

Andrzej Gębura, Lucjan Setlak,  
Tomasz Tokarski, Jerzy Borowski

# LOTNICZE URZĄDZENIA ELEKTRYCZNE

MONOGRAFIA



---

WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH

WARSZAWA 2023

RECENZENCI

*dr hab. inż. Grzegorz Kopecki, prof. PRz*

*dr hab. inż. Roman Pniewski, prof. UTH*

REDAKCJA TECHNICZNA

*mgr inż. Krzysztof Bubrzyk*

ADIUSTACJA I KOREKTA

*mgr Magdalena Malczewska*

*mgr Wioletta Gramek*

OPRACOWANIE GRAFICZNE

*Tomasz Grochowski*

ŁAMANIE TEKSTU

*Tomasz Grochowski*

PROJEKT OKŁADKI

*Piotr Tarasiewicz*

Zdjęcie na okładce: Sławek hecja Krajniewski

Zdjęcia: z archiwum autorów, jeśli nie podpisano inaczej.

© Copyright by Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

ISBN 978-83-61021-59-9

WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH  
01-494 Warszawa 46, ul. Księcia Bolesława 6

---

Drukowano w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych

*Autorzy pracy składają serdeczne podziękowania  
Współpracownikom, w szczególności twórcom rysunków  
i wykonawcom fotografii:  
Stanisławowi Klukowskiemu i Mirkowi Kulisowi  
oraz  
Rodzinom i Przyjaciółom, za okazane wsparcie i cierpliwość*



# SPIS TREŚCI

<b>Przedmowa .....</b>	<b>13</b>
<b>Podstawowe określenia i oznaczenia .....</b>	<b>15</b>
<b>1. WSTĘP.....</b>	<b>25</b>
<b>2. PODSTAWOWE WIADOMOŚCI Z ELEKTROTECHNIKI .....</b>	<b>29</b>
2.1. Typowe napięcia pokładowe .....	29
2.2. Podstawowe elementy elektryczne .....	32
2.2.1. Układy liniowe .....	32
2.2.2. Przyczyny nieliniowości sygnałów elektrycznych .....	38
2.2.3. Wykorzystanie wykresu widma Fouriera do analizy sygnałów elektrycznych.....	40
2.3. Trójkąty oporności oraz wykresy wskazowe prądu przemiennego dla cewki indukcyjnej i kondensatora, podstawowe prawa elektrotechniki .....	42
2.3.1. Opis matematyczny oporności stawianej przez elementy pojemnościowe i indukcyjne bez zastosowania liczb zespolonych .....	42
2.3.2. Opis matematyczny układów elektrycznych czynnych i biernych z zastosowaniem liczb zespolonych .....	48
2.3.3. Opis matematyczny oporności stawianej przez elementy pojemnościowe i indukcyjne z zastosowaniem liczb zespolonych .....	55
2.3.4. Podstawowe prawa elektrotechniki .....	56
2.3.4.1. Obwody prądu stałego .....	56
2.3.4.2. Obwody prądu przemiennego .....	59
2.4. Podstawowe pojęcia wykorzystywane w analizie sygnałów .....	63
<b>3. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA LUE – BUDOWA I WYMAGANIA ....</b>	<b>69</b>
3.1. Budowa i funkcje typowego układu energoelektrycznego .....	69
3.2. Charakterystyka wymagań oraz obowiązujących norm dotyczących układów elektroenergetycznych statków powietrznych.....	74
3.2.1. Podstawowe definicje i wymagania dotyczące LUE.....	74

3.2.2.	Charakterystyka typowych napięć oraz wymagań i norm jakościowych .....	77
3.2.2.1.	Charakterystyki typowych napięć prądu przemiennego o stabilizowanej częstotliwości .....	80
3.2.2.2.	Charakterystyki typowych napięć prądu przemiennego o niestabilizowanej częstotliwości .....	91
3.2.2.3.	Charakterystyki układu zasilania elektrycznego prądu stałego (DC) 28 V.....	94
3.2.3.	Warunki pracy LUE.....	99
3.2.3.1.	Ogólne warunki pracy urządzeń elektrycznych .....	99
3.2.3.2.	Wymagania dotyczące rozmieszczenia elementów sterujących w kabinie .....	101
3.3.	Podsumowanie .....	104
<b>4.</b>	<b>LOTNICZE ŹRÓDŁA ENERGII ELEKTRYCZNEJ .....</b>	<b>107</b>
4.1.	Podział lotniczych źródeł energii elektrycznej .....	107
4.2.	Prądnice prądu stałego .....	108
4.2.1.	Ogólna charakterystyka prądnic prądu stałego.....	108
4.2.1.1.	Komutatorowa prądnica prądu stałego w lotnictwie .....	108
4.2.1.2.	Konstrukcja i działanie komutatorowej prądnicy prądu stałego.....	110
4.2.2.	Kompensacja oddziaływania twornika .....	120
4.2.3.	System elektroenergetyczny prądu stałego.....	132
4.2.4.	Charakterystyki prądnic prądu stałego .....	142
4.2.5.	Dane prądnicy komutatorowej na przykładzie prądnicy komutatorowej prądu stałego GS-12T z samolotu Su-22.....	145
4.2.6.	Chłodzenie prądnic komutatorowych prądu stałego .....	156
4.2.6.1.	Wiadomości ogólne – warunki pracy urządzeń wyposażenia elektrycznego .....	156
4.2.6.2.	Podstawowe systemy układu nadmuchu powietrznego w lotnictwie .....	159
4.2.6.3.	Proces nagrzewania się i schładzania prądnicy.....	162
4.3.	Prądnice prądu przemiennego .....	168
4.3.1.	Wiadomości ogólne dotyczące prądnic prądu przemiennego w lotnictwie – rys historyczny.....	168
4.3.2.	Fizykalne podstawy działania prądnic prądu przemiennego .....	172
4.3.3.	Konstrukcja prądnic prądu przemiennego – wiadomości ogólne ....	175
4.3.4.	Schematy prądnic prądu przemiennego.....	177

4.3.5. Charakterystyki prądnicy prądu przemiennego.....	180
4.4. Napędy prądnic lotniczych .....	185
4.4.1 Napęd prądnicy prądu stałego.....	185
4.4.2. Napęd prądnicy prądu przemiennego.....	188
4.5. Prostowniki .....	196
4.5.1. Ogólna charakterystyka .....	196
4.5.1.1. Rola bloku transformatorowo-prostowniczego w systemie elektroenergetycznym statku powietrznego .....	196
4.5.1.2. Fizyczne podstawy działania prostownika jednopołówkowego i dwupołówkowego.....	197
4.5.1.3. Podstawy działania transformatora .....	205
4.5.1.4. Możliwości kształtowania przesunięć fazowych poprzez zmianę konfiguracji geometrii połączeń pomiędzy uzwojeniami.....	210
4.5.1.5. Rola biernego filtra elektrycznego w strukturze bloku transformatorowo-prostowniczego.....	217
4.5.1.6. Schematy i charakterystyki prostowników.....	224
4.5.1.7. Dane techniczne bloku transformatorowo- -prostowniczego .....	231
4.6. Lotnicze baterie akumulatorowe.....	237
4.6.1. Rys historyczny .....	237
4.6.2. Pojęcia podstawowe i zasada działania lotniczych baterii akumulatorowych .....	240
4.6.3. Podział lotniczych baterii akumulatorowych .....	242
4.6.4. Rola, przeznaczenie baterii akumulatorowych w lotnictwie .....	244
4.6.5. Warunki pracy i przechowywania baterii akumulatorowych w lotnictwie .....	247
4.6.6. Złącza wysokoprądowe pokładowych baterii akumulatorowych .....	252
4.6.7. Charakterystyka akumulatorów kwasowych.....	256
4.6.8. Charakterystyka akumulatorów zasadowych kadmowo-niklowych .....	262
4.6.9. Charakterystyki akumulatorów zasadowych srebrowo-cynkowych.....	263
4.6.10. Charakterystyki akumulatorów litowo-jonowych.....	267
4.7. Praca równoległa źródeł prądu.....	269
4.7.1. Informacje ogólne o pracy równoległej źródeł prądu.....	269

4.7.1.1.	Początki stosowania prądnic i sieci elektrycznej na pokładach statków powietrznych.....	269
4.7.1.2.	Podstawowe struktury pokładowej sieci elektroenergetycznej w powojennym rozwoju lotnictwa .....	273
4.7.1.3.	Praca równoległa prądnicy z akumulatorem .....	279
4.7.1.4.	Praca równoległa prądnic prądu stałego.....	283
4.7.2.	Praca równoległa prądnic prądu przemiennego.....	284
4.8.	Współpraca naziemnego źródła zasilania LZE z pokładową siecią elektroenergetyczną statku powietrznego .....	285
4.8.1.	Podział LZE.....	285
4.8.2.	Podstawowe zasady współpracy LZE z siecią elektroenergetyczną WSP.....	289

## **5. PROBLEMATYKA EKSPLOATACJI POKŁADOWEJ SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ ..... 301**

5.1.	Sieci elektroenergetycznej statku powietrznego .....	301
5.1.1.	Podstawowe rodzaje sieci elektroenergetycznej statku powietrznego .....	301
5.1.2.	Podstawowe parametry jakościowe energii elektrycznej dostarczanej do odbiorników pokładowych .....	303
5.1.2.1.	Związek jakości energii elektrycznej ze stanem struktury metalizacji statku powietrznego.....	303
5.1.2.2.	Podstawowe problemy stanu ustalonego.....	305
5.1.2.3.	Podstawowe problemy stanu przejściowego.....	306
5.1.3.	Droga powrotna prądu elektrycznego – przewodowy minusowe i neutralne .....	308
5.2.	Struktura metalizacji konstrukcji płatowca.....	312
5.2.1.	Przyczyny wprowadzenia metalizacji płatowca statku powietrznego .....	312
5.2.1.1.	Informacje ogólne o metalizacji kadłuba .....	312
5.2.1.2.	Powstawanie wyładowań elektrostatycznych w atmosferze.....	314
5.2.1.3.	Porażenia statków powietrznych piorunem – opis przypadków .....	318
5.2.1.4.	Zabezpieczenie przeciw piorunowe statków powietrznych .....	323



5.2.1.5. Wstępny algorytm oceny odporności metalowego płotowca na uderzenie pioruna .....	326
5.2.2. Metalizacja metalowej struktury statku powietrznego .....	333
5.2.3. Właściwości elastycznych łączników metalizacji .....	339
5.2.4. Uziemienia statku powietrznego .....	341
<b>6. ĆWICZENIA.....</b>	<b>343</b>
6.1. Pytania kontrolne z części opisowej monografii.....	344
6.1.1. Powtórzenie z elektrotechniki .....	344
6.1.2. Ogólna charakterystyka lotniczych urządzeń elektrycznych.....	345
6.1.3. Lotnicze baterie elektryczne.....	346
6.1.4. Lotnicze prądnice prądu stałego .....	347
6.1.5. Lotnicze źródła prądu przemiennego i prostowniki .....	347
6.1.6. Podstawowe wymagania na sieć elektroenergetyczną – obwód powrotny – metalizacja.....	348
6.2. Zadania z podstaw elektrotechniki, matematyki i fizyki.....	349
6.2.1. Obwody prądu stałego .....	349
6.2.1.1. Prawo Ohma dla odcinka oraz dla całego obwodu prądu stałego.....	350
6.2.1.2. Równoległe łączenie oporników .....	351
6.2.1.3. Szeregowe łączenie oporników .....	352
6.2.1.4. Prawa Kirchhoffa dla prądu stałego i ich zastosowanie.....	353
6.2.2. Obwody prądu przemiennego.....	356
6.2.2.1. Krótki wykład o liczbach zespolonych .....	356
6.2.2.2. Prawo Ohma dla odcinka obwodu prądu przemiennego – spadek napięcia na pojedynczej impedancji .....	359
6.2.2.3. Prawo Ohma dla odcinka obwodu prądu przemiennego – spadek napięcia na obwodzie szeregowym impedancji .....	362
6.2.2.4. Prawo Ohma dla całego obwodu prądu przemiennego bez użycia liczb zespolonych .....	368
6.2.2.5. Prawo Ohma dla całego obwodu prądu stałego z zastosowaniem liczb zespolonych.....	369
6.2.2.6. Równoległe łączenie modułów impedancji.....	374
6.2.3. Obwody RLC.....	375
6.2.1.1. Filtr pasywny RC – charakterystyki częstotliwościowe ....	375
6.2.1.2. Filtry rezonansowe RLC .....	380

6.3. Zadania związane z ogólną charakterystyką lotniczych urządzeń elektrycznych .....	392
6.3.1. Ogólna charakterystyka LUE – obwody prądu stałego .....	392
6.3.1.1. Typowe wartości napięć prądu stałego .....	392
6.3.1.2. Przerwy w zasilaniu .....	392
6.3.1.3. Pulsacja napięcia .....	392
6.3.1.4. Szeregowe łączenie źródeł napięcia jako szczególny przypadek prawa Ohma dla całego obwodu .....	395
6.3.2. Ogólna charakterystyka LUE – obwody prądu przemiennego .....	399
6.3.2.1. Wartość napięcia fazowego, przewodowego, wartość skuteczna, szczytowa i międzyszczytowa dla obwodu trójfazowego prądu przemiennego .....	399
6.3.2.2. Prawa Ohma i Kirchhoffa dla obwodu trójfazowego prądu przemiennego .....	400
6.4. Zadania związane z eksploatacją i konstrukcją baterii elektrycznych .....	414
6.4.1. Współdziałanie baterii akumulatorowych z siecią pokładową prądu stałego .....	414
6.4.1.1. Praca baterii akumulatorowej w czasie awarii podstawowego źródła zasilania prądu stałego .....	414
6.4.1.2. Praca baterii akumulatorowej jako wsparcie podstawowego źródła zasilania prądu stałego przy chwilowym wzroście zapotrzebowania prądowego .....	423
6.4.2. Bateria akumulatorowa jako obiekt obsługiwany .....	423
6.4.2.1. Wybrane parametry podstawowych typów baterii akumulatorowych .....	423
6.4.2.2. Kontrolne rozładowanie baterii akumulatorowej .....	427
6.5. Zadania związane z lotniczymi prądnicami prądu stałego .....	432
6.5.1. Podstawowe parametry prądnicy prądu stałego .....	432
6.5.1.1. Obliczanie rozptywu prądów dla bocznikowej prądnicy prądu stałego pod obciążeniem .....	432
6.5.1.2. Obliczanie strumienia magnetycznego stojana maszyny prądu stałego .....	436
6.5.1.3. Obliczanie SEM twornika .....	449
6.6. Zadania związane z lotniczymi prądnicami prądu przemiennego i prostownikami .....	452
6.6.1. Transformatory .....	452
6.6.2. Prostowniki .....	455

6.7. Zadania związane z podstawowymi wymaganiami na sieć elektroenergetyczną.....	457
6.7.1. Obliczanie parametrów użytkowych okablowania statku powietrznego .....	459
6.7.2. Skłonność odbiornika prądu stałego do wyłączania na skutek zbyt dużej oporności obwodu kablowego. Zastosowanie praktyczne szeregu AWG .....	466
<b>7. PODSUMOWANIE .....</b>	<b>477</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>483</b>
<b>SPIS RYSUNKÓW .....</b>	<b>497</b>
<b>SPIS TABEL .....</b>	<b>511</b>



*Nie możemy żyć historią, bo zaczniemy się cofać,  
nie możemy nie poznawać historii, bo będziemy powtarzać stare błędy...*

## **Przedmowa**

Niniejsza monografia przedstawia wybrane zagadnienia dotyczące lotniczych urządzeń elektrycznych (LUE), dostosowane do programu nauczania przedmiotu LUE w Lotniczej Akademii Wojskowej dla cywilnych specjalności awionika. Zdaniem autorów, może być też cennym uzupełnieniem merytorycznym dla studentów o podobnej specjalności innych uczelni technicznych. Monografia ma na celu przygotowanie studentów do samodzielnego opracowania projektów i połączenia wiedzy teoretycznej zdobytej podczas pierwszych lat studiów technicznych z realnymi problemami dotyczącymi lotniczych urządzeń elektrycznych w praktyce eksploatacyjnej, technologicznej i konstrukcyjnej, którą (zdaniem autorów) studenci powinni zdobyć w czasie praktyk. Monografia w pewnym stopniu przeprowadza „edukację” techniczną z LUE od podstaw, jednakże wymaga podbudowy w postaci matematyki wyższej, elektrotechniki i fizyki z pierwszych semestrów studiów technicznych. Jednocześnie opracowanie to ma ambicję uzupełnienia wielopokoleniowej luki (powstającej nie tylko w naszym kraju) wynikającej z wybitnej (zdaniem autorów zbyt głębokiej) specjalizacji tworzonej już na studiach, a pogłębianej w lotniczych zakładach produkcyjnych i remontowych. Brakuje ludzi o wiedzy umożliwiającej scalenie tych specjalności. Ludźmi takimi są teoretycznie pracownicy działów handlowego i marketingu, ale w praktyce brakuje im wiedzy technicznej. Autorzy pragną wyrobić u czytelnika swego rodzaju „wrażliwość” na często złożone problemy związane ze zjawiskami elektroenergetycznymi na pokładach statków powietrznych. Wiele skomplikowanych zjawisk powodujących zagrożenie życia ludzkiego do dzisiaj nie zostało w lotnictwie do końca rozwikłanych i student powinien wiedzieć, że w przyszłym życiu zawodowym będzie się z nimi spotykał. W związku z tym nie powinien w czasie studiów skupiać się tylko na zaliczeniu przedmiotu, ale już teraz powinien poczuć się w pewnym sensie badaczem. W tym celu, aby dokonać swego rodzaju humanizacji monografii, autorzy niekiedy przedstawiają krótkie wzmianki o naukowcach, którzy swoją wytrwałością, uporem, in-

nowacyjnością i wszechstronnością, pokonując często niechęć, a nawet wrogość swojego środowiska, doprowadzili do sformułowania powszechnie dzisiaj znanych i „oczywistych” praw elektrotechniki. Jednocześnie w wielu przypadkach autorzy przedstawiają własne doświadczenia badawcze lub własną interpretację zjawisk.

Życzymy ciekawej lektury.

*Autorzy*

# PODSTAWOWE OKREŚLENIA I OZNACZENIA

## A. PODSTAWOWE DEFINICJE

**Awaryjne źródło energii elektrycznej** – prądnica, przetwornik energii elektrycznej lub bateria akumulatorowa, zapewniające zasilanie odbiorników energii elektrycznej w przypadku awarii głównego źródła energii elektrycznej

**Całkowita zawartość harmoniczych** – współczynniki zawartości harmoniczych, stosunek wartości skutecznej wyższych harmoniczych sygnału do wartości skutecznej napięcia fazowego

**Częstotliwość powtarzania modulacji częstotliwości** – odwrotność okresu periodycznych zmian częstotliwości

**Charakterystyka statyczna** – zależność sygnału wyjściowego w funkcji sygnału wejściowego w stanie ustalonym

**Charakterystyka skokowa układu dynamicznego** – odpowiedź badanego układu po wystąpieniu na jego wejściu sygnału w postaci skoku jednostkowego

**Czas regulacji** – czas, po którym wartość sygnału na wyjściu mieści się w zadanym przedziale tolerancji wokół wartości w stanie ustalonym

**Diamagnetyk** – materia fizyczna (np. miedź) mająca właściwość rozpraszania pola magnetycznego (izolator magnetyczny), tj. mająca wartość względnego współczynnika przenikalności magnetycznej ( $\mu_r$ ) mniejszy od 1

**Dryft częstotliwości** – powolna zmiana poziomu częstotliwości w **stanie ustalonym** o okresie nie mniejszym niż 5 s

**Dwuprzewodowa elektryczna linia zasilania** – jeden z rodzajów elektrycznej linii zasilania, gdzie wszystkie zaciski elektryczne są połączone bezpośrednio kablami elektrycznymi z odpowiednimi zaciskami odbiorników, tj. nie wykorzystuje się kadłuba statku powietrznego jako obwodu powrotnego przepływu prądu

**Dysocjacja** – rozpad cząstek: kwasów, zasad lub soli na jony

**Dławik** – cewka indukcyjna nawinięta na rdzeniu ferromagnetycznym (na rdzeniu wykonanym z ferromagnetyku)

**Działanie układu zasilania** – w zależności od działania źródła energii elektrycznej w stanie ustalonym można wyróżnić:

**normalne działanie układu zasilania elektrycznego** – działanie układu zasilania elektrycznego w stanie ustalonym, w warunkach braku awarii głównego źródła energii elektrycznej i awaryjnego źródła energii elektrycznej

**nienormalne działanie układu zasilania elektrycznego** – działanie układu zasilania elektrycznego w stanie ustalonym, objawiające się obniżeniem parametrów napięcia lub częstotliwości o czasie trwania ograniczonym przez obwody zabezpieczające

**awaryjne działanie układu zasilania elektrycznego** – działanie układu zasilania elektrycznego, w przypadku gdy zostaje wyłączone główne źródło energii elektrycznej i zostaje załączone awaryjne źródło energii elektrycznej

**Elektryczna linia zasilania** – zespół przewodów, aparatura komutacyjna i inne elementy układu rozdziału energii elektrycznej pomiędzy zaciskiem pierwotnego źródła energii elektrycznej albo wtórnego źródła energii elektrycznej a zaciskiem odbiornika energii elektrycznej

**Ferromagnetyk** – materia fizyczna (np. stal elektrotechniczna) mająca właściwość skupiania pola magnetycznego (przewodnik magnetyczny), tj. mająca wartość względnego współczynnika przenikalności magnetycznej ( $\mu_r$ ) znacznie większy od 1

**Główne źródło energii elektrycznej** – prądnica napędzana przez silnik wojskowego statku powietrznego (WSP) albo przetwornik energii elektrycznej, niebędący częścią odbiornika energii elektrycznej

**Harmoniczne obwiedni napięcia modulującego** – składowe amplitudowe rozkładu harmonicznym obwiedni napięcia

**Heurystyka** (gr. *heurisko* – odkrywam, znajduję) – umiejętność i zdolność (zwykle zespołowa) rozwiązywania problemu z wykorzystaniem analogii z różnych dziedzin nauki, w tym metod niekonwencjonalnych

**Impuls napięciowy** – zmiana wartości amplitudy napięcia (wynikająca ze zmiany natężenia prądu pobieranego z układu zasilania elektrycznego i zależna od charakterystyki amplitudowo-czasowej regulatora napięcia) o czasie trwania nie mniejszym niż 1 ms, zachodząca w stanie nieustalonym

**Impuls szpilkowy** – zmiana wartości napięcia (wynikająca z włączenia, wyłączenia lub przełączenia obwodów elektrycznych i zależna od indukcyjności i pojemności sieci elektrycznej) o czasie trwania poniżej 1 ms, o amplitudzie:



dla obwodów prądu stałego ( $U_N = 28 \text{ V}$ ) od 45 V do 600 V, dla obwodów prądu przemiennego ( $U_N = 115 \text{ V}$ ,  $f_N = 400 \text{ Hz}$ ) od 180 V do 600 V, zachodząca w stanie nieustalonym

**Iskiernik** – prosty aparat elektryczny złożony z dwóch elektrod (zwykle o kształcie ostrzowym) rozdzielonych izolatorem (np. powietrzem lub gazem), zapewniający skokowe zwarcie (np. łuk elektryczny) między elektrodami po przekroczeniu pewnego poziomu napięcia (np. 1 kV). W lotnictwie stosuje się iskierniki przeważnie w obudowie ceramicznej, wypełnione gazem obojętnym, do ochrony przeciwprzebiegowej

**Iskrownik** – urządzenie do generowania iskry elektrycznej w układzie zapłonowym. Działa przeważnie na zasadzie skokowego rozrywania obwodu prądowego w obwodzie transformatora. Nazwę iskrownik stosuje się przeważnie dla silników tłokowych, gdzie rozrywanie obwodu musi być zsynchronizowane chwilowym z położeniem tłoka – dla silników turbinowych (pomimo analogicznej konstrukcji) stosuje się pojęcie (bardziej ogólne) układ zapłonowy

**Jednoprzewodowa elektryczna linia zasilania** – jeden z rodzajów **elektrycznej linii zasilania**, gdzie znaczną częścią obwodu przepływu **prądu powrotnego** jest metalowy kadłub płatowca WSP

**Krańcowa płyta odgromowa** – płaskownik z materiału przewodzącego umieszczony na krawędzi spływu niemetalowego (np. kompozytowego) profilu lotniczego: skrzydła lub usterzenia samolotu albo śmigła śmigłowca

**Kupalowa podkładka** – podkładka wykrojona z dwuwarstwowej blachy (zgrzewanej wybuchowo), gdzie jedna z ww. warstw jest wykonana z miedzi (Cu) a druga z aluminium (Al); podkładki takie stosuje się jako element pośredniczący w punktach przyłączenia (miedzianej) końcówki przewodu minusowego do (aluminiowego) elementu płatowca np. podłużnicy

**Lotnicza pokładowa bateria akumulatorowa** – bateria ogniw lotniczej zasadowej baterii akumulatorowej montowana pojedynczo lub grupowo na pokładzie wojskowego statku powietrznego jako: a) awaryjne źródło energii elektrycznej, b) współpracujące z elektryczną siecią pokładową (w normalnych warunkach działania pokładowej sieci elektroenergetycznej), c) rozruchowe źródło energii elektrycznej – do rozruchu silnika pomocniczego lub głównego wojskowego statku powietrznego na ziemi lub w powietrzu

**Moc znamionowa układu zasilania elektrycznego** – suma mocy znamionowych jednego rodzaju wszystkich pierwotnych źródeł energii elektrycznej, wytwarzających energię elektryczną podczas normalnego działania układu zasilania elektrycznego

**Modulacja częstotliwości** – cykliczna lub losowa zmiana częstotliwości podczas działania układu zasilania elektrycznego w warunkach stanu ustalonego

**Napięcie fazowe** – napięcie mierzone między zaciskiem fazowym a zaciskiem neutralnym danego elementu układu zasilania elektrycznego albo odbiornika energii elektrycznej prądu przemiennego

**UWAGA:** Jeśli nie zaznaczono inaczej, na tabliczkach znamionowych urządzeń elektrycznych oraz w niniejszym opracowaniu podaje się wartość skuteczną napięcia fazowego.

**Obwiednia napięcia** – cykliczna lub losowa zmiana wartości szczytowej napięcia prądu przemiennego układu zasilania elektrycznego w stanie ustalonym

**Obwód powrotny** – obwód przepływu prądu powrotnego – w jedнопrzewodowej elektrycznej linii zasilania główną częścią tego obwodu jest metalowy kadłub płatowca WSP; w dwuprzewodowej – oddzielny przewód elektryczny

**Odbiornik energii elektrycznej** – urządzenie, zespół lub grupa urządzeń zasilanych energią elektryczną

**Odczep transformatora lub autotransformatora** – zacisk do połączenia z siecią zewnętrzną na końcówkach lub po środku uzwojenia transformatora/autotransformatora

**Oslona diamagnetyczna** – osłona (najczęściej radaru pokładowego) chroniąca przed oddziaływaniem atmosferycznym i zapewniająca aerodynamiczność kształtu kadłuba przezroczysta dla fal radiowych

**Pierwotne źródło energii elektrycznej** – prądnica napędzana jednym z silników WSP albo turbiną powietrzną, albo bateria akumulatorowa

**Prąd powrotny** – prąd płynący w obwodzie: od zacisku „-” (w przypadku prądu stałego) albo od zacisku neutralnego (w przypadku prądu przemiennego) odbiornika energii elektrycznej, poprzez metalowy kadłub płatowca (tylko w jedнопrzewodowej elektrycznej linii zasilania), do pierwotnego **źródła energii elektrycznej** albo wtórnego **źródła energii elektrycznej**

**Przewód minusowy** – przewód elektryczny oznaczany zwykle literą (M), przyłączony do zacisku „-” odbiornika lub źródła energii elektrycznej prądu stałego

**Przewód zerowy** – przewód elektryczny przyłączony do zacisku „N” odbiornika lub źródła energii elektrycznej prądu przemiennego

**Pulsacja napięcia stałego** – składowa zmienna napięcia wyjściowego prądnicy prądu stałego – cykliczna i/lub losowa zmiana (wahanie) napięcia prądu stałego względem wartości średniej napięcia podczas działania układu zasilania elektrycznego w warunkach stanu ustalonego

**Punkt regulacji napięcia** – miejsce podłączenia obwodów pomiarowych regulatorów napięcia głównego źródła energii elektrycznej

- Równoważna funkcja skokowa** – prostokątne impulsy zastępcze napięcia stałego albo prostokątne impulsy zastępcze obwiedni przebiegu napięcia przemiennego, odzwierciedlające impulsy napięciowe
- Równoważne impulsy zastępcze** – równoważna funkcja skokowa, prostokątne impulsy zastępcze napięcia stałego albo prostokątne impulsy zastępcze obwiedni przebiegu napięcia przemiennego, odzwierciedlające impulsy napięciowe powstające przy skokowej zmianie obciążenia prądnic
- Stabilność układu automatycznej regulacji (UAR)** – właściwość układu polegająca na powrocie do stanu równowagi stałej po ustaniu działania wymuszenia, które wytrąciło układ z tego stanu, lub na osiągnięciu nowego stanu równowagi stałej, jeśli wymuszenie pozostało na stałym poziomie
- Stan nieustalony** – zaburzenie stanu ustalonego. Stany nieustalone dzielą się na dwie grupy: impulsy napięciowe („długotrwałe” o czasie trwania powyżej 1 ms), impulsy szpilkowe („krótkotrwałe” o czasie trwania poniżej 1 ms)
- Stan ustalony** – warunki występujące przy ustalonym obciążeniu oraz stabilnych parametrach zasilania ( $I_{\text{obc}} = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ ), w przypadku normalnego działania układu zasilania elektrycznego
- Sterowanie** – określone, świadome wymuszenie powodujące przejście obiektu sterowania z jednego stanu dynamicznego do drugiego
- Sterowanie automatyczne** – sterowanie realizowane za pomocą odpowiednich układów sterowania
- Transformator** – aparat elektryczny o minimum dwóch uzwojeniach. Jego zadaniem jest zmiana parametrów przesyłanej energii elektrycznej prądu przemiennego z jednego napięcia na inne, o tej samej częstotliwości
- Układ rozdziału energii elektrycznej** – zespół urządzeń przesyłających energię elektryczną z głównego źródła energii elektrycznej i/lub awaryjnego źródła energii elektrycznej do odbiorników energii elektrycznej zawierający urządzenia sterowania i zabezpieczenia
- Układ zasilania elektrycznego** – zespół obejmujący główne źródło energii elektrycznej i awaryjne źródło energii elektrycznej oraz układy rozdziału energii elektrycznej
- Warystor** – półprzewodnikowy zespół elektroniczny o nieliniowej charakterystyce napięciowo-prądowej zależnej od napięcia elektrycznego – dla małych (zbliżonych do poziomu znamionowego danego urządzenia elektrycznego) wykazuje b. wysoką wartość rezystancji a po przekroczeniu wartości progowej (np. 300 V) b. małą, i w funkcji dalszego wzrostu napięcia malejąca. Warystor jest podłączony równolegle do urządzenia elektrycznego i chroni go przed przepięciami (wewnętrzny i zewnętrznymi)

**Wtórne źródło energii elektrycznej** – przetwornik energii elektrycznej będący jednocześnie odbiornikiem energii elektrycznej i głównym źródłem energii elektrycznej, niebędące pierwotnym źródłem energii elektrycznej

## B. PODSTAWOWE OZNACZENIA

- $\alpha$  – kąt przemieszczenia położenia szczotek komutacyjnych względem strefy magnetycznie obojętnej [°]
- $B$  – indukcja pola magnetycznego [T]
- BTP – blok transformatorowo-prostowniczy
- AC – prąd przemienny
- ASSL – (*abnormal steady-state limits*) granice stanu ustalonego w nienormalnych warunkach zasilania
- DC – prąd stały
- $E_p$  – wartość skuteczna siły elektromotorycznej indukowanej w tworniku prądnicy [V]
- $e(t)$  – przebieg zmian wartości chwilowej siły elektromotorycznej indukowanej w tworniku prądnicy [V]
- EPS – (*electric power system*) elektroenergetyczny system zasilania
- ESSL – (*emergency steady-state limits*) granice stanu ustalonego w awaryjnych warunkach zasilania
- $E_f$  – SEM w fazie twornika wytworzona przez główny strumień wzbudzenia (SEM biegu jałowego) [V]
- $F$  – siła mechaniczna niezbędna do wybierania luzu występującego na połączeniu wielowypustu wałka napędowego wirnika prądnicy GS-12T 3s [N]
- $F_{L1}$  – siła elektromagnesu od cewki L1 regulatora napięcia RN180M [N]
- GS-12T 3s – komutatorowa prądnica prądu stałego stosowana na samolocie Su-22
- $H$  – natężenie pola magnetycznego [A/m]
- HVDC – (*high voltage direct current*) system zasilania wysokim napięciem prądu stałego

- $I_{\text{obc}}$  – wartość natężenia prądu obciążenia (zewnętrznego) [A]
- $I_{\text{w}}$  – wartość natężenia prądu w uzwojeniu wzbudzenia [A]
- $I_{\text{ow}}$  – wartość natężenia prądu wzbudzenia w stanie jałowym (bez obciążenia zewnętrznego) prądnicy [A]
- $I_z, I_N$  – wartość znamionowa prądu prądnicy [A]
- $I_f$  – prąd fazowy prądnicy [A]
- $J$  – gęstość prądu [A/mm<sup>2</sup>]
- $L_r$  – indukcyjność uzwojenia wzbudzenia, tj. uzwojenia równoległego [H]
- $L_t$  – indukcyjność twornika prądnicy (uzwojeń wirnika) [H]
- $L_{\text{komp}}$  – indukcyjność uzwojeń kompensacyjnych [H]
- L1 – oznaczenie (symbol na schemacie ideowym) cewki głównej regulatora napięcia RN180M
- L2 – oznaczenie (symbol na schemacie ideowym) cewki pomocniczej obwodu kompensacji temperaturowej regulatora napięcia RN180M
- $L_d$  – indukcyjność uzwojeń biegunów dodatkowych (tzw. biegunów komutacyjnych) [H]
- $l_k$  – długość odcinka obwodu magnetycznego [mm]
- LUE – lotnicze urządzenia elektryczne
- LZZ – lotniskowe złącze zasilania na pokładzie WSP (gniazdo) przeznaczone do przyłączania końcówki zasilania elektrycznego z LZE (wtyczka kablowa)
- LZE – lotniskowe zasilanie elektroenergetyczne
- MG – masa główna wojskowego statku powietrznego
- MEA/ AEA – (*the concept of more / all electric aircraft*) koncepcja samolotu bardziej/w pełni elektrycznego
- $n$  – prędkość obrotowa wirnika prądnicy [obr/min]
- $n_N$  – prędkość znamionowa silnika statku powietrznego [obr/min]
- NSSL – (*normal steady-state limits*) granice stanu ustalonego w normalnych warunkach zasilania
- NSP – napęd stałej prędkości

- $P$  – moc czynna [W]
- $P_{\text{wir}}$  – moc czynna wydzielana w wirniku (tworniku) prądnicy [W]
- $P_{\text{st}}$  – moc czynna wydzielana w stojanie prądnicy [W]
- PES – (*power electronic system*) energoelektroniczny system zasilania
- $Q$  – dobroć układu [-]
- $Q_T$  – energia cieplna [J]
- $Q_0$  – początkowa ilość elektryczności w baterii (początkowy stan naładowania) [Ah]
- $Q_t$  – ilość elektryczności pozostałej w baterii po czasie  $t$  [Ah]
- $R_\mu$  – oporność obwodu magnetycznego [1/H]
- $R_{\text{sl}}$  – rezystancja słupka węglowego (w regulatorze napięcia) [ $\Omega$ ]
- $R_{\text{rw}}$  – rezystancja obwodu wzbudzenia (rezystancja uzwojenia wzbudzenia prądnicy oraz rezystancja kabli w obwodzie wzbudzenia) [ $\Omega$ ]
- $R_{\text{to}}$  – rezystancja twornika prądnicy (uzwojeń wirnika) [ $\Omega$ ]
- $R_d$  – rezystancja uzwojeń biegunów dodatkowych (tzw. biegunów komutacyjnych) [ $\Omega$ ]
- $R_{\text{komp}}$  – rezystancja uzwojeń kompensacyjnych [ $\Omega$ ]
- $R_b$  – rezystancja bocznika prądowego [ $\Omega$ ]
- $R_p$  – rezystancja obwodu minusowego prądnicy (przewodu łączącego bocznik prądnicy z masą statku powietrznego oraz przewodu łączącego zacisk minusowy prądnicy z bocznikiem prądowym) [ $\Omega$ ]
- SEM – siła elektromotoryczna [V]
- $S$  – pole powierzchni impulsu napięcia [ $V \cdot ms$ ]
- $S_{iz}$  – pole powierzchni impulsu zastępczego napięcia [ $V \cdot ms$ ]
- $S_k$  – pole przekroju poprzecznego obwodu magnetycznego [ $mm^2$ ]
- $T$  – temperatura elementu lub podzespołu [K]
- $T_1(t)$  – przebieg zmian temperatury wirnika prądnicy [K]
- $T_3(t)$  – przebieg zmian temperatury kanału powietrznego pomiędzy wirnikiem i stojanem prądnicy [K]

- $T_4(t)$  – przebieg zmian temperatury kanału powietrznego w wale drążonym [K]
- $THD$  – (*total harmonic distortion*) współczynnik zawartości harmoniczych
- $\Theta$  – siła magnetomotoryczna, zwana także przepływem – arytmetycznie równa jest iloczynowi liczby zwojów  $z$  [-] i natężeniu prądu  $I$  [A] przez te zwoje przepływającego [A]
- $\varphi$  – kąt zawarty między  $I_f$  i  $E_f$  przy oddziaływaniu twornika w prądnicy synchronicznej [°]
- $t$  – czas [s]
- $t_z$  – czas zredukowany impulsu zastępczego [s]
- $\tau_t$  – stała czasowa cieplna wirnika prądnicy [s]
- $U$  – wartość (skuteczna) napięcia
- $U_{min}$  – minimalna wartość napięcia [V]
- $U_n$  – znamionowa wartość napięcia [V]
- $U_o$  – wartość składowej prądu stałego napięcia w przebiegu prądu przemiennego [V]
- $\Phi$  – strumień pola magnetycznego (postać ogólna) [ $V \cdot s$ ]
- $\Phi_w$  – strumień pola magnetycznego wzbudzenia (stojana) prądnicy, tj. wytwarzany przez uzwojenia wzbudzenia prądnicy [ $V \cdot s$ ]
- $\Phi_q$  – strumień magnetyczny poprzeczny (do kierunku linii sił pola magnetycznego stojana) – składowa czynna pola magnetycznego reakcji twornika [ $V \cdot s$ ]
- $\Phi_d$  – strumień magnetyczny podłużny (do kierunku linii sił pola magnetycznego stojana) – składowa bierna pola magnetycznego reakcji twornika
- $\Phi_{kom}$  – strumień magnetyczny wytwarzany przez uzwojenie kompensacyjne prądnicy
- $\Phi_z$  – strumień pola magnetycznego od zezwoju zwartego przez szczotkę komutacyjną prądnicy [ $V \cdot s$ ]
- $\omega$  – prędkość kątowna wirnika prądnicy [rad/s]
- $\mu$  – współczynnik przenikalności magnetycznej względnej materiału [-]
- WSP – wojskowy statek powietrzny
- $z$  – liczba zwojów





# 1

## WSTĘP

Współczesne lotnictwo zarówno cywilne, jak i wojskowe charakteryzuje się dużym i ciągle wzrastającym zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Wzrost ruchu lotniczego oraz zadań lotnictwa wojskowego, zapotrzebowanie na optymalizację wydajności i potrzeba obniżenia kosztów eksploatacyjnych skłoniły przemysł lotniczy do rozwiązań, które w znacznie większym zakresie będą wykorzystywać energię elektryczną na pokładzie statku powietrznego.

Powstała koncepcja samolotu częściowo/w pełni elektrycznego MEA/AEA (*more/all electric aircraft*) [29, 88, 118, 125, 183, 184]. W wyniku tego trendu moc elektryczna wymagana na pokładzie statku powietrznego znacznie wzrosła, powodując poważne zmiany w architekturze elektroenergetycznych systemów zasilania. Nastąpił rozwój zaawansowanych samolotowych systemów elektrycznych AAES (*advanced aircraft electrical system*), które charakteryzują się innowacyjnymi rozwiązaniami technologicznymi architektury energoelektronicznego systemu zasilania PES (*power electronics system*) oraz elektroenergetycznego systemu zasilania EPS (*electric power system*) wraz z zasilaniem wysokonapięciowym prądu stałego HVDC (*high-voltage direct current*) [29, 88, 102, 118, 182–184].

W lotnictwie wojskowym RP, m.in. na statkach powietrznych: Su-22 [43, 47, 112, 122, 133, 134, 166–168, 193–197, 219–224, 240–242], MiG-29 [65–67], PZL 130 TC II Orlik [51, 68, 69], W-3WA [163], SW 4 [164], M-28B/PT Skytruck [174–178], CASA-C295M [33], Mi-8 [209], Mi 2 [214], nadal wykorzystuje się jako źródło energii elektrycznej komutatorowe prądnice prądu stałego.

Ponadto wykorzystywana jest cała grupa silników komutatorowych prądu stałego, np. do rozruchu bezpośredniego głównego silnika turbinowego, jak np. ST-107 w W-3WA Sokół lub do rozruchów turborozruszników, np.:

- NSN-2925-01-221-3247 w turborozruszniku samolotu Herkules;
- STG-3 w turborozrusznikach AI-9 i AI-9M śmigłowców Mi-17, Mi-14 i Mi-24;
- LUN2251.01 w turborozruszniku SAFIR5K/G78 oraz SAFIR5K/M1.

Zaletami układu wykorzystującego komutatorowe prądnice prądu stałego są m.in.: łatwa współpraca z pokładową baterią akumulatorową, a także możliwość współpracy buforowej, czyli pobieranie energii z baterii akumulatorowej podczas przeciążenia prądnicy oraz łatwa współpraca równoległa prądnic, ponieważ nie trzeba synchronizować częstotliwości ani fazy [14, 15, 37, 44, 55, 116]. Komutatorowa maszyna prądu stałego jest maszyną odwracalną, tzn. może pracować jako prądnica, a następnie może być użyta jako rozrusznik.

Ponadto do zalet tego układu należą: prosty układ regulacji napięcia kontrolujący tylko amplitudę napięcia wyjściowego prądnicy, brak efektu pojemnościowego podczas pracy w warunkach ustalonego (stałego) obciążenia, tj. efektów zwiększania napięcia na końcu kabla przy obciążeniu o charakterze pojemnościowym [37, 64].

W prądnicach komutatorowych prądu stałego konieczność przemieszczenia położenia szczotek do strefy magnetycznie obojętnej (neutralnej) jest znana i opisana w literaturze dotyczącej urządzeń naziemnych [13, 14, 112, 116, 133, 193, 221–226]. Wiadomo, że linia strefy magnetycznie obojętnej maszyny prądu stałego wraz ze wzrostem natężenia prądu w obwodzie przemieszcza się na skutek reakcji twornika (powstawania pola magnetycznego poprzecznego do kierunku linii pola magnetycznego stojana) w stosunku do geometrycznej płaszczyzny pomiędzy nabiegunkami stojana – w prądnicie zgodnie z kierunkiem obrotów wirnika, zaś w silnikach przeciwnie [15, 217, 218, 221, 225].

Obwód magnetyczny stojana uzyskuje lokalne nasycenie, w wyniku czego prądnica staje się mniej wydajna – efektem zewnętrznym jest zmniejszenie poziomu napięcia wyjściowego dla układów bez regulatora napięcia lub zwiększenie prądu wzbudzenia dla układów z automatycznym regulatorem napięcia. W czasach istnienia lokalnych elektrowni prądu stałego przy wzroście obciążenia prądowego przemieszczano szczotkotrzymacze (uchwyty szczotkowe) o pewien kąt w kierunku wirowania napędu prądnicy, aby utrzymać wymagany poziom napięcia na wyjściu prądnicy. Dodatkowo, aby zautomatyzować proces kompensacji tego zjawiska w maszynach prądu stałego, montuje się uzwojenie komutatorowe i uzwojenia kompensacyjne wytwarzające pole magnetyczne o przeciwnym zwrocie niż strumień reakcji twornika. Jednakże należy podkreślić, że w czasie długotrwałej eksploatacji pomimo istnienia tych uzwojeń oraz automatycznego regulatora napięcia sprawność prądnicy spada.

W literaturze nie omawia się wpływu procesu starzeniowego na zmniejszenie skuteczności oddziaływania tych uzwojeń – badania takie przeprowadził jeden z autorów niniejszego opracowania. Z uwagi na procesy starzeniowe w obwodach elektrycznych i magnetycznych skuteczność tej automatycznej kompensacji maleje – stąd konieczne jest dodatkowe korygowanie położenia szczotek względem stojana.

W konstrukcjach lotniczych w praktyce eksploatacyjnej rzadko kiedy reguluje się kąt położenia szczotek względem strefy magnetycznie obojętnej [13, 14, 21, 24, 26, 30, 36, 37, 44, 48, 73, 74, 92, 93, 101, 228, 242] z uwagi na niedocenicenie znaczenia wpływu reakcji twornika (powstawania silnego pola poprzecznego w tworniku przy zwiększaniu natężenia prądu obciążenia) m.in. na:

- sprawność energetyczną prądnicy, zwłaszcza w warunkach dynamicznych zmian poziomu jej obciążenia, destrukcji jej komutatora,
- proces przeciążenia cieplnego prądnicy,
- przeciążenia prądowe uzwojenia wzbudzenia,
- szybkość układu automatycznej regulacji napięcia przez nią zasilanego.

Ponadto eksploatacyjni nadmierną wiarę pokładają w roli uzwojenia komutatorowego oraz kompensacyjnego w neutralizacji skutków oddziaływania pola poprzecznego – mimo że, jak się okazuje, w miarę upływu czasu eksploatacji ich skuteczność słabnie [228]. Tendencja odchodzenia od stosowania w nowych konstrukcjach lotniczych komutatorowych prądnic prądu stałego na korzyść trójfazowych prądnic prądu przemiennego dodatkowo spowodowała spadek liczby opracowań literaturowych na temat regulacji stref magnetycznie obojętnych.

Wraz z rozwojem skomplikowanych coraz szybszych układów regulacji napięcia komutatorowych prądnic prądu stałego (opartych na układach elektromechanicznych, a następnie elektronicznych), powstało mylne przekonanie, że dobry układ regulacji napięcia (tzn. o stałej czasowej mniejszej niż stała czasowa prądnicy) jest w stanie dowolnie ukształtować charakterystykę sieci elektroenergetycznej statku powietrznego nawet przy przemieszczeniu się stref magnetycznie obojętnych na skutek zjawisk starzeniowych.

Z formalnego punktu widzenia tak jest (w większości przypadków eksploatacyjnych obserwowanych na pokładach statków powietrznych), lecz wiąże się to m.in. ze wzrostem temperatury obwodów wzbudzenia prądnic (często widoczne w postaci przegrzania izolacji kabli zewnętrznego obwodu wzbudzenia), pozanormalnymi czasami ustabilizowania się napięcia po zmianach poziomu obciążenia, i ogólnie ze wzrostem kosztów eksploatacji wynikających z przedwczesnego remontu [3, 111, 112, 166, 167, 197, 228].

Specyfiką techniki lotniczej jest odpowiednie kształtowanie konstrukcyjne i technologiczne wykorzystywanych w lotnictwie części, zespołów i urządzeń, racjonalne ich użytkowanie, obsługiwane i przechowywanie, co w zasadniczy sposób spowalnia procesy starzenia i poprawia wskaźniki ekonomiczne eksploatacji. Wymagany poziom niezawodności bezpieczeństwa współczesnego statku powietrznego nie może zostać osiągnięty bez realizacji prac obsługowych, pomi-

mo zapewnienia już na etapie konstruowania i produkcji spełnienia najwyższych standardów.

W celu wyznaczenia optymalnego modelu eksploatacji konieczne jest prawidłowe rozpoznanie procesów i zjawisk charakterystycznych dla eksploatacji techniki lotniczej, ich zbadanie eksperymentalne zarówno w laboratorium, jak i na pokładzie statku powietrznego oraz opisanie z wykorzystaniem odpowiedniego aparatu matematycznego, a następnie wypracowanie środków zaradczych [165, 217–220, 224, 226, 228].

# 2

## PODSTAWOWE WIADOMOŚCI Z ELEKTROTECHNIKI

### 2.1. Typowe napięcia pokładowe

Napięcie elektryczne to różnica potencjałów elektrycznych pomiędzy dwoma punktami obwodu elektrycznego. Symbolem napięcia jest  $U$ . Napięcie między dwoma punktami przewodnika jest równe stosunkowi pracy wykonywanej podczas przenoszenia ładunku między tymi punktami przewodnika do tego ładunku. Jednostką napięcia w układzie SI jest volt [V]. Napięcie elektryczne powoduje przepływ prądu elektrycznego wywołany przez różnicę potencjałów (napięcie) podłączonego do zamkniętego obwodu elektrycznego źródła zasilania.

Przepływ prądu elektrycznego zależy od intensywności przemieszczania się ładunków elektrycznych, czyli od natężenia prądu elektrycznego ( $I$ ). Jest to wielkość fizyczna charakteryzująca przepływ prądu elektrycznego zdefiniowanego jako stosunek wartości ładunku elektrycznego przepływającego przez wyznaczoną powierzchnię do czasu przepływu ładunku. Jednostką natężenia prądu elektrycznego w układzie SI jest amper [A], odpowiadający przepływowi ładunku 1 kulomba w ciągu 1 sekundy. Wyróżnia się dwa rodzaje prądu: stały i przemienny.

Prąd stały DC (*direct current*) charakteryzuje się tym, że płynie zawsze w tym samym kierunku i nie zmienia się jego biegunowość, zaś prąd przemienny AC (*alternating current*) porusza się naprzemiennie w jednym lub drugim kierunku, a wartość jego natężenia zmienia się w czasie w zależności od częstotliwości. W lotnictwie stosuje się następujące rodzaje napięć [129, 141, 182–184]:

#### 1. Napięcie prądu stałego DC:

- 1.1. Pozyskiwane z baterii akumulatorowych o znamionowej wartości napięcia 24 V.

- 1.2. Pozyskiwane z komutatorowych prądnic pokładowych o znamionowej wartości napięcia 28,5 V.
- 1.3. Pozyskiwane z bloków prostowniczych transformujących napięcie 3x208/115 V, 400 Hz i prostujące je (prostownik 12-pulsowy) na napięcie 28 V prądu stałego.
- 1.4. Pozyskiwanego poprzez 12-pulsowe prostowniki z bezstykowych trójfazowych prądnic prądu przemiennego o znamionowej wartości napięcia 270/540 VDC (upowszechnione po 2000 r. głównie na dużych rozmiarowo samolotach w celu zmniejszenia masy sieci kablowej).

## 2. Napięcie prądu przemiennego AC o quasi-sinusoidalnym kształcie przebiegu i częstotliwości 400 Hz

- 2.1. Pozyskiwane z pokładowych prądnic lotniczych (przetwarzających energię mechaniczną silnika głównego statku powietrznego na energię elektryczną) o quasi-sinusoidalnym kształcie przebiegu i częstotliwości stabilizowanej  $f_N = 400$  Hz.
- 2.2. Pozyskiwane z przetwornic lotniczych (przetwarzających energię elektryczną prądu stałego na energię elektryczną prądu przemiennego – przetwornice elektromaszynowe albo elektroniczne).

Najważniejsze parametry prądu przemiennego AC o quasi-sinusoidalnym kształcie [120, 129, 141]:

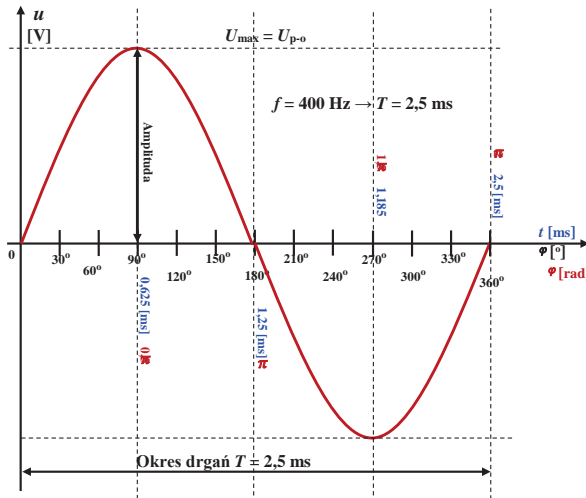
- 1) Wartość amplitudy napięcia oznaczana jako  $U_{\max}$  albo wartość napięcia wyrażana w woltach [V] – jeżeli w instrukcji lub na tabliczce znamionowej podana jest wartość napięcia w [V] to oznacza to **wartość skuteczną** napięcia, np. napięcia wyjściowego prądnicy albo napięcia zasilania dla odbiornika energii elektrycznej – określanej jako równa stałemu napięciu przyłożonemu do danego odbiornika energii elektrycznej, powodującemu wydzielanie się na tym odbiorniku energii elektrycznej takiej samej energii (energia  $E = U \cdot I \cdot t$ ), jak przy napięciu przemiennym; wartość skuteczną oznacza się łacińską literą  $U$  niekiedy (głównie w podręcznikach lub rozważaniach naukowych) z indeksem dolnym  $U_{\text{sk}}$ . Dla przebiegu sinusoidalnego  $U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707U_{\max}$  (rys. 2.1).
- 2) Wartość szczytowa napięcia przemiennego  $U_{p-o}$  (rys. 2.1).
- 3) Okres drgań, tj. czas wykonania jednego pełnego drgania w ruchu drgającym, czyli czas pomiędzy wystąpieniami tej samej fazy ruchu drgającego (rys. 2.2).
- 4) Częstotliwość, tj. (wielkość fizykalna) – właściwość fizyczna ciała lub zjawiska, którą można (przynajmniej teoretycznie) określić ilościowo, czyli

zmierzyć. Arytmetycznie częstotliwość jest to odwrotność okresu drgań i jest wyrażana w hercach [Hz].

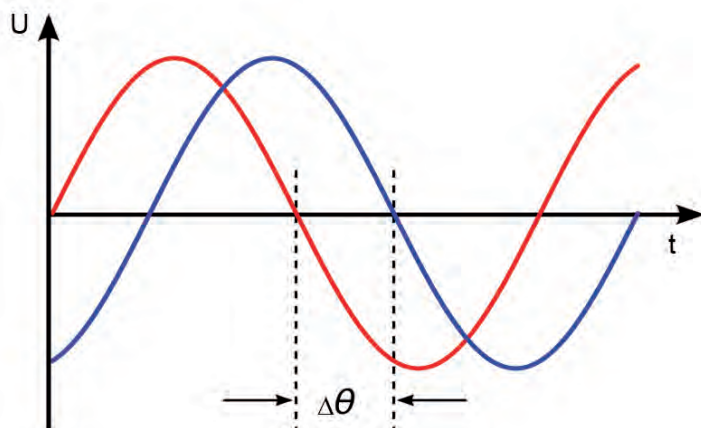
- 5) Przesunięcie fazowe – kąt pomiędzy początkiem rozpatrywanego przebiegu a punktem odniesienia. Przesunięcie fazowe jest różnicą między wartościami fazy dwóch okresowych ruchów drgających (np. fali lub dowolnego innego okresowego przebiegu czasowego) – rys. 2.2. W prądnicach trójfazowych przesunięcie sygnałów (pomiędzy przebiegami napięcia z każdej z faz) powinno wynosić  $120^\circ$ , tj.  $\frac{2\pi}{3}$  [rad] z dopuszczalną tolerancją  $\pm 4^\circ$ .
- 6) Wartość składowej stałej  $U_o$  – dla komutatorowej prądnicy prądu stałego (DC) była to wartość podstawowa użyteczna energetycznie (zaś składowa przemienna AC była pasożytnicza); dla prądnic prądu stałego odwrotnie – składowa stała jest wielkością pasożytniczą – według pokładowych norm lotniczych jest wymagane, aby  $U_o \leq 0,1$  V, co zważywszy na fakt, że wartość skuteczna (pojedynczej fazy) wynosi 115 V, jest bardzo ostrym wymaganiem.
- 7) Współczynnik szczytu (niekiedy zwany współczynnikiem amplitudy) oznaczany zwykle jako  $k_a$  – iloraz wartości szczytowej do wartości skutecznej:

$$k_a = \frac{U_{p-o}}{U_{sk}} \quad (2.1)$$

- dla przebiegu sinusoidalnego  $k_a = 1,41$ , tj.;
- dla przebiegu trójkątnego  $k_a = 1,73$ , tj.;
- dla przebiegu prostokątnego  $k_a = 1$ .



Rys. 2.1. Pojedynczy przebieg napięcia przemiennego sinusoidalnego (rysunek poglądowy)



Rys. 2.2. Dwa przebiegi napięcia przemiennego (rysunek poglądowy)

## 2.2. Podstawowe komponenty obwodów elektrycznych

### 2.2.1. Układy liniowe

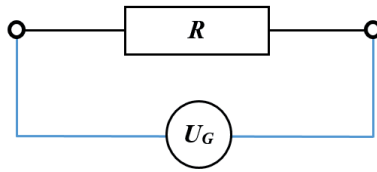
Układ liniowy to jest układ, którego charakterystyka statyczna wejście-wyjście jest linią prostą w całym rozpatrywanym zakresie sygnału wejściowego.

W elektrotechnice występują trzy podstawowe elementy elektryczne o różnych charakterystykach częstotliwościowych i liniowych zależnościach pomiędzy natężeniem prądu a wartością przyłożonego na ich wejście napięcia:

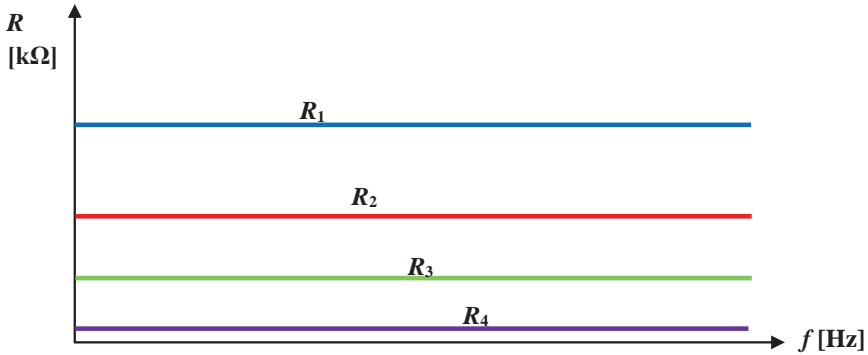
**Rezystory** – przedstawiane jak na rys. 2.3 i reprezentujące tzw. rezystancję czynną. Jej charakterystyka częstotliwościowa (idealnego rezystora) jest niezależna od częstotliwości (rys. 2.4) i przyjmuje kształt linii poziomej (równoległej do osi odciętych). Charakterystyka napięciowo-prądowa przyjmuje kształt linii prostej – stąd klasyfikacje elementu rezystancyjnego do grupy elementów liniowych – nachylonej pod kątem do osi odciętych. Tangens tego kąta nachylenia jest równy wartości rezystancji (rys. 2.5):

$$R = \frac{U}{I} = \operatorname{tg} \alpha \quad (2.2)$$

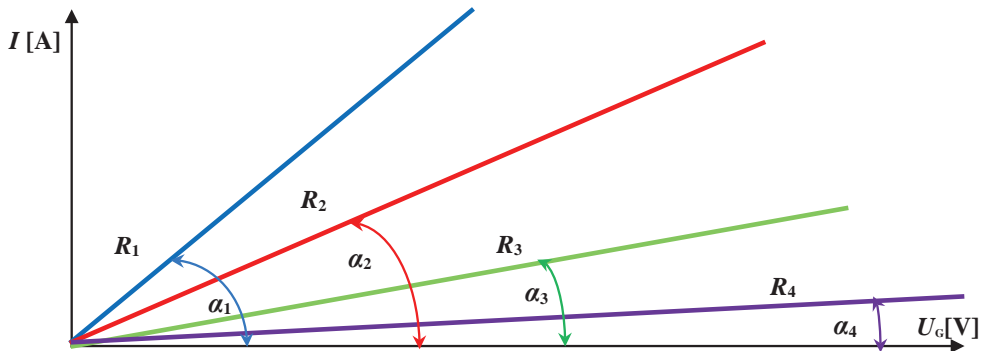




**Rys. 2.3.** Rezystor w układzie prądu przemiennego, gdzie:  $U_G$  – napięcie prądnicy prądu przemiennego,  $R$  – rezystancja czynna



**Rys. 2.4.** Charakterystyka częstotliwościowa rezystora, gdzie:  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – wartości rezystancji czynnych,  $R_1 > R_2 > R_3 > R_4$ ,  $f$  – częstotliwość napięcia wyjściowego prądnicy,  $I$  – wartość prądu przemiennego w obwodzie



**Rys. 2.5.** Charakterystyka prądowo-napięciowa rezystora, gdzie:  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – wartości rezystancji czynnych,  $R_1 > R_2 > R_3 > R_4$ ;  $U_G$  – napięcie wyjściowe prądnicy prądu przemiennego,  $f$  – częstotliwość napięcia wyjściowego prądnicy,  $I$  – wartość prądu przemiennego w obwodzie

**Cewki indukcyjne** – przedstawiane jak na rys. 2.6 i reprezentujące tzw. reaktancję bierną. Zgodnie z literaturą wartość indukcyjności wyraża się wzorem:

$$L = \frac{z^2}{R_\mu} \quad (2.3)$$

gdzie:  $z$  – liczba uzwojeń cewki indukcyjnej,  $R_\mu$  – oporność magnetyczna obwodu magnetycznego.

Oporność magnetyczna obwodu magnetycznego z kolei wyraża się wzorem:

$$R_\mu = \mu \cdot \frac{l}{S} \quad (2.4)$$

gdzie:  $\mu$  – przenikalność magnetyczna materiału rdzenia,  $l$  – długość (sumaryczna) obwodu magnetycznego cewki indukcyjnej,  $S$  – pole przekroju poprzecznego rdzenia obwodu magnetycznego cewki indukcyjnej.

Przenikalność magnetyczna rdzenia wyraża się iloczynem:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o \quad (2.5)$$

gdzie:  $\mu_o$  – przenikalność magnetyczna próżni,  $\mu_r$  – przenikalność magnetyczna względna materiału rdzenia w stosunku do próżni – dla stali transformatorowej wynosi ona ok.  $\mu_r \approx 1000$ , dla powietrza  $\mu_r = 1$ , dla miedzi  $\mu_r \approx 0,8$ .

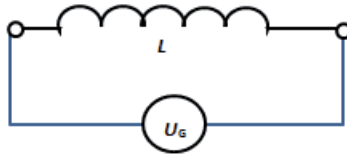
Charakterystyka idealnej cewki indukcyjnej jest zależna od częstotliwości (rys. 2.7) i wyraża się wzorem:

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.6)$$

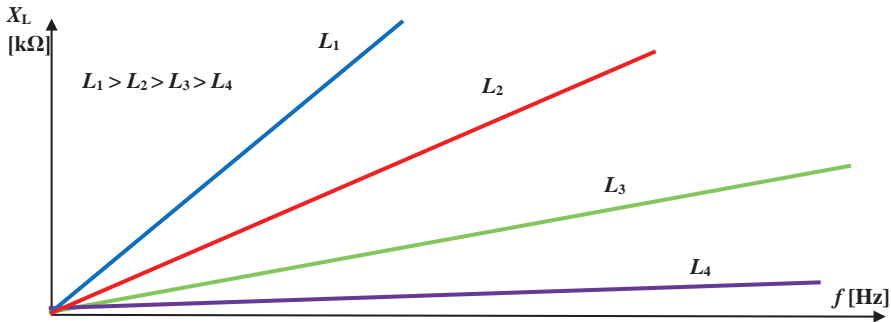
Zależność reaktancji biernej od częstotliwości przyjmuje kształt linii prostej – stąd klasyfikacje cewek indukcyjnych do grupy elementów liniowych – nachylonej pod kątem do osi odciętych. Tangens tego kąta nachylenia jest równy wartości oporności (reaktancji) biernej – rys. 2.8. Można tu zauważyć, że im większa jest wartość indukcyjności, tym większa jest wartość reaktancji biernej cewki.

Charakterystyka napięciowo-prądowa przyjmuje kształt linii prostej – stąd klasyfikację cewek indukcyjnych do grupy elementów liniowych – nachylonej pod kątem do osi odciętych (rys. 2.8). Tangens tego kąta nachylenia jest równy wartości reaktancji biernej:

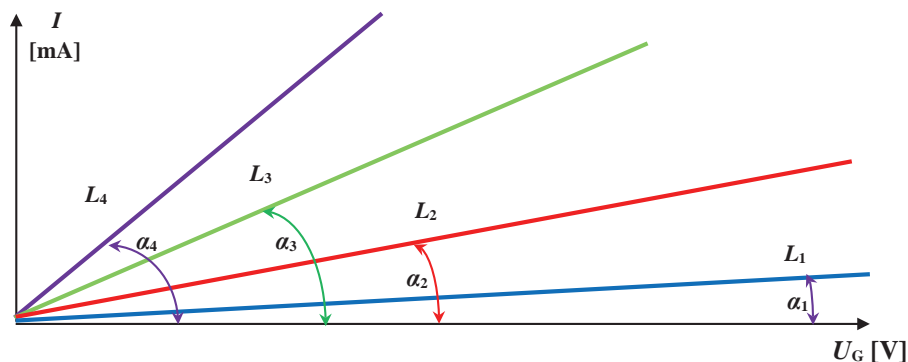
$$X_L = \frac{U}{I} = \operatorname{tg} \alpha \quad (2.7)$$



**Rys. 2.6.** Cewka indukcyjna w układzie prądu przemiennego, gdzie:  $U_G$  – napięcie prądu przemiennego,  $R_C$  – rezystancja czynna (składowa czynna) kondensatora,  $C$  – pojemność kondensatora



**Rys. 2.7.** Charakterystyka częstotliwościowa oporności biernej cewki indukcyjnej, gdzie:  $L_1, L_2, L_3, L_4$  – wartości indukcyjności,  $L_1 > L_2 > L_3 > L_4$ ,  $f$  – częstotliwość napięcia wyjściowego prądu,  $I$  – wartość prądu przemiennego w obwodzie



**Rys. 2.8.** Charakterystyki prądowo-napięciowe: elektrycznej cewki indukcyjnej powietrznej (bezdzeniowej), gdzie:  $L_1, L_2, L_3, L_4$  – wartości rezystancji czynnych,  $L_1 > L_2 > L_3 > L_4$ ,  $U_G$  – napięcie wyjściowe prądnicy prądu przemiennego,  $f$  – częstotliwość napięcia wyjściowego prądnicy,  $I$  – wartość prądu przemiennego w obwodzie

**Kondensatory** – przedstawiane na schematach w postaci symbolicznych okładek (rys. 2.9, element  $C$ ) i reprezentujące tzw. reaktancję bierną.

Zgodnie z literaturą wartość pojemności elektrycznej kondensatora płaskiego wyraża się wzorem:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (2.8)$$

gdzie:  $\varepsilon$  – przenikalność elektryczna dielektryka oddzielającego od siebie okładziny kondensatora,  $S$  – powierzchnia okładziny kondensatora,  $d$  – grubość dielektryka oddzielającego od siebie okładziny kondensatora.

Przenikalność elektryczna  $\varepsilon$  wyraża się wzorem:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (2.9)$$

gdzie:  $\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni,  $\varepsilon_r$  – przenikalność elektryczna względna dielektryka.

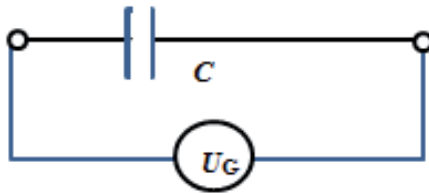
Oporność bierna (idealnego kondensatora) jest zależna od częstotliwości (rys. 2.10) i wyraża się wzorem:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.10)$$

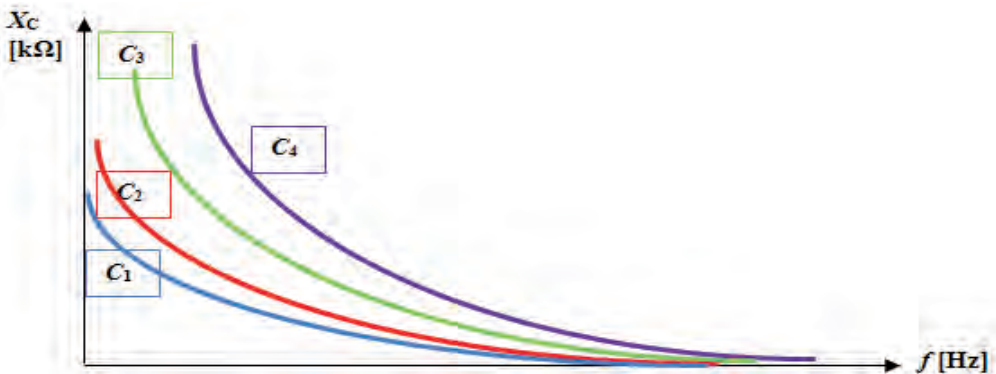
Zależność reaktancji biernej od częstotliwości przyjmuje więc kształt krzywej hiperbolicznej (rys. 2.10). Można tu zauważyć, że im większa jest wartość pojemności, tym mniejsza jest wartość reaktancji biernej kondensatora. Jednocześnie im większa jest wartość pojemności, tym bardziej płaska jest jej charakterystyka.

Charakterystyka napięciowo-prądowa przyjmuje kształt linii prostej (rys. 2.11) – stąd klasyfikacje kondensatorów do grupy elementów liniowych. Linie te są nachylone do osi odciętych (0-x) pod kątem  $\alpha$ . Tangens tego kąta nachylenia (rys. 2.11, szczegóły:  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ) jest równy wartości oporności biernej:

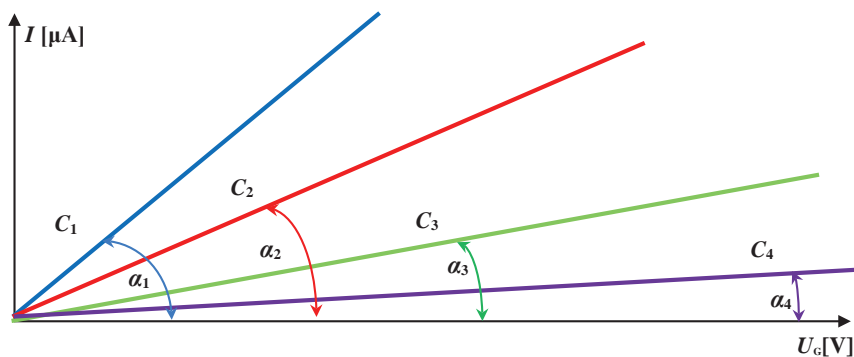
$$X_c = \frac{U}{I} = \operatorname{tg} \alpha \quad (2.11)$$



**Rys. 2.9.** Kondensator w układzie prądu przemiennego, gdzie:  $U_G$  – napięcie prądu przemiennego,  $C$  – pojemność kondensatora



**Rys. 2.10.** Charakterystyka częstotliwościowa kondensatora, gdzie:  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – wartości rezystancji czynnych,  $C_1 > C_2 > C_3 > C_4$ ,  $f$  – częstotliwość napięcia wyjściowego prądu,  $I$  – wartość prądu przemiennego w obwodzie

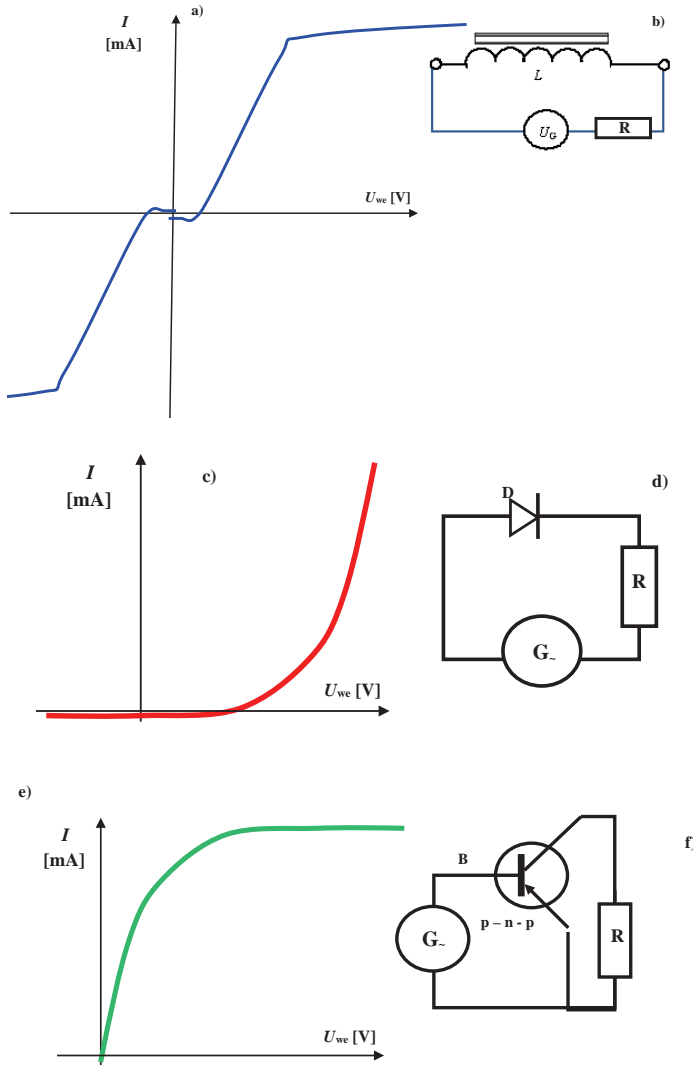


**Rys. 2.11.** Charakterystyka prądowo-napięciowa kondensatora przy stałej częstotliwości prądu, gdzie:  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – wartości rezystancji czynnych,  $C_1 > C_2 > C_3 > C_4$ ,  $U_G$  – napięcie wyjściowe prądu przemiennego,  $f$  – częstotliwość napięcia wyjściowego prądu,  $I$  – wartość prądu przemiennego w obwodzie

### 2.2.2. Przyczyny nieliniowości sygnałów elektrycznych

Przebiegi sygnałów często nie mają dokładnie przebiegów sinusoidalnych – w praktyce, na zaciskach odbiorników energii elektrycznej na pokładzie statku powietrznego, często odbiegają od kształtu sinusoidy. Również podczas sprawdzania poprawności funkcjonowania poszczególnych bloków odbiorników energii elektrycznej, gdy podajemy na ich wejście „idealny” sygnał sinusoidalny, to na wyjściu badanego bloku często otrzymujemy przebieg elektryczny lub przebieg innego parametru (np. kąta wychylenia statecznika wysokości samolotu, prędkości obrotowej silnika wykonawczego, przemieszczenia członu siłownika hydraulicznego) w funkcji czasu, często znacznie odkształcony od kształtu sinusoidy. Przyczyny tkwią w strukturze obiektu regulacji, a także w strukturze układu regulatora automatycznej regulacji. Mogą to być:

- lokalne nasycenia obwodu magnetycznego prądu tachometrycznej transformatora lub innego urządzenia z obwodem magnetycznym (rys. 2.12.a),
- nieliniowa zależność kąta pochylenia steru od przyrostu kąta pochylenia drążka sterującego,
- nieliniowość charakterystyki półprzewodników, w tym układów prostowniczych opartych na diodach półprzewodnikowych (rys. 2.12.b), diod elektroluminescencyjnych (LED) i elementów półprzewodnikowych jak np. tranzystory (rys. 2.12.c) – są stosowane we wzmacniaczach i zasilaczach,
- zastosowanie napędów bezstopniowych dla silników prądu stałego,
- inne.



**Rys. 2.12.** Typowe charakterystyki elektrycznych elementów nieliniowych: a) charakterystyka prądowo-napięciowa elektrycznej cewki indukcyjnej z rdzeniem ferromagnetycznym; b) schemat ideowy cewki indukcyjnej z rdzeniem ferromagnetycznym; c) charakterystyka prądowo-napięciowa półprzewodnikowej diody prostowniczej; d) schemat diody półprzewodnikowej w układzie prostowania napięcia prądnicą prądu przemiennego na prąd stały pulsujący, D – dioda półprzewodnikowa, R – oporność czynna, G<sub>~</sub> – prądnicą prądu przemiennego; e) charakterystyka prądowo-napięciowa tranzystora p-n-p; f) schemat ideowy tranzystora p-n-p ze wspólnym emiterem

### 2.2.3. Wykorzystanie wykresu widma Fouriera do analizy sygnałów elektrycznych

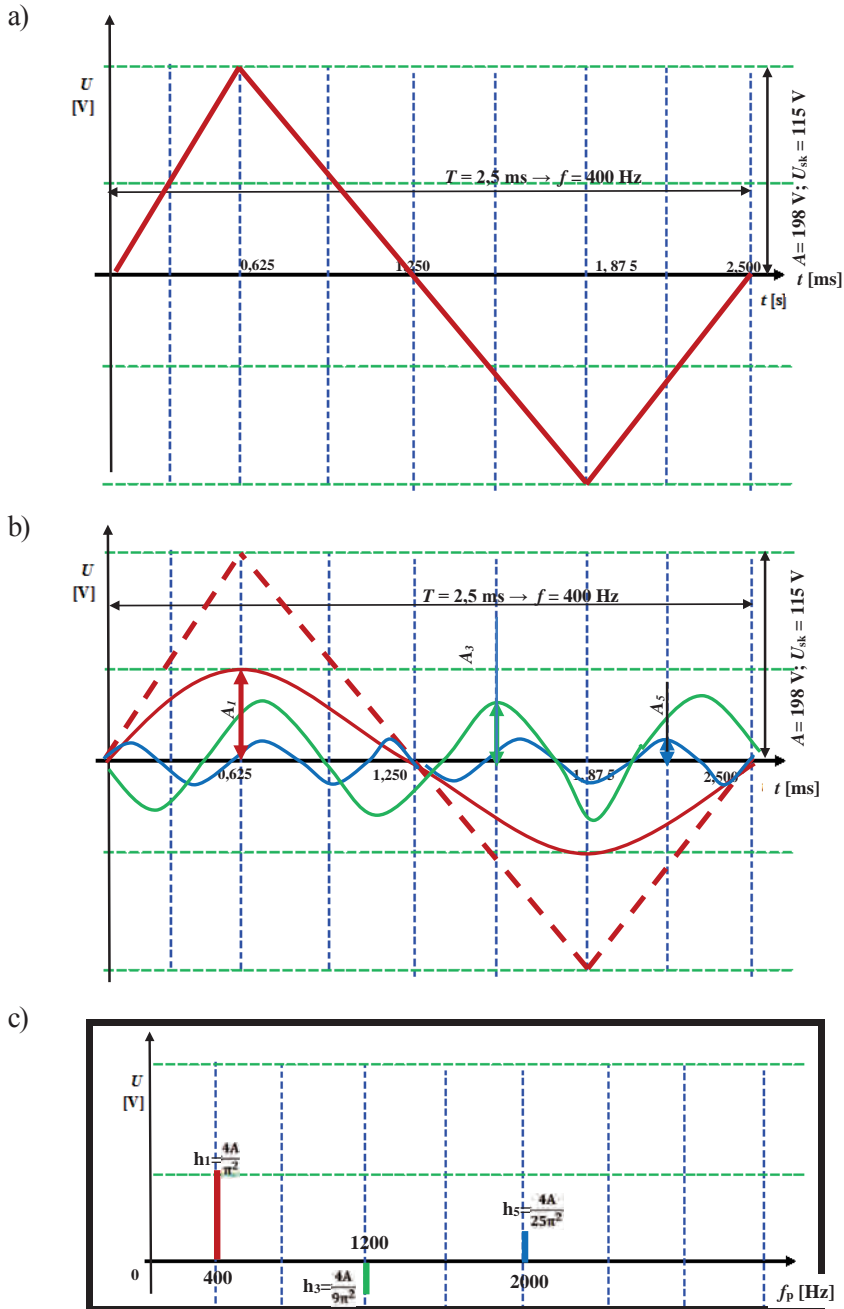
Przełomem dla automatyki, zwłaszcza dla teorii układów nieliniowych, było przekształcenie Fouriera dla przebiegów odkształconych, opracowane w 1803 r. przez francuskiego uczonego Jeana Fouriera, uzupełnione w 1829 r. przez Petera Dirichleta [4, 79]. Zgodnie z tymi twierdzeniami dowolny przebieg okresowy (rys. 2.13a) może być opisany przez sumę geometryczną składowych sinusoidalnych [4, 56, 84, 145, 146, 149, 150, 191, 220, 238, 239] (rys. 2.13b). Jednocześnie składowe tej sumy mogą być graficznie przedstawione w postaci prążków (tj. impulsów o nieskończenie małym czasie trwania) na osi częstotliwości (rys. 2.13c) – każdy z nich odzwierciedla inną składową sinusoidalną: na osi odciętych miejsce posadowienia prążka odzwierciedla częstotliwość składowej sinusoidalnej, wysokość prążka odzwierciedla wartość amplitudy (zwykle w wartościach skutecznych) każdej składowej sinusoidalnej. Przekształcenie Fouriera zrewolucjonizowało elektrotechnikę i diagnostykę wibroakustyczną.

Wykres widma jest graficznym przedstawieniem przekształcenia Fouriera jako funkcji częstotliwości lub pulsacji. Umożliwiło ono wymierne przedstawienie stopnia zniekształcenia przebiegu. Dzięki temu możliwe było też precyzyjne określenie przyczyn tego zniekształcenia oraz ustanowienie norm na dopuszczalny poziom zniekształcenia.

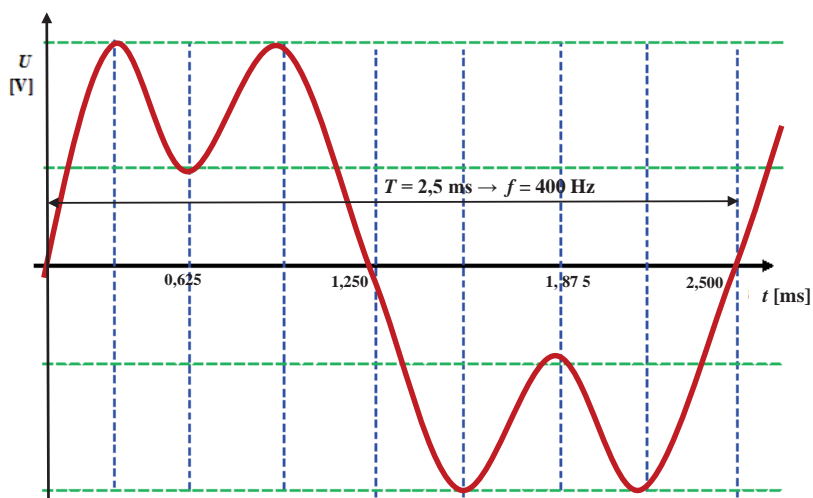
Jako szczególne przypadki z techniki lotniczej można przytoczyć dwa przykłady zniekształceń nieliniowych:

1. Przebieg sinusoidalny sieci elektroenergetycznej prądu przemiennego  $1 \times 115$  V, 400 Hz zniekształcony do postaci trójkąta (rys. 2.13a) – składowa podstawowa (pierwsza harmoniczna)  $f_1 = 400$  Hz.
2. Przebieg sinusoidalny sieci czujnika magnetycznego kąta kursowego ID-2M:  $3 \times 1,2$  V, 400 Hz zniekształcony (na skutek nasycenia rdzenia wykonanego z permalaju przez natężenia ziemskiego pola magnetycznego) do postaci przedstawionej na rys. 2.14 – składowa podstawowa (pierwsza harmoniczna)  $f_1 = 800$  Hz.





Rys. 2.13. Przebieg odkształcony: a) przebieg podstawowy trójkątny; b) składowe sinusoidalne na tle przebiegu podstawowego; c) prążki amplitudowe Fouriera w funkcji częstotliwości



**Rys. 2.14.** Przebieg odkształcony przez lokalne nasycenie cewki indukcyjnej z rdzeniem ferromagnetycznym zasilanej prądem przemiennym o częstotliwości 400 Hz

## 2.3. Trójkąty oporności oraz wykresy wskazowe prądu przemiennego dla cewki indukcyjnej i kondensatora, podstawowe prawa elektrotechniki

### 2.3.1. Opis matematyczny oporności stawianej przez elementy pojemnościowe i indukcyjne bez zastosowania liczb zespolonych

Przed wprowadzeniem liczb zespolonych opisywano zmianę oporności kondensatorów i cewek indukcyjnych na podstawie zjawisk fizycznych. Wystarczało to w zupełności, dopóki w energetyce „królował” prąd stały. Rozróżniano już wówczas elementy elektroenergetyczne:

1. czynne, tj. takie, które wydzielają ciepło – rezystory;
2. bierne, tj. takie, które nie wydzielają ciepła, ale za to miały szereg innych właściwości:
  - a) kondensatory – mogące magazynować (kondensować) energię elektryczną,
  - b) cewki indukcyjne – mogące wytwarzać pole magnetyczne.

Jednocześnie stwierdzono na podstawie obserwacji na obiektach fizycznych, że podczas załączania do źródła prądu stałego elementy te mają całkiem odmienne właściwości:

1. Rezystory – po załączeniu pojawiał się w tym samym momencie prąd o natężeniu:

$$I = \frac{U}{R} = tg \alpha \quad (2.12)$$

2. Bierne – po załączeniu pojawiał się prąd, ale z pewnym przesunięciem:
- kondensatory – natężenie prądu na początku było duże, a następnie wykładniczo, w miarę ładowania się kondensatora (w miarę zwiększania ilości zgromadzonej energii elektrycznej w postaci ładunków elektrycznych na okładzinach kondensatora), malało. Wartość napięcia zgromadzonego w kolejnym odcinku czasu na kondensatorze zwiększała się wykładniczo aż do uzyskania wartości napięcia źródła prądu stałego. Można powiedzieć, że prąd ładowania kondensatora wyprzedza wartość napięcia pomiędzy jego okładzinami – inaczej **wartość napięcie na kondensatorze opóźnia się względem płynącego prądu**;
  - cewki indukcyjne – na początku, z uwagi na szybki wzrost natężenia pola magnetycznego, napięcie indukowane (napięcie samoindukcji [2, 96, 102, 108, 119, 120] jest tak duże, że przeciwstawia się wzrostowi natężenia prądu – tuż po przyłączeniu źródła napięcia do cewki indukcyjnej wartość napięcia samoindukcji cewki jest równa napięciu źródła) w uzwojeniach uzyskuje natężenie prądu zerowe, po czym wykładniczo narasta do wartości określonej wzorem:

$$I_{L\infty} = \frac{U}{R_L} \quad (2.13)$$

gdzie:  $R_L$  – rezystancja wewnętrzna uzwojeń cewki indukcyjnej.

Można więc powiedzieć, że **dla cewki indukcyjnej napięcie samoindukcji wyprzedza natężenie prądu**, natomiast **dla kondensatora odwrotnie – najpierw jest prąd**, a później na okładzinach kondensatora pojawia się napięcie.

Po odłączeniu źródła prądu stałego i przełączeniu na rezystor obciążający  $R_r$  elementy R, L, C także mają całkiem odmienne od siebie właściwości:

- Rezystory – po odłączeniu prąd w obwodzie natychmiast zanikał.
- Bierne – po odłączeniu pojawiał się prąd, ale z pewnym przesunięciem:
  - kondensatory – natężenie prądu przyjmuje początkowo duże o wartości:

$$I_C = \frac{U_C}{R_r} \quad (2.14)$$

po odłączeniu źródła zasilania i załączeniu jego zacisków na rezystorze rozładującym  $R$ , wykładniczo zmniejsza swoją wartość;

- b) cewki indukcyjne – na początku natężenie prądu było duże, zwykle przekraczające wielokrotnie wartość  $I_{L\infty}$ , po czym wykładniczo ulegało zmniejszeniu do zera. Dzieje się tak dlatego, że cewka indukcyjna dążąc do zachowania zgromadzonej energii magnetycznej wywołuje napięcie samoindukcji (tuż po odłączeniu źródła napięcia zasilającego napięcie samoindukcji jest największe) dążące do podtrzymania tego pola – kierunek napięcia samoindukcji jest zgodny co do kierunku przed chwilą odłączonego źródła napięcia stałego.

Zatem po przyłączeniu elementów  $R$ ,  $L$ ,  $C$  do źródła prądu stałego, a następnie (po pewnym czasie) po odłączeniu tych elementów od źródła zaobserwowano zupełnie odmienne właściwości. Jeżeli za kryterium wyjściowe przyjmujemy wektor płynącego prądu, to można stwierdzić, że:

- a) dla kondensatorów napięcie opóźnia się względem prądu;  
 b) dla cewek indukcyjnych prąd opóźnia się względem przyłożonego napięcia, czyli napięcie wyprzedza prąd.

Gdy na początku XX w. w elektroenergetyce przemysłowej zaczął dominować prąd przemienny, to opis fizyczny wpływu pojemności i indukcyjności na zasilane prądem przemiennym systemy już nie wystarczał – pojawił się w rękach praktyków podstawowy aparat matematyczny – wzory i zależności na tzw. oporność bierną, tj. taką, która nie wydziela ciepła.

### **Opis matematyczny przesunięć fazowych cewki indukcyjnej bez zastosowania liczb zespolonych**

W rzeczywistości każda cewka indukcyjna składa się z rezystancji uzwojenia  $R_L$  i z indukcyjności (rys. 2.15). Z tego powodu dla niskich wartości indukcyjności (np. dla cewek o niewielkiej liczbie zwojów), o dużej rezystancji czynnej (tj. dla cewek indukcyjnych nawiniętych cienkim drutem) iloraz spadku napięcia i prądu w obwodzie elektrycznym nie będzie równy sumie wartości reaktancji biernej  $X_L$  i rezystancji czynnej  $R_L$ .

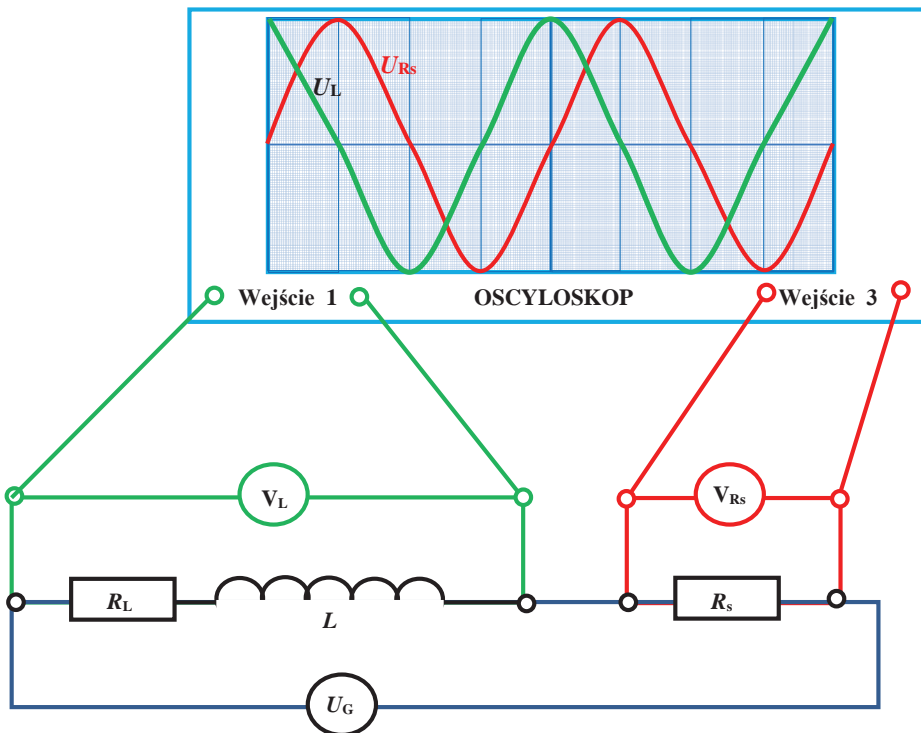
Czy oznacza to, że cewki indukcyjne w obwodzie prądu przemiennego nie spełniają prawa Ohma? Oczywiście, że spełniają, po uwzględnieniu przesunięcia w czasie pomiędzy napięciem a prądem, opisanego w poprzednim rozdziale. W obwodzie jak na rys. 2.15 można zaobserwować przesunięcie pomiędzy prądem  $I$  w obwodzie elektrycznym a spadkiem napięcia (rys. 2.15, blok „Oscyloskop”, szczegóły:  $u_L$ ,  $u_{RL}$ ). W związku z tym elektrycy zaczęli korzystać z tzw. trójkąta oporności (rys. 2.16) oraz trójkąta napięć (rys. 2.17).

Teraz opis matematyczny obserwowanych zjawisk mógł być stworzony zgodnie z zasadami geometrii analitycznej, a właściwie z twierdzenia Pitagorasa. W opisie tym utworzono nowe pojęcie: tzw. oporności pozornej  $Z_L$ , tj. wypadkowej geometrycznej z oporności czynnej  $R_L$  cewki indukcyjnej i oporności biernej  $X_L$  – wyrażone wzorem:

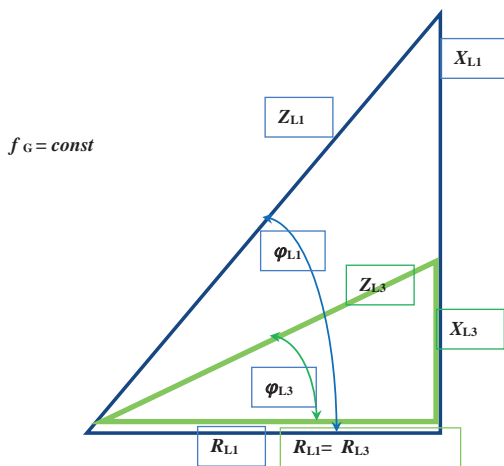
$$Z_L = \sqrt{X_L^2 + R_L^2} \quad (2.15)$$

Oczywiście, dla obwodu przedstawionego na rys. 2.15, gdzie włączono dodatkowo rezystor  $R_L$ , wartość impedancji całego obwodu wzrośnie – będzie się wyrażała wzorem:

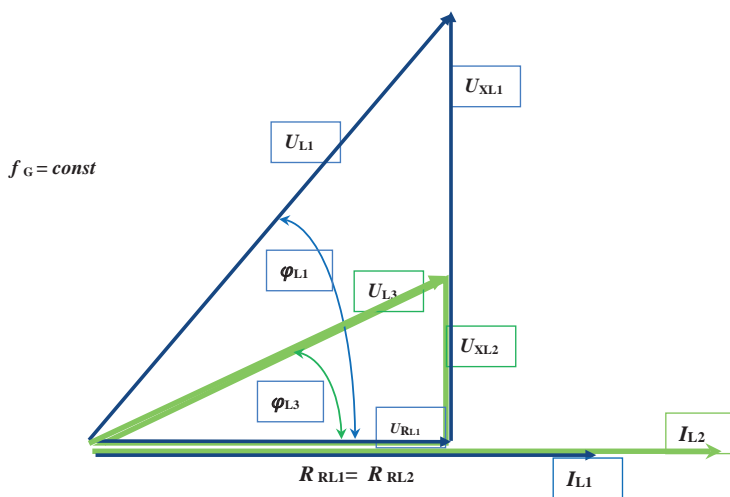
$$Z_L = \sqrt{X_L^2 + (R_L + R_S)^2} \quad (2.16)$$



Rys. 2.15. Układ do pomiaru przesunięcia fazowego cewki indukcyjnej



**Rys. 2.16.** Trójkąt oporności dla dwóch cewek indukcyjnych przy jednakowej oporności czynnej i różnych wartościach indukcyjności własnej



**Rys. 2.17.** Trójkąt napięć i prądów dla dwóch cewek indukcyjnych przy jednakowej oporności czynnej i różnych wartościach indukcyjności własnej

Teraz, zgodnie z prawem Ohma:

$$Z = \frac{U_G}{I} \tag{2.17}$$

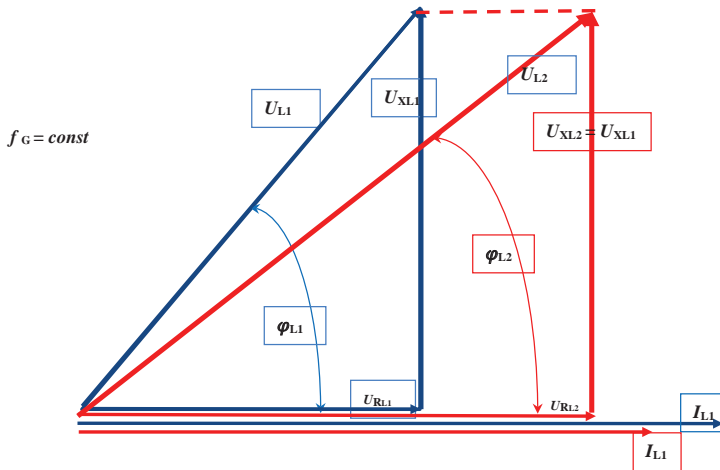
czyli:

$$I = \frac{U_G}{Z} \quad (2.18)$$

natomiast wartość (modułu) napięcia:

$$U_G = \sqrt{U_L^2 + (U_{R_L} + U_{R_s})^2} \quad (2.19)$$

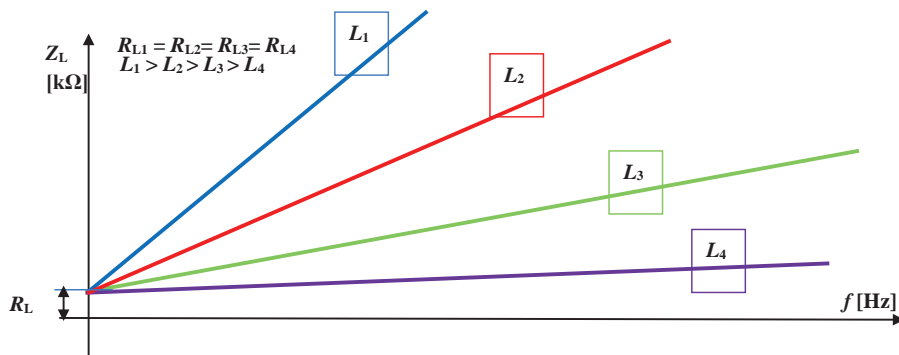
Musimy zatem w tym miejscu skorygować charakterystyki częstotliwościowe otrzymane w poprzednim rozdziale o elementy związane z rezystancją czynną cewki indukcyjnej – zamiast wartość oporności biernej należy rozpatrywać impedancję cewki indukcyjnej powiązaną z jej opornością czynną (rys. 2.18). W przypadku pokazanym na tym rysunku założono, że dla wszystkich rozpatrywanych cewek jest stała rezystancja czynna cewki (w praktyce najczęściej spotykane są relacje, że im większa jest wartość indukcyjności, tym większa jest wartość rezystancji czynnej, co wynika ze średnicy stosowanego drutu nawojowego oraz z liczby zwojów decydującej o wartości indukcyjności).



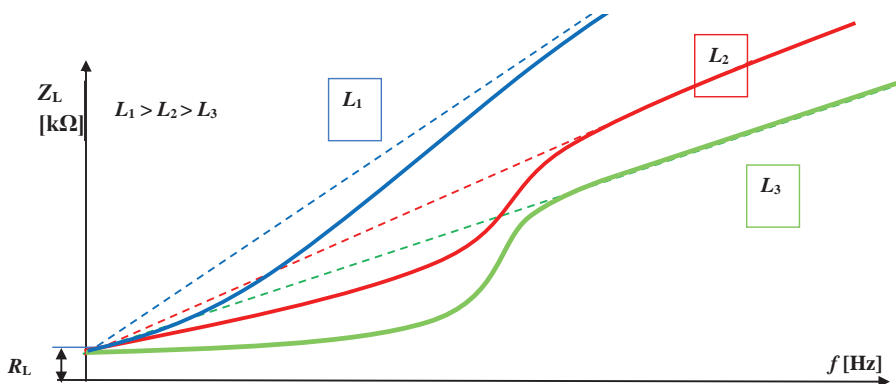
**Rys. 2.18.** Trójkąt napięć i prądów dla cewki indukcyjnej przy zwiększaniu oporności czynnej obwodu elektrycznego (bez zmiany wartości indukcyjności własnej)

Podobne relacje otrzymuje się dla trójkątów napięć. Można zauważyć, że wartość rezystancji czynnej powoduje przesunięcie charakterystyk impedancji w funkcji częstotliwości w górę (rys. 2.19). Dla oporności czynnej porównywalnej (dla danej częstotliwości generatora zasilającego) z opornością bierną następuje pewne

odchylenie ujemne od linii prostej (rys. 2.20). Im mniejsza jest zatem indukcyjność cewki, tym bardziej jest ona „wrażliwa” na zwiększoną rezystancję czynną – powstaje wówczas większe odchylenie ujemne od linii prostej i przegięcie charakterystyki występuje przy wyższej częstotliwości źródła zasilania.



**Rys. 2.19.** Charakterystyka częstotliwościowa oporności biernej cewki indukcyjnej, gdzie:  $L_1, L_2, L_3, L_4$  – wartości indukcyjności,  $L_1 > L_2 > L_3 > L_4$ ,  $f$  – częstotliwość napięcia wyjściowego prądu;  $I$  – wartość prądu przemiennego w obwodzie



**Rys. 2.20.** Charakterystyka częstotliwościowa impedancji cewki indukcyjnej przy znaczącej wartości jej oporności czynnej, gdzie:  $L_1, L_2, L_3, L_4$  – wartości indukcyjności,  $L_1 > L_2 > L_3 > L_4$ ,  $f$  – częstotliwość napięcia wyjściowego prądu;  $I$  – wartość prądu przemiennego w obwodzie

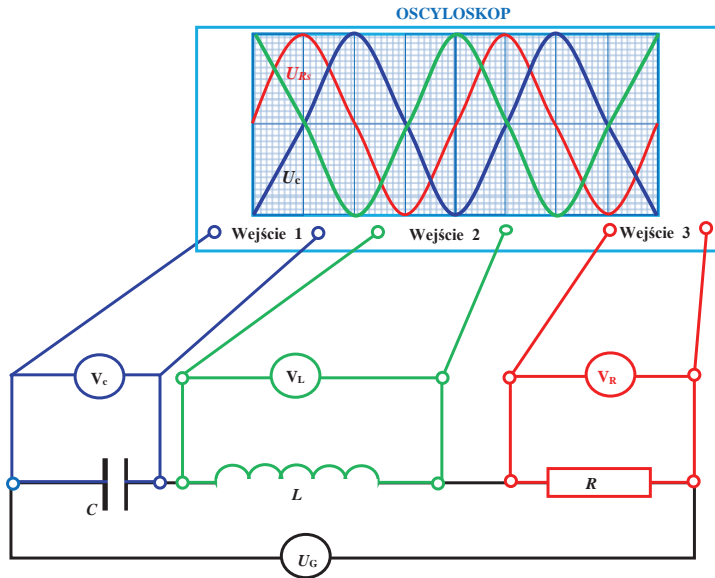
### 2.3.2. Opis matematyczny układów elektrycznych czynnych i biernych z zastosowaniem liczb zespolonych

Po przestudiowaniu poprzedniego rozdziału rodzi się pytanie – po co właściwie potrzebne są liczby zespolone, skoro rezystancje podstawowych elementów obwo-



dów elektrycznych można opisać w postaci prostych i jednoznacznych wzorów? Odpowiedź dała praktyka. Przy obwodach złożonych z rozbudowanych pojemności i indukcyjności pojawiły się rezonanse [8, 108, 120] elektryczne powodujące zakłócenia w sieciach telegraficznych i telefonicznych, a niekiedy przegrzania lub nawet przepalenia elementów obwodów.

W obwodzie jak na rys. 2.21 można zaobserwować przesunięcie pomiędzy prądem  $I$  w obwodzie elektrycznym a spadkiem napięcia na kondensatorze (rys. 2.21, blok „Oscyloskop”, szczegóły:  $u_C$ ,  $u_R$ ).



**Rys. 2.21.** Schemat zastępczy obwodu elektrycznego prądu przemiennego złożonego z kondensatora, cewki indukcyjnej i oporności czynnej

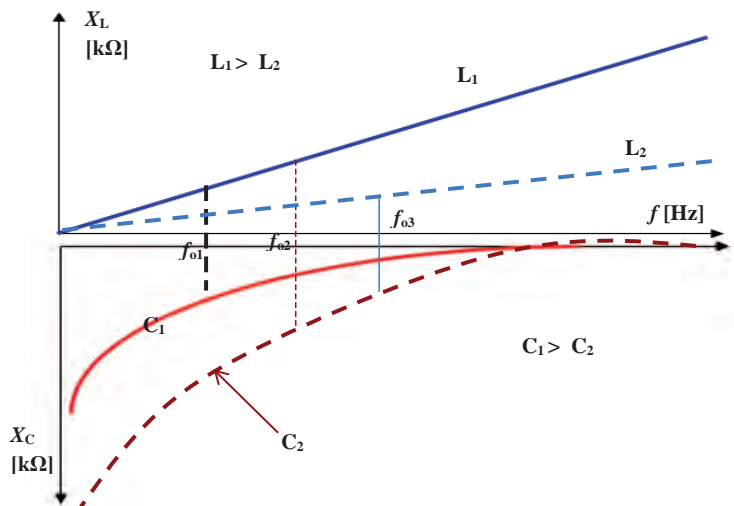
W szeregowym połączeniu pojemności i indukcyjności (rys. 2.21) – przy pewnej częstotliwości, zwanej częstotliwością rezonansową danego obwodu, wyrażonej wzorem [8, 108, 120]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.20)$$

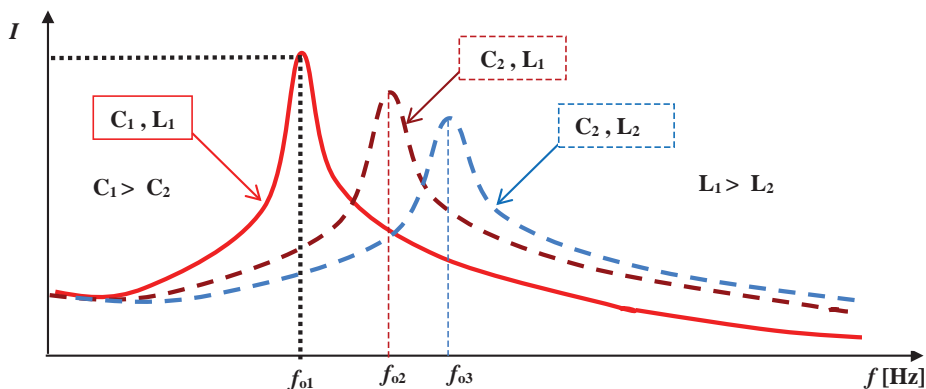
następuje zrównoważenie (zniesienie) się wartości reaktancji biernych kondensatora i indukcyjności (rys. 2.22) – pozostaje tylko rezystancja czynna cewki indukcyjnej o niewielkiej wartości. W związku z tym natężenie prądu w pobliżu częstotliwości  $f_0$  wyraźnie zwiększa swoją wartość (rys. 2.23). Na marginesie należy zaznaczyć,

że przy znacznych wartościach rezystancji czynnej w obwodzie rezonansowym (znaczną rezystancją przewodów połączeniowych lub znaczne wartości rezystancji połączeń przewodów minusowych albo fazowych z korpusem statku powietrznego) w stosunku do wartości indukcyjności, wartość częstotliwości rezonansowej ulega pewnemu zmniejszeniu do wartości określonej wzorem [79, 85-87, 144, 187, 232]:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}} \quad (2.21)$$



Rys. 2.22. Wyznaczanie częstotliwości rezonansowej metodą graficzną



Rys. 2.23. Zmiana natężenia prądu szeregowego obwodu rezonansowego w pobliżu częstotliwości rezonansowej

Dla „dużych” wartości pojemności  $C$  lub „dużych” wartości indukcyjności  $L$  uzyskuje się niskie częstotliwości rezonansowe, dla „małych” – wysokie wartości częstotliwości rezonansowych (tabela 2.1). Dla „małych” częstotliwości rezonansowych największe zmiany częstotliwości rezonansowych można osiągnąć poprzez zmiany pojemności kondensatora. Dla „dużych” częstotliwości rezonansowych największe zmiany częstotliwości rezonansowych można osiągnąć poprzez zmiany indukcyjności  $L$ . Dla „małych”  $L$  i  $C$ , zwiększanie wartości pojemności  $C$  daje na początku bardzo duże zmiany częstotliwości rezonansowej  $f_0$  – potem coraz mniejsze (tabela 1, lp. 11–40). Zasady te są bardzo istotne dla specjalistów obsługi naziemnej strojących radiostacje naziemne lub pokładowe oraz radiokompasy na częstotliwości poszczególnych lotnisk oraz w układach teletransmisyjnych [5–7, 105].

**Tabela 2.1**

Zestawienie częstotliwości rezonansowej dla obwodu szeregowego RLC

Lp.	L	$R_{L0}$	$R_{s1}$	C	$f_0$
	mH	$\Omega$	$\Omega$	$\mu\text{F}$	Hz
1	0,2	0,100	2700	15,0	2 906
2	1	0,500	1200	5,0	2 251
3	10	1,000	800	3,0	919
4	30	5,000	800	0,4	1 453
5	100	10,000	20	0,1	1 592
6	0,2	0,100	2700	0,1	35 588
7	1	0,500	1200	0,4	7 958
8	10	1,000	800	3,0	919
9	30	5,000	800	5,0	411
10	100	10,000	20	15,0	130
11	0,2	0,100	2700	0,1	35 588
12	0,2	0,500	1200	0,2	25 165
13	0,2	0,500	1200	0,3	20 547
14	0,2	0,500	1200	0,4	17 794
15	0,2	0,500	1200	0,5	15 915
16	0,2	0,500	1200	0,6	14 529
17	0,2	0,500	1200	0,7	13 451
18	0,2	0,500	1200	0,8	12 582
19	0,2	0,500	1200	0,9	11 863

20	0,2	0,500	1200	1,0	11 254
21	0,2	0,500	1200	1,1	10 730
22	0,2	0,500	1200	1,2	10 273
23	0,2	0,500	1200	1,3	9 870
24	0,2	0,500	1200	1,4	9 511
25	0,2	0,500	1200	1,5	9 189
26	0,2	0,500	1200	1,6	8 897
27	0,2	0,500	1200	1,7	8 631
28	0,2	0,500	1200	1,8	8 388
29	0,2	0,500	1200	1,9	8 164
30	0,2	0,500	1200	2,0	7 958
31	0,2	0,500	1200	2,1	7 766
32	0,2	0,500	1200	2,2	7 587
33	0,2	0,500	1200	2,3	7 421
34	0,2	0,500	1200	2,4	7 264
35	0,2	0,500	1200	2,5	7 118
36	0,2	0,500	1200	2,6	6 979
37	0,2	0,500	1200	2,7	6 849
38	0,2	0,500	1200	2,8	6 726
39	0,2	0,500	1200	2,9	6 609
40	0,2	0,500	1200	3,0	6 497

Na chwilę można się przenieść ze świata elektryki do zjawisk rezonansu mechanicznego [8, 23, 108, 120]. Odpowiednikiem indukcyjności  $L$  jest masa lub moment bezwładności tego podzespołu, zaś pojemności  $C$  – odwrotność współczynnika sprężystości podzespołu, tj. gdzie współczynnik sztywności można wyrazić wzorem:

$$k = \frac{M}{\Delta\varphi} \quad (2.22)$$

gdzie:  $M$  – moment siły,  $\Delta\varphi$  – kąt skręcenia wału.

Dla podzespołów masywnych, tj. wydłużonych elementów i małych sprężystości, wartość częstotliwości rezonansowej będzie niska. Zmianę tej częstotliwości najlepiej przeregulować poprzez zmianę momentu bezwładności, tzn. poprzez dokładanie lub ujmowanie materiału (dodawanie lub zmniejszanie masy) lub też wydłużanie konstrukcji. Dla lekkich konstrukcji (o niewielkiej masie lub niewielkiej wartości momentu bezwładności), gdzie częstotliwość rezonansowa jest znacznie

wyższa, zmianę wartości rezonansowej najlepiej wykonać przez zmianę współczynnika sprężystości, np. poprzez zmianę naciągu wstępnego konstrukcji.

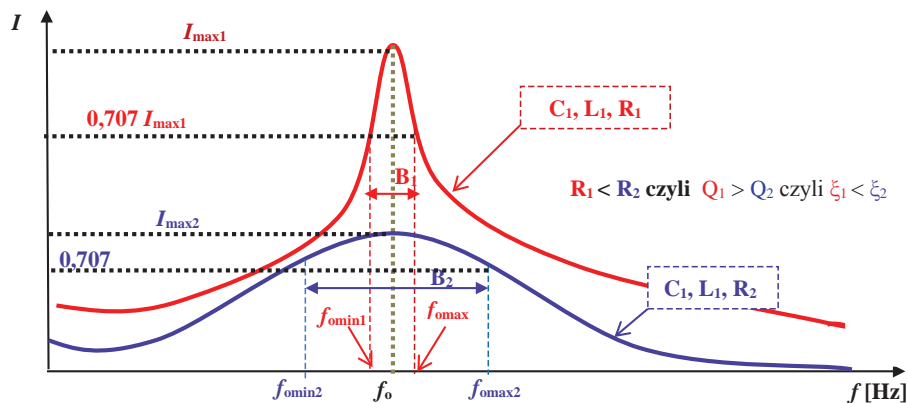
Jeśli chodzi o aspekt energetyczny rezonansu – niepożądanym rezonans może spowodować uszkodzenie konstrukcji:

- a) elektrycznej – w czasie rezonansu przez obwód szeregowy RLC przepływa ekstremalnie wielki prąd, który może spowodować przegrzanie, a nawet przepalenie obwodu;
- b) w łożysku tocznym energia zsynchronizowanych odbić od elementów tocznych pomiędzy bieżniami może spowodować:
  - złuszczenia materiału bieżni – powstają charakterystyczne ślady zużycia (złuszczenia na bieżni o liczbie i podziałce równej liczbie i podziałce rozstawu elementów tocznych łożyska), zwane fałszywymi odciskami Brinella;
  - zużycie lub wyłamanie elementów separujących koszyka-separatora łożyska, co wtórnie powoduje wzajemne blokowanie elementów tocznych i powoduje powstawanie gwałtownych, chociaż krótkotrwałych przyhamowań, co skutkuje wielkimi siłami działającymi na obwód koszyka-separatora danego łożyska, jak również krótkotrwałe znaczne momenty skręcające wałów w układzie mechanicznym;
  - rozerwanie obwodu koszyka-separatora.
- c) przyspieszone zużycie zmęczeniowe elementów mechanicznych.

Teraz pojawia się pytanie – jak np. pilot, który rozpozna oznaki rezonansu [8, 23, 56, 77, 108, 120], może wpływać na obniżenie jego negatywnych skutków? Otóż z analiz energetycznych wynika, że wartość ekstremum krzywej rezonansowej, tj. energia wydzielania w czasie pracy urządzenia podczas rezonansu, jest wprost proporcjonalna do energii wprowadzanej do układu. Tak więc pierwszą rzeczą jest zmniejszenie mocy silników, zmniejszenie wzmocnienia w danym kanale sterowania, zmniejszenie intensywności wykonywania danego manewru oraz omawiana już wcześniej zmiana częstotliwości pracy (zmiana prędkości obrotowej silnika, zmiana częstości wykonywanych ruchów elementów sterowania płatowcem. Jednocześnie pilot w takich przypadkach powinien unikać dynamicznych zmian położenia elementów sterowania – podczas gwałtownych zmian parametrów w elementach mechanicznych mogą nastąpić siły udarowe, które (jak wiadomo z punktu 1.2.4.3) po rozłożeniu w szereg Fouriera dają nieskończone szerokie widmo składowych częstotliwościowych – mogą dostarczyć dodatkowej energii do pary kinematycznej będącej w rezonansie i spowodować jej uszkodzenie.

Ponadto istnieją jeszcze pojęcia: dobroci układu  $Q$  oraz tłumienia  $\xi$  (rys. 2.24) [2, 23, 36, 40, 41, 101, 120]. Wysoki współczynnik tłumienia to znaczne zmniejszenie

sznieniu amplitudy drgań mechanicznego podzespołu lub w obwodzie elektrycznym znaczne zmniejszenie natężenia prądu.



Rys. 2.24. Zmiana natężenia prądu szeregowego obwodu rezonansowego w pobliżu częstotliwości rezonansowej

Tłumienie jest odwrotnością dobroci, zaś dobroć jest to zdolność układu (elektrycznego, mechanicznego) do wzbudzenia drgań rezonansowych – im większa wartość dobroci  $Q$ , tym mniej tłumione mogą się okazać drgania rezonansowe. Wartość dobroci można określić z parametrów konstrukcyjnych danego układu albo z charakterystyki rezonansowej z szerokości zajmowanego pasma  $B$  i częstotliwości rezonansowej  $f_0$  ze wzoru:

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad (2.23)$$

gdzie:

$$B = f_{\text{omax}} - f_{\text{omin}} \quad (2.24)$$

Szerokość pasma  $B$  (rys. 2.28, szczegóły:  $B_1, B_2$ ) wyznacza się dla wartości parametru przedstawionego na osi rzędnych charakterystyki rezonansowej (np. wartości natężenia prądu) dla spadku jego wartości do 0,707 jego wartości maksymalnej (np.  $0,707 I_0$ ). W ten sposób wyznacza się wartości skrajne częstotliwości pasma przenoszenia:  $f_{\text{omax}}$  i  $f_{\text{omin}}$ . Tak więc zwiększając tłumienie, czyli zmniejsza-

jąc dobroć układu powodujemy, że wartość amplitudy drgań rezonansowych ulega zmniejszeniu. Do rozważań dotyczących neutralizacji niepożądanych drgań rezonansowych należy dodać ten aspekt energetyczny. Jednym z przykładów takiego działania w lotnictwie jest wychodzenie z niekontrolowanego korkociągu, kiedy to poprzez zwiększenie tłumienia aerodynamicznego (wysuwanie hamulców aerodynamicznych, wyrzucenie spadochronu hamującego) zmniejszona zostaje prędkość opadania statku powietrznego.

### 2.3.3. Opis matematyczny oporności stawianej przez elementy pojemnościowe i indukcyjne z zastosowaniem liczb zespolonych

Wróćmy do zadanego na początku rozdziału pytania – czy do określania częstotliwości rezonansowej potrzebne są liczby zespolone? – można ją przecież wyznaczać ze wzoru na  $f_0$  lub metodą graficzną przedstawioną na rys. 2.22. Niestety obliczenia komplikują się, gdy mamy do czynienia z rozbudowaną siecią o nieokreślonych wartościach pojemności i zmieniających się częstotliwościach przekazywanych sygnałów. Dlatego też angielski inżynier Hevisaid [85, 120] zaproponował skorzystanie z pomysłu norweskiego mierniczego Caspara Wessela [235] i zastosowanie liczb zespolonych [103, 104, 120]. Stwierdził on, że kombinacje połączeń linii telekomunikacyjnych z ich pojemnościami i indukcyjnościami można opisać w postaci liczb zespolonych:

- a) cewkę indukcyjną – połączenie indukcyjności z rezystancją czynną jej uzwojeń – jako:

$$Z_L = R_L + j2\pi f L \quad (2.25)$$

- b) kondensator – jako:

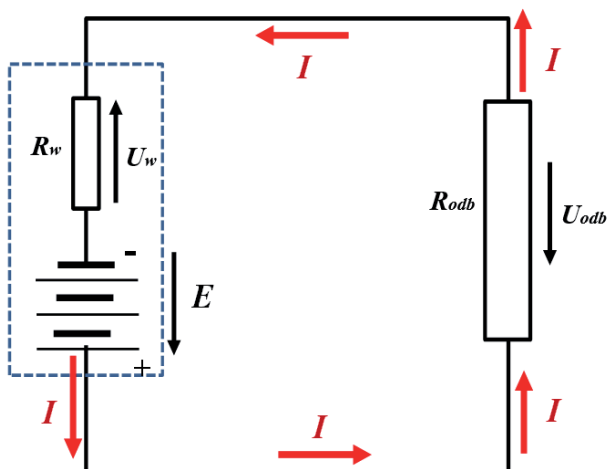
$$Z_C = -\frac{1}{j2\pi f C} \quad (2.26)$$

Przy olbrzymiej liczbie znanych modułów sieci telekomunikacyjnej dynamicznie rozbudowywanej dobieranie filtrów tłumiących lokalne i strukturalne zakłócenia stało się o wiele prostsze i szybsze.

## 2.3.4. Podstawowe prawa elektrotechniki

### 2.3.4.1. Obwody prądu stałego

Podstawowy uniwersalny obwód prądu stałego przedstawia rys. 2.25.



Rys. 2.25. Podstawowy uniwersalny obwód prądu stałego

### Prawo Ohma dla odcinka oraz dla całego obwodu

Wartość siły elektromotorycznej  $E$  jest równa sumie spadków napięć na oporności wewnętrznej źródła i spadku napięcia na oporności zewnętrznej odbiornika [108, 119].

$$E = I \cdot R_w + R_{odb} \quad (2.27)$$

Szeregowe połączenie oporników przedstawiono na rys. 2.26.



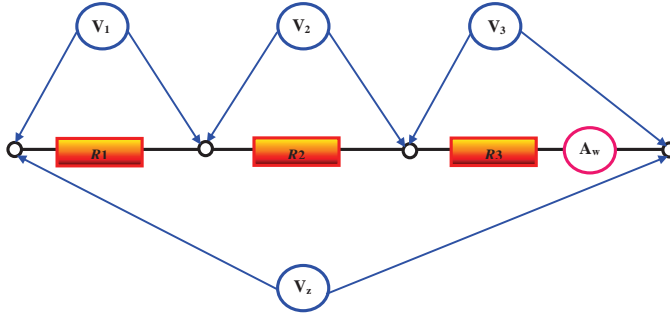
Rys. 2.26. Szeregowe połączenie oporników

Przy szeregowym połączeniu oporników (rezystancji czynnych) oporność wypadkowa  $R_w$  jest równa sumie wartości rezystancji składowych:



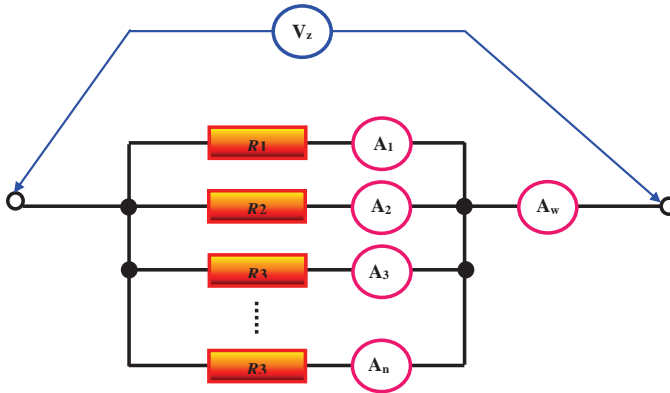
$$R_w = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{1n} \quad (2.28)$$

Pomiar prądu i spadków napięć szeregowego połączenia oporników przedstawia rys. 2.27.



Rys. 2.27. Spadki napięć dla szeregowego połączenie oporników

Równoległe łączenie oporników oraz pomiar prądów i spadków napięć przedstawiono na rys. 2.28.



Rys. 2.28. Równoległe połączenie oporników

Przy równoległym połączeniu oporników (rezystancji czynnych) odwrotność oporności wypadkowej  $1/R_w$  jest równa sumie odwrotności rezystancji składowych [108, 119]:

$$\frac{1}{R_w} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (2.29)$$

Jeżeli do szeregowo połączonych, np. trzech oporników, przyłożymy napięcie o wartości  $U_z$  (napięcie źródła zewnętrznego), to wartość natężenia prądu w tym odcinku obwodu wyniesie:

$$I_w = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2.30)$$

Natomiast spadki napięcia na poszczególnych opornikach:

$$U_1 = I \cdot R_1; \quad U_2 = I \cdot R_2; \quad U_3 = I \cdot R_3 \quad (2.31)$$

Wartość spadków napięć:

$$U_w = U_1 + U_2 + U_3 \quad (2.32)$$

### **Prawa Kirchhoffa dla prądu stałego i ich zastosowanie [108, 119]**

**I prawo Kirchhoffa** – suma algebraiczna prądów wpływających i wypływających do i od danego węzła elektrycznego jest równa zeru – np. dla układu jak na rys. 2.29 dla węzła A:

$$\sum_{n=1}^{n=k} I_{nA} = 0 \quad (2.33)$$

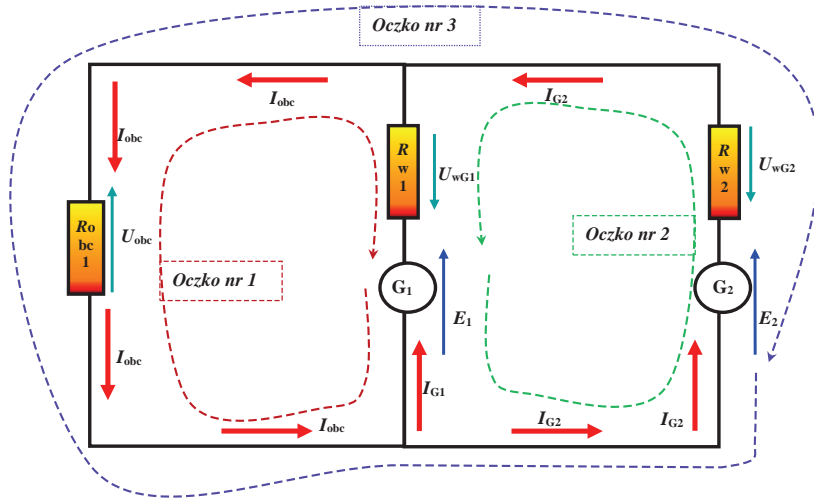
Zwykle przyjmuje się znaki dodatnie dla prądów wpływających, zaś ujemne dla wypływających, ale w zastosowaniu praktycznym nie ma to znaczenia – musi być zachowana tylko konsekwencja oznaczeń – prądy wpływające muszą mieć przeciwny znak niż wypływające.

**II prawo Kirchhoffa** – suma algebraiczna spadków napięć i sił elektromotorycznych dowolnego oczka (obwodu zamkniętego) wynosi zero. Jest to więc de facto bardziej uniwersalna definicja prawa Ohma dla obwodu elektrycznego. Możemy ją przedstawić w formie uniwersalnej:

$$\sum_{o=1}^{o=k} E_o + \sum_{p=1}^{p=k} U_p = 0 \quad (2.34)$$

Należy przy strzałkowaniu obwodu prądu stałego pamiętać, że zwrot (grot) wektora siły elektromotorycznej lub spadku napięcia na rezystorze wskazuje zawsze wyższy potencjał, oraz że umowny kierunek przepływu prądu jest od „plusa” do „minusa”.

Zwykle tworzy się tyle równań łącznie z I i z II prawa Kirchhoffa, ile mamy niewiadomych – tworzy się więc układ równań, z którego wyliczane są niewiadome.

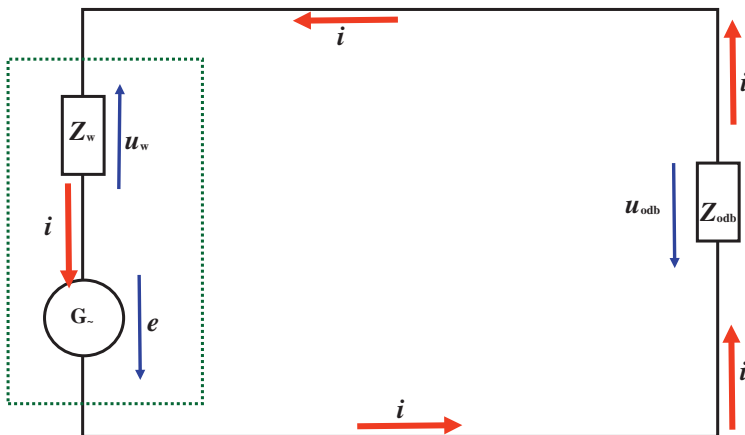


Rys. 2.29. Obwód elektryczny prądu stałego z dwoma źródłami napięć prądu stałego

### 2.3.4.2. Obwody prądu przemiennego bez zastosowania liczb zespolonych

#### Prawo Ohma dla odcinka oraz dla całego obwodu

Podobnie jak dla obwodów prądu stałego, w obwodach prądu przemiennego wartość siły elektromotorycznej (chwilowej)  $e$  równa jest sumie spadków napięć na impedancji wewnętrznej  $Z_w$  i spadku napięcia na impedancji odbiornika  $Z_{odb}$ . Podstawowy obwód prądu przemiennego przedstawia rys. 2.30.



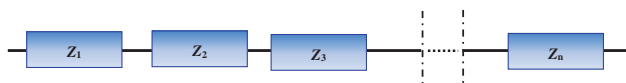
Rys. 2.30. Prawo Ohma dla obwodu elektrycznego prądu przemiennego

## Prawo Ohma dla odcinka oraz dla całego obwodu

Prawo Ohma dla zamkniętego obwodu brzmi analogicznie jak dla prądu stałego, z tym że dla prądu przemiennego posługujemy się wartościami chwilowymi – wartość chwilowa siły elektromotorycznej jest równa sumie spadków napięć chwilowych na impedancji wewnętrznej źródła oraz na rezystancji (zewnętrznej) odbiornika:

$$e = i \cdot Z_w + i \cdot Z_{odb} \quad (2.35)$$

### Szeregowe łączenie impedancji (rys. 2.31)

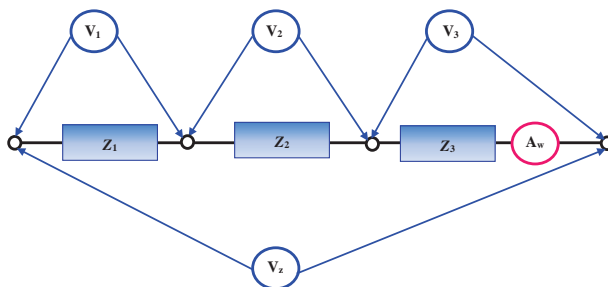


Rys. 2.31. Szeregowe połączenie impedancji

Przy szeregowym łączeniu impedancji łączna wartość impedancji równa się sumie impedancji składowych:

$$Z_w = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n \quad (2.36)$$

Pomiar prądu i spadków napięć przy szeregowym połączeniu impedancji w obwodzie prądu przemiennego przedstawia rys. 2.32.



Rys. 2.32. Spadki napięć przy szeregowym połączeniu impedancji w obwodzie prądu przemiennego

Jeżeli do szeregowo połączonych, np. trzech oporników, przyłożymy napięcie o wartości  $U_z$  (napięcie źródła zewnętrznego), to wartość natężenia prądu w tym odcinku obwodu wyniesie:

$$i_w = \frac{u}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \quad (2.37)$$

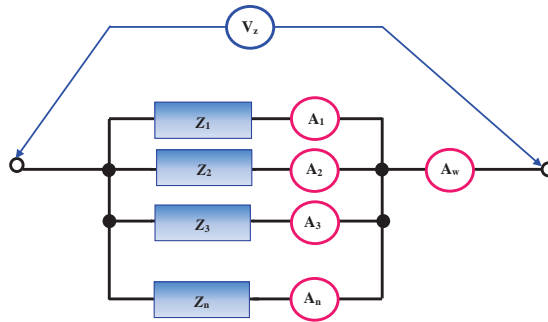
Na każdej impedancji w połączeniu szeregowym będzie się odkładał spadek napięcia:

$$u_1 = i \cdot Z_1; \quad u_2 = i \cdot Z_2; \quad u_3 = i \cdot Z_3 \quad (2.38)$$

Wartość spadku napięcia:

$$u_w = u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_n \quad (2.39)$$

### Równoległe łączenie impedancji (rys. 2.33)



**Rys. 2.33.** Spadki napięć przy szeregowym połączeniu impedancji w obwodzie prądu przemiennego

Przy równoległym połączeniu impedancji odwrotność impedancji wypadkowej  $1/Z_w$  jest równa sumie odwrotności impedancji składowych:

$$\frac{1}{Z_w} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \dots + \frac{1}{Z_n} \quad (2.40)$$

### Prawa Kirchhoffa dla prądu przemiennego i ich zastosowanie

Prawa Kirchhoffa dla obwodu prądu przemiennego wykorzystujemy analogicznie jak dla prądu stałego, jednak z pewnymi istotnymi różnicami:

- strzałkowanie dotyczy wartości chwilowych prądów, napięć i sił elektromotorycznych, ale musi być konsekwentne;
- zamiast rezystancji czynnej  $R$  (występującej w obwodach prądu stałego) mamy w obwodach prądu przemiennego impedancje  $Z$  składające się z części

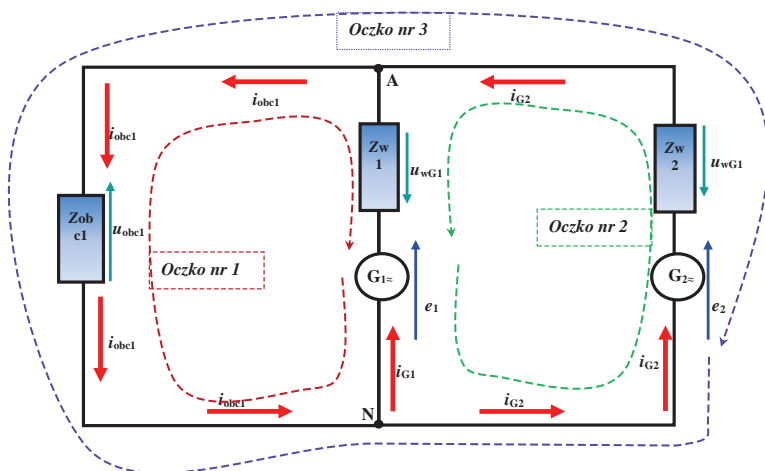
czynnej i biernej powodujące przesunięcie fazowe – najprościej jest przedstawiać impedancje w postaci zespolonej – „automatyzuje” się wówczas proces przeliczeń [104, 120];

- c) zapis każdego parametru siły elektromotorycznej, natężenia prądu i spadków napięć wnosi, podobnie jak w pkt. b, parametry amplitudy i fazy – w tym przypadku także zalecane jest korzystanie z liczb zespolonych.

**I prawo Kirchhoffa** – suma algebraiczna prądów wpływających i wypływających do i od danego węzła elektrycznego jest równa zero – np. dla układu jak na rys. 2.34 dla węzła A:

$$\sum_{n=1}^{n=k} i_{nA} = 0 \quad (2.41)$$

Zwykle przyjmuje się znaki dodatnie dla prądów wpływających, zaś ujemne dla wypływających, ale w zastosowaniu praktycznym nie ma to znaczenia – musi być zachowana tylko konsekwencja oznaczeń, tj. prądy wpływające muszą mieć przeciwny znak niż wypływające.



**Rys. 2.34.** Obwód elektryczny prądu przemiennego z dwoma źródłami napięć prądu przemiennego

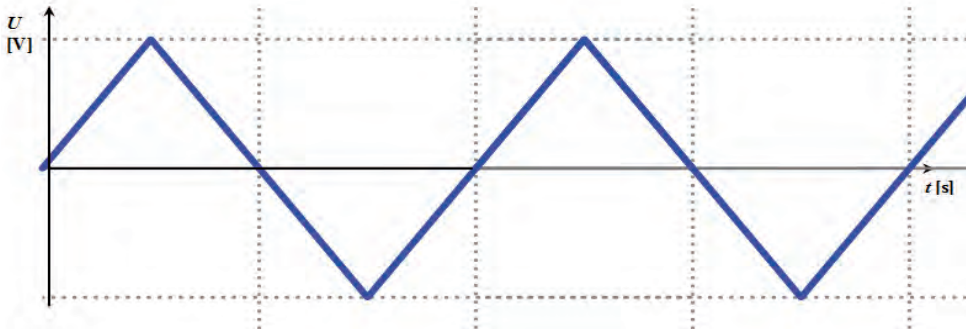
**II prawo Kirchhoffa** – suma algebraiczna spadków napięć i sił elektromotorycznych dowolnego oczka (obwodu zamkniętego) wynosi zero. Jest to więc de facto bardziej uniwersalna definicja prawa Ohma dla obwodu elektrycznego. Możemy ją przedstawić w formie uniwersalnej:

$$\sum_{o=1}^{o=k} e_o + \sum_{p=1}^{p=k} u_p = 0 \quad (2.42)$$

Zwykle tworzy się tyle równań łącznie z I i z II prawa Kirchhoffa, ile występuje niewiadomych – tworzy się więc układ równań, z którego wyliczane są niewiadome.

## 2.4. Podstawowe pojęcia wykorzystywane w analizie sygnałów

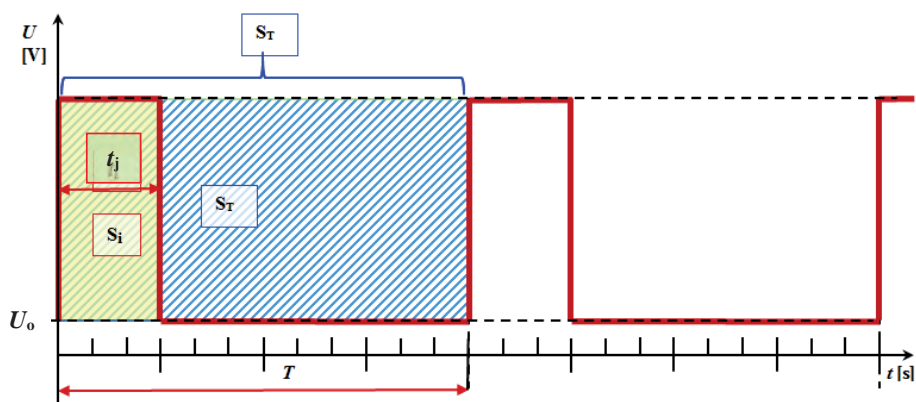
**Współczynnik wypełnienia impulsu**  $k_{wi}$  wyrażany jest w postaci ułamka (z zakresu od 0 do 1) lub w procentach (z zakresu od 0 do 100%) [40, 185]. Jest określany dla sygnałów, które mają charakter okresowy (rys. 2.35). Współczynnik wypełnienia impulsu ma wówczas stałą wartość.



**Rys. 2.35.** Przebieg wyjściowy napięcia 115 V 400 Hz odkształcony do kształtu trójkątnego bez składowej stałej (współczynnik wypełnienia 50%)

Może się on zmieniać, gdy zmienia się sam sygnał, tzn. jeżeli zmienia się szerokość impulsu (rys. 2.36). Arytmetycznie współczynnik wypełnienia  $k_{wi}$  jest to stosunek pola powierzchni impulsu  $S_i$  do pola powierzchni prostokąta  $S_T$  wykreślonego dla jednego okresu przy ekstremalnej amplitudzie zakreślonej przez dany impuls:

$$k_{wi} = \frac{S_i}{S_T} \quad (2.43)$$



**Rys. 2.36.** Przebieg prostokątny impulsów ze składową stałą o współczynniku wypełnienia 25%, gdzie:  $t_i$  – czas trwania impulsu;  $T$  – okres powtarzania impulsu;  $S_i$  – pole powierzchni impulsu;  $S_T$  – pole powierzchni zakreślone przez impuls w ciągu jednego okresu drgań

Dla impulsów prostokątnych wzór ten można uprościć do postaci:

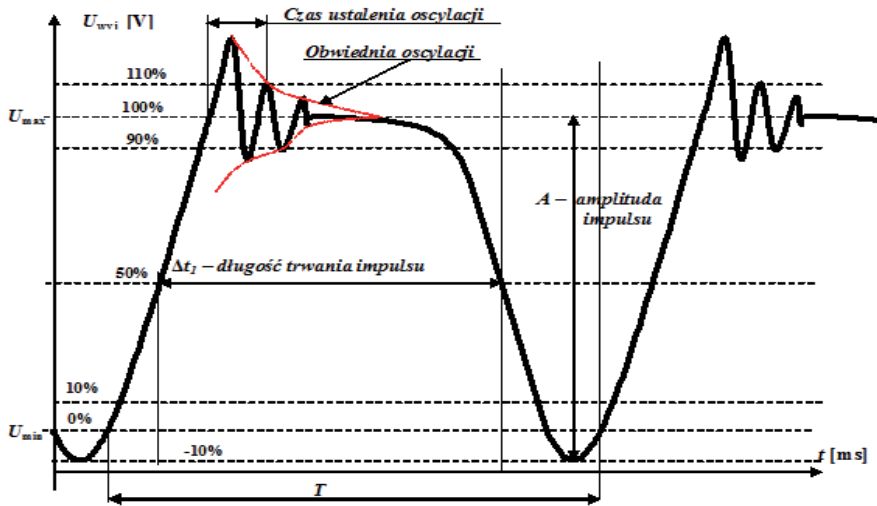
$$k_{wi} = \frac{t_i}{T} \quad (2.44)$$

### Parametry kształtu impulsu (rys. 2.37)

Nachylenie zbocza narastającego – określanego jako iloraz przyrostu parametru od 10% do 90% wartości amplitudy do przyrostu czasu pomiędzy tymi wartościami [141, 185, 201, 211, 212, 216]:

1. Wartość maksymalna amplitudy przeregulowania – wartość maksymalna amplitudy oscylacji.
2. Czas ustalenia oscylacji – czas, po którym amplituda oscylacji zmniejszy się do poziomu 10% wartości maksymalnej amplitudy oscylacji.
3. Spadek poziomu impulsu – wartość obniżenia grzbietu impulsu.
4. Nachylenie zbocza opadającego – określanego jako iloraz przyrostu parametru od 90% do 10% wartości amplitudy do przyrostu czasu pomiędzy tymi wartościami.
5. Czas narastania impulsu dla stałej struktury układu regulacji (niezmiennej stałej czasowej) jest taki sam jak czas opadania. Jednakże w wielu zastosowaniach, np. regulatorach napięcia prądnic pokładowych statków powietrznych, gdzie zależy konstruktorowi na skróceniu stanu przejściowego przy pomocy układu diodowego (pełniącego funkcję „zwrotnicy”) przestrajają się układ regulacji na niższą stałą czasową.





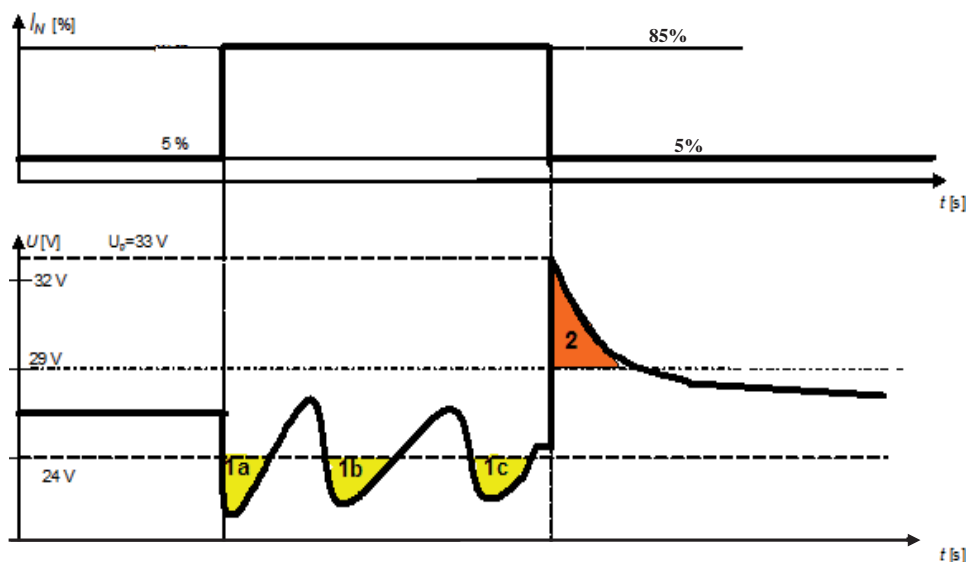
Rys. 2.37. Przebieg prostokątny rzeczywisty – przebieg prostokątny o współczynniku wypełnienia 90%

Widoczne na rys. 2.37 oscylacje są nazywane przez praktyków zjawiskiem dzwonienia, przez analogię do zjawisk występujących w wielu maszyn mechanicznych lub elektromechanicznych, gdzie zwiększone luzy np. w układzie korbowodu i sworznia tłokowego powodują w suwie wydechu zjawisko dzwonienia akustycznego.

Impuls może być generowany przez czujniki informujące o zachowaniu się elementów wykonawczych obiektu sterowania – najczęściej informację tę niesie wartość amplitudy (np. wartość zwiększającego się kąta wychylenia statecznika poziomego czujnik przekształca na impulsy o zwiększającej się amplitudzie); czasami informację tę niesie także współczynnik wypełnienia, szerokość impulsu lub zmiany okresu  $T$ :

1. Wygenerowany przez układy elektroniczne w celu wysterowania obiektu – przekaz danych w postaci zmiany amplitudy, szerokości impulsu, współczynnika wypełnienia.
2. W wyniku skokowego zwiększenia albo zmniejszenia obciążenia urządzenia, nazywanego skokiem jednostkowym [12, 25, 32, 34, 81, 89, 90, 98] – występująca zmiana dwóch poziomów przebiega teoretycznie w nieskończenie krótkim czasie; w praktyce lotniczej w badaniach pokładowych węzłów elektroenergetycznych (etatowo zaopatrzonego w układ automatycznej regulacji napięcia) stosuje się skokową zmianę natężenia prądu obciążenia od  $5\% I_N$  do  $85\% I_N$  i do  $5\% I_N$  (rys. 2.38a) lub od  $10\% I_N$  do  $180\% I_N$  i z powrotem do  $10\% I_N$ , tj. dla prądnicy

o mocy 18 kW (Mi-8) wynoszą odpowiednio od 30 A do 430 A i z powrotem do 30 A lub od 60 A do 960 A i z powrotem do 60 A. Obserwuje się wówczas parametry generowanych impulsów na wyjściu prądnicy (rys. 2.38b). Wartości amplitudy oraz czas trwania oscylacji muszą zamknąć się w ściśle określonych limitach wg normy NO-15-A200:2016 [141] – dla prądnicy prądu stałego o mocy 18 kW wartość amplitudy oscylacji nie może przekroczyć 80 V, a czas trwania oscylacji 20 ms.

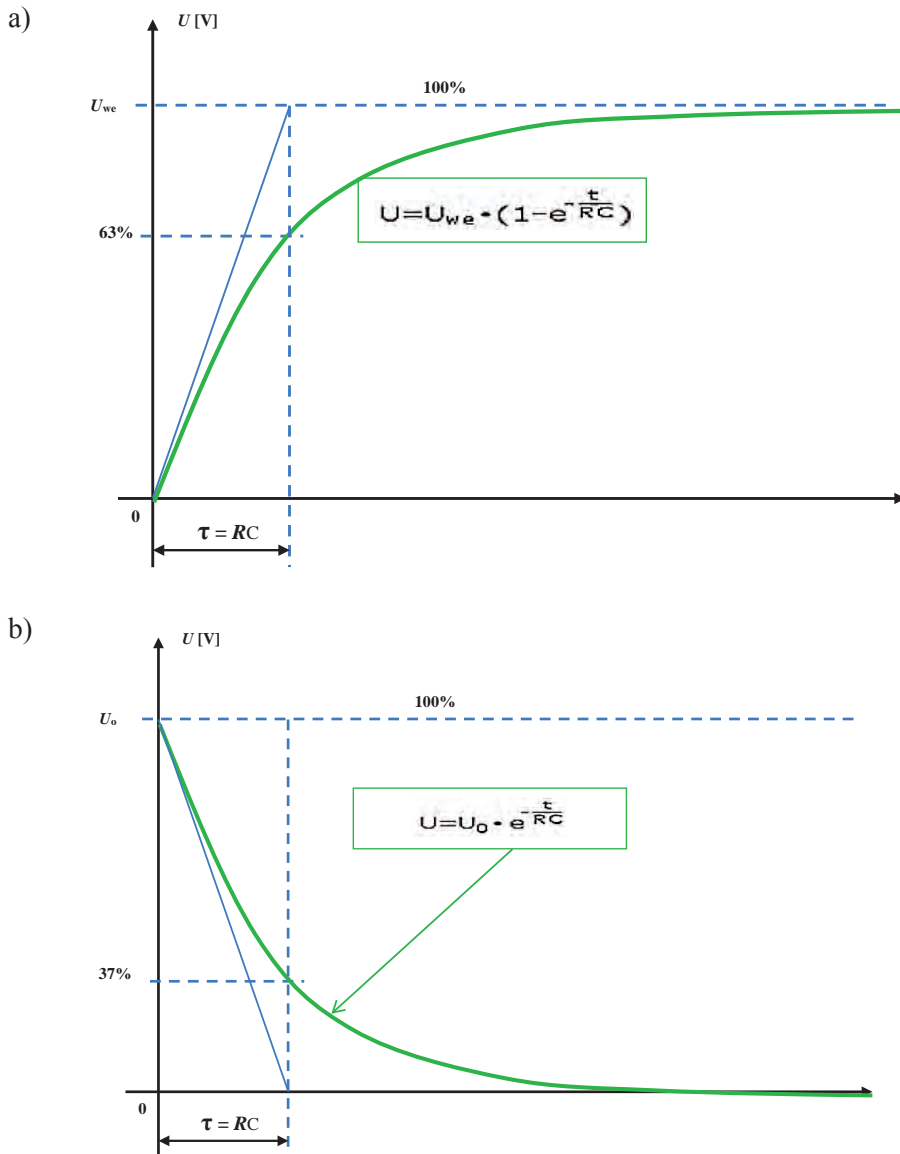


**Rys. 2.38.** Stany przejściowe prądnicy prądu stałego – odpowiedź na skokowe zaciążenie (rysunek poglądowy): a) zwiększenie obciążenia z poziomu 5% wartości prądu znamionowego do 85% oraz skokowe zmniejszenie obciążenia z poziomu 85% do poziomu 5%; b) parametry generowanych impulsów na wyjściu prądnicy

Czas trwania stanu nieustalonego szacuje się na 3 do 5 stałych czasowych [12, 34, 81, 150, 152].

**Stała czasowa** – jest to wielkość o wymiarze czasu, oznaczana grecką literą  $\tau$  lub  $T$  – nie należy mylić z symbolem okresu drgań (wyrażaną łacińską literą  $T$ ). Aby uniknąć pomyłek autorzy będą starali się w dalszej części używać oznaczenia  $\tau$ .

**Stała czasowa** – jest to czas, po którym składowa przejściowa maleje  $e$ -krotnie względem swojej wartości początkowej. W literaturze na temat maszyn elektrycznych  $\tau = RL$  oraz  $\tau = RC$  (rys. 2.39).



**Rys. 2.39.** Przebieg napięcia: a) ładowania; b) rozładowania kondensatora (przez rezystor  $R$ ) jako przykład poglądowy graficznego wyznaczenia stałej czasowej



# 3

## OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA LUE – BUDOWA I WYMAGANIA

### 3.1. Budowa i funkcje typowego układu energoelektrycznego

Układy elektroenergetyczne mają za zadanie dostarczanie energii elektrycznej odpowiedniej (określonej normami) jakości do pokładowych odbiorników energii elektrycznej, we wszystkich warunkach lotu (adekwatnie do potrzeb) [113, 115, 137, 141, 210]. Z konstrukcyjnego punktu widzenia składają się one z kluczowych komponentów przedstawionych na poniższym rysunku (rys. 3.1):

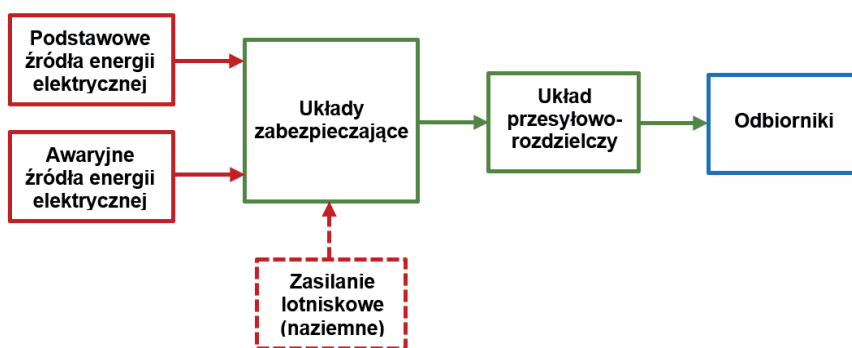
1. źródła energii elektrycznej, np. prądnicy, wraz z układami zabezpieczającymi jego pracę (regulator napięcia, automat przeciwprzebieciowy);
2. sieci przesyłowej (okablowanie, szyny rozdzielcze, bezpieczniki i inne układy zabezpieczające przed przeciążeniem odbiorników, aparatury komutacyjnej w postaci: przełączników, włączników, wyłączników, styczników, przekładników);
3. odbiorników energii elektrycznej.

Każdy system energetyczny musi spełniać (oddzielne) wymagania normatywne w następujących warunkach zasilania:

1. normalnych – najwyższe standardy normatywne zarówno dla stanów ustalonych, jak i przejściowych;
2. nienormalnych – w chwili zadziałania układów zabezpieczeń, np. w trakcie procesu przepalania się bezpiecznika z powodu zwarcia w odbiorniku energii elektrycznej;
3. awaryjnych – gdy główne źródło zasilania zostało uszkodzone – załączane jest awaryjne źródło zasilania – obowiązują obniżone standardy jakościowe – odłączane są ręcznie lub automatycznie niektóre odbiorniki mocy – pracują tylko systemy niezbędne do bezpiecznego dotarcia do lądowiska.

Każdy statek powietrzny powinien mieć co najmniej jedno awaryjne źródło energii elektrycznej zapewniające zasilanie odbiorników niezbędnych do zasilania podstawowych układów pilotażowo-nawigacyjnych (niezbędnych do bezpiecznego dotarcia do lotniska) – dla baterii akumulatorowej przyjmuje się czas pracy 30 min [141]. Dla większych statków powietrznych tworzy się zwykle kilka systemów awaryjnego zasilania energią elektryczną:

- a) **APU** – pomocniczy zespół energetyczny (*auxiliary power unit*);
- b) **EPU** – awaryjny zespół energetyczny (*emergency power unit*);
- c) **RAT** – awaryjna turbina powietrza (*ram air turbine*).



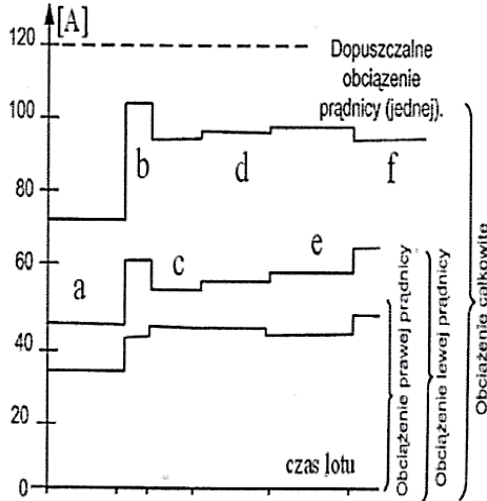
**Rys. 3.1.** Ogólny schemat blokowy układu elektroenergetycznego statku powietrzego

### Pierwotne pokładowe źródła energii elektrycznej prądu stałego

Moc zainstalowanych pokładowych źródeł energii zależy od mocy obciążających je odbiorników w poszczególnych fazach lotu oraz warunków atmosferycznych, jak również od stanów awaryjnych określonych źródeł i przy zasilaniu awaryjnym. Analizy takiej dokonuje się w trakcie prac projektowych oraz pomiarów podczas prób w locie. Sprawdzane są wówczas następujące dane:

- a) moc układu pierwotnego,
- b) moc wtórnych źródeł energii,
- c) wartość prądów zwarcia,
- d) moc znamionowa odbiorników,
- e) dopuszczalne spadki napięcia w sieci,
- f) warunki pracy odbiorników,
- g) współczynnik równoczesności,
- h) czas pracy odbiorników,
- i) moc odbiorników określonych rodzajów energii.

Przykładowy wykres obciążenia źródeł prądu statku powietrznego przedstawia rys. 3.2.



**Rys. 3.2.** Wykres obciążenia źródeł prądu podczas: a) przygotowania lotu; b) uruchomienia zespołu napędowego; c) kołowania na start; d) startu; e) lotu po trasie; f) lądowania

W pokładowych układach zasilania pierwotnymi źródłami zasilania energii elektrycznej prądu stałego są: prądnice prądu stałego – obcowzbudne lub zespolone, oraz bocznikowe.

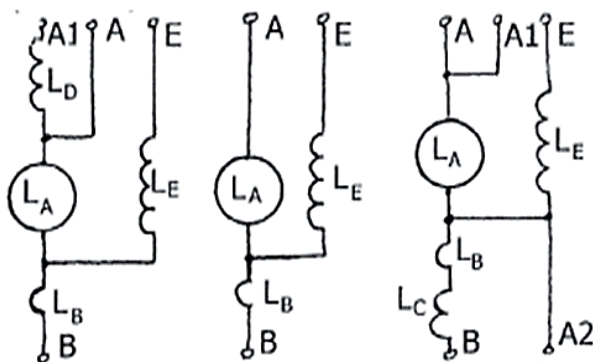
Stosowanie prądnic prądu stałego jako źródeł energii elektrycznej w sieci pokładowej wynika z jakości generowanej energii oraz zalet eksploatacyjnych, do których należą:

- mała wrażliwość na zmiany prędkości obrotowej twornika,
- odporność na przeciążenia i zwarcia,
- łatwość pracy równoległej z baterią akumulatorową,
- niska pulsacja wytwarzanego napięcia (ważna przy zasilaniu elektroniki),
- łatwość przetwarzania w urządzeniach elektronicznych na inne rodzaje energii.

Prądnice bocznikowe (komutatorowe) mogą być użytkowane do określonej wysokości (ze względu na pracę zespołu komutatorowo-szczotkowego) i są obecnie zastępowane przez prądnice zespolone z prostownikiem półprzewodnikowym. Pokładowe prądnice prądu stałego napędzane są przez silnik statku powietrznego za pośrednictwem skrzynki napędów [143, 163, 214, 247], a to oznacza, że ich prędkość obrotowa wynosi ok. 9000 obr/min dla silników turboodrzutowych lub ok. 4000 obr/min dla silników tłokowych. Prądnice lotnicze charakteryzują się wysoką

mocą jednostkową:  $p_j = 0,3-1,4$  [kg/kW], co powoduje, że urządzenie jest bardzo obciążone: elektrycznie, magnetycznie, ciepłnie i mechanicznie.

Podstawowe elementy konstrukcyjne prądnicy prądu stałego to: stojan z uzwojeniami wzbudzenia, komutacyjnym i kompensacyjnym, komutator oraz zespół szczotkowy, twornik z uzwojeniem – pełniące funkcje elektryczne, oraz korpus, gniazda łożyskowe, wentylator, wał – pełniące funkcje mechaniczne. Podstawowe schematy prądnicy prądu stałego przedstawia rys. 3.3.



**Rys. 3.3.** Podstawowe schematy prądnicy prądu stałego, gdzie:  $L_A$  – uzwojenie twornika;  $L_E$  – bocznikowe uzwojenie wzbudzenia;  $L_D$  – szeregowe uzwojenie wzbudzenia;  $L_B$  – uzwojenie komutacyjne;  $L_C$  – uzwojenie kompensacyjne; A – zacisk plus wyjścia prądnicy (+); A1 – zacisk zasilania w zakresie pracy przy rozruchu; E – zacisk uzwojenia wzbudzenia; A2 – zacisk przyłączenia uzwojenia wyrównawczego RN

Stojan stanowi pakiet złożony z wykrojonych o określonym kształcie cienkich blach wykonanych ze stali elektrotechnicznej wciśnięty w korpus. Na rdzeniach biegunów umieszczone są uzwojenia wzbudzenia w postaci połączonych szeregowo cewek o wymaganym przekroju drutu w izolacji emaliowej.

Przy założeniu, że sprawność bocznikowych prądnicy prądu stałego wynosi ok. 85%, można dokonać bilansu mocy dla prądnicy:

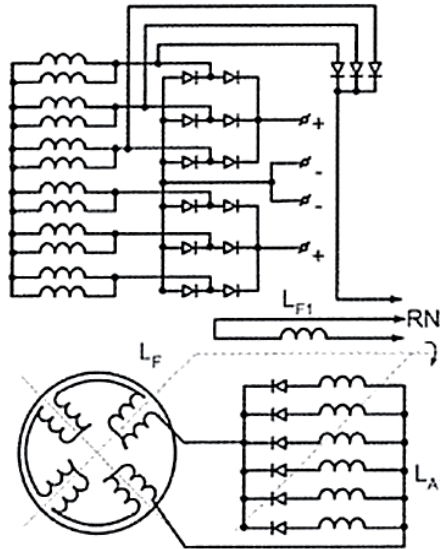
- moc znamionowa  $12 \text{ kW} = 30 \text{ V} * 400 \text{ A}$ ;
- moc indukowana ok.  $14 \text{ kW} = 35 \text{ V} * 400 \text{ A}$ ;
- moc strat ok.  $3 \text{ kW} = 5 \text{ V} * 400 \text{ A}$ .

Wynika stąd, że straty mocy w prądnicach z komutatorem mechanicznym są zbyt duże. Obecnie prądnice z komutatorem mechanicznym są zastępowane przez prądnice z komutatorem półprzewodnikowym.

Prądnice prądu stałego z komutatorem półprzewodnikowym wykonane są jako trójfazowe prądnice synchroniczne obcowzbudne lub z wbudowaną wzbudnicą.



Maszyna ta, to trójfazowa prądnica synchroniczna (Vac) z uzwojeniem twornika połączonym w trójkąt lub w gwiazdę i zamontowanym na wyjściu twornika trójfazowym prostownikiem półprzewodnikowym (rys. 3.4).



**Rys. 3.4.** Schemat zespolonej prądnicy prądu stałego z komutatorem półprzewodnikowym

Dla zmniejszenia prądu w uzwojeniach twornika i w układzie prostowniczym przedstawiona na rys. 3.4 zespolona prądnica prądu stałego posiada połączone równoległe dwa trójfazowe uzwojenia twornika. Obecnie prądnice prądu stałego dużej mocy (dla obciążeń w zakresie 300–600 A) mają wbudowaną wzbudnicę, która jest prądnicą synchroniczną trójfazową ze wzbudzeniem magnesami stałymi, a jej obciążenie stanowi uzwojenie wzbudzenia prądnicy. Prądnice prądu stałego z komutatorem półprzewodnikowym nie mają wad prądnic komutatorowych i związanych z tym niekorzystnych zjawisk w procesach wzbudzenia i komutacji. Brak szczotek w urządzeniu nie ogranicza wysokości lotu statku powietrznego, umożliwi również stosowanie chłodzenia cieczą. Prądnice z komutatorem półprzewodnikowym są maszynami nieodwracalnymi (praca, silnik-prądnica), co jest cechą prądnic z komutatorem mechanicznym. Prądnice z komutatorem półprzewodnikowym ze względu na swoje zalety wypierają poprzedniczki w pokładowych układach zasilania prądem stałym.

Zaletą tych prądnic jest to, że pracują przy zmiennej prędkości obrotowej (bez NSP), zapewniają dużą moc prądu o napięciu 28 V (DC), który może być przetwarzany elektronicznie na inne rodzaje energii elektrycznej. Zespolone prądnice prądu

stałego łączą zalety trójfazowej prądnicy prądu przemiennego i prostownika półprzewodnikowego. Konstrukcyjnie różnią się one od prądnic z komutatorem szczotkowym tym, że uzwojenie twornika (czyli wyjście) umieszczone jest na stojanie.

## **3.2. Charakterystyka wymagań oraz obowiązujących norm dotyczących układów elektroenergetycznych statków powietrznych**

### **3.2.1. Podstawowe definicje i wymagania dotyczące LUE**

Podstawowe definicje dotyczące LUE przyjęto z Normy Obronnej NO-15-A200:2016 *Wojskowe statki powietrzne. Pokładowe układy zasilania elektrycznego. Wymagania i badania* [141].

W niniejszej Normie Obronnej określono wymagania dotyczące nowo opracowywanych naziemnych układów zasilania elektrycznego wojskowych statków powietrznych w zakresie jakości energii elektrycznej stanów ustalonych i przejściowych. Norma dotyczy również elementów związanych z konstrukcją układu zasilania elektrycznego, istotnych z punktu widzenia militarnego zastosowania naziemnego układu zasilania elektroenergetycznego. Obejmuje układy zasilania elektrycznego o mocy znamionowej nie mniejszej niż 18 kW dla naziemnych układów zasilania elektrycznego wojskowych statków powietrznych prądu stałego oraz nie mniejszej niż 30 kVA dla trójfazowych układów prądu przemiennego.

Norma ujmuje także niektóre zagadnienia związane ze zjawiskami elektrycznymi występującymi poza układem zasilania elektrycznego WSP, które są istotne dla poprawności jego działania oraz niezawodności i bezpieczeństwa obsługi naziemnych układów zasilania elektrycznego.

W niektórych punktach Normy Obronnej przedstawiono dwa poziomy wymagania:

- a) znamionowe – odpowiadające parametrom normatywnym NATO oraz EN (m.in. EN-2282:1996) [83];
- b) dopuszczalne – odpowiadające parametrom normatywnym ISO (m.in. ISO-1540:2006) [52].

**Terminy i definicje** zawarte w normie NO-15-A200:2016 [141] przedstawiono poniżej.

**Układ zasilania elektrycznego** – zespół obejmujący główne i awaryjne źródła energii elektrycznej oraz układy rozdziału energii elektrycznej.

**Układ rozdziału energii elektrycznej** – zespół urządzeń przesyłających energię elektryczną z głównego i/lub awaryjnego źródła energii elektrycznej do odbiorników energii elektrycznej (1.3.13) zawierający urządzenia sterowania i zabezpieczenia.

**Główny punkt rozdzielczy sieci** – wspólne (o jednakowym potencjale) miejsce podłączenia przewodów elektrycznych:

- głównego źródła energii elektrycznej i awaryjnego źródła energii elektrycznej;
- odbiorników energii elektrycznej.

**Moc znamionowa układu zasilania elektrycznego** – suma mocy znamionowych wszystkich pierwotnych źródeł energii elektrycznej, wytwarzających energię elektryczną jednego rodzaju.

**Główne źródło energii elektrycznej** – prądnica napędzana przez silnik wojskowego naziemnego układu zasilania elektroenergetycznego albo przetwornik energii elektrycznej niebędący częścią odbiornika energii elektrycznej.

**Awaryjne źródło energii elektrycznej** – prądnica, przetwornik energii elektrycznej lub bateria akumulatorowa, zapewniające zasilanie odbiorników energii elektrycznej w przypadku awarii głównego źródła energii elektrycznej.

**Normalne działanie układu zasilania elektrycznego** – działanie układu zasilania elektrycznego w warunkach braku awarii.

**Normalne warunki zasilania odbiornika energii elektrycznej** – warunki zasilania odbiornika energii elektrycznej w stanie ustalonym podczas normalnego działania układu zasilania elektrycznego.

**Nienormalne działanie układu zasilania elektrycznego** – działanie układu zasilania elektrycznego w stanie ustalonym, objawiające się pogorszeniem się parametrów napięcia lub częstotliwości o czasie trwania ograniczonym przez obwody zabezpieczające.

**Awaryjne działanie układu zasilania elektrycznego** – działanie układu zasilania elektrycznego, w przypadku gdy zostaje wyłączone główne źródło energii elektrycznej i zostaje załączone awaryjne źródło energii elektrycznej.

**Awaryjny układ zasilania elektrycznego** – układ zasilania elektrycznego przeznaczony do zasilania odbiorników energii elektrycznej w czasie awarii głównego źródła energii elektrycznej.

**Stan ustalony** – warunki występujące przy ustalonym obciążeniu, w przypadku normalnego działania układu zasilania elektrycznego.

**Odbiornik energii elektrycznej** – urządzenie, zespół lub grupa urządzeń zasilanych energią elektryczną.

**Napięcie fazowe** – napięcia prądu przemiennego, mierzone między zaciskiem fazowym a zaciskiem neutralnym danego elementu układu zasilania elektrycznego albo odbiornika energii elektrycznej.

**UWAGA:** Jeśli nie zaznaczono inaczej, podaje się wartość skuteczną napięcia fazowego.

**Średnia wartość napięć fazowych** – suma arytmetyczna napięć fazowych podzielona przez liczbę faz.

**Stan nieustalony** – krótkotrwale zaburzenie stanu ustalonego.

**UWAGA:** Stany nieustalone podzielono na dwie grupy: impulsy napięciowe stanu przejściowego i impulsy szpilkowe. Impulsy napięciowe dzielą się na:

- przepięciowe;
- zanikowe.

**Impuls napięciowy** zmiana wartości amplitudy napięcia (wynikająca ze zmiany natężenia prądu pobieranego z układu zasilania elektrycznego) o czasie trwania nie mniejszym niż 1 ms.

**Impuls szpilkowy** zmiana wartości napięcia (wynikająca z włączenia, wyłączenia lub przełączenia obwodów elektrycznych) o czasie trwania poniżej 1 ms, o amplitudzie:

- dla obwodów prądu stałego ( $U_N = 28 \text{ V}$ ) od 45 V do 600 V;
- dla obwodów prądu przemiennego ( $U_N = 115 \text{ V}$ ,  $f_N = 400 \text{ Hz}$ ) od 180 V do 600 V.

**Całkowita zawartość harmonicznych** – stosunek wartości skutecznej harmonicznych do wartości skutecznej napięcia fazowego.

**Modulacja częstotliwości** – cykliczna lub losowa zmiana częstotliwości podczas działania układu zasilania elektrycznego w warunkach stanu ustalonego.

**Częstotliwość powtarzania modulacji** – odwrotność okresu przebiegu modulującego.

**Dryft częstotliwości** – powolna zmiana poziomu częstotliwości w stanie ustalonym o okresie nie mniejszym niż 5 s.

**Obwiednia napięcia** – cykliczna lub losowa zmiana wartości szczytowej napięcia prądu przemiennego układu zasilania elektrycznego w stanie ustalonym.

**Harmoniczne obwiedni napięcia modulującego** – składowe amplitudowe rozkładu harmonicznych obwiedni napięcia.

**Pulsacja napięcia stałego** – składowa zmienna napięcia wyjściowego prądnicy prądu stałego – cykliczna i/lub losowa zmiana (wahanie) napięcia prądu stałego względem wartości średniej napięcia podczas działania układu zasilania elektrycznego w warunkach stanu ustalonego.

**Równoważna funkcja skokowa** – prostokątne impulsy zastępcze napięcia stałego albo prostokątne impulsy zastępcze obwiedni przebiegu napięcia przemiennego, odzwierciedlające impulsy napięciowe.

**Kanał układu zasilania elektrycznego** – autonomiczna część układu zasilania elektrycznego, zawierająca główne źródło energii elektrycznej, awaryjne źródło energii elektrycznej, układ rozdziału energii elektrycznej, odbiorniki energii elektrycznej oraz urządzenia regulacji i zabezpieczenia.

**Punkt regulacji napięcia** – miejsce podłączenia obwodów pomiarowych regulatorów napięcia głównego źródła energii elektrycznej.

**Pierwotne źródło energii elektrycznej** – prądnica napędzana jednym z silników naziemnego układu zasilania elektroenergetycznego albo bateria akumulatorowa.

**Wtórne źródło energii elektrycznej** – przetwornik energii elektrycznej będący jednocześnie odbiornikiem energii elektrycznej i głównym źródłem energii elektrycznej.

**Instalacja pomiarowo-diagnostyczna układu zasilania elektrycznego** – zespół rejestratorów, wskaźników, analizatorów, umożliwiający ocenę stanu technicznego poszczególnych elementów układu zasilania elektrycznego.

**Prąd powrotny** – prąd płynący od zacisku „-” (w przypadku prądu stałego) albo od zacisku neutralnego (w przypadku prądu przemiennego) odbiornika energii elektrycznej, poprzez metalowy kadłub, do pierwotnego źródła energii elektrycznej albo wtórnego źródła energii elektrycznej.

**Elektryczna linia zasilania** – zespół przewodów, aparatura komutacyjna i inne elementy układu zasilania elektrycznego pomiędzy zaciskiem pierwotnego albo wtórnego źródła energii elektrycznej, a zaciskiem odbiornika energii elektrycznej.

**Podstawowy przewodnik odgromowy** – element przewodzący montowany na nieprzewodzących elementach poszycia statku powietrznego, układany w kierunku potencjalnej drogi przemieszczania się wyładowania atmosferycznego.

**Krańcowa płyta odgromowa** – płaskownik z materiału przewodzącego umieszczony na krawędzi spływu niemetalowego skrzydła lub usterzenia samolotu albo na krawędzi spływu niemetalowego poszycia śmigła śmigłowca.

### 3.2.2. Charakterystyka typowych napięć oraz wymagań i norm jakościowych

Układ zasilania elektrycznego statku powietrznego powinien zapewniać na zaciskach zasilania odbiorników energii elektrycznej jakość energii elektrycznej spełniającą wymagania w odniesieniu do całości warunków działania i otoczenia:

- a) we wszystkich przewidzianych w instrukcji eksploatacji warunkach temperaturowych,
- b) na wszystkich przewidzianych w instrukcji eksploatacji wysokościach lotu,
- c) w przypadku awarii głównych źródeł zasilania elektrycznego,
- d) we wszystkich możliwych konfiguracjach układu rozdziału energii elektrycznej: dla normalnego działania układu zasilania elektrycznego, dla nie-normalnego działania układu zasilania elektrycznego, dla awaryjnego działania układu zasilania elektrycznego,
- e) we wszystkich przewidzianych w instrukcji eksploatacji (w tym ekstremalnych) poziomów prędkości obrotowych silnika głównego,
- f) we wszystkich dopuszczalnych kombinacjach włączeń i wyłączeń odbiorników energii elektrycznej, źródeł oraz układu rozdziału energii elektrycznej,
- g) dla maksymalnego czasu lotu,
- h) z uwzględnieniem procesów starzeniowych.

Zgodnie z NO-15-A200:2016 [141] pierwotne lub wtórne źródła energii elektrycznej powinny zasilac układ odbiorników energii elektrycznej statków powietrznych. Wyróżnia się dwa rodzaje napięć:

- przemienne, o wartości znamionowej częstotliwości  $f_N = 400$  Hz,
- stałe.

Na WSP wyróżnia się następujące wartości napięć:

1. Przemienne trójfazowe 115/200 V, 400 Hz – wartość znamionowa napięcia fazowego  $U_N = 115$  V. Układ zasilania elektrycznego prądu przemiennego powinien być układem trójfazowym, czteroprzewodowym, połączonym w gwiazdę o kolejności faz A – B – C (patrz rys. 3.5). Zacisk neutralny każdego źródła energii elektrycznej prądu przemiennego powinien być podłączony do masy głównej (MG) WSP za pomocą przewodu neutralnego (N).
2. Stałe 28 V (wartość znamionowa  $U_N = 28$  V). Zacisk „-” każdego źródła energii elektrycznej prądu stałego powinien podłączony do masy WSP za pomocą przewodu powrotnego (oznaczenie na przewodzie M).
3. Przemienne jednofazowe – 115 V (albo 26 V), 400 Hz – powinno spełniać wymagania dotyczące napięcia między przewodem fazowym a przewodem neutralnym, określone w wymaganiach [141] dla obwodu prądu przemiennego trójfazowego. Zacisk neutralny każdego źródła energii elektrycznej prądu przemiennego powinien być podłączony do masy WSP za pomocą przewodu neutralnego; w niektórych konstrukcjach WSP odstępuje się niekiedy od tego, aby zwiększyć odporność systemu elektroenergetycznego na przestrzelenie i zwarcia fazy do masy statku powietrznego (do kadłuba) z tym związane – w chwili przywarcia przewodu fazowego układu elektroenergetycznego do masy obra-

ca się kątowno struktura fazowa systemu, ale nie ma przeciężenia prądowego – punkt przywarcia staje się „przypadkowym” miejscem zerowym tego systemu pokładowego prądu przemiennego.

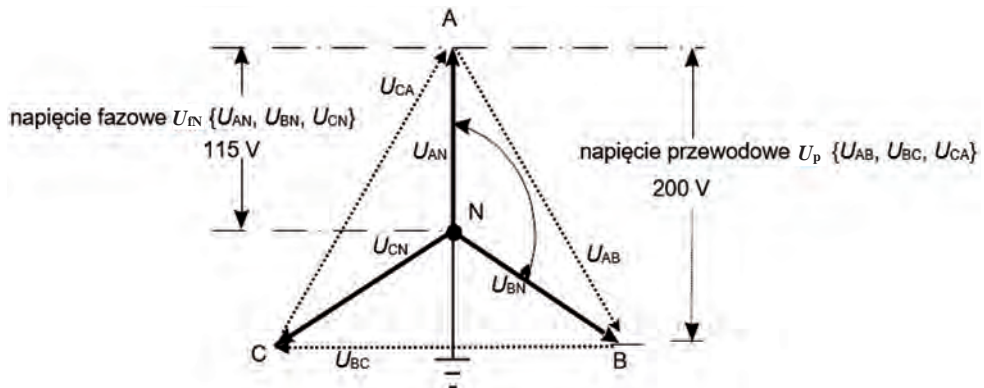
4. Specjalne – parametry napięciowe należy przeliczać z proporcji pomiędzy wartością znamionową skuteczną napięcia znamionowego specjalnego a odpowiadającego mu napięcia (tego samego rodzaju) z grupy podstawowych wartości napięć.

**UWAGA:** Pojęcie „napięcie” ( $U$ ) bez dodatkowych określeń należy rozumieć jako „wartość skuteczną napięcia” ( $U_{RMS}$ ).

Dla przebiegów sinusoidalnych uznaje się oznaczenia i zależności:

- wartość szczytowa napięcia  $U_{p-0} = 1,41 \times U_{RMS}$ ,
- wartość międzyszczytowa napięcia  $U_{pp} = 2 \times U_{p-0}$ .

Dopuszcza się inne wartości napięć i częstotliwości zasilania określonej grupy odbiorników energii elektrycznej z wtórnego źródła energii elektrycznej.



**Rys. 3.5.** Schemat wektorowy kolejności faz i oznaczeń

Powinno być zapewniona możliwość jednoznacznej identyfikacji napięć układu zasilania elektrycznego:

- wartości napięć zasilania powinny być jednoznacznie opisane w dokumentacji technicznej i eksploatacyjnej WSP,
- obwody poszczególnych napięć, a zwłaszcza gniazda wtykowe zasilania napięciowego, powinny mieć wyraźne i jednoznaczne oznaczenia wartości napięcia, umieszczone w miejscach widocznych podczas wykonywania czynności obsługowych.

Układ zasilania elektrycznego powinien zapewniać na zaciskach zasilania odbiorników energii elektrycznej jakość energii elektrycznej spełniającą wy-

magania w odniesieniu do całości warunków działania i otoczenia, określonych w NO-15-A200:2016, p. 2.2.1:

- a) we wszystkich przewidzianych w instrukcji eksploatacji warunkach temperaturowych;
- b) na wszystkich przewidzianych w instrukcji eksploatacji wysokościach lotu;
- c) w przypadku awarii głównych źródeł zasilania elektrycznego;
- d) we wszystkich możliwych konfiguracjach układu rozdziału energii elektrycznej:
  - dla normalnego działania układu zasilania elektrycznego,
  - dla nienormalnego działania układu zasilania elektrycznego,
  - dla awaryjnego działania układu zasilania elektrycznego;
- e) we wszystkich przewidzianych w instrukcji eksploatacji (w tym ekstremalnych) poziomów prędkości obrotowych silnika głównego;
- f) we wszystkich dopuszczalnych kombinacjach włączeń i wyłączeń odbiorników energii elektrycznej, źródeł oraz układu rozdziału energii elektrycznej;
- g) dla maksymalnego czasu lotu;
- h) z uwzględnieniem procesów starzeniowych.

### **3.2.2.1. Charakterystyki typowych napięć prądu przemiennego o stabilizowanej częstotliwości**

**Charakterystyki stanu ustalonego** napięć prądu przemiennego o stabilizowanej częstotliwości określa NO-15-A200:2016, p. 2.3.2 [141].

Zgodnie z [141] p. 2.3.1 **Postanowienia ogólne** niniejszej normy:

Charakterystyki napięcia dotyczą parametrów energii elektrycznej na zaciskach odbiorników energii elektrycznej.

Charakterystyki napięcia(-owe) dotyczą wielkości napięć fazowych.

Wszystkie wartości napięcia prądu przemiennego (jeśli w opisie szczegółowym nie określono inaczej) są wartościami skutecznymi.

W stanach przejściowych wartości skuteczne napięcia są przeliczane (poprzez podzielenie wartości szczytowej przez pierwiastek z liczby dwa) z zarejestrowanych wartości szczytowych (maksymalnych) bez uwzględnienia zniekształceń (odchyłeń od kształtu sinusoidy).

Zgodnie z [141] p. 2.3.2.1 **Napięcie**:

Wartość skuteczna napięć fazowych i wartość średnia z trzech faz powinna mieścić się w wartościach granicznych określonych w tabelach 3.1, 3.2 i 3.3.



**Tabela 3.1**

**Przedziały zmian napięcia prądu przemiennego w układzie zasilania elektrycznego – parametry dopuszczalne [141]**

Urządzenie(-a) prądu przemiennego	Główne źródło energii elektrycznej [V]	Awaryjne źródło energii elektrycznej [V]
Wartość napięcia na szynie źródła energii elektrycznej (w punkcie regulacji)	od 112 do 119	od 108 do 122
Łączny spadek napięcia na przewodach stycznikach, szynach itp. pomiędzy źródłem energii elektrycznej a odbiornikiem energii elektrycznej w stanie ustalonym	od – 4 do 0	od – 4 do 0
Przedziały zmian wartości średniej z trzech faz w stanie ustalonym przy normalnym działaniu układu zasilania elektrycznego (NSSL)	od 108 do 118	nie określa się
Przedziały zmian procesu załączenia–wyłączenia w stosunku do przedziałów zmian przy normalnym działaniu układu zasilania elektrycznego (NSSL)	od – 10 do +14	nie określa się
Przedziały zmian w stanie ustalonym przy nienormalnym działaniu układu zasilania elektrycznego (ASSL)	od 98 do 132	nie określa się
Przedziały zmian w stanie ustalonym przy awaryjnym działaniu układu zasilania elektrycznego (ESSL)	nie określa się	od 104 do 122

**Tabela 3.2**

**Przedziały zmian napięcia prądu przemiennego energii elektrycznej w stanie ustalonym na zaciskach odbiorników – parametry dopuszczalne [141]**

Lp.	Jedna faza			Średnia z trzech faz		
	warunki normalne (NSSL) [V]	warunki nienormalne (ASSL) [V]	warunki awaryjne (ESSL) [V]	warunki normalne (NSSL) [V]	warunki nienormalne (ASSL) [V]	warunki awaryjne (ESSL) [V]
1	od 108 do 119	od 98 do 132	od 104 do 122	od 109,5 do 117,5	od 100 do 120	od 106 do 120
2	od 108 do 122	od 98 do 132	od 104 do 122	od 109,5 do 120,0	od 100 do 120	od 106 do 120
Wiersz 1 zawiera wartości zalecane, wiersz 2 – wartości dopuszczalne warunkowo w przypadku konieczności przygotowania układu zasilania elektrycznego do krótkotrwałego przeciążenia (przekroczenia mocy znamionowej źródła), np. dodatkowo zamontowaną aparaturą specjalną.						

**Tabela 3.3**

**Przedziały zmian napięcia prądu przemiennego na zaciskach odbiorników energii elektrycznej – parametry znamionowe [141]**

Jedna faza			Średnia z trzech faz		
warunki normalne (NSSL) [V]	warunki nienormalne (ASSL) [V]	warunki awaryjne (ESSL) [V]	warunki normalne (NSSL) [V]	warunki nienormalne (ASSL) [V]	warunki awaryjne (ESSL) [V]
od 108 do 118	od 98 do 132	od 102 do 122	od 109,5 do 116,5	od 100 do 120	od 104 do 120

Zgodnie z [141] p. 2.3.2.2 **Przesunięcie fazowe:**

Przesunięcie między odpowiednimi fazami przebiegów napięć trójfazowych (rys. 3.5) powinno wynosić 120° z odchyłkami zgodnie z tabelą 3.4.

**Tabela 3.4**

**Wartości odchyłek kąta przesunięcia fazowego**

Warunki normalne NSSL		Warunki awaryjne (ESSL)	Warunki nienormalne (ASSL)
Znamionowe	Dopuszczalne		
± 2°	± 4°	± 4°	-

Zgodnie z [141] p. 2.3.2.3 **Asymetria napięć trójfazowych:**

Maksymalna różnica między poszczególnymi napięciami fazowymi nie powinna przekraczać 3 V w przypadku normalnego działania układu zasilania elektrycznego i 4 V w przypadku awaryjnego działania układu zasilania elektrycznego, zgodnie z tabelą 3.5.

**Tabela 3.5**

**Wartości asymetrii napięć [141]**

Warunki normalne (NSSL)		Warunki awaryjne (ESSL)	Warunki nienormalne (ASSL)
Znamionowe	Dopuszczalne		
3 V	4 V	4 V	-

Zgodnie z [141] p. 2.3.2.4 **Kształt krzywej napięcia trójfazowego 3x115/200 V, 400 Hz w sieci zasilanej z prądu:**

Kształt przebiegu napięcia powinien być taki, aby zostały spełnione niżej wymienione kryteria:

a) parametry znamionowe:

- współczynnik amplitudy  $k_a$  od 1,31 do 1,51,
- całkowita zawartość harmonicznych nie powinna przekraczać poziomu 5%,
- wartość dowolnej harmonicznej w stosunku do pierwszej (podstawowej) harmonicznej nie powinna przekraczać poziomu 3%,
- odchylenie kształtu krzywej napięcia przemiennego od kształtu sinusoidy ( $u(t) = \sin\Theta$ ) – nie powinno przekraczać wartości określonej wzorem:

$$\Delta u = (15,5 + 5,5 \times \cos\Theta) \quad (3.1)$$

gdzie:  $\Theta$  – wartość kąta fazowego wyrażona w radianach;

b) parametry dopuszczalne:

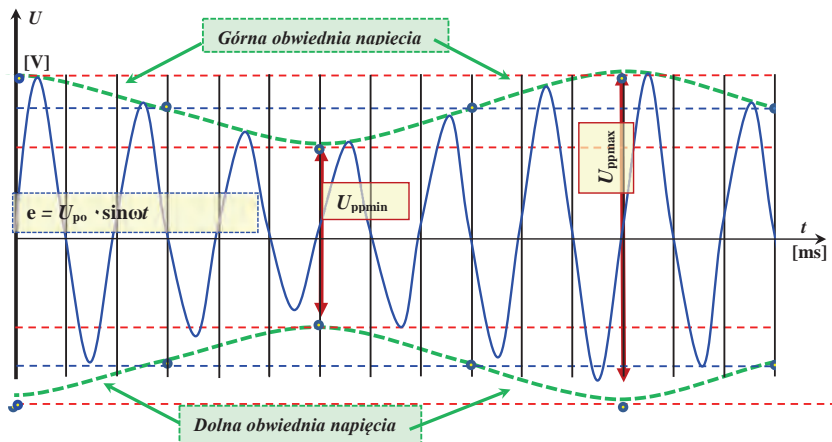
- współczynnik amplitudy  $k_a$  od 1,26 do 1,56,
- całkowita zawartość harmonicznych nie powinna przekraczać poziomu 8%,
- wartość dowolnej harmonicznej w stosunku do pierwszej (podstawowej) harmonicznej nie powinna przekraczać poziomu 5%,
- odchylenie kształtu krzywej napięcia przemiennego od kształtu sinusoidy ( $u(t) = \sin \Theta$ ) – nie powinno przekraczać wartości określonej wzorem (3.1).

Zgodnie z [141] p. **2.3.2.5 Kształt krzywej napięcia jednofazowego w sieci zasilanej 115 V albo 26 V, 400 Hz** – analogicznie jak dla sieci **3x115/200 V, 400 Hz**.

Zgodnie z [141] p. **2.3.2.6 Modulacja napięcia:**

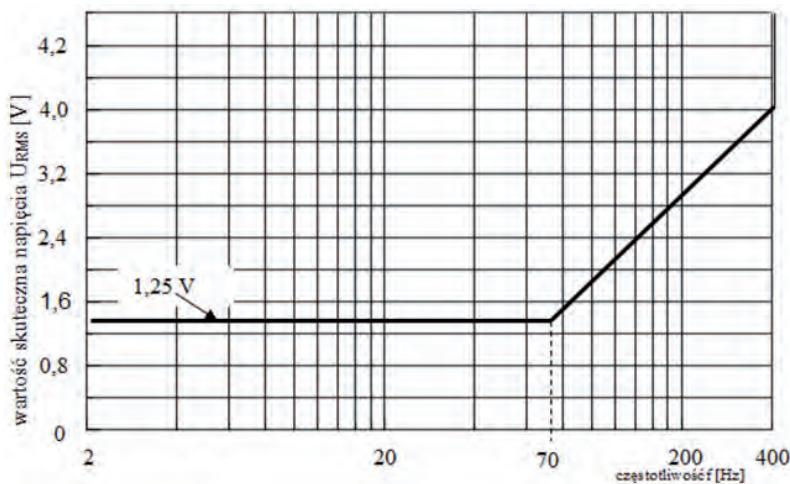
Modulacja amplitudy napięcia fazowego (rys. 3.6) (włączając w to efekty modulacji częstotliwości [53]), mierzona jako względna różnica największej amplitudy obwiedni ( $U_{ppmax}$ ) i najmniejszej ( $U_{ppmin}$ ) wartości międzyszczytowej napięcia ( $U_{pp}$ ), nie powinna przekraczać  $p \leq 1\%$  wartości, podanych w wartościach międzyszczytowych ( $U_{pp}$ ), gdzie wartość  $p$  oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$p = \frac{U_{ppmax} - U_{ppmin}}{U_{ppmax} + U_{ppmin}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$



**Rys. 3.6.** Modulacja amplitudy przebiegu napięcia 115 V, 400 Hz, gdzie:  $A_{max}$  – największa amplituda obwiedni przebiegu napięcia;  $A_{min}$  – największa amplituda obwiedni przebiegu napięcia

Wartości skuteczne harmonicznych obwiedni napięcia powinny mieścić się w wartościach granicznych podanych na rys. 3.7.



**Rys. 3.7.** Przedziały zmian składowych częstotliwości Fouriera obwiedni napięcia [141]

Zgodnie z [141] p. **2.3.2.7 Częstotliwość:**

Częstotliwość głównych źródeł (o stabilizowanej częstotliwości) zasilania energią elektryczną w warunkach normalnych powinna być utrzymana w wartościach granicznych, określonych w tablicy 3.6.

Tabela 3.6

Wartości częstotliwości prądu przemiennego dla stanu ustalonego [141]

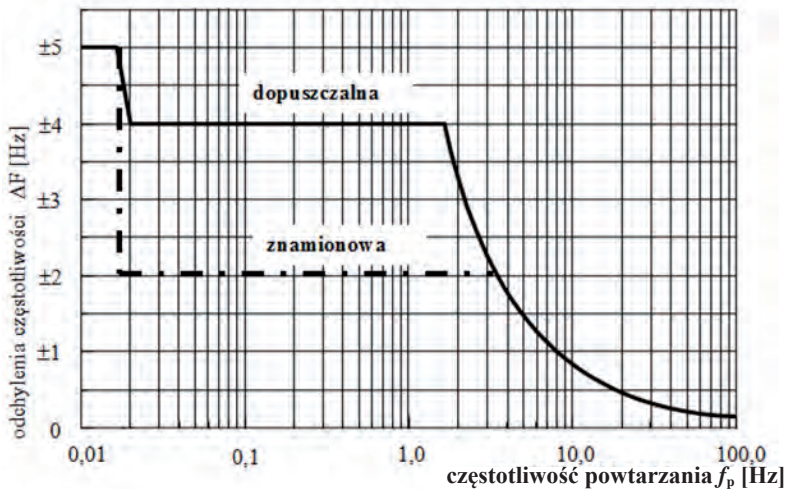
Warunki normalne (NSSL)		Warunki awaryjne (ESSL) [Hz]	Warunki nienormalne (ASSL) [Hz]
Znamionowe [Hz]	Dopuszczalne [Hz]		
od 390 do 410	od 380 do 420	od 360 do 440	od 370 do 430

Zgodnie z [141] p. 2.3.2.8 **Dryft częstotliwości:**

Amplituda dryftu (zakres wahań częstotliwości) nie powinna przekraczać 5 Hz, a prędkość dryftu nie powinna być większa niż 15 Hz/min.

Zgodnie z [141] p. 2.3.2.9 **Modulacja częstotliwości:**

Wahania częstotliwości wskutek modulacji [53, 56, 120, 189, 233] powinny być takie, aby odchylenie od częstotliwości średniej mieściło się w wartościach granicznych podanych na rys. 3.8 oraz w tabeli 3.7.



Rys. 3.8. Przedziały zmian modulacji częstotliwościowej prądu przemiennego [141]

Z uwagi na problemy ze skojarzeniem granic normatywnych przedstawionych na rys. 3.8 przedstawiono przykład obrazujący sposób obliczania dewiacji częstotliwości na podstawie parametrów pozyskanych z przebiegu czasowego:

- a) częstotliwość powtarzania  $f_p$  zmodulowań (rys. 3.9, szczególnie  $f_p = 0,063$  Hz) oblicza się ze wzoru:

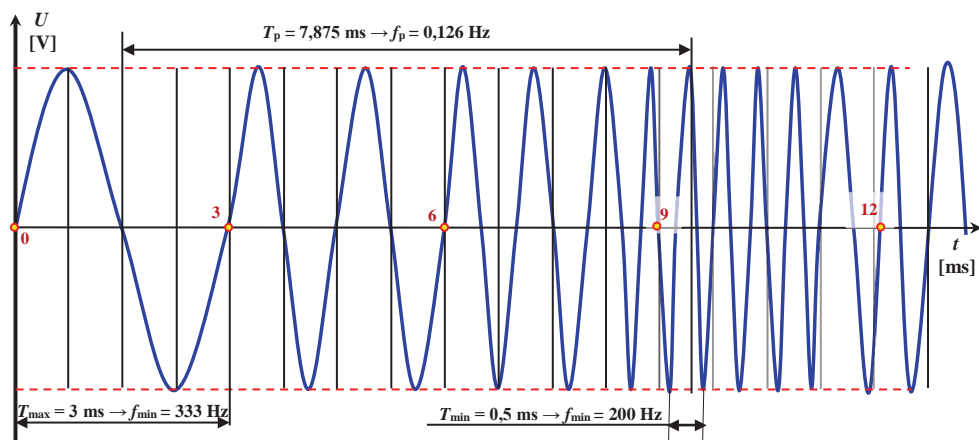
$$f_p = \frac{1}{T_p} \quad (3.3)$$

gdzie:  $T_p$  – częstotliwość powtarzania częstotliwości chwilowej napięcia wyjściowego pokładowej (synchronicznej) prądnicy prądu przemiennego;

b) odchylenie częstotliwości, tj. dewiacja wyniesie w tym przypadku:  
 $\Delta F = 400 - 333 = 67 \text{ Hz}$ , gdyż dewiacja częstotliwości wyraża się wzorem:

$$\Delta F = f_{\max} - f_{\min} \quad (3.4)$$

gdzie:  $f_{\max}, f_{\min}$  – ekstremalne wartości chwilowe częstotliwości:  $f_{\max}$  – maksymalna wartość częstotliwości chwilowej napięcia wyjściowego pokładowej (synchronicznej) prądnicy prądu przemiennego;  $f_{\min}$  – minimalna wartość częstotliwości chwilowej napięcia wyjściowego pokładowej (synchronicznej) prądnicy prądu przemiennego.



**Rys. 3.9.** Przebieg napięcia zmodulowanego częstotliwościowo, oznaczenia jak w (3.3) i (3.4)

Wartość dewiacji przedstawiona (przykładowo) na rys. 3.9 zdecydowanie przekracza wartości dopuszczalne (dla  $f_p = 0,063 \text{ Hz}$  częstotliwości powtarzania wartość dopuszczalna dewiacji wynosi  $\Delta F = \pm 4 \text{ Hz}$ ).

Modulacje częstotliwości napięcia są związane ze zużyciem mechanicznego zespołu napędowego przekazującego ruch obrotowy wirnikowi prądnicy.

Tabela 3.7

Wartości składowych modulacji częstotliwości [141]

Amplituda modulacji częstotliwości		Częstotliwość powtarzania
$\Delta F$		$f_p$
znamionowe [Hz]	dopuszczalne [Hz]	[Hz]
$\pm 5,0$	$\pm 5,0$	0,01
$\pm 2,0$	$\pm 4,9$	0,014
$\pm 2,0$	$\pm 4,0$	0,017
$\pm 2,0$	$\pm 4,0$	1,700
$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	3,2
$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	100,000

Zgodnie z [141] p. 2.3.2.10 Składowa stała napięcia:

Wartość bezwzględna składowej stałej napięcia nie powinna być większa niż 0,1 V.

**Charakterystyki czasowe stanu nieustalonego** napięć prądu przemiennego o stabilizowanej częstotliwości określa NO-15-A200:2016, p. 2.3.3 [141].

Zgodnie z [141] p. 2.3.3.1 Charakterystyka napięciowo-czasowa niniejszej normy:

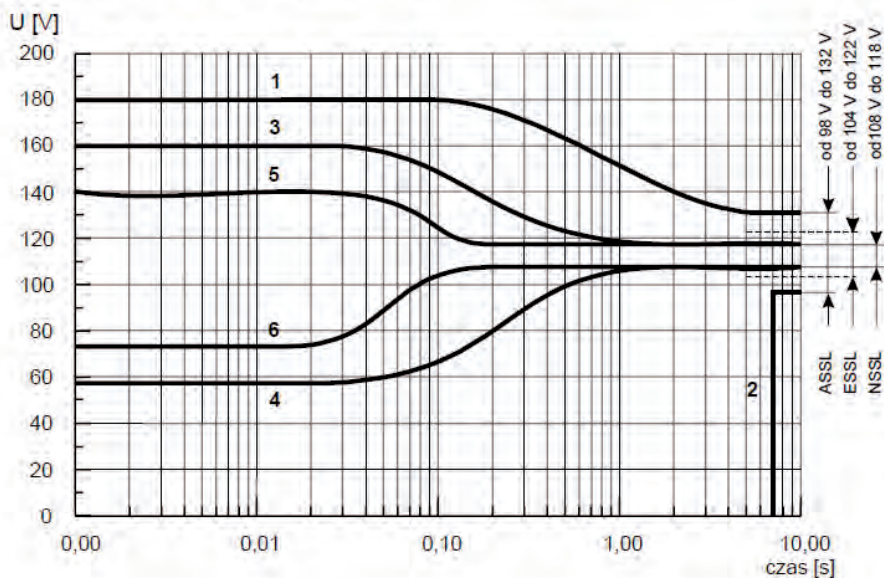
Impulsy napięciowe przekształcone na równoważne funkcje skokowe powinny się mieścić w wartościach granicznych podanych na rys. 3.10 lub 3.11 w następujących przypadkach:

a) normalnego działania układu zasilania elektrycznego:

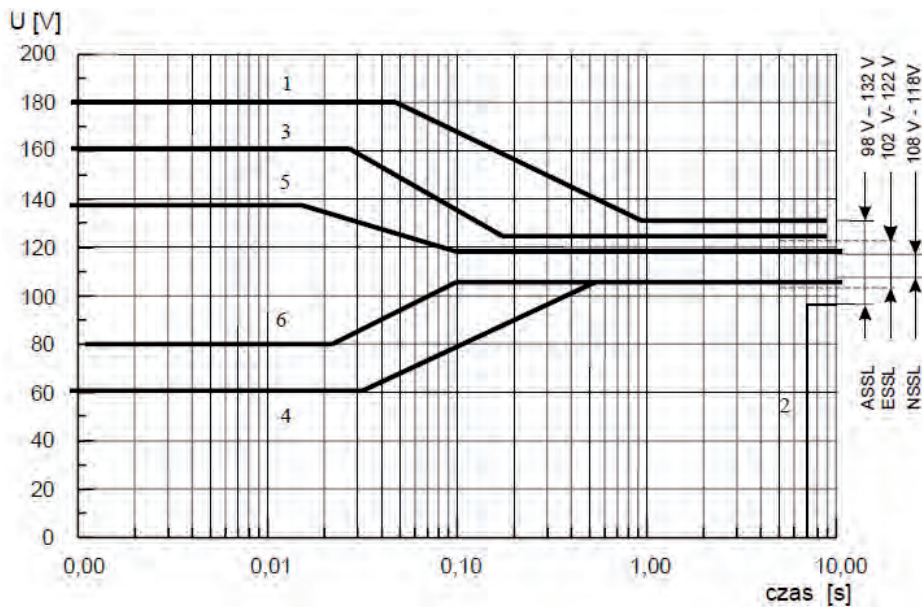
- przy zmianach obciążenia od 5% do 85% i z powrotem od 85% do 5% mocy znamionowej układu zasilania elektrycznego – w przedziałach zmian 5 i 6,
- przy zmianach obciążenia od 10% do 170% i z powrotem od 170% do 10% mocy znamionowej układu zasilania elektrycznego – w przedziałach zmian 3 i 4;

b) nienormalnego działania układu zasilania elektrycznego – w przedziałach zmian 1 i 2.

Do określenia zgodności z tym wymaganiem należy uwzględnić najbardziej „niekorzystny” fazowy przebieg stanu przejściowego z uwzględnieniem ewentualnie powstających impulsów szpilkowych (impulsy szpilkowe nie powinny przekraczać wartości podanej na rys. 3.12).

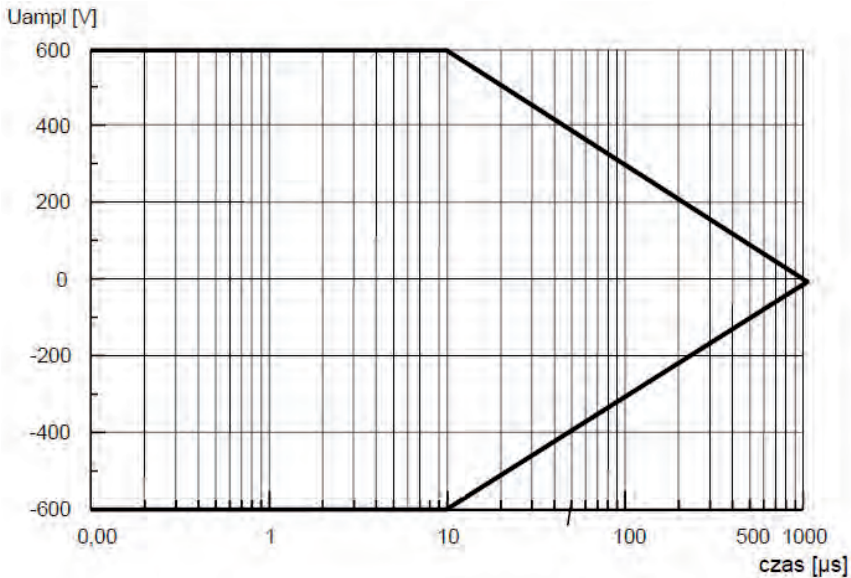


**Rys. 3.10.** Obwiednie równoważnych funkcji skokowych obwiedni napięcia przejściowego prądu przemiennego – parametry dopuszczalne [141]



**Rys. 3.11.** Obwiednie równoważnych funkcji skokowych obwiedni napięcia przejściowego prądu przemiennego – parametry znamionowe [141]





**Rys. 3.12.** Obwiednie równoważnych funkcji skokowych impulsów szpilkowych na zaciskach odbiorników energii elektrycznej prądu stałego i przemiennego [141]

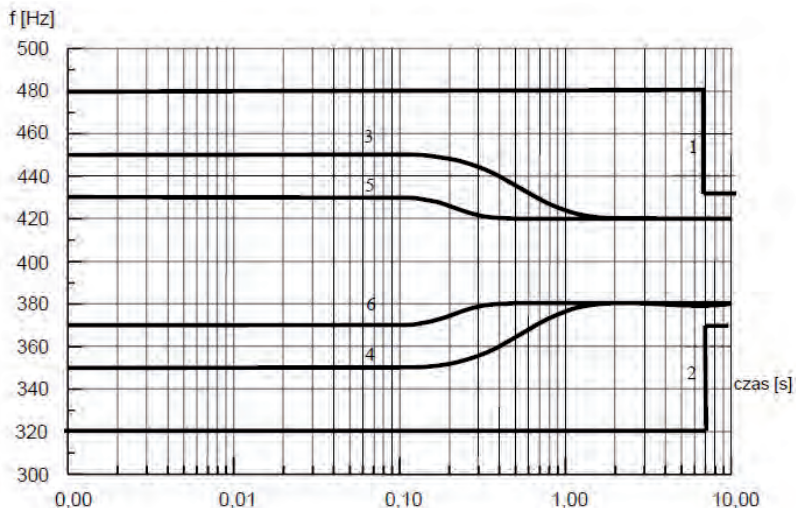
Zgodnie z [141] p. **2.3.3.2 Charakterystyka częstotliwościowo-czasowa:**

Przebiegi częstotliwości stanu nieustalonego we wszystkich stanach działania elektrycznych sieci pokładowych WSP powinny mieścić się w wartościach granicznych wyznaczonych na rys. 3.13 i 3.14 w następujących przypadkach:

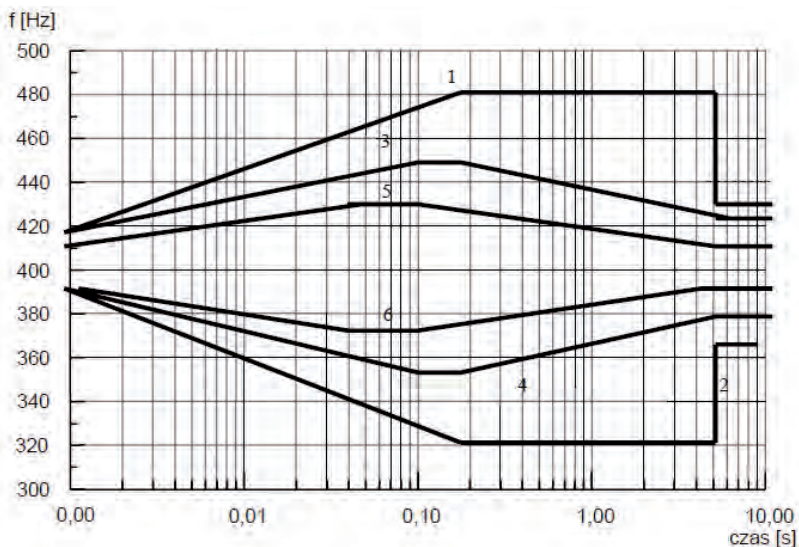
- a) normalnego działania układu zasilania elektrycznego:
  - przy zmianach obciążenia od 5% do 85% i z powrotem od 85% do 5% mocy znamionowej układu zasilania elektrycznego – w przedziałach zmian 5 i 6,
  - przy zmianach obciążenia od 10% do 170% i z powrotem od 170% do 10% mocy znamionowej układu zasilania elektrycznego – w przedziałach zmian 3 i 4;
- b) nienormalnego działania układu zasilania elektrycznego – w przedziałach zmian 1 i 2.

W stanach przejściowych oraz podczas przełączania zasilania odbiorników energii elektrycznej z głównego źródła energii elektrycznej na awaryjne źródło energii elektrycznej powinna być utrzymana korelacja pomiędzy wartością skuteczną napięcia na zaciskach odbiorników energii elektrycznej a częstotliwością – wartość napięcia wyrażona w voltach nie powinna być większa niż 1/3 wartości częstotliwości wyrażonej w hercach (np. przy 300 Hz napięcie nie powinno przekraczać 100 V). Dopuszcza się, za pisemną zgodą użytkownika, istnienie wyższych

wartości ilorazu napięcia do częstotliwości po udowodnieniu, że nie spowoduje to uszkodzenia żadnego z odbiorników we wszystkich warunkach lotu.



**Rys. 3.13.** Przedziały zmian częstotliwości stanu przejściowego dla układu zasilania elektrycznego – parametry dopuszczalne [141]



**Rys. 3.14.** Przedziały zmian częstotliwości stanu przejściowego dla układu zasilania elektrycznego – parametry znamionowe [141]

Zgodnie z [141] p. **2.3.3.3 Przerwy w zasilaniu:**

W czasie przełączania odbiorników energii elektrycznej, źródeł energii elektrycznej i zmian konfiguracji sieci automatyka działania układu sterowania i regulacji powinna zapewniać minimalizację czasu trwania zaniku napięcia na szynach odbiorników – czas ten nie powinien być dłuższy niż:

a) znamionowe:

- 50 ms dla normalnego działania układu zasilania elektrycznego,
- 150 ms dla nienormalnego działania układu zasilania elektrycznego,
- 5 s dla awaryjnego działania układu zasilania elektrycznego;

b) dopuszczalne:

- 200 ms dla normalnego działania układu zasilania elektrycznego oraz dla nienormalnego działania układu zasilania elektrycznego,
- 7 s dla awaryjnego działania układu zasilania elektrycznego.

Po wystąpieniu zaniku napięcia na zaciskach odbiorników energii elektrycznej powinien nastąpić powrót do normalnych warunków zasilania, to znaczy:

- parametry sieci energetycznej powinny być zgodne z wymaganiami niniejszej normy,
- powinna być zapewniona poprawność funkcjonowania elementów układu zasilania elektrycznego oraz odbiorników energii elektrycznej.

Zgodnie z [141] p. **2.3.3.4 Impulsy szpilkowe:**

Elementy układu zasilania elektrycznego i odbiorniki energii elektrycznej powinny być odporne na impulsy szpilkowe o parametrach ujętych w załączniku A (normatywnym), A.2 oraz przedstawionych na rys. 3.10. Po narażeniu na impulsy szpilkowe, elementy układu zasilania elektrycznego powinny funkcjonować poprawnie, zgodnie z wymaganiami technicznymi danego odbiornika energii elektrycznej.

Jednocześnie układ zasilania elektrycznego we wszystkich stanach działania nie powinien generować impulsów szpilkowych o amplitudzie i czasie trwania przekraczających wartości ujęte w załączniku A (normatywnym), A.2 oraz przedstawione na rys. 3.10.

**3.2.2.2. Charakterystyki typowych napięć prądu przemiennego o niestabilizowanej częstotliwości**

Charakterystyki układu zasilania elektrycznego napięć prądu przemiennego o niestabilizowanej częstotliwości **określa** NO-15-A200:2016, p. **2.4** [141].

Zgodnie z [141] p. **2.4.1 Postanowienia ogólne** niniejszej normy:

Wymienione niżej charakterystyki dotyczą energii elektrycznej na zaciskach odbiorników energii elektrycznej w układzie zasilania elektrycznego o niestabilizowanej częstotliwości, o znamionowym zakresie zmian prędkości obrotowej prądnicy  $n = (1:1,67) n_N$ , co w przypadku prądnicy prądu przemiennego odpowiada znamionowym zmianom częstotliwości od 360 Hz do 600 Hz. Dla szerszego zakresu zmian prędkości obrotowej prądnicy, wynikającej z zakresu zmian prędkości znamionowej zespołu napędowego, dopuszcza się wartość częstotliwości od 345 Hz do 900 Hz, pod warunkiem potwierdzenia badaniami dostosowania konstrukcji sieci elektrycznej i odbiorników do tej częstotliwości.

Charakterystyki napięcia określone w niniejszej normie dotyczą napięć fazowych między przewodem fazowym a masą WSP. Charakterystyki napięć przewodowych danego elementu układu zasilania elektrycznego lub odbiornika energii elektrycznej powinny być traktowane jako wynik sumowania geometrycznego wektorów napięć fazowych (rys. 3.5).

Wartości napięcia prądu przemiennego są wartościami skutecznymi.

Przebiegiowe oraz udarowe napięcia skuteczne należy przeliczać z zarejestrowanych wartości szczytowych (maksymalnych), dzieląc wartość szczytową napięcia ( $U_p$ ) przez pierwiastek z liczby 2.

**Charakterystyki stanu ustalonego** napięć prądu przemiennego o niestabilizowanej częstotliwości określa NO-15-A200:2016, p. **2.4.2** [141]:

- **napięcie** zgodnie z [141] p. **2.4.2.1**, które są zgodne z wymaganiami zawartymi w 2.3.2.1. (przedstawionymi w p. 3.2.2.2 monografii);
- **przesunięcie fazowe** zgodnie z [141] p. **2.4.2.2**, które są zgodne zgodnie z wymaganiami zawartymi w 2.3.2.2 (jw.);
- **asymetria napięć** zgodnie z [141] p. **2.4.2.3**, które są zgodne wymaganiami zawartymi w 2.3.2.3 (jw.);
- **kształt krzywej napięcia** zgodnie z [141] p. **2.4.2.4**, które są zgodne wymaganiami zawartymi w 2.3.2.4 (dla napięcia trójfazowego) oraz 2.3.2.5 (dla napięcia jednofazowego) (jw.);
- **modulacja amplitudy napięcia** zgodnie z [141] p. **2.4.2.5**, które są zgodne wymaganiami zawartymi w 2.3.2.6 (jw.);
- **składowa stała napięcia** zgodnie z [141] p. **2.4.2.7**, które są zgodne wymaganiami zawartymi w 2.3.2.10 (jw.);
- **Częstotliwość** zgodnie z [141] p. **2.4.2.6**.

Dopuszczalna częstotliwość źródeł energii elektrycznej prądu przemiennego (o niestabilizowanej częstotliwości) powinna być utrzymana w wartościach granicznych od 320 Hz do 900 Hz. Dopuszczalna częstotliwość źródeł energii elektrycznej prądu przemiennego (o niestabilizowanej częstotliwości) powinna być utrzymana

w wartościach granicznych od 320 Hz do 900 Hz. Ograniczenie to dotyczy tylko źródeł pokładowych – nie dotyczy sieci autonomicznych źródeł przeznaczonych do zasilania odbiorników energii elektrycznej o przeznaczeniu specjalnym, np. źródeł energii elektrycznej stosowanych w systemach uzbrojenia.

Powinien istnieć układ dozoru, który odłącza zaciski wyjściowe prądu od szyny zasilania odbiorników, jeżeli wartość częstotliwości będzie niższa niż określona w p. 2.4.1 (jw.).

**Charakterystyki czasowe stanu nieustalonego** napięć prądu przemiennego o niestabilizowanej częstotliwości określa NO-15-A200:2016, p. 2.4.3 [141].

Zgodnie z [141] p. 2.4.3.1 **Charakterystyki napięciowo-czasowe:**

Napięcia stanu nieustalonego (impulsy napięciowe), przekształcone na ich równoważne funkcje skokowe, powinny się mieścić w wartościach granicznych podanych na rys. 3.15 w następujących przypadkach:

- a) normalnego działania układu zasilania elektrycznego:
  - przy zmianach obciążenia od 5% do 85% i z powrotem od 85% do 5% mocy znamionowej układu zasilania elektrycznego – układu zasilania elektrycznego w przedziałach zmian 5 i 6,
  - przy zmianach obciążenia od 10% do 170% i z powrotem od 170% do 10% mocy znamionowej układu zasilania elektrycznego – w przedziałach zmian 3 i 4;
- b) nienormalnego działania układu zasilania elektrycznego – w przedziałach zmian 1 i 2.

W celu określenia zgodności z tym wymaganiem w analizie należy uwzględnić najbardziej „niekorzystny” fazowy przebieg stanu przejściowego, w tym ewentualnie powstające impulsy szpilkowe (impulsy szpilkowe nie powinny przekraczać wartości podanej na rys. 3.12).

Zgodnie z [141] p. 2.4.3.2 **Charakterystyki częstotliwościowo-czasowe:**

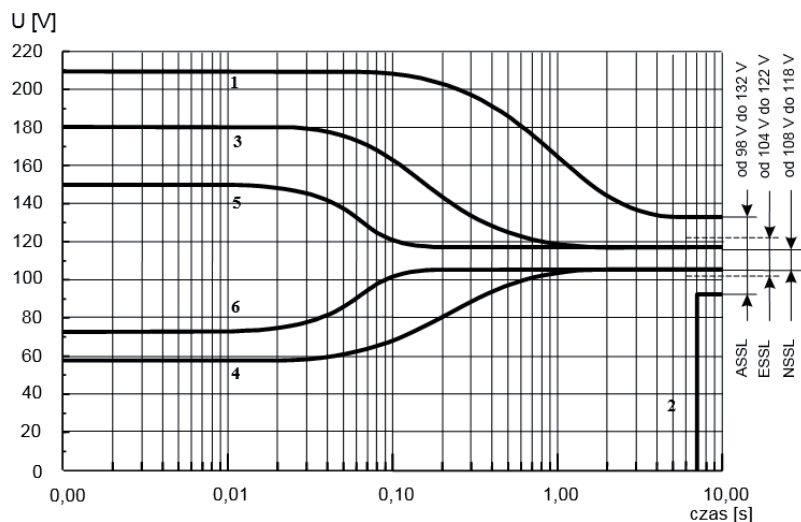
Zmiany częstotliwości powinny być takie, aby ich szybkość nie przekraczała 65 Hz/s.

Zgodnie z p. 2.4.3.3 **Przerwy w zasilaniu**, które są zgodne z wymaganiami zawartymi w 2.3.3.3. (przedstawionymi w p. 3.2.2.2 monografii).

Zgodnie z [141] p. 2.4.3.4 **Impulsy szpilkowe** które są zgodne z wymaganiami zawartymi w 2.3.3.4. (jw.).

Zgodnie z [141] p. 2.4.3.5 **Krótkotrwałe procesy przejściowe.**

Układy zasilania elektrycznego WSP powinny być tak zaprojektowane, żeby spełnić wymagania przedstawione na rys. 3.15.



**Rys. 3.15.** Obwiednie równoważnych funkcji skokowych układu zasilania elektrycznego prądu przemiennego o niestabilizowanej częstotliwości [141]

### 3.2.2.3. Charakterystyki układu zasilania elektrycznego prądu stałego (DC) 28 V

Charakterystyki układu zasilania elektrycznego napięć prądu stałego (DC) 28 V określa NO-15-A200:2016 p. 2.5 [141].

Zgodnie z [141], p. 2.5.1 **Postanowienia ogólne.**

Jeżeli nie podano inaczej, to charakterystyki napięcia dotyczą parametrów energii elektrycznej na zaciskach odbiorników energii elektrycznej.

Charakterystyki napięcia powinny być zachowane w warunkach określonych w p. 2.2.1.

**Charakterystyki stanu ustalonego** napięć prądu stałego (DC) określa NO-15-A200:2016 [141], p. 2.5.2.

Zgodnie z [141] p. 2.5.2.1 **Napięcie:**

Składowa stała napięcia na zaciskach zasilania odbiorników energii elektrycznej powinna mieścić się w granicach podanych w tabelach 3.8 i 3.9.

Wymaganie to nie dotyczy:

- a) napięcia na rozruszniku elektrycznym oraz na odbiornikach energii elektrycznej w czasie rozruchu silnika głównego WSP,
- b) napięcia na urządzeniach zasilanych z osobnych baterii akumulatorowych (nie będących integralną częścią układu zasilania elektrycznego WSP).

Wymagane poziomy napięcie podaje się wówczas w warunkach technicznych poszczególnych urządzeń.

**Tabela 3.8****Przedziały zmian napięcia układu zasilania prądu stałego – parametry dopuszczalne [141]**

Urządzenie(-a) prądu stałego	Główne źródło energii elektrycznej [V]	Awaryjne źródło energii elektrycznej [V]
Napięcie szyny źródła energii elektrycznej (w punkcie regulacji napięcia).	od 26 do 29	od 20 do 29
Łączny spadek napięcia na przewodach stycznikach, szynach itp. pomiędzy źródłem energii elektrycznej a odbiornikiem energii elektrycznej.	od – 2 do 0	od – 4 do 0
Spadek napięcia na przewodzie minusowym w stanie ustalonym.	0,3	nie określa się
Spadek napięcia na przewodzie minusowym w stanie przejściowym (podczas załączania).	0,5	nie określa się
Przedziały zmian w stanie ustalonym przy normalnym działaniu układu zasilania elektrycznego (NSSL).	od 24 do 29	nie określa się
Przedziały zmian załączenia – wyłączenia w stosunku do przedziałów zmian przy normalnym działaniu układu zasilania elektrycznego.	$\pm 3$	nie określa się
Przedziały zmian w stanie ustalonym przy nienormalnych warunkach zasilania (ASSL).	od 21 do 32	nie określa się
Przedziały zmian w stanie ustalonym awaryjnych warunkach zasilania (ESSL).	nie określa się	od 18 do 29

**Tabela 3.9****Przedziały zmian napięcia prądu stałego na zaciskach odbiorników energii elektrycznej – parametry znamionowe [141]**

Warunki normalne (NSSL) [V]	Warunki nienormalne (ASSL) [V]	Warunki awaryjne (ESSL) [V]
od 24 do 29	od 21 do 32	od 18 do 29

Zgodnie z [141] p. 2.5.2.2 **Pulsacja napięcia:**

Pulsacja napięcia na zaciskach odbiorników energii elektrycznej prądu stałego, po odłączeniu pokładowych baterii akumulatorowych od układu zasilania elektrycznego, powinna być taka, żeby wartość względna wartości międzyszczytowej

pulsacji ( $U_p$ ) w stosunku do średniego poziomu napięcia (do wartości składowej stałej napięcia  $U$ ) było mniejsze niż:

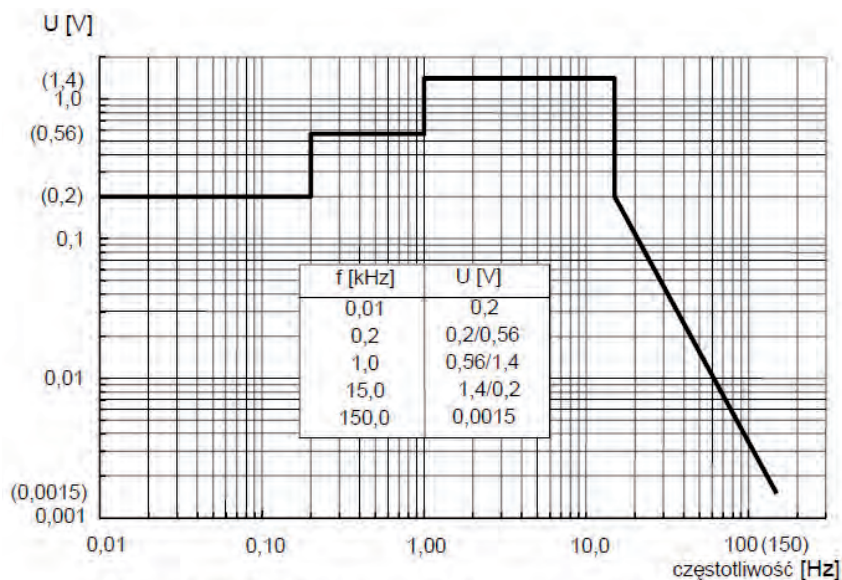
- a) znamionowe – 5,0%,
- b) dopuszczalne – wartość składowej pulsacji ( $k_p$ ) 7,4%.

$$k_p = \frac{U_p}{U} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

Wartości skuteczne składowych harmonicznnych pulsacji nie powinny być wyższe niż:

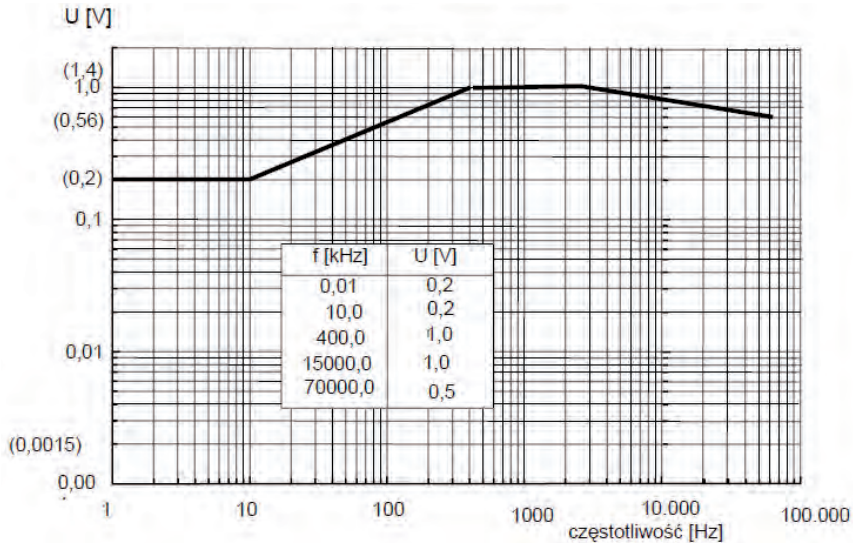
- a) dopuszczalne – wartości skuteczne poszczególnych składowych harmonicznnych pulsacji nie powinny przekraczać wartości przedstawionych na rys. 3.16,
- b) znamionowe – wartości skuteczne poszczególnych składowych harmonicznnych pulsacji nie powinny przekraczać wartości przedstawionych na rys. 3.17.

Elementy układu zasilania elektrycznego oraz odbiorniki energii elektrycznej powinny być odporne na oddziaływanie pulsacji napięcia. Odporność urządzeń na pulsację napięcia należy sprawdzać zgodnie z NO-06-A108:2016 [268] oraz z załącznikiem B (informacyjnym) tej normy.



**Rys. 3.16.** Przedziały zmian składowych harmonicznnych pulsacji napięcia stałego – parametry dopuszczalne [141]





**Rys. 3.17.** Przedziały zmian składowych harmoniczných pulsacji napięcia stałego – parametry znamionowe [141]

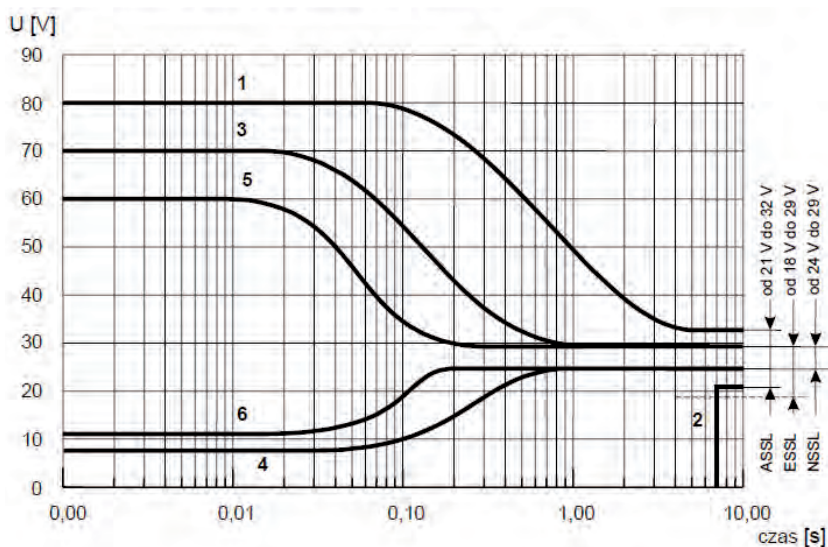
**Charakterystyki stanu nieustalonego** napięć prądu stałego (DC) określa NO-15-A200:2016, p. 2.5.3 [141].

Zgodnie z [141] p. 2.5.3.1 **Charakterystyki napięciowo-czasowe:**

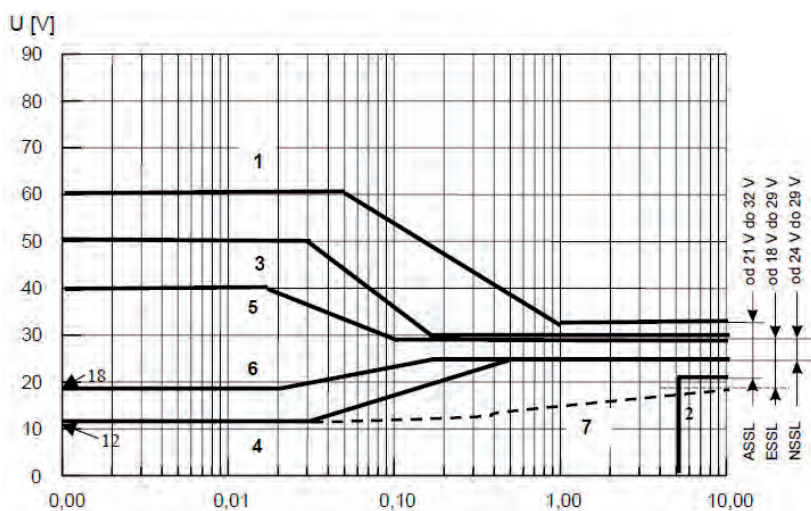
W przypadku normalnego działania układu zasilania elektrycznego napięcia stanu nieustalonego (impulsy napięciowe) przekształcone na ich równoważne funkcje skokowe, powinny się mieścić w wartościach granicznych podanych na rys. 3.18, 3.19 oraz rys. 3.20:

- w przypadku normalnego działania układu zasilania elektrycznego w następujących przypadkach:
  - przy zmianach obciążenia od 5% do 85% i z powrotem od 85% do 5% mocy znamionowej układu zasilania elektrycznego – w przedziałach zmian 5 i 6,
  - przy zmianach obciążenia od 10% do 170% i z powrotem od 170% do 10% mocy znamionowej układu zasilania elektrycznego – w przedziałach zmian 3 i 4;
- w przypadku nienormalnego działania układu zasilania elektrycznego – w przedziałach zmian 1 i 2.

W celu określenia zgodności z tym wymaganiem w analizie należy uwzględnić najbardziej „niekorzystny” fazowy przebieg stanu przejściowego, w tym ewentualnie powstające impulsy szpilkowe (impulsy szpilkowe nie powinny przekraczać wartości podanej na rys. 3.12).



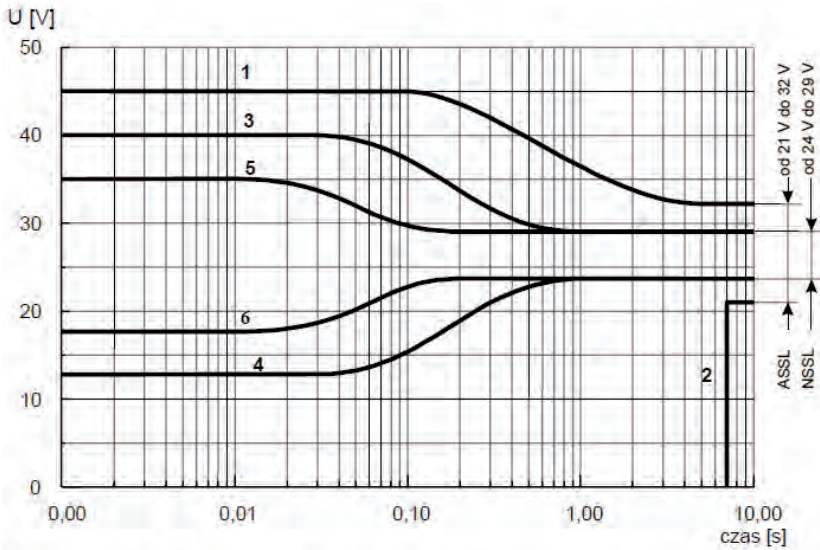
**Rys. 3.18.** Przedziały zmian równoważnych funkcji skokowych napięcia prądu stałego w układach zasilania elektrycznego zasilanych z prądnic prądu stałego 28 V – parametry dopuszczalne [141]



**Rys. 3.19.** Przedziały zmian równoważnych funkcji skokowych napięcia prądu stałego w układach zasilania elektrycznego zasilanych z prądnic prądu stałego 28 V – parametry znamionowe [141]

Jeśli źródłem energii elektrycznej jest prądnic prądu stałego, to napięcia stanu nieustalonego powinny się mieścić w wartościach granicznych podanych na rys. 3.18 oraz na rys. 3.19.

Jeśli źródłem energii elektrycznej jest blok transformatorowo-prostowniczy zasilany z układu zasilania elektrycznego prądu przemiennego o stabilizowanej częstotliwości, to napięcia stanu nieustalonego powinny się mieścić w wartościach granicznych podanych na rys. 3.20.



**Rys. 3.20.** Przedziały zmian równoważnych funkcji skokowych napięcia prądu stałego w układach zasilania elektrycznego, w których źródło energii elektrycznej jest zespołem transformatorowo-prostowniczym zasilanym ze źródła energii elektrycznej prądu przemiennego o stabilizowanej częstotliwości [141]

Zgodnie z [141] p. **2.5.3.2 Przerwy w zasilaniu**, które są zgodne z wymaganiami zawartymi w 2.3.3.3 (przedstawionymi w p. 3.2.2.2 monografii).

Zgodnie z [141] p. **2.5.3.3 Impulsy szpilkowe** które są zgodne z wymaganiami zawartymi w 2.3.3.4 (jw.).

### 3.2.3. Warunki pracy LUE

#### 3.2.3.1. Ogólne warunki pracy urządzeń elektrycznych

**Ze względu na właściwości konstrukcyjne i eksploatacyjne** urządzenia elektryczne przeznaczone są do określonego rodzaju pracy. Inny mają też założony czas osiągnięcia przez niektóre części urządzenia temperatury dopuszczalnej (granicznej).

Polskie Normy wyróżniają m.in. następujące rodzaje pracy urządzeń elektrycznych:

- praca ciągła,
- praca przerywana – okresowa,
- praca dorywcza – chwilowa.

**Ze względu na odporność materiałów izolacyjnych na działanie wysokich temperatur** Polskie Normy określają klasy „ciepłochronności” materiałów izolacyjnych, czyli maksymalnej temperatury w czasie pracy.

Według PN-87/E-02050 [154] dopuszczalne temperatury maksymalne materiału izolacji dla poszczególnych klas izolacji są następujące:

$$\begin{aligned} Z - T &\leq 60^{\circ}\text{C}; X - T \leq 75^{\circ}\text{C}; Y - T \leq 90^{\circ}\text{C}; \\ A - T &\leq 105^{\circ}\text{C}; E - T \leq 120^{\circ}\text{C}; B - T \leq 130^{\circ}\text{C}; \\ F - T &\leq 155^{\circ}\text{C}; H - T \leq 180^{\circ}\text{C}; C - T \leq 180^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Stosowanie w elektrycznych urządzeniach pokładowych materiałów izolacyjnych kl. C, umożliwia uzyskanie dużych mocy przy małej masie urządzenia.

Podstawowe funkcje realizowane i dozowane automatyczne w układzie zasilania energią elektryczną statku powietrznego to:

- a) przyłączenie do sieci samolotu źródeł energii elektrycznej pokładowych lub naziemnych tylko przy określonej: biegunowości, wartości napięcia, kolejności faz;
- b) odłączenie pokładowych źródeł energii elektrycznej po przyłączeniu do sieci pokładowej naziemnych źródeł zasilania energią elektryczną;
- c) sterowanie włącznikiem lub odłącznikiem pokładowych lub naziemnych źródeł energii elektrycznej tylko z pokładu statku powietrznego oraz generowanie informacji o stanie połączenia z siecią;
- d) odłączenie od szyn rozdzielczych określonych odbiorników energii elektrycznej przy zmniejszeniu się mocy układu zasilania energią elektryczną w stanach niezdatności;
- e) automatyczne przełączanie zasilania szyn rozdzielczych do rezerwowych lub awaryjnego źródła energii elektrycznej;
- f) zapewnienie operatorowi kontroli stanu układu zasilania energią elektryczną tak ze źródeł pokładowych, jak i naziemnych.

Dla danego typu statku powietrznego system rezerwowania zasilania energią elektryczną określonych szyn rozdzielczych jest zadany przez konstruktora, a wynika to z liczby źródeł energii i funkcji urządzeń elektrycznych w systemie bezpieczeństwa lotu statku powietrznego. Dla zapewnienia unifikacji wyposażenia elektrycznego w warunkach światowych podstawowe wymagania techniczne i eksploatacyjne dla urządzeń, są standaryzowane przez normy i przepisy międzynarodowych organizacji lotniczych. Międzynarodowa Organizacja Lotnictwa Cywilnego ICAO określa wszystkie wymagania dotyczące dopuszczenia statku

powietrznego do lotu, tak dla jego zespołu napędowego, jak i wyposażenia zapewniającego bezpieczeństwo lotu. Dla każdego urządzenia (elementu) przeznaczonego do zabudowania na pokładzie statku powietrznego określa się warunki techniczne, które określają:

- przeznaczenie i obszar zastosowania, np. bezpiecznik o nominale 5 A,
- urządzenia wchodzące w skład kompletu i ich wzajemne relacje (oddziaływania), np. układ kursowy,
- podstawowe dane techniczne, np.: prądnicza (moc, napięcie, liczba faz itp.),
- wymiary i sposób mocowania, np. przełącznik,
- warunki eksploatacji, np.: blok elektroniczny (montaż w miejscu ogrzewanym),
- warunki przechowywania, np.: temperatura, oświetlenie,
- resurs – czas do remontu – w godz. pracy lub latach eksploatacji, np.: silnik, wyposażenie statku powietrznego (agregaty),
- wymagania konstrukcyjne, np.: podatność obsługowa i diagnostyczna.

### 3.2.3.2. Wymagania dotyczące rozmieszczenia elementów sterujących w kabinie

Wymagania dotyczące rozmieszczenia elementów sterujących w kabinie określa NO-15-A204 *Wojskowe statki powietrzne. Rozmieszczenie elementów sterujących obwodów elektrycznych w kabinie. Wymagania* [138].

Zgodnie z [138] p. **2.1 Wymagania ogólne** niniejszej normy:

Elementy sterujące obwodów elektrycznych powinny być umieszczone na tablicy przyrządów na pokładach wojskowych statków powietrznych, w miejscach wygodnych do obsługi przez pilota.

Elementy sterujące obwodów elektrycznych powinny być konstruowane i montowane na tablicy przyrządów i pulpitych w kabinach wojskowych statków powietrznych tak, aby:

- a) w wyniku przesunięcia do góry, do przodu lub zgodnie z ruchem wskazówek zegara następowało włączanie układu elektrycznego wojskowego statku powietrznego lub zwiększanie wartości parametrów,
- b) w wyniku przesunięcia do dołu, tyłu lub przeciwnie do ruchu wskazówek zegara następowało wyłączenie układu elektrycznego wojskowego statku powietrznego lub zmniejszenie wartości parametrów.

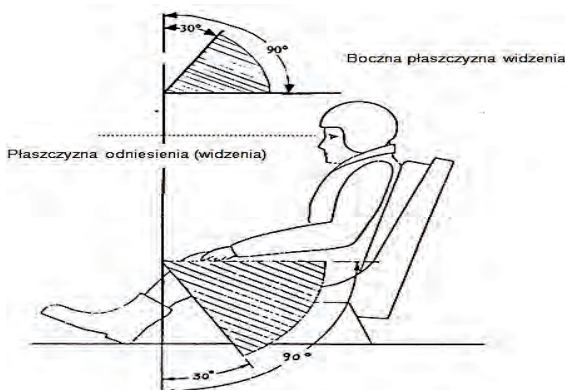
**Uwaga 1.** Wszystkie kierunki ruchu elementów sterujących obwodów elektrycznych odnoszą się do operatora, a nie do wojskowego statku powietrznego.

**Uwaga 2.** Panele przyrządów umieszczone powyżej bocznej płaszczyzny odniesienia (widzenia) członka załogi wojskowego statku powietrznego są definiowane jako „panele powyżej głowy”.

W przypadku, gdy element sterujący obwodu elektrycznego jest umieszczony na płaszczyźnie pochylonej, to kierunek przełączania „do przodu” lub „do góry” powinien być taki, jak podano na rys. 3.21 i 3.22.



**Rys. 3.21.** Typowe pochylenia tablic przyrządów – elementy sterujące obwodów elektrycznych – wariant nr 1 – dla elementów sterujących w zakreskowanych obszarach – elementy sterujące „do góry” dla stanu włączenia, „do dołu” do wyłączenia [138]



**Rys. 3.22.** Typowe pochylenia tablic przyrządów – elementy sterujące obwodów elektrycznych – wariant nr 2 – dla elementów sterujących w zakreskowanych obszarach – elementy sterujące „do przodu” dla stanu włączenia, „do tyłu” do wyłączenia [138]

Wymagania określone w [138] p. 2.1 wspomnianej normy nie dotyczą elementów sterujących:

- a) trójpozycyjnych przełączników elektrycznych (wyłączonych w pozycji środkowej) lub specjalnych przełączników lub elementów sterujących obwodów elektrycznych, które realizują złożone funkcje,
- b) specjalnych przełączników-sygnalizatorów elektrycznych na drążku-manipulatorze oraz przełączników elektrycznych sterowania skokiem ogólnym w wiropłatach,
- c) sterowania zrzutem spadochronu hamującego,
- d) sterowania skosem płata skrzydła,
- e) sterowania silnikiem lotniczym na panelach powyżej głowy, dla tych elementów przemieszczanie dźwigni przełącznika elektrycznego do przodu powoduje wzrost parametrów silnika lotniczego,
- f) przycisków służących do załączania lub rozłączania obwodów elektrycznych.

**Roźmieszczenie elementów sterujących głównych wyłączników elektrycznych (*master electric switches*) [138].**

1. W samolotach wojskowych z załogą jedno – lub dwuosobową, gdy fotele znajdują się jeden za drugim, elementy sterujące obwodów elektrycznych głównego wyłącznika elektrycznego powinny być zgrupowane i umieszczone w przedniej części prawej tablicy przyrządów.
2. Elementy sterujące obwodów elektrycznych głównego wyłącznika elektrycznego powinny być zamontowane jak najdalej „do przodu”.
3. W samolotach wojskowych z załogą dwuosobową, gdy fotele znajdują się obok siebie, elementy sterujące obwodów elektrycznych głównego wyłącznika elektrycznego powinny być zgrupowane i umieszczone na górnym pulpicie tablicy przyrządów, w zasięgu rąk obu pilotów. Jeśli dana konstrukcja samolotu wojskowego nie ma pulpitu górnego, to dopuszcza się umieszczenie elementów sterujących obwodów elektrycznych głównego wyłącznika elektrycznego na głównej tablicy przyrządów przy zachowaniu dostępności obu pilotów.

Przykład głównych wyłączników elektrycznych roźmieszczonech na górnym pulpicie sterowania pilota przedstawiono na rys. 3.23.

Zgodnie z [138] p. **2.3.2 Roźmieszczenie elementów sterujących obwodów elektrycznych przełączników elektrycznych reflektorów lądowania** omawianej normy:

Elementy sterujące obwodów elektrycznych reflektorów lądowania powinny być umieszczone obok dźwigni wypuszczania podwozia lub głównej dźwigni sterowania silnikiem lotniczym.



**Rys. 3.23.** Pulpit górny sterowania pokładowymi źródłami prądu stałego ze śmigłowca Mi-2

Zgodnie z [138] p. 2.3.3 **Rozmieszczenie elementów sterujących obwodów elektrycznych oświetlenia, instalacji przeciwoblodzeniowej, ogrzewania rurki Pitota i sterowania klimatyzacją** omawianej normy:

W samolotach wojskowych z załogą jedno – lub dwuosobową, gdy fotele znajdują się jeden za drugim, elementy sterujące obwodów elektrycznych oświetlenia, instalacji przeciwoblodzeniowej, ogrzewania rurki Pitota i sterowania klimatyzacją powinny być zgrupowane i umieszczone w prawej części tablicy przyrządów. W samolotach wojskowych z załogą dwuosobową, gdy fotele znajdują się obok siebie, elementy sterujące obwodów elektrycznych oświetlenia, instalacji przeciwoblodzeniowej, ogrzewania rurki Pitota i sterowania klimatyzacją powinny być zgrupowane i umieszczone na górnym pulpicie tablicy przyrządów, w zasięgu rąk obu pilotów. Jeśli dana konstrukcja samolotu wojskowego nie ma pulpitu górnego, to dopuszcza się umieszczenie głównych elementów sterujących obwodów elektrycznych na głównej tablicy przyrządów, w miejscu dostępnym dla obu pilotów.

### 3.3. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale zgromadzono informacje, z jakich podsystemów składa się pokładowy system elektroenergetyczny. Przeciętny pasażer postrzega tylko efekty tego zasilania w postaci działania licznych odbiorników energii elektrycz-



nej, takich jak: oświetlenie, wentylacja i klimatyzacja, czy informacja świetlna. Znacznie więcej wiedzy co do zastosowania energii elektrycznej na pokładzie statku powietrznego ma załoga pokładowa – jest dla niej oczywiste, że energia elektryczna jest niezbędna do sterowania statkiem powietrznym (wysuwanie klap, przemieszczanie lotek, zasilanie pilota automatycznego itp.) czy zasilania przyrządów nawigacyjnych. Tymczasem droga od przetworzenia energii mechanicznej silnika napędowego do pozyskania jej w postaci zasilania m.in. wymienionych odbiorników jest dosyć długa i skomplikowana, pomimo że impuls prądowy ma prędkość światła.

Zastosowanie energii elektrycznej zwiększyło znacznie (wręcz rewolucyjnie) poziom bezpieczeństwa statku powietrznego, ale zmusiło konstruktorów, technologów, personel naziemny i pokładowy do pogłębienia wiedzy na temat właściwości energii elektrycznej. Zacząć należy tu od efektów zasilania, tj. od odbiorników energii elektrycznej. Aby odbiornik energii elektrycznej mógł poprawnie działać, musi mieć przyłożone na swoje zaciski wejściowe napięcie w określonym przedziale tolerancji, gdyż zbyt niskie napięcie to niepoprawna praca odbiornika skutkująca jego samoczynnym wyłączeniem. Zbyt wysoka wartość napięcia to przeciążenie, którego efektem może być uszkodzenie (np. termiczne stopienie) obwodów wewnętrznych i w efekcie końcowym nie tylko zaprzestanie jego pracy, ale również niebezpieczeństwo pożaru, a nawet detonacji (na skutek odparowania elementów).

Wysoka niezawodność węzłów elektroenergetycznych oraz szybkość przesyłu informacji równa prędkości światła umożliwiła tzw. sterowanie „po drucie”, tj. połączenia elektryczne pomiędzy elementami sterowania (np. drążkiem sterowym) a ruchomymi elementami sterującymi płatowca [190, 229].

Aby utrzymać wartość napięcia na zaciskach odbiorników, stosuje się regulatory napięcia, które mają za zadanie stabilizować poziom napięcia na szynie odbiorników [78, 171, 173, 174, 240]. Okazuje się jednak, że w stanach przejściowych regulatory niekiedy nie są w stanie wystarczająco szybko wyregulować poziomu napięcia, przy czym sama regulacja napięcia często nie gwarantuje poprawy. Winę ponoszą spadki napięcia w obwodzie pomiędzy pierwotnym źródłem zasilania a odbiornikiem: zwiększona rezystancja na końcówkach kablowych, na kotwicach styczników sterujących, na skorodowanej strukturze połączeń mechanicznych kadłuba (stanowi obwód powrotny przepływu prądu). Zjawiska te są szczególnie dotkliwie odczuwalne dopiero po kilkunastu latach eksploatacji. Jeżeli dobrze rozpozna się zjawiska związane z tym zagadnieniem, to można drogą niewielkich kosztów panować nad tą sytuacją bez zakupów nowego sprzętu. Zagadnienia te będą omówione w dalszej części niniejszej monografii.



## LOTNICZE ŹRÓDŁA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

### 4.1. Podział lotniczych źródeł energii elektrycznej

Statki powietrzne wykonują złożone zadania, co powoduje nasycenie techniki lotniczej systemami, agregatami i urządzeniami zasilanymi energią elektryczną, które umożliwiają ich realizację. Powstały zintegrowane systemy nawigacyjno-celownicze, systemy rozpoznania i walki radioelektronicznej, komputerowe systemy przetwarzania i zobrazowania informacji, systemy sterowania oraz inne, które w znacznym stopniu zwiększyły wartość użytkową statków powietrznych. Wszystkie te systemy są zasilane z pokładowej sieci elektrycznej, która umożliwia prawie natychmiastową gotowość do działania, minimalizację masy i gabarytów, dużą prędkość przesyłową, łatwość przemiany w inne rodzaje energii, wysoką sprawność przetwarzania oraz łatwość separacji od miejsc niebezpiecznych. W przypadku wojskowych statków powietrznych prawidłowe działanie tych systemów w każdych warunkach wymaga zasilania energią elektryczną o parametrach odpowiedniej jakości, określonej w normach, np.: NO-15-A200:2016 [141].

System elektroenergetyczny statku powietrznego to samodzielna sieć komponentów, które wytwarzają, przesyłają, dystrybuują, wykorzystują i przechowują energię elektryczną. Główną funkcją tego systemu jest generowanie, regulowanie i dystrybucja mocy w całym statku powietrznym. Generalnie systemy elektroenergetyczne statku powietrznego wykorzystują zarówno prąd przemienny, jak i stały.

Lotnicze źródła energii elektrycznej dzielimy na pokładowe i lotniskowe. Pokładowe urządzenia elektryczne stanowią złożony i zautomatyzowany system elektroenergetyczny obejmujący:

- pierwotne źródła energii elektrycznej wraz z urządzeniami sterującymi i zabezpieczającymi ich funkcjonowanie,

- wtórne źródła energii elektrycznej wraz z urządzeniami sterującymi i zabezpieczającymi ich funkcjonowanie,
- awaryjne źródła energii elektrycznej wraz z urządzeniami sterującymi i zabezpieczającymi ich funkcjonowanie,
- sieci przesyłowo-rozdzielcze, tj. zbiory urządzeń zapewniających dostarczenie energii od źródeł do odbiorników oraz sterowanie ich funkcjonowaniem,
- odbiorniki energii elektrycznej o różnorodnym przeznaczeniu.

W większości przypadków pierwotne źródła energii elektrycznej stanowią:

- synchroniczne prądnice prądu przemiennego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym, zwane prądnicami synchronicznymi,
- komutatorowe prądnice prądu stałego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym, zwane prądnicami bocznikowymi.

Natomiast Lotniskowe Zasilanie Elektroenergetyczne (LZE) stanowiące wyposażenie lotnisk przeznaczone są do zasilania systemów pokładowych statków powietrznych, uruchamiania silników i sprawdzania stanu technicznego wyposażenia pokładowego [140, 155]. Wśród LZE, można zaobserwować znacznie większe (niż dla statków powietrznych) zróżnicowanie typów oraz źródeł energii ze względu na sposób pozyskiwania energii elektrycznej dostosowanej do potrzeb pokładowej instalacji elektroenergetycznej statku powietrznego.

Od jakości energii elektrycznej wytwarzanej na pokładzie statku powietrznego przez pierwotne źródła energii elektrycznej (tj. prądnice prądu stałego lub przemiennego) i następnie przekazywanej przez sieci przesyłowo-rozdzielcze do poszczególnych systemów pokładowych zależy prawidłowe działanie urządzeń zasilanych tą energią. Stany nieprawidłowego działania systemu elektroenergetycznego stanowią bezpośrednie zagrożenie dla poprawnego działania zasilanych przez niego systemów statku powietrznego – a tym samym zagrożenie bezpieczeństwa lotu.

## **4.2. Prądnice prądu stałego**

### **4.2.1. Ogólna charakterystyka prądnic prądu stałego**

#### **4.2.1.1. Komutatorowa prądnica prądu stałego w lotnictwie**

W lotnictwie wojskowym RP, m.in. na statkach powietrznych: Su-22 [47, 48], MiG-29 [46, 49], PZL-130TC-II Orlik [51], W-3WA [163], SW-4 [164], M-28B/PT Skytruck [175-178], CASA-C295M [33], Mi-8 [215], Mi2 [214] nadal wykorzystuje się jako źródło energii elektrycznej komutatorowe prądnice prądu stałego. Ponadto

wykorzystywane są różne silniki komutatorowe prądu stałego, np. do rozruchu bezpośredniego głównego silnika turbinowego, jak np. ST-107 w W-3WA Sokół lub do rozruchów turborozruszników np.:

- NSN-2925-01-221-3247 w turborozruszniku samolotu Herkules,
- STG-3 w turborozrusznikach AI-9 i AI-9M śmigłowców: Mi-17, Mi-14, Mi-24,
- LUN2251.01 w turborozruszniku SAFIR5K/G78 oraz SAFIR5K/M1.

Zaletami układu wykorzystującego komutatorowe prądnice prądu stałego są m.in.: łatwa współpraca z pokładową baterią akumulatorową, a także możliwość współpracy buforowej, czyli pobierania energii z baterii akumulatorowej podczas przeciążenia prądnicy, oraz łatwa współpraca równoległa prądnic, ponieważ nie trzeba synchronizować częstotliwości ani fazy [14, 15, 37, 55, 64]. Prądnica prądu stałego jest maszyną odwracalną, tzn. może pracować jako prądnica, a za chwilę może być użyta jako rozrusznik. Ponadto, do zalet tego układu należą: prosty układ regulacji napięcia kontrolujący tylko amplitudę napięcia wyjściowego prądnicy, brak efektu pojemnościowego podczas pracy w warunkach ustalonego (stałego) obciążenia, tj. efektów zwiększania napięcia na końcu kabla przy obciążeniu o charakterze pojemnościowym [2, 7, 27, 37, 101].

W prądnicach komutatorowych prądu stałego konieczność przemieszczenia położenia szczotek do strefy magnetycznie obojętnej (neutralnej) jest znana i opisana w literaturze [14, 28, 112, 132, 133, 229]. Wiadomo, że linia strefy magnetycznie obojętnej maszyny prądu stałego wraz ze wzrostem natężenia prądu w obwodzie przemieszcza się na skutek reakcji twornika (powstawania pola magnetycznego poprzecznego do kierunku linii pola magnetycznego stojana) w stosunku do geometrycznej płaszczyzny pomiędzy nabiegunkami stojana – w prądnicach zgodnie z kierunkiem obrotów wirnika, w silnikach przeciwnie. Obwód magnetyczny stojana uzyskuje lokalne nasycenie, przez co prądnica staje się mniej wydajna – efektem zewnętrznym jest zmniejszenie poziomu napięcia wyjściowego dla układów bez regulatora lub zwiększenie prądu wzbudzenia dla układów z automatycznym regulatorem napięcia. W prądnicach przy wzroście obciążenia prądowego przemieszczano szczotkarki o pewien kąt w kierunku wirowania napędu prądnicy, aby utrzymać wymagany poziom napięcia na wyjściu prądnicy. W celu zautomatyzowania procesu kompensacji tego zjawiska w maszynach prądu stałego montuje się uzwojenie komutatorowe i uzwojenia kompensacyjne wytwarzające pole magnetyczne o przeciwnym zwrocie niż strumień reakcji twornika. Jednakże w czasie długotrwałej eksploatacji pomimo istnienia tych uzwojeń oraz automatycznego regulatora napięcia sprawność prądnicy spada.

W literaturze nie omawia się wpływu procesu starzeniowego na zmniejszenie skuteczności oddziaływania tych uzwojeń – badania takie przeprowadził jeden

z autorów niniejszego opracowania. Z uwagi na procesy starzeniowe w obwodach elektrycznych i magnetycznych skuteczność rozpatrywanej automatycznej kompensacji maleje, stąd konieczne jest dodatkowe korygowanie położenia szczotek względem stojana.

W konstrukcjach lotniczych w praktyce eksploatacyjnej rzadko kiedy reguluje się kąt położenia szczotek względem strefy magnetycznie obojętnej [15, 16, 24, 37, 92, 121, 242] z uwagi na niedocenienie znaczenia wpływu reakcji twornika (powstawania silnego pola poprzecznego w tworniku przy zwiększaniu natężenia prądu obciążenia) m.in. na:

- a) sprawność energetyczną prądnicy, zwłaszcza w warunkach dynamicznych zmian poziomu jej obciążenia, destrukcji jej komutatora,
- b) proces przeciążenia cieplnego prądnicy,
- c) przeciążenia prądowego uzwojenia wzbudzenia,
- d) szybkość układu automatycznej regulacji napięcia przez nią zasilanego.

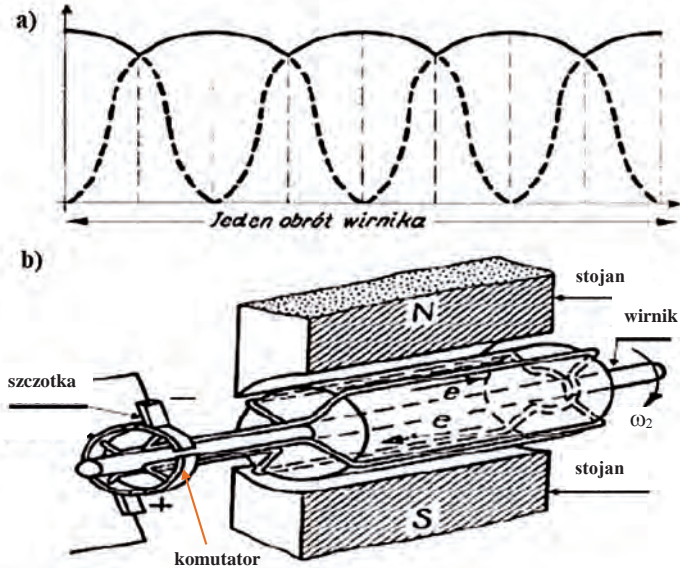
Ponadto eksploatacysty nadmierną wiarę pokładają w roli uzwojenia komutatorowego oraz kompensacyjnego w neutralizacji skutków oddziaływania pola poprzecznego – mimo że, jak się okazuje, w miarę upływu czasu eksploatacji ich skuteczność słabnie. Tendencja odchodzenia od stosowania w nowych konstrukcjach lotniczych komutatorowych prądnic prądu stałego na korzyść trójfazowych prądnic prądu przemiennego dodatkowo spowodowała spadek liczby opracowań literaturowych na temat regulacji stref magnetycznie obojętnych.

#### 4.2.1.2. Konstrukcja i działanie komutatorowej prądnicy prądu stałego

Komutatorowa prądnica prądu stałego (rys. 4.1) jest elektromechanicznym przekształtnikiem mocy mechanicznej w moc elektryczną. Warunkiem koniecznym działania prądnicy jest nadanie jej wirnikowi prędkości kątowej  $\omega_m$  (przekazywanej od sprzęgniętego z nim silnika turboodrzutowego) oraz zapewnienia strumienia wzbudzenia wytwarzanego przez stojan prądnicy. Strumień magnetyczny stojana  $\Phi$  wywołany jest przepływem  $I_w \cdot z_w$ , który wytwarza prąd wzbudzenia (magnesujący) przepływający przez uzwojenie wzbudzenia (uzwojenie magnesujące), na rys. 4.1 dla uproszczenia strumień wzbudzenia zapewniony jest przez magnes stały.

Prąd powstały na skutek istnienia siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu wirnika (tzw. tworniku) wyprowadzany jest z prądnicy do obwodu zewnętrznego przez komutator i szczotki [15, 22, 38, 44, 60, 136, 212]. Na rys. 4.1 przedstawiono schemat prądnicy komutatorowej prądu stałego i przebieg jej siły elektromotorycznej w klasycznym ujęciu. Schemat przedstawia wirnik

z dwoma zwojami, komutatorem o czterech wycinkach oraz wykres zmian siły elektromotorycznej między szczotkami prądnicy prądu stałego.



**Rys. 4.1.** Schemat prądnicy komutatorowej prądu stałego z przebiegiem napięcia [119]: a) przebieg składowych napięcia (siły elektromotorycznej SEM o wartości chwilowej  $e$  indukowanego w poszczególnych zewzwojach wirnika – tworzenie się pulsacji komutatorowej; b) widok ogólny prądnicy

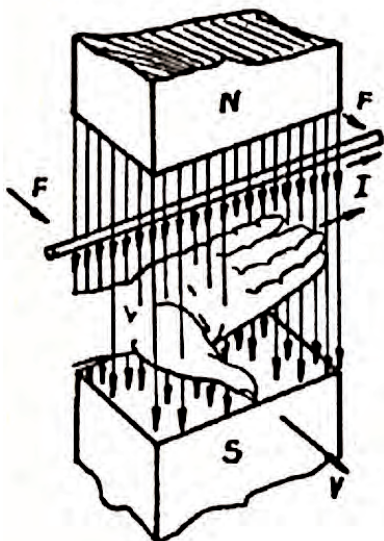
Pokazana na rys. 4.1 prądnica komutatorowa prądu stałego składa się z nieruchomego stojana, który można przedstawić jako pary magnesów stałych N i S wytwarzających stałe pole magnetyczne o natężeniu  $B$ , oraz wirnika obracanego zewnętrzną siłą mechaniczną z prędkością kątową  $\omega_2$ . Na wirniku nawinięte są zwoje (uzwojenie twornika), w których indukuje się siła elektromotoryczna  $e$ . Siłę  $e(t)$  można opisać wzorem (4.1) [85, 86, 87, 112]:

$$e(t) = K_g \cdot B \cdot \omega_2 \cdot \sin \left[ \int_0^t \omega_2(t) dt \right] \quad (4.1)$$

gdzie:  $K_g$  – współczynnik konstrukcyjny danej prądnicy,  $B$  – indukcja magnetyczna,  $\omega_2(t)$  – chwilowa prędkość kątowa wirnika prądnicy,  $t$  – czas

Kierunek wektora SEM oraz przepływu prądu w prądnicy ustala się za pomocą reguły prawej dłoni: kciuk wskazuje kierunek przemieszczania przewodu elektrycznego, zwroty wektorów pola magnetycznego stojana skierowane są w stronę

wewnętrznej części dłoni, pozostałe cztery palce wskazują kierunek przepływu prądu (rys. 4.2).



**Rys. 4.2.** Wyznaczanie kierunku SEM i prądu w przewodzie elektrycznym poruszonym siłą  $F$  w polu magnetycznym stojana prądnicy za pomocą reguły prawej dłoni [108]

Na wirniku zamocowany jest również komutator w postaci pierścienia wykonanego z materiału elektrycznie przewodzącego. Pierścień ten jest podzielony na segmenty, które są od siebie odizolowane elektrycznie, tworząc tzw. wycinki komutatora, zaś do każdego wycinka jest przyłączony koniec zwoju. Aby zwoje na wirniku były dobrze mechanicznie związane z rdzeniem komutatora, układa się je w specjalnie wykonanych rowkach, zwanych żłobkami [14, 22, 74]. Komutator pełni funkcję mechanicznego prostownika prądu przepływającego przez zwoje wirnika, wycinki komutatora oraz przez szczotki elektryczne (rys. 4.1b szczegóły: „+” i „-”), które ślizgają się po kłepkach komutatora.

Na zaciskach wyjściowych prądnicy otrzymuje się napięcie pulsacyjne (rys. 4.1a) powstające na skutek geometrycznego zsumowania wyprostowanych (przez komutator) przebiegów napięcia z poszczególnych zwojów wirnika. Przebieg takiego napięcia można rozdzielić na dwie składowe:

- składową stałą,
- składową zmienną pulsacji.

Pulsacje (linia ciągła rys. 4.1a) są synchronicznie związane z prędkością kątową wirnika prądnicy [71, 72]. W celu zwiększenia wartości indukcji magnetycznej  $B$

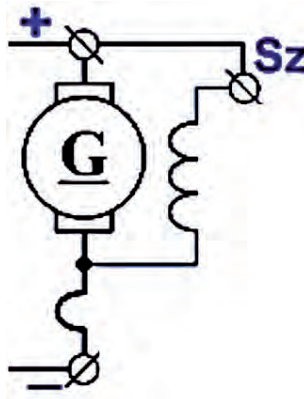


w prądniccy układa się zwoje wirnika (twornika) na rdzeniu wykonanym z pakietu blach krzemowych, uzyskując w ten sposób wzmocnienie wartości siły elektromotorycznej (SEM) o ok. 10 000 razy [119]. Sposób połączenia uzwojenia wzbudzenia względem uzwojenia twornika prądniccy określa nazwę maszyn: obcowzbudna lub samowzbudna (bocznikowa, szeregową i szeregowo-bocznikowa).

Komutatorowe prądnice prądu stałego używane na statkach powietrznych są prądnicami samowzbudnymi, to znaczy takimi, w których prąd przepływający przez uzwojenie wzbudzenia prądniccy płynie pod wpływem siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu twornika tej samej maszyny. Schemat ideowy prądniccy bocznikowej z biegunami komutacyjnymi przedstawiono na rys. 4.3.

Aby nastąpiło wzbudzenie, konieczne jest istnienie strumienia magnetycznego szczątkowego i ruch obrotowy wirnika oraz następujące warunki [15, 17, 22, 101, 192, 203]:

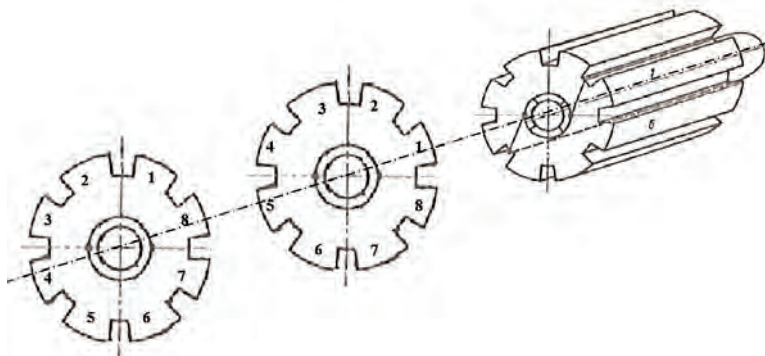
- 1) W tworniku prądniccy musi być magnetyzm szczątkowy.
- 2) Kierunek zwrotu magnetyzmu szczątkowego musi być zgodny z kierunkiem i zwrotem strumienia magnetycznego wytwarzanego przez uzwojenie wzbudzenia (strumień magnetyczny wzbudzenia musi wzmocnić magnetyzm szczątkowy, czyli nie powodować rozmagnesowania prądniccy). Niekiedy kierunek magnetyzmu szczątkowego jest przeciwny. Może to nastąpić na skutek nagłego rozłączenia zacisków wyjściowych prądniccy od obciążenia przy wysokim poziomie pobieranego prądu obciążenia. W takim przypadku należy domagnesować stojan prądniccy poprzez krótkotrwałe przyłożenie napięcia do zacisków wzbudzenia zgodnie z polaryzacją oznaczoną na tabliczce zaciskowej prądniccy.
- 3) Oporność obwodu wzbudzenia musi być mniejsza od tzw. oporności krytycznej.



**Rys. 4.3.** Schemat ideowy prądniccy bocznikowej z biegunami komutacyjnymi, gdzie: Sz – zacisk uzwojenia wzbudzenia [43]

Twornik w kształcie walca wiruje w nieruchomym polu magnetycznym, wobec czego jest stale przemagnesowywany. Z tego względu rdzeń twornika powinien być wykonany z materiału o małej wartości magnetyzmu szczałkowego w celu zmniejszenia strat histerezy. Ponieważ metalowy rdzeń twornika w czasie wirowania przecina linie magnetyczne, indukują się w nim prądy wirowe. W celu zmniejszenia prądów wirowych rdzeń twornika wykonuje się z cienkich blach krzemowych o grubości ok. 0,5 mm. Blachy te, w kształcie krążków z wcięciami (rys. 4.4), są jednostronnie izolowane bibulką lub lakierem izolacyjnym. Ich proces starzeniowy wynikający z pracy w podwyższonej temperaturze jest jedną z przyczyn zmniejszania się wartości przenikalności magnetycznej w funkcji godzin nalotu.

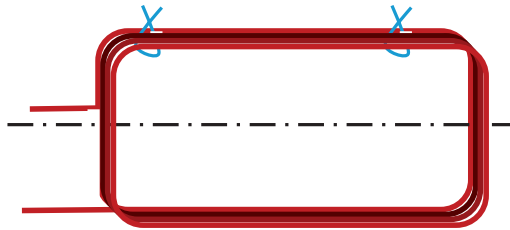
Aby uniknąć anizotropii wirnika, tj. jednokierunkowego zmniejszenia przenikalności magnetycznej związanej z kierunkiem walcowania blach (w procesie jej wytwarzania), oraz zmniejszyć błąd kątowy podziałki międzyzębnej w czasie wykonania procesu wykrawania, każdy kolejny krążek blachy przesuwana się o jedną podziałkę kątową. Tak skompletowany pakiet wirnika zostaje ściśnięty i po zanurzeniu w lakierze izolacyjnym zostaje wstawiony do autoklawu, gdzie pod ciśnieniem usuwane są wszystkie pęcherzyki powietrza. Następnie rdzeń jest poddany procesowi suszenia w podwyższonej temperaturze.



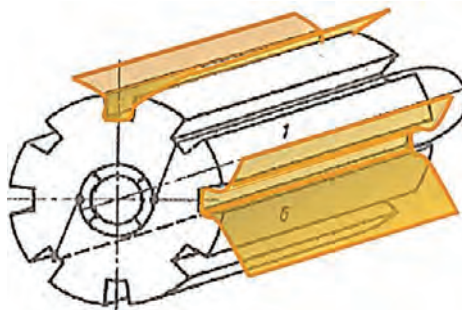
Rys. 4.4. Pakiet wirnika prądnic w czasie montażu

Po wysuszeniu rdzenia wciska się w niego stalową tuleję, a tę w aluminiową ożebrowaną piastę w kształcie gwiazdy. Piasta ma kanały wentylacyjne do przepływu chłodzonego powietrza. Do piasty wciśnięty jest stalowy wał drażony, który jest wykonany ze stali o dużej wytrzymałości. Następnie przechodzi się do jego zwojenia. W tym celu na specjalnych ramkach przygotowuje się odpowiednią liczbę zewojów, zabezpiecza się tymczasowo zwoje przed przemieszczeniem za pomocą nici, a następnie nadaje się im odpowiedni kształt, czyli tzw. krępowanie.

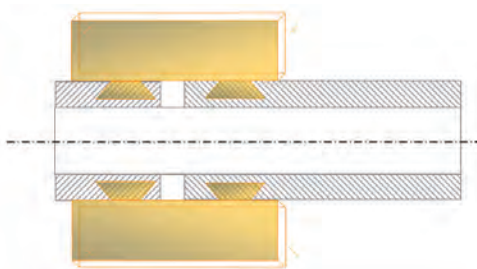
W żłobkach wirnika układa się wyprofilowane kawałki cienkiego izolatora (zwykle jest to preszpan) i na jego powierzchni układa się wstępnie boki zezwojów. Następnie, po przecięciu nici zabezpieczającej, za pomocą ebonitowej lub drewnianej kostki, wciska się posuwistymi ruchami równomiernie boki każdej ramki zezwoju (rys. 4.5) do żłobka (rys. 4.6).



**Rys. 4.5.** Pojedynczy zewzój przygotowany do montażu w wirniku (tworniku) komutatorowej prądniccy prądu stałego



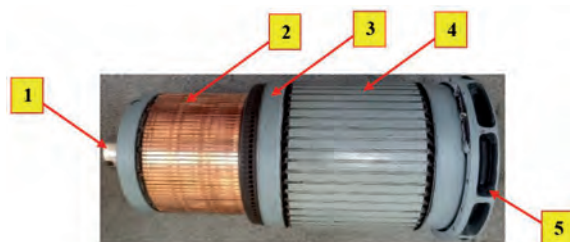
**Rys. 4.6.** Wirnik (twornik) komutatorowej prądniccy prądu stałego przygotowany do zamontowania zezwoju – dwa żłobki wyłożone preszpanem



**Rys. 4.7.** Wirnik (twornik) komutatorowej prądniccy prądu stałego – sposób mocowania klepek komutatora do konstrukcji wirnika

Po wciśnięciu wszystkich zwojów jednego boku ramki przecina się nadmiar preszpanu, zawija się go do wewnątrz i zabezpiecza przed wysunięciem ze żłobka przy pomocy klinów wykonanych z materiału izolacyjnego. Końcówki zezwojów lutuje się lutem twardym srebrnym do końcówek komutatora (zazwyczaj wykonanego z brązu chromowego), tzw. chorągiewek. Odcinki końcówek pomiędzy żłobkiem wirnika a miejscem lutowania są narażone na duże elektromagnetyczne siły rozciągające (w kierunku biegunów stojana). Dlatego też są one w tych miejscach owinięte tzw. bandażem z materiału izolacyjnego, najczęściej taśmą szklaną, i wzmacniane drutem stalowym.

Wycinki komutatora, popularnie zwane klepkami, są wykonane w postaci płaskowników pakietowanych promieniowo i rozdzielanych mineralnym izolatorem, zwanym mikanitem. Każda klepka od wewnętrznej strony ma kształt jaskółczego ogona (rys. 4.7), co umożliwia jej mocowanie przez wewnętrzną konstrukcję stojana. Wycinki kolektora założone są na dwóch stalowych pierścieniach i zamocowane z obu końców krążkami dociskającymi i nakrętkami. Pierścienie i krążki odizolowane są od wycinków kolektora za pomocą stożków mikanitowych i taśmy mikanitowej nawiniętej na pierścień. Wał napędowy umieszczony jest wewnątrz wału drążonego. Wał napędowy zamocowany jest na wale drążonym za pomocą klina albo wielowypustu i nakrętki, umożliwiając w ten sposób przenoszenie napędu na twornik i kolektor prądnicy za pomocą wielowypustu umieszczonego na jego drugim (w stosunku do miejsca przyłożenia momentu napędowego) zakończeniu. Połączenie to umożliwia zwiększenie tolerancji montażowej na niewspółosiowy montaż prądnicy na przekładni – tworzy się swego rodzaju elastyczność połączenia wirnika prądnicy z gniazdem napędowym przekładni – stąd też w świecie praktyków awioników zrodziło się pojęcie „wałka giętkiego”. Na wale drążonym od strony napędu zamocowany jest aluminiowy wentylator. Kompletny wirnik montuje się na łożyskach tocznych w korpusie prądnicy (rys. 4.8).



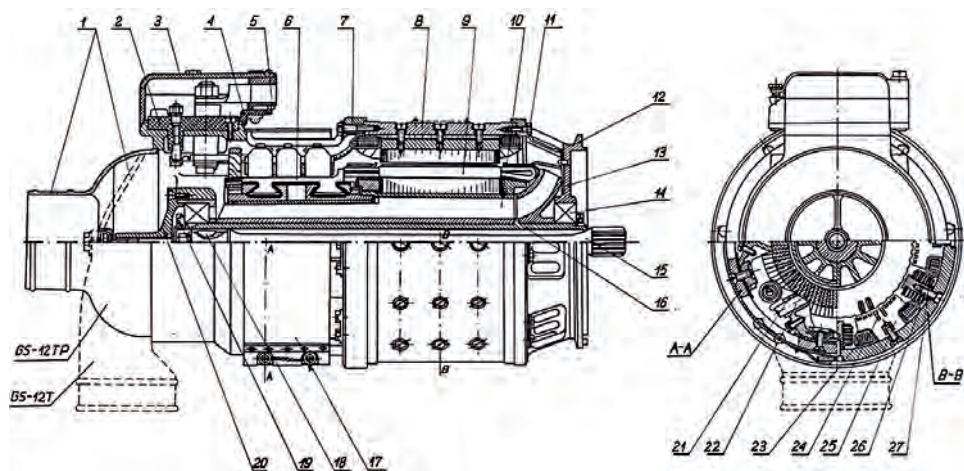
**Rys. 4.8.** Wirnik (twornik) komutatorowej prądnicy prądu stałego – widok zewnętrzny, gdzie: 1 – wał stalowy; 2 – komutator; 3 – „bandaż”; 4 – żłobki wirnika z uzwojeniami; 5 – łopatki wentylatora odśrodkowego

Korpus prądnicy jest wykonany w formie grubościennego walca odlanego ze staliwa. Wcześniej (przed zamontowaniem wirnika) do korpusu wkłada się cewki uzwojenia stojana i wkłada się w ich środek nabiegunniki. Nabiegunniki są wykonane z pakietu blach krzemowych, blachy te przełożone są izolacyjną bibułą lub odizolowane od siebie lakierem izolacyjnym i sklejone w autoklawie. W nabiegunnikach są nawiercone i nagwintowane otwory do wkręcania wkrętów łączących je z korpusem.

W prądnicy GS-12T 3s rys. 4.9 (Su-22) jest sześć biegunów stojana. Pomiędzy nimi montuje się bieguny komutacyjne na podkładkach diamagnetycznych (np. miedzianych) w celu regulacji oporności magnetycznej, a więc i regulowania strumienia magnetycznego biegunów dodatkowych [133]. Pod tymi biegunami będą później ustawiane szczotki komutacyjne, zaś biegun dodatkowy ma za zadanie zneutralizować pole magnetyczne stojana wokół nich, aby zwierane przez szczotki zezwoje nie miały zbyt dużego napięcia. Bieguny tzw. dodatkowe, z litej, miękkiej stali, również przykręca się do odlewu korpusu.

W prądnicach dużej mocy (powyżej 10 kW) żłobki nabiegunników stojana mają wyfrezowane płytkie zęby. Służą one do montażu uzwojenia kompensacyjnego. Uzwojenie to jest wykonane ze sztywnych płaskowników, zaś jego środek „wisi w powietrzu”. Musi tak być, bo mają one za zadanie kompensowanie pola poprzecznego – zbyt niska wartość rezystancji magnetycznych spowodowałaby tu zbyt wielki strumień kompensacyjny w stosunku do strumienia reakcji wirnika na obciążenie prądowe – powstałoby przekompensowanie. Szczelina powietrzna o dużej wartości (ok. 10 mm) skutecznie zwiększa wartość rezystancji magnetycznej związanej z uzwojeniem kompensacyjnym, a jednocześnie powoduje, że ten obwód magnetyczny (kompensacyjny) jest odporny na nasycenie magnetyczne. Jednocześnie tak duża szczelina powietrzna powoduje, że zmiany przenikalności magnetycznej, jak i oporność magnetyczna wirnika jest bez znaczenia wobec bardzo dużej rezystancji magnetycznej szczeliny powietrznej.

Oslona kolektora, wykonana ze stopu aluminium, przymocowana jest do stojana za pomocą pierścienia osadzającego i wkrętów. W osłonie wprasowane jest łożysko. Wewnątrz, do cylindrycznej części osłony, zamocowanych jest wkrętami sześć promieniowych obsad szczotkowych. Obsady te mają po trzy przewodnice do umieszczenia szczotek, a szczotki do kolektora twornika są dociskane sprężynami spiralnymi. Od osłony obsady szczotek odizolowane są podkładkami z mikanitu lub tekstolitu. Dzięki specjalnym otworom na pierścieniu osadczym istnieje możliwość przesunięcia obsady względem stojana.



**Rys. 4.9.** Półprzekrój prądnicy komutatorowej prądu stałego GS-12T 3s [133, 134], gdzie: 1 – króciec, 2 – tabliczka zaciskowa, 3, 5 – pokrywy, 4 – kołpak, 6 – kolektor (komutator) z widocznym mocowaniem klepek komutatora do piasty wirnika (10), 7, 12 – osłony, 8 – stojan, 9 – twornik, 10 – piasta, 11 – wkręt, 13 – wentylator, 14 – łożysko, 15 – wał napędowy (giętki), 16 – wał drążony, 17 – taśma ochronna, 18 – klin, 19 – nakrętka, 20 – kołnierz, 21 – obsada szczotkowa, 22 – szczotka, 23 – uzwojenie biegunów zasadniczych, 24 – uzwojenie kompensacyjne, 25 – biegun zasadniczy, 26 – biegun dodatkowy, 27 – uzwojenie biegunów dodatkowych (komutatorowych)

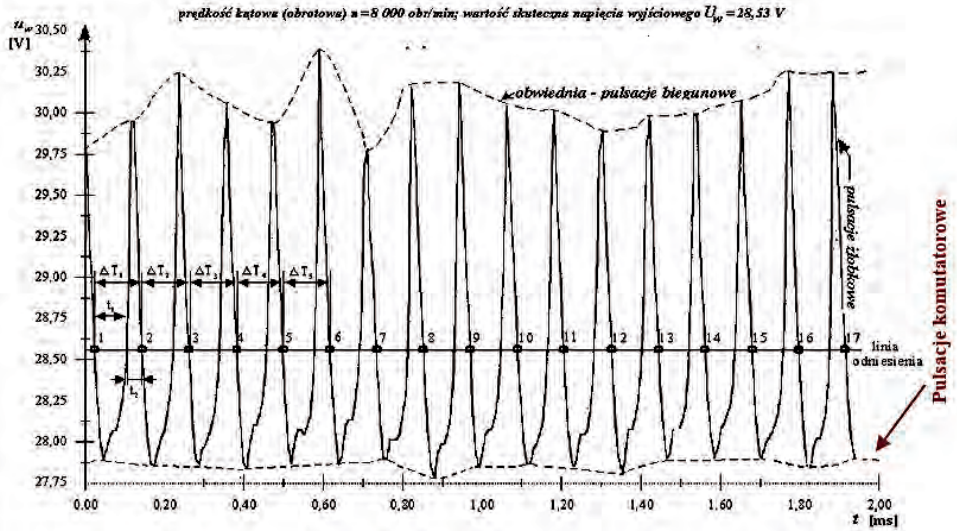
Jak wcześniej wspomniano, na wirniku zamocowany jest również komutator w postaci pierścienia wykonanego z materiału elektrycznie przewodzącego. Pierścień ten jest podzielony na segmenty, które są od siebie odizolowane elektrycznie, tworząc tzw. wycinki komutatora. Do każdego wycinka jest przyłączony koniec zwoju. Komutator pełni funkcję mechanicznego prostownika prądu przepływającego przez zwoje wirnika, wycinki komutatora oraz przez szczotki elektryczne, które ślizgają się po klepkach komutatora. Na zaciskach wyjściowych prądnicy otrzymuje się napięcie pulsacyjne (rys. 4.10) powstające na skutek geometrycznego zsumowania wyprostowanych (przez komutator) przebiegów napięcia z poszczególnych zwojów wirnika. Przebieg takiego napięcia można rozdzielić na dwie składowe:

1. składową stałą (DC)  $U \approx 28,5$  V,
2. składową zmienną pulsacji (AC)  $U \approx 0,5-2,1$  V.

Składowa zmienna pulsacji może być podzielona na trzy składowe:

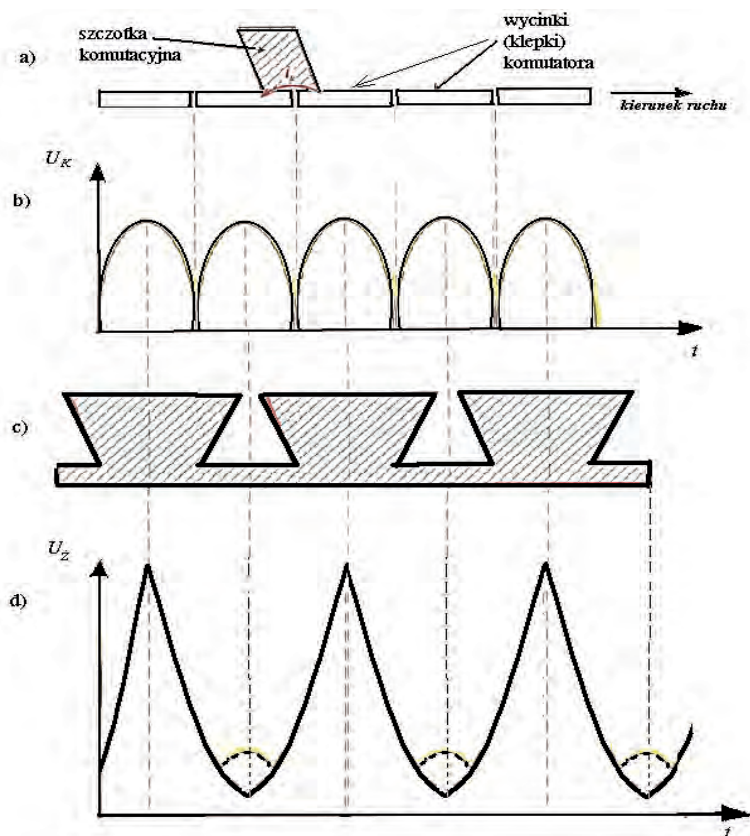
1. Pulsacje komutatorowe – przedstawione na rys. 4.10, związane głównie z procesem prostowania elektromechanicznego realizowanego przez komutator – dla poprawnie działającej maszyny komutatorowej prądu stałego są one niewiel-

kie, rzędu kilku procent wartości amplitudy składowej pulsacji. Dopiero wraz ze stopniem przekroczenia poziomu obciążenia prądnicy powyżej 100% wartości mocy znamionowej zaczyna wprost proporcjonalnie przekraczać poziom amplitudy składowej żłobkowej pulsacji.



**Rys. 4.10.** Zmiany składowej pulsacji dla lotniczej prądnicy prądu stałego bez zwarcia, przy minimalnym obciążeniu [60, 61]

2. Pulsacje żłobkowe związane z istnieniem żłobków wirnika przemieszczających się pod nabiegownikami stojana. Ponieważ wciśnięte do żłobków wirnika przewody wykonane są z miedzi, a ta jest diamagnetykiem, tzn. ma bardzo niską przenikalność  $\mu_r = 1$ , zaś stal krzemowa wierzchołka zęba  $\mu_r \approx 8000$ , to przemieszczający się wirnik powoduje pulsacyjne zmiany oporności magnetycznej dla strumienia magnetycznego stojana – powstają pulsacje żłobkowe – w warunkach poprawnego działania prądnicy stanowią one ok. 90% wartości składowej pulsacji.
3. Pulsacje biegunowe – objawiają się w postaci obwódni składowej pulsacji żłobkowej (rys. 4.11, szczegól „obwódni – pulsacje biegunowe”). Zwykle nie przekraczają 10% wartości pulsacji żłobkowych. Jednakże w chwili zwarcia zezwoju do masy wirnika prądnicy, gdy przywarty zezwój przechodzi pod środkiem nabiegownika stojana, wartość pulsacji biegunowej osiąga do 700% wartości pulsacji żłobkowej (która cały czas jest stabilna). Jednocześnie w tym momencie wzrasta również wartość pulsacji komutatorowej do 300% wartości pulsacji żłobkowej.

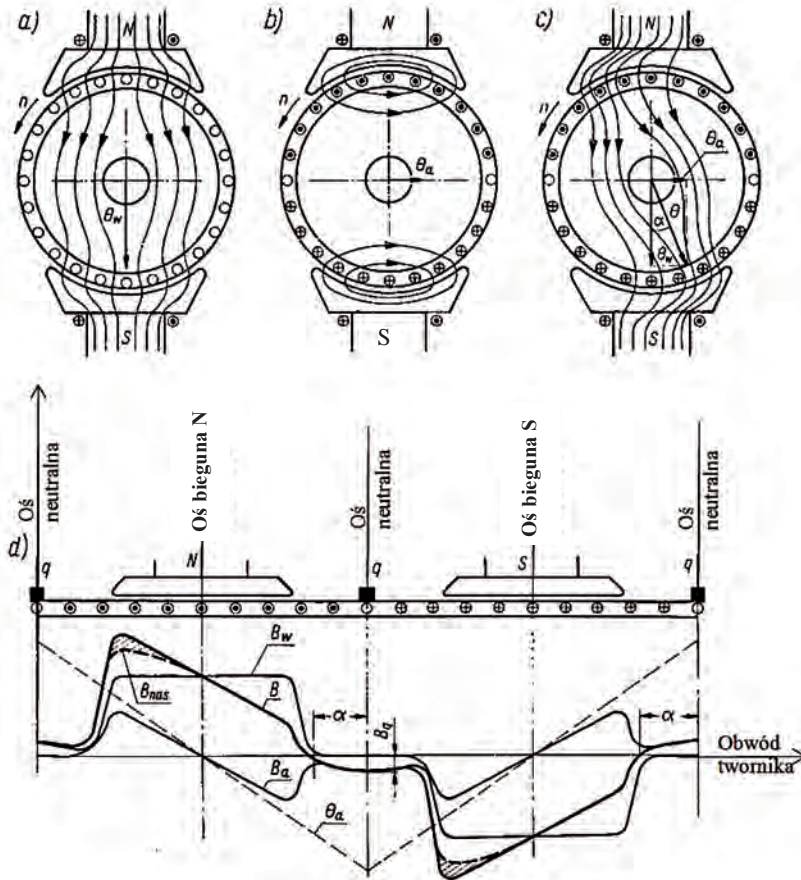


**Rys. 4.11.** Kształt przebiegu składowej napięcia pulsacji dla prądnicy prądu stałego: a) rozwinięcie elementów mechanicznego węzła komutatora; b) przebieg pulsacji komutatorowych; c) rozwinięcie żłobków wirnika; d) przebieg pulsacji żłobkowych (linia ciągła) z zaznaczeniem pulsacji komutatorowych (linia przerywana) [60, 61]

#### 4.2.2. Kompensacja oddziaływania twornika

Pole magnetyczne biegunów głównych stojana nie jest jedynym polem magnetycznym wytwarzanym w maszynie prądu stałego pracującej jako prądnica [15, 37, 44]. Obraz tego pola oraz rozkład indukcji na obwodzie maszyny prądu stałego przedstawiono na rys. 4.12. Kształt tego pola w maszynie o jednej parze biegunów w stanie jałowym, przedstawiono na rys. 4.12a. Strumień wytwarzany przez ten przepływ nazywa się strumieniem głównym  $\theta_w$ . W przedstawionym przypadku nad biegunami indukcja ma wartość stałą, w strefie neutralnej jest równa zero – przedstawia to na rys. 4.12d krzywa  $B_w$ .





**Rys. 4.12.** Oddziaływanie twornika maszyny prądu stałego [15, 37, 228]: a) przebieg strumienia głównego; b) przebieg strumienia oddziaływania twornika; c) przebieg strumienia wypadkowego; d) rozkład indukcji wzdłuż obwodu maszyny

Jeżeli maszyna prądu stałego jest obciążona, to w uzwojeniu twornika (wirnika) płynie prąd i w związku z tym wokół uzwojeń twornika wytwarza się pole magnetyczne twornika [14, 15] o kierunku prostopadłym do kierunku pola magnetycznego biegunów stojana i zwrocie zgodnym z regułą prawej dłoni. Obraz tego pola przedstawiono na rys. 4.12b. Strumień wytwarzany przez ten przepływ nazywa się strumieniem poprzecznym  $\Phi_a$ , a w osi neutralnej (tzn. osi symetrii pomiędzy krawędziami nabiegunków stojana) osiąga wartość maksymalną (rys. 4.12d). Indukcja magnetyczna  $B_a$  strumienia wytworzonego przez przepływ poprzeczny w dowolnym miejscu na obwodzie wirnika zależy od wartości przepływu i reluktancji (oporności magnetycznej), którą reprezentuje głównie szczelina powietrzna. Wykres indukcji magnetycznej  $B_a$  przedstawiono na rys. 4.12d. Pod biegunami prze-

bieg indukcji  $B_a$  jest liniowy, natomiast w strefie między biegunami indukcja jest zbliżona do zera.

Strumień magnetyczny reakcji twornika  $\Phi_a$  wytwarzany przez uzwojenia wirnika, nakładając się na strumień główny stojana (wzbudzenia)  $\Phi_w$ , zniekształca go, dając pewien strumień wypadkowy  $\Phi$ , którego obraz przedstawiono na rys. 4.12c. Wypadkowy strumień magnetyczny jest przemieszczony względem osi podłużnej o pewien kąt  $\alpha$ . Zniekształcenie głównego pola magnetycznego przez pole magnetyczne twornika jest nazywane oddziaływaniem twornika. Jeżeli obwód magnetyczny jest nienasycony, to przebieg wypadkowej indukcji magnetycznej przedstawia wykres  $B$  na rys. 4.12d. Gdy obwód magnetyczny jest nasycony, to przebieg wypadkowej indukcji magnetycznej przedstawia wykres  $B_{nas}$  na rys. 4.12d.

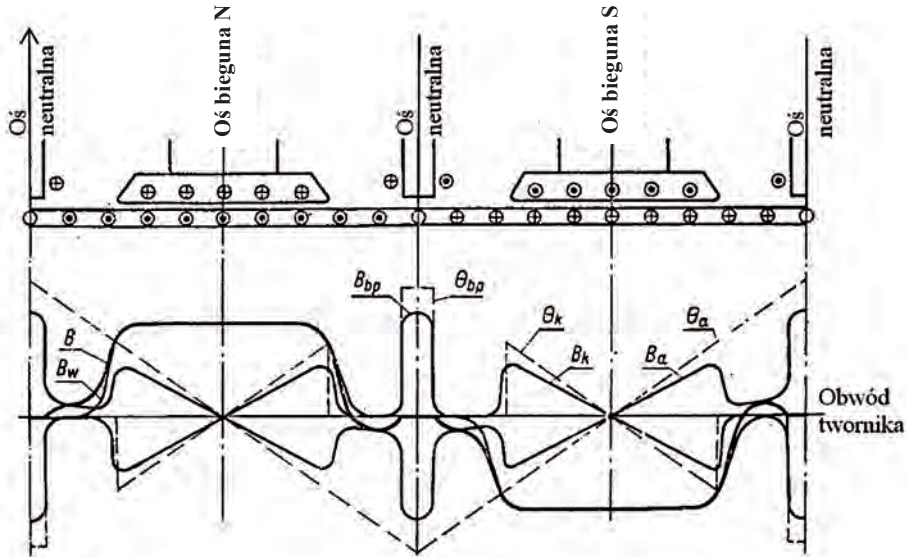
Oddziaływanie strumienia magnetycznego twornika (będące reakcją na przepływający przez uzwojenia wirnika prąd obciążenia)  $\Phi_a$  wywiera następujące skutki:

- pod biegunami ulega zmianie rozkład indukcji magnetycznej,
- rzeczywista oś neutralna ulega przemieszczeniu o kąt  $\alpha$  względem geometrycznej osi neutralnej na skutek oddziaływania składowej czynnej  $\Phi_{aq}$  strumienia magnetycznego twornika na strumień główny stojana (wzbudzenia)  $\Phi_w$ ,
- w maszynie nasyconej strumień magnetyczny wzdłuż osi symetrii nabiegunków stojana ulega zmniejszeniu na skutek oddziaływania składowej biernej  $\Phi_{ad}$  strumienia magnetycznego twornika na strumień główny stojana (wzbudzenia)  $\Phi_w$  – powoduje to osłabienie wypadkowego pola stojana i zgodnie ze wzorem (4.1) zmniejszenie napięcia wyjściowego prądnicy.

Przesunięcie strefy neutralnej o kąt  $\alpha$  powoduje, że w osi poprzecznej, gdzie są umieszczone szczotki, występuje pole magnetyczne o pewnej indukcji magnetycznej  $B_q$  – rys. 4.12d, a więc w zwojach zwartych przez szczotkę indukuje się napięcie, co powoduje przepływ znacznego prądu w tych obwodach – energia przepływu tego prądu zwartych zwojów jest bezużytecznie wytracana na ciepło, na wyjściu prądnicy obserwuje się zmniejszenie wartości napięcia. Konieczne staje się wówczas przesunięcie położenia szczotek o kąt  $\alpha$  w kierunku wirowania (rys. 4.12, szczegół n). Jednocześnie, jak wspomniano wcześniej, zmniejszenie strumienia powoduje spadek indukowanego napięcia.

Przesuwając szczotki prądnicy w kierunku wirowania wirnika o kąt  $\alpha$ , do miejsca gdzie indukcja jest równa zero, można przeciwdziałać skutkowi pojawienia się indukcji pola poprzecznego  $B_q$ . Aby zautomatyzować ten proces, w prądnicach prądu stałego stosuje się bieguny pomocnicze (dodatkowe, zwane także komutacyjnymi) oraz uzwojenia kompensacyjne. Ich uzwojenia są połączone w szereg z uzwojeniami twornika, zwrot strumienia magnetycznego tych uzwojeń jest skierowany przeciwnie do składowej czynnej strumienia wytwarzanego przez uzwojenia wirnika (twornika).

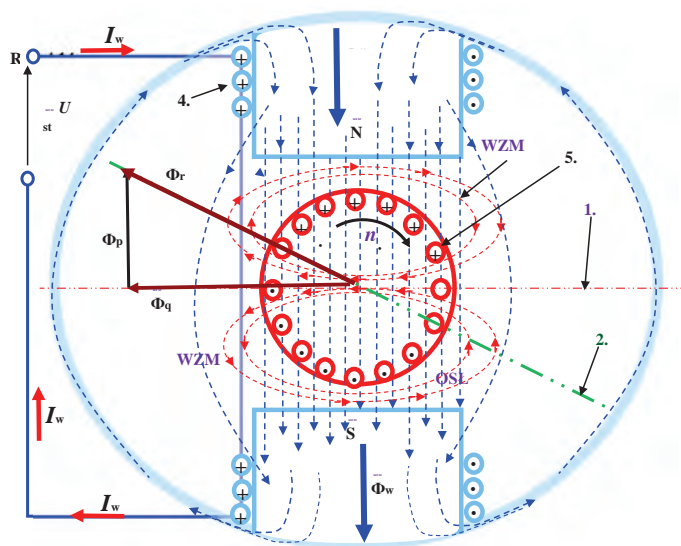
Zastosowane w maszynie prądu stałego bieguny dodatkowe, ustawione w strefie neutralnej, powodują, że przepływ wirnika działający w tej osi wytwarza duży strumień. Rozkład przepływów i indukcji w maszynie prądu stałego z biegunami pomocniczymi i uzwojeniem kompensacyjnym przedstawiono na rys. 4.13.



**Rys. 4.13.** Rozkład przepływów i indukcji w maszynie prądu stałego z biegunami pomocniczymi i uzwojeniem kompensacyjnym [15, 37, 228], gdzie:  $\theta_{bp}$  – strumień biegunów dodatkowych,  $B_{bp}$  – indukcja biegunów dodatkowych,  $\theta_k$  – strumień uzwojenia kompensacyjnego,  $B_k$  – indukcja uzwojenia kompensacyjnego,  $B_a$  – indukcja twornika,  $B_w$  – indukcja wirnika,  $B$  – wypadkowa indukcja magnetyczna

Bieguny dodatkowe i uzwojenia kompensacyjne sprawiają, że przeciwdziałają strumieniowi składowej czynnej pola magnetycznego wirnika – rozkład indukcji przy obciążeniu jest niemal taki sam, jak w stanie jałowym. Przez odpowiedni dobór uzwojeń biegunów dodatkowych oraz uzwojeń kompensacyjnych w strefie neutralnej indukcja będzie równa zero. W praktyce wypadkowe linie sił pola magnetycznego twornika ulegają lokalnym zagęszczeniom i rozrzedzeniom [14, 15, 22, 37, 44] – rys. 4.14. To zróżnicowanie lokalnych zmian bieguny komutacyjne i kompensacyjne mogą złagodzić tylko częściowo (rys. 4.15) – niekiedy podczas wieloletniej eksploatacji konieczne jest przesunięcie kątowne położenia szczotek komutacyjnych, gdyż na skutek zjawisk starzeniowych przenikalność wirnika słabnie a więc strumień twornika ulega zmniejszeniu podczas gdy strumień od uzwojenia

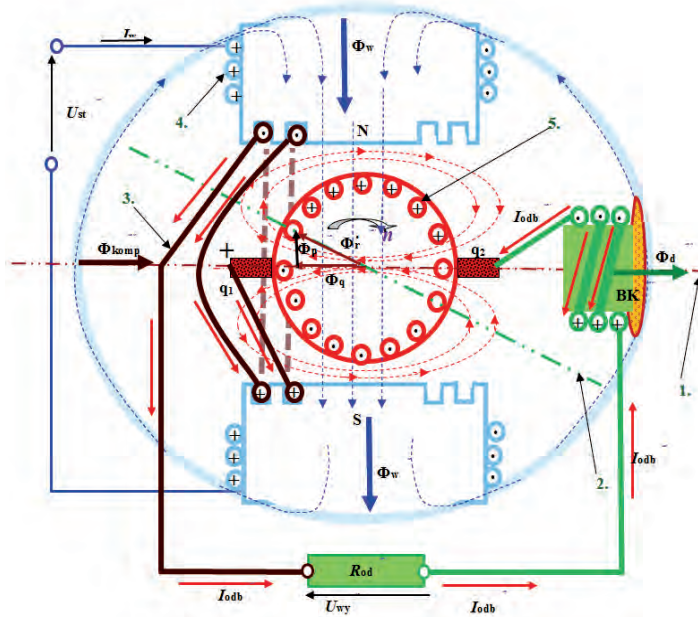
kompensacyjnego i komutacyjnego pozostaje bez zmian – zjawisko to nazywamy prze kompensowaniem prądnic [37]. Aby to zrozumieć należy przeanalizować relacje pomiędzy składowymi strumienia magnetycznego w tworniku prądnic prądu stałego.



**Rys. 4.14.** Przekrój poprzeczny prądnicy prądu stałego – model uproszczony – przesunięcie strefy magnetycznie obojętnej prądnicy komutatorowej prądu stałego spowodowane oddziaływaniem pola poprzecznego wirnika (twornika), gdzie: 1 – linia (strefa) magnetycznie obojętne przy niskim (poniżej 10% prądu znamionowego) obciążeniu prądnicy, jednocześnie jest to linia podziału geometrycznego pomiędzy biegunem północnym (N) a południowym (S) nabiegunków stojana; 2 – linia (strefa) magnetycznie obojętne przy oddziaływaniu twornika; N, S – bieguny stojana prądnicy; WZM – strefa wzmocnienia pola magnetycznego stojana poprzez pole magnetyczne wirnika; OSŁ – strefa osłabiania pola magnetycznego stojana poprzez pole magnetyczne wirnika; 4 – uzwojenie wzbudzenia prądnicy, w tym przypadku uzwojenie sterujące; 5 – uzwojenie wirnika (twornika) prądnicy;  $n$  – kierunek obrotów napędu mechanicznego prądnicy;  $U_{st}$  – napięcie sterujące,  $U$  – napięcie podawane na uzwojenie wzbudzenia prądnicy,  $U_{st}$  – napięcie wyściowe,  $U$  – napięcie przykładane na uzwojenie wzbudzenia (w prądnic boczniowej, np. GS-12T, przyłączone jest równolegle do twornika)

Przy przesunięciu szczotek ze strefy neutralnej na przepływ twornika składa się przepływ: poprzeczny  $\theta_{aq}$  i podłużny  $\theta_{ad}$ . Przepływ poprzeczny daje takie skutki jak przy położeniu w strefie neutralnej, a przepływ podłużny, w zależności od

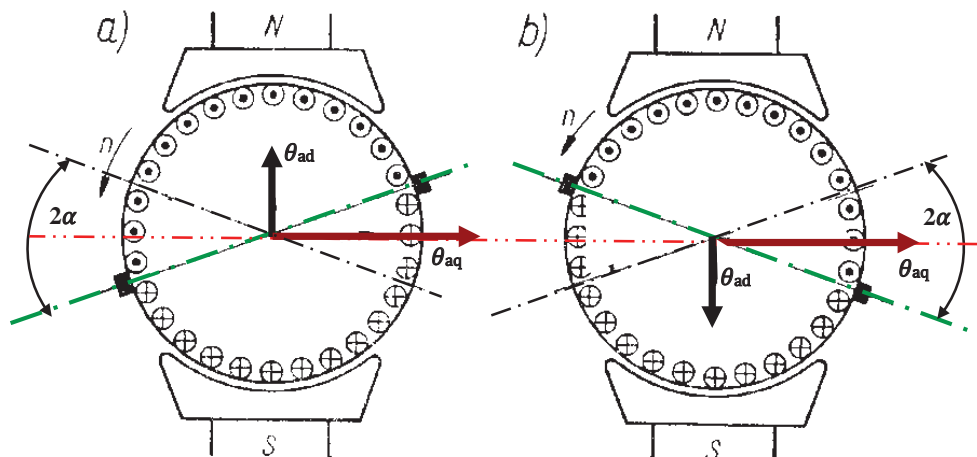
kierunku przesunięcia w stosunku do kierunku obrotów, osłabienie lub wzmocnienie strumienia. Przy pracy prądnicowej i przesunięciu szczotek zgodnie z kierunkiem obrotów maszyny jest przepływ rozmagnesowującym, a przy przesunięciu w kierunku przeciwnym jest przepływ domagnesowującym.



**Rys. 4.15.** Przekrój poprzeczny prądnicy prądu stałego – model uproszczony – sposób neutralizowania strumienia reakcji wirnika (twornika) poprzez uzwojenie kompensacyjne oraz uzwojenie bieguna dodatkowego (komutacyjnego), gdzie: 1 – linia (strefa) magnetycznie obojętna przy niskim (poniżej 10% obciążeniu prądnicy, jednocześnie jest to linia podziału geometrycznego pomiędzy biegunem północnym (N) a południowym (S) nabiegunków stojana; 2 – linia (strefa) magnetycznie obojętna przy oddziaływaniu twornika; N, S – bieguny stojana prądnicy; 3 – uzwojenie kompensacyjne;  $q_2$  – szczotka komutacyjna minusowa;  $q_1$  – szczotka komutacyjna plusowa; 4 – uzwojenie wzbudzenia prądnicy, w tym przypadku uzwojenie sterujące; 5 – uzwojenie wirnika (twornika) prądnicy; 6 – podkładka diamagnetyczna pod biegunem dodatkowym (komutacyjnym);  $n$  – kierunek obrotów napędu mechanicznego prądnicy;  $U_{st}$  – napięcie sterujące, w tym przypadku: napięcie podawane na uzwojenie wzbudzenia prądnicy;  $\Phi_w$  – strumień magnetyczny wytwarzany przez uzwojenie wzbudzenia prądnicy;  $U_{wy}$  – napięcie wyjściowe; BK – biegun dodatkowy zwany komutacyjnym

Na rys. 4.16 przedstawiono wpływ oddziaływania twornika przy przesunięciu szczotek z osi neutralnej. W prądnicę obrócenie szczotek w kierunku wektora prąd-

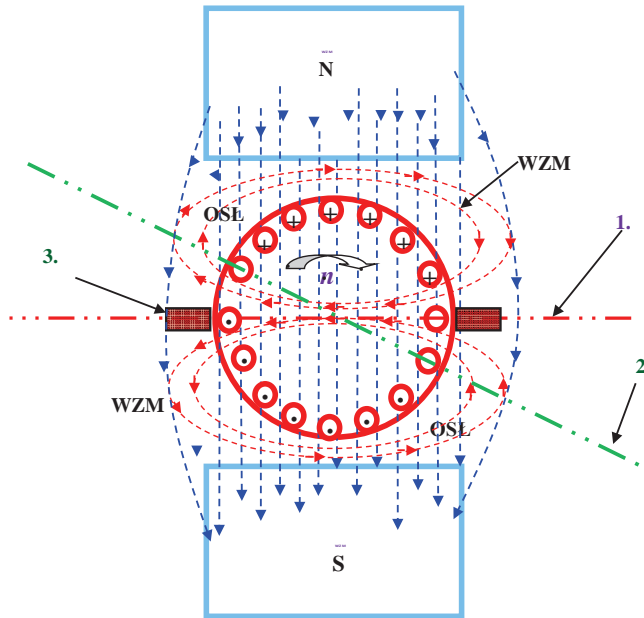
kości powoduje osłabienie strumienia, a przy obrocie w kierunku przeciwnym – jego wzmocnienie.



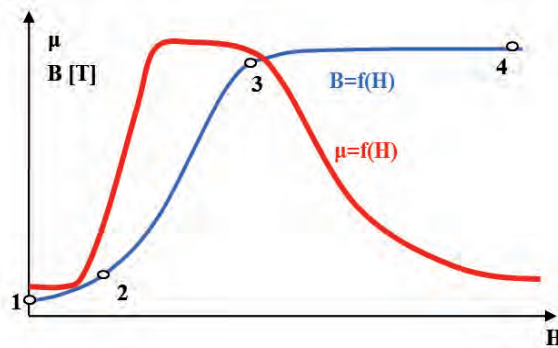
**Rys. 4.16.** Oddziaływanie twornika przy przesunięciu szczotek ze strefy neutralnej [14]:  
a) przy obróceniu szczotek w kierunku obrotów prądnicy, b) przy obróceniu szczotek w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów prądnicy

Wraz ze wzrostem prądu obciążenia wzrasta wartość natężenia prądu wirnika oraz natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzenia, co powoduje zwiększenie natężenia pola magnetycznego w rdzeniu stalowym wirnika (twornika) i zwiększenie wartości indukcji magnetycznej  $B$  [36, 37]. Na rys. 4.17 przedstawiono przesunięcie strefy magnetycznie obojętnej w komutatorowej prądnicy prądu stałego spowodowane oddziaływaniem pola poprzecznego jej wirnika, a na rys. 4.18 krzywą magnesowania.

Parametry eksploatacyjne prądnicy i jej obciążenia są tak dobierane, aby mieściły się pomiędzy punktami 2 i 3 na rys. 4.18, tj. na charakterystyce liniowej krzywej magnesowania  $B = f(H)$ , ponieważ w tym zakresie są największe wartości przenikalności magnetycznej  $\mu$ . Jednocześnie zgodnie z literaturą [37, 96, 119] punkt pracy nabiegunków obwodu wzbudzenia przy obciążeniu znamionowym powinien być w pobliżu pkt. 3, „...ponieważ przy zwiększaniu się oporu magnetycznego osłabia się wpływ oddziaływania twornika na strumień i SEM maszyny (wpływ pola magnetycznego twornika na pole magnetyczne stojana), a zatem napięcie prądnicy ma mniejsze wahania przy zmianach obciążenia...”.



**Rys. 4.17.** Przesunięcie strefy magnetycznie obojętnej prądnicy komutatorowej prądu stałego [112], gdzie: 1 – strefa magnetycznie obojętnej bez oddziaływania wirnika; 2 – strefa magnetycznie obojętnej przy oddziaływaniu wirnika; N, S – bieguny stojana prądnicy, WZM – strefa wzmacniania pola magnetycznego stojana poprzez pole magnetyczne wirnika; OSŁ – strefa osłabiania pola magnetycznego stojana poprzez pole magnetyczne wirnika; 3 – szczotka komutacyjna



**Rys. 4.18.** Krzywa magnesowania prądnicy komutatorowej prądu stałego [37, 96, 119], gdzie:  $B = f(H)$  – krzywa zmian indukcji magnetycznej  $B$  w funkcji natężenia pola magnetycznego;  $\mu = f(H)$  krzywa zmian przenikalności magnetycznej  $\mu$  w funkcji natężenia pola magnetycznego; punkty na krzywej magnesowania: 1 – magnetyzm szczątkowy; 2 – początek stanu nasycenia; 3–4 – stan pełnego nasycenia

## Prądnica prądu stałego jako wzmacniacz maszynowy

Prądnicą prądu stałego może być rozpatrywana jako wzmacniacz maszynowy – na uzwojenie wzbudzenia na stojanie jest podawane napięcie wejściowe ( $U_{we}$ ), czyli sterujące, a na zaciskach wyjściowych (w uzwojeniu twornika) otrzymujemy napięcie wyjściowe ( $U_{wy}$ ). Zgodnie ze wzorem Ohma, popłynie przez uzwojenie wzbudzenia prąd o natężeniu równym ilorazowi napięcia sterującego i rezystancji uzwojenia wzbudzenia. Pojawia się siła magnetomotoryczna  $\Theta$  równa iloczynowi natężenia prądu i liczby zwojów, która powoduje wytworzenie strumienia wzbudzenia:

$$\Phi_w = \frac{\theta}{\sum_{k=1}^n R_{\mu k}} \quad (4.2)$$

gdzie:  $R_{\mu k}$  – rezystancja magnetyczna  $k$  odcinków obwodu magnetycznego;  $\theta$  – siła magnetomotoryczna

Rezystancję  $i$ -go odcinka obwodu magnetycznego można wyrazić wzorem:

$$R_{\mu i} = \frac{l_k}{\mu_k \cdot S_k} \quad (4.3)$$

Siła magnetomotoryczna (SEM) określana jest równaniem (7):

$$\theta = I_w z_w \quad (4.4)$$

gdzie:  $z_w$  – liczba zwojów (rys. 4.15, element 4) wzbudzenia.

Wirnik prądnicy, obracając się w polu magnetycznym (wytworzonym przez uzwojenia wzbudzenia), powoduje indukowanie się siły elektromotorycznej  $E$ , wyrażanej wzorem:

$$E = \sum_{j=1}^{j=z} n \cdot l \cdot B_w \cdot \sin \varphi_j \quad (4.5)$$

gdzie:  $E$  – siła elektromotoryczna indukowana w tworniku;  $n$  – prędkość obrotowa wirnika prądnicy;  $l$  – długość boku ramki zezwoju wirnika (w praktyce długość



wirnika);  $B_w$  – indukcja magnetyczna stojana;  $j$  – numer zezwoju nawiniętego na wirniku;  $\varphi_j$  – kąt nachylenia  $j$ -go zezwoju:

$$B_w = \frac{\Phi_w}{S} \quad (4.6)$$

gdzie:  $S$  – pole przekroju poprzecznego nabiegownika obwodu wzbudzenia.

Dla nieobciążonej prądnicy siła elektromotoryczna  $E$  jest znacznie większa od wartości napięcia wejściowego (sterującego) – stąd wzmacnienie maszynowe:

$$K = \frac{E}{U_{st}} \quad (4.7)$$

Dla obciążonej prądnicy wykorzystywanej jako wzmacniacz maszynowy należy uwzględnić spadki napięć zgodnie z prawem Kirchhoffa:

$$K = \frac{E - I_{obc}(R_p + R_-)}{U_{st}} \quad (4.8)$$

Jeśli prądnica (wzmacniacz maszynowy) jest obciążona, to w wirniku przez jej zezwoje przepływa prąd, powodując wytwarzanie poprzecznego strumienia magnetycznego (rys. 4.15, szczegół  $\Phi_q$ ). Generuje on zakłócenia w rozkładzie pola magnetycznego stojana – w pewnym rejonie ulega on wzmacnieniu (rys. 4.15, szczegół „WZM”), a w innych osłabieniu (rys. 4.15, szczegół „OSŁ”), powodując powstanie wektora wypadkowego pola reakcji twornika przesuniętego względem linii podziału geometrycznego (pomiędzy biegunem północnym a południowym stojana) o kąt  $\alpha$ . Tworzy się więc linia magnetycznie obojętna [24, 37, 228]. Przesunięcie linii magnetycznie obojętnej powoduje, że komutowane (przez szczotki) końcówki zezwojów wychodzą ze strefy magnetycznie obojętnej – pomiędzy zwierzanymi wycinkami komutatora tworzy się znacząca SEM. Zwieranie tych zezwojów wiąże się w tej chwili ze znacznymi prądami zwarciovymi, zważywszy, że szczotka komutacyjna ma bardzo małą rezystancję. Zewnętrznie zwiększone natężenie prądu zwarciowego objawia się silnym iskrzeniem, a niekiedy także powstawaniem zjawiska łuku elektrycznego niszczącego komutator.

Jednocześnie wektor reakcji twornika  $\Phi_r$  można rozłożyć na dwa wektory składowe: wektor poprzeczny  $\Phi_q$  oraz wektor podłużny  $\Phi_p$  [37]. Ten ostatni powoduje osłabienie pola stojana. Im większe obciążenie prądowe prądnicy, tym składowa  $\Phi_p$  staje się większa, a składowa  $\Phi_q$  mniejsza. Tak więc, im większe obciążenie prądnicy, tym staje się ona mniej wydajna.

Aby przeciwdziałać nadmiernemu iskrzeniu montuje się uzwojony biegun dodatkowy, zwany komutacyjnym, którego zadaniem jest „wyzerowanie” pola magnetycznego w zwieranych zezwojach. Uzwojenie bieguna dodatkowego jest połączone w szereg z obwodem zewnętrznym prądnicy – im większy prąd obciążenia, tym strumień magnetyczny  $\Phi_k$  staje się także większy. Aby uniknąć przekompensowania, pod biegunem komutacyjnym montuje się podkładkę diamagnetyczną – zwiększając jej grubość, powiększa się oporność magnetyczną i osłabia wytwarzany strumień magnetyczny  $\Phi_d$ . Nie zmienia to faktu, że składowa podłużna  $\Phi_p$  strumieni reakcji twornika ( $\Phi_r$ ) osłabia strumień wzbudzenia. Aby temu przeciwdziałać, na prądnicach o znacznej mocy (w lotnictwie od 3 kW, w technice naziemnej powyżej 10 kW) stosuje się uzwojenie kompensacyjne. Uzwojenie to nie ma własnego nabiegownika – jego środek jest zawieszony pomiędzy biegunami stojana, zaś końcówki są zamocowane w dodatkowych złołkach na obrzeżach biegunów magnetycznych stojana. Uzwojenie kompensacyjne jest nawinięte w postaci sztywnych płaskowników połączonych szeregowo z obwodem wyjściowym. Liczba uzwojeń i oporność magnetyczna obwodu wzbudzenia są tak dobrane, aby strumień magnetyczny  $\Phi_{komp}$  wytwarzany przez uzwojenie kompensacyjne był równy składowej poprzecznej  $\Phi_q$  reakcji  $\Phi_r$ .

Podczas eksploatacji następują liczne procesy starzeniowe prądnicy, wpływające na przemieszczenie strefy magnetycznie obojętnej. Do głównych zjawisk należą:

- a) zmiana wartości przenikalności magnetycznej (blach stalowych obwodów magnetycznych wirnika, stojana, biegunów komutacyjnych i kompensacyjnych) powodująca lokalne rozpraszanie i wzmacnianie linii sił pola magnetycznego,
- b) zmiana średnicy komutatora powodująca zmianę warunków komutacji,
- c) zmiana położenia klepek komutatora względem konstrukcji nośnej wnętrza wirnika spowodowana utlenianiem i korozją elektrochemiczną połączeń mechanicznych (w wyniku zróżnicowania potencjału elektrochemicznego materiałów [35, 213]).

Z uwagi na postępujące procesy starzeniowe w prądniczy wartość przenikalności magnetycznej  $\mu$  także ulega zmianie, a więc zmienia się również charakter zagęszczeń lokalnych linii sił pola magnetycznego w niektórych obszarach blach stalowych wirnika. Powoduje to lokalne zmiany natężenia pola magnetycznego w obszarach o silnym zagęszczeniu linii sił pola magnetycznego, gdzie może dojść do lokalnego nasycenia, tzn. do przesunięcia się na krzywej magnesowania – punkt pracy przemieści się z odcinka 2–3 do odcinka 3–4 (rys. 4.8), co spowoduje znaczące zmniejszenie wartości przenikalności magnetycznej  $\mu_k$ , a więc wzrost rezystancji magnetycznej (reluktancji)  $R_{mk}$  określanej zależnością (4.2) [119, 228]:

$$R_{mk} = \frac{l_k}{\mu_k \cdot S_k} \quad (4.9)$$

gdzie:  $l_k$  – długość odcinka obwodu magnetycznego nr  $k$ ,  $\mu_k$  – przenikalność magnetyczna dla odcinka obwodu magnetycznego nr  $k$ ,  $S_k$  – pole powierzchni odcinka obwodu magnetycznego nr  $k$ .

Zróźnicowanie to powoduje osłabienie strumienia magnetycznego  $\Phi$  stojana wytwarzanego przez uzwojenie wzbudzenia o liczbie zwojów  $z_w$  oraz natężeniu prądu  $I_w$  zgodnie z zależnością (4.10) [108, 123, 228]:

$$\Phi = \frac{\theta}{\sum_{k=1}^n R_{nk}} \quad (4.10)$$

gdzie:  $\theta$  – siła magnetomotoryczna.

Siłę magnetomotoryczną można opisać równaniem (4.11):

$$\theta = I_w \cdot z_w \quad (4.11)$$

Dla obwodu magnetycznego zwiększeniu ulegnie strumień rozproszenia przechodzący poprzez powietrze obok wirnika, pomiędzy biegunami stojana, co dodatkowo zmniejsza wartość strumienia magnetycznego oddziałującego na wirnik (twornik).

W czasie długotrwałej pracy prądnicy w warunkach silnego obciążenia prądowego uzwojenia wirnika ulegają przegrzaniu, przez co obserwuje się wzrost wartości rezystancji i zwiększony spadek napięcia na tworniku, a więc zmniejsza się wartość napięcia wyjściowego. Obsługa zwiększa wówczas poziom napięcia przez przemieszczenie położenia pokrętkła potencjometru wynośnego regulatora napięcia (obserwacja własna). Zmniejszana zostaje rezystancja w obwodzie wzbudzenia i rośnie wartość strumienia stojana. Tymczasem rezystancja uzwojeń: kompensacyjnego i komutatorowego (bieguny dodatkowe) nie ulega zmianie – może wystąpić przekompensowanie prądnicy – linie sił pola magnetycznego stojana ulegają zagęszczeniu z drugiej strony niż przed kompensacją.

Niektóre prądnice mają, przy maksymalnej wartości obrotów, wklęsnięcie w charakterystyce regulacyjnej, co zmniejsza stabilność systemu regulacji napięcia wyjściowego i stabilność współpracy równoległej prądnic. Wklęsnięcie w charakterystyce regulacyjnej spowodowane jest niepoprawnym oddziaływaniem biegunów kompensacyjnych (pomocniczych, dopełniających), które niekiedy powodu-

ją wzrost strumienia magnetycznego biegunów głównych [8, 11, 26]. Uzwojenia kompensacyjne nie są w stanie zapewnić równomiernego rozkładu sił pola magnetycznego wokół uzwojenia wirnika (twornika) (rys. 4.7) – konieczne jest wówczas przesunięcie szczotek komutacyjnych do rzeczywistej wypadkowej strefy magnetycznie obojętnej. Tak więc zgodnie z rys. 4.7 należy przesunąć uchwyty szczotkowe ze szczotkami z położenia 1 do położenia 2. Oczywiście ze wzrostem obciążenia uzwojeń wirnika (twornika) następuje także zwiększenie oddziaływania korygującego przez uzwojenie komutacyjne i uzwojenie kompensacyjne – uzwojenia te (twornika + komutacyjne + kompensacyjne) są ze sobą połączone szeregowo. Teoretycznie komutatorowa prądnica prądu stałego wyposażona w uzwojenia kompensacyjne i komutacyjne nie powinna mieć przesunięcia strefy magnetycznie obojętnej.

### 4.2.3. System elektroenergetyczny prądu stałego

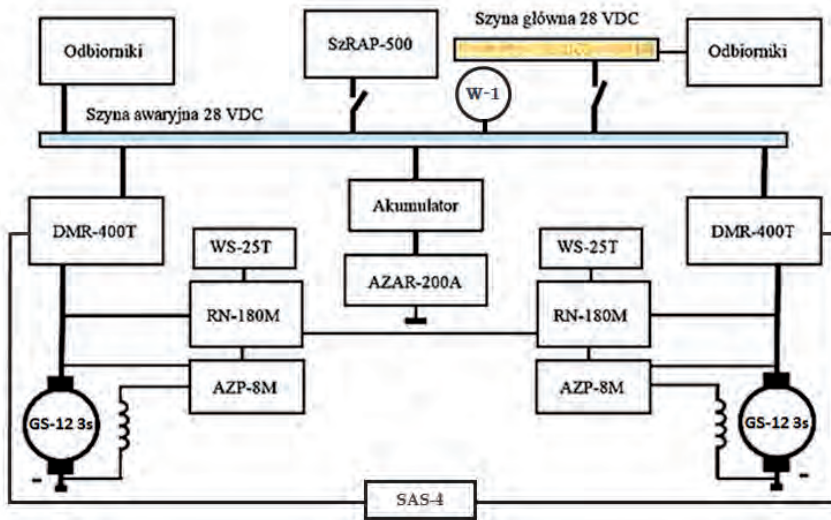
Przykładowy system elektroenergetyczny prądu stałego to system samolotu Su-22, który składa się przede wszystkim z pokładowych urządzeń elektrycznych przeznaczonych do zasilania sieci pokładowej samolotu energią elektryczną o napięciu 28,5 V. System ten obejmuje następujące podstawowe komponenty [24, 43]:

- dwie prądnice prądu stałego GS-12T 3s o napięciu nominalnym 28,5 V i mocy znamionowej 12 kW każda jako zasadnicze źródło zasilania pracujące równolegle na wspólną szynę odbiorników,
- akumulator pokładowy typu 20NKBN-25 o pojemności 25 Ah jako rezerwowe (awaryjne) źródło zasilania pracujące również równolegle z prądnicami prądu stałego (praca buforowa),
- dwa potencjometry wynośne WS25-TW jako element ustalający punkt pracy regulatora napięcia RN-180M,
- dwa regulatory napięcia RN-180M jako urządzenia regulacyjne prądnicy,
- dwa przekaźniki różnicowe DMR-400T oraz styczniki jako elementy automatyki układu przesyłowo-rozdzielcze energii elektrycznej,
- szynę główną i awaryjną do przyłączenia wszystkich odbiorników prądu stałego w zależności od stopnia ich ważności,
- dwa automaty AZP-8M przeznaczone do zabezpieczenia przed przepięciami w sieci prądu stałego, które w chwili wystąpienia przepięcia odłączają daną prądnicę od sieci, włączając w jej uzwojenie szeregowo rezystor w celu ograniczenia strumienia magnetycznego stojana,
- aparat zabezpieczenia AZAR200A do zabezpieczenia baterii akumulatorowej przed rozładowaniem akumulatora.

Schemat blokowy systemu elektroenergetycznego prądu stałego samolotu Su-22 przedstawiono na rys. 4.19.

System elektroenergetyczny prądu stałego samolotu Su-22 zabezpiecza [133, 134]:

- możliwość odległościowego włączenia prądnic prądu stałego do sieci pokładowej samolotu,
- odłączenie prądnic prądu stałego od sieci pokładowej samolotu przy włączeniu lotniskowego źródła zasilania,
- włączenie lotniskowego źródła zasilania do sieci pokładowej samolotu tylko z prawidłową jego polaryzacją,
- odłączenie części odbiorników od sieci pokładowej przy niesprawnej jednej prądnicy,
- sygnalizację niesprawności prądnic.



Rys. 4.19. Schemat blokowy systemu elektroenergetycznego prądu stałego samolotu Su-22, opracowanie własne na podstawie [133, 134, 228]

Podczas pracy prądnic prądu stałego lub przy włączonym lotniskowym źródle zasilania szyna główna i awaryjna są połączone ze sobą. Przy uszkodzeniu prądnic prądu stałego lub przy wyłączonym lotniskowym źródle zasilania (przy niepracujących pokładowych prądnicach) szyna główna nie jest pod napięciem. Jeżeli jedna z prądnic prądu stałego jest uszkodzona, to sprawna prądnica zasila prądem stałym wszystkie odbiorniki, z wyjątkiem niektórych urządzeń specjalnych. W przypadku uszkodzenia dwóch prądnic szyna główna jest odłączana, a z szyny awaryjnej zasilane są odbiorniki.

lanej z akumulatora zasilane są odbiorniki umożliwiające kontynuowanie lotu oraz lądowanie. Na pokładzie napięcie sieci prądu stałego 28 V jest wskazywane przez woltomierz W-1. Niesprawność źródeł energii elektrycznej na pokładzie samolotu sygnalizuje system SAS-4.

Podstawowym źródłem zasilania prądu stałego o napięciu 28 V na samolocie Su-22 jest prądnica GS-12T 3s. Jest ona samowzбудną, sześciobiegunową maszyną elektryczną prądu stałego ze wzbudzeniem równoległym. Widok zewnętrzny prądnicy prądu stałego GS-12T 3s przedstawiono na rys. 4.20.



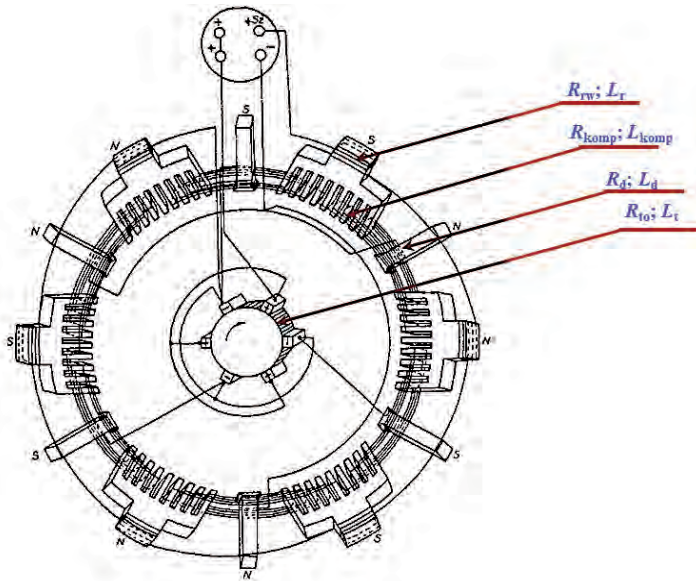
**Rys. 4.20.** Widok zewnętrzny komutatorowej prądnicy prądu stałego GS-12T 3s

Do podstawowych parametrów technicznych prądnicy prądu stałego GS-12T 3s [133, 134] należą:

- napięcie znamionowe – 28,5 V;
- znamionowe natężenie prądu – 400 A;
- moc przy napięciu 30 V – 12 000 W;
- zakres obrotów – 4200–9000 obr/min;
- zakres pracy – praca długotrwała;
- prądnica może pracować przy obciążeniu 200 A bez chłodzenia, przy obrotach od 3700–9000 obr/min w ciągu 20 min;
- w stanie podgrzanym prądnica zapewnia obciążenie 600 A przy obrotach 5000 obr/min w ciągu 1 min i 800 A przy obrotach 6000 obr/min w ciągu 10 s;
- początkowe obroty przy napięciu 28 V z włączoną w obwód wzbudzenia prądnicy minimalną wartością słupka węglowego, przy normalnej temperaturze otoczenia i temperaturze powietrza chłodzącego  $20 \pm 5$  °C nie powinny przekraczać:
  - przy obciążeniu 400 A – 4000 obr/min,
  - przy obciążeniu 200 A – 3600 obr/min,
  - przy obciążeniu 100 A – 3400 obr/min,

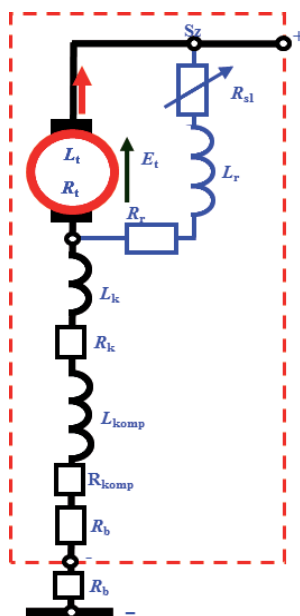
- początkowe obroty podczas pracy bez regulatora napięcia ze zwartym uzwojeniem wzbudzenia przy obciążeniu 400 A nie powinny przekraczać 3900 obr/min,
  - patrząc od strony napędu, kierunek obrotów prądnicy jest lewy,
  - prądnica chłodzona jest strumieniem powietrza doprowadzanym z zewnątrz.
- Przekrój prądnicy prądu stałego GS-12T 3s przedstawia rys. 4.9.

Schemat wewnętrznych połączeń elektrycznych prądnicy prądu stałego GS-12T 3s przedstawiono na rys. 4.21.



**Rys. 4.21.** Schemat połączeń elektrycznych wewnętrznych prądnicy prądu stałego GS-12T 3s [133, 228], gdzie: „Sz” – zacisk uzwojenia wzbudzenia;  $R_{rw}$  – rezystancja obwodu wzbudzenia (rezystancja uzwojenia wzbudzenia prądnicy oraz rezystancja kabli w obwodzie wzbudzenia);  $L_r$  – indukcyjność uzwojenia wzbudzenia, tj. uzwojenia równoległego;  $R_{to}$  – rezystancja twornika prądnicy (uzwojeń wirnika);  $L_t$  – indukcyjność twornika prądnicy (uzwojeń wirnika);  $R_d$  – rezystancja uzwojeń biegunów dodatkowych (tzw. biegunów komutacyjnych);  $L_d$  – indukcyjność uzwojeń biegunów dodatkowych (tzw. biegunów komutacyjnych);  $R_{komp}$  – rezystancja uzwojeń kompensacyjnych;  $L_{komp}$  – rezystancja uzwojeń kompensacyjnych;  $R_b$  – rezystancja bocznika prądowego;  $R_p$  – rezystancja obwodu minusowego prądnicy (przewodu łączącego bocznik prądnicy z masą statku powietrznego oraz przewodu łączącego zacisk minusowy prądnicy z bocznikiem prądowym)

Na rys. 4.22 przedstawiono schemat zastępczy prądnicy bocznikowej z biegunami komutacyjnymi i uzwojeniem kompensacyjnym.



**Rys. 4.22.** Schemat zastępczy prądnicy bocznikowej z biegunami komutacyjnymi i uzwojeniem kompensacyjnym, gdzie:  $R_{s1}$  – rezystancja słupka węglowego (w regulatorze napięcia) – pozostałe oznaczenia jak na rys. 4.21

### Problemy eksploatacyjne sieci prądu stałego w trudnych warunkach misji wojskowych

Warunki podwyższonej temperatury, zgodnie z prawem Arrheniusa<sup>1</sup>, powodują przyśpieszenie procesu starzeniowego materiałów. Im wyższe są wartości tych temperatur, tym szybciej przebiega proces starzeniowy. Analogiczne relacje powodują inne oddziaływania, jak np. oddziaływanie chemiczne. Zdaniem autorów, zintensyfikowane czynniki fizykochemiczne, jak: zwiększone zapylenie, obniżone ciśnienie, powodują przyśpieszenie procesu degradacji, a stąd też przyśpieszenia zmiana zdolności funkcjonalnych materiałów. W pracowni ITWL kilkanaście lat temu przeprowadzono badania przyśpieszonego starzenia izolacji lotniczych przewodów elektrycznych [70]. W podwyższonej temperaturze w funkcji czasu szybciej zmniejsza się ich elastyczność i odporność na ścieranie. W warunkach podwyższonego zapylenia występującego na terenach pustynnych, w kanałach wentylacyjnych maszyn elektrycznych odbywa się swoiste piaskowanie. Wycierane są warstwy lakieru izolacyjnego [59].

<sup>1</sup> Svante August Arrhenius (1859–1927) – szwedzki chemik i fizyk, jeden z twórców chemii fizycznej.



Zdaniem autorów, szczególnie niebezpieczne jest niszczenie warstw lakierów izolacyjnych z powierzchni blach krzemowych<sup>2</sup> stojanów i wirników maszyn elektrycznych. Zarówno stojany, jak i wirniki maszyn elektrycznych mają obwody magnetyczne zbudowane z pakietu blach krzemowych – z wtłoczonymi ziarnami krzemu w celu zmniejszenia wpływu prądów wirowych (zwiększenie impedancji na drodze prądów wirowych) podczas pracy maszyny elektrycznej. Dzięki ziarnom krzemu obwody magnetyczne mniej nagrzewają się podczas pracy, zaś maszyna elektryczna osiąga wyższą sprawność.

W warunkach podwyższonej wilgotności w blachach krzemowych występuje intensywna korozja elektrochemiczna<sup>3</sup>, powodująca m.in. przemianę znacznej części objętości struktury żelaza w tlenki i wodorotlenki żelaza – objętość poszczególnych zębów wirnika lub stojana zwiększa się [35, 213]. Wokół każdego zęba nawinięte są silnie upakowane uzwojenia. Jeżeli objętość zęba zwiększa się, to następuje ścinanie izolacji uzwojeń – występują zwarcia żył przewodzących uzwojeń wirnika lub (rzadziej) stojana ze sobą lub z masą (z blachami krzemowymi). Zazwyczaj zewnętrznym objawem takiego procesu zwarcioowego jest zwiększanie się temperatury maszyny elektrycznej i zmniejszenie sprawności, tj. następuje zmniejszenie mocy. W przypadku elektrycznego silnika rozruchowego moc wyjściowa może być tak niska, że może dojść do przerwania procesu rozruchu.

Pod kątem kształtu przebiegu zmiany są wyraźne [10, 14-16, 60-63, 72]. **Bez zwarcia** na poziomie składowej stałej (28,5 V<sub>DC</sub>) widoczne są wyraźne pulsacje żłobkowe (rys. 4.23) o kształcie odwróconej półsinusoidy. Ich amplituda wynosi zazwyczaj od 1% do 8% wartości składowej stałej. Półsinusoidy te są zmodulowane w amplitudzie (obwiednia) przez pulsacje biegunowe – powodują one zmodulowanie przebiegu pulsacji żłobkowych od 0,2 do 1%. Przy podstawie każdej półsinusoidy widoczne są nieznaczne „wygarbienia” – są to pulsacje komutatorowe o znikomo niskiej wartości amplitudy – przy obciążeniu od 0 do 10% mocy znamionowej wynosi on zaledwie kilka procent. Przy obciążeniu znamionowym wartość szczytowa pulsacji komutatorowych osiąga poziom ok. 50% pulsacji żłobkowych; dopiero przy przeciążeniu prądnicy powyżej 200% mocy znamionowej prądnicy amplituda pulsacji komutatorowych zaczyna przewyższać poziom amplitudy pulsacji żłobkowych, a przy zwarciu może osiągać nawet 300%.

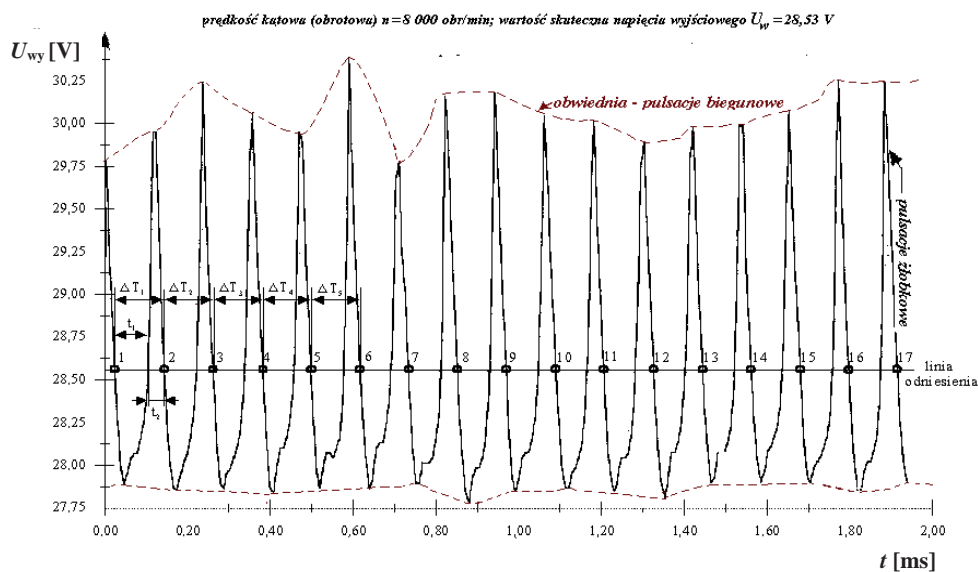
<sup>2</sup> Blachy elektroizolacyjne krzemowe – ok. 3% Si, grubość 0,027–0,65 mm.

<sup>3</sup> Korozja elektrochemiczna – korozja metali spowodowana procesami elektrochemicznymi, zachodząca wskutek występowania różnych potencjałów na powierzchni korodującego obiektu, znajdującego się w środowisku elektrolitu (wilgoci np. kondensacyjnej z domieszką kwasu węglowego wszechobecnego w atmosferze).

W tej sytuacji powstaje ogniwo korozyjne, w którym ziarna krystaliczne o niższym potencjale są anodami, a katodami ziarna o potencjale wyższym – powstają mikroogniwa korozyjne.

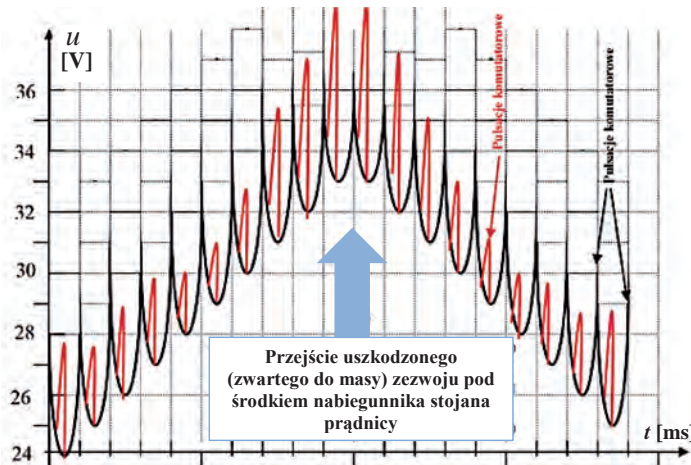
Po zwarcu wewnętrznym w maszynie prądniczej dominujące co do amplitudy (rys. 4.23) stają się pulsacje biegunowe. Składowa pulsacji biegunowej przekracza wielokrotnie wartość pozostałych rodzajów pulsacji (głębokość modulacji biegunowej osiąga wartość 300%–500% wartości amplitudy pulsacji żłbkowych) i jest stabilna pod względem częstotliwości i amplitudy. Składowa pulsacji komutatorowej przybierała największą wartość w momencie przechodzenia zwartego zwoju pod kolejnym biegunem stojana prądniczej („szczyty” przebiegów) i zmniejsza się amplitudę przy przechodzeniu zwartego uzwojenia pomiędzy biegunami. Powyższe relacje umożliwiły autorom wykrycie kilku zwarc w wirnika podczas normalnej pracy węzła elektroenergetycznego statku powietrznego (bez wyłączania silnika głównego i demontażu wirnika).

Pierwsze z zaprezentowanych przebiegów były obserwowane w warunkach laboratoryjnych w ITWL przy zwarcu uzwojeń wirnika do rdzenia wirnika prądniczej przy pomocy śruby miedzianej. W późniejszym okresie w czasie pomiarów jakości energii elektrycznej na pracującym silniku wykryto kilka przypadków częściowych lub całkowitych zwarc w wirniku prądniczej. Jeden z takich przypadków autorzy wykryli podczas swojej działalności w Iraku w 2007 r. [59].



Rys. 4.23. Zmiany składowej pulsacji dla lotniczej prądniczej prądu stałego bez zwarcia [63]

Przykład napięcia wyjściowego prądniczej prądu stałego w chwili uszkodzenia uzwojenia wirnika (zwarcie uzwojenia pośrodku jednego z uzwojeń) przedstawia rys. 4.24 [63].



**Rys. 4.24.** Kształt napięcia wyjściowego prądnicy prądu stałego w chwili uszkodzenia uzwojenia wirnika (zwarcia uzwojenia pośrodku jednego z uzwojeń) [63]

### Opis zdarzenia

W Iraku w bazie Al-Kut podczas rozruchu silnika kierowcaoperator rozrusznika naziemnego APA-5 stwierdził „znacznie większy poziom natężenia prądu” niż podczas innych rozruchów [59]. Ponadto silnik podczas procesu rozruchu osiągnął poziom obrotów 22%, nie zaobserwowano widocznego jego wzrostu do wymaganego poziomu 26%. Rozruch przerwano. Wezwana do pomocy ekipa ITWL stwierdziła, że:

- 1) temperatura korpusu lewej prądnicy była wyraźnie wyższa niż prawej prądnicy.
- 2) lewą prądnicę wymieniono na inną, po czym wykonano rozruch – bez uwag.

Ponadto sprawdzono historię eksploatacji prądnicy – czekając przez ponad dwa miesiące na dostarczenie przekładni WR-8 śmigłowiec był poddany oddziaływaniu wysokich temperatur oraz krótkotrwałych deszczy. Wcześniej śmigłowiec wykonywał loty w warunkach znacznego zapylenia typowego dla Iraku.

### Badania po zdemontowaniu prądnicy-rozrusznika [59]

1. Prądnicę GS-18MO przeniesiono do działu osprzętu – po wyjęciu szczotek z uchwytów szczotkowych sprawdzono rezystancję – stwierdzono zmniejszoną rezystancję izolacji do poziomu około 0,6 M $\Omega$  pomiędzy korpusem prądnicy a elementami czynnymi jej obwodu elektrycznego: zaciskiem „-” wirnik, zaciskiem uzwojenia bocznikowego „III”, zaciskiem uzwojenia szeregowego „I”.
2. Dokonano oględzin elementów wewnętrznych prądnicy za pomocą boroskopu – stwierdzono:

- silnie skorodowane blachy krzemowe nabiegowników stojana (rys. 4.25),
- powierzchnią rdzę na dolnej części kołnierza montażowego prądnicy,
- ślady otarć (zeszlifowań) obwodowych na powierzchniach wirnika od nabiegowników na początku i na końcu żłobków wirnika (rys. 4.26),
- ślady zarysowań na powierzchni wirnika od ciał obcych,
- ślady uderzeń drobnych ciał obcych na powierzchniach izolacyjnych izolacji uzwojeń stojana,
- stalaktyty rdzy<sup>4</sup> na nakrętkach śrub mocujących mostki linek szczotkowych do korpusu prądnicy, niektóre z nich prawie dotykały do części przewodzącej uchwytów szczotkowych (rys. 4.27),
- mikropęknięcia na powierzchni czołowej zakończenia komutatora (zielona zalewa),
- niewielkie ilości włókniny w kanałach wentylacyjnych,
- ślady obwodowych głębokich równomiernych zarysowań (ok. 0,2 mm) na powierzchni komutatora (rys. 4.26),
- stan szczelin izolacyjnych między klepkami komutatora – bez uwag.



**Rys. 4.25.** Silnie skorodowane blachy krzemowe nabiegowników stojana prądnicy-rozrusznika GS-18

<sup>4</sup> Tlenki żelaza oraz wodorotlenek żelaza – ciężar właściwy  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  wynosi  $5,24 \text{ g/cm}^3$ , zaś czystego żelaza  $7,88 \text{ g/cm}^3$ . tak więc po utlenieniu objętość zwiększa się o 34%. Według W. Miarka: Tablice chemiczne, Warszawa 1993.



**Rys. 4.26.** Ślady otarć (zeszlifowań) obwodowych na powierzchniach wirnika prądnicy-rozrusznika



**Rys. 4.27.** Rdza na nakrętkach śrub mocujących mostki uchwytów szczotkowych do korpusu prądnicy

1. Prądnicę poddano oddziaływaniu podwyższonej temperatury przez ok. 24 godziny – stwierdzono niewielki (ok. 10%) spadek, a następnie wzrost rezystancji izolacji.
2. Prądnicę otoczono torbą foliową i wstawiono do niej naczynie z wodą, po czym wystawiono na oddziaływanie dobowych wahań temperatury przy pełnym nasłonecznieniu – po dwóch dobach stwierdzono wyraźne zmniejszenie się rezy-

stancji izolacji pomiędzy korpusem prądnicy a elementami czynnymi jej obwodu elektrycznego: zaciskiem „-” wirnik, zaciskiem uzwojenia bocznikowego „III”, zaciskiem uzwojenia szeregowego „II”.

3. Prądnicę poddano suszeniu – rezystancja izolacji powróciła do wartości wyjściowych w chwili awarii.
4. Zdemontowano wałek giętki – bez uwag.
5. W czasie demontażu wałka giętkiego wypadło łożysko (zgodnie z ogólnie przyjętymi standardami łożysko powinno być wciśnięte z określonym pasowaniem „na wcisk” do gniazda łożyskowego) od strony komutatora. Na zewnętrznej powierzchni cylindrycznej łożyska stwierdzono obwodowe zarysowania. Po zamontowaniu wałka oraz łożyska przeprowadzono „test” obtaczania [8] łożyska – bez uwag.

#### 4.2.4. Charakterystyki prądnic prądu stałego

Charakterystyki prądnicy to zbiór krzywych przedstawiających zależności: napięcia prądnicy  $U_G$ , prądu twornika  $I_{AG}$ , prądu wzbudzenia  $I_E$  ( $I_E = I_w$ ) od wymuszeń wynikających z warunków eksploatacji lub dla pracy silnikowej zależności: prędkości obrotowej  $n$ , prądu twornika  $I_{AM}$  od momentu obciążenia.

Napięcie indukowane w uzwojeniach twornika prądnicy określa zależność:

$$E_G = c_E \cdot \Phi_E \cdot n \quad (4.12)$$

natomiast napięcie na zaciskach wyjściowych prądnicy:

$$U_G = E_G - I_{AG} \cdot R_{AG} \quad (4.13)$$

**Charakterystyka biegu jałowego** (rys. 4.28 i 4.29) przedstawia, praktycznie biorąc, charakterystykę magnesowania. Przedstawia zależność SEM twornika lub strumienia wzbudzenia od prędkości obrotowej  $E = f(n)$ . Określa się w ten sposób szereg właściwości prądnicy, jak wielkość magnetyzmu szczątkowego, łatwość wzbudzania itp. Aby doszło do wzbudzenia prądnicy samowzbudnej, kierunek strumienia magnetyzmu szczątkowego musi być zgodny z kierunkiem SEM wzbudzonym w tworniku. Po remoncie niekiedy dochodzi do zamiany przewodów twornika – nie dojdzie wówczas do wzbudzenia. Podczas eksploatacji prądnicy także może dojść do odmowy wzbudzenia, pomimo poprawnego montażu.

Przyczyną może być przemagnesowanie obwodu magnetycznego wirnika z powodu wyłączenia prądnicy przy zbyt dużym obciążeniu. Wówczas należy domagnesować prądnicę – po odłączeniu prądnicy od regulatora napięcia, przykładając do zacisków wzbudzenia akumulator i po kilkakrotnym, krótkotrwałym (impulsy prądowe o częstotliwości około 0,1–1 Hz) załączeniu obwodu dipole magnetyczne powinny powrócić do poprawnej polaryzacji.

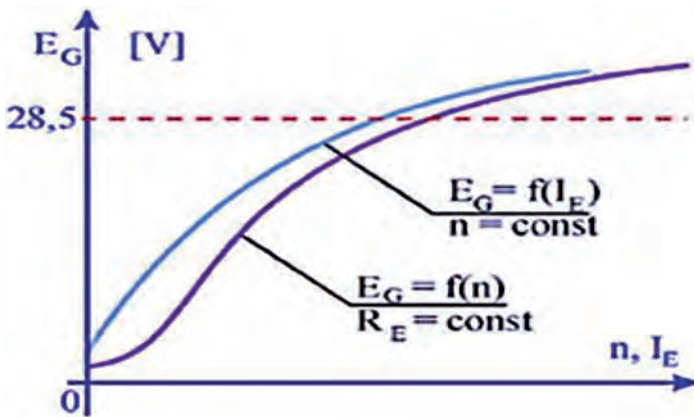
Drugi typ charakterystyki biegu jałowego to zależność SEM od natężenia prądu wzbudzenia przy stałej prędkości obrotowej przy rozwartych zaciskach (siłowych) wyjściowych, tj. bez obciążenia prądnicy.

**Charakterystyka zewnętrzna prądnicy** (rys. 4.30) jest to zależność jej napięcia wyjściowego od natężenia prądu obciążenia przy stałej prędkości obrotowej. Przy wyznaczaniu tej charakterystyki należy pamiętać o płynnym (stopniowym) jej obciążaniu.

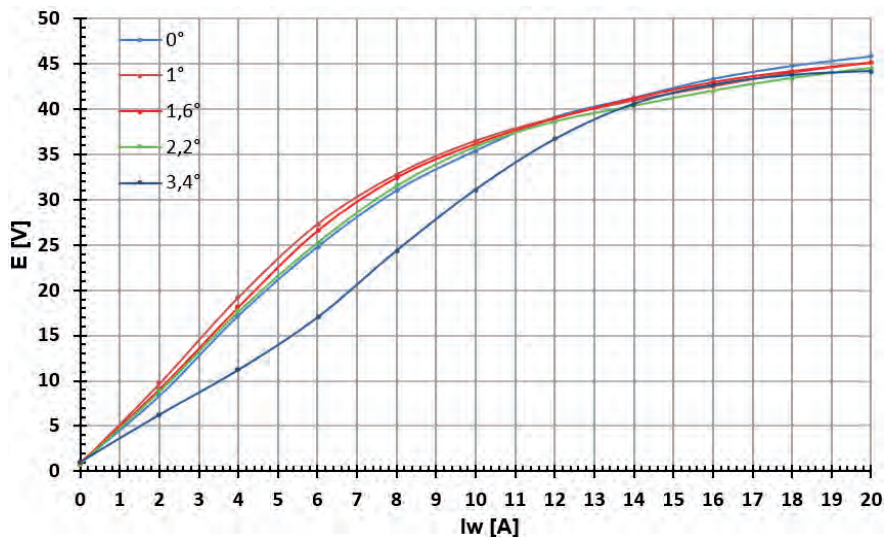
**Charakterystyka regulacyjna** (rys. 4.31) to charakterystyka zmian natężenia prądu wzbudzenia w funkcji prądu obciążenia przy zachowaniu stałego (stabilnego) napięcia wyjściowego, tu: 28,5 V przy stałej prędkości obrotowej.

$$I_w = f(I_{obc}) \quad (4.14)$$

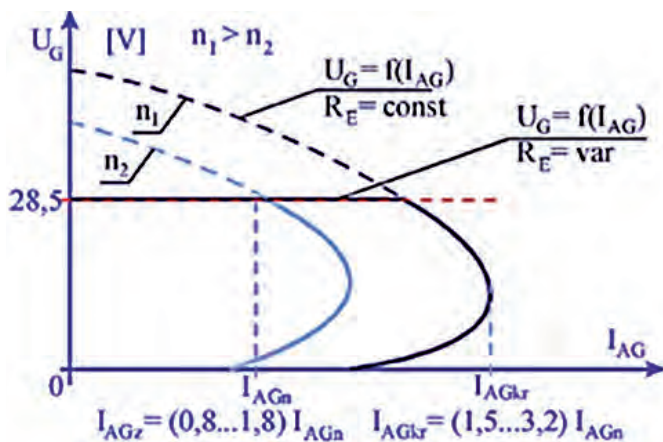
gdzie:  $I_w$  – natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzenia,  $I_{obc}$  – natężenie prądu obciążenia.



Rys. 4.28. Charakterystyki biegu jałowego bocznikowej prądnicy lotniczej [37]

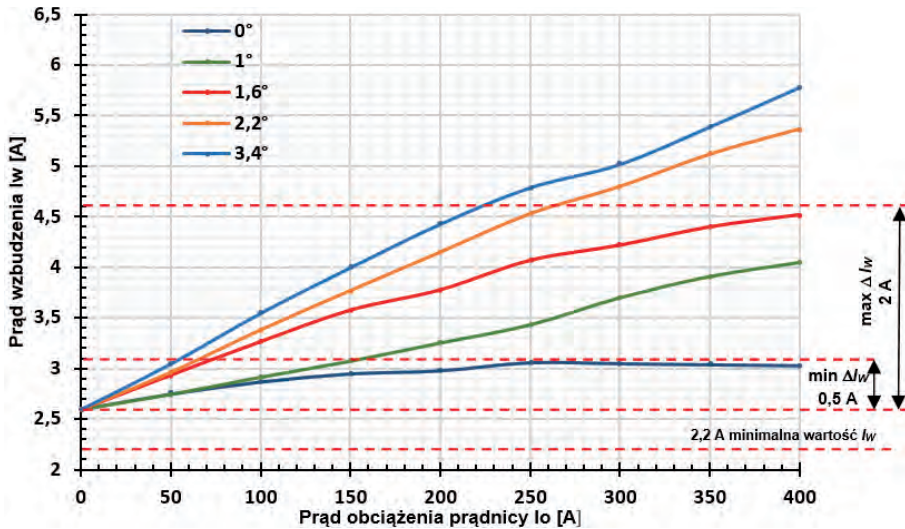


Rys. 4.29. Charakterystyka biegu jałowego prądnicy prądu stałego GS-12T 3s w warunkach rzeczywistych ( $n = \text{const} = 4200 \text{ obr/min}$  i  $I_{\text{obc}} = 0 \text{ A}$ ) przy różnym położeniu szczotek prądnicy względem strefy neutralnej kąta  $\alpha$ :  $0^\circ$ ,  $1,0^\circ$ ,  $1,6^\circ$ ,  $2,2^\circ$  i  $3,4^\circ$  [228].



Rys. 4.30. Charakterystyki zewnętrzne bocznikowej prądnicy lotniczej, gdzie: linia przerywana – bez regulatora; linia pozioma 28,5 V – z regulatorem [37]





**Rys. 4.31.** Charakterystyki regulacyjne prądnicy prądu stałego GS-12T 3s z przesuniętymi szczotkami względem strefy neutralnej w kierunku obrotów wirnika prądnicy o kąt  $\alpha$ :  $0^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $1,6^\circ$ ,  $2,2^\circ$  i  $3,4^\circ$  na tle wartości wymaganych [228]

#### 4.2.5. Dane prądnicy komutatorowej na przykładzie prądnicy komutatorowej prądu stałego GS-12T z samolotu Su-22

Materiały badawcze autorów [193–197, 219–224, 228] przedstawiają zjawiska związane z procesami starzeniowymi zachodzącymi w komutatorowych prądnicach prądu stałego GS-12T 3s i sieciach elektroenergetycznych WSP przez nie zasilanych. Badania te były prowadzone przez wiele lat podczas pracy prądnic na WSP w czasie ich normalnej eksploatacji [166–168]. Z tego powodu nie wszystkie eksperymenty mogły być na tych prądnicach i ich sieciach elektroenergetycznych przeprowadzone. W opracowaniu jednego z autorów przedstawiono model matematyczny oraz wstępne symulacje. W powyższym opracowaniu badania symulacyjne podzielono na:

1. próbę utworzenia kompleksowego modelu matematycznego w środowisku MATLAB, umożliwiającego zamodelowanie procesów statycznych i dynamicznych zachodzących w węzle elektroenergetycznym prądu stałego samolotu Su-22;
2. przedstawienie procesu starzeniowego zachodzącego w ww. węzle prądu stałego w oparciu o arkusze EXCEL;

3. powiązanie ze sobą obserwacji wynikających z badań węzłów prądu stałego w czasie eksploatacyjnych na pokładzie Su-22 oraz badań laboratoryjnych (na stanowisku napędowym) z wynikami badań symulacyjnych na modelach.

Przyjęto, że koncepcja modelu matematycznego dotyczy prądnicy GS-12T 3s z regulatorem napięcia RN-180M oraz sieci pokładowej samolotu Su-22 i uwzględnia zarówno stany statyczne, jak i dynamiczne procesy przejściowe. Dane do modelu uzyskane zostały z dostępnych źródeł literaturowych oraz z bezpośrednich pomiarów charakterystyk reprezentatywnej prądnicy i regulatora. Dane niemożliwe do uzyskania oszacowano metodami heurystycznymi przy spełnieniu poprawności charakterystyk zewnętrznych i warunków brzegowych. Model matematyczny uwzględnia przejściowe procesy cieplne w zakresie dynamicznych zmian temperatury w głównych elementach prądnicy i regulatora, a w procesach cieplnych nie jest rozpatrywany przestrzenny rozkład pola temperatur, lecz wartości uśrednione w poszczególnych elementach.

Model matematyczny dynamiki zmian temperatur w prądnicy zbudowano przy następujących warunkach brzegowych:

- prądnica chłodzona strumieniem powietrza o ciśnieniu na wejściu nie mniejszym niż 400 mm H<sub>2</sub>O,
- temperatura powietrza na wejściu wymuszonego chłodzenia nie większa niż 60°C.

Ponadto model matematyczny uwzględnia wpływ zmian temperatury i ciśnienia powietrza zgodnie z atmosferą wzorcową w zakresie lotu statku powietrznego od 0 do 11 000 m (wysokość geopotencjalna).

Poza przedstawionymi w podrozdziale 4.3 danymi dotyczącymi prądnicy prądu stałego GS-12T 3s na podstawie literatury [73, 122, 133–135, 182–184] pozyskano następujące dodatkowe dane:

1. Dane techniczne uzwojeń:

- uzwojenie wirnika: 1,6×3,8 mm, rezystancja przy +20°C: 0,0041±6% Ω,
- uzwojenie wzbudzenia: φ1,35 mm, rezystancja przy +20°C: 1,2840±6% Ω,
- uzwojenie biegunów dodatkowych: 1,56×6,4 mm, rezystancja przy +20°C: 0,0013±6% Ω,
- uzwojenie kompensacyjne: 1,56 x 6,4 mm, rezystancja przy +20°C: 0,0015±7% Ω.

2. Natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzenia na biegu jałowym i przy obrotach 9000 obr/min nie powinno być mniejsze niż 2,2 A.

3. Krzywa regulacyjna powinna mieć charakter rosnący, przy czym zmiana natężenia prądu wzbudzenia od wartości minimalnej do maksymalnej nie powinna przekraczać 0,5–2 A.

4. Górna graniczna prędkość obrotowa: 11 200 obr/min (max. 2 min).
5. Dopuszczalny przedział zmian napięcia wyjściowego przy zmianie prędkości obrotowej w zakresie 4200–9000 obr/min oraz zmianie prądu obciążenia w zakresie 0–400 A wynosi: 26,5–30 V.

Ponadto na podstawie pomiarów bezpośrednich dla prądnicy GS-12T 3s uzyskano następujące dane:

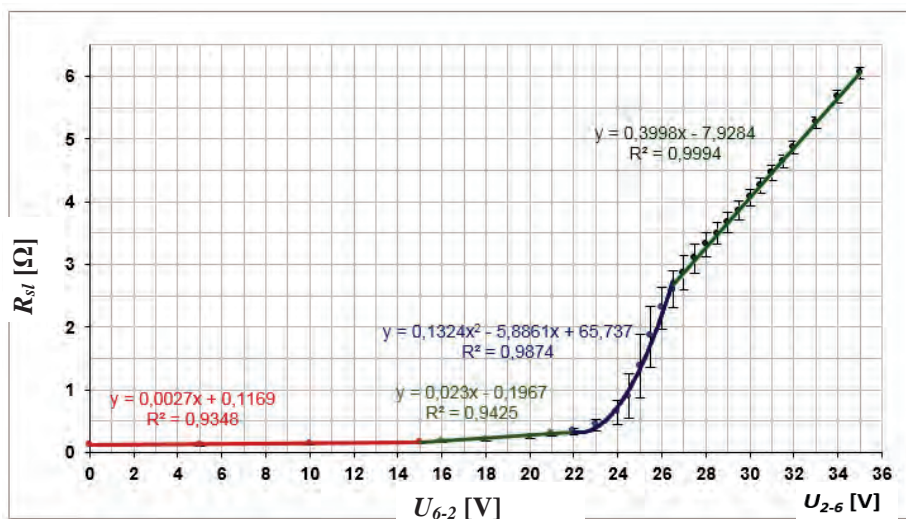
1. Indukcyjność obwodu twornika: 18,0  $\mu\text{H}$  przy  $f=100$  Hz.
2. Indukcyjność uzwojenia wzbudzenia: 27,17 mH przy  $f=100$  Hz.
3. Rezystancja obwodu wzbudzenia zmierzona omomierzem: 1,298  $\Omega$ .
4. Rezystancja obwodu wzbudzenia zmierzona metodą techniczną:

- przy natężeniu prądu 1 A, rezystancja 1,3020  $\Omega$ ,
- przy natężeniu prądu 2 A, rezystancja 1,2765  $\Omega$ .

Dla regulatora napięcia RN-180M na podstawie literatury [74, 131] pozyskano następujące dane (zgodnie z oznaczeniami jak na rys. 4.13):

1. Napięcie znamionowe regulowane przez regulator wynosi 28,5 V.
2. Moc tracona na słupku węglowym nie większa niż 180 W.
3. Prąd pobierany przez uzwojenie robocze regulatora nie większy niż 0,82 A.
4. Zmiana napięcia regulowanego przez regulator nie powinna być:
  - większa niż 3 V (w zakresie 26,3–29,7 V) przy zmianie prędkości obrotowej twornika prądnicy od 4200 obr/min do 9000 obr/min oraz zmianie prądu obciążenia 0–400 A przy stałym położeniu potencjometru WS-25TW, w temperaturze  $+25\pm 10^\circ\text{C}$ ,
  - większa niż 3,5 V (w zakresie 26,3–30,2 V) przy zmianie prędkości obrotowej twornika prądnicy od 4200 obr/min do 9000 obr/min oraz zmianie prądu obciążenia 0–400 A przy stałym położeniu potencjometru WS-25TW, w temperaturze  $+25\pm 10^\circ\text{C}$ .
5. Rezystancja uzwojeń regulatora:
  - uzwojenie robocze L1:  $4,6\pm 0,3$   $\Omega$  w temperaturze  $+20^\circ\text{C}$ ,
  - uzwojenie kompensacji temperaturowej L2:  $1960\pm 0,210$   $\Omega$  w temperaturze  $+20^\circ\text{C}$ ,
  - uzwojenie pracy równoległej L3:  $0,38\pm 0,3$   $\Omega$  w temperaturze  $+20^\circ\text{C}$ .

Wartości rezystancji słupka węglowego regulatora napięcia RN-180M otrzymano z pomiarów na 18 regulatorach przy zmianach napięcia podawanego na zaciski cewek: L1 i L2. Charakterystyka zmian rezystancji słupka węglowego w funkcji napięcia podawanego na zaciski cewek: L1 i L2 węglowego regulatora napięcia RN-180M przedstawiona na rys. 4.32 jest silnie nieliniowa [228].



**Rys. 4.32.** Charakterystyka zmian rezystancji słupka węglowego w funkcji napięcia podawanego na zaciski cewki L1 i L2 (zaciski 6 i 2) węglowego regulatora napięcia RN-180M [228]

Maksymalne odchylenie standardowe dla wykonanych pomiarów rezystancji słupka węglowego nie przekroczyło 0,51 m $\Omega$  (rys. 4.32, zakres wartości napięcia  $U_{2-6} = 24 \div 26$  V).

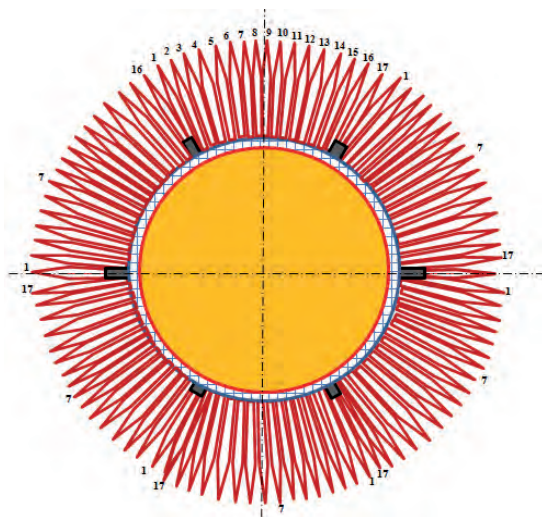
### Wytyczne do modelu matematycznego prądnicy GS-12T 3s

Pomiary na obiektach rzeczywistych wykazały zależności wskazujące na istotne procesy zachodzące w prądnicach GS-12T 3s podczas długotrwałej eksploatacji. Zależności te stanowią wytyczne co do ukierunkowania tworzenia modeli symulacji zmian zachodzących w tych prądnicach podczas długotrwałej eksploatacji i wpływ tych zmian na kształtowanie charakterystyk tych prądnic. Zgodnie z materiałami badawczymi na obiektach rzeczywistych [166-168, 228] stwierdzono, że:

1. Wraz z czasem eksploatacji dla stanów przejściowych, przy skokowej zmianie poziomu obciążenia prądnicy, następuje wzrost czasu trwania impulsu zanikowego ( $\Delta t_z$ ) oraz wzrost jego amplitudy wynikający z obniżania wartości minimalnej napięcia ( $U_{min}$ ) tego impulsu. Stwierdzono również, że wraz z długością czasu eksploatacji na pokładzie samolotu parametry impulsów zanikowych w stanach przejściowych często osiągają poziomy pozanormalny. Wymiana

regulatora napięcia w takich przypadkach często jest nieskuteczna. Korzystne natomiast okazuje się doregulowywanie przesunięcia kąta  $\alpha$  położenia szczotek prądnicy względem aktualnie istniejącej strefy magnetycznie obojętnej pola magnetycznego stojana. W czasie badań na obiektach rzeczywistych zaobserwowano również, że im jest większy nalot prądnicy, tym większą korektę kąta  $\alpha$  należy przeprowadzić.

2. Ze względu na konieczność zapewnienia stabilności [12, 34, 81, 98-100, 126, 147, 152, 159, 188, 234] układu automatycznej regulacji napięcia prądnicy, najmniejsza wartość prądu wzbudzenia  $I_w$  (niezbędna do zapewnienia wartości znamionowej napięcia wyjściowego prądnicy, tu: 28,5 V) zgodnie z [74] nie może być mniejsza niż 0,5 A (poniżej tej wartości system może stać się niestabilny). W prądnicach o niewielkim czasie eksploatacji warunek ten jest spełniony już dla kątów  $\alpha \approx 0^\circ$  – w praktyce ustawienia fabryczne są wystarczające. Dla prądnic o znacznym czasie eksploatacji niezbędna jest korekta ustawienia szczotek, przesunięcie w kierunku przeciwnym do obrotów wirnika prądnicy o kąt  $\alpha > 1^\circ$ .
3. Wraz ze wzrostem czasu eksploatacji, z powodu samoistnego przekompensowania, strefa magnetycznie obojętna przemieszcza się względem swego pierwotnego położenia w kierunku odwrotnym do kierunku wirowania napędu prądnicy. W prądnicach strumień magnetyczny  $\Phi_{kom}$  wytwarzany poprzez uzwojenie kompensacyjne połączone szeregowo z uzwojeniem twornika (wirnika) przeciwdziała polu poprzecznemu reakcji twornika  $\Phi_q$ . Kierunek strumienia wytwarzanego przez uzwojenie kompensacyjne  $\Phi_{kom}$  jest ten sam co  $\Phi_q$ , ale ma przeciwny zwrot. Wartości bezwzględne obu tych wektorów są sobie równe dla fabrycznie nowej prądnicy pod warunkiem niewystępowania zwarć międzyzwojowych w tworniku lub w uzwojeniu kompensacyjnym oraz przy założeniu jednakowych rezystancji magnetycznych  $R_\mu$ . Zmniejszenie się wartości strumienia poprzecznego twornika (wirnika) w stosunku do strumienia wytwarzanego przez uzwojenie kompensacyjne może nastąpić w przypadku zwiększenia rezystancji czynnej uzwojeń twornika w stosunku do rezystancji uzwojenia kompensacyjnego. Pomiar rezystancji zewzwojów eksploatowanej prądnicy GS-12T 3s potwierdziły tę hipotezę – stwierdzono wzrost rezystancji zewzwojów twornika (rys. 4.33) powyżej dopuszczalnej przez producenta odchyłki  $\pm 6\%$ .
4. Pomiar rezystancji zewzwojów przeprowadzono na populacji dziewięciu prądnic GS-12T. Pomiar przeprowadzono metodą techniczną, tj. metodą woltomierza i amperomierza, zalecaną do pomiarów rezystancji poniżej 1  $\Omega$ .
5. Przeprowadzono odpowiednie przeliczenia.



Rys. 4.33. Schemat połączeń zezwojów prądnicy GS-12T 3s [228]

Dane techniczne uzwojeń wg literatury [133, 228]:

- Uzwojenie wirnika:  $1,6 \times 3,8$  mm, stąd  $S=6,08$  mm<sup>2</sup>, tj. przy  $I_{obc} = I_N=400$  A  $J_{100\%} = 65,7$  A/mm<sup>2</sup>, zaś 170% tj.  $I_{obc} = 1,7 \cdot I_N = 1,7 \cdot 400$  A = 680 A  $J_{170\%} = 112$  A/mm<sup>2</sup>.
- Rezystancja uzwojeń wirnika prądnicy w +20°C:  $R_{to} = 0,0041 \pm 6\%$  Ω = 4,1 mΩ, tj.  $R_{to\min} = 0,003854$  Ω,  $R_{to\max} = 0,004346$  Ω, zaś przewodność = 243,9 simensów.
- Komutator prądnicy ma 102 wycinki (klepki), do każdego z nich przyłutowana jest końcówka zezwoju.
- Prądnica ma sześć szczotek stykowych (trzy pary szczotek: trzy plusowe i trzy minusowe).
- Rezystancja twornika  $R_{to}$  („widziana” od strony zacisków plusowego i minusowego wirnika) jest wypadkową oporności sześciu sekcji zezwojów (po 17 zezwojów na każdą sekcję) połączonych równolegle:

$$\frac{1}{R_{to}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{17} R_j} + \frac{1}{\sum_{j=18}^{34} R_j} + \frac{1}{\sum_{j=35}^{51} R_j} + \frac{1}{\sum_{j=52}^{68} R_j} + \frac{1}{\sum_{j=69}^{85} R_j} + \frac{1}{\sum_{j=86}^{102} R_j} \quad (4.15)$$

gdzie:  $R_j$  – rezystancje poszczególnych zezwojów ( $j$  – numer zezwoju i jednocześnie numer wycinka, tj. klepki komutatora), ponieważ zezwoje mają pierścieniową strukturę połączeń, więc zezwój nr 102 jest przyłutowany jednym końcem do wycinka komutatora nr 102 i do wycinka komutatora nr 1.

- f) Zakładając równomierną (jednakową) rezystancję zewzwojów wirnika można otrzymać:

$$\frac{1}{R_{to}} = \frac{6}{\sum_{j=1}^{17} R_j} \quad (4.16)$$

- g) Zakładając, że rezystancja wszystkich zewzwojów jest jednakowa, tj.  $R_j = R_{jo}$ , można otrzymać:

$$\frac{1}{R_{to}} = \frac{6}{17 \cdot R_{jo}} \quad (4.17)$$

- h) Stąd rezystancja widziana od strony zacisków (wypadkowa trzech gałęzi plusowych i trzech gałęzi minusowych):

$$R_{t0} = \frac{1}{6} \cdot 17 \cdot R_{jo} \quad (4.18)$$

- i) Rezystancja (fabrycznie nowego) pojedynczego zewzwoju:

$$R_{jo} = R_{t0} \cdot \frac{6}{17} \quad (4.19)$$

- j) Po podstawieniu wartości liczbowych rezystancja pojedynczego „wzorcowego” zewzwoju (przy założeniu jednakowej rezystancji zewzwojów)  $0,0041 \cdot 6/17 = 1,447 \text{ m}\Omega$ ;

- k) Podczas pomiarów (metodą techniczną) danego zewzwoju mierzona jest w rzeczywistości rezystancja wypadkowa  $R_w$  dwóch rezystancji:  $R_1 = R_j$  oraz  $R_2=5$ , tj. rezystancja badanego zewzwoju i równolegle z nią rezystancje pozostałych pięciu grup (po 17 zewzwojów każda).

Wykorzystując wzór na połączenie równoległe rezystancji:

$$\frac{1}{R_{jw}} = \frac{1}{R_j} + \frac{1}{\sum_{j=1}^{102} R_j^*} \quad (4.20)$$

gdzie:  $\sum_{j=1}^{102} R_j^*$  – sumaryczna wartość rezystancji wszystkich (102) zewzwojów z wyłączeniem wartości zewzwoju, na którym zapięto sondy napięciowe układu pomiarowego.

Stąd można wyznaczyć rzeczywistą wartość zewzwoju, na którym zapięta jest sonda napięciowa:

$$\frac{1}{R_j} = \frac{1}{R_{jw}} - \frac{1}{\sum_{j=1}^{j=102} R_j^*} \quad (4.21)$$

\* z wyłączeniem wartości zezwoju, na którym zapięto sondy napięciowe układu pomiarowego.

Po doprowadzeniu do wspólnego mianownika:

$$R_j = \frac{R_{jw} \cdot \sum_{j=2}^{j=102} R_j^*}{\sum_{j=1}^{j=102} R_j^* - R_{jw}} \quad (4.22)$$

- l) Uzwojenie wzbudzenia:  $\phi 1,35$  mm, rezystancja przy  $+20^\circ\text{C}$ :  $1,284\Omega \pm 6\%$ .
- m) Uzwojenie biegunów dodatkowych:  $1,56 \times 6,4$  mm, rezystancja przy  $+20^\circ\text{C}$ :  $0,0013\Omega \pm 6\%$ .
- n) Uzwojenie kompensacyjne:  $1,56 \times 6,4$  mm, rezystancja przy  $+20^\circ\text{C}$ :  $0,0015\Omega \pm 7\%$ .

Uzyskane wartości rezystancji dla poszczególnych zezwojów (od 1 do 102) prądnicy GS-12T 3s od wartości znamionowej przedstawiono na wykresie radarowym (rys. 4.34), natomiast wzrost wartości średniej zezwojów wirnika przedstawiono na rys. 4.35. Analizując dane przedstawione na rysunku można stwierdzić, że niektóre zezwoje prądnic o długim czasie nalotu miały znacznie zwiększone rezystancje, nawet do  $R_{j0} = 1,884 \text{ m}\Omega$ , przy czym wartość zróżnicowania rezystancji poszczególnych zezwojów ulegała zwiększeniu wprost proporcjonalnemu do czasu nalotu ( $\sigma R_{j0\text{max}} = 29\%$  w stosunku do wartości znamionowej zezwoju), zaś średnia rezystancja wszystkich zezwojów prądnicy była zwiększona średnio o  $24,4\%$  w stosunku do rezystancji znamionowej, przy czym ekstremalne wartości danego wirnika ulegały zwiększaniu zróżnicowania rezystancji wprost proporcjonalnie do godzin nalotu i osiągały wartość do  $\Delta \sigma R_{j0\text{max}} = 10\%$ .

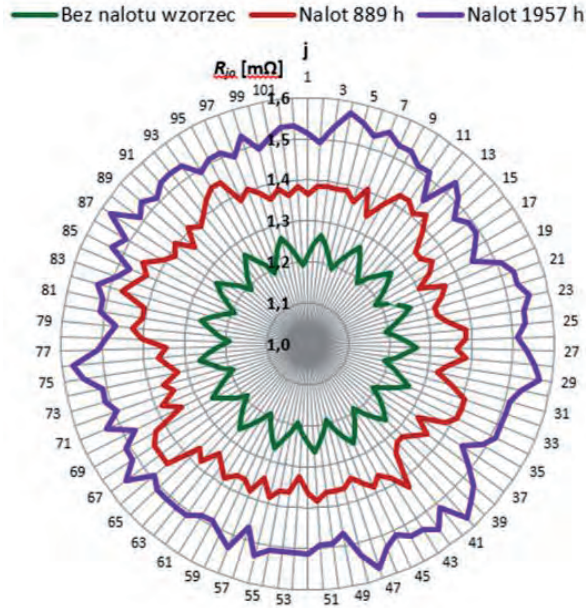
Program EXCEL wygenerował równanie [228] – możliwe jest obliczanie zmian zezwoju w funkcji czasu nalotu [mΩ]:

$$R_{j0} = -5 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 + 0,0002 \cdot t + 1,2181 \quad (4.23)$$

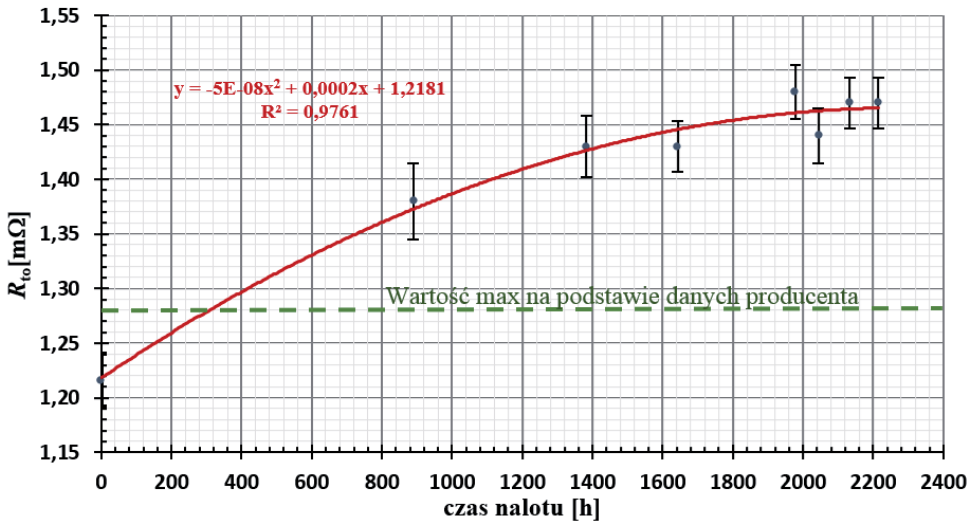
Należy uwzględnić wzrost rezystancji uzwojeń wirnika w czasie eksploatacji oraz temperaturowy współczynnik rezystancji:

$$R_{j0} = R_{j020}[1 + \alpha_{Cu} (T_1 - 20^\circ\text{C})] \quad (4.24)$$





Rys. 4.34. Wartości rezystancji poszczególnych zezwojów prądnicy  $R_{j0} = f(j)$  (promień wodzący) w funkcji numeracji zezwojów wirnika dla różnych czasów eksploatacji dla prądnic o zróżnicowanym czasie nalołu statku powietrznego – z badań własnych Autorów, gdzie:  $j$  – numer zezwoju twornika (numer na obwodzie) [228]



Rys. 4.35. Wartości rezystancji średniej zezwojów prądnicy GS-12T w funkcji godzin nalołu otrzymane z populacji ośmiu prądnic [228]

Maksymalne odchylenie standardowe dla wykonanych pomiarów rezystancji średniej zezwojów wirnika prądnicy nie przekroczyło 1,873 mΩ (rys. 6.2a, przy czasie nalotu ok. 1947 h) [228]. Zaobserwowano również następujące relacje:

1. Zwiększenie rezystancji czynnej uzwojeń twornika  $R_{to}$  powoduje zmniejszenie napięcia wyjściowego prądnicy (wartość napięcia wyjściowego jest równa wartości siły elektromotorycznej  $E$  wytworzonej w tworniku, pomniejszonej o spadek napięcia na rezystancji wewnętrznej, tu: rezystancji twornika), które do pewnego czasu jest podnoszone automatycznie przez regulator napięcia poprzez zmniejszanie rezystancji  $R_{st}$  słupka węglowego włączonego w szereg z uzwojeniem stojana (rys. 4.13, element R5) – co skutkuje zwiększeniem wartości natężenia prądu wzbudzenia  $I_w$ , a więc i zwiększoną wartością strumienia magnetycznego stojana  $\Phi_w$ .
2. Gdy zakres automatycznej regulacji regulatora napięcia RN-180M (zmiana rezystancji słupka węglowego) jest niewystarczający z powodu wzrostu rezystancji w obwodzie wzbudzenia (wzrost rezystancji kabli łączących regulator napięcia z prądnicą, wzrost rezystancji stosu płytek węglowych na skutek długotrwałej pracy), personel naziemny przemieszcza pokrętko rezystora wynośnego WS-25T, zwiększając jego wartość rezystancji – zmniejsza się wówczas natężenie prądu płynącego przez cewkę roboczą regulatora napięcia. Cewka L1 jest cewką sterującą elektromagnesu rozciągającą słupek węglowy. Zwiększenie rezystancji opornika wynośnego WS-25T powoduje więc zmniejszenie siły rozciągającej słupek węglowy i wówczas (pod wpływem siły ściskającej od sprężyny) rezystancja słupka węglowego ulega zmniejszeniu. Słupek węglowy jest włączony szeregowo w obwód cewki stojana, stąd zmniejszenie jego rezystancji powoduje zwiększenie natężenia prądu przepływającego przez uzwojenie stojana. Zgodnie ze wzorami (4.10) i (4.11) wzrost tego prądu spowoduje zwiększenie wartości  $\Phi$  strumienia magnetycznego stojana, a także, zgodnie ze wzorem (4.25), wzrost indukcji magnetycznej stojana. Wówczas to wartość siły elektromotorycznej  $E$  indukowanej w tworniku (wirniku) ulega zwiększeniu zgodnie ze wzorem:

$$E = n \cdot l \cdot B \quad (4.25)$$

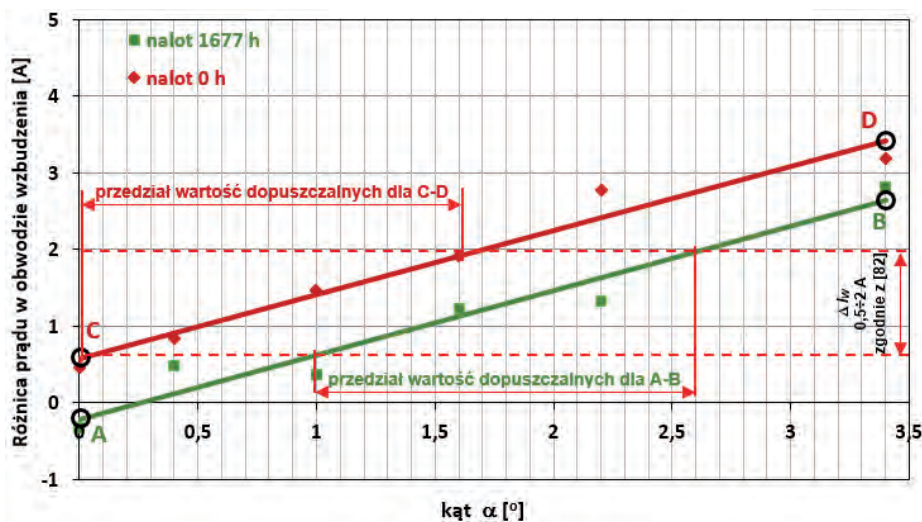
gdzie:  $E$  – siła elektromotoryczna indukowana w tworniku,  $n$  – prędkość obrotowa wirnika prądnicy;  $l$  – długość boku ramki zezwoju wirnika (w praktyce długość wirnika),  $B$  – indukcja magnetyczna stojana, opisana wzorem:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (4.26)$$

gdzie:  $\Phi$  – strumień magnetyczny wzór (4.2),  $S$  – pole przekroju poprzecznego obwodu magnetycznego przez które przepływa strumień magnetyczny.

Zwiększenie wartości  $E$  indukowanej w tworniku powoduje wzrost napięcia na zaciskach wyjściowych prądnicy do poziomu znamionowego.

3. Zwiększenie rezystancji czynnej uzwojeń twornika  $R_{to}$ , powoduje większe spadki napięcia na tej rezystancji, a wraz z nimi wzrost wydzielanego ciepła w wirniku prądnicy oraz wzrost jego temperatury, co zmniejsza współczynnik przenikalności magnetycznej  $\mu$  [34, 45, 46, 47, 64]. Wpływa to na zwiększenie rezystancji magnetycznej  $R_{mk}$  wirnika zgodnie ze wzorem (4.9), powodując zmniejszenie strumienia magnetycznego reakcji twornika zgodnie ze wzorem (4.10).
4. Wraz z czasem eksploatacji prądnicy wartość strumienia poprzecznego reakcji twornika ulega zmniejszeniu, podczas gdy strumień od uzwojenia kompensacyjnego pozostaje bez zmian – następuje przekompensowanie prądnicy. Na rys. 4.36 przedstawiono charakterystyki zmian natężenia prądu w obwodzie wzbudzenia prądnic od wartości minimalnej do maksymalnej (uzyskane na podstawie charakterystyk regulacyjnych prądnic prądu stałego GS12T 3s z przesuniętymi szczotkami względem strefy neutralnej w kierunku obrotów wirnika prądnicy o kąt  $\alpha$ :  $0^\circ$ ,  $0,4^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $1,6^\circ$ ,  $2,2^\circ$  i  $3,4^\circ$ ) w zależności od położenia szczotek względem strefy magnetycznie neutralnej, na podstawie których można stwierdzić, że:
  - a) dla prądnicy bez nalotu na statku powietrznym (rys. 4.36, charakterystyka C-D) strumień poprzeczny reakcji twornika  $\Phi_q$  jest skompensowany przez przeciwny co do kierunku, ale równy co do wartości bezwzględnej strumień magnetyczny uzwojenia kompensacyjnego  $\Phi_{kom}$  – kąt przesunięcia pomiędzy strefą magnetycznie obojętną a szczotkami wynosi ok.  $0^\circ$  (rys. 4.36, szczegól C);
  - b) dla prądnicy o znacznym czasie eksploatacji (rys. 4.36, charakterystyka A-B) składowa poprzeczna strumienia reakcji twornika  $\Phi_q$  pozostaje bez zmian (bo liczba uzwojeń twornika pozostaje bez zmian), natomiast ulega zmniejszeniu składowa podłużna  $\Phi_{kom}$  rozmagnesowująca pole magnetyczne stojana (na skutek wzrostu rezystancji uzwojeń twornika) – następuje przekompensowanie – kąt przesunięcia pomiędzy strefą magnetycznie obojętną a szczotkami ulega przemieszczeniu w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów wirnika prądnicy i osiąga znaczące wartości  $\alpha \sim 3,5^\circ$ .



Rys. 4.36. Charakterystyki zmian natężenia prądu w obwodzie wzbudzenia prądnic od wartości minimalnej do maksymalnej: A-B – charakterystyka dla prądnicy o długotrwałej eksploatacji; C-D – charakterystyka prądnicy bez nalotu na statku powietrznym [228]

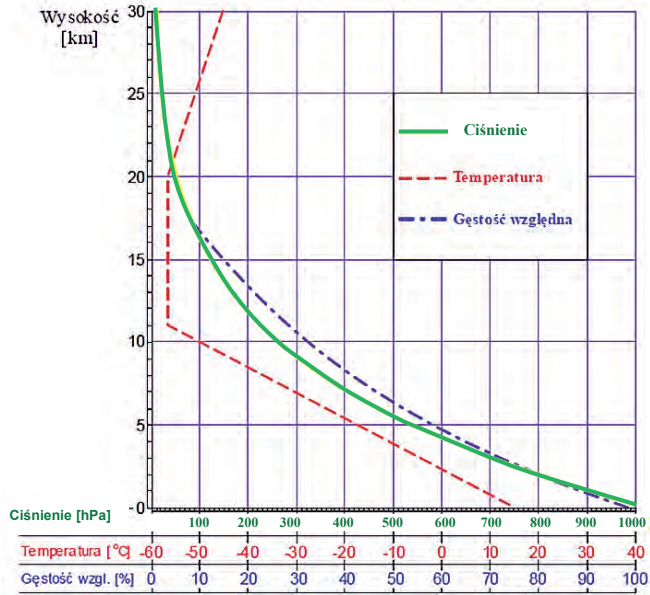
## 4.2.6. Chłodzenie prądnic komutatorowych prądu stałego

### 4.2.6.1. Wiadomości ogólne – warunki pracy urządzeń wyposażenia elektrycznego

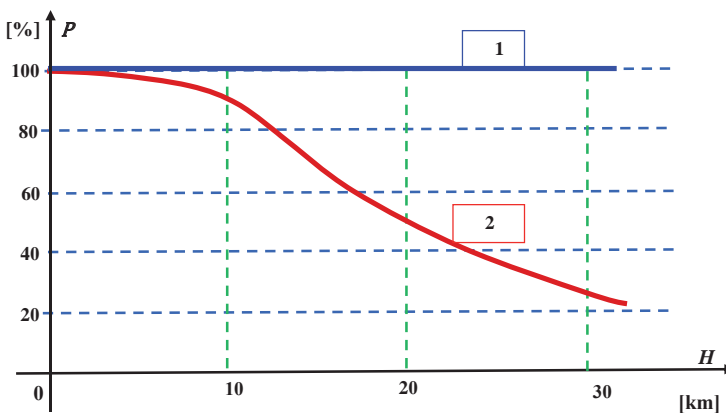
Warunki pracy urządzeń wyposażenia elektrycznego statku powietrznego znacznie różnią się od warunków pracy na ziemi. Różnice te wynikają z następujących narażeń: wysokość (ciśnienie), prędkość lotu, przeciążenia wynikające z drgań i wibracji konstrukcji oraz uderów i przyspieszeń liniowych, zmiany położenia w przestrzeni i zmiany warunków klimatycznych. Obniżenie ciśnienia barycznego i gęstości powietrza wraz ze wzrostem wysokości lotu wpływa na efektywność chłodzenia urządzeń – maleje masa czynnika chłodzącego. Obniżenie się temperatury powietrza częściowo kompensuje zmniejszanie się jego gęstości, lecz na dużych wysokościach oddziaływanie zanika. Wilgotność względna powietrza w warunkach naziemnych może sięgać 100%, jednak wraz ze wzrostem wysokości szybko maleje. Ma to bezpośredni wpływ na jakość pracy zespołów komutatorowo-szczotkowych maszyn elektrycznych, powodując szybsze zużywanie się szczotek. Wzrost wysokości powoduje obniżenie się wytrzymałości elektrycznej powietrza, w związku z tym istnieje konieczność zwiększenia odległości między

stykami urządzeń komutacyjnych, w celu przeciwdziałania łuku elektrycznego. Jest to szczególnie ważne w obwodach wysokonapięciowych.

Model atmosfery ziemskiej do wysokości 30 000 m – warunki pracy urządzeń wyposażenia elektrycznego przedstawia rys. 4.37, a zmiany mocy użytecznej prądnic pokładowej w zależności od wysokości lotu rys. 4.38.



Rys. 4.37. Wykres zmian temperatury powietrza otoczenia w zależności od wysokości, wg atmosfery wzorcowej



Rys. 4.38. Wykres zmian mocy użytecznej prądnic pokładowej w zależności od wysokości lotu: 1 – chłodzenie parą wodną; 2 – chłodzenie powietrzem przy stałym ciśnieniu i prędkości 1600 km/h

Prędkość lotu sama z siebie nie wpływa na pracę urządzeń elektrycznych.

Wpływ prędkości przejawia się w postaci nagrzewania aerodynamicznego powierzchni statku powietrznego oraz powietrza używanego do chłodzenia urządzeń.

Wzrost temperatury wynika z zamiany energii kinetycznej strumienia powietrza w energię cieplną.

Przy założeniu, że proces jest adiabatyczny, to zgodnie z równaniem Bernoulliego przyrost temperatury ma wartość:

$$\Delta T = 5[0,01(v_1 - v_0)]^2 \quad (4.27)$$

np.: dla  $h = 10 \text{ km}$        $v_1 = 300 \text{ m/s (Ma=1)} - \Delta T = 45^\circ\text{C}$   
                                   $v_1 = 900 \text{ m/s (Ma=3)} - \Delta T = 200^\circ\text{C}$

Przeciążenia mechaniczne i warunki klimatyczne określają możliwe warunki eksploatacji wyposażenia elektrycznego.

Normy określają stopnie odporności urządzeń na narażenia mechaniczne i klimatyczne, np.: Radio Technical Commission for Aeronautics RTCA **DO 160** Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment [165], Norma Obronna NO-15-A200 Wojskowe Statki Powietrzne. Pokładowe układy zasilania elektrycznego. Podstawowe parametry. Wymagania i badania [141]. Treść podstawowych zaleceń można przedstawić następująco:

- a) w urządzeniach wirujących może wystąpić zjawisko rezonansu.
- b) przewody (wiązki) elektryczne oraz przewody rurowe powinny być mocowane do płatowca, aby uniemożliwić ich przemieszczanie pod wpływem sił bezwładności.
- c) uzwojenia maszyn i aparatów elektrycznych należy dodatkowo zabezpieczać przed przemieszczaniem się.
- d) temperatura podzespołu jest sumą temperatur: otoczenia i przyrostu jego temperatury wynikającego z przepływu prądu, jak i warunków chłodzenia.
- e) stosowanie chłodzenia cieczowego ogranicza wpływ temperatury otoczenia na urządzenie.
- f) urządzenia hermetyczne wymagają dodatkowych zabezpieczeń wynikających ze spadku ciśnienia otoczenia i związanym z tym zjawiskiem kondensowania się oraz skraplania pary wodnej.
- g) do czynników klimatycznych zalicza się też: radiację słońca, pył i piasek, grzyby pleśniowe, szron, rosę, słoną mgłę, bliskość wody morskiej itp.
- h) warunki klimatyczne wymagają stosowania odpowiednich materiałów, w tym pokryć antykorozyjnych, a czasami nawet specjalnych konstrukcji urządzeń.

- i) podczas lotu urządzenia mogą znajdować się w dowolnym położeniu względem płaszczyzny horyzontu i być poddane działaniom dodatnich i ujemnych przyspieszeń liniowych, a także być w stanie nieważkości.
- j) proces nagrzewania się urządzenia elektrycznego opisuje bilans energii cieplnej (przy założeniu, że całe wydzielane ciepło zostanie zakumulowane w urządzeniu w postaci przyrostu temperatury):

$$I^2 \cdot R \cdot \Delta t = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4.28)$$

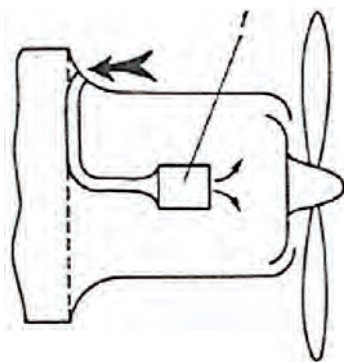
gdzie:  $I$  – prąd przepływający przez urządzenie [A];  $R$  – rezystancja wewnętrzna urządzenia [ $\Omega$ ];  $\Delta t$  – czas pracy urządzenia [s];  $m$  – masa urządzenia [kg];  $c_p$  – ciepło właściwe urządzenia [J/kg $^\circ$ C];  $\Delta T$  – przyrost temperatury urządzenia [ $^\circ$ C].

#### 4.2.6.2. Podstawowe systemy układu nadmuchu powietrznego w lotnictwie

Systemy chłodzenia prądnic pokładowych prądu stałego ewaluowały wraz z rozwojem silników lotniczych [231] – jak wiadomo z literatury [91, 117, 179], od 1926 r., z uwagi na wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną w lotnictwie zrezygnowano z dodatkowych śmigieł napędzających prądnice – od tej chwili zaczęły pobierać energię mechaniczną bezpośrednio z silnika głównego statku powietrznego. Im bardziej intensywne chłodzenie, tym większy prąd można pobierać z prądnicy. Często zabudowywano prądnice na kołpaku śmigła silnika głównego, gdzie w czasie lotu był bardzo dobry opływ powietrza. Miejsce to było jednocześnie podatne diagnostycznie – dobry dostęp dla mechanika. Niestety w czasie oczekiwania na zgodę do startu przepływ strug powietrza był w tym miejscu zbyt słaby – sięgnięto po wykorzystanie strug powietrza wyrzucanego przez końcówki śmigła silnika głównego – rys. 4.39. Wraz z powstaniem w 1941 r. pierwszych silników turboodrzutowych (brytyjski Glosser-Meteor i niemiecki Me-262 Schwalbe) [231] pojawiły się problemy związane z manewrowością samolotów, czyli ich dynamicznymi zmianami kąta pochylenia, a umieszczanie prądnicy w rejonie wlotu do silnika nie zapewniało jej stabilnego strumienia nadmuchu. Sięgnięto więc po powietrze zza sprężarki – rys. 4.40. Nie było to najlepsze wyjście, gdyż sprężone powietrze miało podwyższoną temperaturę. Skorzystano z powietrza wlotowego (rys. 4.41 i 4.42). Wspomniana wcześniej wysoka manewrowość samolotów z napędem turboodrzutowym utrudniała uzyskanie stabilnego strumienia chłodzącego. Z chwilą przekroczenia bariery dźwięku sytuacja jeszcze bardziej się skomplikowała – po powstaniu klinów naddźwiękowych wiele sektorów w rejonie przednich wlotów powietrza było silnie dławionych. Sięgnięto wówczas do rejonu dyszy wylotowej, gdzie nie było tak niekorzystnych warunków

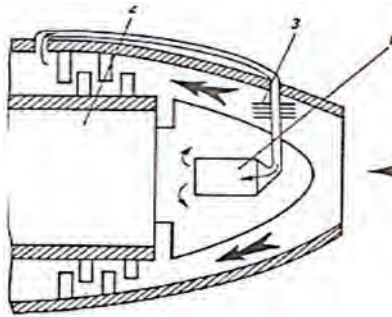
do uzyskania stabilnego strumienia chłodzącego prądnicę – rys. 4.43 [24, 43, 47]. Chwytniki powietrza wysunięte poza obrys kadłuba nie powodowały znaczącego sprężania i w związku z tym nie miało ono wstępnie podwyższonej temperatury. Powietrze wchodziło do wnętrza prądnicy szerokim przewodem (rurą elastyczną). Ponadto często wykorzystywano do „odsysania” powietrza z wnętrza prądnicy zjawisko eżektorowe. Polegało ono na wykorzystaniu prawa Bernoulliego – strumień gazów wylotowych z silnika głównego o znacznej prędkości powodował powstawanie podciśnienia, które zwiększało obieg powietrza chłodzącego w prądnicy oraz wysysało resztki wilgoci, która pojawiała się po długim postoju statku powietrznego na skutek kondensacji pary wodnej wewnątrz prądnicy podczas zmian ciśnienia atmosferycznego.

Osobnym problemem było chłodzenie prądnic zabudowanych na śmigłowcach. Jak wiadomo, już w 1942 r. niemiecki konstruktor i producent Flettner [58] wyprodukował ponad 20 dwuwirnikowych dwumiejscowych śmigłowców. Wcześniejsze wersje wykonywane w różnych krajach (Hiszpania, Francja) [247] miały tylko prototypowy, jednostkowy charakter. Jednakże wszystkie konstrukcje śmigłowców miały ten sam problem utrudniający skuteczne chłodzenie prądnic pokładowych – osiągały niewspółmiernie mniejsze prędkości lotu niż samoloty. Ta dysproporcja trwa do dzisiaj. Dlatego już w pierwszych wersjach prądnice (i nie tylko one) były chłodzone dodatkowym wentylatorem mechanicznym [11, 58, 148, 247].

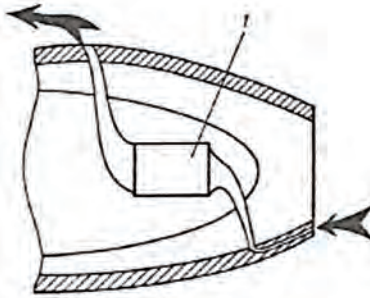


**Rys. 4.39.** Typowy sposób chłodzenia prądnicy stosowany na silnikach samolotów napędzanych śmigłem z silnikiem tłokowym [127]

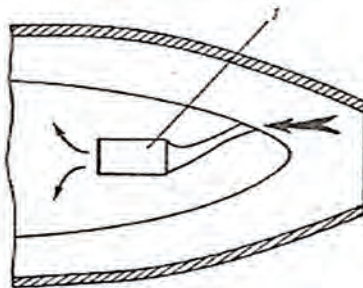




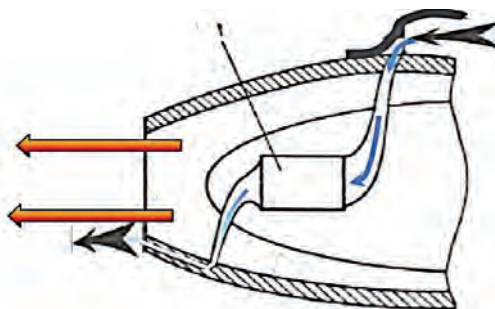
**Rys. 4.40.** Typowy sposób chłodzenia prądnicy stosowany na silnikach turbopropylowych – chłodzenie powietrzem pobieranym z wentylatora mechanicznego (śmigłowce) lub z za wentylatora mechanicznego, gdzie: 1 – prądnica pokładowa; 2 – sprężarka; 3 – chłodnica [127]



**Rys. 4.41.** Typowy sposób chłodzenia prądnicy stosowany na pierwszych silnikach turboodrzutowych – chłodzenie powietrzem pobieranym z naporu powietrza chwytnikiem przednim zewnętrznym, gdzie: 1 – prądnica pokładowa [127]



**Rys. 4.42.** Typowy sposób chłodzenia prądnicy stosowany na pierwszych silnikach turboodrzutowych – chłodzenie powietrzem pobieranym z naporu powietrza chwytnikiem przednim wewnętrznym, gdzie: 1 – prądnica pokładowa [127]



**Rys. 4.43.** Typowy sposób chłodzenia prądnicy stosowany na silnikach turboodrzutowych – chłodzenie powietrzem pobieranym z naporu powietrza z za tylnego chwytніка wewnętrzno oraz wykorzystanie zjawiska eżektorowego [127]

#### 4.2.6.3. Proces nagrzewania się i schładzania prądnicy

Rzeczywisty proces nagrzewania urządzenia jest bardzo złożony. Najczęściej jest tak, że nie cała masa urządzenia elektrycznego uzyskuje równą wartość temperatury i mogą być obszary, gdzie temperatura przekracza dopuszczalną wartość powodującą jego uszkodzenie. Dlatego urządzenia elektryczne wymagają stosowania chłodzenia o określonej intensywności. Chłodzenie, czyli wymiana ciepła między urządzeniem elektrycznym a otoczeniem o niższej temperaturze niż urządzenie, może odbywać się przez:

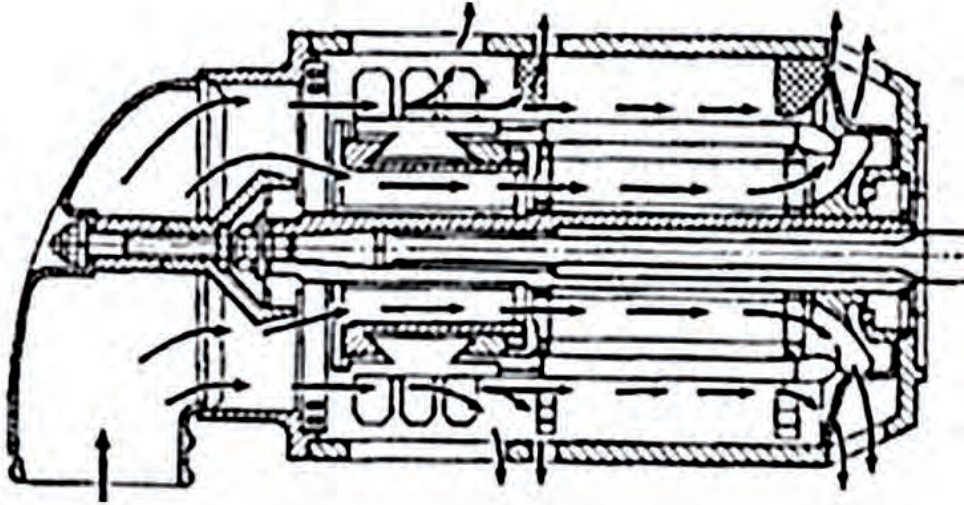
- a) przewodzenie,
- b) konwekcję,
- c) promieniowanie.

W zależności od wymaganej intensywności chłodzenia stosowane są następujące rozwiązania konstrukcyjne układów chłodzenia pokładowych urządzeń elektrycznych:

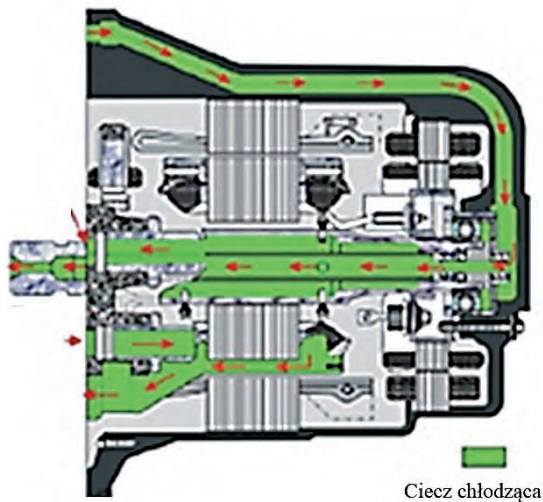
- a) chłodzenie własne powierzchniowe (promieniowanie i konwekcja naturalna),
- b) chłodzenie własne wewnętrzne (wentylator wewnętrzny urządzenia),
- c) chłodzenie wymuszone powierzchniowe,
- d) chłodzenie wymuszone wewnętrzne,
- e) chłodzenie mieszane (czyli własne i wymuszone).

Wzrost wysokości i prędkości lotu ogranicza stosowanie powietrza jako czynnika chłodzącego. Schemat wymuszonego chłodzenia powietrznego prądnicy przedstawia rys. 4.44. Malejąca wraz ze wzrostem wysokości gęstość powietrza zmniejsza skuteczność chłodzenia powietrznego, w wyniku zmniejszenia się masy czynnika chłodzącego. Podczas lotu z dużymi prędkościami następuje nagrzewanie powie-

trza na skutek sprężania dynamicznego, a zatem jest ono już rozgrzane i maleje efektywność chłodzenia, dlatego istnieje potrzeba stosowania chłodzenia cieczowego (rys. 4.45).

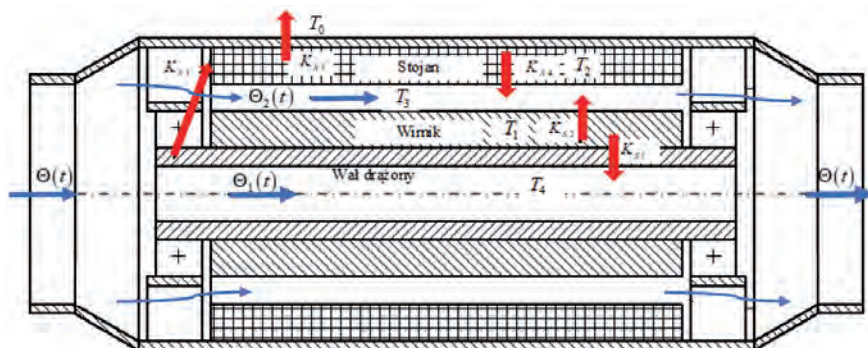


Rys. 4.44. Schemat wymuszonego chłodzenia powietrznego prądnicy [228]



Rys. 4.45. Schemat wymuszonego chłodzenia cieczowego prądnicy [244]

Na rys. 4.46 przedstawiono schemat przepływów ciepła w pracującej prądnicy GS-12T 3s, na podstawie którego opracowano bilans cieplny prądnicy [228].



**Rys. 4.46.** Schemat wymuszonego chłodzenia cieczowego prądnicy – model cieplny prądnicy lotniczej GS-12T 3s [228]

W bilansie cieplnym prądnicy GS-12T 3s uwzględniono następujące składowe [124, 162, 228]:

1. Ciepło dostarczone do układu od strony wirnika i stojana prądnicy:

$$Q_{dost} = P_{dost} \cdot t \quad (4.29)$$

gdzie:

$$P_{dost} = P_{wir} + P_{st} \quad (4.30)$$

gdzie:  $t$  – czas,  $P_{dost}$  – moc cieplna dostarczona do układu (moc strat cieplnych w prądnicy),  $P_{wir}$  – moc cieplna wydzielona w wirniku prądnicy,  $P_{st}$  – moc cieplna wydzielona w stojanie prądnicy.

2. Ciepło konwekcji naturalnej, tj. ciepło odprowadzane z prądnicy w wyniku naturalnej konwekcji i wymiany ciepła z otoczeniem [120, 124, 228]:

$$Q_{konw}(t) = k_5 \cdot [T_2(t) - T_0(H)] \quad (4.31)$$

gdzie:  $k_5$  – współczynnik konwekcji naturalnej,  $T_2(t)$  – temperatura stojana,  $T_0(H)$  – temperatura otoczenia (na zewnątrz obudowy).

Na potrzeby modelu matematycznego przyjęto, że temperatura otoczenia związana jest z wysokością geopotencjalną atmosfery wzorcowej według następującej zależności:

$$T_0(H) = T_b + \beta_t \cdot (H - H_b) \quad (4.32)$$

gdzie:  $H$  – wysokość geopotencjalna (wysokość lotu statku powietrznego),  $T_b = 288,15$  K – temperatura dolnej, rozpatrywanej warstwy powietrza,  $b_t = 0,0065$  K/m – gradient temperatury,  $H_b = 0$  m – wysokość geopotencjalna dolnej, rozpatrywanej warstwy powietrza.

1. Ciepło konwekcji wymuszonej w układzie chłodzenia:

$$Q_{chłodz} = k_1 \cdot [T_1(t) - T_4(t)] + k_2 \cdot [T_1(t) - T_3(t)] \quad (4.33)$$

gdzie:  $T_1(t)$  – temperatura wirnika prądnicy,  $T_3(t)$  – temperatura kanału powietrznego pomiędzy wirnikiem i stojanem prądnicy,  $T_4(t)$  – temperatura kanału powietrznego w wale drążonym,  $k_1, k_2$  – współczynniki konwekcji wymuszonej.

2. Ciepło przenikania pomiędzy kanałem chłodzenia stojana i stojanem:

$$Q_{p1} = k_4 \cdot [T_3(t) - T_2(t)] \quad (4.34)$$

3. Ciepło przenikania pomiędzy wirnikiem i stojanem poprzez konstrukcję prądnicy [141–146]:

$$Q_{p2} = k_3 \cdot [T_1(t) - T_2(t)] \quad (4.35)$$

4. Ciepło promieniowania obudowy prądnicy w kierunku otoczenia, uwzględniając prawo Stefana-Boltzmana można zapisać jako:

$$Q_{prom} = k_6 \cdot [T_2^4(t) - T_0^4(t)] \quad (4.36)$$

gdzie:  $T_2(t)$  – temperatura stojana prądnicy,  $T_0(t)$  – temperatura otoczenia (na zewnątrz obudowy),  $k_6$  – współczynnik promieniowania.

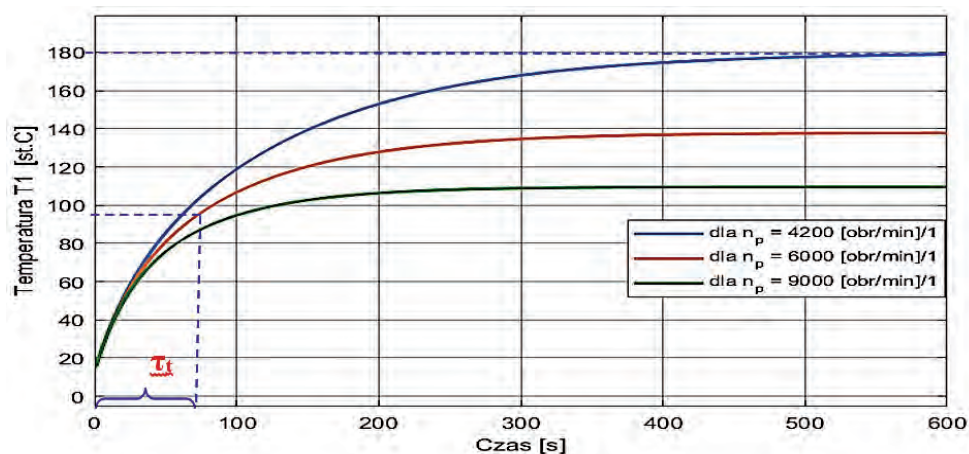
W procesach zachodzących w komutatorowej prądnicy prądu stałego GS-12T 3s, a zwłaszcza procesach starzeniowych dużą rolę odgrywa temperatura prądnicy, zwłaszcza temperatura uzwojeń jej twornika. Temperatura jest przyczyną zwiększenia rezystancji czynnej uzwojeń twornika, co skutkuje zmniejszeniem się wartości strumienia poprzecznego twornika w stosunku do strumienia wytwarzanego przez uzwojenie kompensacyjne prądnicy.

Pomiary przeprowadzone przez autorów w czasie prób silnika na obiekcie rzeczywistym [93] wykazały temperaturę korpusu prądnicy wynoszącą ok. 70°C.

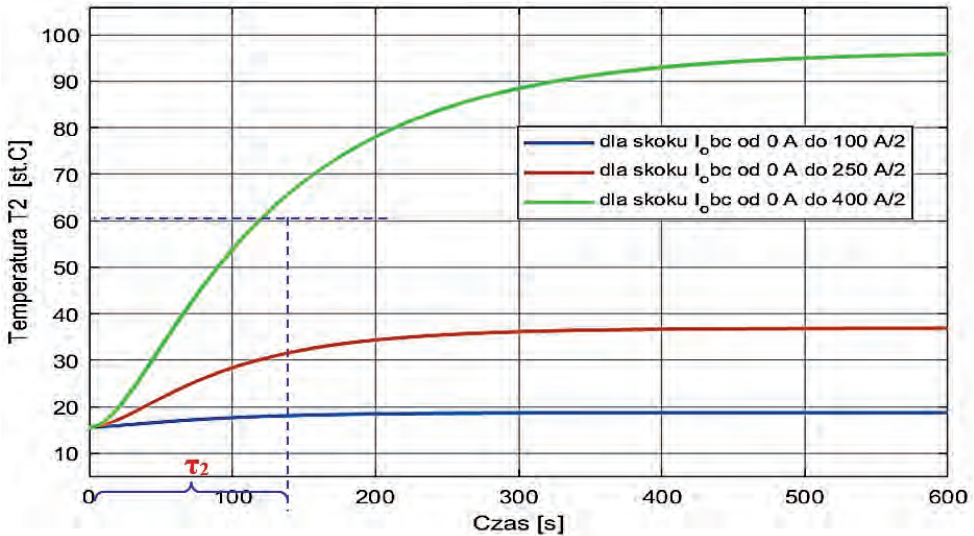
Również symulacje na modelu obwodów elektrycznych prądnicy GS-12T 3s z regulatorem napięcia RN-180M (rys. 4.47) przedstawiające dynamiczne procesy przejściowe zmian temperatury  $T_1$  wirnika (twornika) prądnicy przy skokowej zmianie prądu obciążenia (tu: skokowym obciążeniu prądem znamionowym  $I_z$ ) i zmiennej wartości prędkości obrotowej wirnika wykazały, iż w czasie tych procesów wzrasta temperatura wirnika prądnicy [228]. Z przedstawionych wyników symulacji wynika, że jest ona tym większa, im mniejsza jest prędkość obrotowa badanej prądnicy. Jednocześnie z rys. 4.48 wynika, że uzwojenie stojana prądnicy (uzwojenie wzbudzenia) ma znacznie niższą wartość temperatury ustalenia przy długotrwałym obciążeniu znamionowym (osiąga temperaturę ok. 98°C), podczas gdy uzwojenia wirnika (twornika) ok. 180°C. Jeszcze bardziej istotna jest różnica stałych czasowych [12, 25, 34, 81, 98-100, 162]:

- a) dla uzwojenia twornika wirnika wynosi  $\tau_1 \approx 80$  s,
- b) dla uzwojenia wzbudzenia stojana wynosi  $\tau_2 \approx 120$  s.

W związku z tym przy skokowym zwiększeniu obciążenia, np. do 170%  $I_z$  uzwojenie twornika będzie z większym gradientem zwiększało swoją temperaturę.



**Rys. 4.47.** Dynamiczne procesy przejściowe zmian temperatury  $T_1$  wirnika prądnicy przy skokowej zmianie prądu obciążenia (z poziomu 0 do  $I_z$ ) i zmiennej wartości prędkości obrotowej wirnika, gdzie:  $\tau_1$  – stała czasowa temperaturowa wirnika [228]



**Rys. 4.48.** Dynamiczne procesy przejściowe zmian temperatury  $T_2$  stojana prądnicy przy skokowej zmianie prądu obciążenia i stałej wartości prędkości obrotowej wirnika [228]

Powyższe temperatury to wynik wydzielania się ciepła w poszczególnych uzwojeniach badanej prądnicy zgodnie ze wzorem na ciepło wydzielane [87, 162]:

$$Q_T = 0,24 \cdot R_{to} \cdot I_{obc} \cdot \Delta t \quad (4.37)$$

gdzie:  $R_{to}$  – rezystancja twornika prądnicy (uzwojeń wirnika);  $I_{obc}$  – wartość natężenia prądu obciążenia;  $\Delta t$  – czas trwania (przedział czasu) trwania przeciążenia;

oraz na ciepło pobierane przez masę wirnika prądnicy:

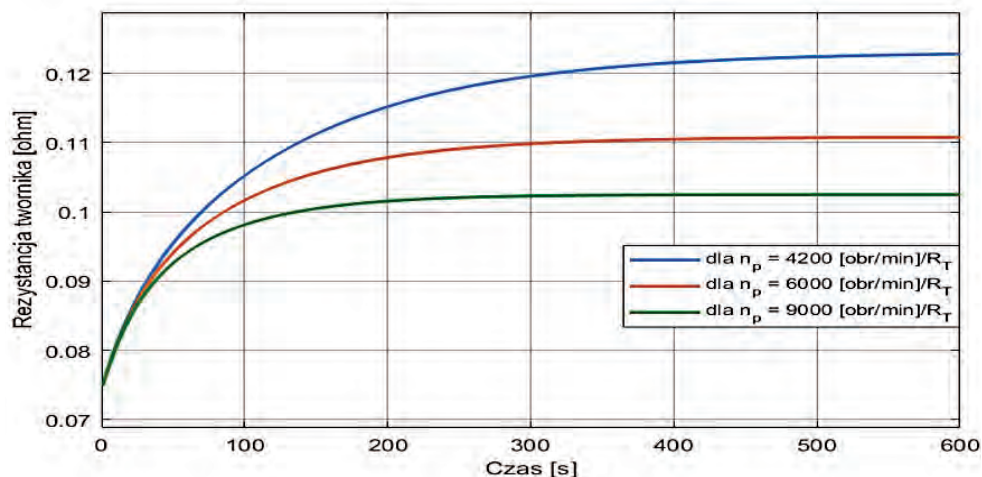
$$Q_T = m_{to} \cdot c \cdot \Delta T_1 \quad (4.38)$$

gdzie:  $m_{to}$  – masa twornika prądnicy;  $c$  – ciepło właściwe wirnika;  $\Delta T_1$  – przyrost temperatury.

Stąd wartość przyrostu temperatury wirnika prądnicy:

$$\Delta T_1 = \frac{0,24 \cdot R_{to} \cdot I_{obc}^2}{m_{to} \cdot c} \quad (4.39)$$

Wzrost temperatury uzwojenia to dla uzwojenia wzrost jej rezystancji. Dynamiczne procesy przejściowe zmian rezystancji uzwojenia twornika przy skokowej zmianie prądu obciążenia (z poziomu 0 do  $I_z$ ) z wykonanych symulacji przedstawiono na rys. 4.49.



**Rys. 4.49.** Dynamiczne procesy przejściowe zmian rezystancji uzwojenia twornika przy skokowej zmianie prądu obciążenia (z poziomu 0 do  $I_z$ ) [228]

Z przedstawionych charakterystyk wyników symulacji dynamicznych procesów przejściowych zmian rezystancji uzwojenia twornika przy skokowej zmianie prądu obciążenia (z poziomu 0 do  $I_z$ ) wynika, że rezystancja twornika jest tym większa, im mniejsza jest prędkość obrotowa badanej prądnicy.

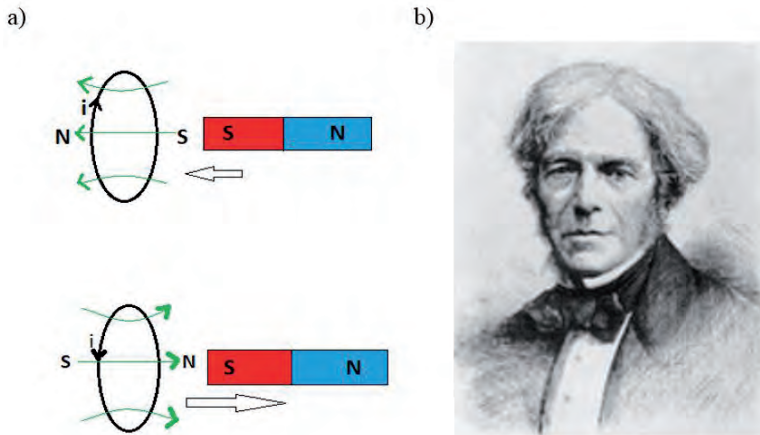
## 4.3. Prądnice prądu przemiennego

### 4.3.1. Wiadomości ogólne dotyczące prądnic prądu przemiennego w lotnictwie – rys historyczny

Niekiedy prądnice prądu stałego utożsamia się z Thomasem Edisonem, zaś przemiennego z Nikołą Teslą. Jednak pierwszych odkryć w dziedzinie możliwości wzbudzenia się siły elektromotorycznej w zamkniętym obwodzie był Michael Faraday, genialny fizyk samouk [129, 243]. On pierwszy stwierdził i udokumentował opisowo, tudzież zademonstrował na posiedzeniu Towarzystwa Królewskiego w Londynie, możliwość wytwarzania prądu elektrycznego w cewce elektrycznej przez ruch magnesu (rys. 4.50). Nie wzbudziło to wówczas entuzjazmu, gdyż śro-



dowiska naukowe oczekiwały prądu stałego (ówczesna elektrotechnika opierała się na energii z baterii akumulatorowych), bo tylko taki prąd uznawano za „użyteczny”, zaś Faraday uzyskiwał prąd przemienny. Ponadto Faraday nie potrafił swego doświadczenia opisać matematycznie.



**Rys. 4.50.** Indukowania się siły elektromotorycznej w elektrycznym obwodzie zamkniętym na skutek przemieszczania magnesu trwałego zademonstrowany przez Michaela Faradaya: a) Zasada indukowania się siły elektromotorycznej w zwartym zwoju pod wpływem przemieszczania magnesu trwałego; b) Michael Faraday (1791–1967), angielski uczonego samouk, odkrywca m.in. prawa indukcji [243]

Pierwszymi prądnicami pracującymi komercyjnie dla społeczeństwa były prądnice prądu stałego o napięciu 400 V zasilane z komutatorowych prądnic prądu stałego – sieć takich elektrowni uruchomił w Stanach Zjednoczonych Thomas Edison. Szybko okazało się, że takie rozwiązanie ma ograniczone zastosowanie – wartość napięcia w odległości powyżej 15 km była już tak niska, że wiele odbiorników przestawało poprawnie działać: żarówki w systemach świetlnych ulic i hal fabrycznych przygasały, silniki elektryczne w maszynach przegrzewały się, a ich prędkość obrotowa i moc użyteczna wyraźnie ulegały zmniejszeniu. Rozwiązaniem mogło być zwiększenie napięcia, ale to przy ówczesnych technologiach (nie było wówczas falowników i półprzewodników) nie było to wykonalne. Tak więc w dużych miastach co 30 km budowano elektrownie zwykle parowe, co zwiększało koszty i powodowało istotne zatrucie środowiska gęsto zaludnionych aglomeracji.

Tymczasem Nikola Tesla, początkowo pracujący w firmie Edisona, uparcie wykazywał wyższość sieci prądu przemiennego nad siecią prądu stałego. Same prądnice prądu przemiennego miały już większą sprawność niż stałego, bo nie miały komutatora, tj. prostownika elektromechanicznego, gdzie znaczny procent energii

był bezpowrotnie tracony na ciepło. Ponadto prąd przemienny dawał się łatwo i tanio transformować – tuż po wygenerowaniu z prądnicy prądu przemiennego napięcie mogło być podnoszone (wówczas zwykle do 15 kV) i doprowadzane na znaczną odległość kilkuset kilometrów do dużych miast, gdzie transformatory obniżały je do poziomu użytecznego dla konsumentów, zwykle 110 V albo 220 V, 60 Hz. Szybko okazało się, że dynamicznie rosnące zapotrzebowanie na tanią energię elektryczną, głównie dynamicznie rozwijającego się przemysłu USA, wymusiło rozpowszechnienie się sieci prądu przemiennego. Niemniej w rejonach „odciętych od świata” lokalne elektrownie oparte na komutatorowych prądnicach prądu stałego utrzymały się jeszcze długo po II wojnie światowej. Co więcej, prąd stały, ale już bardzo wysokich napięć obecnie zdecydowanie wraca do linii przesyłowych na duże odległości (linie napowietrzne o długości powyżej 300 km). Takie linie istnieją pomiędzy Polską a Szwecją (kable podmorskie – polska stacja odbioru w Ustce) oraz pomiędzy Polską a Litwą (w ten sposób zamknięto pierścień energetyczny wokół Bałtyku).

Wytwarzanie prądu przemiennego oparte jest na klasycznych trójfazowych prądnicach prądu przemiennego 50 Hz (przy napięciu na wyjściu prądnicy zwykle do 2 kV). Za pomocą układów półprzewodnikowych są one przekształcane na prąd stały, a na drugim końcu linii z powrotem na prąd przemienny 50 Hz [109, 110]. Skąd ten zwrot ku prądowi stałemu? Zmiana ta wynika z ekonomii – okazało się bowiem, że na wysokonapięciowych liniach przesyłowych prądu przemiennego występuje efekt podbicia napięcia wynikający ze składowej biernej pojemności pomiędzy linią a ziemią. Powoduje to podbicie napięcia na końcu linii [94, 95, 107, 169]. Efekt ten jest jeszcze bardziej wyraźny dla linii kablowych podziemnych lub podwodnych, gdzie pojemność jest większa niż w liniach napowietrznych.

Pokładowe systemy energetyczne statków powietrznych powtórzyły „lekcję” z przemysłowych sieci elektroenergetycznych, jednak z pewnym opóźnieniem: najpierw systemy elektroenergetyczne oparte na komutatorowych prądnicach prądu stałego, następnie prądnice i sieci elektroenergetyczne prądu przemiennego, a obecnie prądnice prądu przemiennego przekształcanego na wysokie napięcie prądu stałego w celach przesyłu do odległych punktów statku powietrznego, gdzie energia ta jest wtórnie przekształcana na niskie napięcia (prądu stałego 28,5 V albo trój – lub jednofazowe napięcia prądu przemiennego) w celu dostosowania do wymagań odbiorników.

Pierwsze samoloty nie miały sieci elektrycznej – ewentualne nieliczne odbiorniki były zasilane z pokładowej baterii akumulatorowej. Historycznie pierwsze węzły elektroenergetyczne w lotnictwie były oparte na źródłach energii elektrycznej prądu stałego [179]. Liderami były wojskowe statki powietrzne w okresie I i II woj-

ny światowej. Z czasem coraz bardziej rozbudowywana sieć oraz zwiększające się długości pokładowych sieci przesyłowych wymusiły zwiększanie napięcia źródeł pokładowych: zgodnie z [91, 117, 179, 207] w 1919 r. 28 V, 1923 r. 12 V, 1932 r. 24 V, 1937 r. 27 V. Dzięki temu wzrost nominalnej mocy odbiorników nie pociągał za sobą konieczności zwiększania średnicy przewodów elektrycznych. Tak więc przez zwiększanie napięcia źródeł zmniejszano masę sieci przesyłowej. Jednakże pojawiło się ryzyko zwiększenia zagrożenia porażeniem prądem elektrycznym. Jak wiadomo, prąd stały jest bardziej niebezpieczny od przemiennego z uwagi na wywoływanie elektrolizy krwi [204]. Szkodliwe substraty tej elektrolizy mogą doprowadzić do powolnego zatrucia organizmu.

W związku z tym cała inicjatywa konstruktorów systemów elektroenergetycznych już w latach 50 XX wieku skupiła się na wprowadzeniu na pokłady statków powietrznych źródeł prądu przemiennego. W 1956 wg [179] na Tu-104 zastosowano trójfazową sieć elektroenergetyczną, zaś w końcu lat 50. upowszechniło się w lotnictwie zasilanie trójfazowe 208/120 V o zmiennej częstotliwości. Wzrost ruchu lotniczego oraz zadań lotnictwa wojskowego, zapotrzebowanie na optymalizację wydajności i potrzeba obniżenia kosztów eksploatacyjnych skłoniły przemysł lotniczy do rozwiązań, które w znacznie większym zakresie będą wykorzystywać energię elektryczną na pokładach statków powietrznych. Powstała koncepcja samolotu częściowo/w pełni elektrycznego (MEA/AEA) [29, 88, 118, 125, 180, 181, 183, 184]. W wyniku tego trendu moc elektryczna wymagana na pokładzie statku powietrznego znacznie wzrosła, powodując poważne zmiany w architekturze systemów elektroenergetycznych. Nastąpił rozwój pokładowych autonomicznych systemów zasilania ASE, które charakteryzują się innowacyjnymi rozwiązaniami technologicznymi architektury energoelektronicznego systemu zasilania (PES) oraz elektroenergetycznego systemu zasilania (EPS) i zasilania wysokiego napięcia prądu stałego (HVDC) [29, 180, 181, 183, 184].

Aktualna analiza wymagań dotyczących zasilania pokładowych urządzeń wyposażenia elektrycznego i elektronicznego wskazuje, że na współczesnych statkach powietrznych ok. 85% zużywanej energii elektrycznej to energia prądu przemiennego. Moc przetwarzanej energii prądu stałego na prąd przemienny sięga do 50% mocy pierwotnego układu zasilania.

Obcowzbudne prądnice synchroniczne jedno – i trójfazowe 115/200V [AC] zmiennej częstotliwości generowały energię, którą można było zasilac ograniczoną liczbę odbiorników (głównie o charakterze rezystancyjnym, np. elementy grzewcze). Wymagały jednak wzbudzenia prądem stałym – prąd ten był pobierany zwykle z prądnicy pądu stałego lub z osobnej wzbudnicy, tu: dodatkowej prądnicy prądu stałego, której wirnik był na tym samym wale, co wirnik prądnicy

prądu przemiennego. Takie rozwiązanie komplikowało konstrukcję i powodowało zwiększone straty mocy. Rozwiązaniem problemów technicznych napędów stałej prędkości było skonstruowanie zespolonych prądnic synchronicznych dużej mocy  $S = 16 \div 120$  kVA.

Na współczesnych statkach powietrznych moc 120 kVA uzyskuje się z dwóch prądnic synchronicznych (samolotów dwusilnikowych), podczas gdy w niedalekiej przeszłości (lata 70.) moc taką uzyskiwano aż z 12 prądnic (samolotów czterosiłnikowych). Obecnie zespolone prądnice synchroniczne 120/208V [AC] 400 Hz o mocy 120 kVA posiadają jednostkową moc chłodzącą: ok. 1 kg/kVA przy chłodzeniu powietrzem i ok. 0,4 kg/kVA przy chłodzeniu cieczą.

#### 4.3.2. Fizykalne podstawy działania prądnic prądu przemiennego

Do wytworzenia prądu przemiennego w prądnicach synchronicznych konieczne jest stałe pole magnetyczne wytwarzane przez bieguny wzbudzenia umieszczone na stojanie lub wirniku. Stosowane są dwa rodzaje wzbudzenia prądnic synchronicznych:

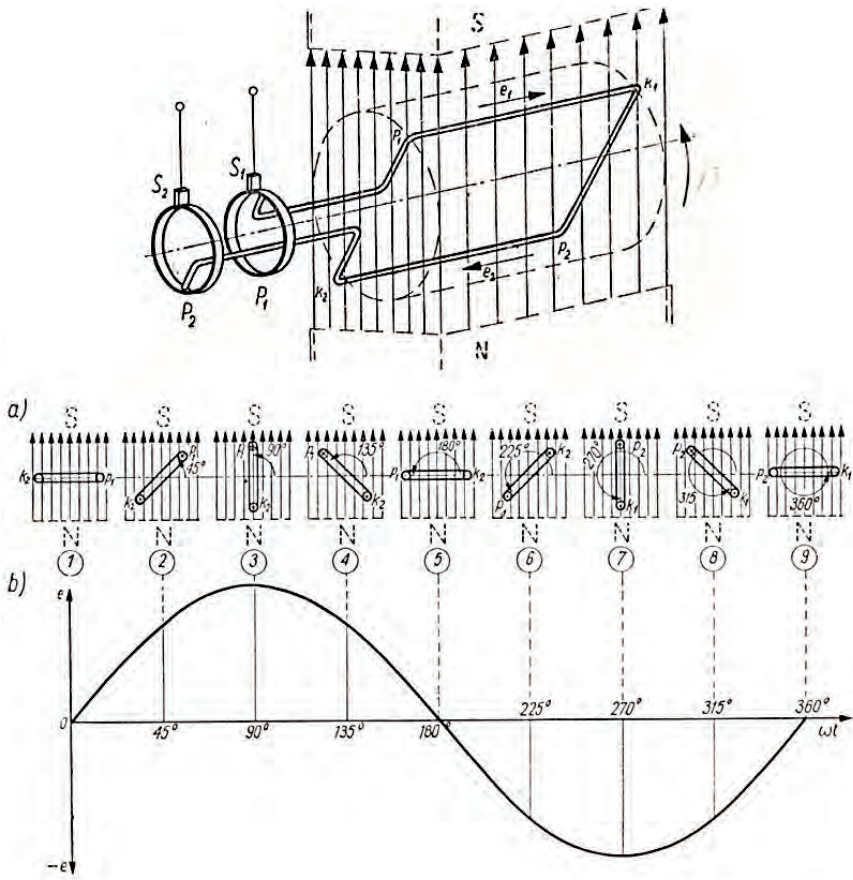
- elektromagnetyczne przez uzwojenie wzbudzenia zasilane z sieci prądu stałego,
- magnetoelektryczne przy pomocy magnesów trwałych.

Strumień magnetyczny w obwodzie magnetycznym prądnicy przy wzbudzeniu elektromagnetycznym powstaje zgodnie ze wzorem:

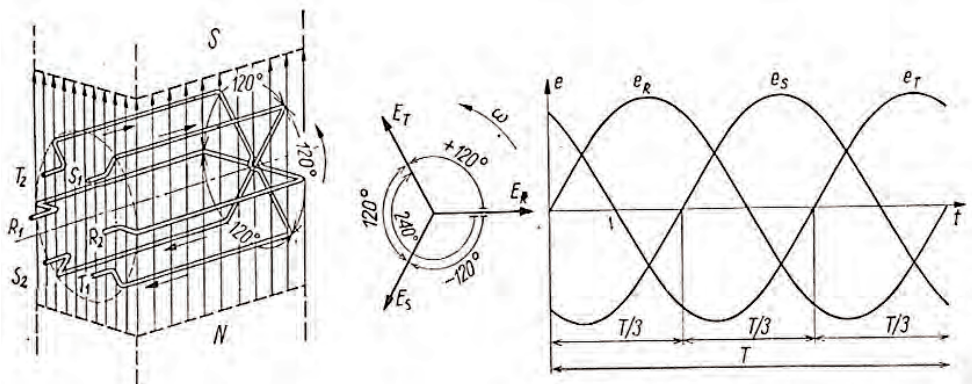
$$\Phi = \frac{\Theta}{R_{\mu}} = \frac{I_F N_F S \mu}{l} [\text{Wb}] \quad (4.40)$$

gdzie:  $\Phi$  – strumień magnetyczny;  $\Theta$  – przepływ uzwojenia wzbudzenia;  $R_{\mu}$  – reluktancja obwodu magnetycznego;  $I_F$  – prąd uzwojenia wzbudzenia;  $N_F$  – liczba zwojów uzwojenia wzbudzenia;  $\mu$  – przenikalność magnetyczna w obwodzie magnetycznym;  $S$  – przekrój poprzeczny w obwodzie magnetycznym;  $l$  – długość obwodu magnetycznego.

Schemat jednofazowej prądnicy prądu przemiennego z przebiegiem napięcia przedstawiono na rys. 4.51, a trójfazowej na rys. 4.52.



Rys. 4.51. Jednofazowa prądnica prądu przemiennego – rysunek poglądowy [108]



Rys. 4.52. Trójfazowa prądnica prądu przemiennego – rysunek poglądowy [108]

Wzbudzenie magnetoelektryczne polega na zastosowaniu magnesów trwałych (o bardzo dużej sile koercji, wykonanych na bazie spiekania różnych metali ferromagnetycznych) jako źródeł energii magnetycznej.

Strumień wzbudzenia powstaje zgodnie z zależnością:

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_{\mu}} = \frac{Hl}{R_{\mu}} [\text{Wb}] \quad (4.41)$$

gdzie:  $H$  – natężenie pola magnetycznego;  $l$  – długość obwodu magnetycznego;  $R_{\mu}$  – reluktancja obwodu magnetycznego.

Do wytworzenia prądu przemiennego o stałej częstotliwości prądnica wymaga napędu o stałej prędkości obrotowej zgodnie ze wzorem:

$$f = \frac{p^* n}{60} \quad (4.42)$$

gdzie:  $p$  – liczba par biegunów;  $n$  – prędkość obrotowa [obr/min].

Do uzyskania częstotliwości 400 Hz prędkość obrotowa wirnika ma wartość:

- dla konstrukcji ośmiobiegunowej 6000 obr/min;
- dla konstrukcji sześciobiegunowej 8000 obr/min;
- dla konstrukcji czterobiegunowej 12000 obr/min.

Warunki samowzbudzenia prądnic synchronicznych są następujące:

- a) istnienie magnetyzmu szczątkowego w obwodzie magnetycznym prądnicy,
- b) rezystancja obwodu wzbudzenia powinna być mniejsza od krytycznej,
- c) prędkość obrotowa wirnika powinna być mniejsza od krytycznej,
- d) strumień magnetyczny  $\Phi$  wywoływany przez siłę magnetomotoryczną  $\Theta = I_w \cdot z_w$  powinien wzmacniać strumień szczątkowy. Jeżeli będzie przeciwny (np. na skutek wyłączenia prądnicy pod dużym obciążeniem), to należy przemagnesować obwód magnetyczny uzwojenia wzbudzenia – podobnie jak w prądnicie komutatorowej prądu stałego. W tym celu należy podłączyć do uzwojenia wzbudzenia baterie akumulatorową 24 V impulsowo (uzwojenia wzbudzenia są liczone na ok. 14 V średniego napięcia – długotrwałe utrzymywanie napięcia 24 V mogłoby przegrzać uzwojenie). Ta czynność powinna spowodować obrócenie się dipoli magnetycznych w obwodzie wzbudzenia w poprawnym kierunku.

Poprzez odpowiednie ukształtowanie biegunów wzbudzenia (szczelina powietrzna na obrzeżu nabiegunnika duża, w środkowej części nabiegunnika mała)

oraz odpowiednie ułożenie uzwojeń wirnika w skośnych (w stosunku do podłużnej osi symetrii) żłobkach, indukowane napięcie ma kształt prawie sinusoidalny – bez powyższych dwóch cech konstrukcyjnych miałyby ono kształt schodkowy.

Działanie prądnic synchronicznych opiera się na tych samych zjawiskach fizycznych, co komutatorowych prądnic prądu stałego. Różnice polegają na wykonaniu i połączeniu uzwojeń twornika – uzwojenia te (tu: trójfazowe) są łączone w gwiazdę lub w trójkąt. Z uzwojeń tych można uzyskać znacznie większe ilości energii elektrycznej niż z prądnicy prądu stałego o tej samej masie.

### 4.3.3. Konstrukcja prądnic prądu przemiennego – wiadomości ogólne

Konstrukcja prądnic prądu przemiennego – cechy podstawowe

Obecnie najczęściej na pokładach współcześnie konstruowanych statków powietrznych montuje się zespolone trójfazowe prądnice prądu przemiennego (rys. 4.53–4.55). Składają się one z trzech maszyn elektrycznych (modułów) ze wspólnym wałem i wirnikiem [45, 58]:

1. podzbudnicy.
2. wzbudnicy.
3. prądnicy.

Nie ma tu żadnych styków elektrycznych – wymiana energii pomiędzy modułami odbywa się poprzez sprzężenie elektromagnetyczne wirnik–stojan. Uzwojenie wzbudzenia prądnicy (modułu nr 3) jest zasilane poprzez trójfazowy 6-pulsowy prostownik diodowy. Prostownik ten pobiera napięcie prądu przemiennego z podwzbudnicy.

#### Zalety prądnic prądu przemiennego

Jedną z najbardziej istotnych zalet synchronicznych prądnic prądu przemiennego jest to, że nie zawierają one komutatora. Dzięki temu znacznie lepiej znoszą obniżone ciśnienie i wilgotność w czasie lotów na dużej wysokości oraz podwyższoną temperaturę. Brak komutatora i ujemnych zjawisk związanych z jego pracą pozwala budować prądnice synchroniczne o znacznie większych mocach znamionowych (60 kVA, a niekiedy nawet do 200 kVA) – nie jest to możliwe w przypadku prądnic prądu stałego. Sprawność lotniczych prądnic prądu przemiennego dochodzi do 88%, podczas gdy komutatorowe osiągają 76%. Ponadto prąd przemienny można łatwo i tanio transformować na dowolną wartość napięcia.

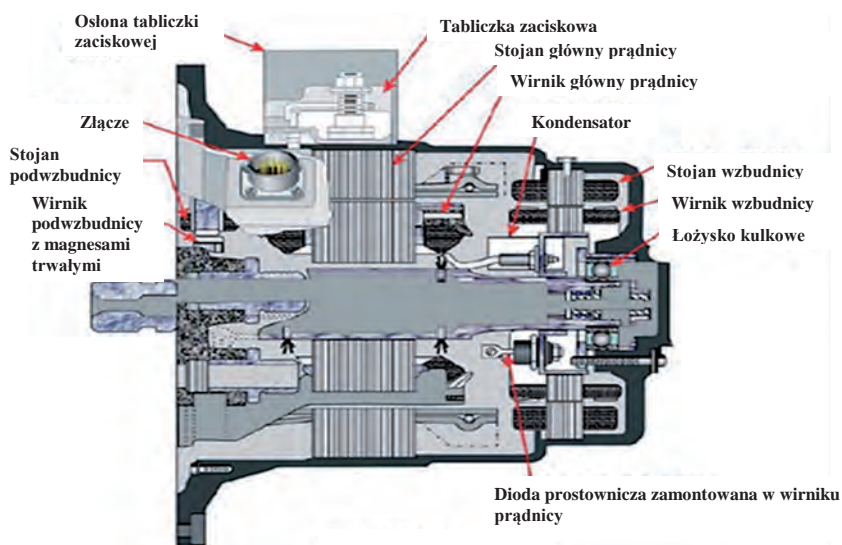
#### Wady prądnic prądu przemiennego

1. Utrudniona praca równoległa.
2. Istnienie mocy biernej.
3. Brak możliwości wykorzystania prądnicy synchronicznej w charakterze rozrusznika.

4. Warto przy tym zauważyć, że silniki elektryczne prądu przemiennego są trudniejsze w regulacji ich prędkości obrotowej niż odpowiadające im silniki prądu stałego.
5. Silniki prądu przemiennego posiadają też mniejszy moment rozruchowy i charakteryzują się mniejszą przeciążalnością.

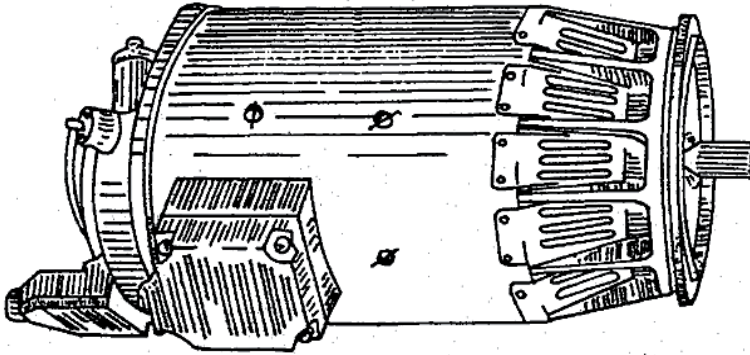


Rys. 4.53. Prądnica trójfazowa bezstykowa prądu przemiennego GT-40PCz8 na śmigłowcu W-3WA Sokół



Rys. 4.54. Przekrój prądnicy prądu przemiennego F-16, opracowano na podstawie [244]



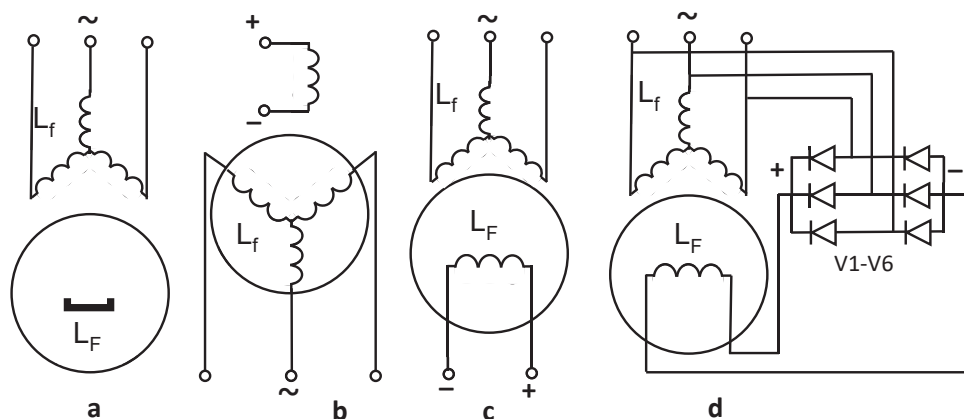


Rys. 4.55. Widok ogólny prądnicy prądu przemiennego GT-40PCz6 [45]

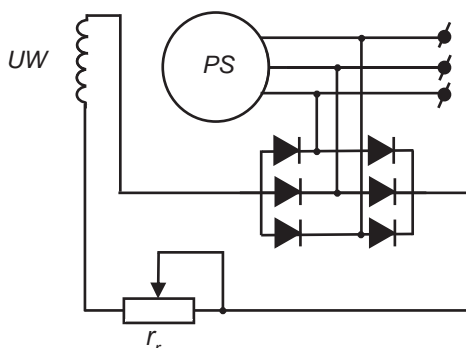
#### 4.3.4. Schematy prądnic prądu przemiennego

Samowzbudne prądnice prądu przemiennego w latach 70. były zasilane z sieci prądu stałego (rys. 4.56b i 4.56c). Stosowano także prądnice z ruchomym magnesem, ale tylko dla niewielkich mocy, z uwagi na ich wówczas niedoskonałość – łatwość rozmagnesowywania pod wpływem wibracji, temperatur i wtórnego oddziaływania twornika. Uzależniało to działanie instalacji prądu przemiennego od sprawności sieci prądu stałego. W stanie przejściowym przy wysokich poziomach skokowych zmian obciążenia w obwodzie  $28,5 \text{ V}_{\text{DC}}$  następowało zwiększanie składowej pulsacji – aby zmniejszyć ten wpływ stosowano dodatkowe filtry. Rozwijająca się technika ciał magnetycznych (stabilne magnesy w podwzbudnicy) oraz coraz większe możliwości wykonawcze diod prostowniczych spowodowały, że zaczęto stosować zespolone trójfazowe prądnice prądu przemiennego, które wytwarzały prąd wzbudzenia w wewnętrznym obwodzie prądnicy.

Konstrukcja prądnicy prądu przemiennego, przynajmniej prądnic o mocy mniejszej niż 10 kVA, jest zbliżona do konstrukcji prądnicy prądu stałego. W zasadzie prądnica prądu stałego jest prądnicą prądu przemiennego z wmontowanym prostownikiem elektromaszynowym zwanym komutatorem rys. 4.57. Na prostowanie to zużywa się znaczną ilość energii, na co zwracał uwagę już Nicola Tesla swojemu chlebodawcy Thomasowi Edisonowi (przez co doszło do skłócenia się tych dwóch wynalazców). Tak samo uznają się wirnik, lecz nie przyłącza się do wielu klepek, lecz do dwóch (dla prądnicy jednofazowej) lub trzech (dla prądnicy trójfazowej) litych (bez przecięć) pierścieni ślizgowych.



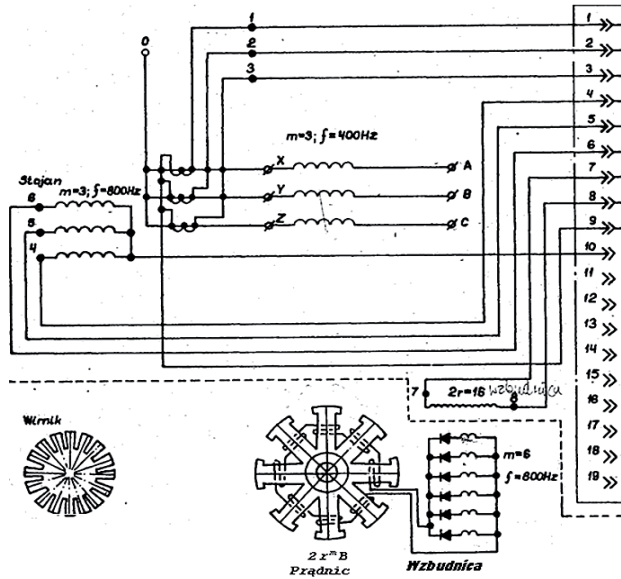
**Rys. 4.56.** Prądnicie prądu przemiennego stosowane w lotnictwie – rysunek poglądowy [108]: a) prądnicę trójfazową z twornikiem trójfazowym (połączonym w gwiazdę) i wirnikiem w postaci magnesu trwałego; b) prądnicę trójfazową z wzbudzeniem (tu: zamontowanym na stojanie) zasilanym z sieci prądu stałego 28,5 V<sub>DC</sub>; c) prądnicę trójfazową z wzbudzeniem (tu: zamontowanym na wirniku) zasilanym z sieci prądu stałego 28,5 V<sub>DC</sub>; d) prądnicę trójfazową z własnym (tu: 6-pulsowym) prostownikiem zasilającym uzwojenia wzbudzenia (tu: zamontowane na wirniku)



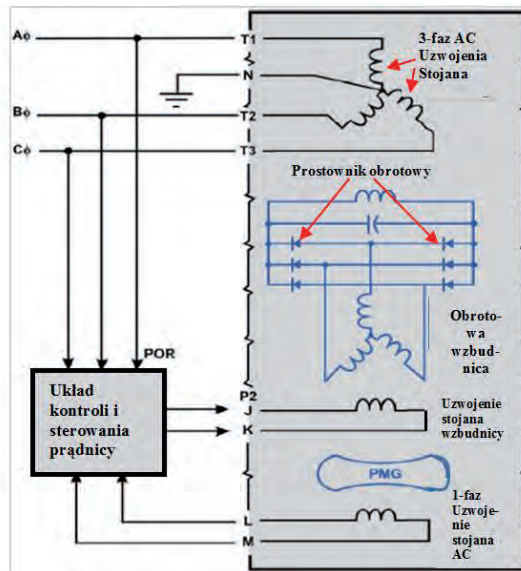
**Rys. 4.57.** Ideowy schemat prądnicy trójfazowej synchronicznej samowzbudnej (wzbudzenie realizowane własnym prostownikiem) [108]

Prądnicie synchroniczne stosowane w lotnictwie (rys. 4.58 i 4.59) mają:

- a) uzwojenie wzbudzenia umieszczone na biegunach wydalnych (jawnych) bądź biegunach rozłożonych (utajonych),
- b) uzwojenie twornika umieszczone na stojanie lub wirniku.



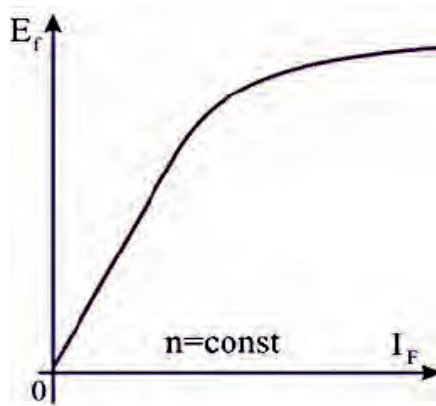
Rys. 4.58. Schemat ideowy prądnicę prądu przemiennego GT-40PCz6 [45], gdzie: „wzбудnik” – wzбудnik podwzбудnicy (3x47 V; 400 Hz) złożony z magnesów stałych; „wzбудnica” – wzбудnica z wprasowanym blokiem prostowniczym 6-pulsowym



Rys. 4.59. Prądnicę trójfazowa bezstykowa prądu przemiennego w systemie elektroenergetycznym samolotu F-16: PMG – magnes trwały (wzбудnik podwzбудnicy) [244]

### 4.3.5. Charakterystyki prądnicy prądu przemiennego

**Charakterystyka biegu jałowego** przedstawia zależność indukowanej siły elektromotorycznej w danej fazie nieobciążonej prądnicy, przy stałej predkości obrotowej, od natężenia prądu wzbudzenia. Można zauważyć, że charakterystyka ta przypomina krzywą magnesowania obwodu magnetycznego wzbudzenia (rys. 4.60). W przypadku zwarcia w uzwojeniu wzbudzenia lub zwiększenia oporności magnetycznej charakterystyka ta zmniejszy swoje nachylenie.



**Rys. 4.60.** Charakterystyka biegu jałowego prądnicy synchronicznej prądu przemiennego [37]

Charakterystyka zewnętrzna prądnicy synchronicznej (rys. 4.61) jest to zależność napięcia fazowego  $U_f$  od prądu obciążenia  $I_f$  przy stałych: prędkości obrotowej, prądzie wzbudzenia i współczynniku mocy.

Wyraża ją równanie napięcia na zaciskach prądnicy:

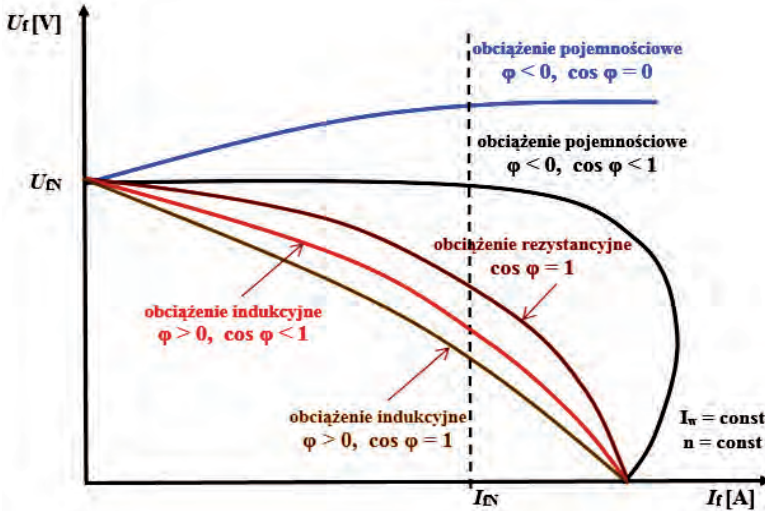
$$U_f = E_f - Z_f * I_f \quad (4.43)$$

dla:  $n = \text{const}$ ,  $I_f = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \text{const}$ ;

gdzie:  $U_f$  – napięcie fazowe na zaciskach prądnicy,  $Z_f$  – impedancja jednej fazy uzwojenia twornika,  $I_f$  – prąd obciążenia fazy.

Zmiany napięcia na zaciskach prądnicy przy wzroście prądu obciążenia powodowane są spadkiem napięcia na impedancji uzwojenia twornika oraz wpływem strumienia reakcji twornika na główny strumień wzbudzenia. Przy obciążeniu o charakterze indukcyjnym następuje zmniejszenie napięcia na zaciskach prądni-

cy, co wynika z rozmagnesowującego oddziaływania twornika. Przy obciążeniu o charakterze pojemnościowym następuje wzrost napięcia na zaciskach prądnicy, co wynika z domagnesowującego oddziaływania twornika.



Rys. 4.61. Charakterystyki zewnętrzne prądnicy synchronicznej [37]

Prądnica prądu stałego to prądnica prądu przemiennego z elektromechanicznym prostownikiem, tj. komutatorem. Większość zjawisk zachodzących w prądnicę prądu stałego powinno zachodzić także w prądnicę prądu przemiennego, w szczególności tych związanych z oddziaływaniem pola poprzecznego twornika prądnicy. Zgodnie z literaturą [37, 87, 101, 141, 153, 192, 205] oddziaływanie to (reakcja twornika na prąd obciążenia) występuje również w prądnicach prądu przemiennego. Liczne zalety prądnic prądu przemiennego spowodowały ich dominację w nowych konstrukcjach lotniczych, zwłaszcza dużych pasażerskich statkach powietrznych. Niewielka liczba opracowań naukowo-badawczych dotyczących reakcji twornika w tych prądnicach wynika prawdopodobnie z przesłanek praktycznych – w komutatorowych prądnicach prądu stałego reakcja twornika była bardzo istotna, lecz obecnie są one już rzadko wykorzystywane, natomiast prądnice prądu przemiennego, praktycznie biorąc, nie odczuwają reakcji twornika w bieżącej eksploatacyjnej, gdyż na pokładach statków powietrznych jest jeszcze stosunkowo niewielki procent odbiorników energii elektrycznej o charakterze pojemnościowym. Oddziaływanie twornika w prądnicę synchronicznej różni się tym od oddziaływania twornika w maszynę prądu stałego, że strumień reakcji twornika w maszynie synchronicznej zależy nie tylko od wartości prądu, lecz również od rodzaju obciążenia, tzn. od

kąta przesunięcia fazowego między wektorami prądu i napięcia [37] (indukcyjny albo pojemnościowy charakter obciążenia). Narastanie wartości strumienia pola poprzecznego twornika przy wzroście obciążenia w maszynie prądu przemiennego wywołuje zewnętrznie jedynie przesunięcie fazowe nieodczuwalne dla pojedynczego zasilanego węzła. Problem pojawiłby się dopiero przy próbie synchronizacji dwóch takich prądnic, co jednak jest rzadko stosowane na pokładach statków powietrznych. Zamiast tego obowiązuje aktualnie trend montowania przy prądnicach prądu przemiennego 12pulsowych bloków transformatorowo-prostowniczych o wysokim napięciu wyjściowym (270 VDC albo 540 VDC). Przy obciążeniach prądnicy prądu przemiennego, a zwłaszcza przy przeciążeniach, występują już nie tylko przesunięcia fazowe, ale również, podobnie jak w komutatorowych prądnicach prądu stałego, obniżenia napięcia wyjściowego. Tu jednak wkraczają nowoczesne regulatory napięcia o wysokiej skuteczności i użytkownik nadal „nie widzi” w dziedzinie amplitudy oddziaływania pola poprzecznego w prądnicę prądu przemiennego. W rzeczywistości są to pozory energetyczne – pole poprzeczne obniża wydajność energetyczną prądnicy prądu przemiennego i z tego względu należy w przyszłości dokładniej poznać te zależności na drodze eksperymentów naukowych. Z punktu widzenia teoretycznego zmiany napięcia na zaciskach wyjściowych prądnicy prądu przemiennego przy wzroście prądu obciążenia spowodowane są spadkiem napięcia na impedancji uzwojenia twornika oraz wpływem strumienia reakcji twornika na główny strumień wzbudzenia prądnicy. Przy obciążeniu o charakterze indukcyjnym wraz ze wzrostem natężenia prądu obciążenia fazowego ( $I_f$ ) następuje zmniejszenie napięcia na zaciskach prądnicy, co wynika z rozmagnesowującego oddziaływania twornika (rys. 3.16, wykresy dla  $\varphi > 90^\circ$ ). Przy obciążeniu pojemnościowym (rys. 3.17, wykresy dla  $\varphi < 90^\circ$ ) wraz ze wzrostem natężenia prądu obciążenia fazowego ( $I_f$ ) następuje wzrost napięcia na zaciskach prądnicy, co wynika z domagnesowującego oddziaływania twornika.

Oddziaływanie twornika w prądnicę synchronicznej różni się od reakcji twornika w prądnicę prądu stałego tym, że strumień reakcji twornika w prądnicę synchronicznej zależy nie tylko od wartości prądu obciążenia, ale również od rodzaju obciążenia, tzn. współczynnika mocy:

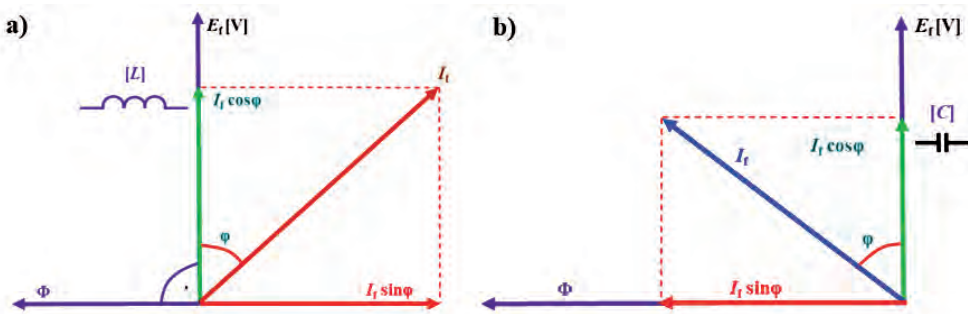
1. **Dla obciążenia rezystancyjnego**  $\cos(\varphi) = 1$  ( $\varphi = 0^\circ$ ), strumień wzbudzenia i reakcji twornika mają zgodny kierunek, ale przeciwne zwroty – podobnie jak w prądnicę prądu stałego.
2. **Przy obciążeniu indukcyjnym** (rys. 4.62a)  $\varphi = (0 \div +90^\circ)$ , prąd jest opóźniony w stosunku do napięcia i w związku z tym zwroty strumieni wzbudzenia i reakcji są przeciwne. Obciążenie prądowe prądnicy można rozłożyć na dwie składowe:
  - a) czynną  $I_{fq} = I_f \cdot \cos\varphi$  – wymuszającą strumień poprzeczny twornika  $\Phi_q$ ,

b) bierną  $I_{fd} = I_f \cdot \sin\varphi$  – wymuszającą strumień podłużny twornika  $\Phi_p$  – osłabiającą lub wzmacniającą strumień wzbudzenia prądnicy.

Składowa czynna strumienia reakcji jest skierowana prostopadle do osi strumienia wzbudzenia, powodując zniekształcenie strumienia wypadkowego, podobnie jak w prądniccy prądu stałego w stanie ustalonym.

Składowa bierna strumienia reakcji jest skierowana przeciwnie do strumienia wzbudzenia i powoduje (bezpośrednie) zmniejszenie lub zwiększenie strumienia wzbudzenia prądnicy. Przy zmniejszeniu wzbudzenia (odbiornik o charakterze indukcyjnym) napięcie na wyjściu prądnicy maleje z powodu zmniejszania się strumienia magnetycznego stojana (rys. 4.62a, szczegóły: wektor  $\Phi$ , wektor  $I_f \sin\varphi$ ).

3. **Przy obciążeniu pojemnościowym** (rys. 4.62b)  $\varphi = (0 \div -90^\circ)$ . Przy zwiększeniu wzbudzenia (odbiornik o charakterze pojemnościowym) napięcie na wyjściu wzrasta (rys. 4.62b, szczegóły: wektor  $\Phi$ , wektor  $I_f \sin\varphi$ ).



**Rys. 4.62.** Wykres wskazowy obrazujący oddziaływania twornika w prądniccy synchronicznej dla różnego rodzaju obciążenia: obciążenie o charakterze: a) indukcyjnym – osłabienie strumienia wzbudzenia prądnicy; b) pojemnościowym – wzmocnienie strumienia wzbudzenia prądnicy [37]

Z powyższych rozważań wypływa jeden główny wniosek, iż rozważania ujęte w niniejszej pracy dotyczące kształtowania charakterystyk prądu stałego można będzie z powodzeniem przenieść jako podstawę dla podobnych, a nawet bardziej rozbudowanych problemów dotyczących prądnic prądu przemiennego. Silna zależność charakterystyk prądu przemiennego od charakteru obciążeń (pojemnościowy, indukcyjny) doda niewątpliwie wielu wątków do rozważań w stosunku do problematyki związanej z prądnicami prądu stałego. Możliwość zwiększenia napięcia przemiennego na końcu linii obciążenia o charakterze pojemnościowym jest jedną z przyczyn, dla których w nowoczesnych dużych samolotach przechodzi się na prąd stały o wysokim napięciu ( $270 \text{ V}_{DC}$ ,  $540 \text{ V}_{DC}$ ) [182–184]. Co ciekawsze, źródłem

pierwotnym jest prądnica trójfazowa prądu przemiennego. Wzrost liczby i mocy odbiorników o charakterze pojemnościowym (m.in. oświetlenie typu LED, zwiększanie liczby i mocy półprzewodników, zwiększone zapotrzebowanie na różnego rodzaju filtry elektryczne) powoduje powolne, ale nieustanne przechodzenie w kierunku obciążenia o charakterze pojemnościowym. W związku z tym nakreślone w niniejszym rozdziale problemy dotyczące prądnicy prądu przemiennego zarówno w stanie ustalonym, jak i przejściowym będą się pogłębiać.

Reasumując, w celu podniesienia poziomu bezpieczeństwa lotów samolotu Su-22 zabudowana na jego pokładzie komutatorowa prądnica prądu stałego GS-12T 3s wymaga dodatkowych obsług regulacyjnych. Ich wykonanie umożliwia zasilanie sieci elektroenergetycznej samolotu o wymaganej jakości energii elektrycznej oraz prawidłowe działanie w kolejnych latach eksploatacji. Zależne od nalotu procesy starzeniowe zachodzące w prądnicach prądu stałego GS-12T 3s w czasie eksploatacji wpływają na zmiany ich poszczególnych właściwości, co przekłada się na nieprawidłowe parametry stanów przejściowych (stanów nieustalonych [150]) węzła elektroenergetycznego statku powietrznego. W czasie długotrwałej eksploatacji prądnicy GT-12T 3s na pokładzie Su-22 stwierdzono, że kąt  $\alpha$  pomiędzy położeniem szczotek a strefą magnetycznie obojętną ulega samorzutnemu zwiększaniu w kierunku wirowania twornika prądnicy. Powoduje to: wzrost temperatury korpusu prądnicy, przegrzewanie się przewodów zewnętrznego obwodu wzbudzenia, późniejsze (przy większej prędkości obrotowej twornika) samowzbudzenie, dłuższe czasy przejściowe przy skokowym włączeniu odbiorników dużej mocy.

Z badań właściwości węzła prądu stałego Su-22 oraz z badań laboratoryjnych prądnic GT-12T 3s wynika konkluzja, że istnieją związki pomiędzy kątem położenia szczotek względem strefy magnetycznie obojętnej komutatorowej prądnicy prądu stałego GS-12T 3s a badanymi parametrami procesów przejściowych (impulsów zanikowych) węzła prądu stałego samolotu Su-22. Dlatego w czasie procesu eksploatacji samolotu Su-22 niezbędne są dodatkowe (w stosunku do aktualnie obowiązującej technologii eksploatacji i remontu) czynności w postaci pomiaru i regulacji kąta  $\alpha$  położenia szczotek względem strefy magnetycznie obojętnej w komutatorowych prądnicach prądu stałego GS-12T 3s. Okazuje się bowiem, że od poprawnego ustawienia położenia kąta  $\alpha$  w prądnicach zależy prawidłowa samoregulacja systemu elektroenergetycznego samolotu Su-22, w czasie jego stanów nieustalonych.

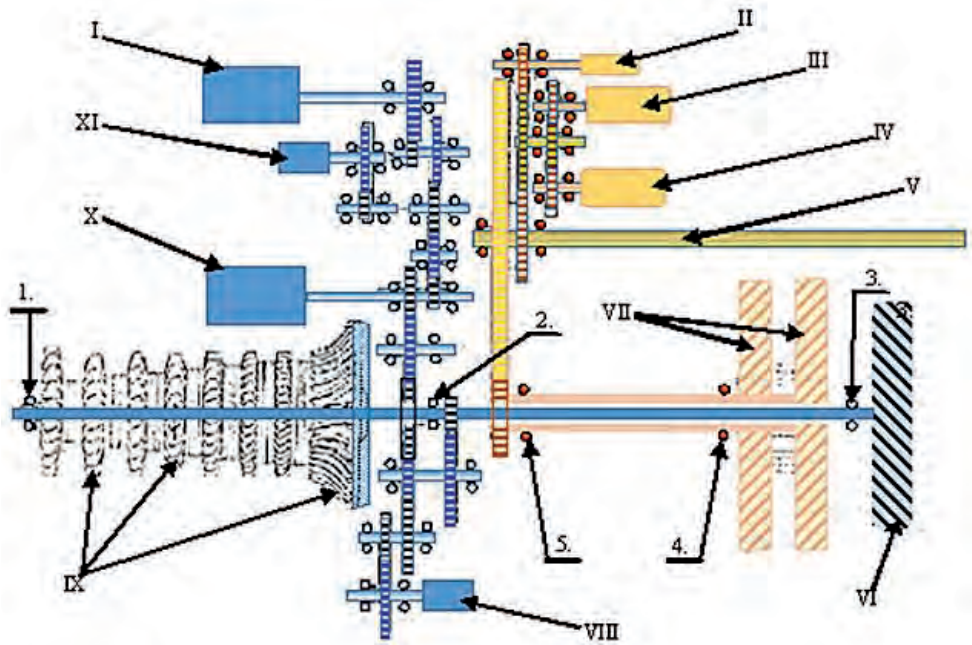


## 4.4. Napędy prądnic lotniczych

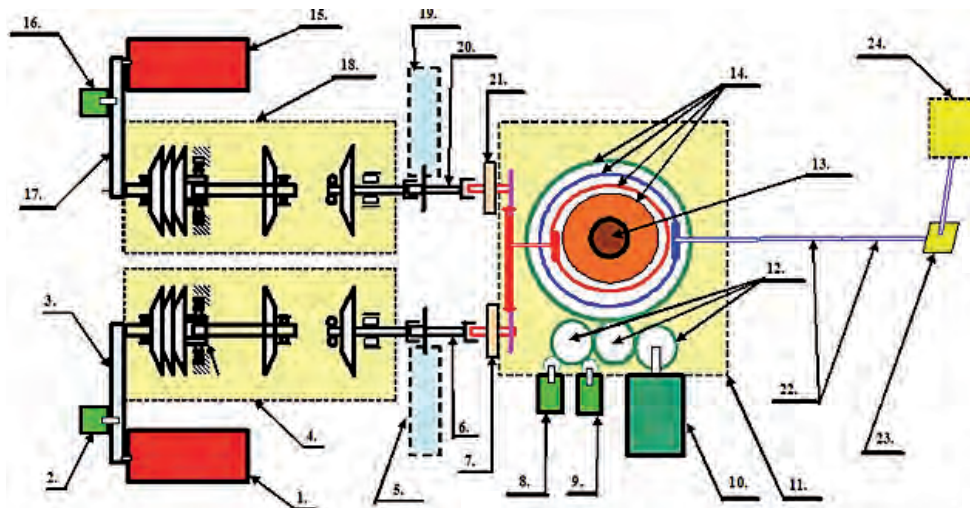
### 4.4.1 Napęd prądnicy prądu stałego

Prądnica prądu stałego ma tylko stabilizowane napięcie wyjściowe i w przeciwieństwie do prądnicy prądu przemiennego nie wymaga stabilizacji prędkości obrotowej. W starszych konstrukcjach lotniczych „dużych” i „małych” łączono funkcję prądnicy z funkcją rozrusznika. Przykładem może być:

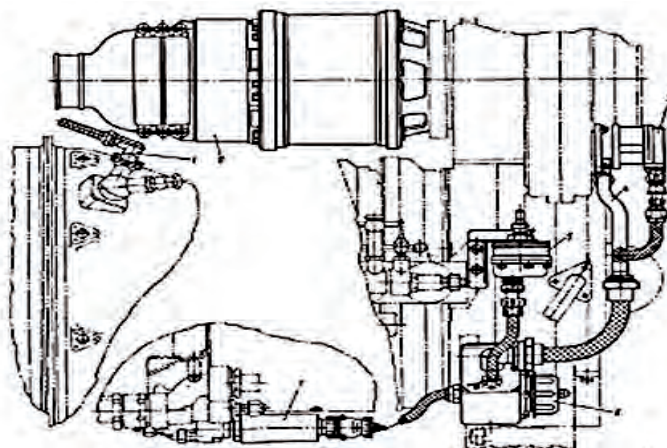
- a) prądnica-rozrusznik STG-3 [214] zamontowany na reduktorze silnika turbowałowego GTD-350 (rys. 4.63) oraz na skrzynce napędów turbostartera AI-9W [45, 58],
- b) prądnica-rozrusznik GS-ST-18MO [58, 209, 215] zamontowany na reduktorze silnika turbowałowego TW-2 (rys. 4.64–4.66).



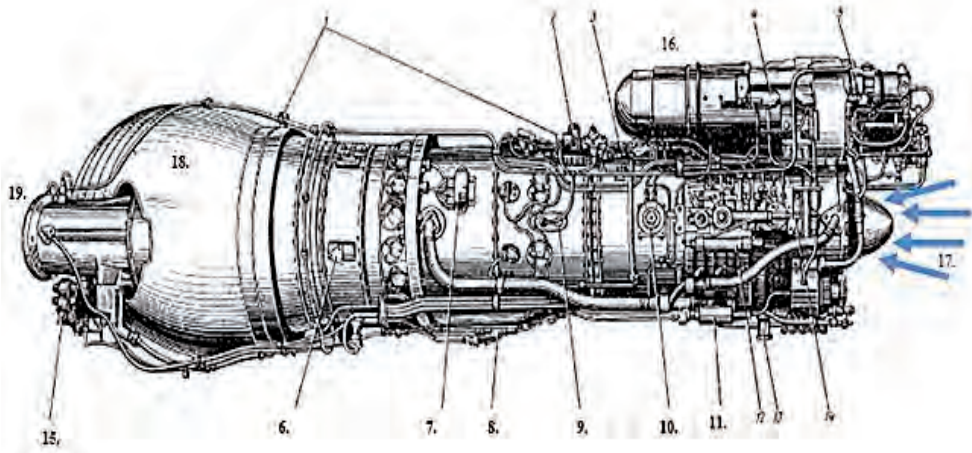
**Rys. 4.63.** Schemat kinematyczny silnika turbowałowego GTD-350 śmigłowca Mi-2, gdzie: IX – wirnik sprężarki, X – prądnica-rozrusznik STG-3; XI – nadajnik obrotomierza turbosprężarki (trójfazowa prądniczka tachometryczna D-2M); 1 – łożysko przednie – I podpora silnika; 2 – łożysko środkowe – miejsce połączenia obu części wału turbosprężarki (wał turbiny, wał sprężarki) – II podpora silnika; 3 – łożysko tylne turbosprężarki – III podpora silnika; 4 – IV podpora silnika; 5 – łożysko V podpory silnika [214]



**Rys. 4.64.** Schemat blokowy zespołu napędowego śmigłowca Mi-8, gdzie: 1 – prądnica-rozrusznik GS-18MO (albo GS-18TO) lewego silnika; 2 – trójfazowa prądniczka tachometryczna (nadajnik obrotomierza) D-2M lewego silnika; 7 – sprzęgło jednokierunkowe lewego silnika; 8 – prądnica tachometryczna (nadajnik obrotomierza) D-1M nr 1 reduktora głównego; 9 – prądniczka tachometryczna (nadajnik obrotomierza) D-1M nr 2 reduktora głównego; 10 – jednofazowa prądnica prądu przemiennego SGO-30U; 15 – prądnica-rozrusznik GS-18MO (albo GS-18TO) prawego silnika; 16 – trójfazowa prądniczka tachometryczna (nadajnik obrotomierza) D-2M prawego silnika



**Rys. 4.65.** Sposób mocowania prądnicy-rozrusznika GS-18MO do reduktora silnika TW-2-117 śmigłowca Mi-8 [215]



**Rys. 4.66.** Widok silnika TW2-117A (śmigłowca Mi-8) z prawej strony, gdzie: 1 – uchwyt do podnoszenia silnika; 2 – synchronizator mocy SO-40; 3 – króciec odbioru powietrza do instalacji śmigłowca; 4 – filtr oleju; 5 – króciec doprowadzenia oleju do silnika ze zbiornika; 6 – króciec odpowietrzenia trzeciej podpory; 7 – gniazdo termopar; 8 – blok zaworów zalewowych; 9 – króciec odpowietrzenia drugiej podpory; 10 – zawór upustu powietrza; 11 – mechanizm wykonawczy wychylania łopatek aparatów kierujących sprężarki; 13 – króciec wylotowy oleju z silnika; 14 – wspornik nadajnika manometru oleju; 15 – regulator obrotów; 16 – prądnica-rozrusznik GS-18MO; 17 – wlot powietrza; 18 – kolektor wylotowy spalin; 19 – wał wyjściowy mocy mechanicznej [Instrukcja eksploatacji silnika TW2-117A]

W nowszych konstrukcjach łączenie funkcji prądnicy i rozrusznika „przetrwało” jedynie na silnikach małej mocy, jak np. prądnica-rozrusznik typu 200SGL129Q na śmigłowcu SW-4 Puszczyk (rys. 4.67). W nowszych konstrukcjach samolotów i śmigłowców nie łączy się tych funkcji – rozruch dokonuje się przy pomocy oddzielnych rozruszników elektrycznych. Przykładem jest tu śmigłowiec W-3M Sokół, gdzie na każdym silniku jest osobny rozrusznik (silnik elektryczny ST-107) i niezależna prądnica prądu stałego WG-7500Ja zamontowana na przekładni głównej WR-3. Na przekładni tej jest zamontowana prądnica prądu przemiennego GT-40-PCz8, której obwód wyjściowy (trójfazowy) jest połączony z prostownikiem zapewniającym zasilanie prądem stałym. W wielu konstrukcjach zespołów napędowych „dużych” mocy stosuje się mały silnik turbinowy, tzw. turbostarter, uruchamiany silnikiem elektrycznym, zaś rozruch silników głównych odbywa się dzięki sprzężeniu pneumatycznemu – powietrze pobierane z za sprężarki turbostartera jest doprowadzone sztywnymi przewodami rurowymi do turbiny powietrznej, która jest sztywno połączona z wałem silnika głównego.



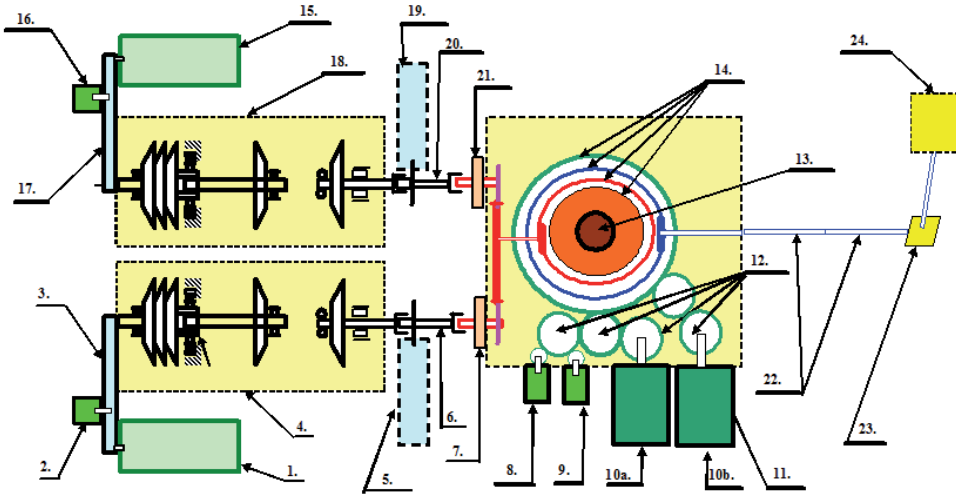
Rys. 4.67. Widok śmigłowca SW-4 Puszczyk z prawej strony, z widoczną prądnicą-rozrusznikiem

#### 4.4.2. Napęd prądnicy prądu przemiennego

Napęd prądnicy prądu przemiennego może być ze stabilizacją lub bez stabilizacji prędkości obrotowej. Ten ostatni jest najczęściej stosowany, gdyż jest tani. Taki układ napędu prądnicy prądu przemiennego mają statki powietrzne:

1. Su-22 – na silniku prądnicą jednofazowa SGO-8 [242],
2. M-346 Bielik – na każdy z (dwóch) silników po jednej prądnicę trójfazowej,
3. śmigłowiec Mi-14 oraz Mi-17 (rys. 4.68), gdzie na przekładni głównej WR-14 zamontowane są dwie prądnice jednofazowe SGO-30U [65],
4. śmigłowiec Mi-24 (rys. 4.69 i 4.70), gdzie na skrzynce napędu agregatów (SNA) zamontowane są dwie prądnice trójfazowe GT-40PCz6 [45].

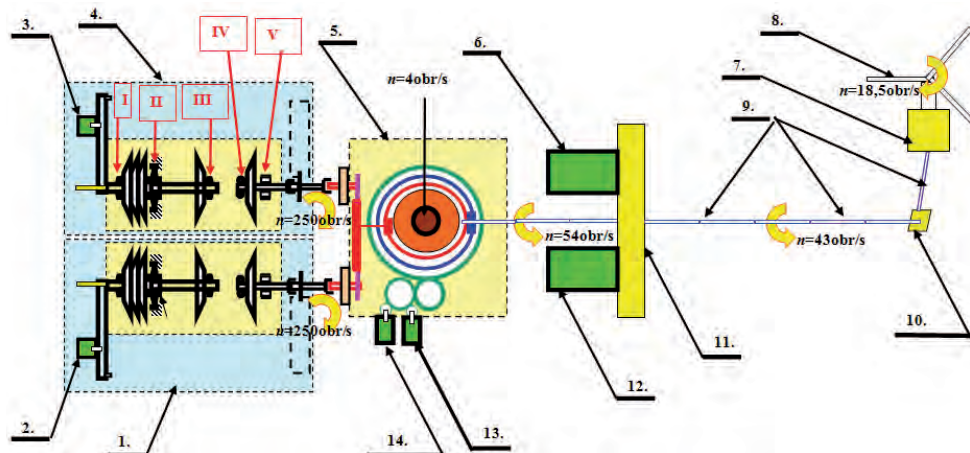
Prądnice prądu przemiennego pracują niezależnie, każda na swój zespół odbiorników energii elektrycznej. Nie ma możliwości zasilania niektórych odbiorników energii elektrycznej (niektóre bloki radiowe i radionawigacyjne) wymagających stabilnej częstotliwości – trzeba montować przetwornice, kosztowne i zużywające znaczne ilości energii na straty ciepłne. Nie można też synchronizować prądnic, przez co system energetyczny staje się mniej elastyczny.



**Rys. 4.68.** Schemat blokowy zespołu napędowego śmigłowca Mi-17, gdzie: 1 – rozrusznik powietrzny SW-78BA lewego silnika; 2 – trójfazowa prądnica tachometryczna (nadajnik obrotomierza) D-2M lewego silnika; 3 – skrzynka napędów agregatów lewego silnika; 4 – lewy silnik TW3-117; 5 – skrzynka napędów regulatora obrotów RO-40WR; 6 – wał transmisyjny napędu (z lewego silnika do reduktora głównego WR88) z przegubami Cardana; 7 – sprzęgło jednokierunkowe lewego silnika; 8 – prądnica tachometryczna (nadajnik obrotomierza) D-1M nr 1 reduktora głównego; 9 – prądnica tachometryczna (nadajnik obrotomierza) D-1M nr 2 reduktora głównego; 10a. – trójfazowa prądnica prądu przemiennego SGO-30U nr 1; 10b. – trójfazowa prądnica prądu przemiennego SGO-30U nr 2; 11 – reduktor główny WR-14; 12 – koła zębate napędzające prądnice prądu przemiennego: D-1M, GO-30U; 13 – wał śmigła nośnego; 14 – koła zębate w osi wału śmigła nośnego; 15 – rozrusznik powietrzny SW-78BA prawego silnika; 16 – trójfazowa prądnica tachometryczna (nadajnik obrotomierza) D-2M prawego silnika; 17 – skrzynka napędów agregatów prawego silnika; 18 – prawy silnik TW3-117; 19 – skrzynka napędów regulatora obrotów RO-40WR prawego silnika; 20 – wał transmisyjny napędu (z prawego silnika do reduktora głównego WR-14) z przegubami Cardana; 21 – sprzęgło jednokierunkowe prawego silnika; 22 – wały transmisyjne napędu (z reduktora głównego WR-14 do śmigła ogonowego) z przegubami Cardana; 23 – przekładnia kąтова; 24 – przekładnia końcowa

Spotykane są również (choć rzadko) układy par prądnic prądu przemiennego z synchronizacją faz. Oczywiście obie prądnice muszą mieć jednakowe częstotliwości i napięcia fazowe – regulacji eksploatacyjnej podlega tylko przesunięcie fazowe pomiędzy wektorami napięć fazowych. Taki układ umożliwi elastyczne optymalne dysponowanie energią elektryczną – w chwili zwiększonego zapotrzebowania energetycznego na jeden odbiornik energii elektrycznej, np. na taśmy

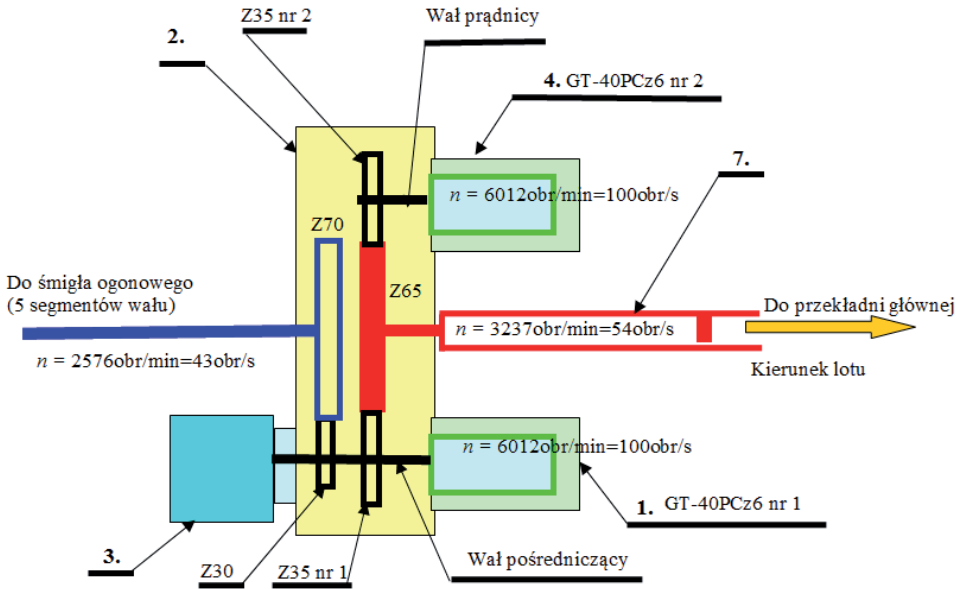
grzejne krawędzi natarcia łopat nośnych podczas oblodzenia. Układ taki istnieje na śmigłowcu Mi-24. Konstrukcja takiego układu mocno się komplikuje. Obsługa musi mieć możliwość precyzyjnej zmiany kąta położenia korpusów prądnic i to w czasie pracy silnika. Spowodowało to, że na śmigłowcu musiano zastosować do napędu prądnic (GT-40PCz6) osobną skrzynkę napędu prądnic odłączoną i odsuniętą od przekładni głównej na odległość ok. 2 m umożliwiającą bezpieczną pracę obsługi podczas pracy zespołu napędowego.



**Rys. 4.69.** Schemat blokowy zespołu napędowego śmigłowca Mi-24, gdzie: 1 – lewy silnik TW3-117MT; 2 – trójfazowa prądnica tachometryczna (nadajnik obrotomierza) D-2M sprężarki lewego silnika; 3 – trójfazowa prądnica tachometryczna (nadajnik obrotomierza) D-2M sprężarki prawego silnika; 4 – prawy silnik TW-3; 5 – przekładnia główna WR-24; 6 – prądnica GT-40PCz6 lewa; 11 – skrzynka napędu agregatów; 12 – prądnica GT-40PCz6 prawa; 13 – prądnica tachometryczna D-1M nr 2 reduktora głównego; 14 – prądnica tachometryczna D-1M nr 1 reduktora głównego; I÷V – podpory łożyskowe silnika TW-3

Dla zapewnienia stałej częstotliwości generowanego napięcia prądnic prądu przemiennego istnieje potrzeba stosowania układu napędowego stałej częstotliwości obrotowej (rys. 4.71–4.75).

Napęd stałej prędkości (nazywany NSP) stanowi urządzenie włączone pomiędzy zespół napędowy statku powietrznego a prądnicę i zapewniające jej stałą prędkość obrotową. Napędy stałej prędkości prądnic synchronicznych konstruowane w celu zapewnienia im stałej prędkości obrotowej są złożonymi układami regulacji automatycznej. Układ NSP może być zrealizowany w postaci układu automatycznej regulacji w różnych miejscach zespołu napędowego prądnicy:



**Rys. 4.70.** Schemat kinematyczny skrzynki napędów prądnic śmigłowca Mi-24, gdzie: 1 – prądnicza-przetwornik nr 1 (lewa); 2 – skrzynka napędu prądnic; 3 – wentylator prądnic; 4 – prądnicza-przetwornik nr 2 (prawa)

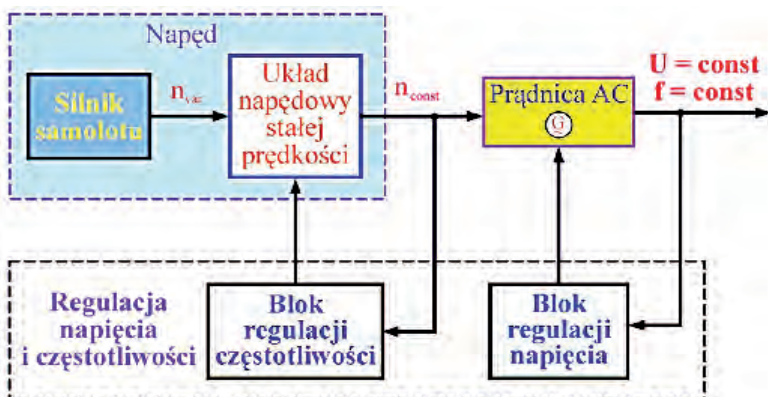
- przy samej prądniczy;
- w skrzynce napędów (stabilizowana cała skrzynka napędów) – rzadko stosowane, gdyż:
  - nie wszystkie odbiorniki mocy mechanicznej potrzebują stabilizowanej prędkości obrotowej,
  - skrzynka napędów sumarycznie ma duży moment bezwładności – przy gwałtownych przyspieszeniach prędkości kątowej wału wyjściowego silnika może łatwo dojść do urwania wału;
- w silniku – stabilizowana prędkość wału wyjściowego w silniku cieplnym – np. w silniku turbowałowym śmigłowca – stabilizacja prędkości obrotowej wolnej turbiny – stosowane praktycznie biorąc we wszystkich śmigłowcach i to nie ze względu na pracę turbiny, lecz ze względu na wielki moment bezwładności wiotkiej i lekkich łopat wirnika głównego.

Ad a) Często stosowanym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest hydrauliczny napęd stałej prędkości składający się z podzespołów:

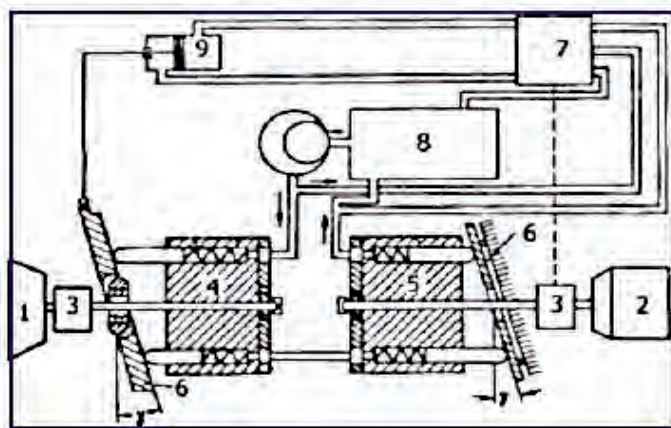
- czujnika prędkości obrotowej, np. bezwładnościowo-odśrodkowego (podobnego do regulatora Watta),

- 2) pompy hydraulicznej, najczęściej tłoczkowej o zmiennym kącie nachylenia tarczy sterującej, tj. zmiennym wydatku medium (płyn hydrauliczny – np. w MiG-29, paliwo lotnicze np. w MiG-23) sterowanym przez czujnik prędkości obrotowej,
- 3) silnika hydraulicznego o stałym kącie nachylenia tarczy sterującej.

Sygnal z czujnika proporcjonalny do prędkości obrotowej podawany jest do regulatora prędkości, który steruje napędem, zmieniając położenie tarczy sterującej – czujnik steruje tłoczkiem rozdzielnika ciśnienia hydraulicznego, które to przesuwają tłok silownika hydraulicznego zmieniającego położenie tarczy sterującej.

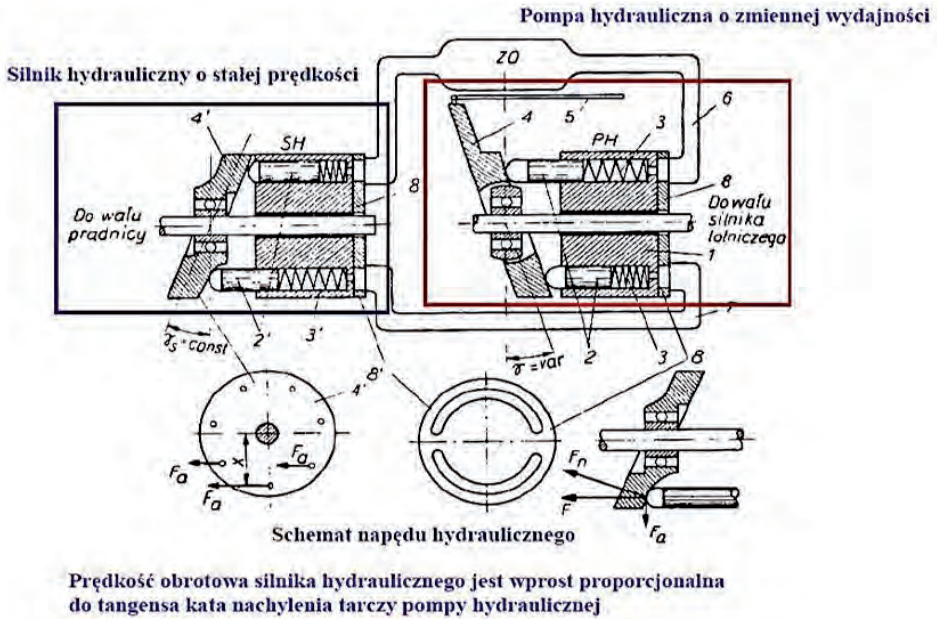


Rys. 4.71. Hydrauliczny napęd o stałej prędkości – schemat blokowy [46]

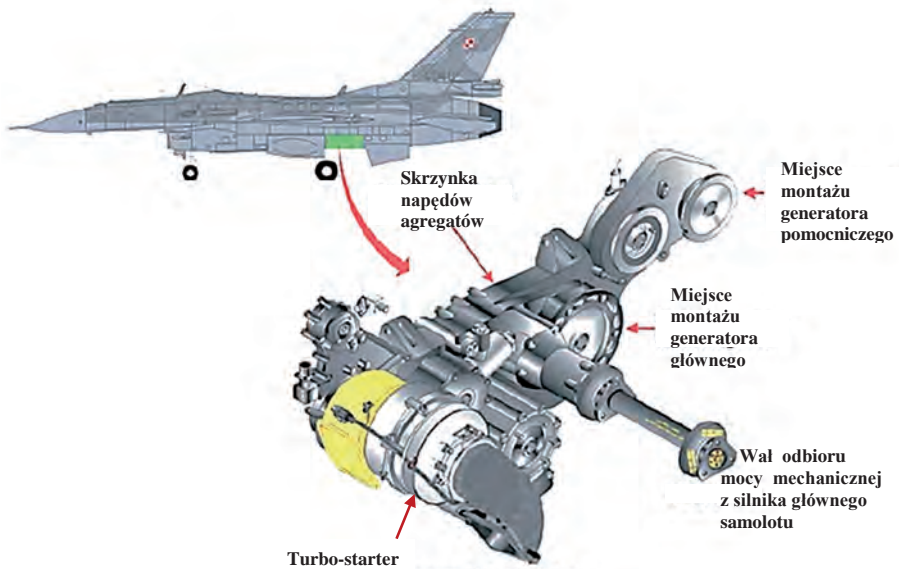


Rys. 4.72. Hydrauliczny napęd o stałej prędkości – schemat instalacji hydraulicznej [46], gdzie: 1 – silnik lotniczy, 2 – prądnica synchroniczna, 3 – przekładnia, 4 – pompa hydrauliczna, 5 – silnik hydrauliczny, 6 – tarcza sterująca, 7 – regulator prędkości obrotowej, 8 – zbiornik płynu hydraulicznego, 9 – serwonapęd tarczy sterującej

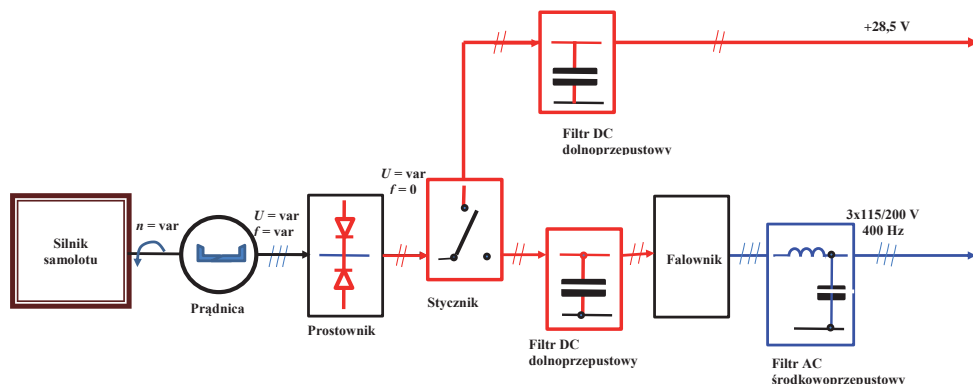




Rys. 4.73. Hydrauliczny napęd o stałej prędkości – konstrukcja pompy i silnika hydraulicznego [46]

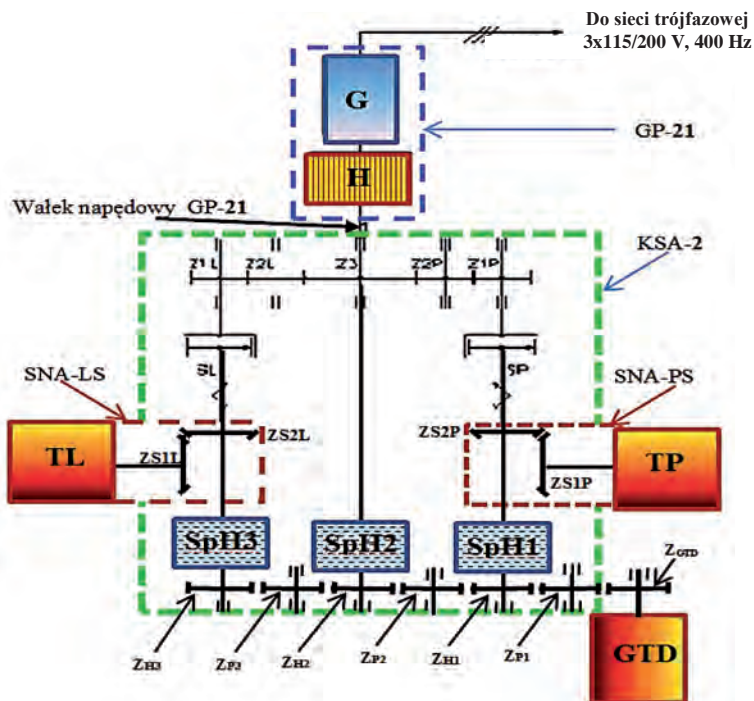


Rys. 4.74. Skrzynka napędów agregatów samolotu F-16 z wyróżnioną prądnicą główną [244]



Rys. 4.75. System elektroenergetyczny samolotu F-16 (VSCF – Variable Speed Constant Frequency) [244]

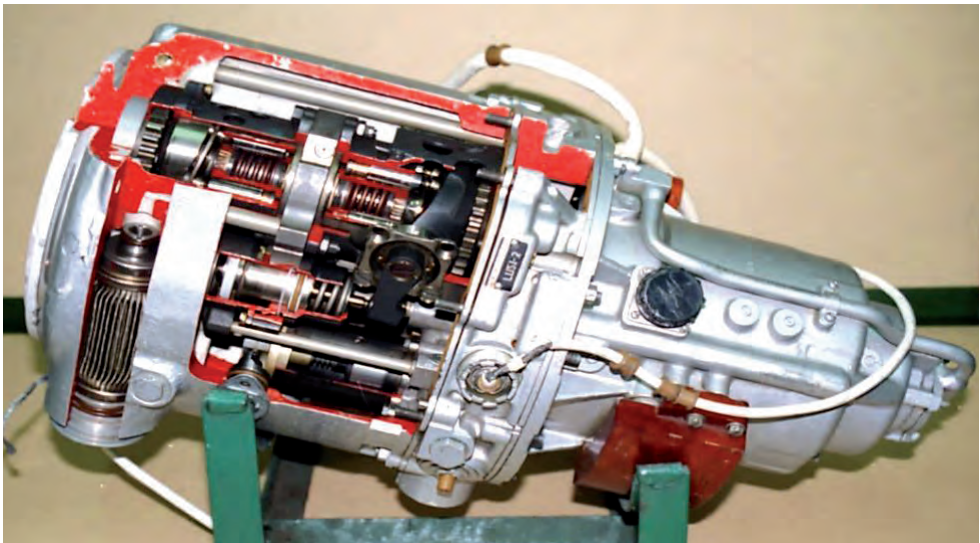
Znane są także konstrukcje układu napędu prądnic prądu przemiennego ze stabilizacją prędkości obrotowej. Należą do nich:



Rys. 4.76. Schemat kinematyczny dwusilnikowego zespołu napędowego samolotu MiG-29 [46], gdzie: TL – silnik napędowy lewy; TP – silnik napędowy prawy; ZS1L, ZS2L – koła zębate stożkowe przekazujące napęd z silnika lewego na KSA-2; ZS1P,

ZS2P – koła zębate stożkowe przekazujące napęd z silnika prawego na KSA-2; KSA-2 – skrzynka napędów agregatów płatowca: Z1L, Z2L, Z3, Z2P, Z1P – koła zębate napędu poszczególnych agregatów zamontowanych na KSA-2; SL, SP – sprzęgła jednokierunkowe; SpH1, SPH2, SPH3 – sprzęgła hydrauliczne cierne; ZH1, ZH2, ZH3 – koła zębate łączące części napędzane sprzęgiel hydraulicznych ciernych; Z<sub>GTD</sub> – koło zębate napędzane z turbostartera GTD; ZP1, ZP2, ZP3 – koła zębate pośredniczące; H – regulator hydrauliczny; G – prądnicca prądu przemiennego 115V/400 Hz; GTD – silnik rozruchowy (turbostarter) GTDE-117 [rys. Grzegorz Tyrała]

1. Praktycznie wszystkie zespoły napędowe na śmigłowcach – z uwagi na dużą średnicę śmigła głównego ich moment bezwładności jest zbyt duży, aby zniosły zmiany prędkości obrotowej. Dlatego wał główny tego śmigła napędzany w przekładni głównej ma tylko niewielką możliwość zmiany prędkości obrotowej, od 7% do 10% prędkości znamionowej (wg standardu „wschodniego” prędkość znamionowa wału głównego wynosi 4 obr/s, według standardu „zachodniego” 2 obr/s). W związku z tym także prądnice prądu przemiennego zamontowane na przekładni głównej mają stabilizowaną prędkość obrotową.
2. Zespoły napędowe na samolotach z układem stabilizacji prędkości obrotowej. Może to być np. układ stabilizatora hydraulicznego stosowany na skrzynce napędów KSA-2 na samolocie MiG-29 (rys. 4.76 i 4.77).



**Rys. 4.77.** Agregat GP-21 z samolotu MiG-29 – złożony z e stabilizatora hydraulicznego oraz z prądnicy trójfazowej S = 30 kVA typ GT-30NŻ412

## 4.5. Prostowniki

### 4.5.1. Ogólna charakterystyka

#### 4.5.1.1. Rola bloku transformatorowo-prostowniczego w systemie elektroenergetycznym statku powietrznego

Bloki transformatorowo-prostownicze służą do przekształcania napięcia przemiennego np. trójfazowego 115/200 V, 400 Hz na prąd stały. Jest to niezbędne we współczesnych sieciach pokładowych, do zasilania prądem stałym licznych odbiorników prądu stałego 28,5 V, które wobec wycofywania komutatorowych prądnic prądu stałego byłyby pozbawione tego zasilania. Większość odbiorników energii elektrycznej starszych konstrukcji WSP wymagała tego zasilania. Jak wiadomo, sterowanie układami prądu stałego jest znacznie prostsze niż przemiennego i dlatego ze względu na wiedzę techniczną i poziom technologiczny były najkorzystniejsze w zastosowaniach praktycznych na pokładach statków powietrznych. Oczywiście bloki transformatorowo-prostownicze musiały zapewnić jakość energii elektrycznej porównywalną z jakością energii elektrycznej zapewnioną przez wycofywane komutatorowe prądnice prądu stałego.

Konstrukcyjnie blok transformatorowo-prostowniczy stanowi połączenie:

1. transformatora,
2. prostownika półprzewodnikowego,
3. układu filtracji (niezbędnego do zmniejszenia poziomu pulsacji).

Bloki transformatorowo-prostownicze nie mają regulatorów napięcia, co powoduje:

- a) znaczne obniżanie się wartości napięcia przy obciążeniu znamionowym – w miarę wzrostu obciążenia wartość napięcia wyraźnie, liniowo obniża swoją wartość, co wynika ze spadku napięcia na oporności wewnętrznej uzwojeń transformatora, na oporności diod prostowniczych oraz na rezystancji żył przewodzących kabli łączeniowych i szyn rozdzielczych;
- b) wysoką stabilność jakości napięcia wyjściowego w stanach przejściowych, tj. w czasie załączania i wyłączania dużych mocy obciążenia.

W ostatnich latach (w konstrukcjach od 2000 r.) w związku z wprowadzaniem na duże samoloty pasażerskie (Airbus: A380, A350XWB, Boeing B-787) oraz nowoczesne samoloty wojskowe (F-22 Raptor, F-35) wysokich napięć prądu stałego 270 V<sub>DC</sub>, 350 V<sub>DC</sub>, 540 V<sub>DC</sub>, bloki transformatorowo-prostownicze, praktycznie

biorąc sprzężone z trójfazową, bezstykową prądnicą prądu przemiennego, zyskały na znaczeniu [29, 182–184]. Aktualnie więc transformatory w blokach transformatorowo-prostowniczych nie zmniejszają, a zwiększają napięcie stałe. Aktualnie też stosuje się prostowanie 12- i 18-plusowe dzięki podwójnemu lub potrójnemu zróżnicowaniu grupy połączeń, dzięki czemu zyskuje się zróżnicowanie kątów pomiędzy wyjściowymi wektorami fazowymi.

#### **4.5.1.2. Fizykalne podstawy działania prostownika jednopółwukowego i dwupółwukowego**

W 1939 r. Russell Shoemaker Ohl zbudował pierwsze złącze półprzewodnikowe p-n, które stało się osnową obecnie powszechnie stosowanych: diod, tranzystorów, tyrystorów i układów scalonych. Początkowo złącza półprzewodnikowe p-n stosowano tylko w wojskowych technikach radiowych, a po długiej drodze wyparła układy lampowe [2, 7, 18, 42, 75, 96, 243].

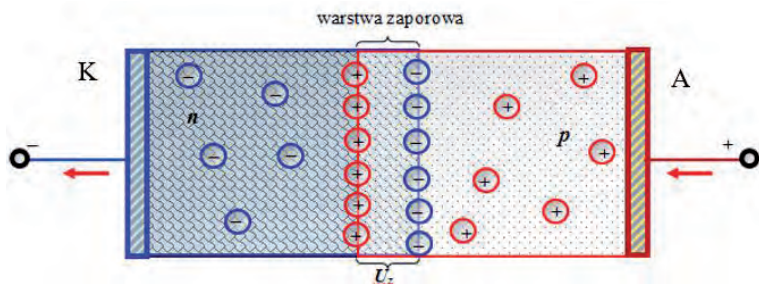
Aktualnie wszystkie diody półprzewodnikowe konstruuje się na osnowie krzemu. Jest to minerał czterowartościowy – ma on cztery elektrony na ostatniej orbicie. Uzupełniając elektrony z sąsiednich atomów krzemu, każdy atom uzupełnia liczbę elektronów do ośmiu, tj. do tzw. oktetu, i tworzy w ten sposób silne wiązania krystaliczne.

Jeżeli do części płytki krzemu wprowadzimy niewielką ilość pierwiastka pięciowarstwowego, np. fosforu, to utworzy się obszar z pewnym nadmiarem elektronów w strukturze kryształu krzemu. Obszar ten oznaczamy literą n.

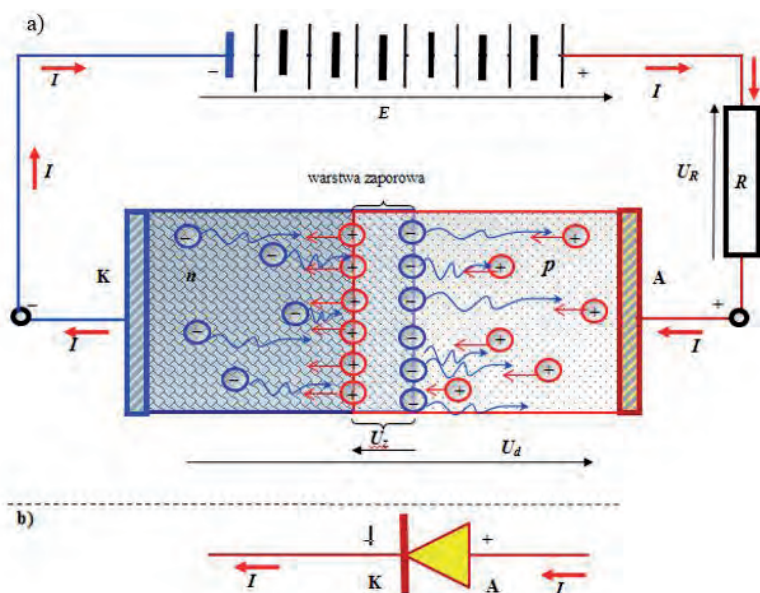
Jeżeli do części płytki krzemu wprowadzimy niewielką ilość pierwiastka trójwarstwowego, np. boru, to utworzy się obszar z pewnym niedomiarem elektronów w strukturze kryształu krzemu – elektronicy te miejsca niedomiaru elektronów oznaczyli jako ładunek dodatni i nazwali je dziurami. Obszar ten oznaczamy literą p.

Działanie diody warstwowej powszechnie stosowanej w blokach transformatorowo-prostowniczych polega na tworzeniu się warstwy zaporowej na połączeniu dwóch warstw struktury (obecnie zazwyczaj opartej na strukturze kryształu krzemu):

1. jedna n domieszkowana pierwiastkiem o nadmiarze (w stosunku do czterech elektronów na ostatniej orbicie w atomie krzemu) elektronów, najczęściej fosforem;
2. druga p domieszkowana pierwiastkiem o niedomiarze (w stosunku do czterech elektronów na ostatniej orbicie w atomie krzemu) elektronów, najczęściej trójwartościowym borem.



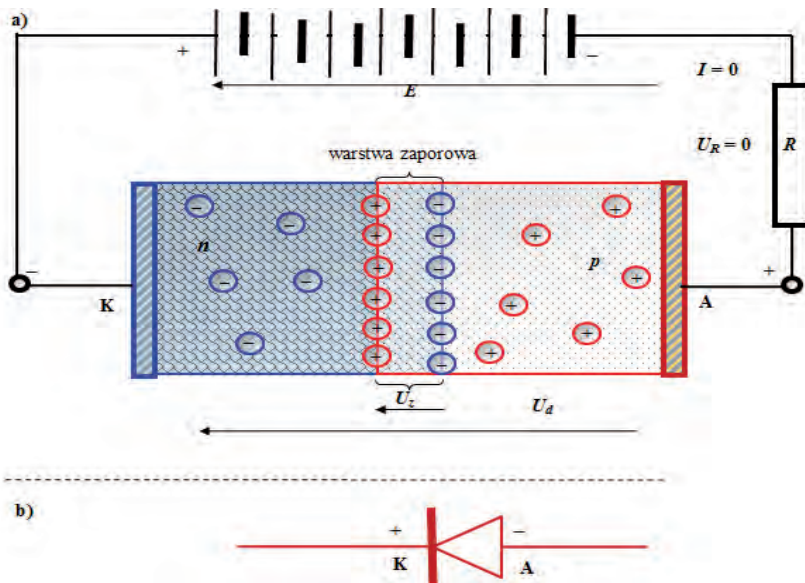
Rys. 4.78. Złącze n-p półprzewodnika bez źródła zewnętrznego – samorzutnie tworzy się warstwa zaporowa K – katoda diody; A – anoda diody



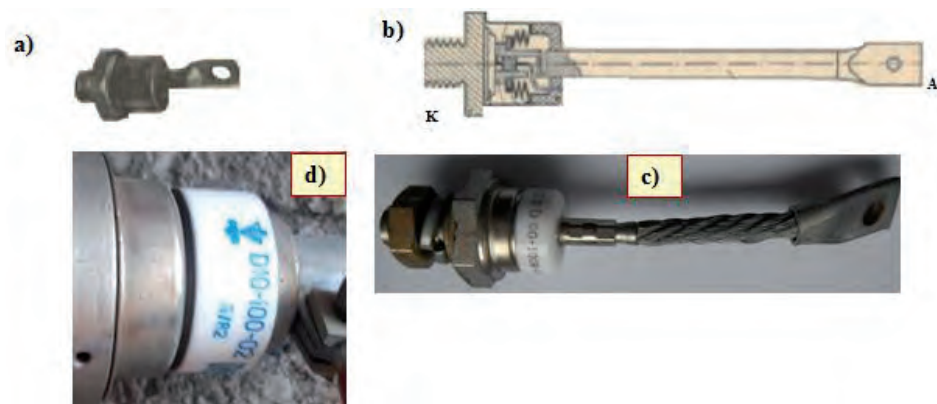
Rys. 4.79. Złącze n-p półprzewodnika w stanie przewodzenia – napięcie od źródła zewnętrznego (napięcie  $U_d$ ) osłabia napięcie warstwy zaporowej: a) obwód ze złączem półprzewodnikowym p-n w stanie przewodzenia; b) symbol diody półprzewodnikowej, tu: spolaryzowana dodatnio, tj. w stanie przewodzenia: K – katoda diody; A – anoda diody;  $E$  – siła elektromotoryczna źródła napięcia;  $R$  – rezystancja obciążenia

W obszarze n jest nadmiar elektronów, więc precesują one do warstwy p, gdzie jest ich niedomiar, jednocześnie z miejsc, gdzie wyprecesowały, pojawia się nie-

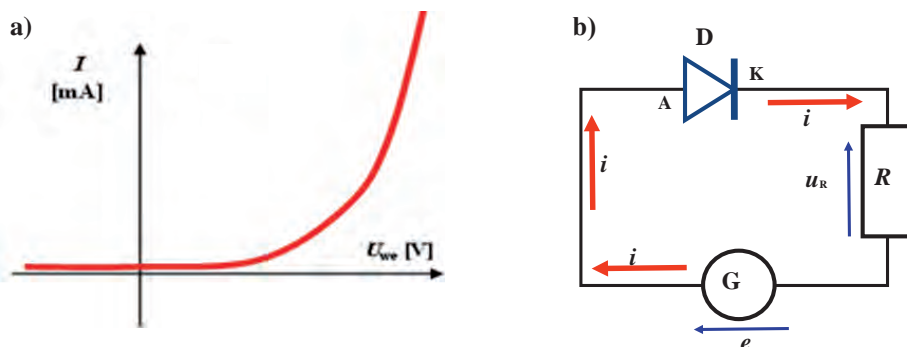
dobór elektronów, tj. pojawiają się tzw. dodatnie dziury. Pomiędzy tymi dziurami a warstwą elektronów, które wyprecesowały z warstwy n, tworzy się różnica potencjałów, zwana napięciem warstwy zaporowej, które w pewnym momencie powstrzymuje dalszą precesję elektronów – tworzy się na granicy warstw tzw. warstwa zaporowa o napięciu  $U_z$ . Jeżeli przyłożone zewnętrznie napięcie ma zwrot zgodny ze zwrotem tego napięcia, to półprzewodnik nie przewodzi. Jeżeli zmienimy polaryzację źródła, to napięcie zaporowe zostaje osłabione i półprzewodnik zaczyna przewodzić (rys. 4.78–4.81), elektrony przepływają od katody do anody (jakkolwiek kierunek umowny przepływu prądu jest strzałkowany od wyższego potencjału, tj. „+” do niższego, tj. „-”). Charakterystykę prądowo-napięciową półprzewodnikowej diody prostowniczej przedstawiono na rys. 4.82.



**Rys. 4.80.** Złącze n-p półprzewodnika w stanie zaporowym, tj. bez przewodzenia – napięcie od źródła zewnętrznego (napięcie  $U_d$ ) wzmacnia napięcie warstwy zaporowej: a) obwód ze złączem półprzewodnikowym p-n, tu: w stanie zaporowym; b) symbol diody półprzewodnikowej: K – katoda diody; A – anoda diody;  $E$  – siła elektromotoryczna źródła napięcia;  $R$  – rezystancja obciążenia



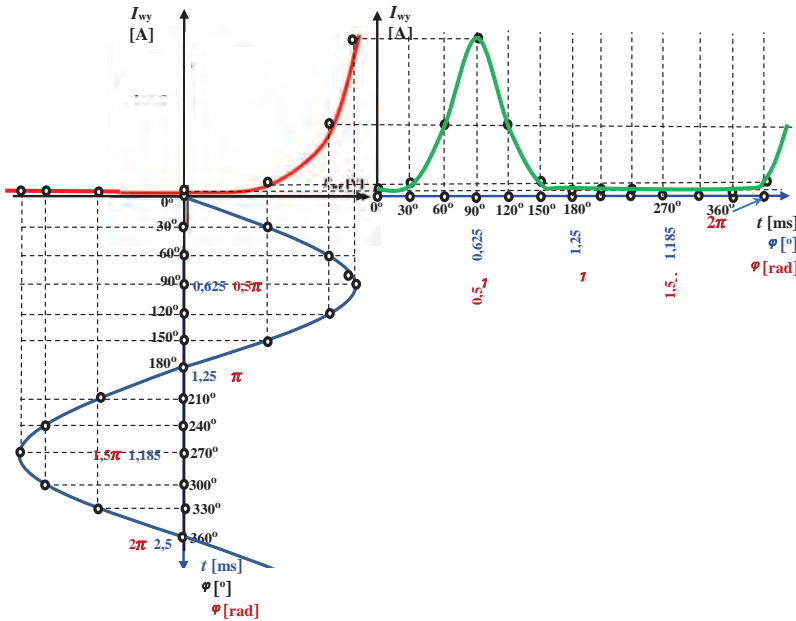
Rys. 4.81. Diody półprzewodnikowe: a) widok diody półprzewodnikowej o wartości prądu znamionowego 10 A; b) przekrój diody półprzewodnikowej o wartości prądu znamionowego 100 A; c) widok diody półprzewodnikowej o wartości prądu znamionowego 100 A; d) widok diody półprzewodnikowej o wartości prądu znamionowego 100 A – powiększenie izolatora



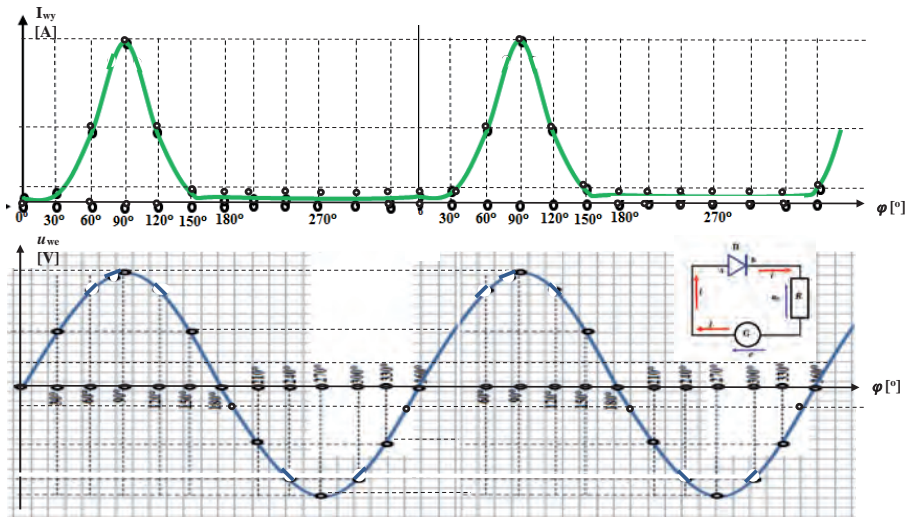
Rys. 4.82. Charakterystyka prądowo-napięciowa półprzewodnikowej diody prostowniczej: a) charakterystyka prądowo-napięciowa; b) schemat diody półprzewodnikowej w układzie prostowania napięcia generatora prądu przemiennego na prąd stały pulsujący; D – dioda półprzewodnikowa; K – katoda diody; A – anoda diody; R – rezystancja czynna (odbiornik); G – generator prądu przemiennego

Prostowanie jednopółkownikowe, zwane także jednopulsowym (rys. 4.83, 4.84) nie jest ekonomiczne – wartość napięcia i mocy, po wyprostowaniu jest ponad dwukrotnie niższa niż wartość skuteczna napięcia, z którego została wytworzona, a więc układ jest wybitnie nieekonomiczny. Ponadto przebieg jednopulsowy ma bardzo dużo wysokich harmonicznych powodujące zakłócenia m.in. odbioru radiowego. Znacznie korzystniejszy jest układ dwupółkownikowy. Układ ten oparty na układzie prostownikowym Gretza powstał w 1897 r. (rys. 4.85).

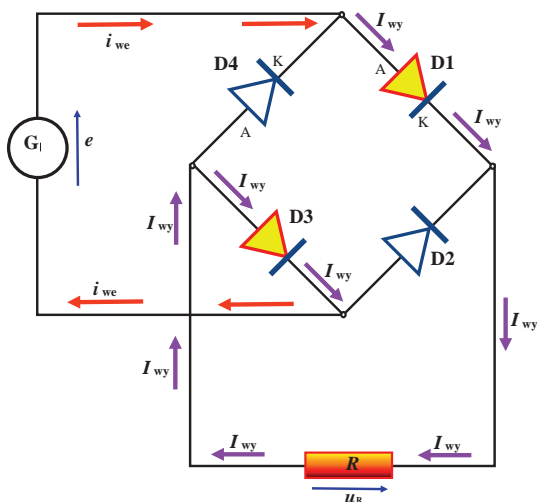




Rys. 4.83. Prostownianie jednopółkowe (jednopulsowe) przez pojedynczą diodę prostowniczą – zasada przetwarzania – rysunek poglądowy

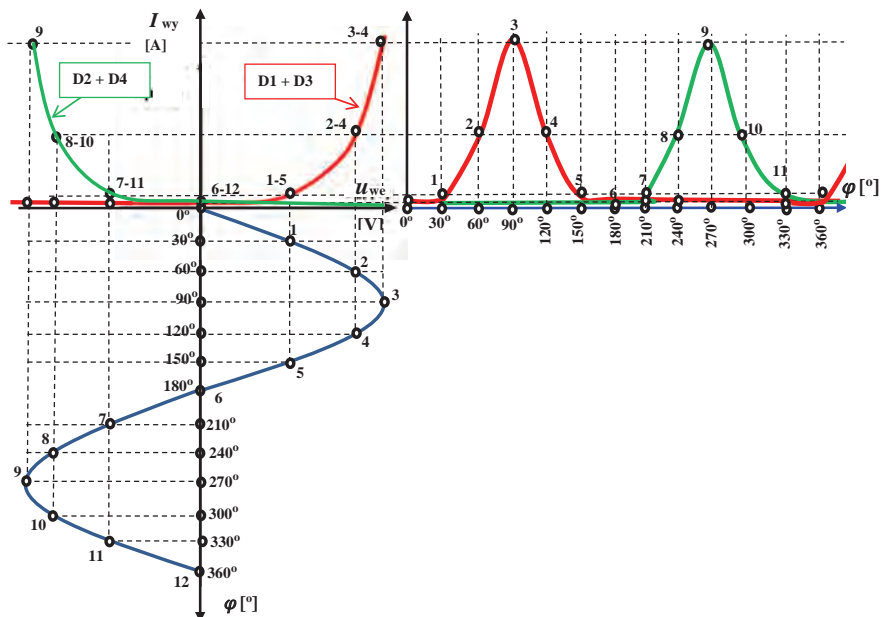


Rys. 4.84. Przebiegi napięcia wejściowego i wyjściowego prostownika jednopółkowego (przez pojedynczą diodę prostowniczą), gdzie:  $i$  – przebieg chwilowej wartości prądu wyjściowego po wyprostowaniu jednopółkowym przez pojedynczą diodę półprzewodnikową;  $e$  – przebieg chwilowej wartości siły elektromotorycznej źródła prądu przemiennego

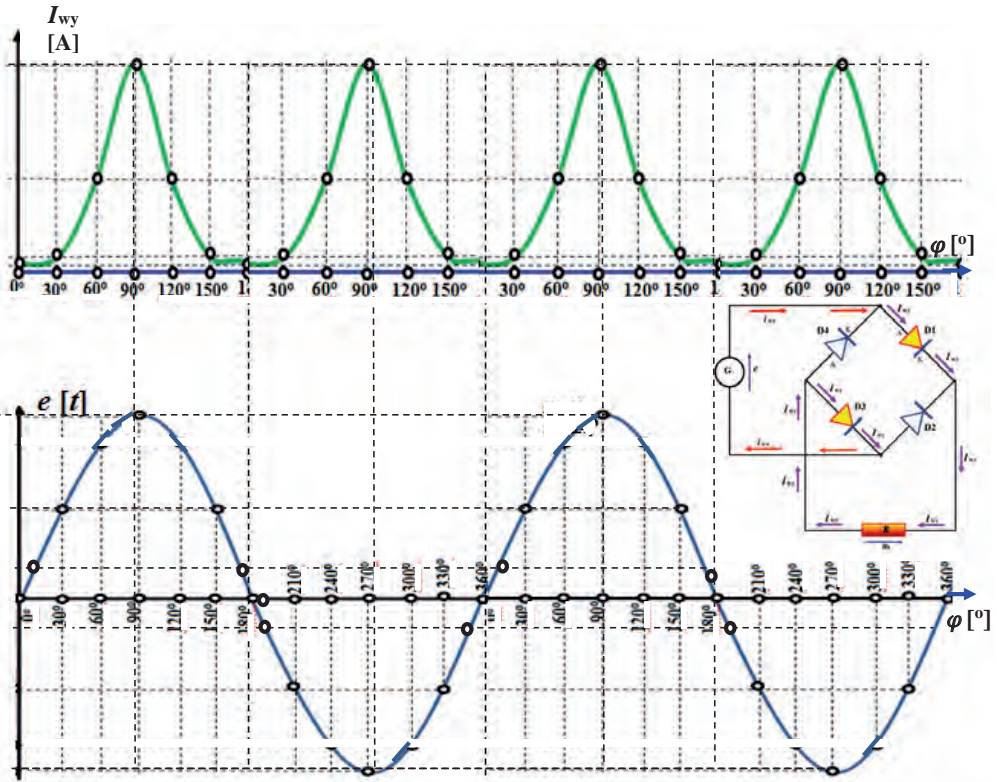


**Rys. 4.85.** Mostek Gretza – prostowanie dwupołówkowe – przepływ prądu dla dodatniej półokwy sinusoidy generowanej przez źródło prądu przemiennego G

Prostowanie dwupołówkowe (dwupulsowe) przez cztery diody w układzie mostka Gretza – zasadę przetwarzania przedstawiono na rys. 4.86 i 4.87.

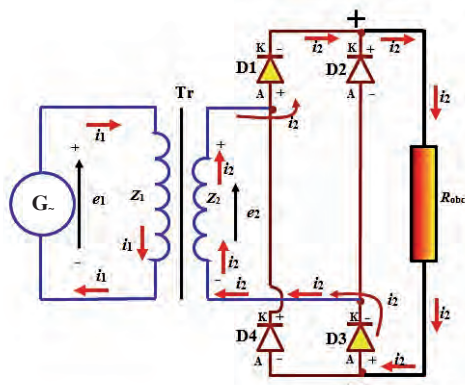


**Rys. 4.86.** Prostowanie dwupołówkowe (dwupulsowe) przez cztery diody w układzie mostka Gretza – zasadę przetwarzania – rysunek poglądowy

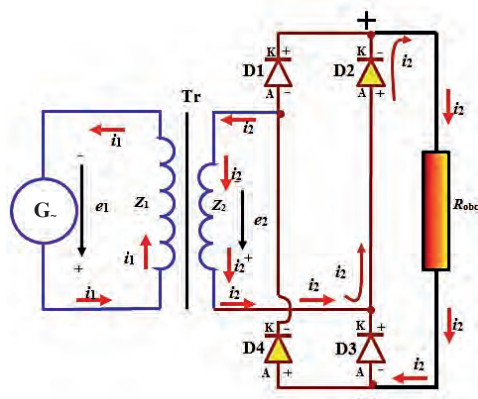


**Rys. 4.87.** Prostowanie przez mostek Gretza – prostowanie dwupołówkowe, gdzie:  $I$  – przebieg chwilowej wartości prądu wyjściowego po wyprostowaniu dwupołówkowym przez mostek Gretza;  $e$  – przebieg siły elektromotorycznej źródła prądu przemiennego przyłożone na wejście mostka Gretza

W technice lat 70., 80. i 90., kiedy to jako główne źródło elektroenergetyczne prądnice prądu przemiennego 115 V, 400 Hz wypierały komutatorowe prądnice prądu stałego o napięciu znamionowym 28,5 V, mostki prostownicze były niezbędne do tego, aby część energii prądu przemiennego przekształcić w prąd stały [163]. Wiele odbiorników było zaprojektowanych na prąd stały, jak np. wiele silników wykonawczych – ich sterowanie było prostsze i dopracowane technologicznie. Aby tego dokonać, musiano przed prostownikiem zastosować transformator obniżający napięcie (rys. 4.88 i 4.89). Z punktu widzenia teorii obwodów wyjście takiego transformatora klasyfikuje się jako dwufazowe. Do każdej z tych faz montuje się po dwie diody prostownicze – jedną przyłączoną do danego odczepu katodą (K), a drugą – anodą (A).

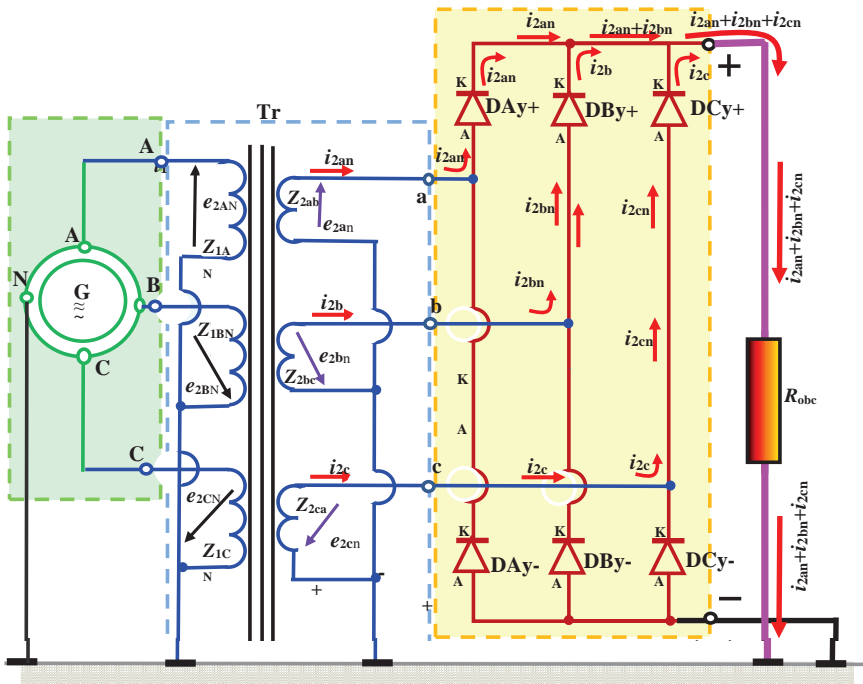


**Rys. 4.88.** Blok transformatorowo-prostowniczy jednofazowy dwupulsowy – prostowanie przez mostek Gretza – przedstawiono przepływ prądu dla górnej połówki sinusoidy, gdzie: K – katoda diody; A – anoda diody; D1, D2, D3, D4 – diody prostownicze;  $e_1$  – przebieg siły elektromotorycznej źródła prądu przemiennego prądnicy jednofazowej;  $e_2$  – przebieg siły elektromotorycznej źródła prądu przemiennego indukowanego w uzwojeniu wtórnym transformatora i przyłożone na wejście mostka Gretza; Tr – transformator; G – źródło prądu przemiennego;  $R_{obc}$  – rezystancja obciążenia (odbiornika energii elektrycznej)



**Rys. 4.89.** Blok transformatorowo-prostowniczy jednofazowy dwupulsowy – prostowanie przez mostek Gretza – przedstawiono przepływ prądu dla dolnej połówki sinusoidy, gdzie: K – katoda diody; A – anoda diody; D1, D2, D3, D4 – diody prostownicze;  $e_1$  – wartość chwilowa siły elektromotorycznej źródła prądu przemiennego prądnicy jednofazowej;  $e_2$  – wartość chwilowa siły elektromotorycznej źródła prądu przemiennego indukowanego w uzwojeniu wtórnym transformatora i przyłożonego na wejście mostka Gretza; Tr – transformator; G – źródło prądu przemiennego;  $R_{obc}$  – rezystancja obciążenia (odbiornika energii elektrycznej)

Na rys. 4.90 przedstawiono przykład bloku transformatorowo-prostowniczego trójfazowego, 6-pulsowego.



**Rys. 4.90.** Blok transformatorowo-prostowniczy trójfazowy, 6-pulsowy, gdzie: K – kato-  
da diody; A – anoda diody; DA+, DB+, DC+ – diody prostownicze „plusowe”;  
DA-, DB-, DC- – diody prostownicze „minusowe”;  $e_{1AN}$ ,  $e_{1BN}$ ,  $e_{1CN}$  – przebieg  
siły elektromotorycznej źródła prądu przemiennego prądnicy trójfazowej, tu tak-  
że przebieg siły elektromotorycznej na uzwojeniach pierwotnych transformatora  
trójfazowego Tr;  $e_{2an}$ ,  $e_{2bn}$ ,  $e_{2cn}$  – przebieg siły elektromotorycznej na uzwojeniach  
pierwotnych transformatora trójfazowego Tr; Tr – transformator; G – źródło prądu  
przemiennego;  $R_{obc}$  – rezystancja obciążenia (odbiornika energii elektrycznej)

#### 4.5.1.3. Podstawy działania transformatora

##### Podstawowe zjawiska zachodzące w transformatorze

Transformator jest to maszyna elektryczna, przeznaczona do zmiany parametrów energii elektrycznej drogą sprzężenia magnetycznego [73, 108, 120, 199]. W uproszczeniu transformator tworzą dwie cewki indukcyjne (rys. 4.91). Transformator zwiększa lub zmniejsza napięcie na wyjściu. Decyduje o tym przekładnia transformatora, czyli iloraz uzwojeń wyjściowych w stosunku do liczby uzwojeń na wejściu. Transformator jest prostym przetwornikiem amplitudy napięcia zacho-

wującym częstotliwość nośną. Zgodnie z zasadą zachowania bilansu mocy pozornej, kiedy podwyższy się napięcie za pomocą transformatora np. dwukrotnie, to prąd w uzwojeniu pracującym na dwukrotnie wyższym napięciu będzie dwukrotnie niższy. Jednocześnie zapewnia separację galwaniczną pomiędzy obwodem wejściowym a wyjściowym. Podczas nawijania uzwojeń należy zachowywać kierunek nawijania taki, aby każde z uzwojeń wywoływało ten sam zwrot wektora strumienia magnetycznego (zgodnie z regułą prawej ręki zgiętej). Dla transformatorów obowiązują zasady istotne przy projektowaniu bloków transformatorowo-prostowniczych:

1. Prawo zachowania mocy – iloczyn napięcia oraz natężenia prądu przyłożonego na cewkę uzwojenia pierwotnego jest równy iloczynowi napięcia oraz natężenia prądu przyłożonego na cewkę uzwojenia wtórnego, tj.:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad (4.44)$$

stąd po przekształceniu powszechnie używany w praktyce wzór:

$$\frac{\bar{U}_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (4.45)$$

2. Przekładnia transformatora – iloczyn napięcia oraz natężenia prądu przyłożonego na cewkę uzwojenia pierwotnego jest równy iloczynowi napięcia oraz natężenia prądu przyłożonego na cewkę uzwojenia wtórnego, tj.:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{z_1}{z_2} \quad (4.46)$$

3. Prawo przepływu – wartość chwilowa strumienia magnetycznego wytwarzanego w rdzeniu transformatora jest równa iloczynowi wartości prądu i liczby zwojów.
4. Prawo indukcji – podobnie jak w maszynach elektrycznych, gdzie w polu magnetycznym stojana przemieszcza się przewód elektryczny, w transformatorze przewód elektryczny jest zamontowany w jednym miejscu, a przemieszcza się strumień magnetyczny z częstotliwością sieci, np.  $f = 400$  Hz, stąd dla transformatora SEM indukowana:

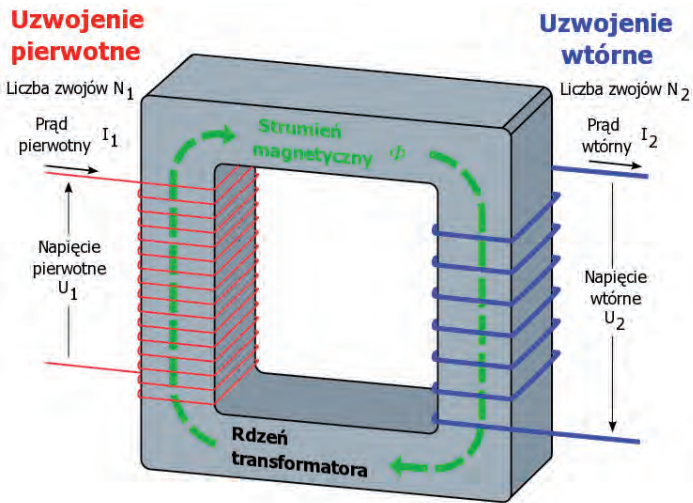
$$E_1 = 4,44 z_1 \Phi_m f \quad (4.47)$$

$$E_2 = 4,44 z_2 \Phi_m f \quad (4.48)$$

Stąd jednocześnie wynika zależność, że dla wyższej częstotliwości do wytworzenia określonej wartości napięcia na wyjściu potrzebna jest mniejsza wartość strumienia magnetycznego niż dla mniejszej częstotliwości. Stąd transformatory o częstotliwości 400 Hz mają do przeniesienia tej samej mocy 8-krotnie mniejsze pole poprzeczne przekroju kolumny transformatora niż dla 50 Hz. Pole przekroju poprzecznego transformatora pracującego przy częstotliwości 50 Hz można obliczyć ze wzoru empirycznego:

$$S = \sqrt{U_1} \cdot \sqrt{I_1} \quad (4.49)$$

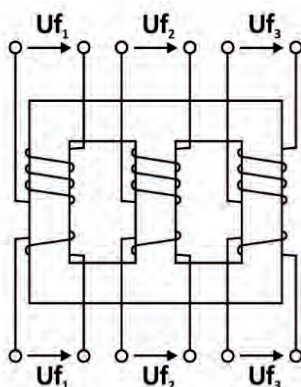
gdzie:  $S$  – pole przekroju poprzecznego rdzenia [ $\text{cm}^2$ ],  $U_1$  – wartość skuteczna napięcia wejściowego,  $I_1$  – wartość skuteczna natężenia prądu w uzwojeniu wejściowym.



Rys. 4.91. Transformator jednofazowy

### Konfiguracje geometryczne połączeń uzwojeń transformatora

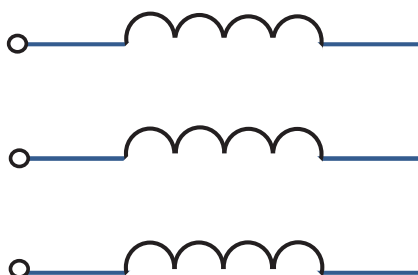
Obecnie bloki transformatorowo-prostownicze korzystają z sieci trójfazowej 115/200 V, 400 Hz, dlatego też stosuje się w nich transformatory trójfazowe (rys. 4.92).



**Rys. 4.92.** Transformator trójfazowy

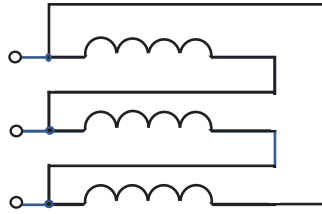
W transformatorach trójfazowych stosowane są trzy układy połączeń: w gwiazdę, trójkąt i zygzak (rys. 4.93–4.95) [74, 75, 199]. Połączenia te oznaczają się określonymi symbolami graficznymi i literowymi, mają także znormalizowane oznaczenia końcówek wyprowadzeń uzwojenia pierwotnego i wtórnego. Oznaczenia te są następujące:

- a) końce uzwojeń transformatora oznaczają się dużymi literami A, B, C, oraz przewód neutralny N;
- b) strony transformatora (górną, średnią i dolną) oznaczają się cyframi umieszczonymi przed literą oznaczającą fazę, np. 1A, 2A, 3A, przy czym cyfra 1 odpowiada stronie górnego napięcia, cyfra 2 – średniego, a cyfra 3 – dolnego napięcia. Końcówki uzwojeń oznaczają się cyframi umieszczonymi za literą. Cyfra 1 oznacza początek, a cyfra 2 koniec uzwojenia. W przypadku gdy jedno uzwojenie transformatora jest podzielone na części, końce poszczególnych części uzwojenia oznaczają się kolejnymi cyframi: 3, 4 itd.

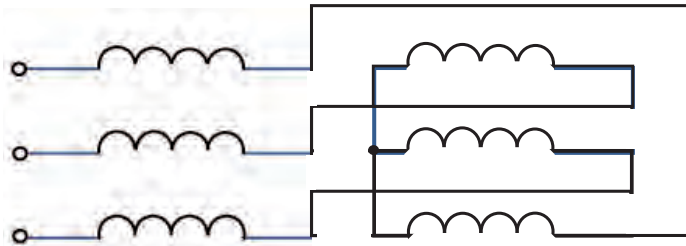


**Rys. 4.93.** Uzwojenie transformatora trójfazowego połączone w gwiazdę „Y”





**Rys. 4.94.** Uzwojenie transformatora trójfazowego połączone w trójkąt „D”



**Rys. 4.95.** Uzwojenie transformatora trójfazowego połączone w zygzak „Z”

Uzwojenie pierwotne i wtórne transformatora są zwykle łączone w gwiazdę (Y,y) lub w trójkąt (D, d), co oznacza się odpowiednimi symbolami przedstawionymi w tabeli 4.1. Układ gwiazda-zygzak (Y, z) spotyka się często w układach oświetleniowych ze względu na wynikającą z tego rozwiązani większą równomierność obciążenia po stronie wtórnej.

Układy połączeń uzwojeń w transformatorach trójfazowych są oznaczane symbolem połączeń tego układu. Symbol składa się z liter i cyfr. Symbol literowy określa sposób połączeń uzwojeń [74, 75, 199]:

- duże litery Y – gwiazda, D – trójkąt – dla napięć pierwotnych<sup>5</sup>,
- małe litery y – gwiazda, d – trójkąt, z – zygzak – dla napięć wtórnych,
- litera N – oznacza wyprowadzenie zacisku neutralnego uzwojenia pierwotnego na listwę zaciskową,
- litera n – oznacza wyprowadzenie zacisku neutralnego uzwojenia wtórnego na listwę zaciskową.

Zasadę oznaczania końcówek uzwojeń transformatora trójfazowego przedstawiono w schematach połączeń w tabeli 4.1.

<sup>5</sup> Dotyczy transformatorów zmniejszających napięcie (stosowanych w lotnictwie do 2000 r.). Dla transformatorów zwiększających napięcie relacje wielkości liter będą dokładnie odwrotne. Uniwersalną zasadą jest stosowanie wielkich liter dla wyższego napięcia transformatora, a małych dla niższego.

Tabela 4.1

Podstawowe układy połączeń uzwojeń transformatorów trójfazowych [74]

Układ połączeń	Schemat połączeń	Symbol graficzny	Oznaczenie literowe		Wyszczególnienie
			uzwojenie górne	uzwojenie dolne	
Gwiazda			Y	y	Początki lub końce uzwojenia są wyprowadzone i przyłączone do zacisków. Początkami uzwojeń na jednej kolumnie nazywa się umownie zaciski, które dla pewnej wybranej chwili mają wyższy potencjał od drugich zacisków w parach przynależnych do danego uzwojenia. $U = \sqrt{3} \cdot U_f, \quad I = I_f$
Trójkąt			D	d	Powstaje przez połączenie końca pierwszej fazy z początkiem drugiej, końca drugiej z początkiem trzeciej, a końca trzeciej z początkiem pierwszej. $U = U_f, \quad I = \sqrt{3} \cdot I_f$
Zygzak			—	z	Układ ten umożliwia rozłożenie przepływu wywołanego prądem jednej fazy na dwie kolumny. Połączenie w zygzak tworzy się, łącząc szeregowo dwie połowki uzwojenia umieszczone na dwóch kolumnach w sposób cykliczny (obie połowki uzwojenia muszą być połączone przeciwnie). Wolne końce jednych połówek łączy się w gwiazdę, natomiast wolne końce drugich połówek wyprowadza się na tabliczkę zaciskową. $U_f = \frac{\sqrt{3}}{2} U, \quad I_f = I$

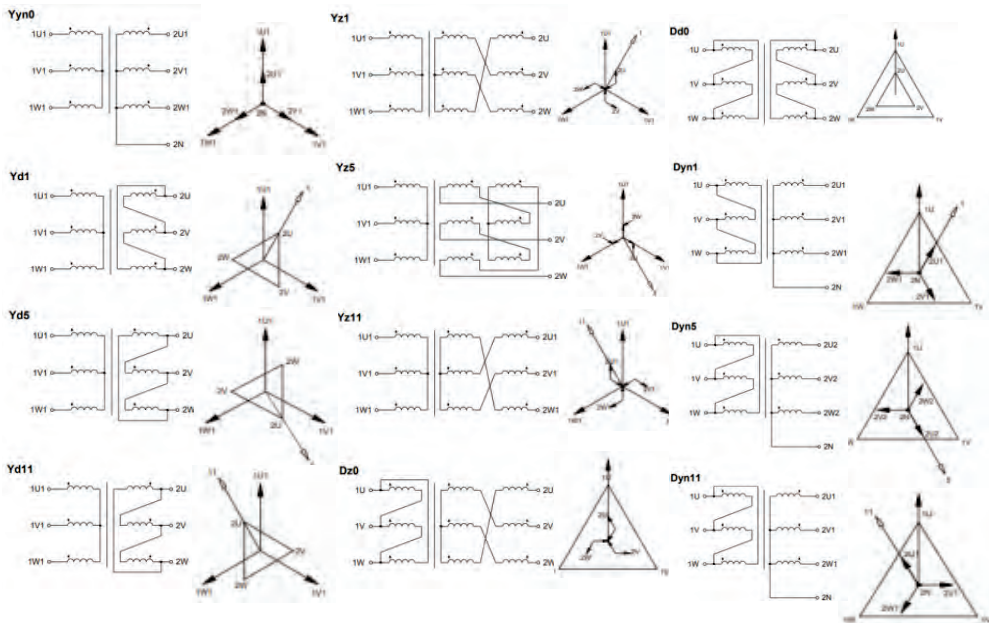
#### 4.5.1.4. Możliwości kształtowania przesunięć fazowych poprzez zmianę konfiguracji geometrii połączeń pomiędzy uzwojeniami

##### Układy i grupy połączeń transformatorów trójfazowych

Symbol cyfrowy określa wzajemne przesunięcie wskazu napięcia wyjściowego (np. 2U) w stosunku do wskazu napięcia wejściowego (1U). Przesunięcie fazowe wyrażone jest w godzinach od 0 do 11, zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Np. układ połączeń Dy5 oznacza przesunięcie fazowe napięcia 2U w stosunku do napięcia 1U o 5 godzin. Jedna godzina jest równa przesunięciu o 30° elektrycznych.

##### Wybór grupy połączeń uzwojeń w transformatorach trójfazowych

W praktyce najczęściej spotykamy się z następującymi układami połączeń: Yy, Dy, Yd, Yz oraz Dz (rys. 4.96). Dodatkowo uzwojenia połączone w gwiazdę i zygzak mają punkt zerowy, który może być wyprowadzony bądź utajniony.



**Rys. 4.96.** Najczęściej stosowane układy (grupy) połączeń transformatorów trójfazowych dwuzwojeniowych [108]

Prawidłowy wybór układu połączeń transformatorów trójfazowych uzależniony jest od kilku czynników:

1. układu zasilającego transformator:
  - transformator zasilany z sieci (trójprzewodowej, czteroprzewodowej),
  - transformator zasilany z przekształtnika;
2. mocy transformatora;
3. poziomu napięć;
4. niesymetrii obciążenia:
  - niesymetria obciążenia przy zasilaniu symetrycznym układem napięć,
  - niesymetria obciążenia wynikająca z niesymetrycznego układu napięć zasilających;
5. względów ekonomicznych (koszt budowy transformatora o różnych układach połączeń).

1. **Układ Yy** połączeń uzwojeń stosuje się głównie w transformatorach o małych mocach znamionowych zasilających symetryczne odbiory trójfazowe. Czasami połączenie to stosuje się do układów o dużych mocach znamionowych, w których zachodzi potrzeba uziemienia punktów zerowych połączeń gwiazdowych.

Układ ten jest niekorzystny ze względu na konieczność ograniczania szkodliwego wpływu braku harmonicznych rzędu  $v = 3n$  ( $n = 1, 3, 7, \dots$ ) w prądzie jałowym przy zasilaniu z sieci trójprzewodowej. Układ ten jest niekorzystny również przy obciążeniu niesymetrycznym (prądy składowej zerowej), gdy wyprowadzony jest punkt zerowy połączenia w gwiazdę uzwojeń wtórnych. Stwarza to konieczność wprowadzenia dodatkowego uzwojenia, tzw. kompensacyjnego, połączonego w trójkąt.

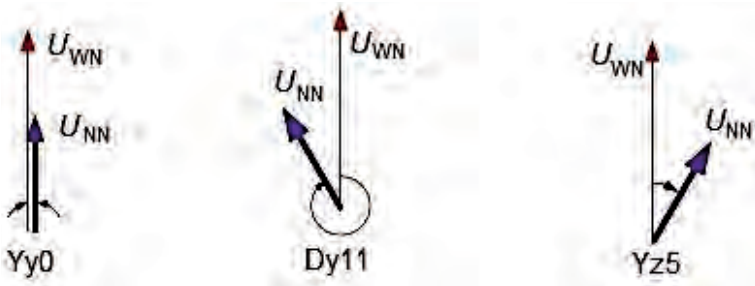
2. **Układ Dy** połączeń uzwojeń stosuje się głównie w transformatorach obniżających napięcie, z reguły o większych mocach znamionowych. Transformatory z takimi układami połączeń uzwojeń pracują w układach zasilania sieci rozdzielczych niskiego napięcia i mają zwykle wyprowadzony punkt zerowy połączenia gwiazdowego, by można było korzystać z napięć międzyprzewodowych i fazowych. Połączenie to jest bardzo korzystne ze względu na zmniejszenie strumieni trzecich harmonicznych oraz prądów składowej zerowej przy obciążeniu niesymetrycznym.
3. **Układ Yd** połączeń uzwojeń stosuje się głównie w transformatorach podwyższających napięcie. Transformator z takim układem połączeń jest korzystny, gdy punkt zerowy połączenia w gwiazdę strony pierwotnej ma być uziemiony bezpośrednio lub przez dławik. Połączenie uzwojeń w trójkąt po stronie pierwotnej lub wtórnej jest ze względu na prąd magnesujący bardzo korzystne, gdyż prąd trzeciej harmonicznej płynie w zwartym obwodzie trójkąta i strumień trzeciej harmonicznej praktycznie się nie pojawia.
4. **Układ Yz** oraz **Dz** połączeń uzwojeń stosuje się w transformatorach obniżających napięcie o małych mocach znamionowych. W układach tych punkt zerowy połączenia uzwojeń w zygzak jest wyprowadzony, aby można było korzystać z napięć fazowych. Rozwiązanie takie stosowane jest rzadko, głównie ze względów ekonomicznych. Porównując np. gwiazdę z zygzakiem, przy tych samych prądach znamionowych oraz takich samych przekrojach przewodów, dochodzimy do wniosku, że liczba zwojów zygzaka przy tym samym napięciu międzyprzewodowym jest  $2/3$  razy większa od liczby zwojów gwiazdy, a zatem koszt miedzi w zygzaku jest o ponad 15% większy niż przy gwieździe. Dlatego zastosowanie tych układów połączeń ogranicza się przede wszystkim do zasilania odbiorów niesymetrycznych (np. przy znaczącym udziale odbiorów jednofazowych), a zależy nam na symetrycznym rozkładzie napięć fazowych po stronie wtórnej transformatora.

Prawidłowy wybór grupy połączeń ma bardzo duży wpływ na prawidłową pracę transformatora. Powyżej przedstawiono tylko podstawowe właściwości i cechy poszczególnych układów połączeń. Często zachodzi potrzeba głębszej analizy ca-

łego układu pod względem współpracy transformatora z układami przekształtnikowymi, niesymetrycznym obciążeniem lub zasilaniem.

### Grupy połączeń transformatora

Grupą połączeń transformatora nazywany jest kąt między wektorami górnego i dolnego napięcia, wyrażony w godzinach. Zestawiając różne układy połączeń uzwojeń po obu stronach transformatora, otrzymuje się różne grupy połączeń transformatorów trójfazowych. Ma to istotny wpływ na charakter magnesowania rdzenia transformatora trójfazowego. W zależności od sposobu połączeń obu uzwojeń transformatora można uzyskać różne przesunięcia fazowe między napięciami po stronie wysokiego i niskiego napięcia (rys. 4.97).



Rys. 4.97. Przesunięcia fazowe między napięciami  $U_{WN}$  i  $U_{NN}$

Dla układów gwiazda, trójkąt i zygzak kąty przesunięcia fazowego są zawsze wielokrotnością kąta  $30^\circ$ . Kątowi  $30^\circ$  odpowiada jedna godzina, dlatego wygodniej jest podawać przesunięcie fazowe między napięciami jako tzw. przesunięcie godzinowe (np. grupa Dy11 = kątowi przesunięcia fazowego  $330^\circ$ ). Kąt ten jest mierzony od napięcia górnego do dolnego w kierunku zgodnym z następstwem faz, czyli określa, o ile napięcie dolne opóźnia się w fazie względem napięcia górnego (rys. 4.97).

Dla każdego transformatora trójfazowego podaje się grupę połączeń, która zawiera symbole połączeń strony napięcia oraz kąt przesunięcia fazowego między odpowiadającymi sobie napięciami międzyfazowymi (tabela 4.2).

Przy układzie połączeń w gwiazdę są możliwe tylko dwie grupy: grupa Yy0 oraz Yy6, niezależnie od tego, czy zmiana zacisków jednego z uzwojeń nastąpiła po stronie górnego czy dolnego napięcia. Znacznie więcej grup połączeń może powstać dla transformatora, którego jedno z uzwojeń jest połączone w gwiazdę, natomiast drugie w trójkąt. Równie dużo grup połączeń można uzyskać przy łączeniu jednego z uzwojeń transformatora w gwiazdę, a drugiego w zygzak.

Tabela 4.2

Grupy połączeń transformatorów trójfazowych zalecane do pracy równoległej [108]

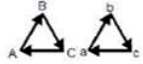

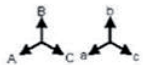



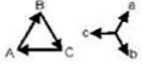

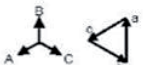

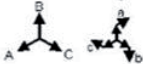



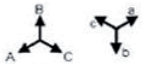

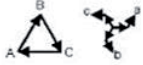

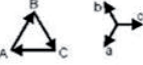

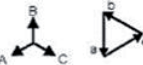



Symbol grupy łączeniowej	Kąt przesunięcia fazowego	Układ połączeń uzwojeń		Przekładnia napięciowa $n_u$
		górne	dolne	
Yy0	0			$n_z$
Dy5	$\frac{5}{6} \pi$			$\frac{1}{\sqrt{3}} n_z$
Yd5				$\sqrt{3} n_z$
Yz5				$\frac{2}{\sqrt{3}} n_z$
Dy11	$\frac{11}{6} \pi$			$\frac{1}{\sqrt{3}} n_z$
Yd11				$\sqrt{3} n_z$
Yz11				$\frac{2}{\sqrt{3}} n_z$

Praca równoległa transformatorów wymaga ograniczenia grup połączeń. Zaleca się stosowanie tylko następujących grup połączeń: Yy9, Dy5, Yd5, Yz5, Dy11, Yd11 oraz Yz11 (tabela 4.3).

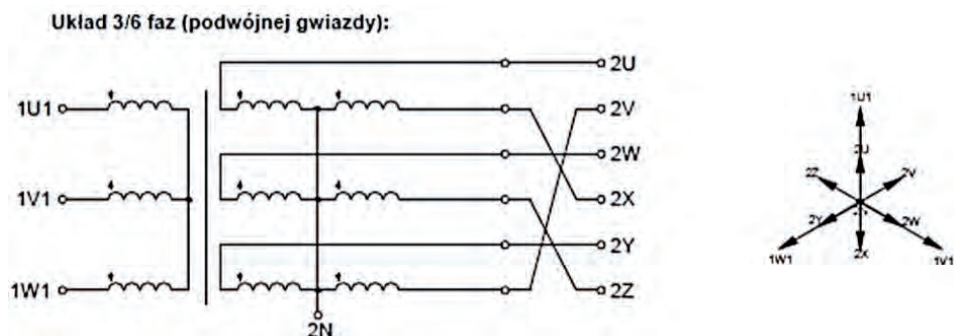
Tabela 4.3

Grupy połączeń transformatorów trójfazowych zalecane do pracy równoległej wraz z wykresami wskazowymi [108]

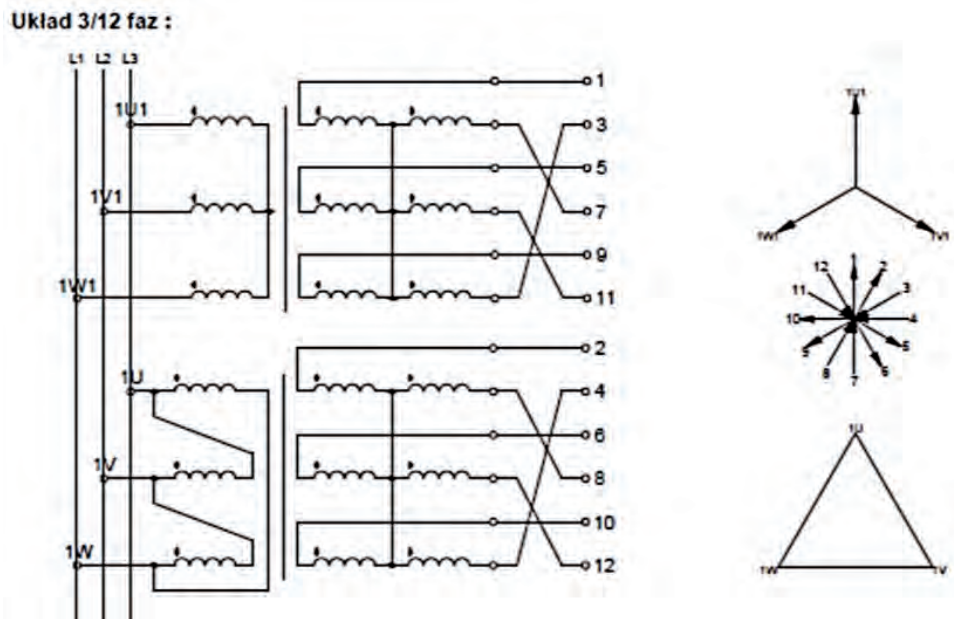
Schemat połączeń	Nazwa	Symbol Literowy PRI/SEC	uwagi
	gwiazda	Y/y	Możliwość wyprowadzenia punktu zerowego. Stosowane zwykle do sieci czteroprzewodowej.
	trójkąt	D/d	Niedostępny punkt zerowy. Stosowane zwykle do sieci trójprzewodowej
	zygzak	Z/z	Możliwość wyprowadzenia punktu zerowego. Stosowane zwykle dla dużych niesymetrii obciążenia.

Grupa połączeń	Wykresy wskazowe	Diagramy połączeń	Punkt zerowy
Dd0			Niedostępny
Yy0			Obciążenie do ok. 10%
Dz0			Obciążenie w 100%
Dy5			Obciążenie w 100%
Yd5			Niedostępny
Yz5			Obciążenie w 100%
Dd6			Niedostępny
Yy6			Obciążenie do ok. 10%
Dz6			Obciążenie w 100%
Dy11			Obciążenie w 100%
Yd11			Niedostępny
Yz11			Obciążenie w 100%

W literaturze [108] pojawiają się informacje o szczególnych (specjalnych) konfiguracjach połączeń transformatorów dostosowanych do prostowników 6- lub 12-pulsowych. Najczęściej stosowane są w tym celu układy połączeń transformatorów trójfazowych, wielouzwojeniowych, zmieniających liczbę i kolejności połączeń (rys. 4.98 i 4.99).



**Rys. 4.98.** Układ połączeń transformatora trójfazowego gwiazda/podwójna gwiazda stosowany przy prostownikach sześciopulsowych [108]



**Rys. 4.99.** Układ połączeń transformatora trójfazowego gwiazda/podwójna gwiazda stosowany przy prostownikach 12-pulsowych [108]

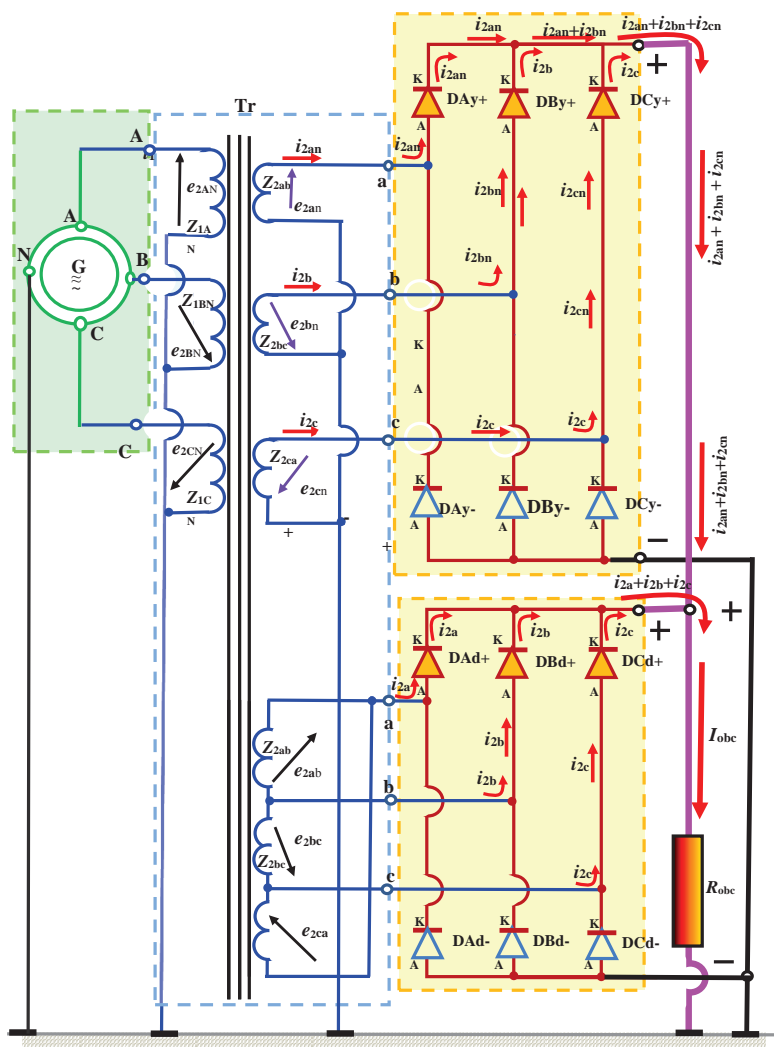


#### 4.5.1.5. Rola biernego filtra elektrycznego w strukturze bloku transformatorowo-prostowniczego

Filtry elektryczne dzielimy na bierne i aktywne. Filtry bierne są złożone z elementów R, L, C. Filtry aktywne mają w swej strukturze wzmacniacze operacyjne i umożliwiają zwiększenie stromości pasma charakterystyki tłumienia. W niniejszej monografii będą omówione tylko filtry bierne.

Układ elektroniczny bloku transformatorowo-prostowniczego sześciopulsowego jest podobny do układu dwupulsowego. Jednakże w BTP sześciopulsowym zamiast transformatora dwufazowego zastosowano transformator trójfazowy z sześcioma odczepami. Blok transformatorowo-prostowniczy sześciopulsowy pod kątem idei podłączenia nie różni się praktycznie wiele od BTP dwupulsowego. Tak samo od każdego odczepu uzwojenia wtórnego transformatora odchodzą po dwie diody prostownicze – jedna przyłączona do danego odczepu uzwojenia wyjściowego transformatora katodą, a druga anodą do górnego odczepu uzwojenia wyjściowego transformatora (dioda DA<sup>+</sup> od strony anody (A), a dioda DA – od strony katody).

Blok transformatorowo-prostowniczy 12-pulsowy (rys. 4.100) nie różni się praktycznie pod kątem idei wiele od BTP sześciopulsowego. Tak samo od każdego odczepu uzwojenia wtórnego transformatora odchodzą po dwie diody prostownicze – jedna przyłączona do danego odczepu uzwojenia wyjściowego (rys. 4.100, szczegół  $z_2$ : dla uzwojeń wtórnych połączonych w gwiazdę:  $Z_{2an}$ ;  $Z_{2bn}$ ;  $Z_{2cn}$ ;) transformatora katodą, a druga anodą do górnego odczepu uzwojenia wyjściowego transformatora: dioda D1 od strony anody (A), a dioda D4 od strony katody. Według literatury [265] z dziedziny naziemnych sieci elektroenergetycznych, zastosowanie układu 12-pulsowego w miejsce sześciopulsowego przynosi duże korzyści, gdyż ulegają wyraźnemu zmniejszeniu 5 i 7 harmoniczna sieci zasilającej. Jednocześnie autorzy ww. opracowania twierdzą, że dla naziemnych urządzeń elektroenergetycznych poniżej 1000 kW bardziej opłacalne jest stosowanie układu sześciopulsowego z zastosowaniem układów filtracyjnych. Autorzy niniejszej monografii z kolei uważają, że dla lotniczych BTP wartość „opłacalności” stosowania BTP 12-pulsowych należy przenieść do poziomu 10 kW, co wynika zarówno ze zwiększonej częstotliwości lotniczych prądnic pokładowych, jak i ze znacznie większej odpowiedzialności i zwiększonych wymagań dla systemów statków powietrznych w stosunku do naziemnej techniki elektroenergetycznej. Autorzy są przekonani, że dla BTP o mocach wyższych niż 10 kW korzystne byłoby zastosowanie w konstrukcjach lotniczych BTP 24-pulsowych, co jednak wymaga dodatkowych analiz, obliczeń i symulacji komputerowych wychodzących poza ramy niniejszej pracy.



**Rys. 4.100.** Schemat ideowy bloku transformatorowo-prostowniczego 12-pulsowego

Konieczność stosowania filtrów elektrycznych wynika z przyczyn praktycznych – ich brak, zgodnie z literaturą [219], powoduje:

1. Wzrost temperatury pracy odbiorników energii elektrycznej:
  - silników (np. silnik wentylatora BTP),
  - generatorów (np. prądnicy pokładowej),
  - transformatorów.
2. Wzrost wartości szczytowych napięcia, prądu i mocy dla odbiorników o znacznej pojemności – efektem mogą być uszkodzenia kondensatora:

- wyładowania niezupełne w dielektryku,
  - zwarcie końców folii,
  - trwałe uszkodzenie (przebiecie) izolacji,
  - przepływ przez dielektryk dodatkowych prądów – dodatkowe straty mocy, skrócenie czasu eksploatacji.
3. Zwiększenie iskrzenia i skrócenie żywotności wyłączników.
  4. Przyspieszony proces starzenia przewodów elektrycznych w wyniku zwiększenia się temperatury pracy – wzrost strat na skutek:
    - zwiększenia temperatury żyły przewodzącej w wyniku zwiększenia lokalnej gęstości prądu – tzw. zjawisko naskórkowości: składowe wyższych częstotliwości płyną przez żyłę przewodzącą tylko po powierzchni drutu,
    - zwiększenia zjawiska pojemnościowego sprzężenia pomiędzy sąsiednimi przewodami oraz pomiędzy przewodami przylegającymi do kadłuba statku powietrznego a kadłubem.

W celu poprawy własności układów prostownikowych stosuje się w nich elementy reaktancyjne:  $R$ ,  $L$  i  $C$ . Spełniają one dwa podstawowe zadania:

- a) zmniejszają tętnienia,
- b) magazynują energię, gdy wartość chwilowa ma dużą wartość, i zwracają ją, gdy wartość chwilowa ulega zmniejszeniu.

Elementy  $L$  i  $C$  w zastosowaniach do filtracji układów prostowniczych łączy się z wyjściem prądu stałego po wyprostowaniu przez układ diod prostowniczych w konfiguracji:

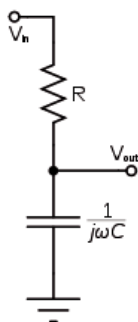
1. pojemnościowe  $C$  – równoległe do obciążenia,
2. indukcyjne  $R$ ,  $L$  – szeregowo do obciążenia.

Istnieją dwa podstawowe sposoby zmniejszania zawartości wyższych harmonicznych z wyjścia lub z wejścia BTP:

1. zwieranie wyższych częstotliwości – dokonuje się tego zwykle poprzez równoległe podłączenie do wyjścia (lub wejścia) BTP:
  - a) kondensatora,
  - b) układu rezonansowego szeregowego LC – zwierane są wówczas tylko harmoniczne w pewnym paśmie;
2. zwiększanie impedancji w linii (w linii przewodu plusowego wyjściowego BTP albo w przewodzie fazowym prądnicy trójfazowym) dla wyższych harmonicznych – realizuje się to zwykle poprzez włączenie w szereg dławika – zwiększa to jednak rezystancję w linii (a więc zmniejsza wartość napięcia użytecznego) i zwiększa ciężar konstrukcji.

**Filtr dolnoprzepustowy RC** (rys. 4.101) jest niczym innym jak członem całkującym. Układ RC ma najlepsze właściwości filtracji wyższych harmonicznych przy

znacznych rezystancjach obciążenia i dlatego jest stosowany w blokach prostowniczych jednofazowych małej mocy (rzędu do 1000 W).



**Rys. 4.101.** Filtr dolnoprzepustowy RC pierwszego rzędu

Filtr RC pierwszego rzędu składa się z rezystora włączonego szeregowo z odbiornikiem oraz kondensatora włączonego równolegle do odbiornika. Dla niskich częstotliwości kondensator ma dużą reaktancję, więc sygnał płynie do obciążenia. Przy wyższych częstotliwościach reaktancja kondensatora zmniejsza się i zaczyna on zachowywać się bardziej jak zwarcie, nie dopuszczając sygnału do obciążenia. Wielkością charakteryzującą taki układ jest transmitancja [12, 34, 76, 81, 98, 99, 126, 147, 152, 159, 188, 234] określana jako stosunek napięcia wyjściowego do wejściowego i często zapisuje się ją w postaci operatorowej:

$$G(\omega) = \frac{1}{\tau \cdot \omega + 1} \quad (4.50)$$

gdzie:  $\tau$  – stała czasowa,  $\omega$  – pulsacja;

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (4.51)$$

$$\tau = R \cdot C \quad (4.52)$$

Częstotliwość graniczna przedstawionego układu filtra wynosi:

$$G(\omega) = \frac{1}{\tau \cdot \omega + 1} \quad (4.53)$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{R \cdot C}} \quad (4.54)$$

czyli pulsacja:

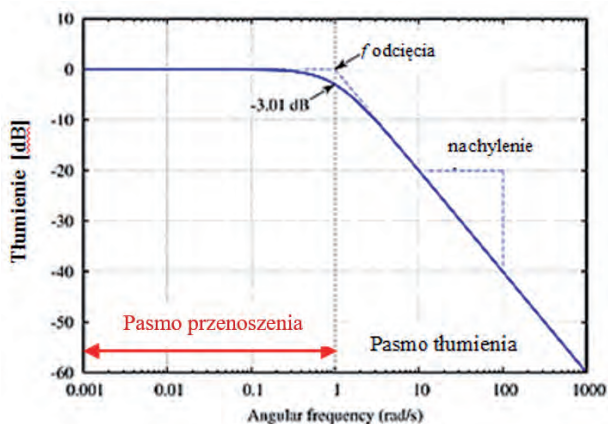
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R \cdot C}} \quad (4.55)$$

wartość wzmocnienia/tłumienia  $k$  filtra dolnoprzepustowego RC można określić wzorem:

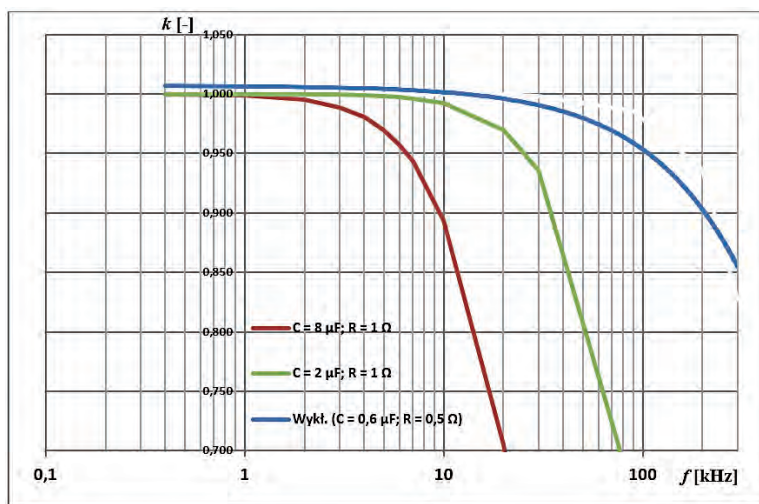
$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \cdot R \cdot C)^2}} \quad (4.56)$$

Charakterystyka amplitudowa  $k = f(\omega)$  filtra wraz ze wzrostem częstotliwości (pulsacji) zmniejsza swoją wartość – im większa częstotliwość składowej pulsacji na wyjściu BTP, tym mniejsza jest wartość  $k$  (rys. 4.102 i 4.103). Przy spadku o 3 dB w stosunku do maksymalnej wartości  $k$  (0,707 maksymalnej wartości  $k$ ) wyznacza się formalnie wartość pulsacji granicznej, w tym miejscu kończy się formalnie pasmo przenoszenia filtra. Zwykle dobiera się częstotliwość graniczną równą częstotliwości pulsacji, tj. dla 18-pulsowego prostownika zasilanego z sieci 400 Hz –  $f_0 = 7,2$  kHz. Im większa jest wartość pojemności, tym bardziej stroma jest charakterystyka i częstotliwości powyżej  $f_0$  są silniej tłumione. Stromość tej charakterystyki można zwiększyć poprzez stosowanie wielokrotnego filtra RC. Jednakże w literaturze fachowej [266] z dziedziny elektroniki przestrzega się konstruktorów, że charakterystyka wypadkowa wielokrotnego filtra dolnoprzepustowego RC w praktyce nie jest sumą charakterystyk kilku identycznych charakterystyk sekcji składowych RC. Powodem jest znaczące wzajemne obciążanie się sąsiednich stopni, powodujące zmianę wypadkowej charakterystyki rzeczywistej układu filtrującego w stosunku do teoretycznej charakterystyki sumacyjnej. Należy pamiętać, że obliczeniowe (teoretyczne) charakterystyki filtrów RC otrzymuje się przy założeniu zerowej impedancji źródła zasilania oraz nieskonczenie dużej impedancji obciążenia. Jednym z rozwiązań tego problemu jest takie dobranie sekcji filtra, aby kolejna sekcja miała znacznie większą impedancję niż sekcja ją poprzedzająca.

Z kolei większa pojemność to zwiększenie przesunięcia fazowego – przy zbyt dużej wartości pojemności w stanach przejściowych oscylacje napięcia mogą być zbyt słabo tłumione, stąd konieczność stosowania filtra (rys. 4.104). Ponadto po odłączeniu odbiornika lub skokowym zmniejszeniu jego wartości na wyjściu BTP powstają „zawisy” napięcia, których czas trwania jest wprost proporcjonalny do pojemności.

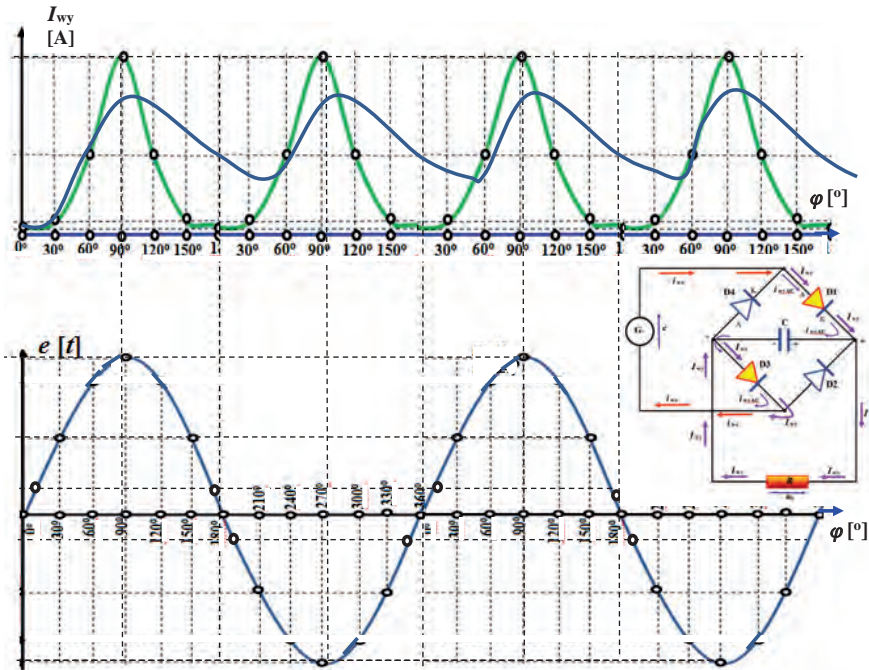


Rys. 4.102. Przykładowa charakterystyka ogólna filtra dolnoprzepustowego RC



Rys. 4.103. Przykładowa charakterystyka filtra dolnoprzepustowego RC dla przykładowych danych

**Zwiększenie impedancji szeregowej w linii na wyjściu prostownika zmniejsza wartość składowej stałej napięcia wyprostowanego.** W układach trójfazowych o większej mocy stosuje się dławiki indukcyjne. Dzięki temu ze wzrostem indukcyjności maleje liczba i amplituda składowych harmonicznych wyższych rzędów. W stosunku do filtrów RC, w praktycznym zastosowaniu dławiki dają znacznie ostrzejsze charakterystyki tłumienia częstotliwościowego, jednakże mają znacznie większą masę.



Rys. 4.104. Prostowanie przez mostek Gretza – prostowanie dwupołówkowe, gdzie: 1 – przebieg chwilowej wartości prądu wyjściowego po wyprostowaniu dwupołówkowym przez mostek Gretza; e – przebieg siły elektromotorycznej źródła prądu przemiennego przyłożone na wejście mostka Gretza; 1 – C kondensator; 2 – przebieg chwilowej wartości prądu wyjściowego po „wygładzeniu” przez kondensator

**Zwieranie wyższych częstotliwości poprzez równoległe podłączenie do wyjścia BTP układu rezonansowego szeregowego LC** jest w pewnym sensie bardzo wydajnym, jeśli chodzi o stromość charakterystyki tłumienia oraz pod kątem ciężaru, sposobem walki ze szkodliwymi harmonicznymi. W czasie projektowania takiego filtra, zgodnie z literaturą [248], należy zapewnić największe tłumienie dla harmonicznej najniższego rzędu występującej w sygnale wyjściowym BTP, nawet jeśli nie ma ona wartości dominującej. Zainstalowanie filtra o większej częstotliwości własnej powoduje wzrost odkształcenia napięcia, a także może być przyczyną uszkodzenia BTP lub odbiorników. Filtr rezonansowy ma też „ukrytą” wadę systemową – eliminuje bardzo skutecznie harmoniczne, ale tylko w dosyć wąskim paśmie. Ma to kardynalne znaczenie dla układów zasilanych z prądnic prądu przemiennego o niestabilizowanej częstotliwości (np. prądnica SGO-8 zmienia swoją częstotliwość w granicach 360–900 Hz). Oczywiście można poszerzyć szerokość pasma tłumienia poprzez [2, 7, 19, 75, 76, 96]:

- a) dla pojedynczego układu rezonansowego – zwiększenie rezystancji w obwodzie (zwiększenie rezystancji włączonej w szereg lub równoległe do dławika) – zmniejsza to jednocześnie wartość tłumienia;
- b) zastosowanie dwóch równoległych obwodów rezonansowych:
  - jednego nastrojonego na dolną częstotliwość planowanego pasma tłumienia;
  - drugiego nastrojonego na górną częstotliwość planowanego pasma tłumienia – zwiększa to koszty i masę, ale utrzymuje wysoką skuteczność tłumienia.

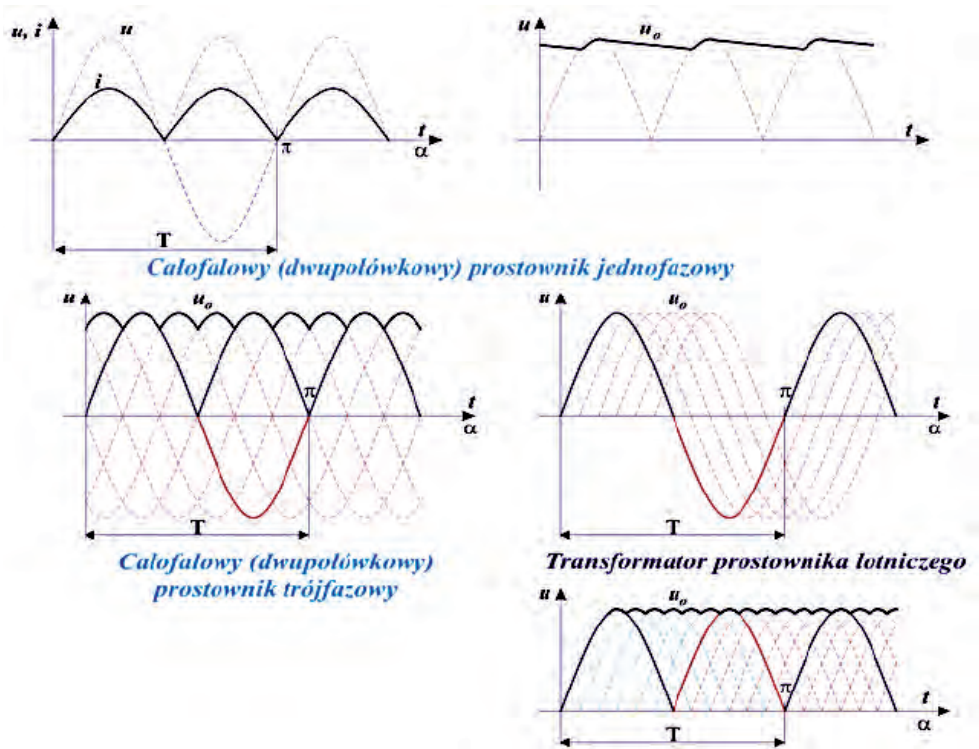
#### 4.5.1.6. Schematy i charakterystyki prostowników

Pomimo zmniejszenia masy i kosztów związanych z wymianą komutatorowych prądnic prądu stałego na bloki transformatorowo-prostownicze nie wszystkie parametry jakości energii elektrycznej spełnianej przez ww. prądnice udało się wprost osiągnąć:

1. Nie udało się wprowadzić regulacji napięcia wyjściowego – stosowane do regulacji napięcia wyjściowego półprzewodnikowych zasilaczy w układach naziemnych tyrystory swoją regulację opierały na ucinaniu części sinusoidy – dla małych kątów otwarcia powodowało to wytwarzanie wysokiej amplitudy harmonicznych o bardzo szerokim spektrum „wchodzącym” nawet w pasma radiowe – oparte na takim sposobie niektóre lotniskowe urządzenia elektroenergetyczne powodowały utrudnienie komunikacji radiowej pilota z wieżą kontrolną; ostatecznie powstały konstrukcje prostowników opartych na diodach (przykładowe przebiegi napięć wejściowych i wyjściowych z prostowników przedstawiono na rys. 4.105).
2. Zastosowane prostowniki sześciopulsowe (dwupółokowe prostowanie w każdej z faz) miały na wyjściu wysoką wartość 6 harmonicznej, tj. dla  $f_6 = 2400$  Hz. Do jej zredukowania nie wystarczało już stosowane dotychczas (w sieciach prądu stałego opartych na komutatorowych prądnicach prądu stałego) tanich filtrów RC (rys. 4.106, szczegóły: C10, C7). Konieczne stało się:
  - a) zastosowanie dławików (rys. 4.106, szczegół DŁ4), które jak wiadomo z podstaw elektrotechniki, mają właściwość zwierania wyższych harmonicznych do masy. Wprowadzenie ich to jednocześnie zwiększenie spadku napięcia tj. zmniejszenie napięcia na wyjściu BTP;
  - b) zastosowanie filtrów rezonansowych do wytłumienia 6 harmonicznej. Jak wiadomo, obwód rezonansowy dostrojony do częstotliwości rezonansowej ma minimalną rezystancję dla częstotliwości rezonansowej – w chwili re-

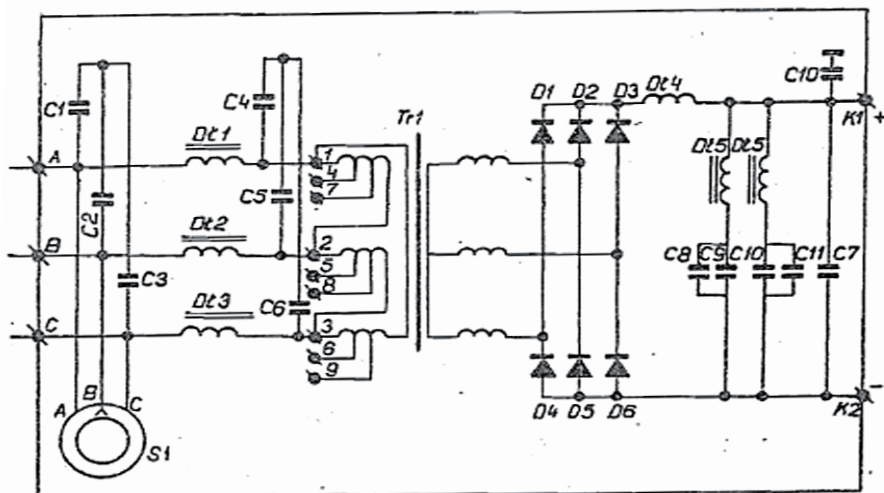


zonansu składowe bierne (oporności bierne indukcyjne i pojemnościowe) znoszą się i pozostaje tylko oporność czynna. Zgodnie ze wzorem na częstotliwość rezonansową, aby uzyskać stosunkowo niską wartość częstotliwości rezonansowej, musimy zastosować stosunkowo wysokie wartości  $L$  i  $C$ . Zastosowanie zbyt wysokich wartości pojemności jest ograniczone „zawisami” napięcia podczas skokowych zmian prądu obciążenia. Dlatego też stosuje się cewki indukcyjne z rdzeniem ferromagnetycznym (rys. 4.106, szczegół D15);  
 c) w półokresach „nieprzewodzenia” diod prostowniczych pojawiają się w kierunku źródła wyższe harmoniczne.

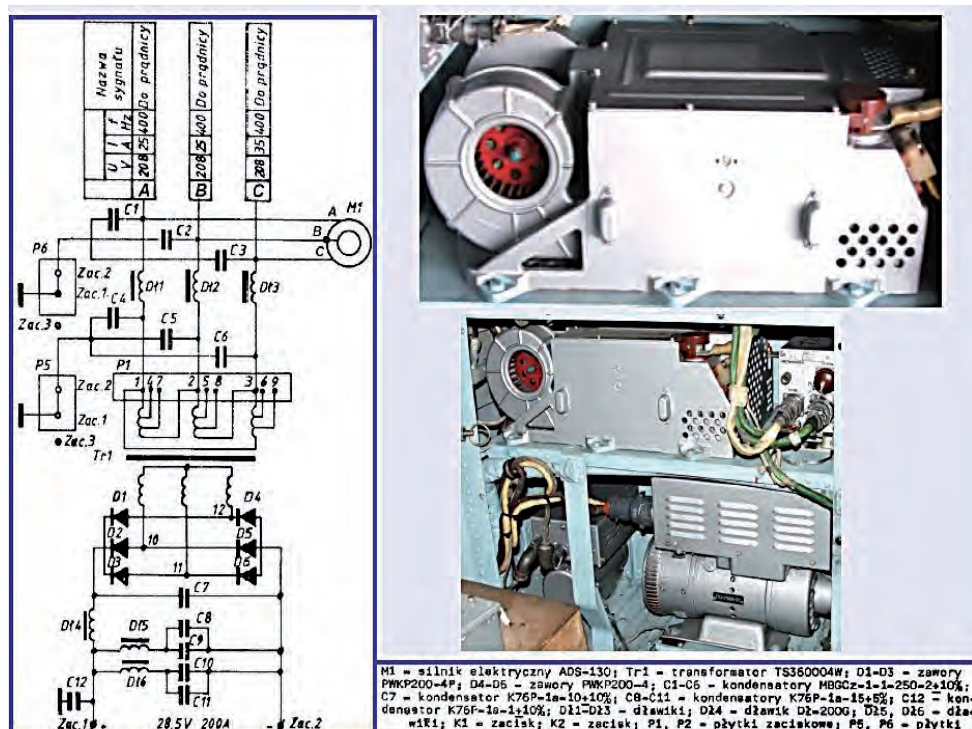


Rys. 4.105. Przebiegi napięcia prostowników [101, 108]

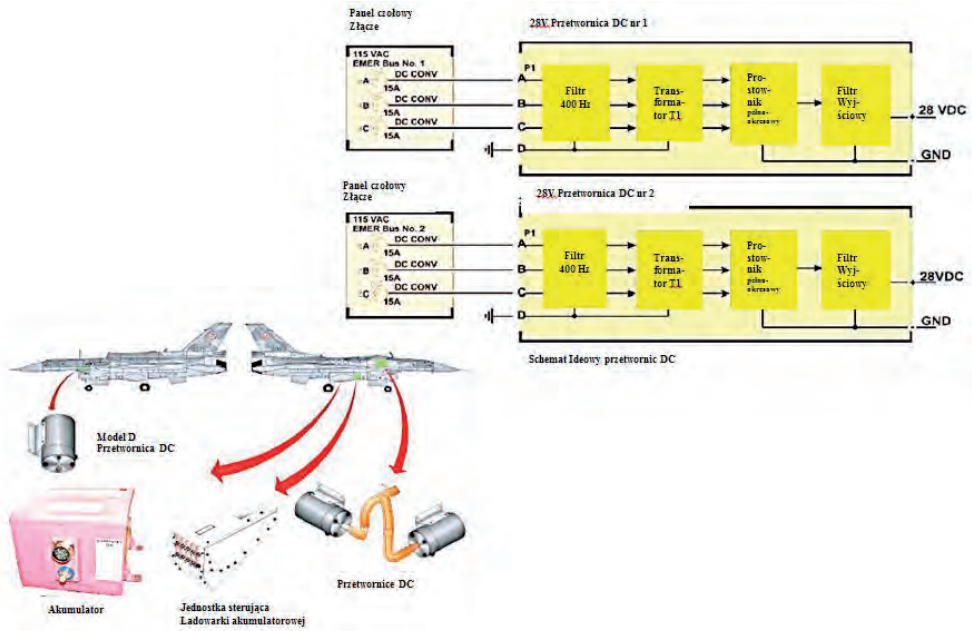
Ideowy schemat elektryczny oraz urządzenie prostownicze WU-6A śmigłowca Mi-24 przedstawiono na rys. 4.107. Prostowniki stosowane na samolocie F-16 przedstawiono na rys. 4.108 i 4.109.



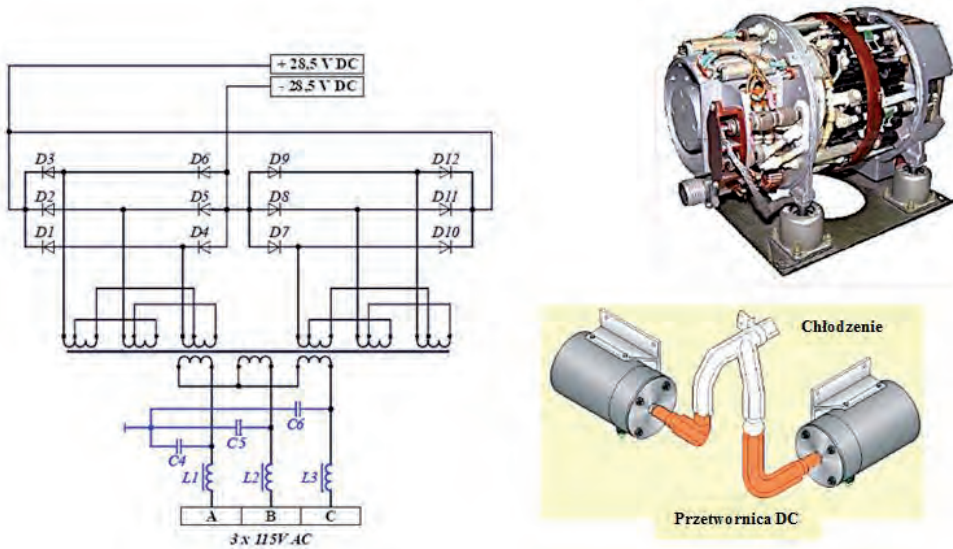
Rys. 4.106. Schemat ideowy uproszczony bloku transformatorowo-prostowniczego typu WU-6A śmigłowca Mi-24 [163]



Rys. 4.107. Ideowy schemat elektryczny oraz prostownik DC na śmigłowcu Mi-24 [163]

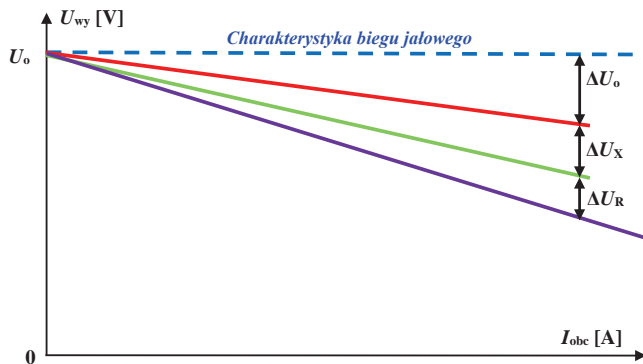


Rys. 4.108. Schemat sieci prądu stałego DC samolotu F-16 z rozmieszczeniem podstawowych urządzeń sieci [244]



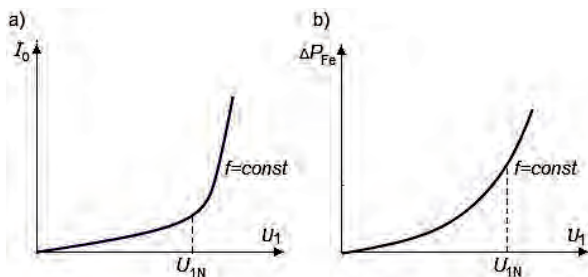
Rys. 4.109. Ideowy schemat elektryczny oraz prostownik DC stosowany na samolocie F-16 [244]

Użytkowe właściwości BTP stosunkowo najpełniej obrazuje jego charakterystyka zewnętrzna, tj. zależność napięcia wyjściowego w funkcji natężenia prądu obciążenia (rys. 4.110).



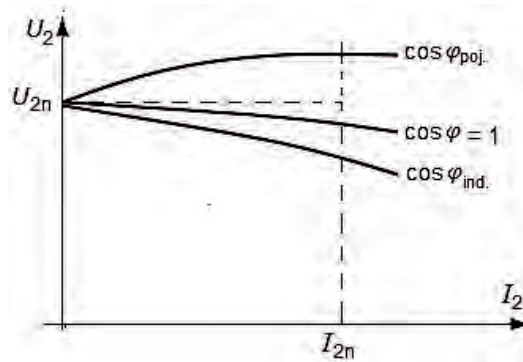
**Rys. 4.110.** Charakterystyka zewnętrzna bloku transformatorowo-prostowniczego [7], gdzie:  $\Delta U_o$  – spadek napięcia spowodowany stratami w rdzeniu transformatora;  $\Delta U_x$  – spadek napięcia spowodowany charakterem obciążenia (indukcyjny charakter do dołu, pojemnościowy do góry);  $\Delta U_R$  – spadek napięcia spowodowany rezystancją czynną obwodu (składowa czynna odbiornika + składowa czynna uzwojeń transformatora + rezystancja styków + rezystancja przewodów elektrycznych + rezystancja diod w stanie przewodzenia)

Z charakterystyki stanu jałowego transformatora (rys. 4.111), którą określa zależność  $I_o = f(U_1)$ , wynika, że praca transformatora przy napięciu wyższym niż znamionowe powoduje znaczny wzrost prądu jałowego. Z charakterystyki  $\Delta P_{Fe} = f(U_1)$  przedstawionej na rys. 4.111b wynika, że zasilanie transformatora napięciem wyższym niż znamionowe powoduje znaczny wzrost strat w rdzeniu, natomiast zmniejszenie częstotliwości poniżej znamionowej (przy znamionowym napięciu) powoduje nadmierne nagrzewanie się rdzenia, ze względu na wzrost strat histerezowych oraz wzrost prądu jałowego na skutek zmniejszenia się wartości  $X_\mu$ .



**Rys. 4.111.** Charakterystyka prądu jałowego transformatora [74]

Transformator znajduje się w stanie obciążenia wówczas, gdy jedno uzwojenie przyłączone jest do źródła zasilania, a do zacisków drugiego przyłączony jest odbiornik. Od charakteru impedancji tego odbiornika zależy faza prądu wtórnego  $I_2$  i wartość napięcia wtórnego  $U_2$ . Napięcie wtórne osiąga wartość największą, przekraczającą nawet wartość znamionową wówczas, gdy transformator jest obciążony odbiornikiem o charakterze pojemnościowym. Jeżeli transformator jest obciążony odbiornikiem o charakterze indukcyjnym, to przy wzroście obciążenia napięcie wtórne maleje, natomiast przy odbiorniku pojemnościowym – rośnie. Wpływ charakteru obciążenia na wartość napięcia wtórnego, przy znamionowym napięciu pierwotnym i stałej wartości współczynnika mocy odbiornika, przedstawiono na rys. 4.112.



**Rys. 4.112.** Charakterystyka zmian wartości napięcia wyjściowego w funkcji prądu obciążenia transformatora [73]

Stanem zwarcia transformatora nazywa się stan, w którym jedno z uzwojeń zasilane jest ze źródła energii elektrycznej, natomiast zaciski drugiego uzwojenia są zwarte. Wówczas napięcie na zaciskach uzwojenia zwartego jest równe zeru i chociaż prąd w nim płynie – nie występuje oddawanie mocy na zewnątrz do odbiornika. Całkowita moc pobierana przez transformator w stanie zwarcia pokrywa wyłącznie powstałe straty. Przetwarza się ona całkowicie na ciepło. Wyróżnia się dwa rodzaje zwarcia transformatora:

- a) **zwarcie awaryjne** – występuje w praktyce przy pełnym napięciu zasilającym;
- b) **zwarcie pomiarowe** – realizowane w warunkach laboratoryjnych – pozwala wyznaczyć szereg danych charakterystycznych transformatora na podstawie przeprowadzonych pomiarów.

W transformatorach energetycznych wymagana wartość napięcia zwarcia wynosi:

$$U_z = (0,03 \div 0,15) U_n, (3 \div 15)\% U_n \quad (4.57)$$

ustalony prąd zwarciaowy może być ok. 8–25 razy większy niż prąd znamionowy.

Moc pobierana w czasie zwarcia równa jest sumie strat:

$$P_z = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{iz} = U_z I_N \cos\varphi_2 \quad (4.58)$$

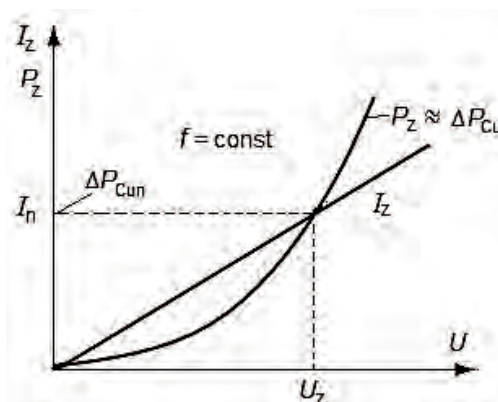
przy czym wzór (4.58) jest słuszny przy założeniach:

- straty w izolacji  $\Delta P_{iz}$  są pomijalnie małe,
- straty w uzwojeniach  $\Delta P_{Cu}$  zależą od wartości prądu,
- straty w rdzeniu  $\Delta P_{Fe}$  zależą pośrednio od wartości napięcia zasilania.

Można przyjąć, że moc pobierana przez transformator w stanie zwarcia jest w przybliżeniu równa stratom w jego uzwojeniach (stratom w miedzi):

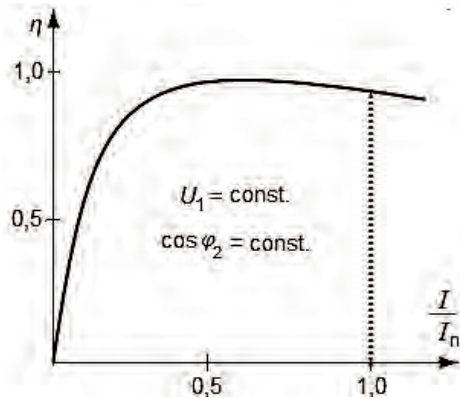
$$P_z \approx \Delta P_{Cu} \quad (4.59)$$

Charakterystykę zwarcia transformatora wyznacza się, przyjmując, że rezystancja  $R_1 \approx R_2$ , natomiast straty w uzwojeniu strony pierwotnej są tego samego rzędu co straty w uzwojeniu strony wtórnej. Na rys. 4.113 przedstawiono charakterystyki zwarcia transformatora, czyli  $I_z = f(U)$ ,  $P_z = f(U)$ .



**Rys. 4.113.** Charakterystyka zwarcia transformatora – zmiany natężenia zwarcia i mocy w funkcji napięcia [73]

Jeżeli transformator pracuje z maksymalną sprawnością przy obciążeniu mocą znamionową, to znamionowe straty w stanie zwarcia muszą być równe znamionowym stratom jałowym. Charakterystykę sprawności transformatora w funkcji natężenia obciążenia w odniesieniu do wartości prądu znamionowego przedstawiono na rys. 4.114.



**Rys. 4.114.** Charakterystyka sprawności transformatora w funkcji natężenia obciążenia w odniesieniu do wartości prądu znamionowego [73]

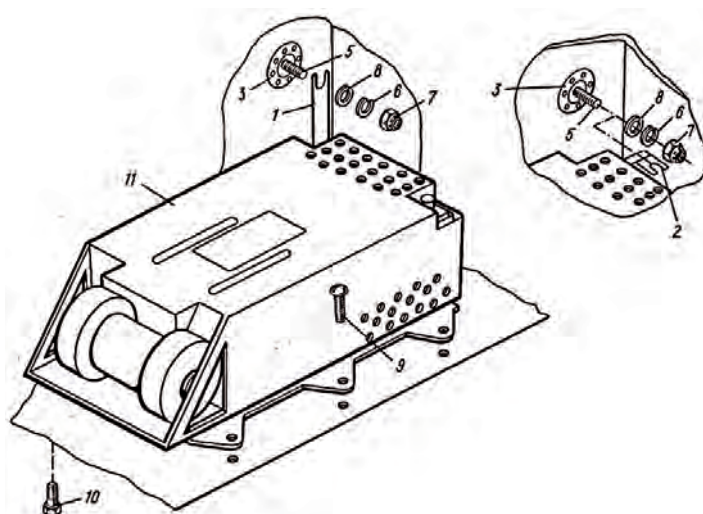
#### 4.5.1.7. Dane techniczne bloku transformatorowo-prostowniczego

Prostowniki pokładowe, stanowiące źródło prądu stałego, powinny zapewnić wysoką jakość energii elektrycznej określonej w odpowiednich normach i przepisach lotniczych. Wysoka jakość napięcia zasilania jest niezbędna do poprawnej i niezawodnej pracy (wykonywania funkcji użytkowych). Od wysokiej jakości energii elektrycznej uzależniona jest poprawna praca w szczególności układów radionawigacyjnych oraz układów łączności radiowej. Aby sprostać tym wysokim wymaganiom, walczy się od dawna z wysoką zawartością składowych harmonicznych Fouriera [56, 82, 141]. Pojawiają się one w wyniku prostowania pulsacyjnego przez diody prostownicze. Aby zmniejszyć amplitudę tych pulsacji, opracowuje się nowe typy prostowników wielopulsowych.

Urządzenie prostownicze WU-6A przeznaczone jest do przetwarzania prądu przemiennego trójfazowego o napięciu znamionowym 208 V na prąd stały o napięciu znamionowym 27 V i do zasilania odbiorników energii prądu stałego (rys. 4.115 i 4.116).



Rys. 4.115. Widok bloku transformatorowo-prostowniczego typu WU-6A



Rys. 4.116. Montaż bloku transformatorowo-prostowniczego WU-6A do struktury śmigłowca [45]

Blok WU-6A składa się z następujących elementów [45]:

- siłowego, trójfazowego dwuuzwojeniowego transformatora mocy obniżającego napięcie; uzwojenie pierwotne transformatora połączone w trójkąt, a wtórne w gwiazdę,
- prostowników siłowych w układzie mostka trójfazowego przeznaczonych do wyprostowania napięcia wyjściowego transformatora,
- rezonansowego filtra w kształcie litery „T” do wygładzania pulsacji wyprostowanego prądu,



- d) filtra tłumiącego zakłócenia radiowe od prądu przemiennego,
- e) silnika elektrycznego z dwoma wentylatorami do chłodzenia elementów urządzenia.

W sieci prądu stałego urządzenie prostownicze wykorzystuje się przy pracy pojedynczej i pracy równoległej z bateriami akumulatorowymi.

Dane techniczne bloku transformatorowo-prostowniczego WU-6A [45]:

1. napięcie sieci zasilającej – 208 V;
2. częstotliwość sieci zasilającej – 400 Hz;
3. liczba faz sieci zasilającej;
4. pobierany prąd –  $I \leq 25$  A;
5. napięcie na wyjściu – 28,5 V;
6. prąd znamionowy na wyjściu –  $I_{DC} = 200$  A;
7. kolejność faz napięcia zasilania – bezpośrednia;
8. zakres zmian na wyjściu przy zmianie wartości napięcia na wejściu w granicach 208–210 V oraz częstotliwości w granicach  $400 \pm 20$  Hz i obciążenia w granicach 20–200 A –  $U_{DC} = 25\text{--}30,4$  V<sub>DC</sub>;
9. zdolność przeciążeniowa:
  - napięcie na wyjściu przy prądzie obciążenia 300 A w ciągu 2 min –  $U_{DC} = 23,5$  V<sub>DC</sub>,
  - napięcie na wyjściu przy prądzie obciążenia 400 A w ciągu 5 s –  $U_{DC} = 23,5$  V<sub>DC</sub>;
10. maksymalne napięcie na wyjściu przy napięciu zasilania 210 V, częstotliwości  $400 \pm 20$  Hz, prądzie obciążenia 2 A –  $U_{DC} = 31$  V<sub>DC</sub>;
11. napięcie na wyjściu przy zmianie wartości napięcia na wejściu 206 V oraz częstotliwości 400 Hz i normalnej temperaturze otaczającego powietrza (zasilanie od prądnicy GT-40PCz6):
  - przy prądzie obciążenia 4 A –  $U_{DC} \leq 30,5$  V<sub>DC</sub>,
  - przy prądzie obciążenia 20 A –  $U_{DC} \leq 28,5\text{--}29,5$  V<sub>DC</sub>,
  - przy prądzie obciążenia 200 A –  $U_{DC} = 26,4\text{--}27,2$  V<sub>DC</sub>,
  - przy prądzie obciążenia 300 A w ciągu 2 min –  $U_{DC} \geq 24,6$  V<sub>DC</sub>;
12. maksymalne napięcie na wyjściu przy napięciu zasilania 210 V, częstotliwości  $400 \pm 20$  Hz, prądzie obciążenia 2 A –  $U_{DC} = 31$  V<sub>DC</sub>;
13. natężenie prądu biegu jałowego przy napięciu zasilania 210 V, 400 Hz –  $I_{f0} \leq 5$  A;
14. natężenie prądu fazowego przy obciążeniu  $I_{DC} = 200$  A –  $I_{f0} \leq 25$  A;
15. współczynnik sprawności –  $\eta \geq 82\%$ ;
16. wartość pulsacji prądu stałego –  $p \leq 8\%$ ;
17. napięcie zakłóceń radiowych nie przekracza wartości w tabeli 4.4;

18. rodzaj pracy – ciągły;
19. masa –  $m \leq 17,5$  kg;
20. wartości skuteczne zakłóceń harmoniczných bloku prostowniczego nie powinny przekraczać wartości przedstawionych w tabeli 4.4.

**Tabela 4.4**

**Wartości skuteczne zakłóceń harmoniczných bloku prostowniczego WU-6A**

Częstotliwość [MHz]	Napięcie zakłóceń radiowych [ $\mu$ V]	
	W obwodach prądu stałego	W obwodach prądu przemiennego
0,15 – 0,5	50	250
0,5 – 2,5	100	100
2,5 – 150	50	50

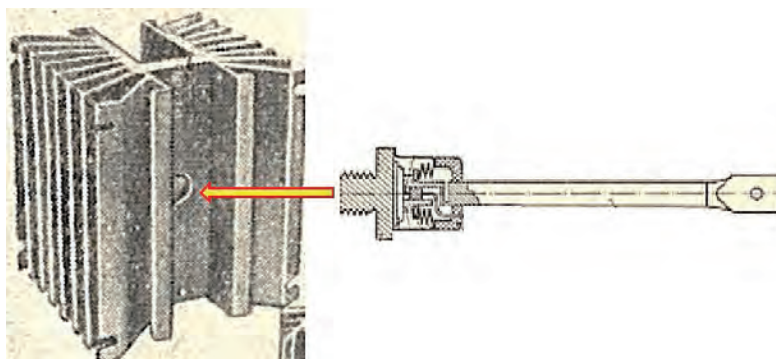
### Chłodzenie, eksploatacja bloków transformatorowo-prostowniczych

Szczególnie wiele uwagi w konstrukcji chłodzenia podzespołów BTP konstruktorzy poświęcają chłodzeniu diod prostowniczych. Wynika to z dwóch powodów:

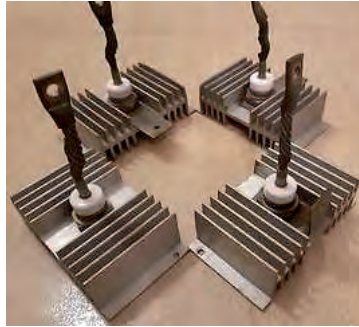
- a) kryształy krzemu mają niski współczynnik przewodnictwa cieplnego,
- b) półprzewodnikowe diody prostownicze mają znaczny współczynnik wartości natężenia prądu do objętości struktury krystalicznej.

Dlatego katody diod prostowniczych (zwaných często w literaturze technicznej zaworami) przykręca się do radiatorów (rys. 4.117–4.119). Radiatorem jest zwykle odlew aluminiowy o znacznej powierzchni. Miejsca powierzchni styku katody z radiatorem przed montażem powinny być:

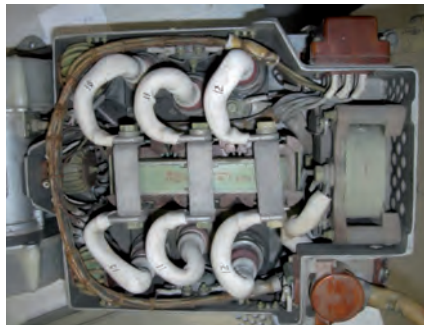
- oczyszczone mechanicznie i odtłuszczone chemicznie,
- pokryte pastą przewodząca temperaturę.



**Rys. 4.117.** Połączenie diody prostowniczej z radiatorem przed montażem [108]

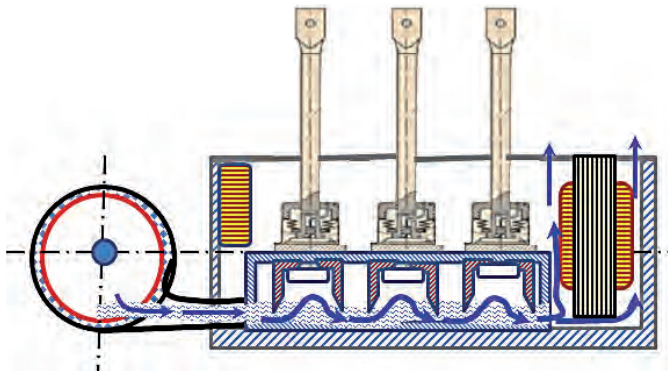


Rys. 4.118. Połączenie diody prostowniczej z radiatorem po montażu

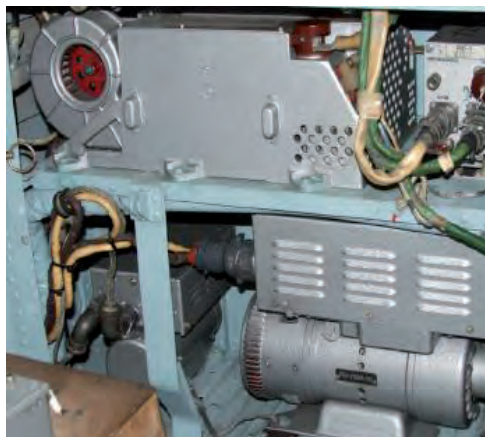


Rys. 4.119. Widok z góry BTP typu WU-6A po zdemontowaniu pokrywy

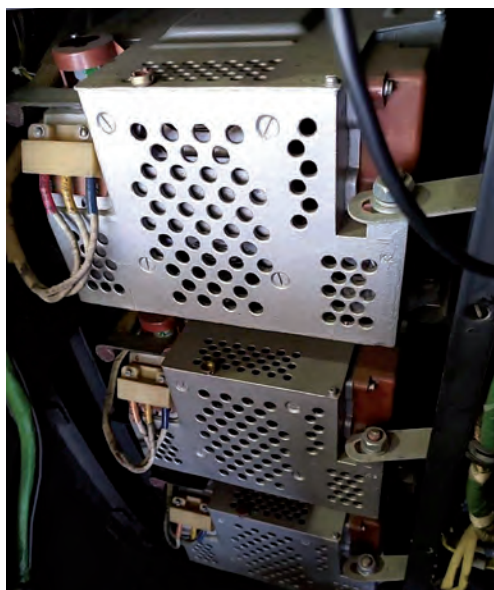
Opływ strumienia powietrznego chłodzącego podzespoły bloku transformatorowo-prostowniczego WU-6A oraz ich montaż na pokładzie statków powietrznych przedstawiono na rys. 4.120–4.122.



Rys. 4.120. Opływ strumienia powietrznego chłodzącego podzespoły bloku transformatorowo-prostowniczego WU-6

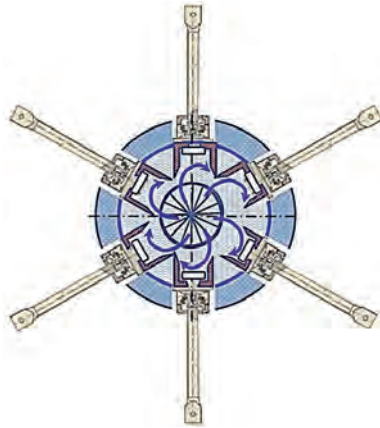


**Rys. 4.121.** Blok transformatorowo-prostowniczy WU-6A zamontowany na śmigłowcu W-3WA Sokół – widok na półkę agregatów (przedział transportowy, za plecami pilota)

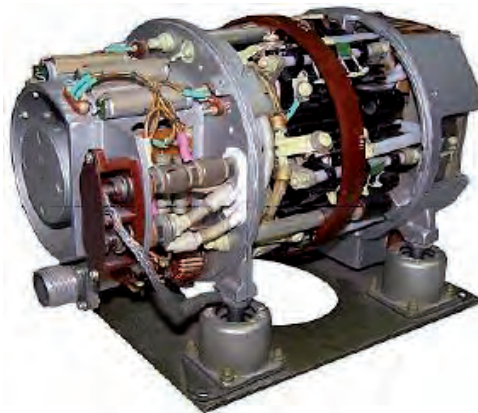


**Rys. 4.122.** Bloki transformatorowo-prostownicze WU-6A zamontowane na śmigłowcu Mi-17

Opływ strumienia powietrznego chłodzącego podzespoły bloku transformatorowo-prostowniczego WU-8 oraz blok transformatorowo-prostowniczy WU-8 przedstawiono na rys. 4.123 i 4.124.



Rys. 4.123. Opływ strumienia powietrza chłodzącego podzespoły bloku transformatorowo-prostowniczego WU-8



Rys. 4.124. Blok transformatorowo-prostowniczy WU-8

## 4.6. Lotnicze baterie akumulatorowe

### 4.6.1. Rys historyczny

Wzmianki o elektryczności statycznej można znaleźć już w pismach starożytnych. Znany nam z wypraw nad morze bursztyn starożytni Grecy nazywali elektronem. W czasie jego pocierania suknem tworzyły się ładunki elektrostatyczne, które powodowały przyciąganie drobnych elementów. To tajemnicze dla starożyt-

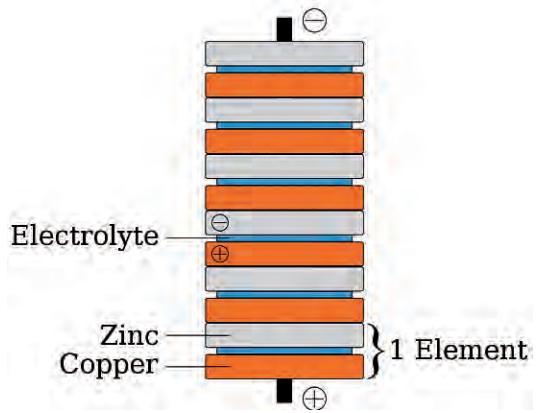
nych zjawisko uchodziło za magię. Dlatego bryłki bursztynu nazywano „świętym kamieniem”. 25 wieków temu grecki filozof i matematyk Tales z Miletu (ur. ok. 620, zm. ok. 540 r. p.n.e) pierwszy opisał, że potarty sukniem bursztyn przyciąga drobne, lekkie ciała jak np. drewniane wiórki. W wieku XVIII udokumentowano podobne właściwości dla wielu innych materiałów izolacyjnych, m.in. ebonitu, szkła, porcelany, wełny itd. Równocześnie skonstruowano pierwsze maszyny elektrostatyczne oparte na technice pocierania wirującego izolatora w postaci krążka lub taśmy. Na dworach monarchów prezentowano efektowne pokazy związane z tym zjawiskiem – na dwóch metalowych elektrodach, z których jedna połączona była z wirującym izolatorem, a druga z ziemią, gromadziły się ładunki, które po osiągnięciu odpowiedniej różnicy potencjałów dawały efektowne iskry. Rozwój biologii spowodował, że zaczęto interesować się techniką oddziaływania elektryczności statycznej na organizmy zwierząt i ludzi. Stwierdzono, że po wbiciu elektrod maszyny elektrostatycznej w ciało żaby i podaniu na elektrody napięcia, następują skurcze nóg żaby [160, 237, 243].

Włoski uczony Luigi Galvani [237, 243] pragnął natomiast udowodnić teorię odwrotną – że organizmy żywe mają swoją własną, wewnętrzną elektryczność. W tym celu w udo żaby wbijał metalowe pary elektrod i skonstruowanym przez siebie galwanometrem sprawdzał, czy pojawi się ładunek elektrostatyczny. Stwierdził, że ładunek pojawia się, gdy użyje się pary elektrod wykonanych z różnych metali. Zjawisko to nazwał „elektrycznością zwierzęcą”. Jego rodak Alessandro Volta (rys. 4.125) podważył tę teorię [9, 87, 236, 243]. Stwierdził, że tkanki miękkie uda żaby były jedynie elektrolitem, a nie źródłem prądu. Najważniejsze były, jego zdaniem, elektrody, z których każda była wykonana z innego materiału. Aby to udowodnić, w 1800 r. zanurzył dwie elektrody wykonane z różnych materiałów w kwasie siarkowym. Po przyłączeniu galwanometru okazało się, że istnieje pomiędzy elektrodami różnica potencjałów. Z czasem okazało się, że układ ten, złożony z dwóch elektrod (wykonanych z różnych materiałów) zanurzonych w elektrolicie może być doładowywany z maszyny elektrostatycznej, a później z prądnicy prądu stałego.

Stos Alessandra Volty (rys. 4.126) był niepraktyczny w zastosowaniu do zasilania urządzeń – szybko się wyładowywał. Ponadto mógł być rozładowywany tylko niewielkimi prądami. Stwierdzono, że im jest większa powierzchnia płytek, tym większe natężenie prądu wyładowania można uzyskać.



Rys. 4.125. Alessandro Volta (1745–1827) [236]

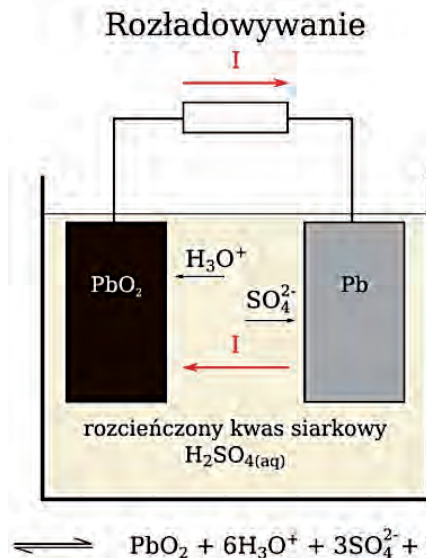


Rys. 4.126. Stos Alessandra Volty – pierwsza nowożytna elektryczna bateria akumulatorowa [236]

Pierwszy praktycznie wykorzystywany akumulator (kwasowo-ołowiowy) opracował Gaston Planté (rys. 4.127). Ideę jego działania przedstawiono na rys. 4.128.



Rys. 4.127. Gaston Planté (1843–1889) – twórca pierwszego działającego akumulatora kwasowo-ołowiowego [243]



Rys. 4.128. Idea działania pierwszego akumulatora kwasowo-ołowiowego opracowanego przez Gastona Plantégo [243]

#### 4.6.2. Pojęcia podstawowe i zasada działania lotniczych baterii akumulatorowych

Każdy metal ma określony potencjał elektrochemiczny [35, 213], aktualnie ściśle określony i tablicowany. Jeżeli dwa metale o znacznie różniących się potencjałach elektrochemicznych będą zanurzone w zdysocjowanym<sup>6</sup> wodnym roztworze zasad, soli lub kwasów, to pomiędzy nimi wytworzy się siła elektromotoryczna równa różnicy potencjałów elektrochemicznych. Po zamknięciu obwodu elektrycznego, tj. połączeniu tych elektrod z odbiornikiem, np. silnikiem elektrycznym lub żarówką, energia ta może być wykorzystana na pracę mechaniczną lub emisję światła. Niestety reakcje chemiczne wokół elektrod spowodowane przepływającym prądem powodują zmniejszenie się siły elektromotorycznej. W celu regeneracji niezbędne jest naładowanie tego ogniwa poprzez przyłączenie zewnętrznego źródła energii elektrycznej. Bardzo ważnym elementem w teorii i praktyce eksploatacji lotniczych baterii akumulatorowych jest odpowiedni stan elektrolitu.

W 1887 r. szwedzki uczony Arrhenius opracował teorię dysocjacji elektrolitycznej [79, 85, 86, 144, 187]. Stwierdził, że do dysocjacji nie jest potrzebny prąd elektryczny, a jedynie rozpuszczalnik (zazwyczaj woda) oraz bezwodnik kwasu, zasady lub soli. Wraz ze zwiększaniem stężenia np. kwasu w powstałym elektrolicie powstaje coraz więcej jonów, tj. nośników energii elektrycznej. Objawia się to zmniejszeniem rezystancji właściwej elektrolitu. W pewnym momencie osiąga się minimum rezystancji właściwej. Dla kwasu siarkowego występuje ono przy stężeniu 32%. Wraz z dalszym zwiększaniem gęstości rezystancja właściwa wzrasta.

Sprawność energetyczna baterii akumulatorowej w dużej części zależy od ilości zdysocjowanych jonów w elektrolicie. Nadmienić należy, że stężenie zdysocjowanych jonów można zmienić nie tylko poprzez zwiększanie stężenia bezwodnika kwasów, zasad lub soli, ale także poprzez zwiększanie temperatury. W ujemnych temperaturach liczba jonów jest niewielka, z uwagi na niewielką amplitudę drgań cieplnych i wynikający stąd mało intensywny rozpad na jony. Ze wzrostem temperatury drgania te wzrastają, aż stężenie zdysocjowanych jonów osiągnie optimum (dla lotniczych baterii akumulatorowych zazwyczaj przyjmuje się 40°C). Przy dalszym podwyższaniu temperatury stężenie przestaje wzrastać.

Pobieranie energii elektrycznej z akumulatora powoduje jego wyładowanie. Wyładowany akumulator można naładować, dostarczając mu energii elektrycznej.

<sup>6</sup> Dysocjacja – rozpad cząstek kwasów, zasad lub soli na jony.



Akumulatorowe źródła energii elektrycznej można przedstawić za pomocą tzw. schematu elektrochemicznego, podającego podstawowe składniki substancji czynnych elektrod oraz elektrolitu [35, 139, 208, 213].

Schemat elektrochemiczny zapisuje się następująco:



Schemat elektrochemiczny akumulatora ołowiowego zapisany zostanie tak:



**Siła elektromotoryczna** (SEM) (napięcie indukowane)  $E_A$  akumulatora jest to różnica potencjału elektrycznego  $V_+$  dodatniej i potencjału elektrycznego  $V_-$  elektrody ujemnej przy otwartym obwodzie elektrycznym:

$$E_A = V_+ - V_- \quad (4.60)$$

**Napięcie akumulatora**  $U_A$  jest to różnica potencjału elektrod przy zamkniętym obwodzie elektrycznym, tj. przy obciążeniu akumulatora prądem elektrycznym. Napięcie jest mniejsze od SEM w czasie wyładowywania, a większe od SEM w czasie ładowania. Jest to spowodowane spadkiem napięcia na rezystancji wewnętrznej akumulatora (oraz innymi przyczynami).

Napięcie akumulatora określa wyrażenie:

$$U_A = E_A \pm I_A \cdot R_A \quad (4.61)$$

gdzie:  $I_A$  – prąd płynący przez akumulator, przyjmuje się dla wyładowania  $I_A > 0$  oraz dla ładowania  $I_A < 0$ ;  $R_A$  – rezystancja wewnętrzna akumulatora.

Jak wynika z powyższego wzoru, napięcie akumulatora (baterii akumulatorowej) zależy od płynącego w nim prądu  $I_A$ . Zależność napięcia od prądu (dla określonego stanu naładowania) nazywany zewnętrzną charakterystyką obciążenia.

### Definicje dotyczące lotniczych baterii akumulatorowych [139]

- **lotnicza zasadowa bateria akumulatorowa kadmowo-niklowa** – jeden z typów lotniczej zasadowej baterii akumulatorowej z płytami czynnymi (elektrodami), wykonanymi ze spieków tlenku niklu (elektroda dodatnia) i metalicznego kadmu (elektroda ujemna),
- **łącznik międzyogniowy** – płaskownik metalowy, zapewniający połączenie elektryczne pomiędzy ogniwami lotniczej zasadowej baterii akumulatorowej,
- **naczynie ogniwa lotniczej zasadowej baterii akumulatorowej** – obudowa pojedynczego ogniwa lotniczej zasadowej baterii akumulatorowej,
- **plyta podstawy lotniczej pokładowej baterii akumulatorowej** – element WSP, pełniący dwie funkcje: zapewniający mechaniczne mocowanie lotniczej pokładowej baterii akumulatorowej oraz, w przypadku starego systemu techniki wojskowej, połączenie elektryczne (za pomocą złączy elektrycznych zewnętrznych tej baterii akumulatorowej i złączy elektrycznych płyty podstawy) do sieci elektrycznej WSP,
- **pojemność  $Q_5$**  – pojemność lotniczej zasadowej baterii akumulatorowej, wyrażona w amperogodzinach [Ah], uzyskana podczas wyładowywania prądem elektrycznym  $I_5$ ,
- **pojemność znamionowa** – wartość wyrażona w amperogodzinach [Ah], określona w metryce opracowanej przez producenta lotniczej zasadowej baterii akumulatorowej,
- **prąd elektryczny  $I_5$**  – natężenie prądu elektrycznego wyładowania albo ładowania wyrażone w amperach o wartości będącej ilorzem pojemności znamionowej lotniczej zasadowej baterii akumulatorowej i liczby 5.

#### 4.6.3. Podział lotniczych baterii akumulatorowych

Ze względu na rodzaj elektrolitu lotnicze baterie akumulatorowe dzielą się na [123, 139, 142, 161, 208, 230]:

1. kwasowe;
2. zasadowe:
  - a) kadmowo-niklowe,
  - b) srebro-cynkowe;
3. litowo-jonowe.

Ze względu na przeznaczenie lotnicze baterie akumulatorowe dzielą się na:

1. pokładowe – współpraca z pokładową siecią elektryczną, awaryjne zasilanie sieci elektroenergetycznej prądu stałego;

2. naziemne – do zasilania naziemnego statków powietrznych lub do buforowego wspierania głównego lotniskowego źródła energii;
3. autonomiczne – do zasilania podstawowego lub awaryjnego oddzielnych, niezależnych od pokładowej sieci elektrycznej instalacji i systemów:
  - a) łączności, w szczególności systemu ratowniczego (aktywowanego po opuszczeniu statku powietrznego),
  - b) oświetlenia wyjść awaryjnych,
  - c) uzbrojenia, np. baterie ampułkowe do autonomicznego zasilania uzbrojenia podwieszanego, jak np. rakiety sterowane – przykład baterie ampułkowe sucho-ładowane aktywowane poprzez pneumatyczne wciśnięcie elektrolitu z plastikowych ampułek.

**Baterie akumulatorowe kwasowe** stanowią jeden z najstarszych rodzajów lotniczych baterii akumulatorowych [243]. Odznaczają się niską ceną, koniecznością stosowania niskich prądów ładowania i rozładowania. Przez niektórych praktyków są nazywane bateriami „brudnymi” – ich opary powodują destrukcyjne oddziaływanie na elementy elektroniczne, tapicerkę i inne materiały, w szczególności destrukcyjnie wpływają na włókna sztuczne (jedynie wyroby wełniane są odporne na działanie kwasu siarkowego). Raz uruchomione muszą być przechowywane „w pełnej gotowości” do działania. Podczas przechowywania wymagają okresowego (co 1–2 miesiące) doładowywania i uzupełnienia wody destylowanej w celu uniknięcia zasiarczenia. W czasie ich ładowania i rozładowywania gęstość elektrolitu zmienia się w stosunkowo niewielkim stopniu – kilka do kilkunastu procent. Mają niewielki prąd samorozładowania i są przez to zawsze gotowe do działania.

**Baterie zasadowe** weszły na pokłady wojskowych statków powietrznych znacznie później niż kwasowe. Odznaczają się znacznie wyższą ceną, znacznie wyższymi prądami ładowania i rozładowania. Dobrze przechowują się w stanie rozładowanym. Jednakże po pierwszym ładowaniu w praktyce nie jest korzystne dopuszczanie do skrajnego rozładowania – na zaciskach złącza wysokoprądowego powinno być  $U > 20 \text{ V}$  [142]. Znaczny prąd samorozładowania (rzędu 30–90 mA) powoduje, że po długim postoju baterii zasadowej, np. 8 tygodni, będzie ona potencjalnie sprawna, lecz nie można z niej praktycznie biorąc wykonać rozruchu. Aby wartość prądu samorozładowania zmniejszyć, należy dbać o czystość obudowy.

**Baterie litowo-jonowe** weszły na pokłady statków powietrznych stosunkowo późno, bo po 2000 r. Należą do najłżejszych w przeliczeniu oddawanej mocy na jednostkę masy (są dwukrotnie lżejsze niż tej samej mocy baterie kadmowo-niklowe) [97, 123, 161, 230]. Ogniwa litowo-jonowe używane w pojazdach mogą być także szybko ładowane, zazwyczaj od 0 do 80% w 15–30 min bez znaczącego wpływu na ich żywotność. Akumulatory litowo-jonowe, w przeciwieństwie do akumulato-

rów niklowo-kadmowych, powinny być ładowane często i jak najszybciej po rozładowaniu. Jeśli jednak nie będą używane przez dłuższy czas, powinny zostać rozładowane do ok. 40%. W takim stanie akumulator ma znacznie wyższą żywotność. Jeżeli akumulator będzie przechowywany w stanie całkowitego rozładowania, może ulec uszkodzeniu. Akumulatorów tego typu nie trzeba koniecznie formować, w przeciwieństwie do akumulatorów starszego typu. Akumulatory litowo-jonowe najlepiej znoszą temperaturę od +10°C do +25°C. Ładowanie baterii w temperaturach ekstremalnych, tj. poniżej +5°C lub powyżej +30°C, grozi uszkodzeniem ogniw, a nawet pożarem. Akumulatory te muszą być wyposażone w zaawansowaną elektronikę zapewniającą m.in. chłodzenie/ogrzewanie ogniw – jej awaria może spowodować pożar lub nawet detonacje baterii.

Podsumowując:

- a) baterie kwasowe są stabilne napięciowo, ale wymagają długiego ładowania i nie lubią oddawać dużych prądów, jednocześnie nie słabną przy długim postoju. Jednakże przechowywanie kwasowych baterii akumulatorowych powyżej dwóch miesięcy bez doładowywania może spowodować nieodwracalne w skutkach tzw. zasiarczenie baterii. Oznaką takiego zasiarczenia jest szybkie ładowanie i szybkie rozładowywanie pod obciążeniem;
- b) baterie zasadowe są lżejsze i nadają się do szybkiego ładowania i wyładowania dużymi prądami, ale szybko „słabną” przy długim postoju z powodu samowyładowania, jakkolwiek ten długi postój prawie nie szkodzi ich resursowi;
- c) Baterie litowo-jonowe są najlżejsze i mają najwyższą sprawność energetyczną (80–94%), ale wymagają zaawansowanej elektroniki do zapewnienia bezpiecznej eksploatacji. Drogi recykling – jednym z pierwiastków jest kobalt, powodujący skażenie środowiska.

#### 4.6.4. Rola i przeznaczenie baterii akumulatorowych w lotnictwie

Współczesny statek powietrzny zawiera liczne urządzenia zasilane elektrycznie, jak: systemy nawigacyjne, układy łączności, uzbrojenia, oświetlenia, układy automatycznego sterowania. Ten szybki i łatwo przetwarzalny rodzaj energii jest bezdyskusyjnie niezbędny na pokładzie statku powietrznego. Generowany jest przez prądnicę pokładową, która zamienia energię mechaniczną pobieraną z silnika głównego SP na energię elektryczną.

Prądnica jest podstawowym źródłem energii elektrycznej statku powietrznego. Przy **rozruchu** jednakże nie pracuje. Początkowo stosowano rozruch ręczny poprzez pokręcanie śmigłem, był jednak bardzo niebezpieczny (notowane były liczne przypadki przedwczesnego zapłonu mieszanki w cylindrach, co powodowało

gwałtowny ruch śmigła) i wymagał, zwłaszcza w okresie zimowym, znacznego wysiłku fizycznego. Dlatego zaczęto stosować pokładowe baterie akumulatorowe. Zgodnie z normami [130, 139, 141], pojemność lotniczej pokładowej baterii akumulatorowej powinna być na tyle duża, aby możliwe było wykonanie trzech po sobie następujących typów rozruchów:

- „zimnego”, tj. obracanie zespołu wirnikowego silnika turbinowego bez dostarczenia paliwa i bez uruchamiania układu zapłonowego, wykonywany jest w celu przesmarowania elementów mechanicznych silnika;
- „pozornego”, tj. obracanie zespołu wirnikowego silnika turbinowego z otwartymi obwodami wtrysku paliwa i bez uruchamiania układu zapłonowego, wykonywany jest w celu przemywania wnętrza silnika, np. podczas rozkonserwowania;
- „gorącego”, tj. obracanie zespołu wirnikowego silnika turbinowego z otwartymi obwodami wtrysku paliwa i po pewnym czasie (zazwyczaj po 10–20 s) z podaniem iskry elektrycznej, wykonywany jest w celu uzyskania pełnej mocy użytkowej silnika.

Kolejna funkcja pokładowej baterii elektrycznej to **zasilanie pokładowej sieci elektrycznej w czasie awarii prądnicy pokładowej**. Zgodnie z przepisami [142, 208], pojemność pokładowej baterii elektrycznej powinna zapewnić **przez 30 min** zasilanie odbiorników energii elektrycznej, niezbędnych do przeprowadzenia bezpiecznego lotu do lotniska awaryjnego. Ponadto pojemność znamionowa baterii powinna być na tyle duża, aby umożliwić zasilanie wszystkich niezbędnych w stanie awaryjnym odbiorników energii elektrycznej wraz ze światłami gabarytowymi z pułapu do poziomu ziemi.

Trzecią funkcją pokładowej baterii akumulatorowej jest **współpraca z pokładową siecią elektryczną** statku powietrznego. Jak wspomniano, podstawowym źródłem energii elektrycznej SP jest prądnica pokładowa, która zamienia energię mechaniczną pobieraną z silnika głównego SP na energię elektryczną. Następnie cała sieć szyn rozdzielczych, przewodów elektrycznych, styczników i wyłączników rozdziela energię elektryczną do poszczególnych odbiorników. Okazuje się, że z różnych przyczyn<sup>7</sup> jakość tej energii elektrycznej podczas stanów przejściowych (przy zmianach poziomów obciążenia prądowego), reprezentowanej m.in. przez poziom napięcia na zaciskach odbiorników, nie jest do końca stabilna. Zgodnie z normami dotyczącymi jakości energii elektrycznej [140, 141], dopuszczalne są znaczne obniżenia wartości napięcia (w tzw. stanie przejściowym – w znacznym uproszczeniu

<sup>7</sup> Zjawiska zmian parametrów napięcia wynikają zazwyczaj ze specyfiki połączenia obwodów przez urządzenia komutacyjne, opóźnienia reakcji układów automatyki, wpływu momentu bezwładności mechanicznej wirników silników elektrycznych, tłumienia przepływu uderzeń prądowych przez indukcyjność i tłumienia zmian napięcia przez pojemność.

– z 28 V do 12 V przez czas  $\Delta t < 0,1$  s), a nawet zaniki napięcia (wg EN2282 [52] do 30 ms, wg ISO-1540 [83] do 80 ms).

Niestety wiele odbiorników energii elektrycznej, jak niektóre układy elektro-niczno-nawigacyjne, zwłaszcza układy techniki komputerowej, nie może poprawnie funkcjonować przy tak długim czasie trwania obniżenia napięcia. Dlatego też na pokładzie każdego statku powietrznego jest montowana pokładowa bateria akumulatorowa, która w odpowiedni sposób współpracuje z pokładową siecią elektryczną. Jeżeli w sieci elektrycznej istnieje nadmiar energii, to jest ona pochłaniana właśnie przez pokładową baterię akumulatorową. Jeżeli natomiast w sieci występuje niedobór energii, to jest ona pobierana z pokładowej baterii akumulatorowej. Ten sposób współpracy pokładowej baterii akumulatorowej z pokładową siecią elektryczną nazywany jest **pracą buforową** [64].

W naziemnej obsłudze WSP wykorzystywane są baterie lotniskowe, które przeznaczone są do:

- a) zasilania sieci pokładowej w czasie postoju statku powietrznego na lotnisku,
- b) zasilania urządzeń pokładowych niezbędnych do przeprowadzenia rozruchu silnika statku powietrznego.

Zasilanie (baterie) lotniskowe zamontowane są na specjalnych wózkach lub pojazdach mechanicznych. Wózek lub pojazd mechaniczny ustawia się w pobliżu statku powietrznego [140]. Baterie łączy się z siecią pokładową za pomocą gniazda zasilania naziemnego (lotniskowego) umieszczonego w kadłubie statku powietrznego. Podłączenie do **zasilania lotniskowego** powoduje odłączenie baterii pokładowych i prądnic. Warunki pracy baterii pokładowych są trudniejsze niż baterii pracujących w warunkach naziemnych (zamontowanych w LZE) – należy się liczyć z tym, że:

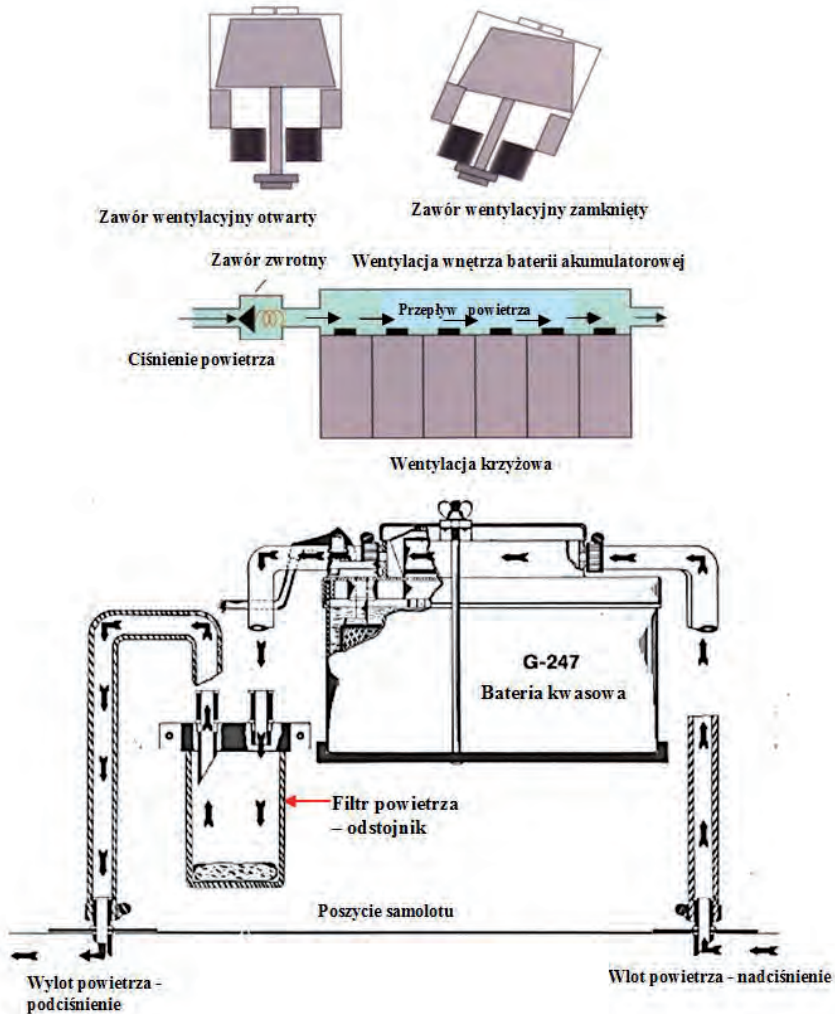
- ciśnienie atmosferyczne może się zmniejszyć do 47 hPa albo jeszcze niżej,
- temperatura otoczenia może się wahać w przedziale – 60°C do +50°C,
- akumulator może podlegać dużym przeciążeniom dynamicznym, drganiom czy wstrząsom,
- elektrolit w akumulatorze może zajmować różne położenia w przestrzeni w trakcie wykonywania ewolucji powietrznych przez statek powietrzny,
- akumulator może być obciążany wysokimi prądami (zbiżonym do zwarcio-wych).

Jednocześnie w takich warunkach wymaga się dużej niezawodności, przy niewielkich rozmiarach, małej masie oraz prostocie obsługi.

#### 4.6.5. Warunki pracy i przechowywania baterii akumulatorowych w lotnictwie

Warunki pracy i przechowywania baterii akumulatorowych w lotnictwie określa Norma Obronna NO-16-A204 *Lotnicze kwasowe baterie akumulatorowe* [139].

Pokładowe baterie lotnicze muszą zapewniać wentylację ogni oraz ich szczelność w każdym położeniu z pozycją odwróconą włącznie. Przykładowy sposób wentylacji wnętrza baterii akumulatorowej przedstawia rys. 4.129.



Rys. 4.129. Wentylacja wnętrza baterii akumulatorowej [244]

### **Zgodnie z NO-16-A204 [139] p. 2.5.2 Przechowywanie**

Baterie akumulatorowe powinny być przechowywane w zamkniętych pomieszczeniach magazynowych w temperaturze od 5°C do 35°C i wilgotności względnej powietrza nie przekraczającej 80%, jednocześnie powinny być zabezpieczone przed promieniowaniem słonecznym, mogącym spowodować wzrost temperatury, oraz pyłem i substancjami agresywnymi. Baterie akumulatorowe powinny być układane w położeniu normalnym, tj. wieczkami do góry, najwyżej w trzech warstwach i powinny być zabezpieczone przed przypadkowym uszkodzeniem.

### **Zgodnie z NO-16-A204 [139] p. Środki bezpieczeństwa i higieny pracy**

Osoby mające styczność z bateriami akumulatorowymi powinny stosować niezbędne środki ochronne oraz mieć zapewniony natychmiastowy dostęp do środków neutralizujących działanie kwasu siarkowego (elektrolitu) na skórę, oczy, odzież itp. Do środków ochronnych zalicza się ubranie ochronne, okulary zabezpieczające, rękawice, fartuchy z materiału kwasoodpornego oraz buty gumowe. Do środków neutralizujących działanie kwasu siarkowego na organizm człowieka zalicza się: do przemywania oczu – 1% roztwór kwaśnego węgla sodowego, do pozostałych części ciała – 1% roztwór węgla sodowego (sody technicznej). Dopuszcza się również stosowanie innych środków neutralizujących spełniających wymagania BHP.

Pomieszczenia, w których wykonywane są prace badawcze i eksploatacyjne z bateriami akumulatorowymi, powinny być wyposażone w naturalny i wymuszony (sztuczny) sposób wentylacji zgodnie z przepisami dotyczącymi tego typu pomieszczeń. Nie wolno w tym samym pomieszczeniu przechowywać baterii kwasowych z bateriami zasadowymi.

### **Problemy eksploatacyjne w warunkach misji wojskowych [59]**

W czasie zwiększania rewersów technicznych układów elektroenergetycznych śmigłowców transportowych w Iraku i Afganistanie, autorzy niniejszego artykułu zwrócili uwagę na liczne uszkodzenia agregatów, nietypowe co do skali i rodzajów zużycia w porównaniu do ich dotychczasowych doświadczeń w kraju. Konieczność wykonywania szybkiego startu z przygodnych lotnisk, często ze względów taktycznych, czyni z pokładowych baterii akumulatorowych bardzo istotny element gotowości bojowej wojskowego statku powietrznego. Na takich lądowiskach zazwyczaj nie ma naziemnych źródeł energii elektrycznej – rozruchy odbywają się z pokładowych baterii akumulatorowych.

W związku ze znacznymi zmianami prędkości obrotowej lub zmianami poziomu obciążenia prądnic pokładowych wymuszonych dynamiką działań taktycz-



nych, znacznie częściej niż w warunkach pokojowych dochodzi do zmian poziomu napięcia. Przy szybkich zmianach prędkości obrotowej lub zmianach poziomu obciążenia układ regulacji napięcia wyjściowego prądnicy nie jest w stanie w pełni go stabilizować z uwagi na pewną zwłokę działania tego układu:

- układy elektroniczne: 10–40 ms,
- regulatory węglowe<sup>8</sup>: 30–80 ms.

Powstają wówczas w sieci elektroenergetycznej impulsy przepięciowe lub zanikowe [140, 141]. Tylko częściowo są one tłumione przez filtry pokładowe. Znaczna część energii tych impulsów jest pochłaniana przez pokładową baterię akumulatorową. Duże wartości amplitudy napięcia tych impulsów mogą spowodować przebicie separatorów. Wtórnie przy uszkodzeniu separatorów może dojść do zwarcia elektrycznych pomiędzy różnoimiennymi płytami. Długotrwałe (od 80 ms do kilkunastu sekund) obniżenie prędkości obrotowej silnika i prądnicy pokładowej może spowodować obniżenie jej napięcia wyjściowego poniżej poziomu napięcia na zaciskach głównych pokładowej baterii akumulatorowej. Wówczas pokładowa bateria akumulatorowa oddaje swoją energię – powstaje tzw. prąd zwrotny<sup>9</sup> o znacznej wartości.

Zazwyczaj automatyka sieci pokładowej czuwa, aby wartość tego prądu nie przekroczyła średniego prądu zwrotnego  $I = 10 \div 50$  A [64] – powyżej tej wartości prądnica jest odłączana i pokładowa bateria akumulatorowa przejmując wówczas pełne obciążenie. Jest to stan awaryjny i zdarza się w praktyce dosyć rzadko. Znacznie częściej może dochodzić podczas lądowania lub dynamicznego zmniejszania prędkości obrotowej do buforowego przekazywania energii pomiędzy prądnicą pokładową a pokładową baterią akumulatorową. Powoduje to wzrost temperatury elektrolitu. Jeżeli eksploatacja pokładowej baterii akumulatorowej, np. kwasowej, odbywa się w temperaturze  $+55^{\circ}\text{C}$ <sup>10</sup>, to dodatkowe zwiększanie temperatury na skutek intensywnej pracy buforowej obniża znacznie sprawność energetyczną baterii. Bateria kwasowa poza tym, jak wcześniej wspomniano, źle toleruje wysokie prądy uderzeniowe – znacznie lepsza w tej roli byłaby lotnicza bateria zasadowa.

<sup>8</sup> Regulatory węglowe – prąd wzbudzenia jest przepuszczany przez stos pastylek węglowych (stąd nazwa regulatora) ściśniętych specjalną sprężyną. Przy wzroście napięcia wyjściowego prądnicy, elektromagnes, który jest załączony na zaciskach wyjściowych prądnicy, rozciąga stos węglowy, zwiększając tym samym jego rezystancję i zmniejszając prąd wzbudzenia prądnicy. Powoduje to zmniejszenie napięcia wyjściowego prądnicy.

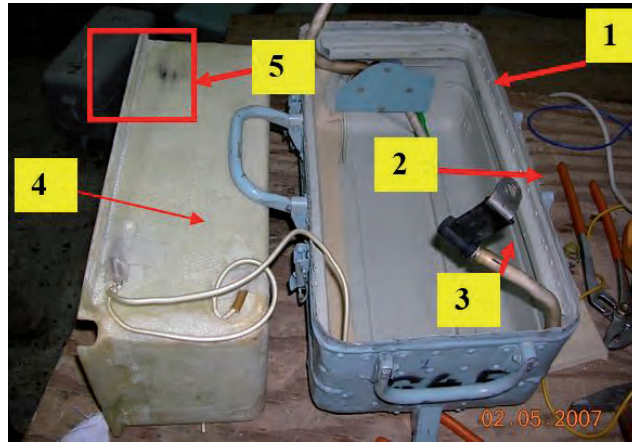
<sup>9</sup> Prąd zwrotny – prąd stały płynący z pokładowej baterii akumulatorowej do prądnicy. Jest to stan odwrotnego przepływu energii i może być tolerowany jedynie krótkotrwale.

<sup>10</sup> Latem w Iraku autorzy często notowali temperaturę  $+55^{\circ}\text{C}$  w cieniu. Według praktyków temperatura w słońcu przekracza wówczas  $+80^{\circ}\text{C}$ . Dlatego niedopuszczalne jest długotrwałe wystawianie baterii akumulatorowych na działanie promieniowania słonecznego.

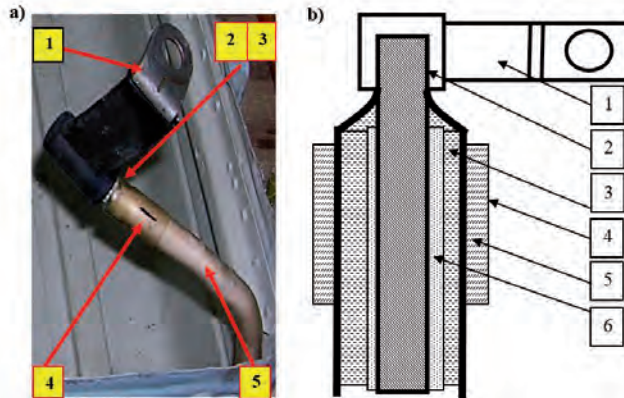
Ogólnie biorąc, pokładowe baterie akumulatorowe są zazwyczaj przeładowywane i przegrzewane w czasie eksploatacji w warunkach misji wojskowej w okresie letnim [59]. Sytuację pogarsza niezrozumienie procesów eksploatacji baterii pokładowej podczas postoju statku powietrznego. W czasie postoju w bazie lotniczej baterie akumulatorowe są zazwyczaj oddawane do polowej stacji ładowania. Są one tam przeważnie tylko doładowywane. Często w warunkach intensywnych działań operacyjnych brakuje czasu na comiesięczne kontrolne rozładowanie, które oprócz dostarczenia informacji o wartości pojemności baterii powoduje też „samooczyszczenie” baterii. Jest to kardynalny błąd eksploatacyjny, gdyż po zamontowaniu na pokładzie, podczas lotu są one ponownie doładowywane. Jeszcze większym błędem jest zbyt intensywne dolewanie wody destylowanej. Faktem jest, że w warunkach podwyższonej temperatury wzrasta intensywność parowania wszelkich cieczy. Zbyt niski poziom elektrolitu, zwłaszcza jeśli część płyt elektrycznie czynnych zostaje wystawiona na bezpośrednie oddziaływanie powietrza, powoduje znacznie zmniejszoną pojemność, a nawet nieodwracalne uszkodzenia („zasiarczenie”).

Jednakże zbyt wysoki poziom elektrolitu to brak przestrzeni kompensacyjnej dla pęcherzyków gazu wydobywających się podczas oddawania lub (w mniejszym stopniu) pobierania energii elektrycznej [59]. Intensywność gazowania wzrasta podczas lotu w rozrzedzonym powietrzu, np. w związku ze wzrostem wysokości lotu. Następuje intensywne gazowanie elektrolitu (w kwasowych bateriach ołowio- wych następuje wydzielanie się wodoru, w zasadowych tlenu), co powoduje jego wydobywanie się przez zawory odpowietrzające. Jednocześnie wraz z wodorem wydobywa się mgła elektrolitu. Osiada ona na elementach wokół zaworów odpowietrzających baterii, m.in. na kablach elektrycznych w pojemniku-kontenerze (rys. 4.130, elementy 2 i 3).

Na przewody elektryczne są nasunięte rurki igielitowe w celu zwiększenia odporności izolacji zewnętrznej na ścieranie. Krople elektrolitu często dostają się pomiędzy powierzchnię wewnętrzną rurki igielitowej a powierzchnię przewodu elektrycznego. Na skutek zjawiska włoskowatości powierzchnia kondensatu elektrolitu podnosi się, powodując jego połączenie z zaciskiem elektrycznym „+” danego przewodu elektrycznego (rys. 4.131). Jeżeli teraz objętość kondensatu elektrolitu połączy się z obudową baterii akumulatorowej na skutek pęknięcia izolacji, to następuje samorozładowanie.



**Rys. 4.130.** Rozmontowany pojemnik akumulatorowy baterii akumulatorowej 12SAM-28 śmigłowca Mi-8, gdzie: 1 – korpus pojemnika akumulatorowego; 2 – końcówka oczkowa przewodu minusowego pojemnika akumulatorowego; 3 – miejsce penetracji kropli elektrolitu do przestrzeni pomiędzy warstwą izolacji podstawowej przewodu elektrycznego a dodatkową igielitową koszulką izolacyjną; 4 – wkładka izolacyjna pojemnika akumulatorowego z wmontowanym elementem grzejnym; 5 – miejsce przetarcia warstwy izolacyjnej przez grzejnik



**Rys. 4.131.** Przewód elektryczny pojemnika akumulatorowego – miejsce penetracji elektrolitu: a) widok ogólny końcówki przewodu minusowego; b) rysunek pogłębiony sposobu zasysania kondensatu elektrolitu i zwarć z końcówką kablową, gdzie: 1 – końcówka kablowa przewodu elektrycznego; 2 – żyła przewodząca przewodu elektrycznego; 3 – elektrolit w przestrzeni pomiędzy warstwą izolacji podstawowej przewodu elektrycznego a dodatkową igielitową koszulką izolacyjną; 4 – koszulka opisowa (do oznaczania biegunowości); 5 – dodatkowa igielitowa koszulka izolacyjna; 6 – warstwa izolacji podstawowej przewodu elektrycznego

#### 4.6.6. Złącza wysokoprądowe pokładowych baterii akumulatorowych

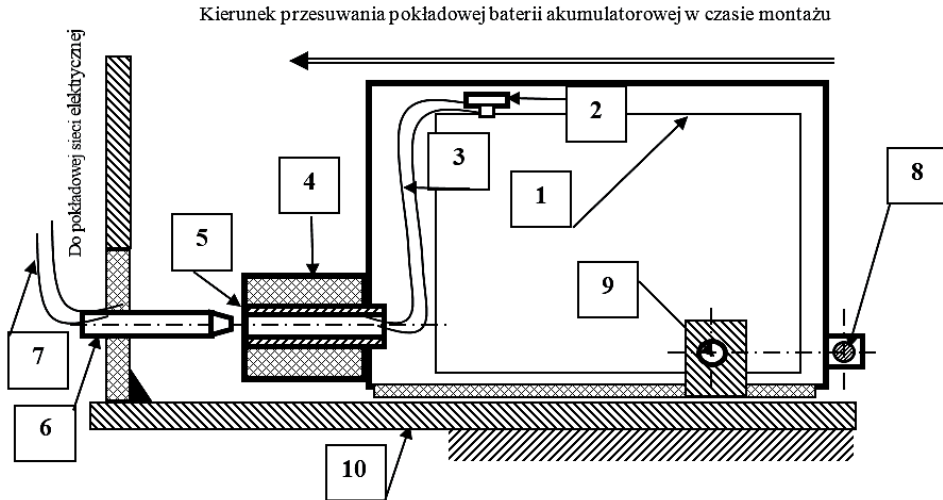
Każda pokładowa bateria elektryczna musi być połączona z pokładową siecią elektryczną. Baterie pokładowe są zazwyczaj wsuwane po odpowiednich przewodnicach. Istotne jest poprawne zamknięcie obwodu prądowego złączem wysokoprądowym. W złączu tym tuleje stykowe umieszczone są „sztywno” na pojemniku-kontenerze, zaś kołki stykowe na pokładzie SP. Cały pojemnik-kontener jest wsuwany po przewodnicach i blokowany mechanicznie za pomocą sworzni blokady mechanicznej (rys. 4.132). W przypadku eksploatacyjnego zużywania się elementów przewodnic lub sworzni powstają luzy podłużne umożliwiające przemieszczanie się pojemnika-kontenera po przewodnicach. Jednocześnie przemieszczają się (sztywno przymocowane do pojemnika-kontenera) tuleje stykowe złącza wysokoprądowego.

Tymczasem kołki stykowe pozostają nadal związane sztywno z pokładem statku powietrznego. Tak więc powstają luzy pomiędzy powierzchniami stykowymi. Luzy te zmieniają się podczas wibracji płatowca w czasie lotu. Powoduje to intensywne iskrzenie pomiędzy powierzchnią tulei stykowej a kołkami stykowymi złącza wysokoprądowego. W historii powojennego lotnictwa wojskowego, pokładowe kwasowe baterie akumulatorowe (na samolotach typu Lim-1-6 czy MiG-15-19<sup>11</sup>) do sieci prądu stałego podłączano śrubami. Jednakże utrudniało to szybkie i sprawne przekazywanie baterii akumulatorowych do stacji obsługi akumulatorów, a także wymianę pokładowej baterii akumulatorowej w razie jej awarii. Z chwilą wprowadzenia do Polski samolotów MiG-21 z **zasadowymi bateriami srebrowo-cynkowymi** zastosowano po raz pierwszy złącza wysokoprądowe szybkozłączne, zbliżone do standardów NATO.

Pokładowe baterie kwasowe eksploatowane w lotnictwie Sił Zbrojnych RP mają dodatkowe pojemniki-kontenery (rys. 4.132). Zaciski elektryczne kwasowej baterii akumulatorowej są połączone z okablowaniem pojemnika-kontenera śrubami. Połączenie to nie sprawia eksploatacyjnych zagrożeń. Jednakże do kolejnego połączenia elektrycznego – pomiędzy pojemnikiem-kontenerem a pokładową siecią elektryczną – stosuje się złącza wysokoprądowe „starego” systemu, które powodują iskrzenie opisane powyżej. Baterie zasadowe nie mają pojemnika-kontenera. Są one montowane bezpośrednio na pokładzie statku powietrznego i przyłączane do elektrycznej sieci pokładowej. Kołki akumulatorowe, zarówno baterii akumulatorowych kwasowych, jak i zasadowych, są wlotowywane do przewodów lotniczych

<sup>11</sup> Prawdopodobnie udział tych typów samolotów w wojnie w Wietnamie już dostarczał sygnałów o konieczności zamiany połączeń śrubowych pokładowych baterii akumulatorowych na złącza szybkozłączne.

i mocowane w sposób trwały do konstrukcji statku powietrznego. W czasie lotu baterie akumulatorowe doznają wibracji.



**Rys. 4.132.** Pokładowa kwasowa bateria akumulatorowa z pojemnikiem-kontenerem na pokładzie SP ze złączem wysokoprądowym spełniającym standardy rosyjskie, gdzie: 1 – lotnicza bateria akumulatorowa; 2 – zacisk śrubowy łączący biegun baterii kwasowej z przewodem elektrycznym pojemnika-kontenera; 3 – przewód elektryczny pojemnika-kontenera; 4 – izolator złącza wysokoprądowego pojemnika-kontenera; 5 – tuleja stykowa złącza wysokoprądowego pojemnika-kontenera; 6 – kołek stykowy złącza wysokoprądowego (przymocowany do konstrukcji płatowca statku powietrznego); 7 – przewód elektryczny przyłutowany do kołka stykowego wysokoprądowego; 8 – sworznie blokady mechanicznej; 9 – otwór w prowadnicy współpracujący ze sworzniem blokady mechanicznej; 10 – prowadnice przymocowane do konstrukcji statku powietrznego

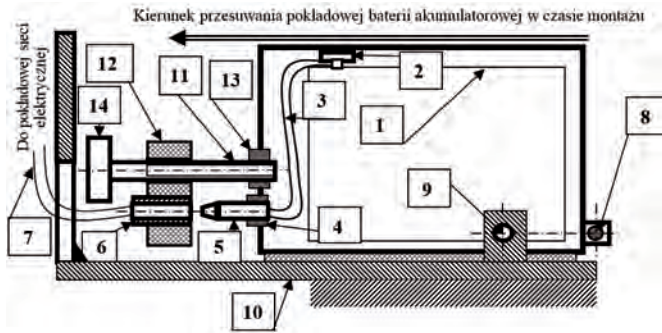
W statkach powietrznych po kilkunastoletnich okresach eksploatacji pojawiają się luzy w elementach mocujących baterie akumulatorowe do kadłuba statku powietrznego, co znacznie zwiększa amplitudę wibracji tych baterii. Powoduje to przemieszczanie się gniazd stykowych baterii względem kołków w czasie lotu. Ponieważ przez połączenie to zwykle płynie prąd (w czasie lotu bateria zwykle jest doładowywana przez prądnicę), następuje iskrzenie i wypalanie się styków. Na zdjęciu (rys. 4.133) można wyróżnić trzy poziomy zużycia kołków stykowych: niski, średni i wysoki. Warunki eksploatacji styków „starego” systemu są nieco łagodzone przez zapewnienie pewnego luzu promieniowego kołków i tulei stykowych. Dzięki temu powierzchnia stykowa kołków złącza wysokoprądowego ma szansę

lepiej przylegać do powierzchni stykowej tulei stykowej. Niemniej przypadki wypaleń tych powierzchni są notowane przez autorów bardzo często, zwłaszcza dla styków zużytych mechanicznie o znacznych luzach promieniowych.

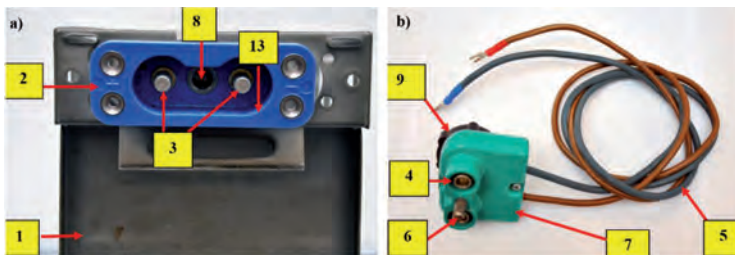


**Rys. 4.133.** Kołek stykowy złącza wysokoprądowego (przymocowany do konstrukcji płatowca statku powietrznego): 1 – o niskim stopniu zużycia; 2 – o średnim stopniu zużycia; 3 – o wysokim stopniu zużycia; 4 – miejsca połączenia (lutowania) żył przewodzących

Zupełnie inna konstrukcja złącza wysokoprądowego, wykonanego według standardów NATO, stosowana jest w krajach zachodnioeuropejskich oraz USA. Tutaj kołki i tulejki stykowe są połączone za pomocą śruby o dużym skoku z zatrzaskiem – dzięki temu zapewniony jest szybki montaż i demontaż baterii (rys. 4.134 i 4.135). Nie występuje dzięki temu iskrzenie podczas wibracji w czasie lotu. Połączenie obwodu elektrycznego płatowca z baterią akumulatorową zapewnia elastyczny przewód przylutowany do kołka stykowego swobodnego złącza wysokoprądowego.



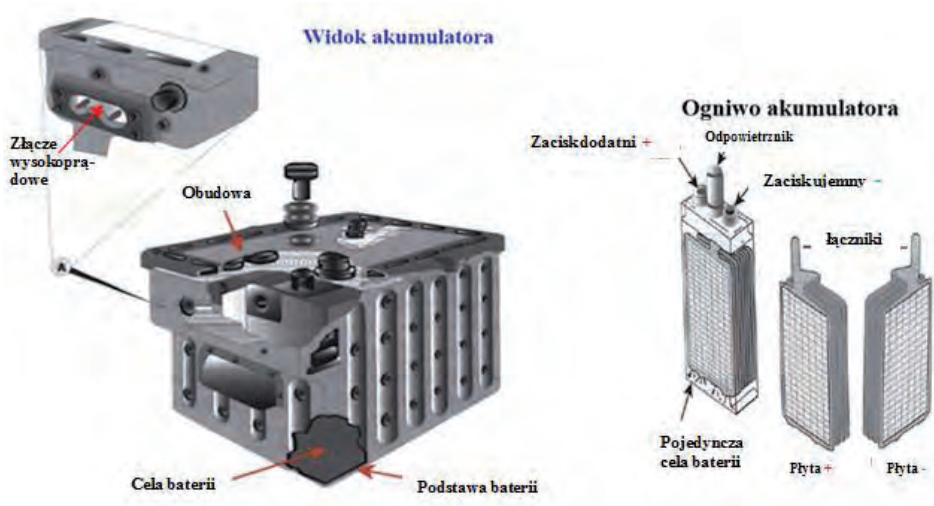
**Rys. 4.134.** Pokładowa bateria akumulatorowa z pojemnikiem-kontenerem na pokładzie SP ze złączem wysokoprądowym spełniającym standardy NATO, gdzie: 1 – lotnicza bateria akumulatorowa; 2 – zacisk śrubowy łączący biegun baterii z przewodem elektrycznym pojemnika-kontenera; 3 – przewód elektryczny pojemnika-kontenera; 4 – izolator złącza wysokoprądowego pojemnika-kontenera; 5 – kołek stykowy złącza wysokoprądowego pojemnika-kontenera; 6 – tuleja stykowa swobodnego złącza wysokoprądowego; 7 – przewód elektryczny przylutowany do kołka stykowego swobodnego złącza wysokoprądowego; 8 – sworzень blokady mechanicznej; 9 – otwór w prowadnicy współpracujący ze sworzniem blokady mechanicznej; 10 – prowadnice przymocowane do konstrukcji statku powietrznego; 11 – śruba mocująca swobodnego złącza wysokoprądowego; 12 – swobodne złącze wysokoprądowe; 13 – tuleja gwintowana współpracująca ze śrubą mocującą swobodnego złącza wysokoprądowego; 14 – gałka (uchwyt) śruby mocującej swobodnego złącza wysokoprądowego



**Rys. 4.135.** Pokładowa kwasowa bateria akumulatorowa ze złączem ruchomym spełniającym standardy NATO: a) część nieruchoma; b) część ruchoma, gdzie: 1 – lotnicza bateria akumulatorowa; 2 – izolator złącza wysokoprądowego pojemnika-kontenera; 3 – kołek stykowy złącza wysokoprądowego pojemnika-kontenera; 4 – tuleja stykowa swobodnego złącza wysokoprądowego; 5 – przewód elektryczny przylutowany do kołka stykowego swobodnego złącza wysokoprądowego; 6 – bolec blokady mechanicznej; 7 – swobodne złącze wysokoprądowe; 8 – tuleja gwintowana współpracująca ze śrubą mocującą swobodnego złącza wysokoprądowego; 9 – pokrętko (uchwyt) śruby mocującej swobodnego złącza wysokoprądowego

#### 4.6.7. Charakterystyka akumulatorów kwasowych

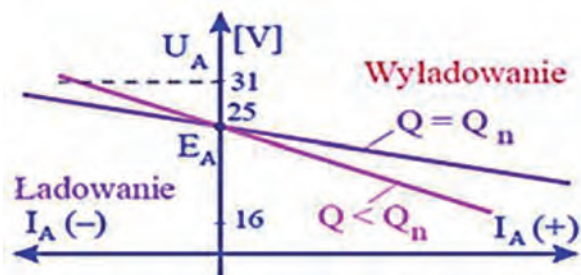
Widok akumulatora ołowiowego stosowanego w lotnictwie przedstawia rys. 4.136.



Rys. 4.136. Akumulator ołowiowy – rysunek poglądowy [208]

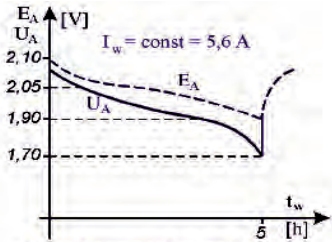
#### Pojęcia podstawowe

Napięcie akumulatora zmienia się w czasie ładowania i rozładowywania (rys. 4.137 i 4.138) [139, 208]. Zależność napięcia od czasu ładowania nazywamy **charakterystyką ładowania**, natomiast zależność napięcia od czasu rozładowywania nazywa się **charakterystyką rozładowywania (wyladowania)** akumulatora (rys. 4.139).



Rys. 4.137. Charakterystyka zewnętrzna ładowania i wyladowania ogniwa akumulatora ołowiowego [208]

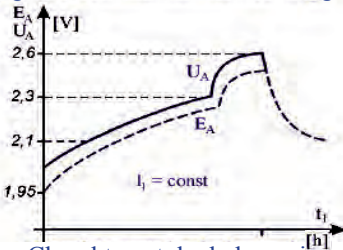




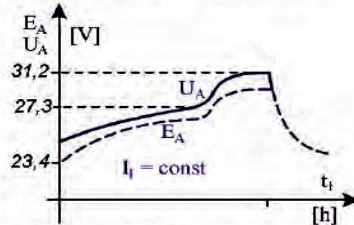
Charakterystyka wyładowania ogniwa akumulatora ołowianego



Charakterystyka wyładowania akumulatora ołowianego 12 ogniwowego

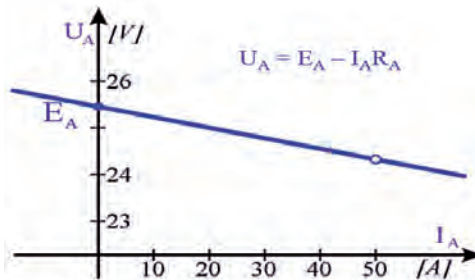


Charakterystyka ładowania ogniwa akumulatora ołowianego



Charakterystyka ładowania akumulatora ołowianego 12 ogniwowego dla  $I_l = \text{const}$

Rys. 4.138. Charakterystyki ładowania i rozładowania akumulatora ołowianego [208]



Rys. 4.139. Przykładowa charakterystyka napięcia na zaciskach wyjściowych lotniczego akumulatora kwasowego w funkcji obciążania [208]

**Graniczne napięcie wyładowania** jest to wartość napięcia, poniżej której akumulator nie powinien być rozładowywany, ponieważ może nastąpić jego uszkodzenie (niemożność jego ponownego naładowania).

**Graniczne napięcie ładowania** jest to taka wartość napięcia, powyżej której akumulator nie powinien być ładowany, ponieważ może nastąpić jego uszkodzenie (niemożność jego ponownego naładowania). Wartość napięć granicznych mogą być różne dla różnych typów akumulatorów oraz różnych prądów.

**Rezystancja wewnętrzna akumulatora  $R_A$**  jest sumą rezystancji elektrod  $R_{elr}$ , styku elektrolitu z elektrodami  $R_{st}$ , elektrolitu  $R_{elt}$  i połączeń między elektrodami

$R_{\text{poi}}$  [139, 208]. Ponieważ przewodzenie prądu w elektrolicie ma charakter jonowy, a ruch jonów jest utrudniany przez separatory, które izolują różnoimienne elektrody, w konsekwencji zwiększa się dodatkowo rezystywność elektrolitu. Można to uwzględnić poprzez dodanie do rezystancji wewnętrznej pewnej rezystancji dodatkowej  $R_{\text{sep}}$ . Efektem tego jest wzór na całkowitą rezystancję wewnętrzną akumulatora  $R_A$ :

$$R_A = R_{\text{elr}} + R_{\text{st}} + R_{\text{elt}} + R_{\text{poi}} + R_{\text{sep}} \quad (4.62)$$

**Pojemność elektryczna akumulatora** to zdolność do przyjęcia i oddania ładunku elektrycznego – energii elektrycznej. Miarą pojemności elektrycznej jest ilość energii, jaką można uzyskać z całkowicie naładowanego akumulatora przy rozładowywaniu go napięciem granicznym. Jednostką pojemności elektrycznej jest **amperogodzina (Ah)**.

**Pojemność energetyczna akumulatora** charakteryzuje zdolność do przyjęcia i oddania energii. Miarą pojemności energetycznej jest ilość energii, jaką można uzyskać z całkowicie naładowanego akumulatora przy rozładowywaniu go do napięcia granicznego. Jednostką pojemności energetycznej jest **watogodzina (Wh)**.

**Rzeczywista pojemność akumulatora** zależy od warunków, w jakich odbywa się rozładowanie, dlatego producenci podają pojemność znamionową w Ah.

**Znamionowa pojemność elektryczna akumulatora** jest to ilość energii, jaką można uzyskać z całkowicie naładowanego akumulatora przy rozładowywaniu go do napięcia granicznego w warunkach znamionowych. Warunki znamionowe określa PN.

Określenie znamionowej pojemności elektrycznej akumulatora zwykle polegają na tym że, bateria rozładowywana jest takim prądem, przy którym zostaje ona wyczerpana np. w ciągu 5 godzin (mówimy wówczas o tzw. pięciogodzinnym prądzie rozładowującym), w temp. 15–20°C przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym. Rozładowanie akumulatora w warunkach innych niż znamionowe zmienia jego pojemność.

Miarę pojemności elektrycznej wyraża się wzorem:

$$Q_{el} = \int_0^{T_{\text{wył}}} i_{\text{wył}}(t) dt \quad (4.63)$$

gdzie:  $i_{\text{wył}}(t)$  – zależność prądu wyładowania od czasu;  $T_{\text{wył}}$  – czas trwania wyładowania akumulatora.

Jeśli założymy (tak jak to się praktycznie biorąc realizuje w stacjach ładowania akumulatorów), że:  $i_{\text{wyl}}(t) = I_{\text{wyl}} = \text{const}$ , to pojemność elektryczną tego ładowania lub wyładowania można opisać uproszczonym wzorem:

$$Q_{\text{el}} = I_{\text{wyl}} T_{\text{wyl}} \quad (4.64)$$

Dla pojemności znamionowych są słuszne następujące wyrażenia:

$$Q_{\text{el}} = I_{\text{wyl}} T_{\text{wyl}} \quad (4.65)$$

Pojemność rzeczywista dla warunków znamionowych maleje w trakcie użytkowania, wskutek zużywania się masy czynnej elektrod. Gdy osiąga ona pewną wartość graniczną (znacznie mniejszą od pojemności znamionowej), baterię akumulatorową należy uznać za zużytą (nie spełniającą swoich zadań).

Przy równoległym połączeniu baterii lub pojedynczych ogniw akumulatorowych, pojemność elektryczna i energetyczna wzrasta. Dla zespołu  $n$  jednakowych baterii lub pojedynczych ogniw akumulatorowych połączonych równolegle, otrzymuje się pojemność elektryczną  $n$ -krotnie większą:

$$I_{\text{wyl zn}(n, r)} = n \cdot I_{\text{wyl zn}} \quad (4.66)$$

Stąd pojemność pokładowej baterii akumulatorowej złożonej z  $n$  jednakowych baterii lub pojedynczych ogniw akumulatorowych połączonych równolegle jest równa sumie pojemności, czyli jeśli są jednakowe, to:

$$Q_{\text{el zn}(n, r)} = I_{\text{el zn}(n, r)} T_{\text{wyl zn}} = n I_{\text{wyl zn}} T_{\text{wyl zn}} = n Q_{\text{el zn}} \quad (4.67)$$

gdzie:  $I_{\text{wyl zn}(n, r)}$ ,  $U_{\text{wyl zn}(n, r)}$  – znamionowy prąd i napięcie rozładowania zespołu  $n$  jednakowych baterii połączonych równolegle,  $Q_{\text{el zn}(n, r)}$ ,  $Q_{\text{en zn}(n, r)}$  – znamionowa pojemność elektryczna i energetyczna zespołu  $n$  jednakowych baterii połączonych równolegle.

Przy szeregowym połączeniu jednakowych baterii pojemność elektryczna nie zmienia się, rośnie natomiast pojemność energetyczna i siła elektromotoryczna w takim połączeniu. Należy pamiętać, że pojemność stanowi pewną właściwość własną akumulatora, niezależną od stanu jego naładowania [119, 139, 142, 208]. Nie należy utożsamiać **pojemności** akumulatora ze stanem jego **naładowania**.

**Stan naładowania** jest to ilość energii, którą możemy pozyskać z baterii, **pojemność** oznacza, jaką ilość energii możemy w tej baterii umieścić. W trakcie ładowania akumulatora wytrza się pewna ilość ciepła (straty na rezystancji wewnętrznej) oraz zachodzą niepożądane reakcje chemiczne (rozpad wody z elektrolitu na wodór i tlen, zjawisko to nazywamy – **gazowaniem**). W wyniku tego część energii dostarczonej do naładowania akumulatora zostaje stracona. Stosunek ilości energii dostarczonej do wykorzystanej nazywamy **sprawnością: elektryczną lub energetyczną**.

**Sprawność elektryczna**  $\eta_{el}$  jest to stosunek ilości elektrycznej otrzymanej z akumulatora w czasie rozładowania do ilości elektryczności dostarczonej do baterii w czasie ładowania:

$$\eta_{el} = \frac{\int_0^{T_{wył}} i_{wył}(t) dt}{\int_0^{T_{ład}} i_{ład}(t) dt} \quad (4.68)$$

**Sprawność energetyczna**  $\eta_{en}$  jest to stosunek ilości energii otrzymanej z baterii w czasie rozładowywania do ilości energii dostarczonej do baterii w czasie ładowania:

$$\eta_{en} = \frac{\int_0^{T_{wył}} u_{wył}(t) \cdot i_{wył}(t) dt}{\int_0^{T_{ład}} u_{ład}(t) \cdot i_{ład}(t) dt} \quad (4.69)$$

Właściwości baterii akumulatorowych wyrażają się wieloma innymi parametrami. Ze względu na zmiany starzeniowe, baterie charakteryzują się trwałością. **Trwałość** określana jest w różny sposób, ale najczęściej jako liczba tzw. cykli. **Cykl** to proces całkowitego naładowania i rozładowania akumulatora lub czas rzeczywistego użytkowania (np.: łączny czas lotu) przy ograniczonym czasie kalendarzowym liczonym od chwili uruchomienia akumulatora.

Naładowany akumulator traci w miarę upływu czasu ładunek elektryczny, nawet wtedy gdy nie jest obciążony (obwód elektryczny rozarty). Zjawisko samoczynnego rozładowywania się baterii nazywane jest samorozładowaniem. Rozróżnia się samorozładowanie naturalne i przyspieszone. Samorozładowanie naturalne jest związane z naturalnymi właściwościami substancji czynnych. Samorozładowanie przyspieszone powodują różne czynniki, takie jak: chemiczne zanieczyszczenia elektrolitu, różna gęstość elektrolitu, jakość substancji czynnych, uszkodzenia lub niewłaściwa jakość separatorów międzyelektrodowych, zabrudzenia pokrywy

akumulatora powodujące upływy elektryczne między poszczególnymi ogniwami baterii. Szczególnie wrażliwe na samorozładowanie są akumulatory kwasowe-ołowiowe.

**Samorozładowanie** określa się zwykle jako procentową (w stosunku do pojemności znamionowej) utratę ładunku elektrycznego w ciągu doby, to jest wg wzoru [119, 139, 142, 208]:

$$q = \frac{Q_0 - Q_T}{Q_{el} - Q_{elznT}} \quad (4.70)$$

gdzie:  $Q_0$  – początkowa ilość elektryczności w baterii (początkowy stan naładowania);  $Q_t$  – ilość elektryczności pozostałej w baterii po czasie  $t$ ;  $T$  – czas przechowywania baterii (bez ładowania) w dobach.

Przez przydatność akumulatora do rozruchu należy rozumieć zdolność do rozładowań bardzo dużymi prądami w krótkim czasie. Taki charakter mają prądy rozruchowe w obwodach rozruszników silników statków powietrznych. Ze względu na przydatność do rozruchu akumulatory pokładowe mają bardzo cienkie i porowate elektrody.

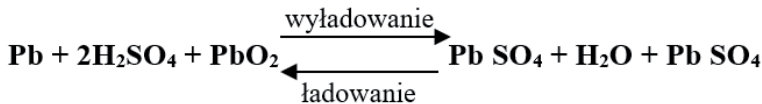
**Przydatność do rozruchu** określamy liczbą wzorcowych rozładowań rozruchowych, które można wykonać przy użyciu całkowicie naładowanego akumulatora.

**Pułap baterii akumulatorowej** jest to graniczne ciśnienie atmosferyczne, poniżej którego bateria przestaje prawidłowo funkcjonować. Jest to wielkość istotna dla akumulatorów użytkowanych na pokładach samolotów latających na dużych wysokościach.

Ogniwo akumulatora ołowiowego w stanie naładowania zawiera substancje czynne w postaci:

- elektrody dodatnie – dwutlenek ołowiu –  $PbO_2$ ;
- elektrody ujemne – metaliczny ołów –  $Pb$ ;
- elektrolit – wodny roztwór kwasu siarkowego o gęstości  $\rho_s = 1,285 \text{ g/cm}^3$ .

Zachodzące w akumulatorze kwasowym procesy chemiczne określa równanie reakcji:

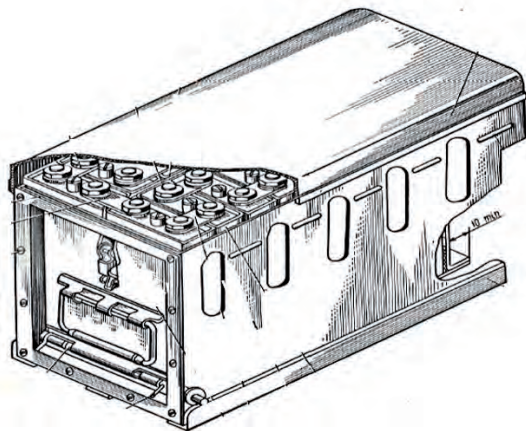


#### 4.6.8. Charakterystyka akumulatorów zasadowych kadmowo-niklowych

Akumulatory, w których elektrolit jest o odczynie zasadowym (roztwór wodorotlenku potasu lub sodu), a ogniwa wykonane są z tlenku wodorotlenku niklu  $\text{NiO(OH)}$  (anoda) i z metalicznego kadmu (katoda) to akumulatory niklowo-kadmowe (NiCd lub Ni-Cd). Akumulatory tego typu cechują się dość dużą wydajnością prądową, ale występuje w nich uciążliwy efekt pamięci. Dlatego w czasie ich eksploatacji zaleca się ich pełne rozładowanie, tj. powinny być rozładowywane i ładowane w pełnych cyklach, a po rozładowaniu należy akumulator niezwłocznie naładować, nie pozostawiając go na dłużej w stanie rozładowanym.

Akumulatory NiCd są nadal stosowane w najtrudniejszych warunkach pracy, a także w środowiskach zagrożonych wybuchem. Są one odporne na złe warunki pracy, czyli wysoką temperaturę ( $40^{\circ}\text{C}$ ) i przeładowania oraz nie mają tendencji do eksplozji w wysokiej temperaturze. Dzięki temu są one dobrym źródłem energii w trudnych warunkach eksploatacji. Ich wadą jest bardzo wysokie samorozładowanie, zwłaszcza gdy spod zaworów wentylacyjnych (na skutek intensywnego ładowania lub przy obniżonym ciśnieniu np. na znacznej wysokości lotu) wydobywają się opary i osiadają pomiędzy sworzniem dodatnim a ujemnym [119, 142, 208].

Widok akumulatora niklowo-kadmowego stosowanego w lotnictwie przedstawia rys. 4.136.



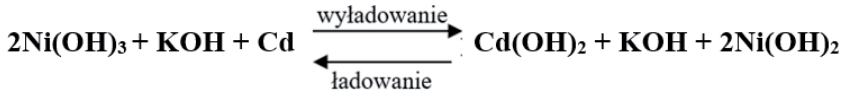
**Rys. 4.140.** Wygląd zewnętrzny baterii akumulatorowej kadmowo-niklowej 20NKBN-25 (Su-22) [133]

Akumulator **kadmowo-niklowy** składa się z 20 (19) ogniw, które zawierają substancje czynne w postaci:

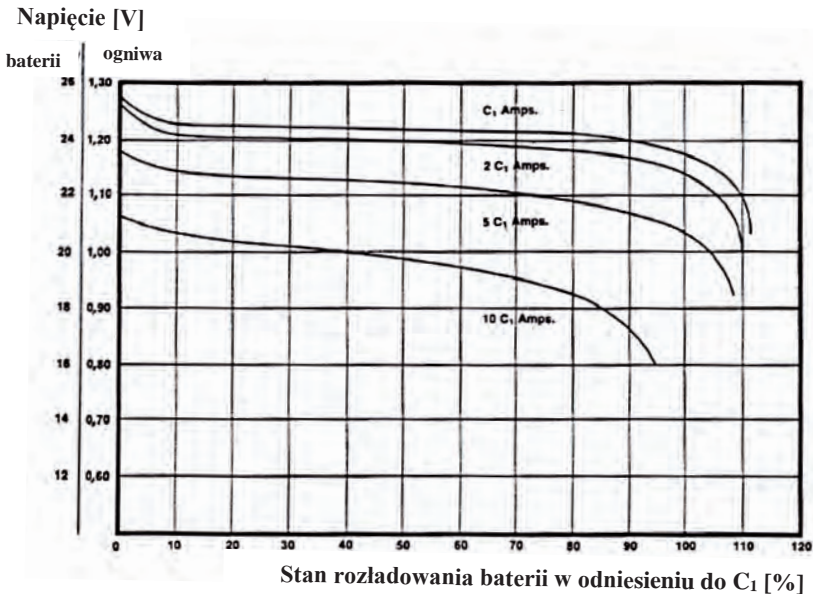
- elektrody dodatnie – wodorotlenek niklu  $\text{Ni(OH)}_3$ ;
- elektrody ujemne – metaliczny kadm  $\text{Cd}$ ;
- elektrolit – wodny roztwór wodorotlenku potasu o gęstości  $\rho_{\text{KOH}} = 1,19\text{--}1,21 \text{ g/cm}^3$ .

Ogniwa są zamknięte zaworami jednokierunkowymi.

Zachodzące procesy chemiczne określa równanie reakcji:



Charakterystykę rozładowania baterii akumulatorowej kadmowo-niklowej przedstawiono na rys. 4.141.

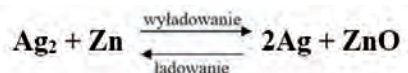


Rys. 4.141. Charakterystyki rozładowania baterii akumulatorowej kadmowo-niklowej [133]

#### 4.6.9. Charakterystyki akumulatorów zasadowych srebrowo-cynkowych

Akumulatory, w których elektrolitem jest roztwór zasadowy (wodorotlenek sodu lub potasu), a ogniwa galwaniczne wykonane są z tlenku srebra  $\text{Ag}_2\text{O}$  (anoda) i z cynku  $\text{Zn}$  (katoda) to akumulatory srebrowo-cynkowe  $\text{Ag-Zn}$  [49].

Zachodzące procesy chemiczne określa równanie reakcji:



Widok akumulatora nikielowo-kadmowego stosowanego w lotnictwie przedstawia rys. 4.142.

**Widok akumulatora**



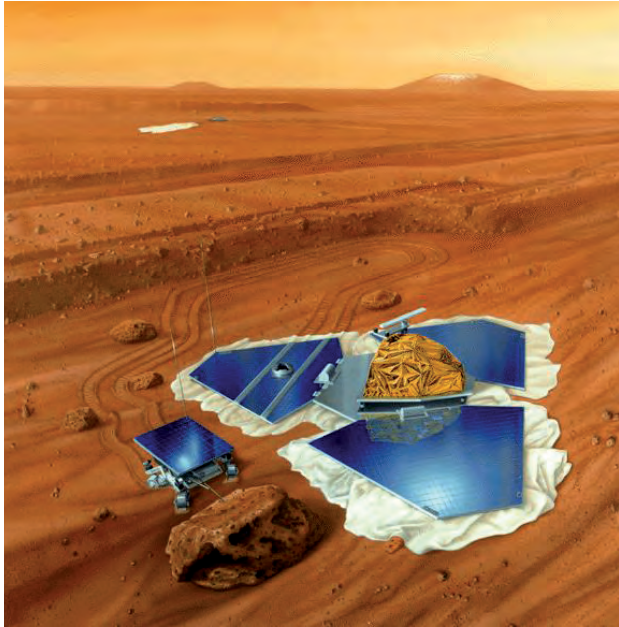
**Ogniwo akumulatora**



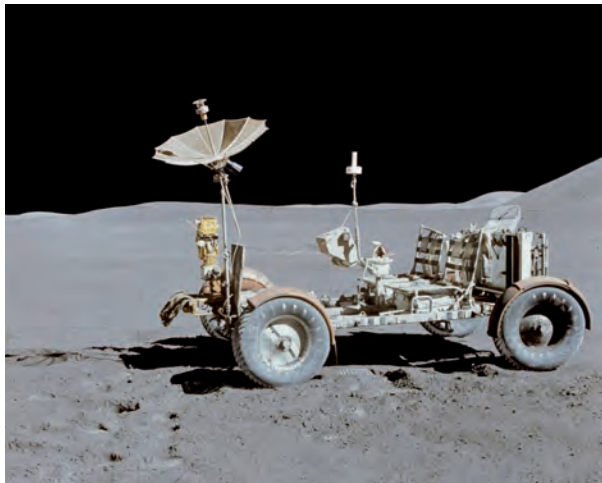
**Rys. 4.142.** Wygląd zewnętrzny baterii akumulatorowej srebrowo-cynkowej 20SCS-45B (MiG-29) [133]

Ogniwo srebrowo-cynkowe jest nieodwracalnym ogniwem galwanicznym o sile elektromotorycznej ok. 1,86 V, a jego gęstość energii wynosi do 0,13 kWh/kg. Wśród baterii niemających możliwości wielokrotnego ponownego naładowania jego stosunek pojemności do ciężaru jest najwyższy. Ogniwa srebrowo-cynkowe mają małą żywotność. Są produkowane w różnych rozmiarach, od guzika do odzieży (w których ilość użytego srebra jest bardzo mała i tylko w nieznacznym stopniu przyczynia się do wzrostu kosztów całości produktu) po duże baterie (w których przypadku zalety są ważniejsze niż koszt produkcji, np. w sprzęcie wojskowym czy kosmicznym). Baterii srebrowo-cynkowych (Ag-Zn) użyto do zasilania w energię elektryczną lądownika w misji na Marsa Pathfinder (rys. 4.143) oraz na pokładzie łazika księżycowego (rys. 4.144). W porównaniu z innymi ogniwami mają większą wartość siły elektromotorycznej i bardziej płaską charakterystykę rozładowania niż standardowe baterie alkaliczne, np. kadmowo-cynkowe. Ze względu na elektrolit na bazie wody nie mają możliwości zapalenia się, co jest plagą baterii litowo-jonowych [123, 161, 230]. Niemniej znane są w praktyce eksploatacyjnej autorów przypadki stopienia się obudowy niektórych ogniw na skutek kilkakrotnego przeciążenia – wyginające się wówczas płyty spowodowały przetarcie separatorów i zwarcie metaliczne pomiędzy różnoimiennymi płytami.





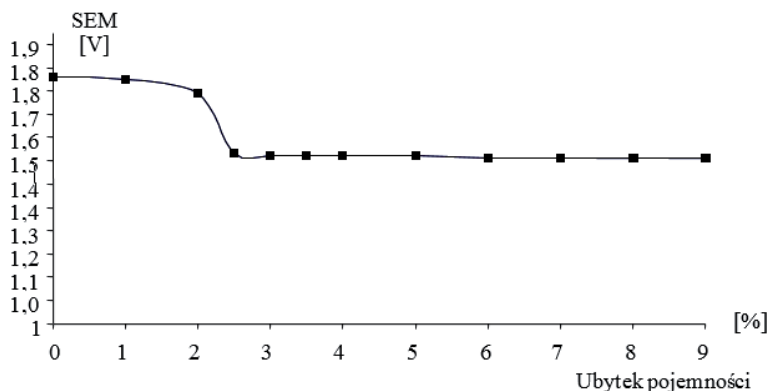
**Rys. 4.143.** Lądownik w misji na Marsa Pathfinder zasilany w energię elektryczną z bateriami srebrowo-cynkowymi (Ag-Zn) [fot. Wikipedia]



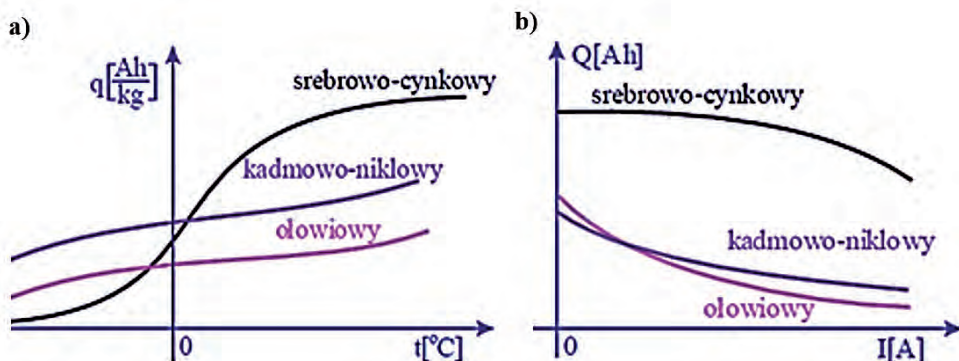
**Rys. 4.144.** Łazik księżycowy wyposażony w baterie srebrowo-cynkowe [fot. Wikipedia]

O przewodze baterii srebrowo-cynkowych zdecydował chemicznie stabilny nieorganiczny separator. Podczas testów w hermetycznie zamkniętym 40 Ah ogniwie poddanym suchej sterylizacji wykazał się długim żywotem. Masa baterii sre-

browo-cynkowych po modernizacji wynosi 1/3 masy baterii niklowo-kadmowych w tym czasie używanych.



Rys. 4.145. Przykładowy wykres zależności SEM od stopnia wyładowania ogniwa (akumulatora) srebrno-cynkowego SCK-45B z praktyki eksploatacyjnej autorów



Rys. 4.146. Charakterystyki porównawcze baterii akumulatorowych srebrno-cynkowych, kadmowo-niklowych i ołowiowych: zależność pojemności jednostkowej (na 1 kg masy) od temperatury elektrolitu; b) zależność pojemności od natężenia prądu rozładowania [105]

Większa gęstość energii baterii srebrno-cynkowych niż niklowo-kadmowych sprawiła, że wybrano je do satelitów geostacjonarnych, które wymagały 400 do 500 cykli ładowania i rozładowania w ciągu 5 lat. Urządzenia elektroniczne satelitów geostacjonarnych zasilane są z baterii słonecznych, baterie srebrno-cynkowe również ładowane są z baterii słonecznych i zasilają satelity w czasie, gdy znajdują się w cieniu Ziemi. Pomyślna modernizacja hermetycznych sterylnych 40 Ah

srebrowo-cynkowych baterii zachęciła NASA do kontynuacji programu ich modernizacji. Przykładowy wykres zależności SEM od stopnia wyładowania ogniwa (akumulatora) srebrowo-cynkowego SCK-45B z praktyki eksploatacyjnej autorów przedstawia rys. 4.145.

Charakterystyki porównawcze baterii akumulatorowych (srebrowo-cynkowych, kadmowo-niklowych i ołowiowych) przedstawiono na rys. 4.146.

#### 4.6.10. Charakterystyki akumulatorów litowo-jonowych

Akumulatory, w których elektrolitem jest ciecz zawierająca sole litowe rozpuszczone w mieszaninie organicznych rozpuszczalników lub w ciele stałym, a ogniwa galwaniczne wykonane są z porowatego węgla (anoda) i z tlenków metali (katoda), to akumulatory litowo-jonowe (Li-Ion) [123, 161, 230]. Widok akumulatora litowo-jonowego przedstawia rys. 4.147. Akumulatory tego typu mają napięcie ok. 3,6 V na ogniwo. Efekt pamięci oraz efekt leniwej baterii nie występuje. Nie należy rozładowywać ogniw Li-Ion do napięcia niższego niż 2,75 V do 3 V na ogniwo. Akumulatory litowo-jonowe nie akceptują przeładowania, nadmiernego rozładowania oraz przegrzania, co narzuca na ładowarki akumulatorów duże wymagania. Nieprzestrzeganie tych reżimów grozi wybuchem lub pożarem. Aby zmniejszyć prawdopodobieństwo tych zjawisk producenci montują w baterii skomplikowaną aparaturę elektroniczną (rys. 4.148).



Rys. 4.147. Akumulator litowo-jonowy firmy Varta [230]

Akumulatory litowo-jonowe są jednymi z najlżejszych, są one stosowane przede wszystkim we wszelkiego rodzaju sprzęcie elektronicznym. Obecnie najczęściej

wykorzystuje się je w laptopach, telefonach komórkowych oraz innych urządzeniach przenośnych. Ogniwa litowo-jonowe stosowane w pojazdach elektrycznych znacznie różnią się od tych stosowanych w sprzęcie elektronicznym. Różnice wynikają przede wszystkim z większych wymagań związanych z warunkami pracy oraz większą wymaganą trwałością, sięgającą 10 lat. Ponadto pakiety wyposażone są w specjalne układy chłodzenia i ogrzewania, zapewniające optymalną temperaturę ich pracy.



**Rys. 4.148.** Akumulator Li-Ion firmy Motorola z telefonu komórkowego po zdjęciu obudowy – widoczny układ kontroli i nadzoru ładowania/rozładowania [230]

W roli elektrolitu ciekłego zastosowanie znajdują siarczan litu  $\text{Li}_2\text{SO}_4$ , heksafluorofosforan litu  $\text{LiPF}_6$  lub nadchloran litu  $\text{LiClO}_4$  rozpuszczone w mieszaninie węgla etylenu (EC), węgla dimetylu (DMC), węgla dietylu (DEC), węgla propylenu (PC) lub węgla etylu metylu (EMC) w różnych proporcjach.

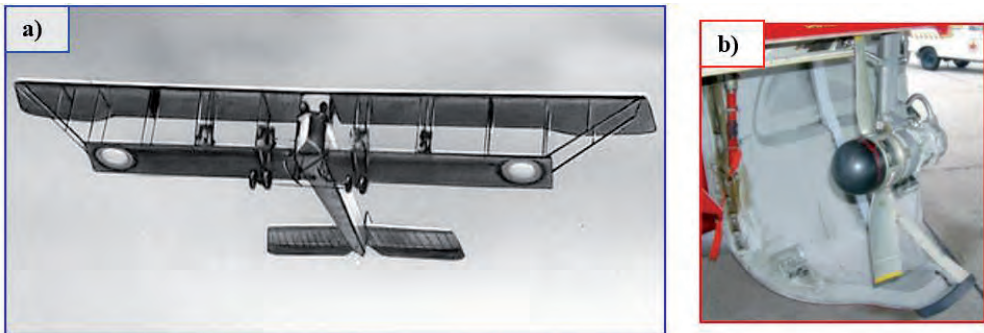
Od pewnego czasu akumulatory litowo-jonowe stosuje firma Boeing. Pierwsze próby były niezbyt pomyślne – zanotowano wiele niesprawności tych baterii, a nawet pożary. Elektronika wypróbowana w zastosowaniu do zasilania sprzętu komercyjnego, jak laptopy, telefony komórkowe, kamery, nie była przystosowana do współpracy z baterią pokładową, która niekiedy musi zapewnić znaczne wartości prądu podczas pracy buforowej z siecią pokładową. „Zapomniano” także o prostych środkach zabezpieczeń wypróbowanych w pokładowych bateriach lotniczych kadmowo-niklowych i srebrowo-cynkowych, polegających na szczelnej obudowie ze stali kwaso- i żaroodpornej oraz o wentylacji baterii z zapewnieniem obiegu powietrza i jego odprowadzeniem na zewnątrz statku powietrznego.

## 4.7. Praca równoległa źródeł prądu

### 4.7.1. Informacje ogólne o pracy równoległej źródeł prądu

#### 4.7.1.1. Początki stosowania prądnic i sieci elektrycznej na pokładach statków powietrznych

W pierwszych statkach powietrznych wykonujących loty krótkotrwałe stosowano tylko pokładową baterię akumulatorową do zasilania pokładowych odbiorników elektrycznych. W czasie dłuższego lotu energia elektryczna szybko się wyczerpywała, dlatego zaczęto stosować prądnice napędzane pędem powietrza w czasie lotu przez osobne śmigiełko [179] nie zamontowane na wale prądnicy (niepołączonej ze strukturą silnika głównego – rys. 4.149a) a na kadłubie. Obecnie na niektórych samolotach powrócono do tej idei jako źródła awaryjnego (rys. 4.149b).



**Rys. 4.149.** Zastosowanie prądnic o napędzie wiatrakowym w lotnictwie: a) samolot Ilja Muromiec konstrukcji Igora Sikorskiego, pierwszy produkowany seryjnie ciężki czterosilnikowy bombowiec rosyjski oblatany w 1913 r.: gdzie na przedniej górnej części kadłuba zamontowano dwie prądnice napędzane strumieniem napływającego powietrza za pośrednictwem śmigła; b) generator awaryjny (napędzany strumieniem napływającego powietrza za pośrednictwem śmigła zamontowanego na wale prądnicy) samolotu Airbus A-320 [125, 179]

Pierwsze węzły elektroenergetyczne w lotnictwie były oparte na źródłach energii elektrycznej prądu stałego: „...od 1919 r. na samolotach zaczęto stosować sieć prądu stałego 8 V, a od 1923 r. 12 V. Generatory były napędzane przez dodatkowe osobne śmigiełko zamontowane na wale prądnicy. Od 1926 r. zaczęto napędzać prądnice bezpośrednio od silnika samolotu za pośrednictwem skrzynki napędów. Od 1933 r. podwyższono napięcie sieci pokładowej do 24 V...” [179]. W latach 50.

XX wieku zaczęto wprowadzać na pokłady statków powietrznych źródła prądu przemiennego. W 1956 r. wg [179] na TU-104 zastosowano trójfazową sieć elektroenergetyczną, zaś w końcu lat pięćdziesiątych upowszechniło się w lotnictwie zasilanie trójfazowe 208/120 V o zmiennej częstotliwości, m.in. oblatany w Rosji i produkowany w WSK Mielec An-28 miał dwie prądnice trójfazowe 3x115/200 V, 400 Hz oraz dwa bloki transformatorowo-prostownicze WU-6 oraz dwie baterie kadmowo-niklowe jako awaryjne. Prądnica GT-16PCz8 służyła jako podstawowe źródło napięcia samolotu.

Prąd przemienny charakteryzuje się możliwościami prostej, łatwej i praktycznie bezstratnej zmiany wartości napięcia poprzez transformowanie. Nie powoduje on erozji elektrolitycznej na połączeniach przewodów elektrycznych z konstrukcją płatowca. Instalacje prądu przemiennego, np. ogrzewania szyby, nie powodują błędów wskazań pokładowych układów nawigacyjnych opartych na magnetyzmie ziemskim. Jednakże podczas projektowania sieci istnieje konieczność uwzględnienia wielu cech prądu przemiennego, wymagających znacznie wyższej wiedzy technicznej oraz wyższych standardów technologicznych niż przy konstruowaniu sieci prądu stałego. Nie wystarczy w obliczeniach uwzględniać tylko rezystancje odbiorników energii elektrycznej, muszą być uwzględniane składowe rezystancje bierny: indukcyjna albo pojemnościowa. Zetknięcie się tych dwóch rodzajów składowych biernych to z kolei możliwość powstawania lokalnych rezonansów.

Kłopoty zwiększają się, gdy chcemy załączyć dwa źródła energii elektrycznej prądu przemiennego do jednej szyny odbiorników. Te dodatkowe (względem źródeł prądu stałego) uwarunkowania można ująć w trzech punktach:

1. Oprócz warunku zrównania amplitudy (wystarczającego do załączania źródła prądu stałego) pojawia się warunek zrównania fazy: wszystkie dołączone do szyny odbiorników źródła prądu przemiennego muszą mieć jednakową wartość częstotliwości. Wiązało się to z koniecznością montowania drogich układów stabilizacji prędkości obrotowej prądnic. Niezachowanie warunku zrównania fazy skutkuje znacznymi stratami energetycznymi, a nawet zwarciami.
2. Załączanie i wyłączanie odbiorników lub źródeł prądu przemiennego powinno się odbywać w momencie osiągnięcia wartości chwilowej napięcia zbliżonej do poziomu zerowego. Przelączenie w innym miejscu może skutkować indukowaniem się w sieci elektroenergetycznej impulsów szpilkowych o krótkich (o czasie trwania znacznie krótszym niż wartość znamionowa okresu) czasach

trwania, ale często znacznych wartościach napięcia. Tego rodzaju impulsy mogą doprowadzić do uszkodzenia (przebiecia) izolacji elektrycznej.

3. Podczas przesyłu energii elektrycznej pojawia się zjawisko modulacji częstotliwościowej. Niekiedy składowa modulująca powoduje znaczną wartość dewiacji (np. podczas zmiany prędkości obrotowej zespołu napędowego albo przy uszkodzeniu niektórych jego podzespołów mechanicznych), wpływając na znaczny poziom zakłóceń pogarszających poprawność funkcjonowania urządzeń radiowych i radionawigacyjnych.

Z uwagi na wymienione trudności i koszty wdrożeń rzadko stosowano na pokładach synchronizację źródeł prądu przemiennego. Wyjątkiem jest śmigłowiec Mi-24, gdzie w czasie oblodzenia łączy się równoległe obie prądnice w celu zwiększenia mocy niezbędnej do zasilania układów grzewczych odladzania łopat i wlotów powietrza do silnika (rys. 4.150).



**Rys. 4.150.** Śmigłowiec Mi-24W ma dwie trójfazowe prądnice prądu przemiennego z możliwością pracy równoległej

W latach 90. nastąpił kolejny przełom w konstrukcji systemów energetycznych stosowanej na zaawansowanych samolotach Airbus, Boeing, Lockheed Martin [3, 4, 125, 182-184] (rys. 4.151), przy prądnicach prądu przemiennego napędzanych silnikami głównymi zaczęto montować wielopulsowe bloki prostownicze o napięciu wyjściowym  $540 V_{DC} (\pm 270 V_{DC})$  oraz  $350 V_{DC}$ .



**Rys. 4.151.** Samoloty z instalacją elektroenergetyczną w technologii HV 270 V<sub>DC</sub>:  
a) Boeing B-787; b) Lockheed F-22 Raptor [fot. Wikipedia]

Przełom ten został wymuszony następującymi czynnikami [3, 4, 54, 125, 182-184, 198, 199, 200, 246]:

1. Zwiększające się zapotrzebowanie na energię elektryczną, ze względu na coraz liczniejsze odbiorniki energii elektrycznej na pokładzie, zgodnie z koncepcją MEA [88, 118, 125, 198, 199, 200] (samolot zelektryfikowany), jak: nowoczesne systemy nawigacyjne, systemy podtrzymania życia, w tym układy klimatyzacji, nowoczesne systemy automatycznego sterowania, napędzane elektrycznie silowniki sterowania lotem, elektryczna instalacja przeciwołodziennowa, hamulce uruchamiane elektrycznie, elektroniczny system zarządzania energią elektryczną, napędzana elektrycznie instalacja ochrony środowiska ECS (Environmental Control System) oraz sterowanie silnikiem – aby nie przegrzewać przewodów elektrycznych należałoby zwiększyć średnicę i masę okablowania, przy podniesieniu napięcia możliwe było znaczne zredukowanie masy, według niektórych opracowań do 28%.
2. Stosowanie na poszycie kadłuba i płatów nośnych materiałów kompozytowych, co utrudnia, a czasem wręcz uniemożliwia stosowanie sieci jedнопроводowej – zastosowanie sieci dwuprzewodowej w technologii 28,5 V<sub>DC</sub> zwiększyłoby dwukrotnie masę okablowania.
3. Znaczne zwiększenie się długości wiązek kablowych z uwagi na wzrost gabarytów statków powietrznych, np. nowoczesny Airbus A-380-800 (napięcie podstawowe 115 VAC, 400 Hz) ma elektryczne linie kablowe o łącznej długości przewodów ok. 470 km. Wiązki przewodów elektrycznych są, zgodnie z przepisami lotniczymi, przykręcane za pomocą obejm do poszycia SP, co powoduje znaczne pojemności pomiędzy żyłą przewodzącą a poszyciem, zwłaszcza po dłuższym okresie eksploatacji, kiedy to grubość izolacji od strony poszycia statku powietrznego wyraźnie ulega zmniejszeniu. Pozostawienie sieci prądu przemien-



nego powoduje znaczne podbicia napięcia na końcu linii kablowych, co stanowi istotne zagrożenie dla odbiorników energii elektrycznej. Prąd stały nie wykazuje takiego zjawiska.

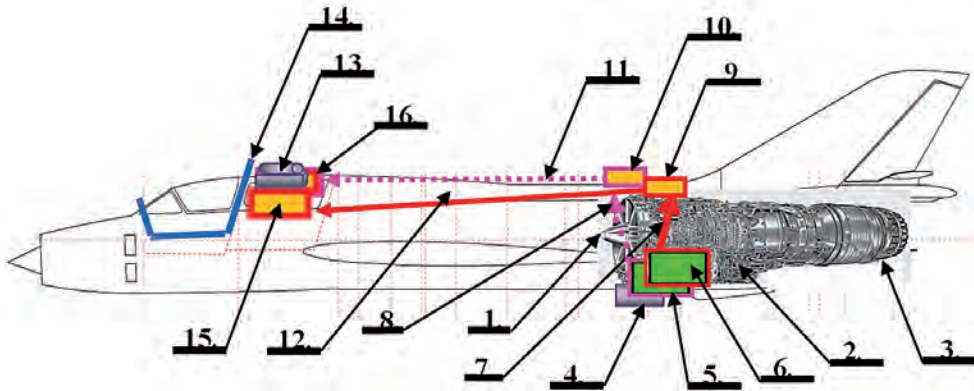
4. Znaczny postęp w dziedzinie technologii izolacji wysokonapięciowej – aktualnie produkowane izolatory takie jak: izolacja kabli (wielowarstwowych), szyn rozdzielczych, bezpieczników, złączy elektrycznych, gwarantuje technologicznie długotrwałą i bezpieczną eksploatację węzła elektroenergetycznego dla podwyższonego napięcia do 270 V<sub>DC</sub>.
5. Większa odporność sieci elektrycznej o podwyższonym napięciu na wyładowania atmosferyczne w stosunku do sieci 28,5 V<sub>DC</sub> oraz sieci 115 /200 V<sub>AC</sub>, 400 Hz.
6. Znaczny postęp w dziedzinie elektroniki – możliwe jest:
  - a) przetwarzanie napięcia prądu przemiennego na prąd stały o wysokim napięciu (270 V<sub>DC</sub> a nawet 540 V<sub>DC</sub>);
  - b) przetwarzanie prądu stałego na dowolne napięcia:
    - 28,5 V, m.in. do ładowania pokładowych baterii akumulatorowych oraz do zasilania licznych pokładowych odbiorników energii elektrycznej; jest to napięcie bezpieczne dla organizmu ludzkiego [77, 141], więc jest preferowane do zastosowania wszędzie tam, gdzie ma styczność załoga lub pasażerowie; sieć 28,5 V jest jednocześnie siecią awaryjną (wspomagana przez pokładowe baterie akumulatorowe i rezerwową komutatorową prądnicę prądu stałego) i powinna być w ciągłej gotowości na wypadek awarii prądnic głównych lub napędzających je silników;
    - stabilizowane częstotliwościowo napięcie 115 V, 400 Hz przez zastosowanie falowników.

#### **4.7.1.2. Podstawowe struktury pokładowej sieci elektroenergetycznej w powojennym rozwoju lotnictwa**

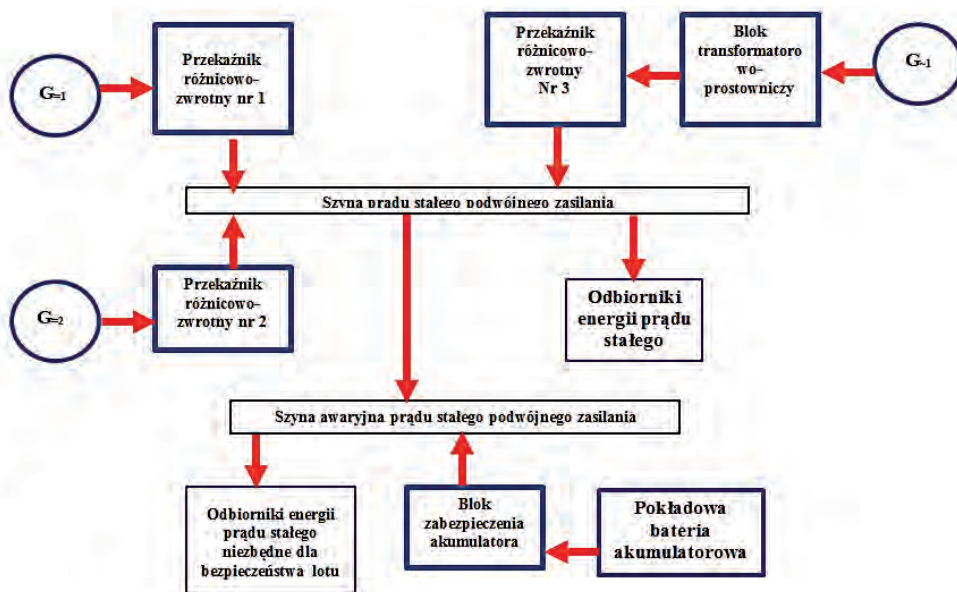
Zadaniem pokładowej sieci elektroenergetycznej jest zapewnienie zasilania olbrzymiej (ciągle rosnącej z roku na rok) liczby odbiorników energii elektrycznej. Od jej niezawodnego działania zależy bezpieczeństwo i zdrowie pasażerów i załogi. Musi więc odznaczać się niezawodnością działania i zapewnić odpowiednią jakość parametryczną na zaciskach wejściowych odbiorników. Pokładowe źródła energii elektrycznej powinny się wzajemnie wspomagać i uzupełniać (praca buforowa), a układ automatyki sterowania siecią odcinać uszkodzone źródła, tak aby w czasie swojej chwilowej lub długotrwałej niesprawności nie obciążały w istotny sposób systemu i nie zagrażały poprawności zasilania, a więc i działania odbiorników. Aby zapewnić wysoki poziom niezawodności pokładowego systemu elektroenergetycz-

nego, statki powietrzne wyposażane są w dwa (i więcej) źródła energii elektrycznej. W systemach konstruowanych do lat 60. XX w. [21, 117, 135, 166, 179, 219]:

1. Sieć prądu stałego 28,5 V<sub>DC</sub> jako podstawowa (rys. 4.152) – komponenty:
  - a) prądnica komutatorowa prądu stałego (często dwie lub więcej połączone równolegle) jako źródło główne;
  - b) bateria akumulatorowa jak źródło awaryjne;
  - c) przekaźnik różnicowo-zwrotny pomiędzy baterią akumulatorową a prądnicą komutatorową prądu stałego, załączający prądnicę do pracy, kiedy jej napięcie przewyższało o 0,2 V wartość napięcia akumulatora i wyłączający ją, gdy prąd zwrotny (gdy prądnica zamiast oddawać prąd zaczynała go pobierać, stając się silnikiem elektrycznym hamującym silnik mechaniczny) zwiększa się powyżej 20% mocy znamionowej.
2. Przetwornice elektromaszynowe (silnik prądu stałego napędzał prądnicę prądu przemiennego) jako wtórne źródło prądu przemiennego o stabilizowanej wartości napięcia i częstotliwości pracujące w ramach własnej, lokalnej sieci prądu przemiennego, przeznaczonej do zasilania:
  - a) przyrządów pokładowych: silników trójfazowych żyroskopów napięciem trójfazowym 3x36 V, 400 Hz, np. sztucznych horyzontów, układów kursowych, żyroskopowych czujników prędkości kątowej w systemie automatycznego sterowania;
  - b) układów radiowych i radionawigacyjnych, elektrycznych przyrządów kontroli silnika, np. manometrów typu DIM.
3. Prądnica prądu przemiennego małej mocy (do 10 kW) o niestabilizowanej prędkości obrotowej do zasilania:
  - a) magnetronu radaru pokładowego;
  - b) układu przeciwołodziennego.
4. W niektórych konstrukcjach (np. W-3WA Sokół) bloki transformatorowo-prostownicze (rys. 4.153) jako źródło wtórne przetwarzające energię prądu przemiennego na prąd stały. W tym przypadku BTP był powiązany z baterią akumulatorową – pomiędzy nimi był instalowany przekaźnik różnicowo-zwrotny.



**Rys. 4.152.** Rozmieszczenie podstawowych podzespołów sieci elektroenergetycznej samolotu Su-22 gdzie: 1 – kołpak aerodynamiczny przedniej podpory łożyskowej silnika turboodrzutowego; 2 – skrzynka napędów agregatów silnika turboodrzutowego; 3 – dysza silnika turboodrzutowego; 4 – prądnica prądu przemiennego SG-8FM; 5 – prądnica prądu stałego GS-12T nr 1 (prawa); 6 – prądnica prądu stałego GS-12T nr 2 (lewa); 7 – tandem kablowy dodatni prądnicy prądu stałego GS-12T nr 1 (prawej); 8 – tandem kablowy dodatni prądnicy prądu stałego GS-12T nr 2 (lewej); 9 – tabela rozdzielcza CRK-1 nr 1 energii elektrycznej prądnicy prądu stałego GS-12T nr 2 (lewej); 10 – tabela rozdzielcza CRK-1 nr 2 energii elektrycznej prądnicy prądu stałego GS-12T nr 1 (prawej); 11 – wiązka elektryczna kabli siłowych (dodatnich) obwodu prądnicy prądu stałego GS-12T nr 1 (prawej); 12 – wiązka elektryczna kabli siłowych obwodu prądnicy prądu stałego GS-12T nr 2 (lewej); 13 – przetwornica elektromaszynowa PTO-1000/1500; 14a – przednia płyta pancerna kabiny pilota; 14 – tylna płyta pancerna kabiny pilota; 15 – tabela rozdzielcza odbiorników nr 1 (lewa); 16 – tabela rozdzielcza odbiorników nr 2 (prawa)

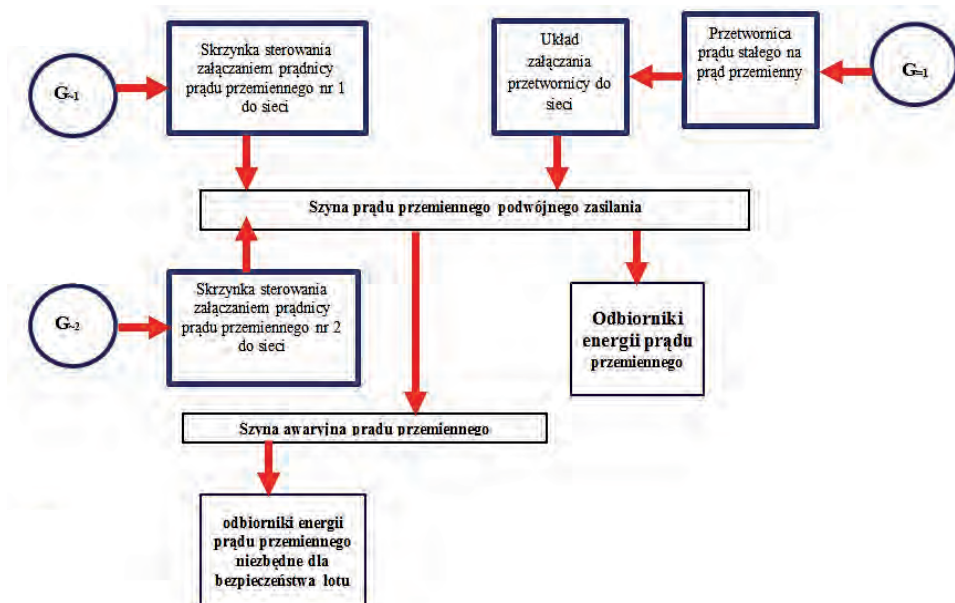


**Rys. 4.153.** Przykładowy system sterowania sieci prądu stałego złożony z dwóch prądnic komutatorowych prądu stałego i jednej prądnicy prądu przemiennego z blokiem transformatorowo-prostowniczym oraz z baterii akumulatorowej

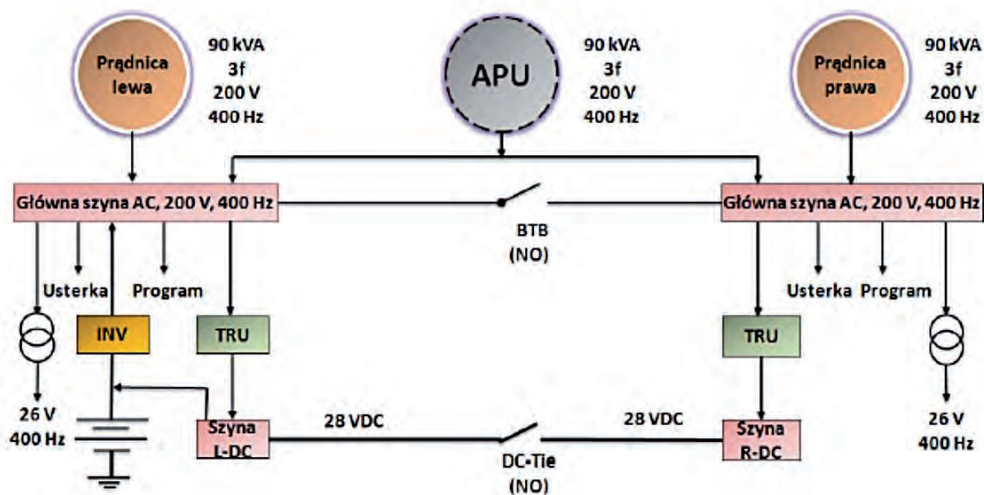
W systemach konstruowanych od lat 60. XX w. do 2000 r. sieć trójfazowa prądu przemiennego była podstawowa (rys. 4.154 i 4.155) – komponenty [163]:

- trójfazowa prądnica prądu przemiennego  $3 \times 115/200$  V, 400 Hz jako źródło główne, często ze stabilizowaną prędkością obrotową, prądnice zwykle pracowały oddzielnie na swoje grupy odbiorników, jednocześnie rezerwując się wzajemnie. Jeżeli prądnice miały stabilizowaną prędkość obrotową, to także pracowały na oddzielne grupy odbiorników, a tylko w przypadku zwiększonego poboru mocy były łączone (synchronizowane);
- w niektórych konstrukcjach bloki transformatorowo-prostownicze o napięciu wyjściowym 28,5 V;
- komutatorowa prądnica prądu stałego jako źródło pomocnicze rezerwująca się wzajemnie z blokiem transformatorowo-prostowniczym; zwykle prądnica ta zasilala swoje odbiorniki, a blok transformatorowo-prostowniczy 28,5 V<sub>DC</sub> swoje. Oba źródła zasilania były łączone przy zwiększonym zapotrzebowaniu energetycznym;
- przełącznik różnicowo-zwrotny pomiędzy baterią akumulatorową a prądnicą komutatorową prądu stałego, załączający prądnicę do pracy, kiedy jej napię-

- cie przewyższało o 0,2 V wartość napięcia akumulatora, i wyłączający ją, gdy prąd zwrotny zwiększa się powyżej 20% mocy znamionowej;
- przełącznik różnicowo-zwrotny pomiędzy baterią akumulatorową a blokiem transformatorowo-prostowniczym, załączający BTP do pracy, kiedy jej napięcie przewyższało o 0,2 V wartość napięcia akumulatora;
  - bateria akumulatorowa jako źródło awaryjne współpracujące z komutatorową prądnicą prądu stałego i BTP – zwykle osobno (jedna bateria z prądnicą, a druga z BTP);
  - przetwornice (zwykle elektroniczne, rzadziej elektromaszynowe) jako źródło prądu przemiennego o stabilizowanej wartości napięcia i częstotliwości pracujące w ramach własnej, lokalnej sieci prądu przemiennego lub (często) jako indywidualna przetwornica w danym urządzeniu, do zasilania:
    - przyrządów pokładowych: żyroskopów (zwykle laserowych) w oparciu o zasilanie z lokalnej sieci 1x26 V, 400 Hz, np. sztucznych horyzontów, układów kursowych, żyroskopowych czujników prędkości kątowej w systemie automatycznego sterowania,
    - układów radiowych i radionawigacyjnych, elektrycznych przyrządów kontroli silnika, np. manometrów typu DIM.



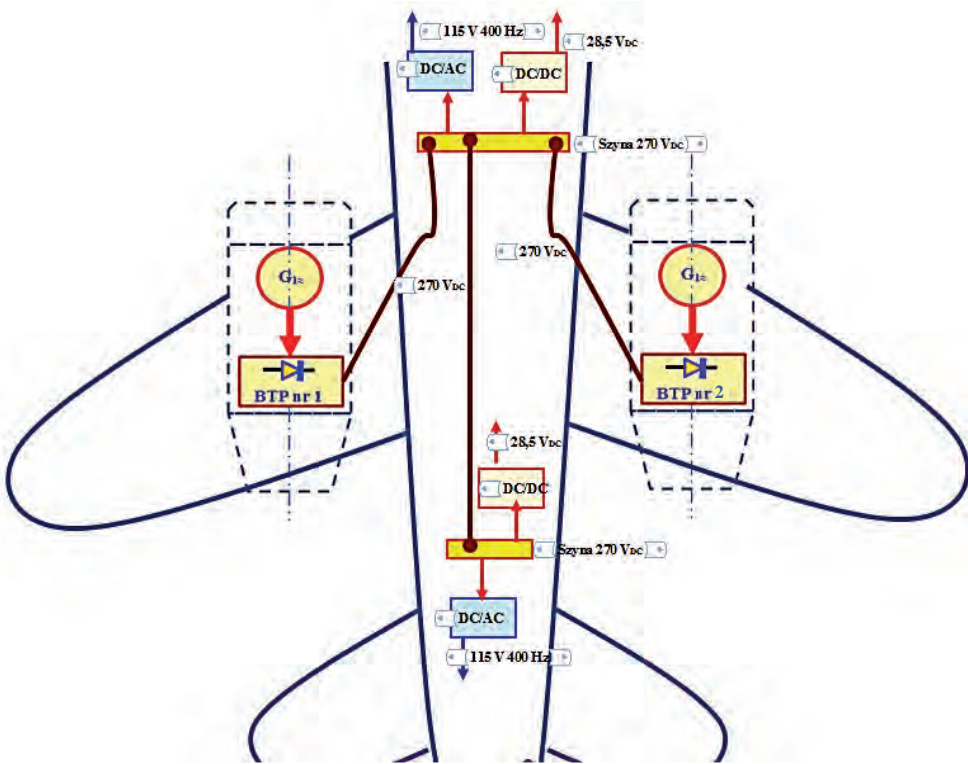
**Rys. 4.154.** Przykładowy system sterowania sieci prądu stałego złożony z dwóch prądnic prądu przemiennego i jednej prądnicy prądu stałego oraz jednej przetwornicy (prądu stałego na prąd przemienny)



Rys. 4.155. System zarządzania rozdziałem energii elektrycznej na samolocie B-767

W systemach konstruowanych po 2000 r. – sieć prądu stałego  $270\text{ V}_{\text{DC}}$  funkcjonuje jako linia przesyłowa pomiędzy prądnicą (trójfazowa prądnica prądu przemiennego  $3 \times 115/200\text{ V}$ ,  $400\text{ Hz}$  z blokiem transformatorowo-prostowniczym) a szynami odbiorników (gdzie zwykle jest przetwarzana na różne wartości i rodzaje napięć dostosowane do wymagań odbiorników i przepisów BHP) – kolejne etapy przetwarzania energii elektrycznej [29, 143, 182–184, 246]:

- trójfazowa prądnica prądu przemiennego  $3 \times 115/200\text{ V}$ ,  $400\text{ Hz}$  jako źródło główne bez stabilizowanej prędkości obrotowej (rys. 4.156, element  $G_{\approx}$ );
- bloki transformatorowo-prostownicze o napięciu wyjściowym  $270\text{ V}_{\text{DC}}$ , montowane w pobliżu prądnicy (rys. 4.156, element BTP);
- kable wysokonapięciowe doprowadzające energię z wyjścia BTP (gondola silnika głównego) do szyn rozdzielczych  $270\text{ V}_{\text{DC}}$ , umieszczone w odległych częściach kadłuba statku powietrznego; w pobliżu tych szyn montuje się przetworniki energii elektrycznej na niskie napięcie dostosowane do zasilania odbiorników;
- falownik przekształcający napięcie stałe  $270\text{ V}_{\text{DC}}$  na napięcie trójfazowe o stabilnej częstotliwości (rys. 4.156, element DC/AC);
- przetwornica energii prądu stałego  $270\text{ V}_{\text{DC}}$  na napięcie prądu stałego  $28,5\text{ V}_{\text{DC}}$  (rys. 4.156, element DC/DC);
- bateria akumulatorowa jako źródło awaryjne współpracujące z szyną (i przetwornicą DC/DC) prądu stałego  $28,5\text{ V}$  – analogicznie jak we wcześniejszych systemach.



**Rys. 4.156.** System zarządzania rozdziałem energii elektrycznej  $270 V_{DC}$ , gdzie:  $G_{1\approx} G_{2\approx}$  – prądnice trójfazowe nr 1 i nr 2 o napięciu wyjściowym  $3 \times 115/200 V$ , 360–900 Hz napędzane ze skrzynki napędów głównego silnika statku powietrznego; BTP – blok transformatorowo-prostowniczy przekształcający napięcie wyjściowe prądnicy trójfazowej  $3 \times 115/200 V$ , 400 Hz na napięcie prądu stałego  $270 V_{DC}$ ; DC/AC – falownik przekształcający napięcie stałe  $270 V_{DC}$  na napięcie trójfazowe o stabilnej częstotliwości 400 Hz; DC/DC – przetwornica energii prądu stałego  $270 V_{DC}$  na napięcie prądu stałego  $28,5 V_{DC}$

#### 4.7.1.3. Praca równoległa prądnicy z akumulatorem

Jak wspomniano, w pierwszych statkach powietrznych wykonujących loty krótkotrwałe stosowano tylko pokładową baterię akumulatorową do zasilania pokładowych odbiorników elektrycznych, lecz w czasie dłuższego lotu energia elektryczna szybko się wyczerpywała. Tak więc na dłuższe loty zastosowano prądnicę komutatorową prądu stałego sprzężoną z silnikiem, a pokładową baterię akumulatorową odłączano i stosowano w sytuacji, gdy nie pracował silnik (rozruch silnika, przymusowe lądowanie w przygodnym terenie, uszkodzenie silnika w czasie lotu). Przy

załączaniu odbiorników dużej mocy o znacznej składowej indukcyjnej, np. silniki, pojawiał się tak silny prąd uderzeniowy (przekraczający ponad 4-krotnie natężenie prądu znamionowego), że napięcie na zaciskach prądnicy zmniejszało się znacznie z powodu spadku napięcia na oporności wewnętrznej tej prądnicy [227]. Aby zmniejszyć ten spadek napięcia sieci pokładowej zasilanej tylko przez prądnicę, do głównych szyn zasilania przyłączana jest pokładowa bateria akumulatorowa.

W czasie normalnej (bez przeciążeń elektrycznych) pracy prądnicy pokładowej bateria ta była doładowywana (przeważnie prąd ładowania 0–3 A). Kiedy jednak następował prąd uderzeniowy i na zaciskach prądnicy gwałtownie obniżało się napięcie, to bateria akumulatorowa oddawała swoją energię na szynę podwójnego zasilania, hamując zjawisko obniżania się napięcia. Taką współpracę nazwano pracą buforową, gdyż niczym bufor pomiędzy wagonami kolejowymi łagodziła skutki uderzenia prądowego spowodowanego przez przyłączenie odbiornika o dużej mocy.

Dla obwodu elektrycznego przedstawiającego pracę równoległą komutatorowej prądnicy prądu stałego 28,5 V<sub>DC</sub> (rys. 4.157) można zapisać równania zgodnie z prawami Kirchhoffa [2, 101, 108, 119]:

$$\left. \begin{aligned} U_S &= U_G \cdot I_G R_G = E_A \pm I_A R_A \\ I_{obc} &= I_G + I_A \end{aligned} \right\} \text{stąd} \Rightarrow \begin{aligned} I_A &= I_{obc} \frac{R_G}{R_A + R_G} - \frac{U_G - E_A}{R_A + R_G} \\ I_G &= I_{obc} \frac{R_G}{R_A + R_G} + \frac{U_G - E_A}{R_A + R_G} \end{aligned} \quad (4.71)$$

gdzie:

$U_S$  – napięcie sieci pokładowej,

$U_G$  – napięcie prądnicy utrzymywane przez regulator,

$E_A$  – napięcie źródłowe akumulatora,

$R_A$  – rezystancja wewnętrzna akumulatora,

$R_G$  – rezystancja połączenia prądnicy z szyną,

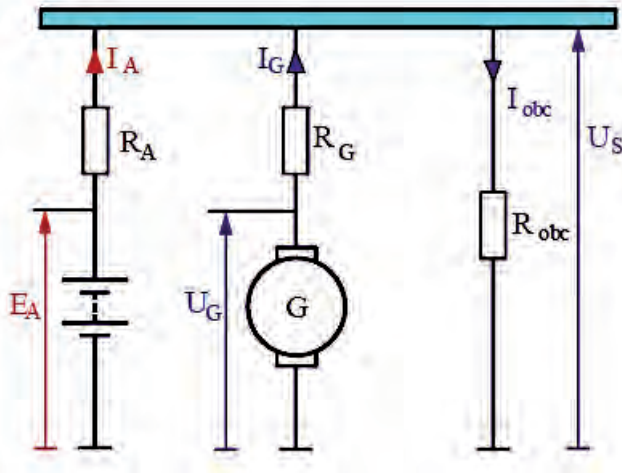
$I_{obc}$  – prąd obciążenia sieci (szyn rozdzielczych),

$I_G$  – prąd obciążenia prądnicy,

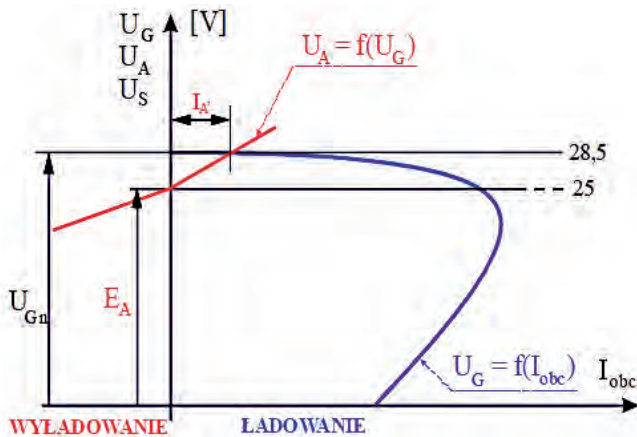
$I_A$  – prąd przepływający przez akumulator.

Z otrzymanych zależności wynika, że wartości prądów prądnicy i akumulatora zależą od ich napięcia i rezystancji połączeń prądnicy z siecią i wewnętrznej (stanu) akumulatora.





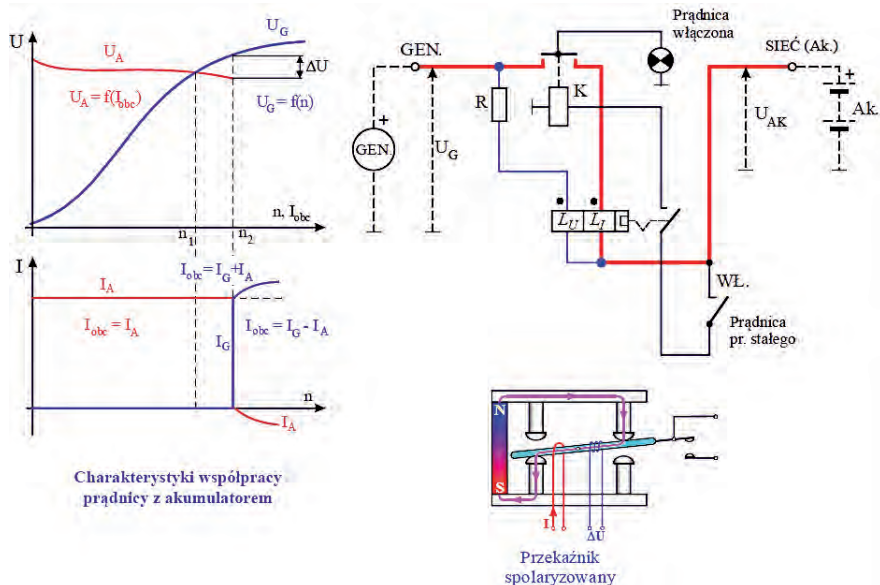
Rys. 4.157. Praca równoległa prądnicy z akumulatorem



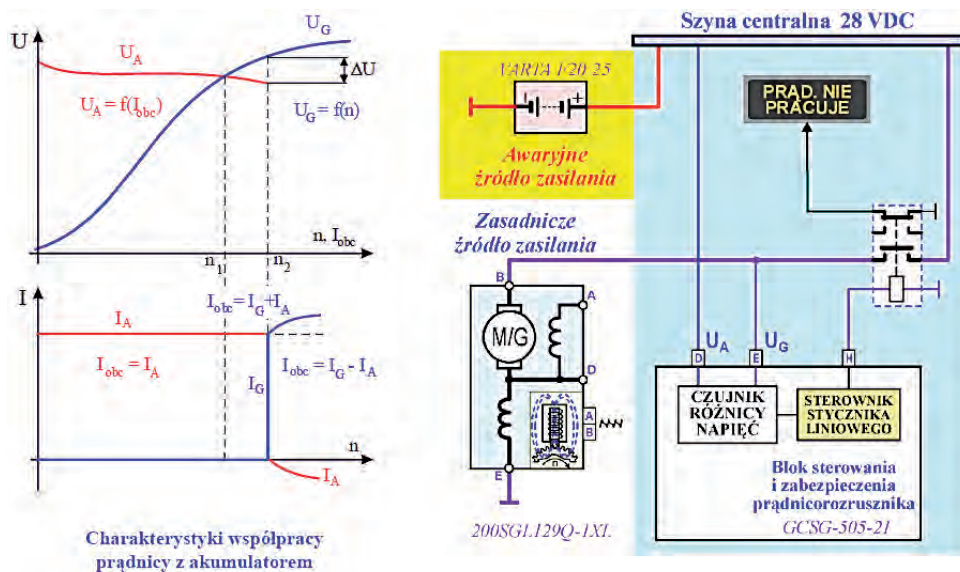
Rys. 4.158. Charakterystyka obcownej komutowanej prądnicy prądu stałego i pokładowej baterii pokładowej w czasie ładowania, oznaczenia jak w (4.157) [37]

W zależności od wielkości prądu obciążenia  $I_{obc}$  można rozpatrzyć przebieg charakterystyk zewnętrznych dla  $I_{obc} = 0$ . Może zająć przypadek, że:  $U_S = U_G = U_A$  to  $I_{obc} = I_A = 0$ , ale praktycznie zawsze  $U_S = U_G > U_A$ , zatem ze wzoru na  $I_A$  wynika, że płynie prąd ładowania akumulatora  $I_A = I_G$ .

W czasie gwałtownego przeciążenia prądnicy napięcie wyjściowe na jej zaciskach staje się znacznie niższe od napięcia na zaciskach pokładowej baterii akumulatorowej, tj.  $U_G > U_A$  – z baterii płynie prąd wyładowania, który uzupełnia energię zasilanej sieci pokładowej.



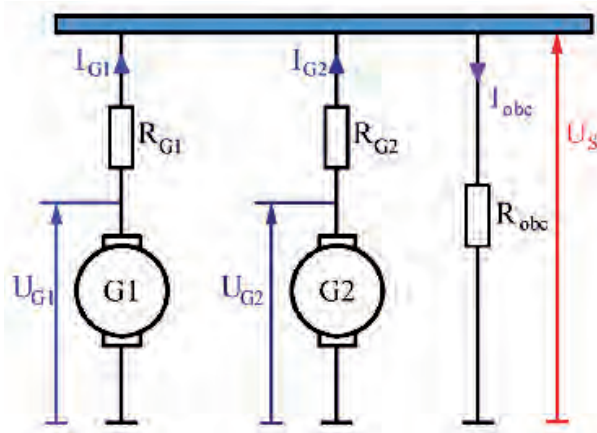
Rys. 4.159. Charakterystyki współpracy prądnicy z akumulatorem koordynowane przez przełącznik spolaryzowany – idea przełączania:  $U_A$  – napięcie na zaciskach akumulatora (różnica pomiędzy  $E_A$  a spadkiem wewnętrznym na oporności wewnętrznej akumulatora); Ak – lotnicza bateria akumulatorowa; Wł – włącznik [37]



Rys. 4.160. Charakterystyki współpracy prądnicy z akumulatorem koordynowane przez przełącznik spolaryzowany – schemat blokowy, oznaczenia jak w (4.71) [163]

#### 4.7.1.4. Praca równoległa prądnic prądu stałego

W celu zwiększenia mocy, a zatem i stabilności układu zasilania prądem stałym na pokładzie statku powietrznego stosowane jest łączenie prądnic do wspólnej szyny rozdzielczej, czyli ich praca równoległa (rys. 4.161).



**Rys. 4.161.** Schemat ideowy pracy równoległej dwóch prądnic prądu stałego, oznaczenia jak w (4.72)

Na statkach powietrznych stosowane są również układy umożliwiające pracę równoległą prądnic rozlokowanych na wszystkich jego silnikach. Zależności między wielkościami elektrycznymi opisującymi układ pracy równoległej mają zgodnie z prawami Kirchhoffa postać:

$$U_S = U_{G1} - I_{G1}R_{G1} = U_{G2} - I_{G2}R_{G2} \quad (4.72)$$

$$I_{obc} = I_{G1} + I_{G2} \quad (4.73)$$

gdzie:

$U_S$  – napięcie sieci pokładowej,

$U_{G1}$  – napięcie prądnicy 1 utrzymywane przez regulator,

$U_{G2}$  – napięcie prądnicy 2 utrzymywane przez regulator,

$E_A$  – napięcie źródłowe akumulatora,

$R_{G1}$   $R_{G2}$  – rezystancja połączenia prądnicy z szyną,

$I_{obc}$  – prąd obciążenia sieci (szyn rozdzielczych),

$I_{G1}$   $I_{G2}$  – prąd obciążenia prądnicy.

Rozwiązując układ równań, otrzymuje się [2, 101, 108, 119]:

$$\begin{aligned}
 I_{G1} &= \frac{(U_{G1} - U_{G2}) + I_{obc} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \\
 I_{G2} &= \frac{(U_{G2} - U_{G1}) + I_{obc} R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}} \\
 \Delta I_G = I_{G1} - I_{G2} &= \frac{2(U_{G1} - U_{G2}) + I_{obc} (R_{G2} - R_{G1})}{R_{G1} + R_{G2}}
 \end{aligned} \tag{4.74}$$

Otrzymane rozwiązania pokazują, że równe obciążenie prądnic pracujących równolegle, tj.  $\Delta I_G = 0$ , jest możliwe tylko, gdy zachodzi jednocześnie równość napięć, tj.  $U_{G1} = U_{G2}$ , oraz rezystancji odcinków plusowych, tj.  $R_{G1} = R_{G2}$ .

W praktyce te równości jednocześnie (a nawet pojedynczo) nie zachodzą. Zatem gdy  $R_{G1} = R_{G2}$ ,  $U_{G1} > U_{G2}$  i np. gdy  $\Delta U_G = 0,3$  V, to  $I_{G2} = 0,25 I_{G1}$ .

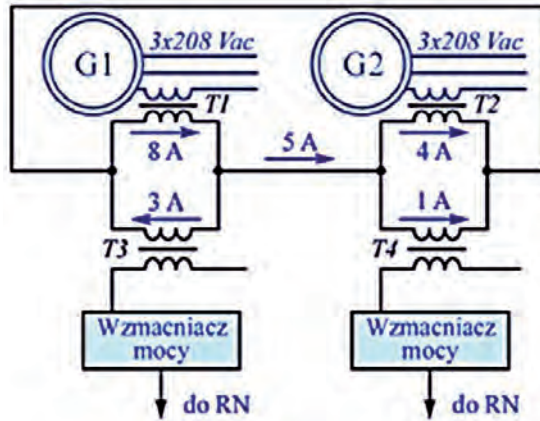
Warunki techniczne określają dopuszczalną różnicę prądów prądnic pracujących równolegle wartością  $\Delta I_G = \pm 0,1 I_{Gzn}$ , tj. prądu znamionowego jednej prądnicy.

#### 4.7.2. Praca równoległa prądnic prądu przemiennego

Metoda **synchronizacji biernej** polega na tym, że prądnice napędzane są wspólnym wałkiem. Podczas zabudowywania prądnic synchronicznych na pokładzie statku powietrznego nadajemy im jednakowe położenie wirnika względem stojana (na podstawie zadanych cech konstrukcyjnych), czyli zgodną kolejność faz. Ideę pracy równoległej prądnic (trójfazowych) prądu przemiennego wspomaganej przez układ wyrównujący ich względne obciążenia przedstawia rys. 4.162.

Połączenie równoległe następuje przy równej wartości napięć. W takim układzie, dla  $f_1 = f_2$  moce czynne prądnic są równe, a moc bierna wyrównywana jest przez działanie regulatorów napięcia [2, 45, 101, 108, 120]. Sygnałem sterującym do wyrównywania obciążeń biernych dla układu regulacji napięcia jest sygnał proporcjonalny do różnicy składowej biernej prądu obciążenia prądnic:

$$\Delta I_x = k I_f \sin \varphi \tag{4.75}$$



Rys. 4.162. Idea pracy równoległej prądnic (trójfazowych) prądu przemiennego wspomaganej przez układ wyrównujący ich względne obciążenia [37]

## 4.8. Współpraca naziemnego źródła zasilania LZE z pokładową siecią elektroenergetyczną statku powietrznego

Współpracę naziemnego źródła zasilania LZE z pokładową siecią elektroenergetyczną statku powietrznego określa NO-17-A206:2018 Wojskowe statki powietrzne – Naziemne układy zasilania elektroenergetycznego – Wymagania [140].

### 4.8.1. Podział LZE

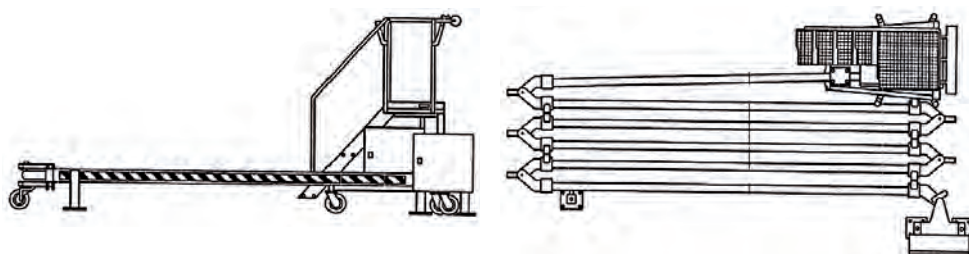
Zgodnie z [140] p. 2.1.1.1 **Klasyfikacja LZE ze względu na mobilność** niniejszej normy LZE dzieli się na:

#### 1. Stacjonarne:

- a) bez możliwości przemieszczania – korpus LZE połączony z podłożem (np. stojący na palecie lub przymocowany do podłoża połączeniem śrubowym), system kabli wydawczych LZE ułożony w studzienkach (warunki płyty lotniska) lub przyłączony do tablic rozdzielczych (hangar, schrono-hangar) – rys. 4.164,
- b) z możliwością przemieszczania – korpus LZE na kołach, system kabli wydawczych LZE połączony bezpośrednio z korpusem LZE, o masie powyżej 300 kg, możliwy do przemieszczenia przy pomocy co najmniej dwóch ludzi lub holowany za pojazdem mechanicznym (rys. 4.165).

2. **Mobilne (rys. 4.166–4.168) – umieszczone na kołach będących integralną częścią konstrukcji LZE:**

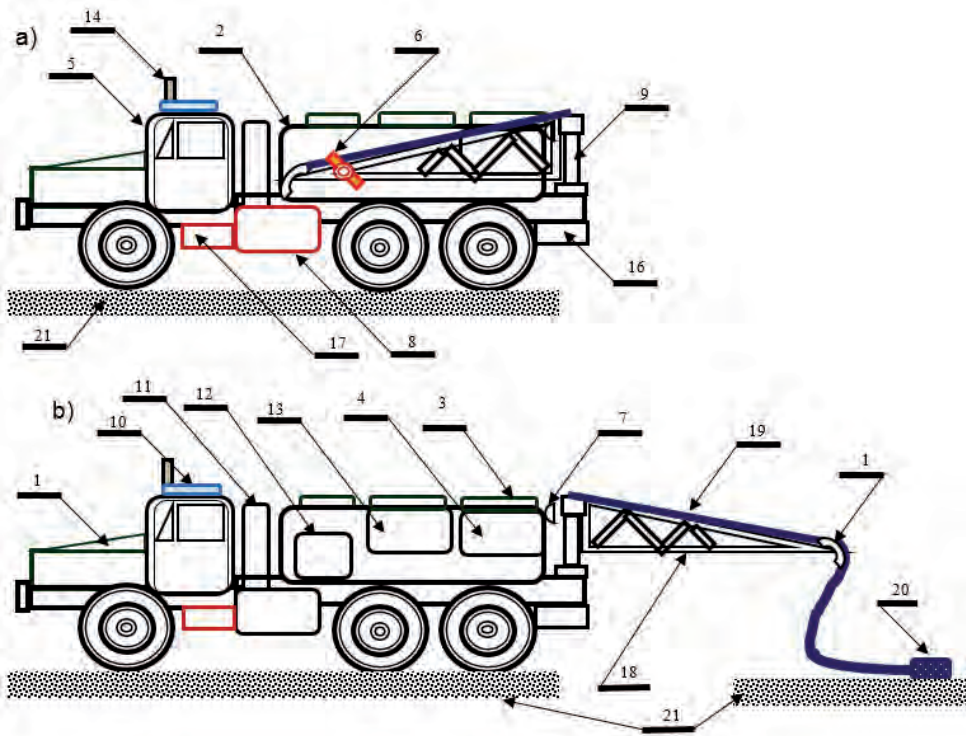
- a) samojezdne (LZE przemieszczane za pomocą własnego napędu) z kabiną operatora,
- b) samojezdne (LZE przemieszczane za pomocą własnego napędu) bez kabiny operatora – operator przemieszcza się pieszo, sterując LZE z wykorzystaniem pulpitu sterowania,
- c) mobilne niesamojezdne (LZE przemieszczane ręcznie przez operatora lub holowane za innym pojazdem) – korpus LZE na kołach, system kabli wydawczych LZE połączony bezpośrednio z korpusem LZE: w przypadku gdy urządzenie przemieszczane jest ręcznie, powinno mieć masę poniżej 300 kg, a także odpowiednie uchwyty i elementy sterowania podwoziem umożliwiające przemieszczanie LZE przez jednego człowieka po płaskiej, czystej płycie lotniska.



**Rys. 4.163.** Przykładowy sposób ułożenia kabli wydawczych stacjonarnego naziemnego układu zasilania statków powietrznych wg normy PN-EN 12312-20+A1:2012 [155]



**Rys. 4.164.** LZE (agregat wielozadaniowy) typ M70D (produkcji włoskiej) etatowo stosowany do naziemnego zasilania samolotu M-346 Bielik – widok ogólny



**Rys. 4.165.** Rysunek LZE na podwoziu samojezdnym z ruchomym wysięgnikiem – przykład: a) – LZE mobilny z wysięgnikiem w położeniu złożonym; b) – LZE na podwoziu samojezdnym z wysięgnikiem w położeniu rozłożonym i z rozwiniętym kablem wydawczym, gdzie: 1 – maska silnika spalinowego LZE; 2 – obudowa LZE; 3 – drzwi górne (pokrywa) obudowy nadwozia; 4 – drzwi boczne (pokrywa) zespołu transmisji i skrzynki napędów agregatów; 5 – kabina kierowcy-operatora; 6 – ustalacz mechaniczny umożliwiający mocowanie wysięgnika do obudowy LZE; 7 – reflektor (szperacz); 8 – zbiornik paliwa; 9 – dźwignia uruchamiająca mechanizm blokowania wysięgnika w położeniu rozłożonym; 10 – górna szyba albo drzwi awaryjne; 11 – koło zapasowe; 12 – drzwi boczne (pokrywa) prądnic; 13 – drzwi boczne (pokrywy) układu rozdziału energii elektrycznej; 14 – układ odprowadzania spalin; 16 – przedział akcesoriów pomocniczych (narzędzia, części zamienne); 17 – bateria akumulatorowa podwozia; 18 – wysięgnik; 19 – kabel wydawczy w pozycji rozwiniętej; 20 – końcówka kabla wydawczego LZE; 21 – podłoże



Rys. 4.166. Samojezdny LZE APA-5 na podwoziu samochodowym



Rys. 4.167. Samojezdny LZE LUZES-V na podwoziu samochodowym

Zgodnie z [140] p. 2.1.1.2 Klasyfikacja LZE ze względu na rodzaj pierwotnego źródła energii elektrycznej jako pierwotne źródło energii elektrycznej LZE należy stosować:



- 1) silnik spalinowy lub
- 2) elektryczną sieć przemysłową 3 x 230/400 V, 50 (60) Hz lub
- 3) elektryczną baterię akumulatorową.

Zgodnie z [140] p. **2.1.1.3 Klasyfikacja LZE ze względu na sposób przemiany energii elektrycznej z pierwotnego źródła energii elektrycznej** przemiana energii elektrycznej z pierwotnego źródła na energię elektryczną przeznaczoną do zasilania WSP może się odbywać poprzez:

- 1) przetworzenie elektromaszynowe (prądnicą) AC albo DC; należy stosować prądnice prądu stałego samowzbudne;
- 2) prostowanie statyczne napięcia elektrycznej sieci przemysłowej 3 x 230/400 V, 50 (60) Hz, poprzez falownik przetwarzający napięcie elektrycznej sieci przemysłowej 3 x 230/400 V, 50 (60) Hz, na napięcie przemiennie trójfazowe 115/200 V, 400 Hz.

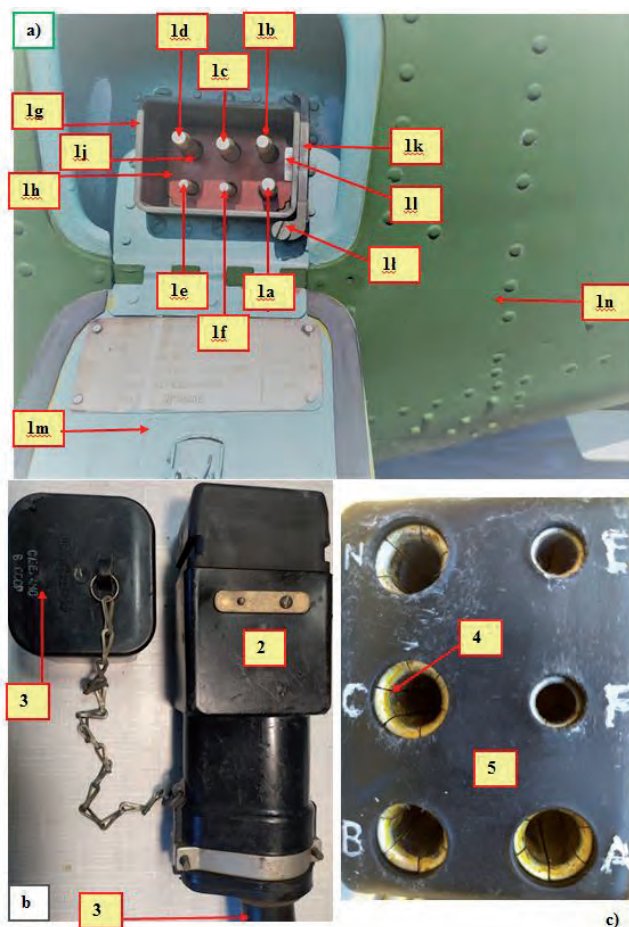
Zgodnie z [140] p. **2.1.1.4 Klasyfikacja LZE ze względu na moc** grupy klasyfikacyjne mocy użytecznej poszczególnych LZE są następujące:

- a) < 30 kVA (kW),
- b) 30 kVA (kW),
- c) 40 kVA (kW),
- d) 60 kVA (kW),
- e) 90 kVA (kW),
- f) 150 kVA (kW),
- g) 180 kVA (kW),
- h)  $\geq$  315 kVA (kW).

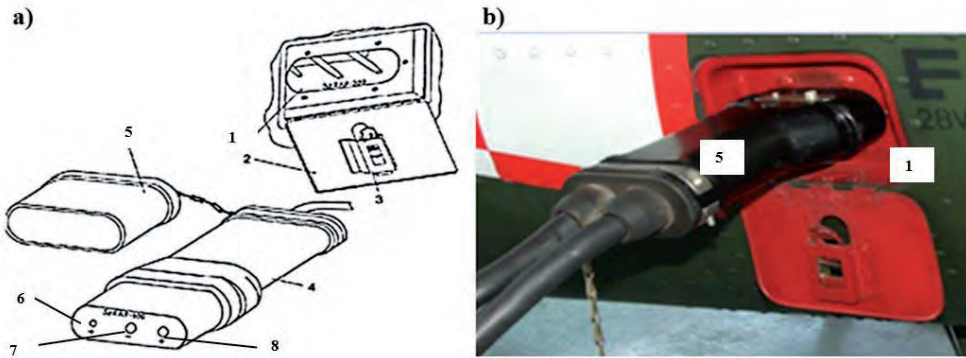
#### **4.8.2. Podstawowe zasady współpracy LZE z siecią elektroenergetyczną WSP**

Kable wydawcze LZE, końcówka kabla wydawczego od strony zewnętrznej powinna mieć wtyczkę rys. 4.168 przystosowaną do przyłączenia do gniazda LZZ WSP [140]. Jeżeli LZE ma więcej niż jeden kabel wydawczy, to powinny być przewidziane środki blokujące podanie napięcia na nieużywane kable wydawcze.

Końcówka kabla wydawczego LZE powinna być wykonana zgodnie z dokumentami: STANAG 7073ED.2 [200], PN-ISO 461-1:2007 [157] oraz PN-ISO 461-2:1997 [158]. Każda końcówka kabla wydawczego LZE powinna mieć gniazda stykowe (rys. 4.168 i 4.169), o parametrach ujętych w załączniku A normy PN-ISO 461-2:1997 [158].



**Rys. 4.168.** Elementy lotniskowego zasilania na śmigłowcu Mi-24 oraz wtyczka zasilania zewnętrznego SzRA-4003F: **a) gniazdo LZZ:** 1 – złącze LZZ: 1a – kołek stykowy siłowy fazy „A”; 1b – kołek stykowy siłowy fazy „B”; 1c – kołek stykowy siłowy fazy „C”; 1d – kołek stykowy neutralny „N”; 1e – kołek pomocniczy „E”; 1f – kołek pomocniczy „F”; 1g – obudowa gniazda LZZ (odlew aluminiowy); 1h – izolator; 1j – szczelina pomiędzy izolatorem (ebonit albo polaldehyd) a kołkiem stykowym (obowiązkowy luz  $0,1 \pm 0,6$  mm); 1k – dźwignia blokady mechanicznej zabezpieczająca wtyczkę przed wysunięciem z gniazda; 1l – płetwa blokująca dźwigni; 1ł – oś obrotu dźwigni blokady mechanicznej zabezpieczająca wtyczkę przed wysunięciem z gniazda; 1m – pokrywa gniazda LZZ; 1n – poszycie zewnętrzne kadłuba śmigłowca Mi-24; **b) wtyczka SzRA-400\_3F:** 2 – uchwyt wtyczki; 3 – pokrywa złącza wtyczki; 4 – kabel wydawczy (najczęściej pole przekroju poprzecznego żyły przewodzącej  $70 \text{ mm}^2$ ); **c) zbliżenie powierzchni czołowej wtyczki SzRA-400-3F:** 4 – tulejka sprężynująca złącza wtyczki; 5 – izolator (guma)



**Rys. 4.169.** Elementy lotniskowego zasilania oraz wtyczka zasilania zewnętrznego SzRAP-500 przyłączona do gniazda zasilania zewnętrznego SzRAP-500 śmigłowca Sokół: a) elementy zasilania LZE, gdzie: 1 – gniazdo zasilania zewnętrznego SzRAP-500; 2 – pokrywa gniazda; 3 – zamek; 4 – wtyczka zasilania zewnętrznego SzRAP500; 5 – osłona wtyczki; 6 – tulejki stykowe wtyczki; 7 – dodatkowy kolek; 8 – zamek. b) widok wtyczki kabla wydawczego LZE podłączonego do gniazda LZZ zamontowanego na śmigłowcu SW-4

Każda końcówka kabla wydawczego LZE powinna mieć gniazda stykowe [140]:

- a) „pomocnicze”, przeznaczone do zapewnienia współdziałania z WSP, tj. zamykające obwód (WSP i LZE) w celu przygotowania (przełączenia) wewnętrznej struktury elektrycznej WSP do przyjęcia energii elektrycznej z LZE:
- dla kabla wydawczego LZE prądu przemiennego – dwa gniazda stykowe (rys. 4.170, element „E” i „F”) zwarte między sobą zworą,
  - dla kabla wydawczego LZE prądu stałego – dodatkowy kolek (rys. 4.171, element 6 oznaczany na wtyczce jako „+K”) zwarty elektrycznie zworą z gniazdem „+”(rys. 4.171, element 8);
- b) „siłowe” (główne), przeznaczone do zasilania elektrycznego WSP:
- dla prądu przemiennego oznaczone: „A”, „B”, „C” (rys. 4.170, szczegół „Kabel wydawczy LZE z wtyczką typ SzRA-400-3F”),
  - dla prądu stałego oznaczone: „+”, „-” (rys. 4.171, szczegóły: 7 i 8).

Wszystkie gniazda stykowe (rys. 4.169, element 2) powinny mieć luz promieniomowy wg PN-ISO 461-1:2007 oraz PN-ISO 461-2:1997. Wartość zalecana luzu w czasie eksploatacji w okresie międzyremontowym to 0,5 mm. Brak tego luzu może skutkować punktowym stykiem pomiędzy kołkiem gniazda wtykowego a tulejką wtyczki kabla wydawczego co może spowodować zgranie obu elementów w czasie przepływu prądu rozruchu.

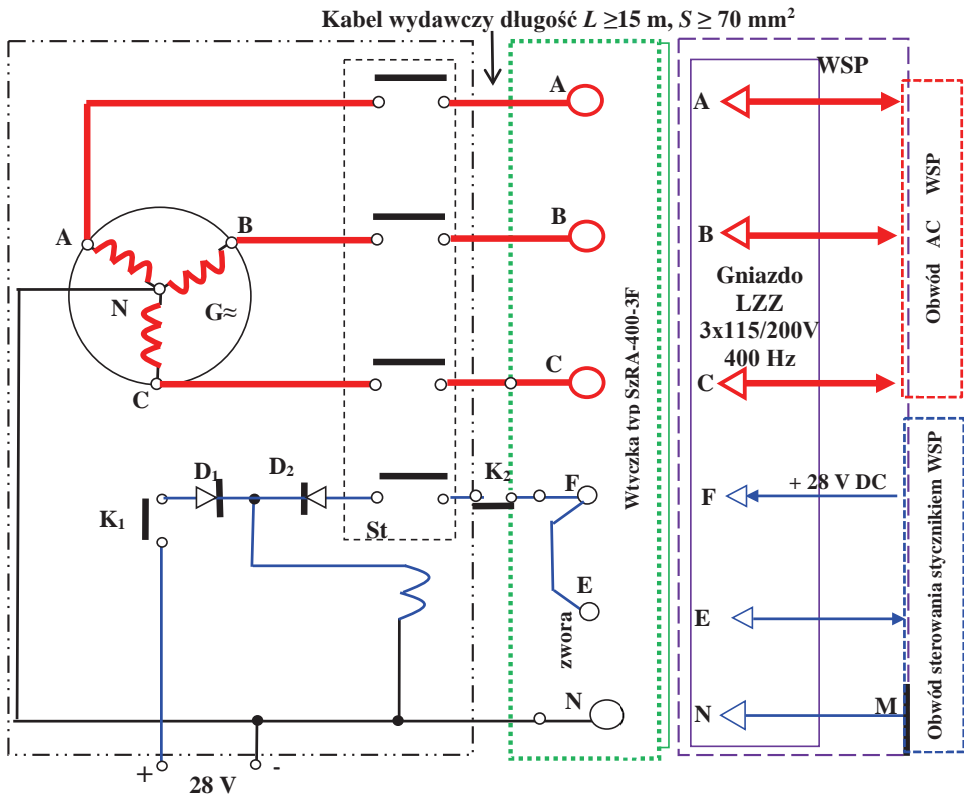
Zgodnie z [140]: p. **2.1.5.2 Podstawowe zasady współdziałania LZE z siecią elektroenergetyczną WSP** podstawową zasadą jest nadrzędność zasilania elektrycznego z LZE nad pokładowym zasilaniem elektrycznym WSP:

- a) z chwilą podłączenia wtyczki kabla wydawczego LZE będącego pod napięciem do gniazda LZZ układ komutacji wewnętrznej WSP powinien odłączyć wszystkie pokładowe źródła energii elektrycznej od odbiorników energii elektrycznej WSP i przyłączyć je do zasilania elektrycznego z LZE – zgodnie z Załącznikiem A (normatywnym),
- b) z chwilą odłączenia wtyczki kabla wydawczego LZE będącego pod napięciem od gniazda LZZ, układ komutacji wewnętrznej WSP powinien automatycznie przyłączyć odbiorniki energii elektrycznej WSP do pokładowych źródeł zasilania elektrycznego.

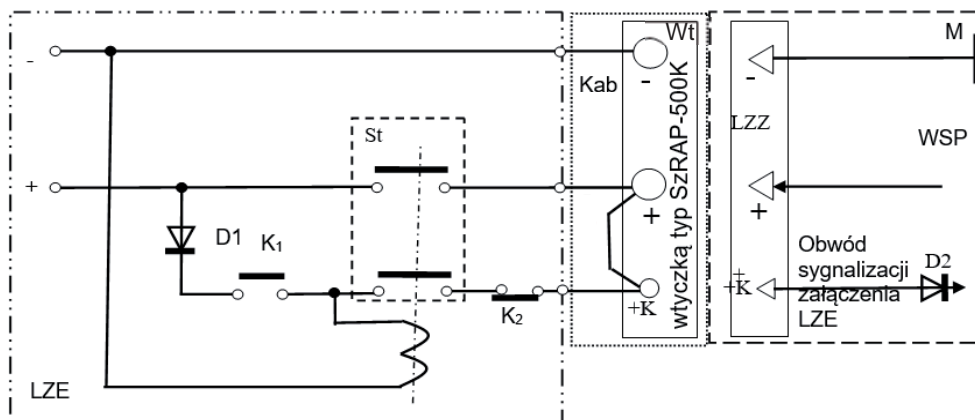
Układ automatyki sterowania kabla wydawczego LZE (rys. 4.170 – 4.173 oraz NO-15-A200:2016, p. 2.1.4.2 [140]:) powinien zabezpieczać także przed powstaniem łuku elektrycznego w przypadku przedwczesnego wyjęcia wtyczki z gniazda LZZ WSP, poprzez:

- w LZE – automatyczne wyłączenie napięcia na stykach głównych danego kabla wydawczego LZE,
- w WSP – automatyczne odcięcie zasilania elektrycznego pokładowych odbiorników energii elektrycznej od LZE (odłączenie danego LZZ) i przełączenie na pokładowe (główne lub rezerwowe) źródło energii elektrycznej WSP.

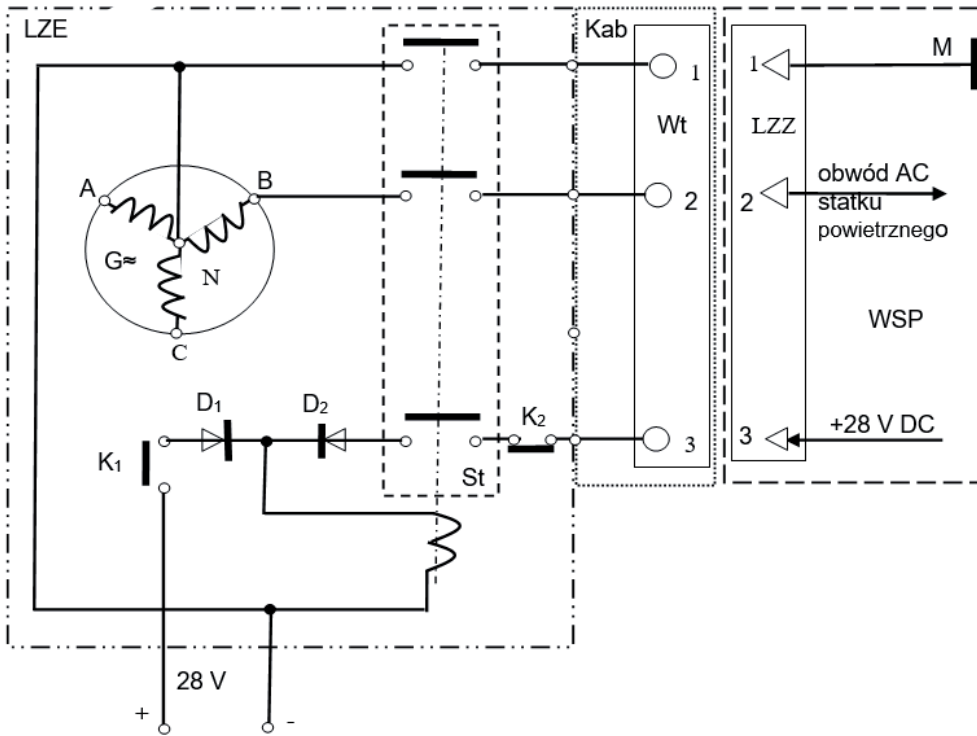
Schematy połączeń LZE przedstawiono na rys. 4.170–4.173. Obwody elektryczne związane z pomocniczymi gniazdami kabla wydawczego LZE powinny zapewnić załączenie napięcia z kabla wydawczego LZE po spełnieniu czynności i uwarunkowań określonych w p. 2.1.5.1 normy NO-17-A206:2018 Wojskowe statki powietrzne Naziemne układy zasilania elektroenergetycznego Wymagania [140]. Wszystkie gniazda stykowe (wtyczki danego kabla wydawczego LZE) powinny mieć luz promieniowy wg PN-ISO 461-1:2007 oraz PN-ISO 461-2:1997 o wartości od 0,1 mm do 0,6 mm – wartość zalecana w czasie eksploatacji w okresie międzyremontowym, 0,5 mm – luz niezbędny do zapewnienia poprawnego styku (pełną powierzchnią) do kołków w złączu LZZ na pokładzie WSP. Luz ten powinien być sprawdzany przed każdym podłączeniem do gniazda LZZ.



**Rys. 4.170.** Schemat podstawowy przykładowej automatyki kabla wydawczego LZE trójfazowego prądu przemiennego 115/200 V, 400 Hz, gdzie: LZE – lotniskowe źródło zasilania elektroenergetycznego, Kab – kabel wydawczy;  $G_{\approx}$  – prądnica trójfazowa prądu przemiennego,  $D_1, D_2$  – diody prostownicze, St – stycznik (trójfazowy) załączający napięcie wyjściowe na kabel wydawczy;  $K_1$  – przycisk (klucz) do załączania stycznika St (stosować przed przyłączeniem kabla wydawczego LZE do gniazda LZZ WSP); Wt – wtyczka kabla wydawczego LZE 115/200 V, 400 Hz typ SzRA-400-3f; LZZ – gniazdo na pokładzie WSP do przyłączania wtyczki kabla wydawczego LZE;  $K_2$  – wyłącznik awaryjny, tj. wyłącznik bezpieczeństwa; M – przewód elektryczny łączący obwód elektryczny LZE do masy  $MG_{WSP}$  (płatowca) WSP [141]

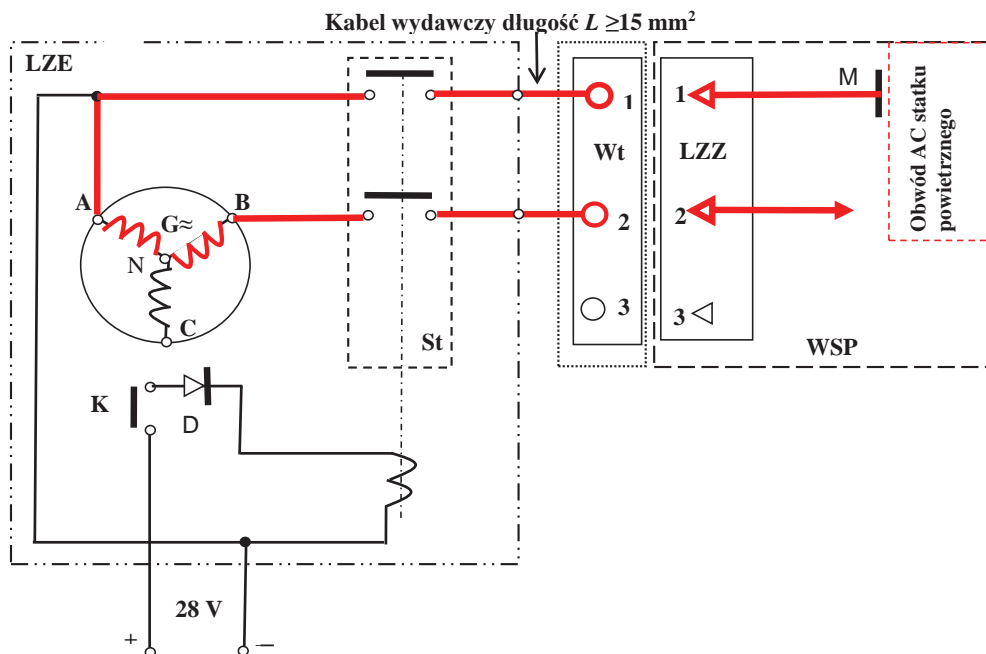


**Rys. 4.171.** Schemat podstawowy przykładowej automatyki kabla wydawczego LZE prądu stałego 28 V, gdzie: LZE – lotniskowe źródło zasilania elektroenergetycznego; Kab – kabel wydawczy; D1, D2 – diody prostownicze; St – stycznik (trójfazowy) załączający napięcie wyjściowe na kabel wydawczy; K<sub>1</sub> – przycisk (klucz) do załączania stycznika St (nie stosować przed przyłączeniem kabla wydawczego LZE do gniazda LZZ WSP); Wt – wtyczka kabla wydawczego LZE; LZZ – gniazdo na pokładzie WSP do przyłączenia wtyczki kabla wydawczego LZE; K<sub>2</sub> – wyłącznik awaryjny, tj. wyłącznik bezpieczeństwa; M – przewód elektryczny łączący obwód elektryczny LZE do masy  $MG_{WSP}$  (płatowca) WSP [141]



**Rys. 4.172.** Schemat podstawowy przykładowej automatyki kabla wydawczego LZE jednofazowego prądu przemiennego 1x115 V, 400 Hz dla prądu obciążenia  $I_{obc} > 10$  A, gdzie: LZE – lotniskowe źródło zasilania elektroenergetycznego, Kab – kabel wydawczy;  $G_{\approx}$  – prądnica trójfazowa prądu przemiennego;  $D_1$ ,  $D_2$  – diody prostownicze, St – stycznik załączający napięcie wyjściowe na kabel wydawczy;  $K_1$  – przycisk (klucz) do załączania stycznika S (stosować przed przyłączeniem kabla wydawczego LZE do gniazda LZZ WSP); Wt – wtyczka kabla wydawczego LZE 1x115 V, 400 Hz typ SzRA200-LK; LZZ – gniazdo na pokładzie WSP do przyłączenia wtyczki kabla wydawczego LZE;  $K_2$  – wyłącznik awaryjny, tj. wyłącznik bezpieczeństwa; M – przewód elektryczny łączący obwód elektryczny LZE do masy  $MG_{WSP}$  (płotowca) WSP [141]

Powyższe zasady dotyczą danego rodzaju energii elektrycznej – osobno obwo-  
du prądu stałego 28,5 V, osobno napięcia 1x115 V 400 Hz, osobno 3 x 115/200V,  
400 Hz, osobno 3 x 36 V, 400 Hz – dla tych obwodów przewidziane są na pokła-  
dzie WSP oddzielne gniazda LZZ, zaś na LZE oddzielne kable wydawcze LZE  
z odpowiednimi wtyczkami. Wtyczki te powinny być niezamienne między  
sobą pod kątem kształtu i średnic gniazd wtykowych.



**Rys. 4.173.** Schemat podstawowy przykładowej automatyki kabla wydawczego LZE jednofazowego prądu przemiennego 1 x 115 V, 400 Hz dla prądu obciążenia  $I_{\text{obc}} \leq 10 \text{ A}$ , gdzie: LZE – lotniskowe źródło zasilania elektroenergetycznego, Kab – kabel wydawczy,  $G \approx$  – prądnica trójfazowa prądu przemiennego, Wt – wtyczka kabla wydawczego LZE 1 x 115 V, 400 Hz typ SzRA-200ŁK, LZZ – gniazdo na pokładzie WSP do przyłączania wtyczki kabla wydawczego LZE, St – stycznik załączający napięcie wyjściowe na kabel wydawczy; K<sub>1</sub> – przycisk (klucz) do załączania stycznika „St”, M – przewód elektryczny łączący obwód elektryczny LZE do masy  $M_{\text{G}_{\text{WSP}}}$  (płatowca) WSP [141]

Zwory w końcówkach kabli wydawczych LZE należy stosować dla kanałów LZE o mocy nie mniejszej niż 30 kVA (kW). W układach tych z chwilą podłączenia wtyczki kabla wydawczego LZE powinien być uruchamiany automatycznie stycznik zamykający obwód siłowy kabla wydawczego LZE (rys. 4.170–4.173 szczegół St).

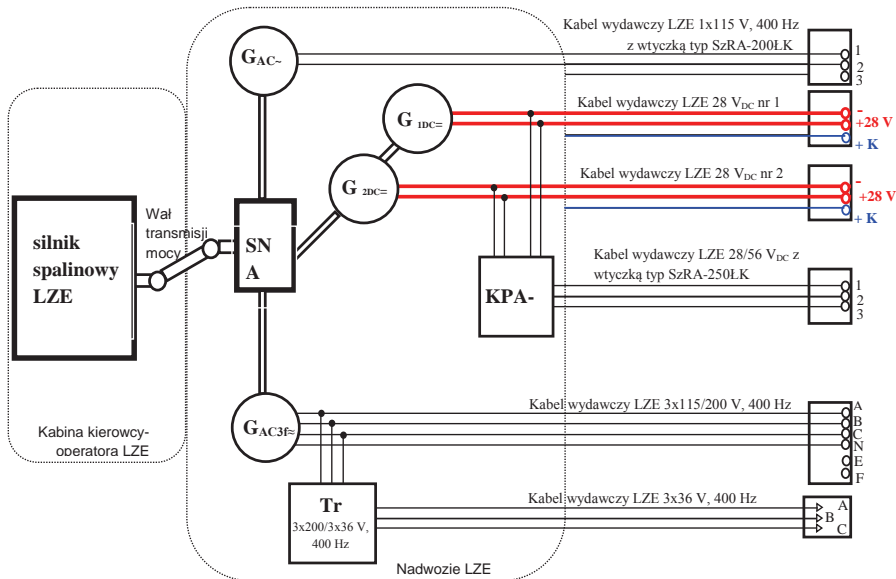


Dla kanałów LZE o mocy znamionowej mniejszej niż 30 kVA (kW) nie należy stosować zwory we wtyczce kabla wydawczego LZE – preferowane są rozwiązania przedstawione na rys. 4.172 i 4.173.

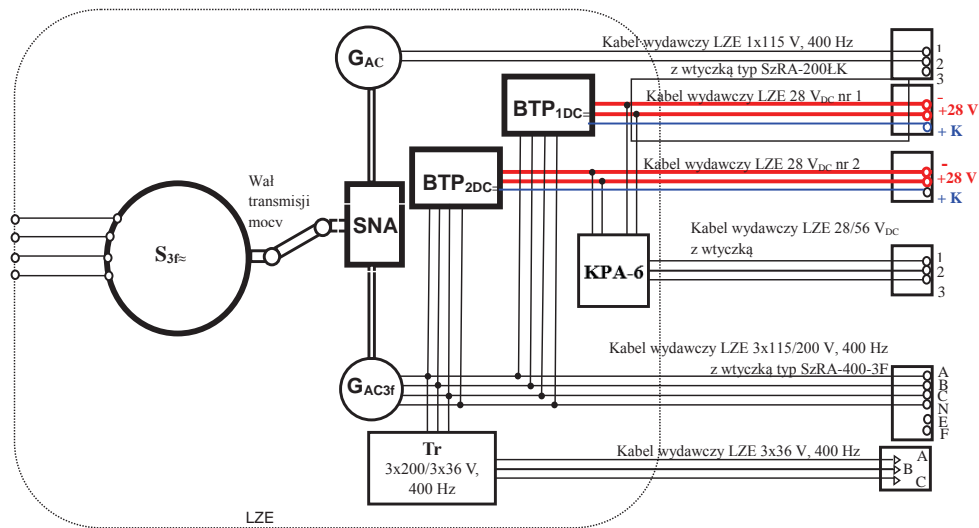
Podstawowa struktura blokowa zespołu wytwarzania energii elektrycznej LZE

Typowe schematy blokowe LZE preferowane na lotniskach SZ RP należy podzielić pod kątem struktur wytwarzania energii elektrycznej na:

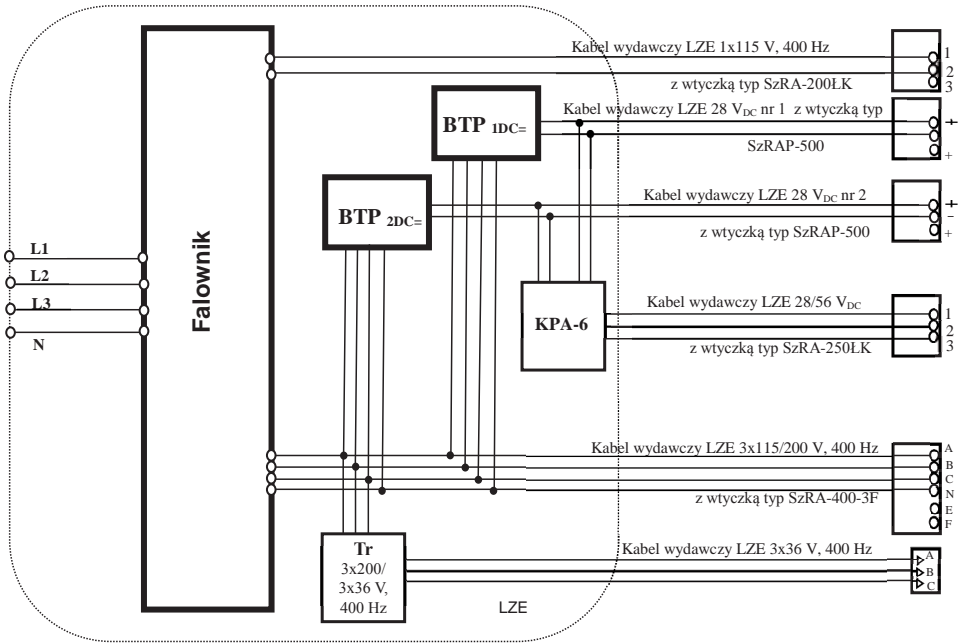
1. samojezdne – przykładowy schemat przedstawiono na rys. 4.174;
2. stacjonarne:
  - a) z przetwarzaniem elektromaszynowym – przykładową strukturę wytwarzania energii elektrycznej, przedstawiono na rys. 4.175,
  - b) z przetwarzaniem elektronicznym falownikowym – przykładowy schemat przedstawiono na rys. 4.176.



**Rys. 4.174.** Schemat podstawowy LZE z trójfazowym źródłem energii elektrycznej prądu przemiennego 115/200 V, 400 Hz, gdzie:  $G_{AC3\Phi}$  – prądnica trójfazowa prądu przemiennego, KPA-6 – skrzynka styczników umożliwiającą sekwencyjne przełączanie zasilania elektrycznego układu rozruchowego WSP z 28 V na 56 V, SNA – skrzynka napędu agregatów (przekładnia pośrednicząca w przekazywaniu energii mechanicznej między silnikiem spalinowym LZE a wałkami napędowymi prądnic),  $G_{AC-}$  – prądnica jednofazowa prądu przemiennego 1 x 115 V, 400 Hz, SNA (przekładnia pośrednicząca w przekazywaniu energii mechanicznej między silnikiem spalinowym LZE a wałkami napędowymi prądnic),  $G_{1DC=}$  – prądnica prądu stałego nr 1,  $G_{2DC=}$  – prądnica prądu stałego nr 2, Tr 3x200/3x36 V, 400 Hz – transformator trójfazowy [141]



**Rys. 4.175.** Przykładowa struktura LZE z przetwarzaniem elektromaszynowym umożliwiającą zasilanie elektryczne wszystkich obwodów WSP eksploatowanych w SZ RP, gdzie:  $G_{AC3f}$  – prądnica trójfazowa prądu przemiennego;  $KPA-6$  – skrzynka styczników umożliwiającą sekwencyjne przełączanie zasilania elektrycznego układu rozruchowego WSP z 28 V na 56 V;  $SNA$  – skrzynka napędu agregatów (przekładnia pośrednicząca w przekazywaniu energii mechanicznej między silnikiem spalinowym LZE a wałkami napędowymi prądnic);  $BTP_{1DC}$  – blok transformatorowo-prostowniczy prądu stałego nr 1;  $BTP_{2DC}$  – blok transformatorowo-prostowniczy prądu stałego nr 2;  $Tr$  3 x 200/3 x 36 V, 400 Hz – transformator trójfazowy [141]



**Rys. 4.176.** Przykładowa struktura LZE z przetwarzaniem falownikowym, gdzie: KPA-6 – skrzynka styczników umożliwiającą sekwencyjne przełączanie zasilania elektrycznego układu rozruchowego WSP z 28 V na 56 V; BTP<sub>1DC=</sub> – blok transformatorowo-prostowniczy prądu stałego nr 1, BTP<sub>2DC=</sub> – blok transformatorowo-prostowniczy prądu stałego nr 2, Tr 3x200/3x36 V, 400 Hz – transformator trójfazowy [141]



## PROBLEMATYKA EKSPLOATACJI POKŁADOWEJ SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

### 5.1. Sieci elektroenergetyczne statku powietrznego

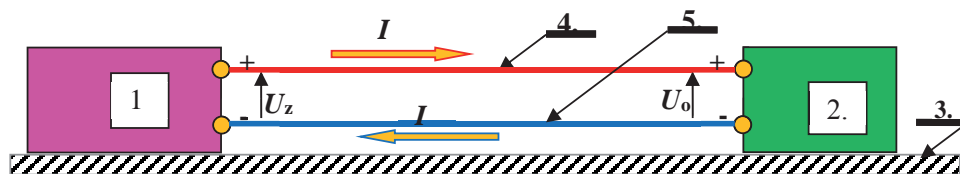
#### 5.1.1. Podstawowe rodzaje sieci elektroenergetycznej statku powietrznego

Jak wiadomo z elektrotechniki, aby odbiornik energii elektrycznej mógł poprawnie pracować, obwód elektryczny pomiędzy źródłem a odbiornikiem musi być zamknięty. Tak więc dla obwodu prądu stałego zacisk „+” źródła musi być połączony z zaciskiem „+” odbiornika, zaś zacisk „-” źródła z zaciskiem „-” odbiornika (rys. 5.1). Jest to tzw. sieć dwuprzewodowa [35].

Po pierwszej wojnie światowej powoli rezygnowano z konstrukcji drewniano-płóciennych z uwagi na ich łatwopalność, stosunkowo niską wytrzymałość mechaniczną i higroskopijność (powodującą odkształcenia geometryczne pod wpływem wilgoci), co dla rozwijających się powietrznych przewozów towarowo-pasażerskich miało duże znaczenie. Powstawały coraz liczniejsze konstrukcje wykonane z duraluminium.

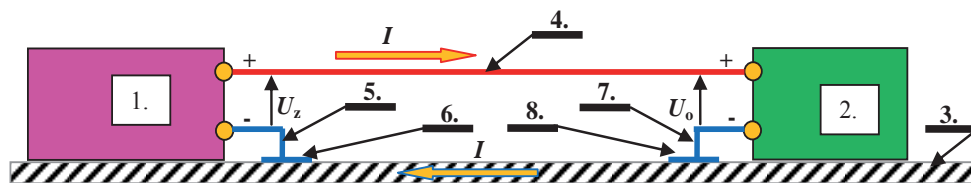
W związku z tym konstruktorzy samolotów, wzorem przemysłu samochodowego, zaczęli wykorzystywać kadłub jako obwód powrotny prądu elektrycznego – zaczęto stosować elektryczną **sieć jedнопrzewodową** (rys. 5.2), zwaną czasami elektryczną siecią dwuprzewodową bez odizolowanej masy. W ten sposób ciężar przewodów miedzianych zmniejszył się prawie o połowę. Jednakże ten rewolucyjny spadek masy okablowania miał i swoje skutki negatywne związane m.in. ze zwiększeniem poziomu zakłóceń radiowych, zwiększeniem rezystancji w obwodzie powrotnym (kadłub statku powietrznego) na skutek zmian korozyjnych [20, 35, 62], co pociąga za sobą zmniejszenie napięcia użytecznego przychodzącego na zaciski wejściowe

odbiornika. Szczególnie groźne wydają się styki powodujące modulacje przepływu prądu na skutek drgań mechanicznych. Ponadto, wraz z przyłączeniem obwodu powrotnego do kadłuba, strumień elektronów w obwodzie powrotnym niejako „odsłonił się” dla różnych zjawisk oddziałujących na poszycie statku powietrznego:



**Rys. 5.1.** Elektryczna instalacja dwuprzewodowa, gdzie: 1 – źródło energii elektrycznej; 2 – odbiornik energii elektrycznej; 3 – kadłub statku powietrznego; 4 – przewód plusowy; 5 – przewód minusowy;  $I$  – natężenie prądu elektrycznego płynącego pomiędzy źródłem napięcia elektrycznego a odbiornikiem energii elektrycznej;  $U_z$  – napięcie na zaciskach źródła energii elektrycznej;  $U_o$  – napięcie na zaciskach odbiornika energii elektrycznej [35]

1. elektryczność statyczna związana z elektryzowaniem się powierzchni statku powietrznego przez pocierania o suche warstwy powietrza,



**Rys. 5.2.** Elektryczna instalacja jedнопrzewodowa, gdzie: 1 – źródło energii elektrycznej, tu: amplidyna (napięcie wyjściowe  $U_z = U_{wy}$ ); 2 – odbiornik energii elektrycznej, tu: elektryczny silnik wykonawczy, przemieszczający łożo stanowiska strzeleckiego; 3 – kadłub statku powietrznego; 4 – przewód plusowy; 5 – przewód minusowy źródła napięcia elektrycznego; 6 – miejsce połączenia przewodu minusowego źródła napięcia elektrycznego z kadłubem statku powietrznego; 7 – przewód minusowy odbiornika energii elektrycznej; 8 – miejsce połączenia przewodu minusowego odbiornika energii elektrycznej z kadłubem statku powietrznego;  $I$  – natężenie prądu elektrycznego płynącego pomiędzy źródłem napięcia elektrycznego a odbiornikiem energii elektrycznej,  $U_z$  – napięcie na zaciskach źródła energii elektrycznej,  $U_o$  – napięcie na zaciskach źródła energii elektrycznej [35]

2. uderzenia pioruna – prąd o znacznej wartości natężenia i dużej wartości napięcia (rzędu 25 kV i więcej) może wnikać do struktury elektroenergetycznej statku powietrznego, powodując jej destrukcję,
3. naprężenia poszycia związane z mechaniką lotu.

Wiąże się to z tym, że konstrukcja kadłuba, skrzydeł i układów aerodynamicznego sterowania płatowca jest projektowana w celu wykorzystania praw aerodynamiki i wykonywania bezpiecznego i skutecznego przelotu, a nie jako przewodnik prądu elektrycznego.

### **5.1.2. Podstawowe parametry jakościowe energii elektrycznej dostarczanej do odbiorników pokładowych**

#### **5.1.2.1. Związek jakości energii elektrycznej ze stanem struktury metalizacji statku powietrznego**

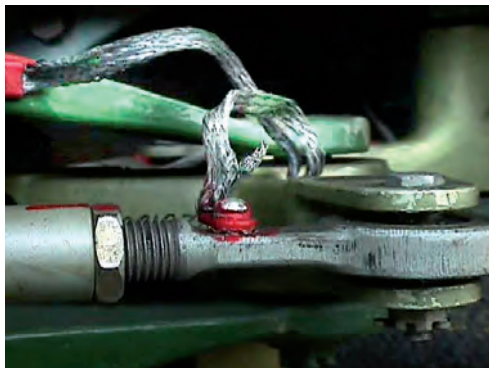
Podstawowe parametry jakościowe energii elektrycznej dostarczane do odbiorników pokładowych zostały omówione w podrozdziale 3.2, a wymagania techniczne dotyczące końcówek oczkowych i łączników przedłużających do zagniatania na przewodach elektrycznych przedstawia norma PN-EN 3373-001 [156]. W bieżącym rozdziale główna uwaga zostanie skierowana na problemy, jakie obsługa statków powietrznych napotyka, aby spełnić wymagania związane z jakością energii elektrycznej, w przypadku zwiększania rezystancji (zwykle na skutek starzeniowych procesów korozyjnych [35, 62]) połączeń metalizacji:

- a) w miejscu przyłączenia kabli minusowych lub zerowych (źródeł energii elektrycznej albo jej odbiorników) do kadłuba statku powietrznego,
- b) pomiędzy płatami poszycia lub innymi elementami konstrukcyjnymi, przez które przepływa prąd powrotny.

Autorzy chcieliby w ten sposób zwrócić uwagę na bagatelizowany problem – że skoro pole przekroju pola poprzecznego kadłuba ma dużą wartość, to prąd powrotny zawsze sobie dogodną drogę znajdzie. Dla fabrycznie nowego płatowca to jest w dużym stopniu prawda. Jednakże z upływem czasu powstają problemy. Wbrew pozorom, prąd powrotny nie ma aż tak dużej powierzchni pola przekroju poprzecznego w przypadku przepływu przez elementy struktury kadłuba statku powietrznego, np. w miejscach połączeń poszycia płynie tylko przez niektóre wytypowane przez konstruktora nity – zgodnie z przepisami lotniczymi co dziesiąty nit w danym brycie poszycia musi być nieanodowany w celu zapewnienia przepływu prądu (jeśli dany element poszycia ma mniej niż 10 nitów, to muszą być dwa nity nieanodowane). Pozostałe nity mają galwanicznie naniesioną pasywną warstwę tlenków, podobnie jak wszystkie elementy konstrukcji nośnej statku powietrznego, i nie przewodzą prądu.

Dużym problemem jest bocznikowanie prądowe ruchomych przegubów mechanicznych, np. naciągach, wahaczach czy też innych elementach ruchomych. Na

skutek utleniania powierzchniowego oraz przepływającego przez nie prądu z biegiem czasu sztywnieją na skutek utleniania i ulegają przerwaniu lub uszkodzeniu. Przykłady przedstawiono na rys. 5.3, 5.4 i 5.5.



**Rys. 5.3.** Urwana metalizacja cięga sterowania lotkami samolotu Su-22



**Rys. 5.4.** Urwana metalizacja cięga wysuwania slotu samolotu Su-22

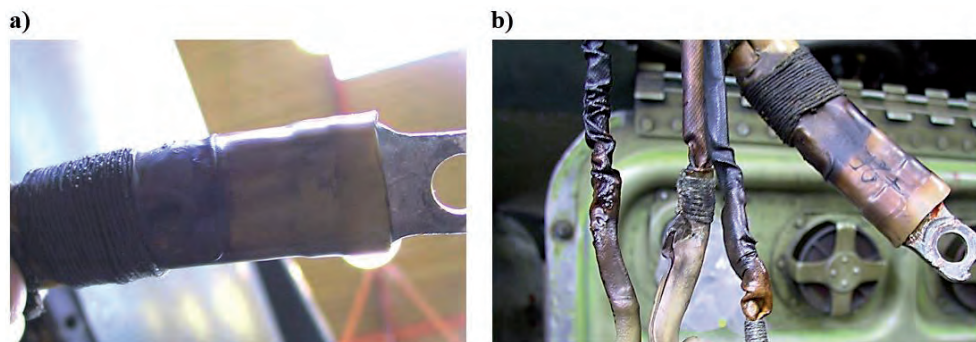


**Rys. 5.5.** Urwana elastyczna linka metalizacji bocznikująca przegub układu sterowania statecznikiem wysokości samolotu Su-22

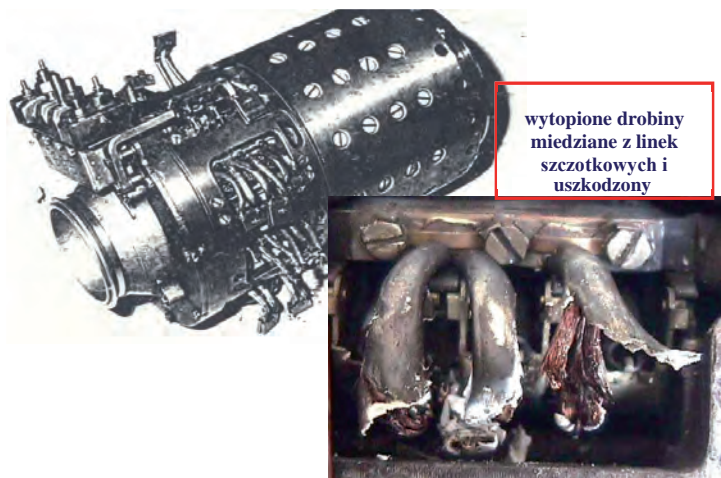


### 5.1.2.2. Podstawowe problemy stanu ustalonego

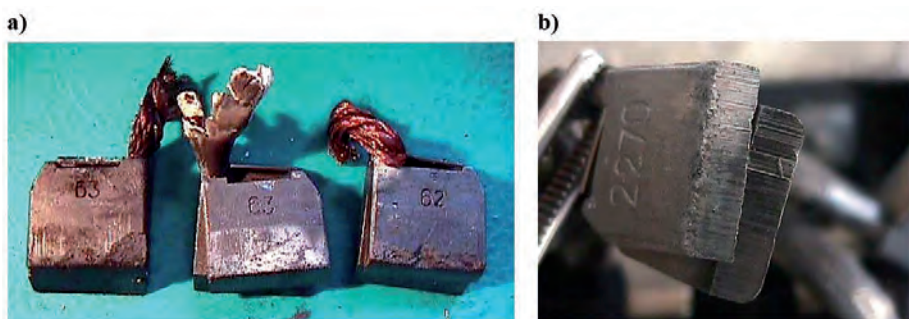
Wstępnie można stwierdzić, że uzyskiwane parametry stanu ustalonego, zarówno w obwodach prądu stałego, jak i przemiennego, w czasie długotrwałej eksploatacji WSP (30–40 lat) ulegają stopniowemu pogorszeniu. Autorzy stwierdzili, że w czasie długotrwałej eksploatacji sieci elektroenergetycznych [194-197, 219] oporniki wynośne regulatora napięcia głównych źródeł zasilania są często skręcone do maksimum, tj. możliwości regulacyjne układu będące w dyspozycji personelu naziemnego osiągnęły kres możliwości. Szczególnie intensywnie proces ten przebiega w obwodach komutatorowych prądnic prądu stałego 28,5 V (dużo wolniej przebiega dla prądnic o wyższym napięciu znamionowym). Oznacza to, że z biegiem czasu, aby utrzymać normatywną wartość napięcia na szynie odbiorników, personel techniczny przemieszczał potencjometr regulatora napięcia celem podwyższenia napięcia, aż w pewnym momencie nie miał już zakresu regulacyjnego. Obserwowano również przegrzewanie się kabli obwodu wzbudzenia prądnic (rys. 5.6) oraz przegrzewanie się, a nawet przepalanie linek szczotek komutacyjnych prądnic – rys. 5.7 i 5.8 [30, 219, 228]. Co gorsza, nie pomaga wymiana regulatora napięcia na fabrycznie nowy. Dopiero na skutek udokumentowanych pomiarów autorów niniejszej monografii, przystępowano do czyszczenia i zabezpieczania połączeń metalizacyjnych w miejscach przyłączenia do masy statku powietrznego oraz w miejscach połączeń konstrukcji statku powietrznego na drodze przepływu prądu powrotnego danej prądnicy.



**Rys. 5.6.** Uszkodzony przewód siłowy i przewody obwodu wzbudzenia prądnicy prądu stałego GS-12T 3s z samolotu Su-22: a) nadtopiony przewód siłowy prawej prądnicy prądu stałego; b) nadtopione przewody obwodu wzbudzenia prądnicy prądu stałego



Rys. 5.7. Uszkodzona prądnica-rozrusznik GSR-ST-12WT-2s z samolotu MiG-21



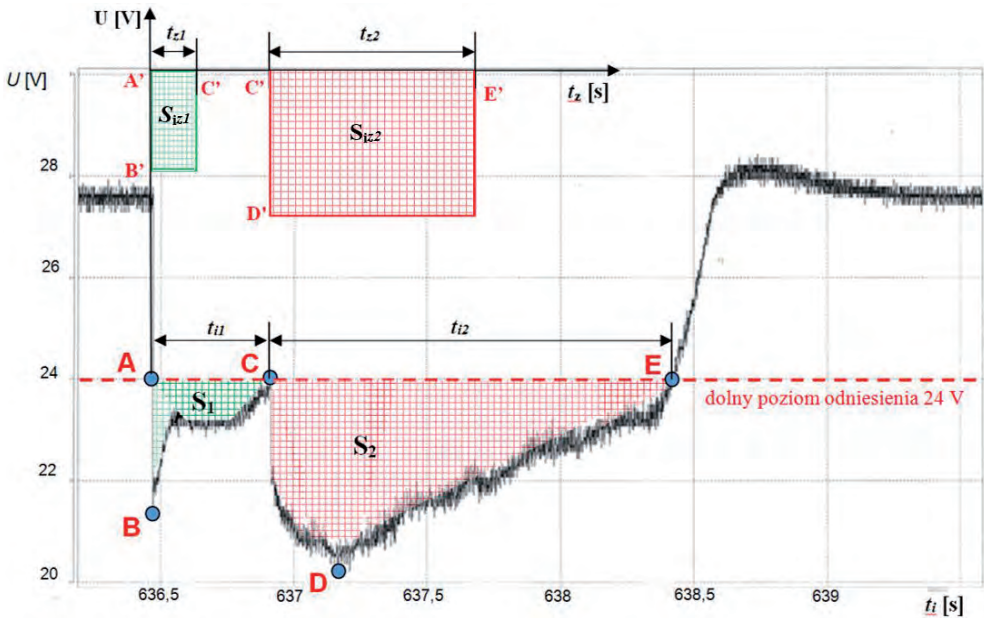
Rys. 5.8. Widok uszkodzonych szczotek z prądnicy-rozrusznika GSR-ST-12WT-2s z samolotu MiG-21bis: a) przepalane boczne powierzchnie szczotek oraz przetopione linki; b) przypalone czołowe powierzchnie szczotek [własne]

### 5.1.2.3. Podstawowe problemy stanu przejściowego

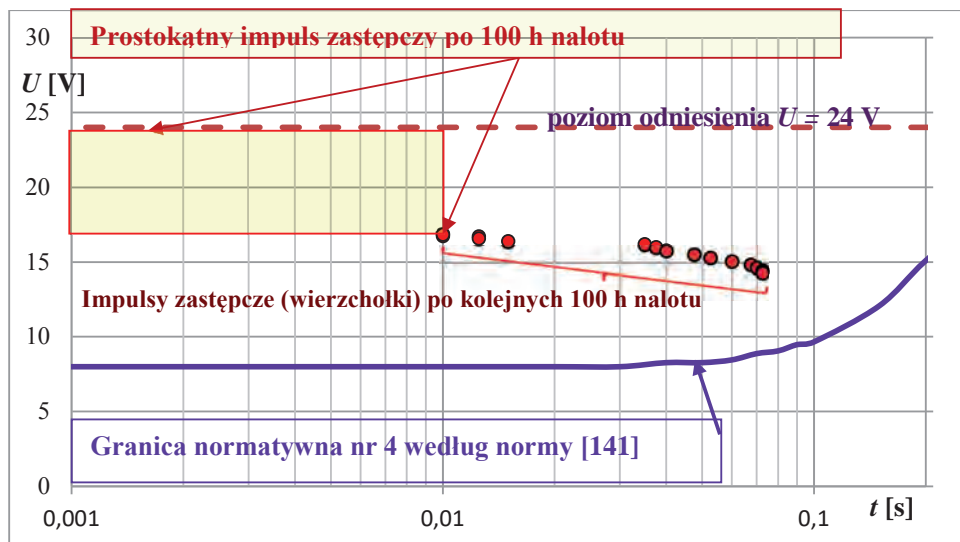
W podrozdziale 3.2 jednoznacznie określono, jak szybko po skokowym włączeniu obciążenia (np. z 10% obciążenia znamionowego do 170%) układ elektroenergetyczny musi uzyskać poziom normatywny na szynie odbiorników [227, 228]. Dla węzłów elektroenergetycznych prądu stałego ten poziom normatywny wynosi 24 V. Podano tam również procedurę oceny czasu trwania zmniejszenia napięcia poniżej tego poziomu – w przybliżeniu nie może on przekroczyć 0,1 s. Podczas pomiarów prowadzonych przez autorów na lotniskach wojskowych dla węzłów elektroenergetycznych po długotrwałej eksploatacji czas ten bywał wielokrotnie

przekroczony, przy czym równoległe prowadzone pomiary rezystancji płatowca wykazywały zwykle wyraźnie zwiększone spadki napięć na połączeniach w obwodzie przepływu prądu powrotnego.

Przykład „negatywnego” przebiegu napięcia w czasie badania stanu przejściowego układu zasilania prądu stałego 28,5 V samolotu Su-22 przedstawiono na rys. 5.9, a na rys. 5.10 wyniki symulacji komputerowych przy założeniu nieprzezwania opornika wynośnego w obwodzie regulatora napięcia, przy uwzględnieniu stwierdzonych podczas pomiarów w ITWL ekstremalnych przyrostów rezystancji kałtuba SP w obwodzie powrotnym prądu [13, 31, 35, 62, 185, 198, 228].



**Rys. 5.9.** Przykład „negatywnego” przebiegu napięcia w czasie badania stanu przejściowego układu zasilania prądu stałego 28,5 V samolotu Su-22, gdzie: A-B-C i C-D-E – krzywe przebiegu napięcia w czasie – stan przejściowy (impulsy zanikowe); A'-B'-C' i C'-D'-E' – pola powierzchni impulsu zastępczego napięcia (A'-B' i C'-D' wysokość  $U_{min}$  oraz odpowiednio A'-C' i C'-E' szerokość  $t_2$ ) [228]



**Rys. 5.10.** Zmiany wartości napięcia minimalnego oraz czasu trwania impulsu przy stanach przejściowych – zmianie poziomu obciążenia z 10% do 170% mocy znamionowej prądnicy bez wsparcia baterii akumulatorowej układu zasilania prądu stałego 28,5 V samolotu Su-22 – symulacje komputerowe przy założeniu nieprzystawiania opornika wynośnego w obwodzie regulatora napięcia, przy uwzględnieniu stwierdzonych podczas pomiarów w ITWL ekstremalnych przyrostów rezystancji kadłuba SP w obwodzie powrotnym prądu [228]

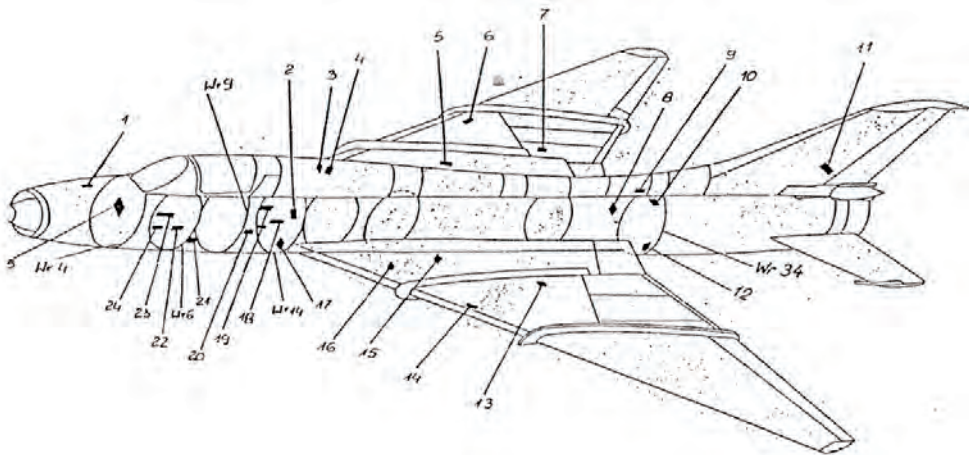
### 5.1.3. Droga powrotna prądu elektrycznego – przewody minusowe i neutralne

Według Normy Obronnej NO-15-A200:2016 Wojskowe statki powietrzne. Podkładowe układy zasilania elektrycznego. Podstawowe parametry. Wymagania i badania [141], pkt 1.8.1. Połączenia układu elektrycznego z masą zaciski minusowe i neutralne elementów układu elektrycznego (zarówno źródła, jak i odbiornika) powinny być połączone ze wspólną masą WSP. Wyjątek dotyczy konstrukcji płatowca WSP (np. konstrukcja śmigłowca SW-4 [164]) nieprzewodzącej prądu elektrycznego, należy wtedy zastosować dodatkowy przewód elektryczny:

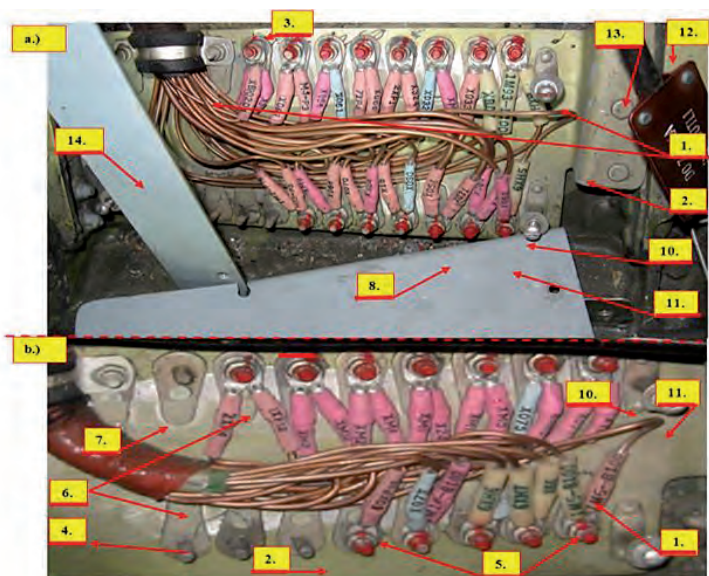
- neutralny (obwód prądu przemiennego),
- minusowy (obwód prądu stałego).

Przewody te powinny być połączone z zaciskiem neutralnym (obwód prądu przemiennego) albo z zaciskiem minusowym (obwód prądu stałego) głównego oraz awaryjnego źródła energii elektrycznej. Przewody te powinny mieć pole przekroju poprzecznego zapewniające przepływ prądu, w czasie normalnego oraz awaryjnego działania układu zasilania elektrycznego, o gęstości nie większej niż  $5 \text{ A/mm}^2$  [141].

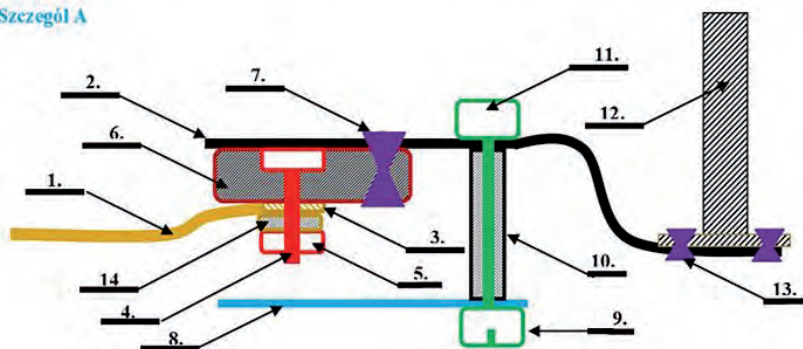
O ile wymagania techniczne nie mówią inaczej, to jeżeli wewnątrz urządzenia (wewnątrz obudowy) jest kilka przewodów neutralnych albo powrotnych, to powinny być one najpierw podłączone do jednej wspólnej listwy wewnątrz tego urządzenia – na zewnątrz urządzenia powinien być wyprowadzony tylko jeden przewód neutralny i jeden przewód zerowy. Na pokładzie statku powietrznego realizowane jest to za pomocą tabliczek minusowych (rys. 5.11. i 5.12) [35, 62, 66, 242].



**Rys. 5.11.** Schemat rozmieszczenia tabliczek minusowych na samolocie Su-22 [242]



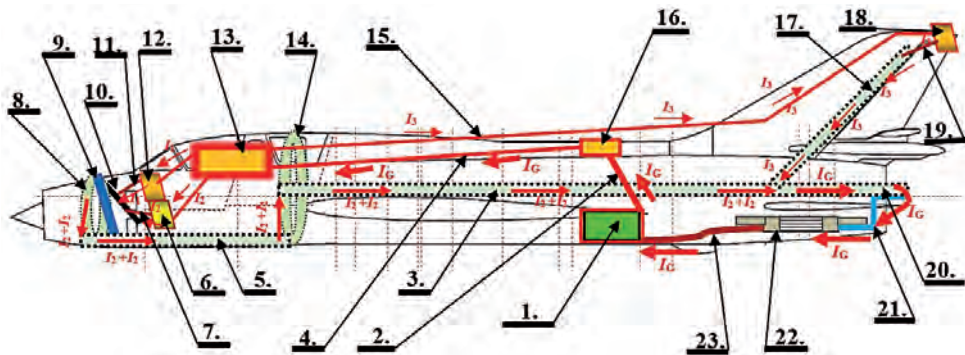
Szczegół A



**Rys. 5.12.** Tabliczka minusowa nr 3 samolotu Su-22UM: a) widok ogólny tabliczki minusowej; b) zbliżenie; szczegół A – szkic konstrukcyjny, gdzie: 1 – elektryczny przewód minusowy; 2 – płytka elektrycznie czynna tabliczki minusowej; 3 – końcówka oczkowa elektrycznego przewodu minusowego; 4 – śruba (stalowa); 5 – nakrętka (stalowa) mocująca oczko (miedź) elektrycznego przewodu minusowego do podstawy stykowej zacisku (odkuwka aluminiowa); 6 – podstawa stykowa zacisku elektrycznego (odkuwka aluminiowa); 7 – nit (aluminowy) łączący podstawę stykową zacisku z płytą elektrycznie czynną tabliczki minusowej; 8 – płytka osłonowa tabliczki minusowej; 9 – nakrętka mocująca płytę osłony; 10 – tuleja dystansowa; 11 – śruba montażowa (stalowa) mocująca płytę elektrycznie czynną tabliczki minusowej do wręgi samolotu; 12 – wręga samolotu (do której jest przynitowana tabliczka minusowa); 13 – nit (aluminowy) łączący płytę elektrycznie czynną tabliczki minusowej z wręgą samolotu; 14 – podkładka stalowa (ocynkowana)

Przykładowy schemat poglądowy obwodu zasilania elektroenergetycznego samolotu Su-22 z uwzględnieniem obwodu powrotnego przedstawiono na rys. 5.13.

**UWAGA:** Zabrania się łączenia przewodu neutralnego z przewodem zerowym zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz urządzenia elektrycznego.



**Rys. 5.13.** Obwód zasilania elektroenergetycznego samolotu Su-22 z uwzględnieniem obwodu powrotnego – schemat poglądowy, gdzie: 1 – prądnica prądu stałego GS-12T nr 2 (lewa); 2 – tandem kablowy dodatni prądnicy prądu stałego GS-12T nr 2 (lewej); 3 – dźwigar nr 1; 4 – wiązka elektryczna kabli siłowych obwodu prądnicy prądu stałego GS-12T nr 2 (lewej); 5 – dźwigar nr 2; 6 – odbiornik energii elektrycznej nr 2; 7 – przewód elektryczny minusowy odbiornika energii elektrycznej nr 2; 8 – wręga nr 1; 9 – przednia płyta pancerna kabiny pilota; 10 – tabliczka minusowa nr 1; 11 – przewód elektryczny minusowy odbiornika energii elektrycznej nr 1; 12 – odbiornik energii elektrycznej nr 1; 13 – tabela rozdzielcza CRK-1 nr 1 energii elektrycznej prądnicy prądu stałego GS-12T nr 2 (lewej); 14 – wręga nr 2; 15 – przewód elektryczny (dodatni) obwodu zasilania tylnej lampki gabarytowej CHS-39; 16 – tabela rozdzielcza CRK-1 nr 1 energii elektrycznej prądnicy prądu stałego GS-12T nr 2 (lewej); 17 – dźwigar nr 3; 18 – odbiornik elektryczny nr 3 (tylna lampka gabarytowa); 19 – przewód elektryczny minusowy obwodu zasilania tylnej lampki gabarytowej CHS-39; 20 – dźwigar nr 4; 21 – szyna przewodząca łącząca bocznik prądnicy GS-12T nr 2 (lewej) z dźwigarem nr 1; 22 – bocznik typu Sz-2 obwodu prądnicy GS-12T nr 2 (lewej); 23 – tandem kablowy minusowy prądnicy prądu stałego GS-12T nr 2 (lewej)

## 5.2. Struktura metalizacji konstrukcji płatowca

### 5.2.1. Przyczyny wprowadzenia metalizacji płatowca statku powietrznego

#### 5.2.1.1. Informacje ogólne o metalizacji kadłuba

Od 1980 r. zaostrzono przepisów budowy statków powietrznych dotyczących wyładowań atmosferycznych. O ile wcześniej uderzenie pioruna traktowano jako dopust boży, którego można uniknąć, omijając szerokim łukiem chmury burzowe, to obecnie uważa się to niemal za normę i wręcz wymaga „piorunoodporności” statku powietrznego [57, 131, 141]. Miało na to wpływ kilka czynników. Intensywna eksploatacja floty śmigłowców nad obszarem Morza Północnego pokazała, że uderzenia piorunów są tak częste, że nawet ich konsekwencje ekonomiczne są poważne. Nie tylko podważyło to pogląd, że uderzeń piorunami daje się unikać, lecz także pokazało, że zdarzają się „bezobjawowe” uderzenia piorunem, tzn. takie, których załoga jest nieświadoma, dopiero podczas przeglądu polotowego odkrywa się ogromniszyszczeń. Co więcej, śmigłowce (i samoloty również) okazały się gigantycznymi maszynami elektrostatycznymi, które same na siebie ściągają niebezpieczeństwo. Groźne ładunki elektrostatyczne generowane są nie tylko w klasycznych warunkach burzowych, ale też w zapyleniu.

Mitem jest dawne wyobrażenie, że metalowy kadłub to klatka Faradaya, która ekranuje. Ekranuje, ale tylko częściowo. Przede wszystkim kadłub sam stanowi ścieżkę dla prądu wyładowania, która umiejscowiona jest w bezpośredniej bliskości wrażliwych obwodów. Kadłub stanowi też obwód powrotny elektrycznej instalacji pokładowej statku powietrznego. Do tego dochodzą kilkusetwoltowe napięcia krokowe.

Ostatnie kilkadziesiąt lat rozwoju technicznego sprawiło, że – paradoksalnie – nowoczesne śmigłowce stały się dużo wrażliwsze na uderzenia piorunów. Dawniejsze materiały konstrukcyjne były albo dobrymi przewodnikami (dural), albo dobrymi izolatorami (kompozyt epoksydowo-szkłany). Prąd wyładowania albo przepływał przez kadłub, nie czyniąc większych szkód, albo w ogóle przezeń nie płynął. Tymczasem kompozyt na bazie włókna węglowego ma właściwości stopu oporowego – płynący prąd wyładowania powoduje wydzielanie niebezpiecznie wielkiej ilości energii cieplnej.

Również awionika stała się bardziej delikatna. Najstarsza awionika, elektromechaniczna, była nie tylko odporna, ale niemal nieczuła na kilkusetwoltowe (nawet do 1 kV) piki napięć indukowanych w przewodach. Podobnie niewrażliwe na przepięcia były lampy elektronowe – stosowane w militariach produkcji ZSRR do lat



80. XX w. (w tym przypadku argumentem była odporność na impuls elektromagnetyczny powstający podczas wybuchu jądrowego).

Dla półprzewodników konstruowane zasadniczo do dzisiejszego dnia głównie w standardzie TTL (napięcie pracy 3–5 V) zabójcze były niższe napięcia (20–200 V), ale niezbyt zaawansowanymi środkami (ekranowanie, iskierniki, warystory, filtry RC) udawało się je zabezpieczyć. Tak zabezpieczone urządzenie samoczynnie powracało do prawidłowej pracy po kilku sekundach od uderzenia pioruna.

Absurdalnie wysoką wrażliwością na indukowane napięcia wykazały się komputery. Nie chodzi przy tym o fizyczne uszkodzenie półprzewodnika, lecz o przepięcie rzędu 1 V wywołujące zmianę wartości jakiegoś bitu z 0 na 1 bądź odwrotnie. W takim przypadku urządzenie (komputer) nie doznaje fizycznego uszkodzenia, lecz działa wadliwie – takie uszkodzenie nosi nazwę rozstroju funkcjonalnego. Są to skutki podobne do błędu w programie albo do wirusa komputerowego, zależne od pełnionej przez komputer funkcji mogą być nawet katastrofalne (np. układy SAS, autopilot) [50]. Co gorsza, klasyczne środki stosowane na okoliczność samistnych uszkodzeń komputera czy błędów oprogramowania (zwielokrotnianie, stosowanie programów pisanych przez różnych programistów i w różnych językach) są w tej sytuacji bezradne – piorun jest wspólną przyczyną mogącą powodować mnogie uszkodzenia również w zwielokrotnionych systemach.

Środki techniczne pozwalające na uporanie się z tym zagrożeniem istnieją, ale wymagają gruntownego przekonstruowania okablowania statku powietrznego i muszą być wszędzie konsekwentnie stosowane, bez oszczędności. Spośród tych środków jedynie zabezpieczenie szyn zasilających warystorami, iskiernikami i filtrami RC jest „tradycyjne”. Inne środki są bardziej radykalne: konfiguracja *tie-point* (całkowita rezygnacja z lokalnych umasień na rzecz odrębnych przewodów neutralnych, połączonych z masą śmigłowca tylko w jednym punkcie – wówczas nie ma obwodu wyrównawczego, gdyż do jego powstania potrzebna są dwa punkty o różnych potencjałach), stosowanie wysokiej jakości skrętki ekranowanej zamiast zwykłych przewodów, stosowanie przewodów odprowadzających ładunek wyładowania (np. w łopatach), dodatkowych – często kaskadowych – ekranów (np. w otworach wentylacyjnych). Należy liczyć się z tym, że środki te po wstępnych próbach okażą się niewystarczające i konieczne będą korekty i przeróbki. Natomiast środkiem, który praktycznie gwarantuje sukces od pierwszego podejścia, są łącza światłowodowe.

Zmianie uległa znajdująca się w przepisach filozofia (idea) prowadzenia badań. Dawniej osobno badano urządzenia i obwody. Urządzenia, które zniosły pik 600 V, określano jako „piorunoodporne”, zaś od obwodów wymagano, aby indukowane

przebiecia nie przekraczały tej wartości. Obecne przepisy nie podają jakichkolwiek wartości liczbowych przebiec (wszak dla komputerów groźne mogą być nawet przebiecia poniżej 1V), natomiast wymagają wykazania odporności całości (z pewnym współczynnikiem bezpieczeństwa).

Zliberalizowane zostały środki wykazywania odporności na wyładowania atmosferyczne – obecnie dopuszcza się próby piorunowe w bardzo dużej skali, metody porównawcze, metody alternatywne (np. fala ciągła dookólna małej mocy), a nawet metody analityczne „zza biurka” (z zastrzeżeniem, że wtedy wymagany jest znacznie wyższy współczynnik bezpieczeństwa, dochodzący nawet do 18).

Dodatkową korzyścią z „piorunoodporności” jest zmniejszenie wrażliwości na broń elektromagnetyczną. Wbrew pozorom broń taka nie jest czymś unikalnym – pociski elektromagnetyczne konstruowane są jako modyfikacja pocisków kumulacyjnych. Pocisk taki – aby był skuteczny – nie wymaga takiej celności jak klasyczny, gdyż zdetonowany w odległości rzędu 100 m od statku powietrznego umożliwia uszkodzenie awioniki WSP, w szczególności jego układu SAS i układów sterowania uzbrojeniem [207]. Broń taka może być stosowana na polu walki według taktyki zawodowych zabójców: pierwszy strzał (szybciej oddany, mniej celny) ma obezwładnić ofiarę (tutaj jest to impuls elektromagnetyczny pochodzący z pocisku elektromagnetycznego), drugi strzał (klasyczną amunicją, spokojniej i starannie celowany) ma dobić.

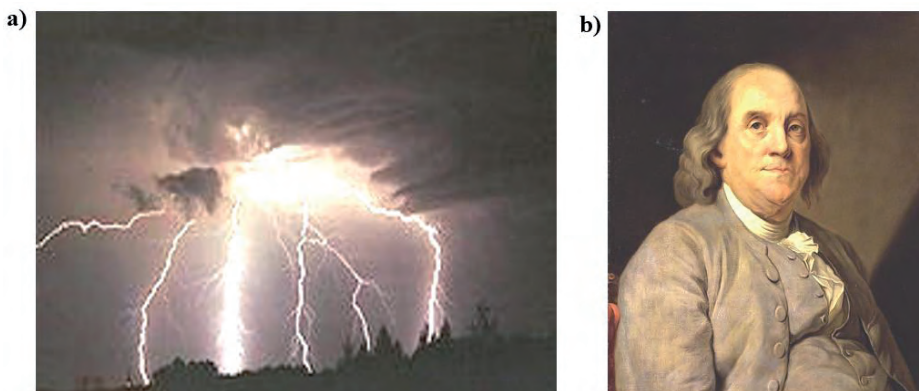
### **5.2.1.2. Powstawanie wyładowań elektrostatycznych w atmosferze**

Zjawisko elektryczności atmosferycznej znane jest od zarania ludzkości. Bano się go i niekiedy czczono. Prawdopodobnie pośrednim wynikiem obserwacji tego zjawiska było odkrycie użyteczności ognia. Po uderzeniu pioruna ogień przechowywano, czuwając aby nie zgasł, a później nauczono się go rozpalać samodzielnie.

Jeśli chodzi o elektryczną naturę pioruna, to pierwszym oficjalnym badaczem był Benjamin Franklin (rys. 5.14) [243]. Swoje doświadczenia przeprowadzał na dachach budynków, gdzie uwiązywał do latawca metalową linkę, której drugi koniec był zakończony iskrownikiem. Przeskok iskry elektrycznej był jednoznacznym dowodem na elektryczny charakter tego zjawiska.

Jeśli chodzi natomiast o zjawisko elektryczności statycznej, to już w starożytnej Grecji czy Rzymie znane było zjawisko elektryzowania się bursztynu (tzw. jantaru) podczas pocierania o różne materiały [243]. Później w okresie renesansu odkryto, że podobne właściwości wykazują inne materiały, jak szkło pocierane jedwabiem lub papierem czy też ebonit (twarda guma z wysycanymi atomami siarki wiązaniami cząsteczkowymi) pocierany wełną. W okresie oświecenia wytwarzano już wy-

sokie napięcie, pocierając szybko obracający się pas lub tarczę nieprzewodzącego materiału. W naszym życiu codziennym często sami doświadczamy oddziaływania elektryczności statycznej podczas wychodzenia z samochodu czy zdejmowania swetra z włókien sztucznych. Warunkiem powstania zjawiska jest:



**Rys. 5.14.** Wyładowanie doziemne z chmury (a); Benjamin Franklin (1706–1790) – pierwszy badacz zjawiska wyładowań elektrostatycznych, który udowodnił elektryczną naturę pioruna (b) [fot. Wikipedia, Ziemowit Porębski (a)]

1. pocieranie o siebie dwóch materiałów izolacyjnych, np. ubrania,
2. lot w środowisku suchego (poniżej 40%) powietrza [245],
3. wystarczająco mała odległość pomiędzy dwoma obiektami.

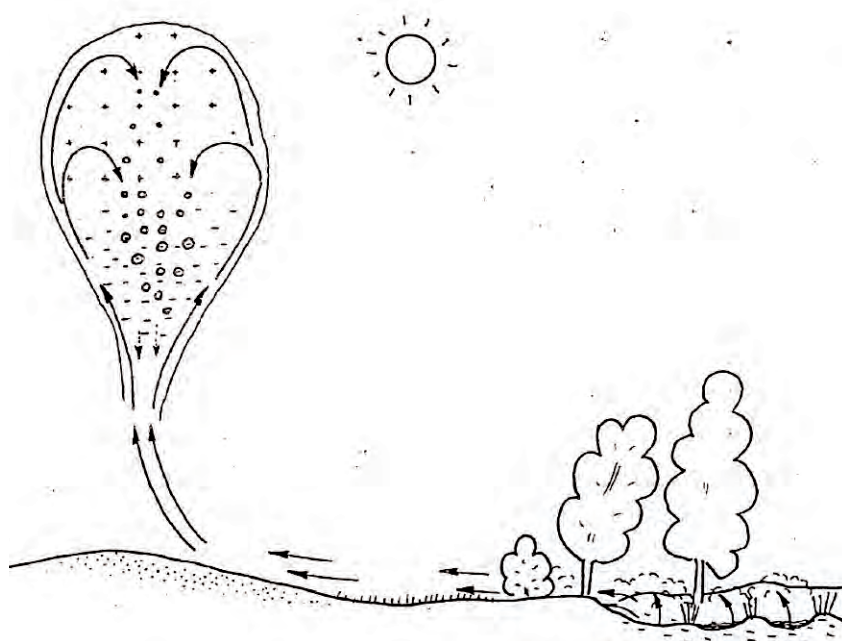
Dzisiaj, w dobie komputeryzacji i lotów kosmicznych, wyładowania elektrostatyczne w atmosferze i elektryczność statyczna jeszcze bardziej mogą wpływać na sprawność wielu systemów, a nawet stworzyć zagrożenie życia ludzkiego. To, że notujemy stosunkowo małą liczbę awarii np. w lotnictwie, wynika tylko i wyłącznie z zastosowanych licznych systemów ochronnych oraz coraz lepszych środków technicznych i organizacyjnych rozpoznawania zagrożeń atmosferycznych i ostrzeżeń o ich lokalizacji (możliwa jest korekta trasy lotu zapewniająca omijanie zagrożeń atmosferycznych). Bez nich awarie systemów pokładowych, a nawet katastrofy z powodu oddziaływania pioruna czy też elektryczności statycznej byłyby niemalże sprawą codzienną.

### Powstawanie piorunów

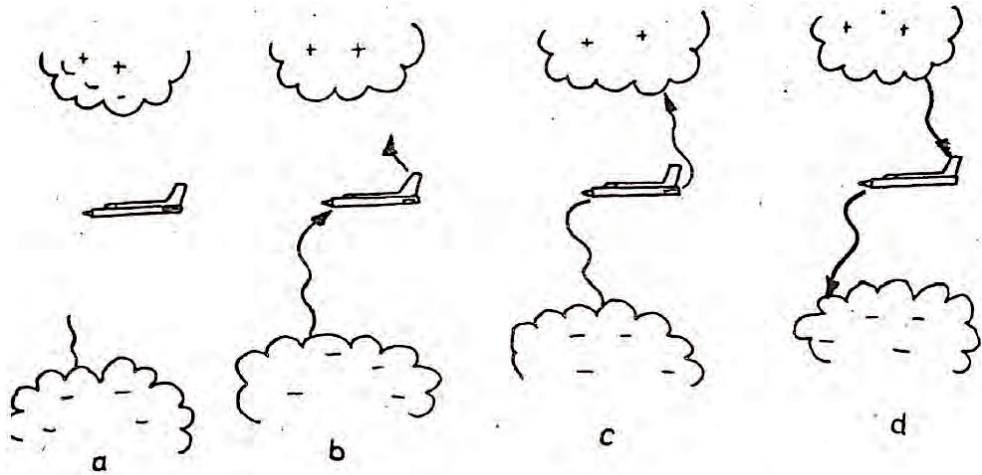
Pioruny są to wyładowania elektryczne między różnoimiennymi ładunkami statycznymi, nagromadzonymi wewnątrz jednego obłoku lub w dwóch sąsiednich obłokach, albo między obłokiem a ziemią [57, 62, 131]. Aktualnie większość teorii

tworzenia się piorunów sprowadza się do tego, że akumulacja ładunków elektrycznych zachodzi w czasie pionowych przemieszczeń kropelek wody wewnątrz obłoku (rys. 5.15). Przy tym w dolnej części obłoku powstaje ujemnie naładowana strefa z centrum ładunku rozłożonym w warstwach o temperaturze ok.  $+5^{\circ}\text{C}$  na wysokości 4–8 km. Przeciwnie (dodatnio) naładowana strefa powstaje w górnej części, centrum ładunku rozłożone w warstwach o temperaturze ok.  $-20^{\circ}\text{C}$  w warstwach na wysokości 8–12 km.

Kiedy różnica potencjałów różnoimiennie naładowanych stref stanie się odpowiednio duża, powietrze wewnątrz obłoku i wokół niego zaczyna się jonizować. W ujemnie naładowanej strefie obłoku pojawiają się pierwsze iskry elektryczne (nazywane ujemnym liderem), przechodzące zygzakowato do dodatnio naładowanej strefy z prędkością ok. 100 km/s. Jeśli na drodze „lidera” znajduje się statek powietrzny (rys. 5.16), którego metalowa konstrukcja ma znaczny statyczny ładunek elektryczny, to zostaje zakłócone pole elektryczne w danym rejonie atmosfery. Kiedy ujemny „lider” osiąga dodatnio naładowaną strefę, naprzeciw niego biegnie dodatnio naładowany kanał plazmowy w tworzącym się kanale zjonizowanego gazu osiągający prędkość ok. 100 000 km/s.



**Rys. 5.15.** Zjawisko powstawania chmur burzowych [57]



**Rys. 5.16.** Proces wyładowania pioruna przez korpus statku powietrznego: a) pojawienie się iskier elektrycznych; b) przechodzenie „lidera” przez statek powietrzny; c) spotkanie „lidera” z przeciwnie naładowanym obszarem; d) pojawienie się kanału plazmowego w kanale zjonizowanego powietrza [57]

Prąd elektryczny wyładowania przy spotkaniu „lidera” z dodatnim kanałem plazmowym gwałtownie wzrasta, niekiedy do wartości 200 kA. W tym momencie pojawia się jasny błysk świetlny i rozlega się grom. Jeśli nagromadzone ładunki elektryczne są dostatecznie liczne, po pierwszym wyładowaniu może wystąpić jeszcze kilka. W średnio intensywnym wyładowaniu (piorunie) zawarte są zazwyczaj po trzy impulsy prądu wyładowania, jednakże w czasie silnych burz były zarejestrowane pioruny złożone z 30 impulsów prądowych. Najczęściej, pierwszy impuls wyładowania ma amplitudę prądu 30 kA, a następne impulsy po 10 kA. Po ostatnim impulsie w czasie kilku dziesiątych części sekundy między centralnym ładunkiem elektrycznym przepływa prąd elektryczny, którego natężenie osiąga kilka setek amperów.

Według danych z obserwacji [57], średnia odległość między środkami ładunków, gdzie powstaje piorun, osiąga 6,4 km, maksymalna długość pioruna może znacznie przekroczyć tę długość. Przeważnie jako średnią długość impulsu prądowego w piorunie przyjmuje się czas  $t = 50 \mu\text{s}$ . Statek powietrzny, który znalazł się w rejonie wyładowania, może doznać groźnego uszkodzenia konstrukcji podczas przepływu przez niego dużych prądów. Oprócz tego, może to doprowadzić do pompażu jego silników i awarii aparatury elektronicznej. Statystyka [57] pokazuje, że porażenie statków powietrznych przez piorun w większości przypadków następuje nie w aktywnych chmurach burzowych, a w czasie ich przelotu przez obłoki z opa-

dami w rejonach małej aktywności burzowej. Tak więc okazuje się, statki powietrzne w locie same przyczyniają się do powstaniu piorunu.

### 5.2.1.3. Porażenia statków powietrznych piorunem – opis przypadków

Niebezpieczeństwo porażenia lecących statków powietrznych piorunem w ostatnich latach nasiliło się w związku z zamontowaniem na ich pokładach wyposażenia pozwalających na prowadzenie lotów w dowolnych warunkach meteorologicznych. Według danych prasy zagranicznej, w USA w latach 1971–1981 zarejestrowano 169 przypadków porażenia statków powietrznych piorunem, część z nich zakończyła się katastrofą lub awarią [57, 131]. Według danych General Electric ustalono, że tylko do 1990 r. z 200 przypadków porażenia piorunem w 32 przypadkach była uszkodzona owiewka anteny RLS, a w 40 przypadkach stwierdzono nieprawidłowości w pracy osprzętu, w 27 przypadkach było przebite (przecięte) lub uszkodzone poszycie samolotu, w pozostałych przypadkach samoloty nie doznały żadnych uszkodzeń lub były uszkodzone tylko odgromniki elektryczności statycznej [57].

W ZSRR w latach 1976–1981 zarejestrowano 133 przypadki porażenia cywilnych statków powietrznych piorunem [57]. Uderzeniom pioruna, według spostrzeżeń załóg, towarzyszyły odgłosy wybuchów, stuknięć i uderzeń po korpusie. W momencie uderzenia piloci niejednokrotnie odczuli „udar” na sterach wysokości i kierunku. W niektórych przypadkach załoga poczuła (po uderzeniu pioruna) zapach spalenizny w kabinie. Najczęściej uszkodzenia i ślady uderzeń pioruna zaobserwowano na elementach konstrukcji i wyposażenia pokładowego w rejonach przedniej części kadłuba, końcówek skrzydła i uderzenia ogonowego, na wystających antenach łączności UKF. W niektórych przypadkach stwierdzono ślady „przemieszczających” się wyładowań na kadłubie (rys. 5.17 i 5.18), nawet do ich ogonowej części.

#### TELEGRAM

z dnia 13.05.2005 r.

*Informuję, że w dniu 09.05.2005 r. (...) na samolocie CASA C-295M nr 011 podczas podejścia do lądowania w chmurach w odległości 20 km od lotniska Bydgoszcz samolot został porażony piorunem. W następstwie powyższego incydentu nastąpiło wyjście z pracy lewej prądnicy prądu stałego i systemu kontroli prędkości steru kierunku. Po zresetowaniu prądnicy, prądnica weszła do pracy. System kontroli prędkości steru kierunku przełączono w sterowanie ręczne. Lądowanie odbyło się bez następstw w m. Bydgoszcz.*

*Podczas oględzin przez specjalistów (...) stwierdzono rozległe punktowe przepalenia na kadłubie umiejscowione głównie w rejonach anten oraz przedniej części kadłuba, ponadto stwierdzono przypalenie lewego białego światła nawigacyjnego oraz jego okolicy.*

*Po wykonaniu szczegółowego przeglądu oraz sprawdzeń zgodnie z „Obsługą specjalną po uderzeniu piorunem” samolot lotem technicznym został przebazowany do Krakowa.*



**Rys. 5.17.** Samolot CASA po uderzeniu pioruna podczas lądowania – ślady wypaleń od uderzenia pioruna w rejonie szyby przedniej kabiny pilotów (jasne koliste przebarwienia)



**Rys. 5.18.** Samolot CASA po uderzeniu pioruna podczas lądowania – ślady wypaleń na kadłubie w rejonie śródpięta

W wielu przypadkach na statkach powietrznych po uderzeniu pioruna nie było żadnych uszkodzeń albo odnotowano nieznaczne uszkodzenia w rodzaju opalenia i naruszenia odgromników elektryczności statycznej na końcówkach skrzydła i poszycia, punktowych obtopień nitów, uszkodzeń pokrycia lakierniczego na owiewkach dielektrycznych. Z analizy analogicznych statycznych danych Sił Powietrznych ZSRR za lata 1973–1985 wynika, że z 67 przypadków porażenia samolotów piorunem w przypadkach 36 były one przesłanką do wypadku lotniczego [57].

Ogólnie, zarówno w lotnictwie cywilnym, jak i wojskowym, notuje się mniejsze uszkodzenia dużych statków powietrznych niż małych. Jest to oczywiste, zważywszy na mniejszą liczbę i mniejsze powierzchnie, połączeń pomiędzy elementami metalowymi płatowca. W lotnictwie transportowym (wojskowym i cywilnym) uderzenia pioruna były zapamiętane przez załogę samolotu jako jasne wybuchy w rejonie owiewki nosowej lub dielektrycznej osłony anteny stacji radiolokacyjnej, albo izolatora anteny radiowej, stuknięć i uderzeń po poszyciu samolotu, niekiedy pokłucie personelu w rejonie twarzy i rąk, uszkodzeniem stacji radiowej. Podczas przeglądu technicznego stwierdzano często: wypalenie kabli wysokoczęstotliwościowych i zniszczenie anten, wyjście z pracy prądnicy, popękanie armatur świateł pozycyjnych lub antykolizyjnych. Samoloty myśliwskie miały groźniejsze uszkodzenia, wśród których zanotowano zniszczenia stożków przezroczystych dla fal radiowych, wyłączenia przyrządów aneroidowo-membranowych, pompaż i zatrzymanie silnika, utratę łączności radiowej i utrudnienie sterowania samolotem.

Proces uszkodzenia czołowego stożka przezroczystego dla fal radiowych (zwykle skrywa on antenę radaru) w czasie i po uderzeniu pioruna można przedstawić następująco. Ładunki elektryczne pioruna, uderzając w wysięgnik PWD (odbiornik ciśnienia powietrznych), winny płynąć z niej na korpus samolotu. Przy odpowiednio małej rezystancji metalizacji pomiędzy końcem wysięgnika (punktem przyłożenia pioruna) a krawędziami spływu usterzenia pionowego (najczęstszy punkt oderwania pioruna) prąd pioruna przepływa po powierzchni wysięgnika, a następnie po powierzchni kadłuba statku powietrzego. Jeżeli rezystancja ta jest odpowiednio duża, to przy napięciu pioruna przekraczającym 100 mln woltów następuje przebicie cienkiej warstwy izolacji pomiędzy punktem przyłożenia pioruna (zwykle w końcówkę powierzchni PWD) a żyłą przewodzącą przewodów ogrzewania PWD (lub innych znajdujących się tam przewodów elektrycznych) – rys. 5.19. Przykładowy ładunek pioruna (mający energię powyżej 500 MJ i natężenie prądu 150 kA) po przewodach ogrzewania PWD i metalizacji „przenika” do wnętrza jamy stożka przezroczystego dla fal radiowych [57].

Momentalne przechodzenie dużych prądów z wysięgnika PWD na stożek samolotu po cienkich przewodach ogrzewania i po metalizacji doprowadza do momen-

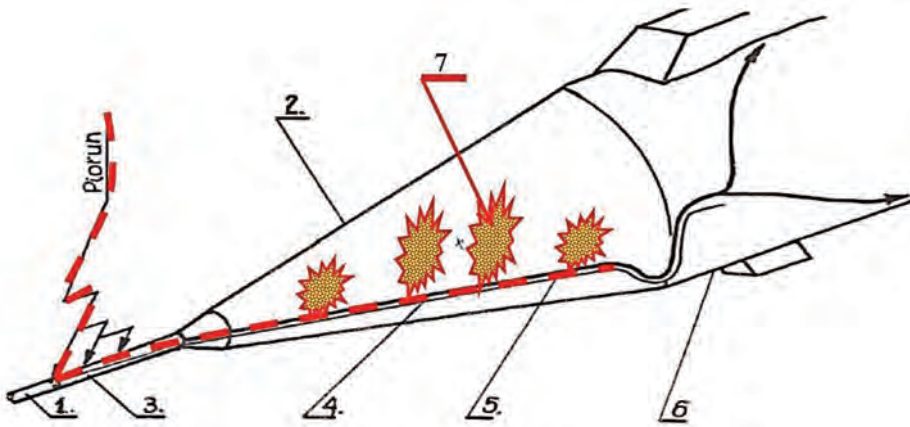


talnego (wybuchowego) parowania żyły przewodzącej tych przewodów. Ponieważ parowanie zachodzi w zamkniętej objętości wysięgnika, to powstaje wysokie ciśnienie par wyparowanego metalu, co w rezultacie powoduje zniszczenie stożka przezroczystego dla fal radiowych. Prowadzi to do uszkodzenia przewodów rurowych ciśnienia statycznego i dynamicznego. Oprócz tego, oddzielne części zniszczonego stożka wpadają w dyfuzor wlotowy silnika, wywołując jego pompaż i zatrzymanie.

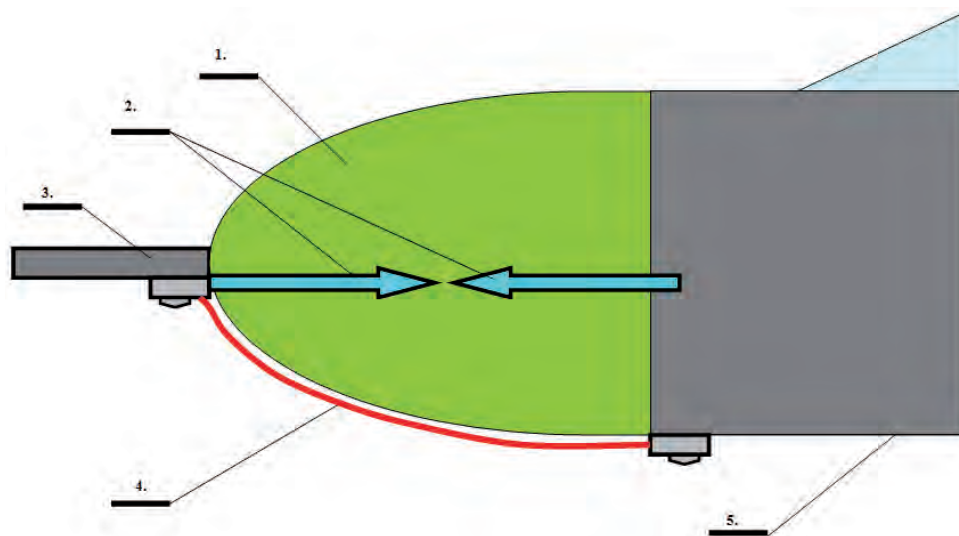
W związku z tym, że porażenie samolotu piorunem często jest przyczyną uszkodzeń, podejmuje się środki zabezpieczenia przeciw piorunowemu statków powietrznych, które ogólnie biorąc polegają na zapewnieniu:

- wysokiej elektrycznej przewodności całego samolotu, szczególnie dla małych napięć,
- specjalnej metalizacji detali z kompozytów i materiałów dielektrycznych poprzez zamontowanie na nich zabezpieczających elementów przewodzących: kół, pasków, iskrowników, lub malowania ich powierzchni farbą elektroprzewodzącą lub antyelektrostatyczną itp.

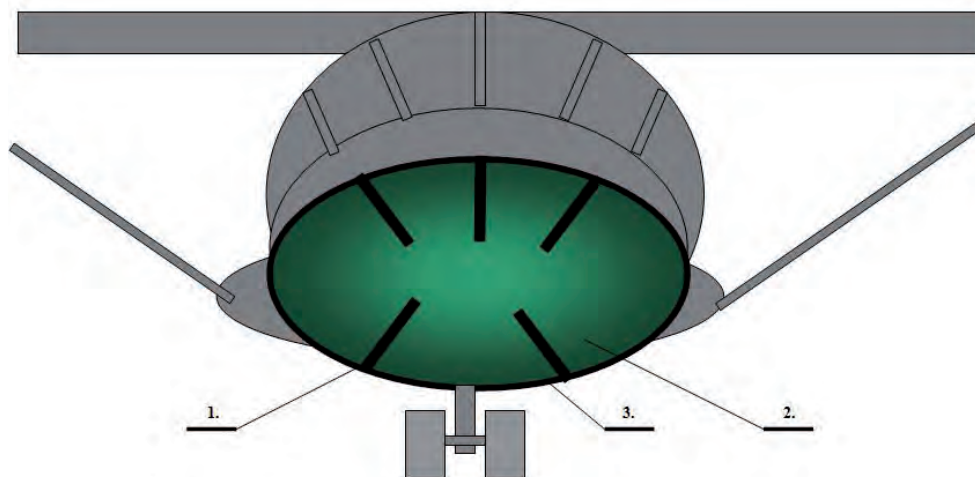
Przykładowe sposoby zabezpieczenia urządzeń statku powietrznego przedstawiono na rys. 5.19–5.21. Jednakże środki te nie gwarantują 100% zabezpieczenia przeciw piorunowemu samolotu.



**Rys. 5.19.** Sposób zabezpieczenia odbiornika ciśnienia powietrza PWD przed uderzeniem pioruna, gdzie: 1 – odbiornik ciśnienia powietrza (PWD); 2 – stożek przezroczysty dla fal radiowych; 3 – wysięgnik; 4 – przewód elektryczny ogrzewania PWD – linia ciągła; 5 – prąd pioruna – linia przerywana; 6 – korpus statku powietrznego; 7 – odparowane cząstki żyły przewodzącej (miedzi)



**Rys. 5.20.** Sposób zabezpieczenia diamagnetycznej osłonie radaru w nosku kadłuba samolotu MiG-29, gdzie: 1 – diamagnetyczna osłona radaru; 2 – iskrownik; 3 – wysięgnik odbiornika ciśnien powietrznych PWD; 4 – stalowa linka boczniująca; 5 – korpus samolotu



**Rys. 5.21.** Paski odgromowe w diamagnetycznej osłonie radaru pogodowego umieszczonego w nosku kadłuba samolotu An-28, gdzie: 1 – metalowy pasek odgromowy; 2 – diamagnetyczna osłona radaru pogodowego; 3 – pierścień stykowy łączący metalowe paski odgromowe w jednolitą całość (za pomocą połączeń stałych oraz styków rozłącznych łączy je z MGS)

#### 5.2.1.4. Zabezpieczenie przeciw piorunowe statków powietrznych

Na statkach powietrznych wszystkich typów w celu podwyższenia poziomu zabezpieczenia przed porażeniem piorunem, zgodnie z przepisami lotniczymi, powinno być zapewnione połączenie wszystkich elementów metalowych konstrukcji płatowca, agregatów energetycznych i osprzętu elektrycznego – łączy się je we **wspólny system metalizacji** statku powietrznego [141]. Pod pojęciem metalizacji statku powietrznego należy rozumieć [35, 62, 131, 141, 245]:

- a) połączenie z płatowcem (korpusem metalowym) narożnych, wystających elementów,
- b) połączenie z płatowcem występujących przemieszczających się elementów skrzydła (dla samolotów ze zmienną geometrią), sterów, klap, grzebieni aerodynamicznych podstaw i innych elementów mechanizacji,
- c) połączenie systemów metalizacji agregatów energetycznych z systemem metalizacji samolotu,
- d) połączenie systemu metalizacji zbiorników podwieszanych z systemem metalizacji samolotu,
- e) połączenie styków poszycia, luków, gardzieli zbiorników paliwa, przewodów rurowych, w których w przypadku przepływu prądów pioruna lub powstania elektryczności statycznej mogą powstawać wyładowania,
- f) połączenie z systemem metalizacji samolotu luków drzwi i klap przedziałów, izolowanych od głównej konstrukcji.

Metalizację konstrukcji (w zależności od elementów składowych) wykonuje się za pomocą:

- połączeń „stałych”: gwintowych, nitowych i spawanych, śrubowych i zaciskowych,
- zespołów przegubów szybkorozłącznych, zamków zatraskowych i blokujących,
- elastycznych łączników metalizacji – stosowanych do połączenia z korpusem statku powietrznego elementów ruchomych jak: luki, drzwi, lotki, ciągnia sterujące, obudowy bloków wyposażenia znajdujące się na amortyzowanych podstawach.

Dla zewnętrznych elementów narożnych konstrukcji statku powietrznego, narażonych na uderzenie pioruna, przyjmuje się mniej niż dwie łączówki (linki) metalizacji. Stery kierunku i wysokości, klapy, lotki i inne elementy mechanizacji samolotów i śmigłowców winny mieć łączówki metalizacji na każdym przegubie.

Sposób instalacji i rozmieszczenia elementów metalizacji ma zabezpieczyć:

- ich niezawodne przyleganie i mocowanie,

– łatwość demontażu elementów metalizacji i ich zamienność.

Ponadto należy pamiętać [35, 62, 131, 141, 245]:

1. W celu przeciwdziałania uszkodzeniu od uderzenia pioruna **podczas postoju na ziemi** statki powietrzne są uziemiane, a oporność (rezystancja) między masą elektryczną statku i obwodem uziemienia na płycie postojowej nie powinna przekraczać  $1,0 \Omega$ . Urządzenie (element) uziemiające powinno być malowane odróżniającą się czarną farbą i być oznakowane czerwoną chorągiewką.
2. Szczególną uwagę w czasie procesu projektowania konstrukcyjnego należy zwrócić na odpowiednio dużą liczbę tzw. odgromników. Są to wiotkie elementy wykonane bądź z pęku drucików, bądź z włókien węglowych, umieszczone na krawędziach spływu strug powietrznych z kadłuba, skrzydeł, stateczników, lotek, z których pęd powietrza zabiera ładunek elektrostatyczny.
3. Elementy poszycia wykonane z materiałów diamagnetycznych powinny być malowane farbą przewodzącą bądź antyelektrostatyczną, zapewniającą odpowiednio małą rezystancję powierzchniową izolacji. Rezystancja ta powinna być tym mniejsza, im większa jest powierzchnia danego elementu poszycia.
4. Elementy poszycia wykonane z materiałów diamagnetycznych powinny mieć zamontowane metalowe koła, paski, iskierniki umożliwiające przemieszczanie się prądu pioruna po powierzchni materiału dielektrycznego.
5. Materiał diamagnetyczny do wykonania elementów poszycia powinien mieć właściwości „antyeksplozyjne” przy oddziaływaniu pioruna:
  - nie powinien mieć wtrąceń pęcherzyków gazu,
  - nie powinien chłonać wilgoci,
  - nie powinien ulegać rozwarstwieniu,
  - powinien mieć jednorodną strukturę rezystancyjną,
  - nie powinien podtrzymywać ognia.

Czy uderzenie pioruna jest groźne dla płatowca?

Powszechnie uważa się, że współczesny statek powietrzny wykonany przecież całkowicie z metalu jest całkowicie bezpieczny – metalowe poszycie tworzy swobodną butelkę lejdejską, po której prąd pioruna może dowolnie przepływać. Nie jest to do końca prawdą (patrz opis przypadków w p. 5.2.1.3) z kilku powodów [35, 62, 131, 141, 245]:

1. Powierzchnia poszycia jest pokryta dosyć cienką blachą (1–3 mm) z duraluminium – punktowe nagromadzenie energii z uderzenia pioruna może spowodować jej przetopienie (rys. 5.17) – przez powstałe otwory część energii pioruna może wnikać do środka. Jeżeli w pobliżu takich miejsc znajdują się opary paliwa (zbiorniki paliwowe, rury drenażowe itp.), to może nastąpić ich zapłon, kończący się często wybuchem. Dlatego rejon poszycia w pobliżu zbiorników pali-

wowych pogrubia się, wolną przestrzeń w zbiornikach wypełnia się niepalnym gazem obojętnym.

2. Powierzchnia statku powietrznego składa się z wielu płatów blach połączonych ze sobą nitami na wręgach i podłużnicach; w celu ochrony przed korozją blachy i nity są pokryte warstwą tlenku (tzw. anodowanie), który jest izolatorem – jedynie co dziesiąty nit jest (zgodnie z przepisami lotniczymi) bez warstwy ochronnej i na nich to spoczywa „odpowiedzialność” za połączenie elektryczne – przy zmianach korozyjnych na tych połączeniach rezystancja może być na tyle duża, że prąd pioruna (zgodnie z prawami elektrotechniki) przepłynie częściowo przez odcinek o mniejszej rezystancji, np. przez przewód elektryczny biegnący wewnątrz kadłuba obok skorodowanego płata poszycia.
3. Przy lokalnym zwiększeniu rezystancji połączeń elementów płatowca wydzielala się w tym miejscu więcej ciepła, proporcjonalnie do wartości tej oporności, i może nastąpić lokalne przetopienie materiału. Mimo że utworzy się wtedy połączenie spawane (czy zgrzewane), które będzie miało mniejszą rezystancję, sytuacja taka jest niebezpieczna zwłaszcza w przypadku licznych elementów, które muszą być ruchome zgodnie ze swym przeznaczeniem: lotki, ster kierunku, ster wysokości, sworzniowe połączenia dźwigarów skrzydeł z kadłubem czy też miejsce połączenia kesonów łopat śmigłowca z piastą wirnika nośnego śmigłowca, cięgien sterowania. Zespawanie tych połączeń może skończyć się pogorszeniem sterowania, a nawet katastrofą [50, 131]. Dlatego też każdy przegub w układzie sterowania musi być bocznikowany co najmniej jednym elastycznym łącznikiem metalizacyjnym. Łącznik taki nie może być dłuższy niż 152 mm (dłuższy mógłby mieć zbyt dużą impedancję i mógłby nie spełnić swojej funkcji) i musi składać się z nie mniej niż 64 drucików (zapewnia to większą elastyczność) o łącznym przekroju nie mniejszym niż 6 mm<sup>2</sup> [141]. W połączeniach stałych takie „naturalne” przetopienie także nie jest korzystne. Pomijając obniżenie elastyczności mechanicznej takiego połączenia, to również zwykle nie jest ono jednorodne – swoiste naturalne spawanie prowadzone bez osłony gazu neutralnego wprowadza warstwy tlenków łamiących się w czasie wibracji, co powoduje pulsacje rezystancji poszycia w czasie lotu. Kadłub statku powietrznego stanowi obwód powrotny dla prądu zasilającego wiele odbiorników energii elektrycznej. Pulsacje rezystancji znajdują odzwierciedlenie w zakłóceniu pracy niektórych odbiorników, jak np. nierównomierność pracy elektromechanizmów, błędy wyliczeń pokładowych układów cyfrowych, zakłócenia odbioru radiowego.
4. W przypadku niemetalowej (kompozytowej) struktury poszycia, pod wierzchnią powierzchnią lakierniczą jest nałożony (bezpośrednio na warstwę kompozyto-

wą) podkład elektroprzewodzący. Śmigłowiec SW-4 (rys. 5.22) to przykład zastosowania poszycia o niemetalowej (kompozytowej) strukturze [164].



**Rys. 5.22.** Śmigłowiec SW-4 o niemetalowej (kompozytowej) strukturze poszycia – pod wierzchnią warstwą lakieru jest nałożony (bezpośrednio na warstwę kompozytową) podkład elektroprzewodzący

#### 5.2.1.5. Wstępny algorytm oceny odporności metalowego płatowca na uderzenie pioruna

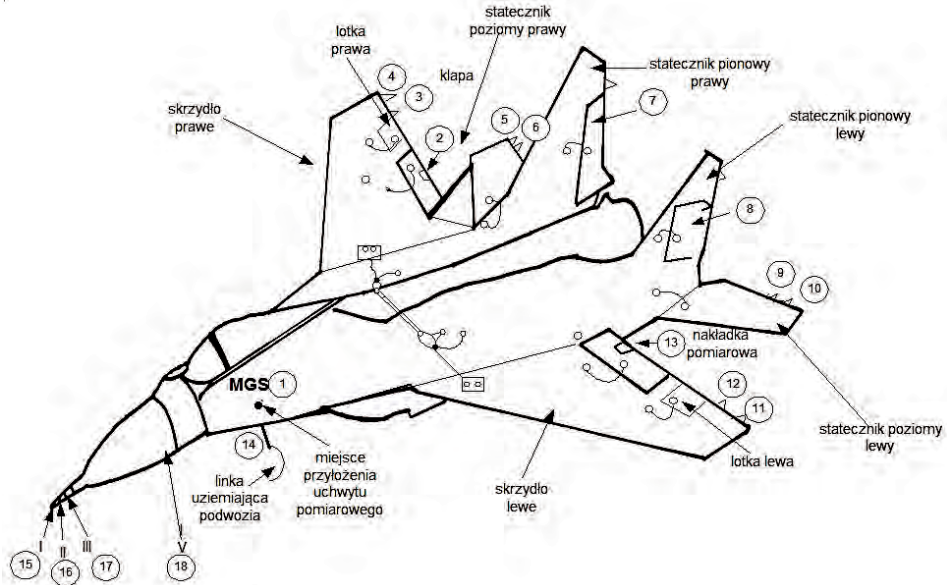
Jak wspomniano w poprzednim punkcie, zwiększenie się rezystancji połączeń elementów płatowca powoduje zwiększenie potencjalnego zagrożenia skutkami uderzenia pioruna. Elementy ruchome płatowca muszą być bocznikowane elastycznymi łącznikami metalizacji. Rezystancja połączenia pomiędzy taką linką a elementami płatowca nie może przekroczyć  $2000 \mu\Omega$ . Jednocześnie pojedyncze połączenie nieruchome (nitowane, skręcane) płatowca nie może mieć rezystancji większej niż  $600 \mu\Omega$ . Obie te wartości są pracochłonie sprawdzane w zakładzie produkcyjnym w trakcie kolejnych procesów montażowych. Negatywny wynik sprawdzenia decyduje o demontażu danego połączenia, czyszczeniu i ponownym łączeniu (np. nitowaniu). Zdaniem specjalistów ITWL takie „diagnozowanie” odporności płatowca na oddziaływanie pioruna jest nieuzasadnione z punktu widzenia eksploatacyjnego [59, 62].

W czasie uderzenia pioruna, tj. przemieszczenia się ładunku elektrycznego pomiędzy dwoma różnoimiennie naładowanymi obiektami, np. chmurami, poprzez kadłub statku powietrznego, nieistotne są lokalne rezystancje połączeń metalicznych, ale rezystancja wypadkowa [131]. Dlatego też w czasie przedłużenia resursów wykonuje się pomiary kompleksowe pomiędzy punktami: „zaczepienia” a „ode-

rwania” pioruna. Ponieważ rezystancja pomiędzy tymi punktami nie jest określona przez normy, specjaliści ITWL często wykonują przestrzenną siatkę rezystancyjną, w celu określenia dopuszczalnej rezystancji pomiędzy badanymi na WSP punktami struktury jego metalizacji. Dopuszczalną rezystancję połączeń określa się przy założeniu wartości określonych dla pojedynczych połączeń [160] – odpowiednio  $2000 \mu\Omega$  albo  $600 \mu\Omega$ . Następnie analizuje się możliwości przepływu pioruna dla danego statku powietrznego.

Niezależnie od tego typuje się elementy stykowe systemu metalizacji szczególnie istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa lotu w przypadku uderzenia pioruna. Dla samolotu MiG-29 za takie elementy zostały uznane (rys. 5.23) [59, 62]:

- a) system metalizacji punktów obrotu steru kierunku – punkty 7, 8;
- b) połączenia stykowe wysięgnika odbiornika ciśnień powietrznych PWD-18 – punkty 15, 16, 17, 18;
- c) system metalizacji sworzni skrzydłowych – lewe skrzydło punkty: 11, 12, prawe skrzydło punkty 3, 4;
- d) lotki i klapy 2, 13;
- e) stateczniki poziome (płytowe stery wysokości) 5, 6, 9, 10;
- f) stery kierunku – punkty 7 i 8.



**Rys. 5.23.** Samolot MiG-29 – miejsca przykładania sond prądowych do pomiaru rezystancji poszycia, gdzie: MGS – masa główna statku powietrznego, tj. wręga do której przyłączony jest kołek „-” pokładowej baterii akumulatorowej [59]

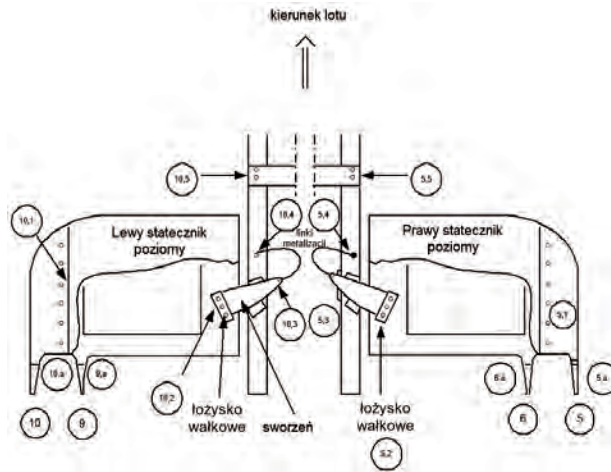
Przykładając sondy układu do pomiaru rezystancji (metodą techniczną przy prądzie probierczym  $I_p = 10$  A), można ocenić, czy dany tor metalizacyjny ma rezystancję zgodną z wyliczoną maksymalną wartością, czy też nie. Problem zaczyna się, jeżeli wartość rezystancji pomiędzy danymi punktami jest przekroczona – pojawia się problem czyszczenia skorodowanego miejsca, a więc należy je zlokalizować. System metalizacji dla MiG-29 jest bardzo rozbudowany [49, 59, 62, 66], jego uproszczony model utworzony w ITWL ma 78 istotnych połączeń metalizacyjnych. W niektórych przypadkach, jak np. dla połączeń 15, 16, 17 wysięgnika PWD-18 (rys. 5.23), można zlokalizować skorodowane miejsca, mierząc rezystancje kolejnych połączeń metalizacyjnych w przypadku przekroczonej dopuszczalnej wartości rezystancji w torze pomiędzy punktem 15 a MGS. Jednak w większości przypadków bezpośredni dostęp do poszczególnych połączeń metalizacyjnych jest bardzo utrudniony, jak np. do linki bocznikującej łożysko wałkowe osi obrotu steru wysokości (rys. 5.24). Rozwiązaniem jest tu korekta metody pomiarowej – wykorzystanie wszystkich kombinacji pomiarowych pomiędzy 17 punktami pomiarowymi (w przypadku MiG-29). Metoda ta została roboczo nazwana metodą superpozycji otrzymanych z pomiarów skrośnych. Polega ona na tym, że jeżeli podczas pomiarów podstawowych rezystancja pomiędzy MGS (rys. 5.23, punkt nr 1) a dowolnym punktem (np. nr 9) będzie przekraczała wartość dopuszczalną, wykonuje się dodatkowe pomiary rezystancji, tworząc pomocniczą siatkę rezystancji „skrośnych”. Są to pomiary rezystancji pomiędzy zewnętrznymi punktami płatowca, tj. z pominięciem MGS.

Obwody pomiarowe „skrośne” muszą obejmować część pojedynczych rezystancji metalizacyjnych w obwodzie „podstawowym”, w którym stwierdzono przekroczenie dopuszczalnej wartości rezystancji. Oczywiście wcześniej musi być obliczona dopuszczalna wartość rezystancji (ze schematu zastępczego) dla obwodów „skrośnych”. W ten sposób łatwo jest zlokalizować skorodowane połączenie metalizacyjne, bez konieczności pracochłonnego demontażu wielu elementów płatowca, w celu udostępnienia miejsca do pomiaru rezystancji poszczególnych (pojedynczych) połączeń metalizacyjnych. Przekroczenie dopuszczalnych wartości rezystancji w danym obwodzie „podstawowym” i w pewnym obwodzie „skrośnym” mającym z tym obwodem podstawowym wspólny element rezystancji metalizacji, np.  $R_{st}$ , może sugerować, że właśnie  $R_{st}$  jest miejscem o pozanormalnej rezystancji styku metalizacyjnego [49, 59, 62, 66].

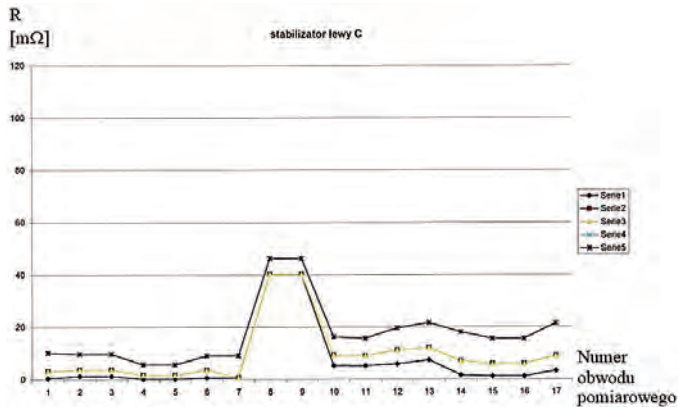
Przykładowy proces pomiarowy można prześledzić na podstawie poszukiwania uszkodzeń struktury metalizacji statecznika wysokości MiG-29 (rys. 5.25 i 5.26). Z aerodynamicznego punktu widzenia jest to bardzo odpowiedzialny podzespół płatowca. Płytowe stery wysokości, tj. stateczniki wysokości, są połączone z kadłubem samolotu za pomocą linek metalizacji o znacznym przekroju poprzecznym



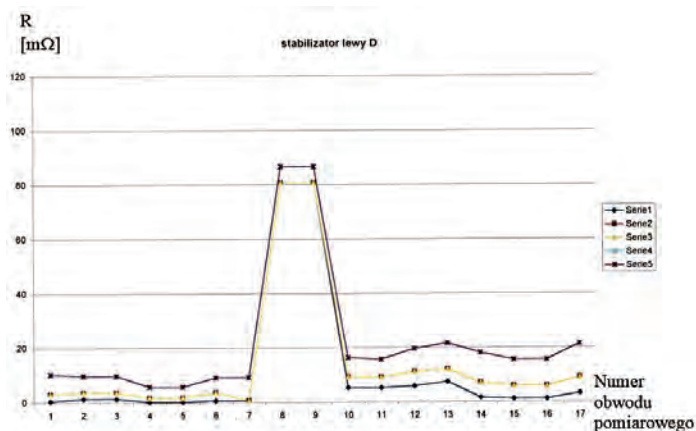
(ok.  $16 \text{ mm}^2$ ). Konstrukcja statecznika jest znitowana ze sworzniem. Sworzzeń ten jest osadzony w łożysku wałkowym umieszczonym w kadłubie samolotu umożliwiając obrót statecznika. Łożysko to ma znaczną rezystancję i w czasie uderzenia pioruna mogłoby ulec lokalnym procesom spawania i przegrzewania. Mogłoby to w konsekwencji zakończyć się utrudnieniem sterowania kątem natarcia samolotu, a nawet zablokowaniem steru wysokości. Powyższe utrudnienia mogłyby przynieść katastrofalne skutki, zwłaszcza w czasie podchodzenia do lądowania [49, 59, 62, 66].



**Rys. 5.24.** Szkic poglądowy mechaniczno-elektryczny pomiędzy sterami wysokości, tj. tzw. stabilizatorami – widok od góry



**Rys. 5.25.** Zmiany wartości rezystancji metalizacji poszycia samolotu MiG-29 dla symulowanego zwiększenia do górnej granicy C, rezystancji lewego steru wysokości na tle równomiernego poziomu pozostałych rezystancji połączeń



**Rys. 5.26.** Zmiany wartości rezystancji metalizacji poszycia samolotu MiG-29 dla symulowanego zwiększenia do górnej granicy D, rezystancji lewego steru wysokości na tle równomiernego poziomu pozostałych rezystancji połączeń

Z matematycznego punktu widzenia poprzez pomiary „skrośne” uzyskuje się dodatkowe równania, których liczba może być wreszcie równa liczbie niewiadomych. Metoda pomiarów skrośnych została z pozytywnym skutkiem wypróbowana przez zespół ITWL na samolotach MiG-29 w czasie badań związanych z przedłużeniem resursu [49, 59, 62, 66]. Po zestawieniu wyników w postaci wykresów (rys. 5.25 i 5.26), można zauważyć, że w rejonie punktów odzwierciedlających poszczególne elementy wykres „wypiętrza się”, a zatem z dużym prawdopodobieństwem można rozkręcać elementy konstrukcji, aby wymienić uszkodzony element ciągu metalizacyjnego, np. uszkodzoną linkę metalizacji bocznikującą sworzeń obrotowy statecznika wysokości.

Skutki oddziaływania pioruna na sieć elektroenergetyczną i sposoby kompleksowej oceny stopnia zabezpieczenia sieci elektroenergetycznej przed oddziaływaniem pioruna

Jak wspomniano wcześniej, struktura poszycia statku powietrznego nie jest jednakowa i energia elektromagnetyczna może różnymi drogami przenikać do przewodów instalacji elektroenergetycznej [57, 62, 131]:

- poprzez wewnętrzne uziemienie pokładowej linii (ekranu przewodu elektrycznego, ekranu wiązki elektrycznej, przewodu minusowego agregatu itp.), stanowiącej część pokładowej instalacji elektrycznej, do dwóch różnych punktów płatowca (np. do dwóch różnych płatów poszycia statku powietrznego). Jeżeli ładunek pioruna zmieni potencjał jednego z nich, to nastąpi, zgodnie z prawami elektrotechniki, nieprzewidziany przez konstruktorów przepływ prądu; jeżeli odcinek ten będzie miał dużą rezystancję, to może

wystąpić wydzielanie znacznej energii – dlatego też należy dbać o to, aby wszelkie ekrany, obudowy, przewody minusowe oraz przewody uziemiające obudowy urządzeń wewnętrznych statku powietrznego były dołączone do płatowca tylko w jednym miejscu i miały możliwie minimalną rezystancję styku;

- poprzez otwory w poszyciu, jak izolatory, szyby, wzierniki, armatury oświetleniowe;
- poprzez spiralne przemieszczanie się prądu pioruna w niektórych fragmentach poszycia, na skutek specyficznych relacji lokalnych wartości rezystancji poszycia.

Ponadto na izolatorach anten i osłon anten radarowych, pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego, magazynuje się ładunek elektrostatyczny, który może wpływać na przyciąganie pioruna. Tym też zjawiskiem można tłumaczyć, dlaczego podczas prób laboratoryjnych uderzenie pioruna omija izolator i uderza w najbliższy element metalowy [57, 62, 131].

Podsumowując – pośrednie skutki oddziaływania uderzenia pioruna, tj. indukowanie się napięć w obwodach instalacji elektroenergetycznej, są trudne do przewidzenia. Dlatego też, zdaniem specjalistów ITWL, należy preferować metody eksperymentalno-pomiarowe, możliwie wiernie odzwierciedlające warunki lotu, a nie pomiarowo-symulacyjne jak w przypadku oceny odporności struktury płatowca. W tym celu należy stosować nieco zmodyfikowaną metodę stosowaną do badania nowo projektowanych statków powietrznych. Polega ona na tym, że pomiędzy potencjalnym punktem „przyczepienia się” pioruna a punktem jego „odczepienia” należy podawać impuls piłokształtny (zredukowana składowa „H” uderzenia pioruna), a następnie gasnący znormalizowany przebieg oscylacyjny (zredukowana składowa „A” uderzenia pioruna).

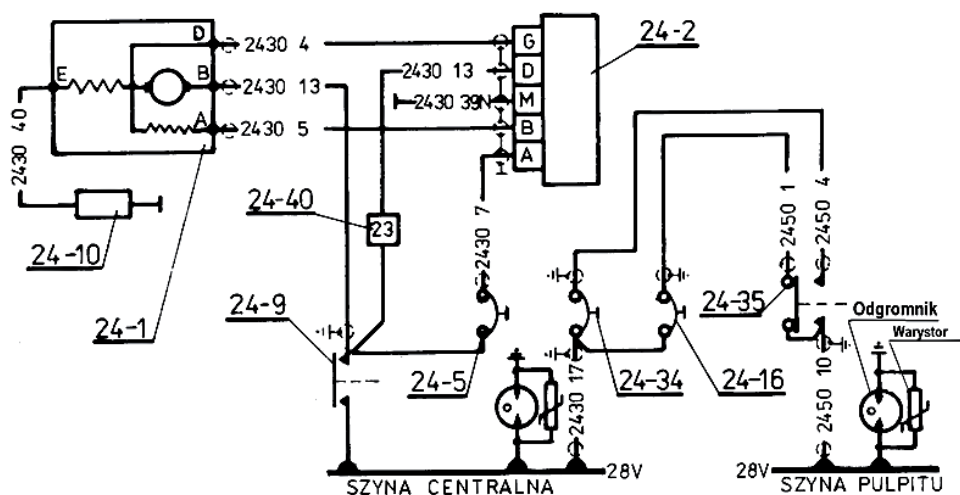
Zgodnie z normą [131], w trakcie każdego takiego udaru mierzy się napięcia i natężenia prądów w obwodach poszczególnych odbiorników:

- napięcia – dla obwodu otwartego, tj. po odłączeniu odbiorników,
- natężenia prądów – dla obwodów zwartych zworami.

W przypadku pomiaru natężenia prądów porównuje się wartości znamionowe systemu zabezpieczeń i przekroje żył zasilających poszczególne odbiorniki. Niedopuszczalne jest, aby wartości znamionowe bezpieczników i czas reakcji były tak duże, zaś pole przekroju poprzecznego przewodu zasilającego tak małe, że żyła przewodząca stopi się szybciej, niż zadziała bezpiecznik.

W czasie badań na nowo projektowanych statkach powietrznych porównuje się uzyskane w poszczególnych rozwartych obwodach wartości maksymalne impulsów napięciowych z wartościami dopuszczalnymi dla danego typu urządzenia.

W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych konstruktorzy przyłączają równolegle do danego odbiornika odpowiednie iskrowniki (stosowane w lotnictwie zazwyczaj redukują impulsy napięciowe do poziomu 300 V), a dla urządzeń szczególnie nieodpornych na impulsy napięciowe również warystory (warystory stosowane w lotnictwie redukują impulsy napięciowe zazwyczaj do poziomu 50 V). Zastosowanie warystorów i odgromników w układzie elektroenergetycznym śmigłowca przedstawia rys. 5.27.



Rys. 5.27. Zastosowanie warystorów i odgromników w układzie elektroenergetycznym śmigłowca W-3WA [163]

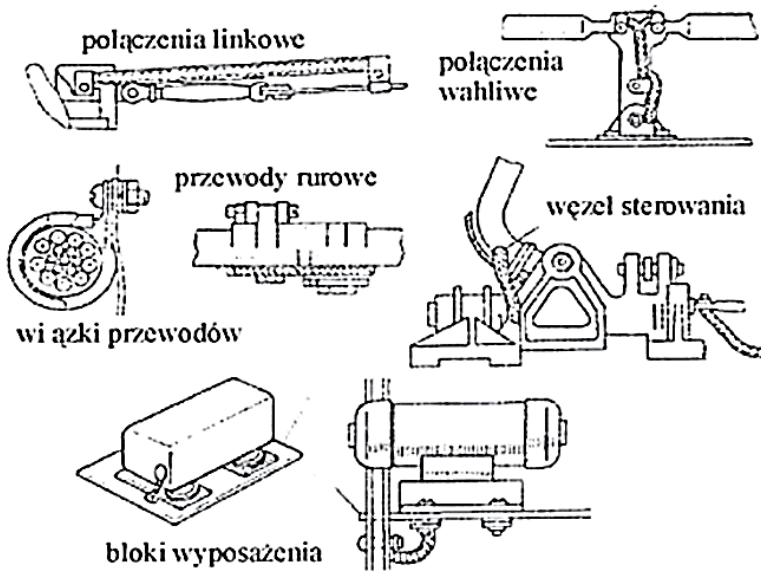
Innym sposobem zabezpieczania przewodów i wiązek jest ich **ekranowanie**. Oczywiście, jak to zaznaczono wcześniej, mogą one być **uziemiene tylko w jednym punkcie** [141]. Punkt tego uziemienia powinien znajdować się możliwie najdalej w kierunku potencjalnej drogi przepływu pioruna. Należy zaznaczyć, że w świetle obowiązujących norm przedmiotowych niedopuszczalne jest stykanie się ze sobą sąsiednich ekranów – na każdym z nich powinna być koszulka izolacyjna.

Czasami stosuje się skręcanie przewodów w wiązce – szczególnie skuteczne, według praktyków-konstruktorów, jest skręcanie par przewodów zasilających dane urządzenie: dla prądu stałego – plusowego i minusowego, zaś dla prądu przemiennego jednofazowego – fazowego z zerowym, dla trójfazowego – skręcenie przewodów fazowych. W ten sposób wzajemnie się znoszą wszelkie zaindukowane impulsy.

W przypadku analiz konstrukcyjnych należy pamiętać, że zgodnie z normami przedmiotowymi trzeba unikać tworzenia pętli prądowych wokół materiałów ferromagnetycznych.

### 5.2.2. Metalizacja metalowej struktury statku powietrznego

W czasie lotu statku powietrznego wskutek tarcia elementów jego struktury o warstwę powietrza na elementach konstrukcyjnych gromadzą się ładunki elektrostatyczne o dużej wartości, w wyniku czego powstaje pole elektryczne o dużym natężeniu. Stałe pole elektryczne Ziemi ma gradient w wysokości ok. 6 V/m, co oznacza, że statek powietrzny lecący na wysokości 5 km ma potencjał względem Ziemi ok. 30 kV. Oprócz tego zjawiska atmosferyczne mogą powodować, że potencjał ten będzie skokowo wzrastał lub malał. W celu przeciwdziałania zagrożeniom wynikającym z różnic potencjałów bardzo ważne jest staranne wykonanie metalizacji. Jest połączenie metaliczne wszystkich metalowych podzespołów i elementów wyposażenia statku powietrznego z płatem za pomocą przewodów miedzianych. Metalizacji podlegają elementy o powierzchni powyżej 0,2 m<sup>2</sup> lub o przekątnej powyżej 0,5 m. Przykładowe podzespoły podlegające metalizacji ze strukturą statku powietrznego przedstawiono na rys. 5.28.



**Rys. 5.28.** Przykładowe podzespoły podlegające metalizacji ze strukturą statku powietrznego [128]

Wykonanie skutecznej metalizacji struktury statku powietrznego jest niezbędne w celu [131, 245]:

- wyrównania potencjałów pomiędzy wszystkimi elementami i wyposażeniem statku powietrznego,

- zapobieżenia powstania na elementach konstrukcyjnych różnic potencjału i iskrzenia pomiędzy tymi elementami, co powoduje zakłócenia radiowe oraz zagrożenie pożarowe w wyniku zapłonu oparów paliwa,
- odprowadzenia poprzez uziemienie ładunku elektrostatycznego ze wszystkich elementów statku powietrznego,
- zapewnienia minimalnej rezystancji lub uziemienia dla przepływu prądu dla instalacji jednożyłowych prądu stałego i przemiennego jednofazowego, dwuprzewodowych dla sieci międzyfazowych, trójprzewodowych dla sieci trójfazowych łączonych w trójkąt oraz czteroprzewodowych dla sieci trójfazowych łączonych w gwiazdę,
- zapewnienia stałej wartości pojemności między antenami a płatowcem, co zapewnia prawidłową pracę urządzeń radiotechnicznych,
- skutecznego ekranowania urządzeń przed zakłóceniami elektrycznymi (ekrany urządzeń i przewodów są metalicznie połączone z płatowcem),
- wykorzystania skorupy (korpusu) statku powietrznego jako przewodu zerowego (dla prądu stałego i „neutralnego” dla prądu przemiennego),
- ograniczenia skutków uderzenia wyładowania atmosferycznego w statek powietrzny.

Połączenia metalizacyjne muszą być wykonane z całą starannością, zarówno ze względów elektrycznych, jak i mechanicznych, tak aby zapewnić w sposób niezawodny połączenia elektryczne przy istniejących narażeniach eksploatacyjnych, np. wartość rezystancji połączenia metalizacyjnego ekranów nie powinna przekraczać  $R_p < 100 \mu\Omega$ .

W celu zapewnienia odpowiedniej rezystancji metalizacji i niezawodności tych połączeń, należy stosować odpowiednie materiały i technologie:

- materiały w węzłach metalizacji muszą być odporne na czynniki klimatyczne, elektrochemiczne [35, 213] i chemiczne,
- powierzchnie stykowe muszą mieć pokrycia ochronne, np.: chrom, nikiel, kadm.

Metalizację elementów struktury statku powietrznego i jego wyposażenia wykonuje się za pomocą:

- części montażowych (nieanodowanych nitów lub śrub, wkrętów, opasek itp.),
- przewodów giętkich (giętkich łączników metalizacji i szyn),
- specjalnych podkładek stykowych, np. kupałowych i itp.

Metalizację za pomocą nitów wykonuje się na szwach nitowych łączących:

- pokrycia z podłużnicami,
- dźwigary, wręgi i żebra z pokryciami i podłużnicami,
- szkielety wręg, pasy dźwigarów i żeber ze ściankami,

- węzły stykowe na pokryciu, wręgach i dźwigarach,
- obramowania wszystkich łuków.

Metalizację za pomocą śrub stosuje się w dużych elementach konstrukcji: skrzydła, centroplat kadłuba i usterzenie. W celu odciążenia połączeń śrubowych od przepływu dużych prądów poprzez śruby łączące, bocznikuje się je łącznikami metalizacji.

Metalizacje za pomocą łączników wykonanych z plecionki miedzianej cynowanej stosowane są w miejscach, gdzie montaż łączników nie powoduje zmniejszenia wytrzymałości konstrukcji. Łączniki metalizacji montowane są na odłuszczonych powierzchniach i zabezpieczone lakierem.

Metalizację przewodów rurowych i zbiorników wykonuje się za pomocą:

- podkładek metalicznych,
- obejm i łączników metalizacji,
- taśm metalizacji,
- połączeń spawanych.

Wewnętrzne elementy szkieletu metalowego elastycznych zbiorników paliwa połączone są między sobą za pomocą łączników metalizacji przez specjalne śruby z korpusem samolotu.

Metalizacja elementów sterowania statku powietrznego wykonana jest za pomocą linek metalizacji oraz poprzez zabudowę metalowych rolek wraz z rolkami tekstolitowymi lub teflonowymi oraz połączenia końcówek linek z korpusem statku powietrznego za pomocą łączników metalizacji.

Stery, lotki, trymery, pokrywy luków, sloty, drzwi i inne ruchome elementy wykorzystujące łożyska łączone są z korpusem za pomocą łączników metalizacji montowanych w pobliżu miejsca podparcia elementów ruchomych.

Wszystkie agregaty elektryczne wyposażenia statku powietrznego, tj.: radiostacje, urządzenia nawigacyjne, tablice przyrządów i pulpity sterujące, bloki automatyki, przetwornice itd. połączone są z korpusem za pomocą łączników metalizacji.

Ekran przewodów, wiązek i kabli połączone są z korpusem za pomocą łączników metalizacji lub metalizowanych opasek. Metalizację ekranów wykonuje się jednostronnie na końcach wiązek i równomiernie na całej długości.

Odbiorniki energii elektrycznej o mocy jednostkowej powyżej 500 W łączone są dodatkowo z korpusem za pomocą łączników metalizacji.

Do elektrycznego połączenia silnika z korpusem statku powietrznego na silniku wskazane są miejsca mocowania łączników metalizacji. Rama silnika połączona jest z korpusem za pomocą łączników metalizacji.

Aby metalizacja właściwie spełniała swoje funkcje, rezystancja połączenia z masą powinna mieć określoną (bardzo niską) wartość:

- przekrój przewodu  $S = 10 \text{ mm}^2$  – rezystancja połączenia  $R_p < 500 \mu\Omega$ ;
- przekrój przewodu  $S = 35 \text{ mm}^2$  – rezystancja połączenia  $R_p < 300 \mu\Omega$ ;
- przekrój przewodu  $S = 95 \text{ mm}^2$  – rezystancja połączenia  $R_p < 100 \mu\Omega$ .

W celu zapewnienia niezawodnego działania metalizacji stosowane są wielokrotne połączenia elementów o dużej powierzchni bądź długich z płatowcem.

Dopuszczalne wartości rezystancji przejścia dla połączeń odbiorników z masą wskazują, jak dokładnie należy wykonywać te połączenia, ich stan ma bardzo duże znaczenie dla bezpieczeństwa lotów, jak i niezawodnego działania urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Normy określają średnicę przewodu i moment dokręcenia śruby do połączenia przewodu z masą. Dla ułatwienia kontroli stanu połączeń są one grupowane w określonych miejscach gdzie podstawa jest odpowiednio pogrubiona, wynika to z zabezpieczenia przed przekroczeniem dopuszczalnej gęstości prądu w miejscu jego przepływu z przewodu na masę statku powietrznego. Końcówki przewodów są łączone do podstawy za pomocą: nitów, wkrętów, śrub, a nawet zgrzewania, aby zapewnić trwałość i pewność połączenia między końcówką przewodu a masą statku powietrznego.

Połączenia metalizacyjne wykonuje się gołym (nieizolowanym) przewodem, zapewniając szczególnie dobry metaliczny styk połączenia elektrycznego z elementami łączonymi (np. blok radiostacji – płatowiec).

Zabezpieczenie odgromowe ma za zadanie ochronę wyposażenia i konstrukcji statku powietrznego przed skutkami wyładowań atmosferycznych.

W przypadku trafienia wyładowania atmosferycznego w skrajne punkty statku powietrznego, np.: nos–ogon, skrzydło–ogon itp., przepływają znaczne prądy wynikające z różnicy potencjałów. W celu zmniejszenia różnicy potencjałów do bezpiecznych wartości, wykonywana jest ogólna metalizacja konstrukcji statku powietrznego, która obejmuje [131]:

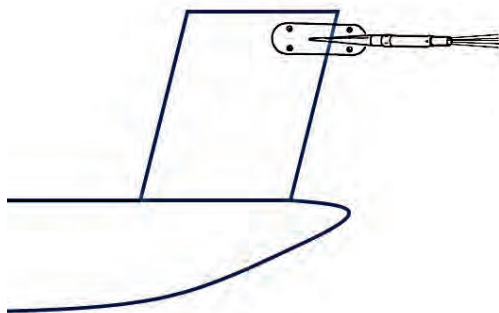
- poszycie płatowca oraz wszystkie nieruchome wystające elementy – oprócz anten,
- wszystkie ruchome elementy: stery, klapy itp.,
- silnik wraz z osłonami, elementy sterowania instalacją paliwową i hydrauliczną,
- wszystkie wewnętrzne elementy konstrukcji.

Zewnętrzne ruchome elementy konstrukcji, skrajne punkty kadłuba, usterzenie skrzydeł są metalizowane przynajmniej dwoma łącznikami.

Na elementach powierzchni statku powietrznego i osłonach anten itp. wykonanych z materiałów dielektrycznych podczas lotu w wyniku tarcia o powietrze powstają ładunki elektrostatyczne o dużym potencjale względem korpusu. W związku z tym statek powietrzny staje się ciałem o potencjale wyższym od otoczenia.



Po osiągnięciu określonych wartości następują wyładowania elektryczne między elementami dielektrycznymi (osłony anten) a korpusem statku powietrznego oraz rozpraszanie pomiędzy skrajnymi punktami statku powietrznego a otoczeniem. Wyładowania te są źródłem zakłóceń urządzeń radiowych, w skrajnych przypadkach może dochodzić do ich uszkodzenia lub zniszczenia. W celu zmniejszenia potencjału dielektryczne elementy konstrukcji statku powietrznego mają półprzewodzące pokrycie, a na krawędziach spływu skrzydeł i sterów zamontowane są rozpraszacze ładunków elektrostatycznych (rys. 5.29). Wykonane są w postaci: ostrzy (drułów stalowych twardych), rezystorów węglowych lub tkanin jedwabnych. Ilość rozładowywaczy zależy od wielkości i prędkości lotu statku powietrznego oraz od rodzaju i jakości sprzętu radiowego.



**Rys. 5.29.** Rozpraszacz ładunków elektrostatycznych (wyładowań atmosferycznych)

Ochronę statku powietrznego przed skutkami uderzenia pioruna pełni metalowa konstrukcja wraz z prawidłowo wykonaną metalizacją wszystkich elementów, stanowiącą elektrycznie przewodzącą klatkę Faradaya, co zabezpiecza przed pojawieniem się dużych różnic potencjału wewnątrz konstrukcji i co za tym idzie dużych przepływów prądów lub/i wyładowań elektrycznych (iskrzeń), które stanowią zagrożenie pożarowe.

Stosowane środki nie zapewniają pełnego odprowadzenia ładunku elektrostatycznego z korpusu statku powietrznego i po wyładowaniu ładunek może mieć znaczną wartość. Stanowi to realne zagrożenie dla załogi i/lub personelu naziemnego. W celu likwidacji tego zagrożenia statek powietrzny musi być wyposażony w skuteczne systemy zapewniające jego uziemienie (rozładowanie doziemne), odprowadzenie do ziemi zgromadzonego ładunku elektrostatycznego.

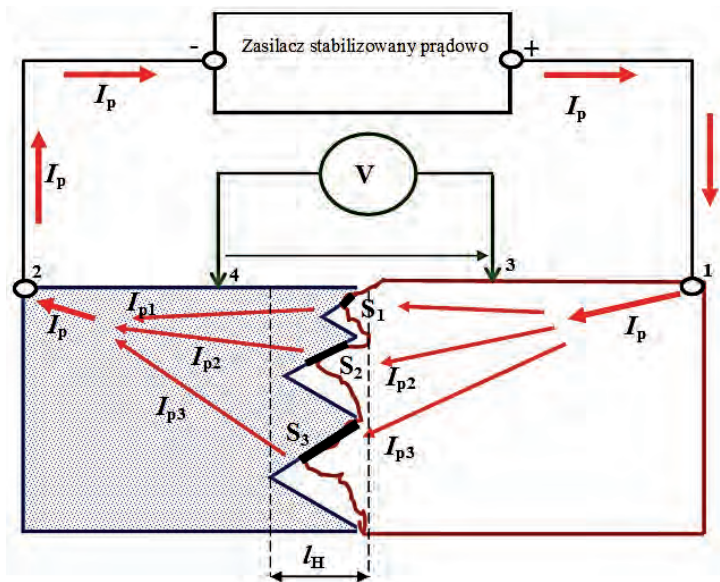
Potencjał elektrostatyczny statku powietrznego może osiągać wartości rzędu kilku kV, zatem ładunek elektryczny przepływa też po powierzchni kół, przewody uziemiające mocowane są do goleni podwozia w postaci linki z końcem, który

styka się z powierzchnią lotniska. Uziemienie przy lądowaniu pierwsze styka się z ziemią, zapewniając wyrównanie potencjałów statku powietrznego i ziemi.

Podczas postoju statki powietrzne muszą być przyłączone do uziemienia o właściwej rezystancji. Uziemienie WSP polega na elektrycznym połączeniu z ziemią. Sposoby i tryb realizacji uziemienia określa producent statku powietrznego w dokumentacji technicznej. Uziom (uziemienie doziemne) podlega okresowej kontroli i weryfikacji pod względem jego prawidłowości działania (okresowe pomiary wykonywane muszą być przez osoby posiadające określone kwalifikacje, w określonych przez prawo okresach, sprawnym sprzętem posiadającym odpowiednie certyfikaty).

Według NO-15-A200:2016 pkt. 2.1.10 [141], metalowe części WSP (zarówno na powierzchni zewnętrznej, jak i wewnątrz WSP), o powierzchni  $S \geq 0,01\text{m}^2$  lub długości  $L \geq 0,25\text{ m}$ , powinny być połączone w celu utworzenia systemu o niskiej i nieziennej rezystancji. Powinny być przewidziane środki pozwalające na uniknięcie przerywanego (o zmiennej rezystancji) połączenia elektrycznego lub styku o zmiennej wartości rezystancji między częściami metalowymi.

Drogę przepływu prądu pobierczego dla dużych powierzchni styków metalizacyjnych statku powietrznego i sposób pomiaru metodą techniczną stosowaną przez autorów przedstawiono na rys. 5.30.



**Rys. 5.30.** Rysunek poglądowy ukazujący drogę przepływu prądu pobierczego dla dużych powierzchni styków metalizacyjnych statku powietrznego

Miejsca połączeń powinny być zabezpieczone przed korozją. Potencjał elektrochemiczny stykających się elementów nie powinien być większy niż 1,5 V [35, 59, 141, 213]. Jeżeli jest niezbędne połączenie elementów konstrukcyjnych, np. elementów płatowca, wykonanych z materiałów o potencjale elektrochemicznym większym niż 1,5 V, to należy stosować przekładki zapewniające utrzymanie wymagania. Jeśli jest to niemożliwe, konstruktor powinien zastosować wszelkie możliwe środki zapewniające odizolowanie takiego połączenia od wpływu wilgoci oraz innych substancji płynnych mających właściwości elektrolitu (opary kwasów, zasad, soli).

Znaczna liczba przypadków powiązanych ze sobą węzłów korozyjnych nasunęła autorom przypuszczenie, że zjawiska korozyjne intensyfikują się w tym węźle montażowym z powodu styku aż czterech rodzajów metali o różnym potencjale elektrochemicznym [35]:

- aluminium ( $E^0 = -1,66$  V): podstawa stykowa zacisku elektrycznego w postaci odkuwki aluminiowej, płytka elektrycznie czynna tabliczki minusowej, nity montażowe,
- żelazo ( $E^0 = -0,45$  V): śruba montażowa i nakrętka,
- miedź ( $E^0 = +1,66$  V) oczko elektrycznego przewodu minusowego,
- cyna ( $E^0 = -0,14$  V) pokrycie.

### 5.2.3. Właściwości elastycznych łączników metalizacji

Według NO-15-A200:2016 pkt. 2.1.10 [141], jeśli jest to możliwe, należy unikać stosowania elastycznych łączników metalizacji – należy stosować połączenia: śrubowe, nitowane itp. Rezystancja takiego połączenia nie powinna być większa niż  $600 \mu\Omega$ . W miejscach ulegających przemieszczaniom mechanicznym dopuszcza się połączenia elastyczne. Zastosowane elastyczne łączniki metalizacji nie powinny być dłuższe niż 152 mm. W uzasadnionych przypadkach za pisemną zgodą użytkownika dopuszcza się stosowanie dłuższych elastycznych łączników metalizacji dla pojedynczych agregatów. Muszą być wówczas spełnione następujące warunki:

- konstrukcja łącznika powinna spełniać wymagania MIL-S-24749(SH) [128];
- zostały przeprowadzone badania na oddziaływanie wyładowań atmosferycznych.

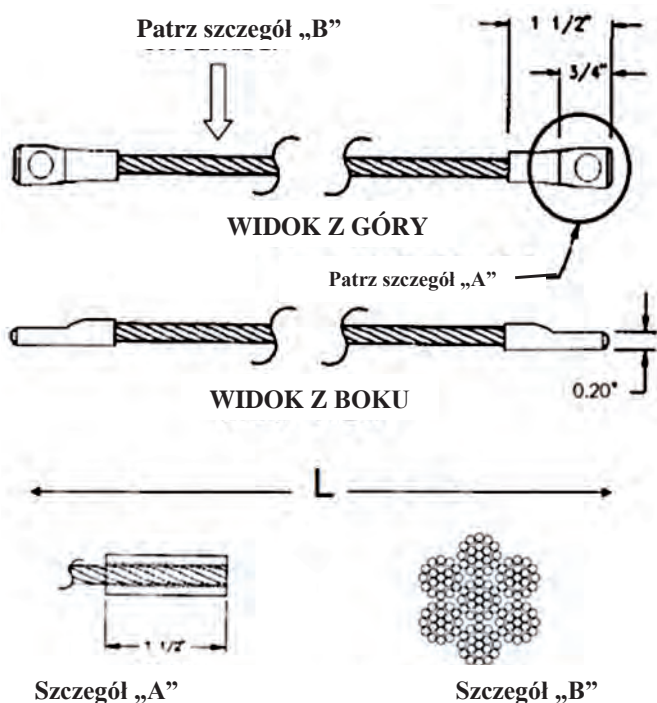
Zabrania się łączenia kilku elastycznych łączników metalizacji w połączenie szeregowo. Rezystancja styku elastycznego łącznika metalizacji z agregatem lub innym elementem nie powinna być większa niż  $2\ 000 \mu\Omega$ . Rezystancja elastycznego łącznika metalizacji nie powinna być większa niż  $1\ m\Omega/25,4$  mm długości. Długość elastycznych łączników metalizacji powinna zapewniać swobodne przemiesz-

czanie się metalizowanego elementu w skrajnych jego położeniach. Do połączenia danego elementu obudowy albo ramy montażowej agregatu do masy WSP powinna być zastosowany tylko jeden elastyczny łącznik metalizacji.

Dopuszczalna zmiana wartości rezystancji pojedynczego połączenia metalizacji w czasie lotu (podczas oddziaływania wibracji, zmian temperatury itp.) nie powinna przekraczać  $\pm 10\%$  wartości rezystancji mierzonej na ziemi w warunkach normalnych. W dokumentacji eksploatacyjnej powinna być określona procedura okresowego sprawdzania wymienionej wyżej rezystancji.

Według NO-15-A200:2016 pkt. 2.1.5 [141] pole przekroju poprzecznego elastycznych łączników metalizacji powinno być nie mniejsze niż:

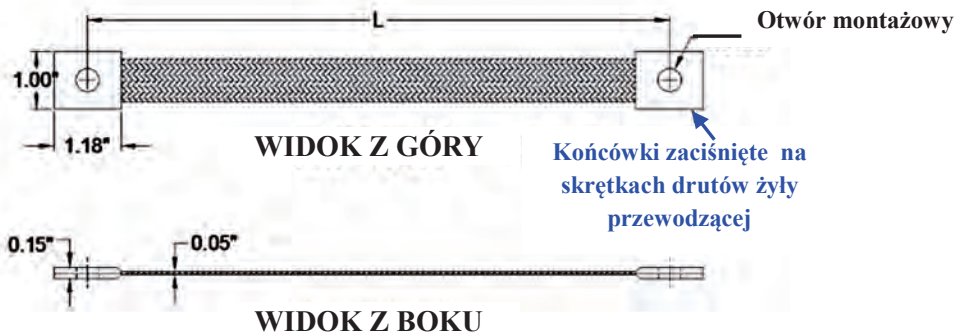
- 6 mm<sup>2</sup> – w przypadku wszelkich elementów zewnętrznych WSP,
- 3 mm<sup>2</sup> – w przypadku pozostałych elementów (pomocnicze elastyczne łączniki metalizacji).



Przekrój poprzeczny skrętek drutów żyły przewodzącej

**Rys. 5.31.** Linka metalizacji (stosowana warunkowo do połączenia metalizacyjnego ruchomych elementów konstrukcji) – wymiary i konstrukcja według normy militarnej USA MIL-S-24749(SH) [128] – przykład nr 1

Łączniki metalizacji o przekroju a powinny mieć nie mniej niż 64 druty (skrętki), zaś b – 32 druty. Łączniki metalizacji powinny być wykonane w postaci elastycznej plecionki lub skrętki drutów wykonanych z miedzi pokrytej galwanicznie warstwą cyny, niklu lub srebra (rys. 5.31 i 5.32).



**Rys. 5.32.** Linka metalizacji (stosowana warunkowo do połączenia metalizacyjnego ruchomych elementów konstrukcji) – wymiary i konstrukcja według normy militarnej USA MIL-S-24749(SH) [128] – przykład nr 2

#### 5.2.4. Uziemienia statku powietrznego

Według NO-15-A200:2016 pkt. 2.2.1.6 [141] każdy WSP powinien mieć co najmniej jedną linkę uziemiającą, łączącą masę elektryczną WSP z potencjałem ziemi z chwilą dotknięcia podwozia WSP do ziemi. Rezystancja poszczególnych połączeń (rozumianych jako pojedyncze połączenia mechaniczne metal–metal, w obwodzie pomiędzy linką uziemiającą a masą główną WSP) linki uziemiającej z podwoziem (pojedynczego styku) WSP nie powinna być większa niż  $600 \mu\Omega$ .

**UWAGA:** Pomiar dotyczy tylko miejsc styków mechanicznych w miejscach ich przylegania, a nie całego obwodu prądowego. Dla bardzo wysokich napięć związanych z ładunkiem elektrostatycznym, a nawet z wyładowaniem pioruna, rezystancja materiału przewodzącego ma nieporównywalnie mniejsze znaczenie niż rezystancja styku.

Rezystancja pomiędzy końcówką linki uziemiającej (miejsce styku linki uziemiającej z ziemią) a masą główną WSP (łącznie z rezystancją elektryczną poszczególnych elementów konstrukcyjnych w tym obwodzie) nie powinna być większa niż  $1 \Omega$ .

Według NO-15-A200:2016 pkt. 2.2.1.7 [141] każdy WSP przeznaczony do działania z lotnisk polowych o nawierzchni nieutwardzonej powinien mieć dodatkową linkę uziemiającą z końcówką przystosowaną do wbicia w ziemię.

Rezystancja poszczególnych połączeń linki uziemiającej z innymi elementami (np. z końcówką przystosowaną do wbicia w ziemię, z masą WSP) nie powinna być większa niż  $600 \mu\Omega$  (pojedynczy styk elektryczny).

**UWAGA:** Powyższy pomiar dotyczy tylko miejsc styków mechanicznych w obwodzie, np. styku linki uziemiającej z konstrukcją WSP, a nie pomiaru rezystancji linki.

Rezystancja pomiędzy końcówką przystosowaną do wbicia w ziemię a masą główną WSP (łącznie z rezystancją elektryczną poszczególnych elementów konstrukcyjnych, np. linki uziemiającej w tym obwodzie) nie powinna być większa niż  $1 \Omega$ . Linka po rozwinięciu nie powinna mieć załamań, zapętleń lub przerw dla żadnej ze skrętek.

Miejsce przechowywania linki powinno być wyraźnie, czytelnie i jednoznacznie oznaczone oraz opisane w instrukcji eksploatacji WSP.

# 6

## ĆWICZENIA

W poprzednich rozdziałach przedstawiono podstawowe wiadomości niezbędne inżynierom awionikom w działalności w obszarze lotniczych urządzeń elektrycznych, w tym:

- 1) podstawy elektrotechniki – prawa elektrotechniki (rozdział 2),
- 2) budowę i wymagania stawiane lotniczym układom elektroenergetycznym – podstawowe pojęcia dotyczące specyfiki LUE (rozdział 3),
- 3) lotnicze źródła energii elektrycznej – ich podział na podstawowe, awaryjne i lotniskowe źródła zasilania (rozdział 4),
- 4) problematykę eksploatacji pokładowej sieci elektroenergetycznej – rodzaje, obwód powrotny oraz metalizacja (rozdział 5).

Już z powyższego podziału wynika, że niniejsza monografia ujmuje tylko najbardziej podstawowe zagadnienia LUE, do których można zaliczyć:

- 1) podstawowe, pierwotne źródła energii elektrycznej w postaci **prądnic prądu stałego i przemiennego, w tym ich napędów**,
- 2) wtórne źródła zasilania w postaci **bloków prostowniczych**,
- 3) awaryjne źródła napięcia – pokładowe **baterie akumulatorowe**,
- 4) **odbiorniki energii elektrycznej**,
- 5) **sieć elektryczną**, która łączy źródła napięcia z odbiornikami.

Zamieszczone w niniejszym rozdziale ćwiczenia stanowią dopełnienie wykładu z rozdziałów 1–5 oraz umożliwiają przyswojenie omówionych zagadnień. Ich zadaniem jest wyrobienie umiejętności świadomego korzystania z wiedzy naukowej pozyskanej z monografii. Proces ten odbywa się w trakcie praktycznego rozwiązywania zagadnień naukowo-technicznych, w znacznym stopniu kształtując umiejętności i kompetencje przydatne w pracy zawodowej zarówno w dziedzinie konstruowania, jak i w zakresie analizy uszkodzeń instalacji i urządzeń LUE. Po krótkim zestawie pytań (podrozdział 6.1) dotyczących sprawdzenia zrozumienia najważniejszych zagadnień ujętych w rozdziałach 1–5, następuje cykl ćwiczeń. Składa

się on z kilku bloków problemowych odpowiadających omawianej problematyce. W każdym z nich znajduje się zbiór ćwiczeń rachunkowych zachęcających dotychczas biernego czytelnika do zaangażowania się w proces obliczeniowy zbliżony do praktyki eksploatacyjnej lub procesu konstruowania układów LUE.

Należy podkreślić, że w rozdziale 6 autorzy nie powielają wiedzy teoretycznej zawartej w rozdziałach 1–5, lecz kształtują treść zadań rachunkowych w oparciu o wybrane zagadnienia problemowe. Każdy z podrozdziałów poprzedzony jest krótkim wprowadzeniem tłumaczącym systematykę i cel rozwiązywania danej grupy zadań dotyczących problematyki obsługiwania, remontowania i naprawiania statków powietrznych w praktyce.

## 6.1. Pytania kontrolne z części opisowej monografii

### 6.1.1. Powtórzenie z elektrotechniki

1. Jaka jest zależność oporności biernej indukcyjnej od częstotliwości i indukcyjności?
2. Jaka jest zależność oporności biernej pojemnościowej (reaktancji pojemnościowej) od częstotliwości?
3. Co to jest rezonans elektryczny i jak się objawia?
4. Proszę narysować schemat elektryczny członu liniowego różniczkującego RC i ewentualnie LR, i zapisać jego transmitancję w postaci operatorowej i w postaci widmowej.
5. Proszę narysować schemat elektryczny członu liniowego inercyjnego pierwszego rzędu RC i ewentualnie LR, i zapisać jego transmitancję w postaci operatorowej i w postaci widmowej.
6. Proszę narysować przebieg odkształcony trójkątny oraz jego składowe sinusoidalne; wskazane przedstawienie amplitudowych prązków Fouriera.
7. Jakie są (przykładowe) wartości napięć na współczesnych statkach powietrznych oraz co to jest wartość skuteczna napięcia prądu przemiennego?
8. Jakie są powiązania pomiędzy tymi parametrami?
9. Jaka będzie odpowiedź na skok jednostkowy dodatni przyłożony na wejście członu różniczkującego rzeczywistego dla różnych stałych czasowych?
10. Jaka jest różnica pomiędzy członem liniowym a członem nieliniowym – proszę podać przykłady.
11. Co to jest siła elektromotoryczna?
12. Co oznaczają w elektrotechnice skróty: DC, AC, P, R, Z,  $\Phi$ ,  $\mu$ ,  $k_a$ ?



13. Co to jest i jak się definiuje (własnymi słowami) pojęcia: amplituda, przesunięcie fazowe?
14. Co to jest indukcyjność i od czego zależy jej wartość?
15. Proszę narysować trójkąt oporności dla indukcyjności i pojemności.
16. Co to jest pojemność i od czego zależy jej wartość?
17. Proszę przedstawić graficznie, na czym polega rezonans elektryczny w układzie szeregowym typu R-L-C.
18. Na czym polega i jak się wyznacza dobroć obwodu rezonansowego szeregowego RLC?
19. Prawo Ohma dla odcinka obwodu.
20. Prawo Ohma dla całego obwodu.
21. Szeregowe łączenie oporników – oporność wypadkowa, spadki napięć, rozptyw prądów.
22. Równoległe łączenie oporników – oporność wypadkowa, spadki napięć, rozptyw prądów.
23. Prawa Kirchhoffa dla obwodu elektrycznego.
24. Co to jest współczynnik wypełnienia impulsu? Proszę podać przykłady rysunkowe.
25. Co to jest stała czasowa? Jak się ją wyznacza i jakie ma znaczenie?
26. Co to jest człon całkujący rzeczywisty? Schemat, właściwości.
27. Proszę narysować odpowiedź członu całkującego na przebieg prostokątny.
28. Proszę narysować odpowiedź członu różniczkującego na przebieg prostokątny podany na jego wejście.
29. Co to jest człon różniczkujący rzeczywisty? Schemat, właściwości.

### 6.1.2. Ogólna charakterystyka lotniczych urządzeń elektrycznych

1. Co to jest moc znamionowa układu zasilania elektrycznego?
2. Co to jest awaryjne źródło energii elektrycznej?
3. Co to jest nienormalne działanie układu zasilania elektrycznego?
4. Co to jest napięcie fazowe? Proszę narysować trójkąt napięć.
5. Co to jest impuls szpilkowy? Czym różni się od impulsu napięciowego?
6. Co to jest całkowita zawartość harmonicznnych?
7. Jak oznacza się w lotnictwie przewody fazowe w sieci trójfazowej prądu przemiennego?
8. Jak oznacza się przewody minusowe w obwodzie prądu stałego?
9. Jaka wartość napięcia fazowego (zakres napięć) powinna być w obwodzie prądu przemiennego sieci 3x115/200 V, 400 Hz?

10. Jakie odchyłki kąta fazowego oraz długości wektorów napięć lotniczych obwodów napięcia trójfazowego są dopuszczalne w obwodzie prądu przemiennego sieci 3x115/200 V, 400 Hz?
11. Na czym polega modulacja napięcia prądu przemiennego i jak się ją wyznacza?
12. Co to jest modulacja częstotliwości? Proszę zinterpretować pojęcie w oparciu o rysunek.
13. W której pozycji element sterujący w kabinie będzie włączony, a w której wyłączony?
14. Gdzie (w którym miejscu względem pilota/ów) powinny być umieszczone elektryczne wyłączniki główne (*master electric switches*)?
15. Proszę narysować (naskicować), jak typowo napędzane są prądnice w zespołach napędowych dwusilnikowych statków powietrznych.
16. Na czym polega stabilizacja prędkości obrotowej prądnicy prądu przemiennego?
17. Czy stosuje się synchronizację współpracy prądnic prądu przemiennego?
18. Co to jest nienormalny stan zasilania systemu elektroenergetycznego?
19. Jakie zasady obowiązują we współpracy pokładowych źródeł zasilania statku powietrznego z naziemnym układem zasilania?

### 6.1.3. Lotnicze baterie elektryczne

1. Z jakich podstawowych elementów składało się ogniwo Volty?
2. Z jakich podstawowych elementów składała się bateria akumulatorowa ołowio-wa wynaleziona przez Gastona Planté?
3. Podział baterii akumulatorowych ze względu na rodzaj elektrolitu.
4. Podział baterii akumulatorowych ze względu na przeznaczenie lotnicze.
5. Wady i zalety kwasowych baterii akumulatorowych.
6. Wady i zalety zasadowych baterii akumulatorowych.
7. Wady i zalety litowo-jonowych baterii akumulatorowych.
8. Co to jest pojemność akumulatora  $Q_5$  i co to jest natężenie prądu ładowania/rozładowania baterii akumulatorowej oznaczane symbolem  $I_5$ ?
9. Jaka jest rola i przeznaczenie baterii akumulatorowych w lotnictwie?
10. Co to jest praca buforowa?
11. Jakie są stosowane środki i zasady higieny pracy związane z obsługą baterii akumulatorowych w stacji ładowania akumulatorów?
12. Jak są skonstruowane złącza wysokoprądowe baterii akumulatorowych?
13. Proszę przedstawić porównanie właściwości baterii: srebro-cynkowych z kadmowo-niklowymi oraz z litowo-jonowymi.

#### 6.1.4. Lotnicze prądnice prądu stałego

1. Wady i zalety komutatorowych prądnic prądu stałego.
2. Konstrukcja komutatorowych prądnic prądu stałego.
3. Reguła prawej dłoni w określaniu kierunku SEM i prądu w przewodzie elektrycznym poruszonym siłą  $F$  w polu magnetycznym stojana prądnicy.
4. Skąd się biorą pulsacje (składowa AC) na wyjściu komutatorowej prądnicy prądu stałego?
5. Jakie warunki muszą być spełnione, aby prądnica bocznikowa została wzbudzona do pracy?
6. Jakie zasady konstrukcyjno-technologiczne powinny być przestrzegane przy wytwarzaniu wirników komutatorowej prądnicy prądu stałego?
7. Co to jest i po co jest tworzony tzw. bandaż na wirniku prądnicy?
8. Co to jest przesunięcie strefy magnetycznie obojętnej prądnicy komutatorowej prądu stałego? Czym jest spowodowane?
9. Co to jest i do czego służy uzwojenie dodatkowe, zwane też komutatorowym, prądnicy prądu stałego?
10. Co to jest i do czego służy uzwojenie kompensacyjne stosowane w komutatorowych prądnicach prądu stałego większej mocy (powyżej 10 kW dla prądnic lotniczych; powyżej 100 kW dla naziemnych).
11. Do czego służy komutator i jak jest montowany?
12. Proszę narysować krzywą magnesowania oraz zmiany przenikalności magnetycznej obwodu magnetycznego prądnicy komutatorowej prądu stałego.
13. Proszę określić natężenie prądu znamionowego prądnic o mocach znamionowych kolejno: 6 kW, 12 kW, 18 kW.
14. Dlaczego należy regenerować pokrycia antykorozyjne nabiegunników stojana i zębów wirnika prądnicy?
15. Co to jest prądnica bocznikowa?
16. Jak są łączone zezwoje w wirniku komutatorowej prądnicy prądu stałego?
17. Czy wraz ze wzrostem wysokości lotu chłodzenie prądnic poprawia się, czy pogarsza?
18. Do jakiego poziomu temperatury (w przybliżeniu) nagrzewają się wirniki lub stojany komutatorowych prądnic prądu stałego o mocy 12 kW?

#### 6.1.5. Lotnicze źródła prądu przemiennego i prostowniki

1. W jaki sposób oraz kto po raz pierwszy doświadczalnie ukazał możliwość indukowania się prądu przemiennego?

2. Dlaczego prądnice prądu przemiennego zaczęły wypierać prądnice prądu stałego?
3. Proszę narysować poglądowo (szkic) powstawanie i przebieg napięć w prądnic trójfazowej.
4. Zalety i wady prądnic prądu stałego w porównaniu do prądnic prądu przemiennego.
5. Jak (z jakich trzech głównych podzespołów) zbudowana jest bezstykowa prądnica prądu przemiennego?
6. Z jakich głównych podzespołów składa się blok transformatorowo-prostowniczy?
7. Jak działa dioda prostownicza?
8. Proszę omówić zasadę działania i właściwości prostownika diodowego: jedno-, dwupółkowego.
9. Jak jest realizowane prostowanie 6-pulsowe?
10. Co to jest transformator i do czego służy?
11. Jakie występują konfiguracje transformatorów trójfazowych?
12. Jak jest realizowane prostowanie 12-pulsowe?
13. Jak jest zbudowany filtr RC dolnoprzepustowy?
14. Proszę narysować przebieg sinusoidalny wyprostowany przez mostek Gretza oraz jak zmienia się ten przebieg, jeżeli na wyjściu tego układu prostowniczego podłączony będzie kondensator.
15. Do czego służy radiator w bloku transformatorowo-prostownicznym?
16. Jak ewaluowały rodzaje źródeł prądu w historii lotnictwa?
17. Proszę przedstawić zalety systemu rozdziału energii elektrycznej 270 V<sub>Dc</sub>.
18. Proszę omówić pracę równoległą prądnicy z akumulatorem.

#### **6.1.6. Podstawowe wymagania na sieć elektroenergetyczną – obwód powrotny – metalizacja**

1. Elektryczna instalacja elektrycznej sieci jedнопrzewodowej.
2. Elektryczna instalacja elektrycznej sieci dwuprzewodowej.
3. Powiązania jakości energii elektrycznej ze stanem struktury metalizacji statku powietrznego.
4. Podstawowe problemy stanu przejściowego.
5. Informacje ogólne uzasadniające konieczność metalizacji kadłuba.
6. Porażenie statków powietrznych piorunem – przyczyny, skutki, przeciwdziałanie.

7. Czy uderzenie pioruna jest groźne dla płatowca statku powietrznego?
8. Co to są waristory i iskrowniki oraz dlaczego są stosowane w instalacji elektrycznej statku powietrznego?

## 6.2. Zadania z podstaw elektrotechniki, matematyki i fizyki

### 6.2.1. Obwody prądu stałego

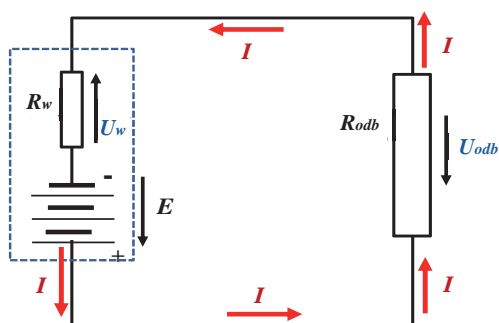
W rozwiązywaniu zadań z obwodów elektrycznych prądu stałego kluczową rolę odgrywa wstępne określenie i ustalenie całego toku rozwiązania, co łączy się z wyborem najwłaściwszej metody. W ten sposób należy postępować, żeby optymalizować czas obliczeń oraz dostosować metodę do potrzeb:

- 1) projektowych, gdzie czas przeznaczony na obliczenia jest dłuższy, a oczekiwana dokładność większa;
- 2) w praktyce eksploatacyjnej, gdzie np. w czasie definiowania przyczyn stanu awarii i procesu naprawczego – nie ma zwykle czasu ani potrzeby rozległego i precyzyjnego przeliczania obwodów. Najczęstszym sposobem w praktyce jest podmienianie kolejnych, intuicyjnie wyznaczanych agregatów danego systemu czy obwodu, co wcale nie jest najlepszym wyjściem pod kątem zapasu bezpieczeństwa lotu. Autorom znane są przypadki, gdzie takie „procedury” dosyć często prowadzą do połowicznego rozwiązania problemu. Znane są również przypadki „pozornego uzdrowienia” systemu energetycznego lub innej instalacji elektrycznej, gdy układ zaczyna działać, ale awaria przenosi się do innego punktu obwodu. Takie zjawisko nazywane jest „wędrującym ogniwem awarii”. Aby tego uniknąć, analiza awarii powinna być poprzedzona pewnymi obliczeniami, które w końcowym etapie powinny oszczędzić wielu błędów.

Aby móc optymalizować dobór metod do potrzeb trzeba poznać wszystkie niezbędne metody obliczeniowe. W niektórych przypadkach zalecono w zadaniach, celem nabycia przez studentów należytej wprawy, przeprowadzenie rozwiązania pewną konkretną metodą lub kilkoma metodami i porównanie wyników. Jednak w większości przypadków pozostawiono studentom swobodę w wyborze metody rozwiązania.

### 6.2.1.1. Prawo Ohma dla odcinka oraz dla całego obwodu prądu stałego

**Zadanie:** Wykorzystując prawo Ohma dla odcinka oraz dla całego obwodu prądu stałego, proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć w obwodzie jak na rys. 6.1 dla parametrów wykazanych w poniższej tabeli (tabela 6.1).



**Rys. 6.1.** Spadki napięć dla szeregowego połączenia oporników

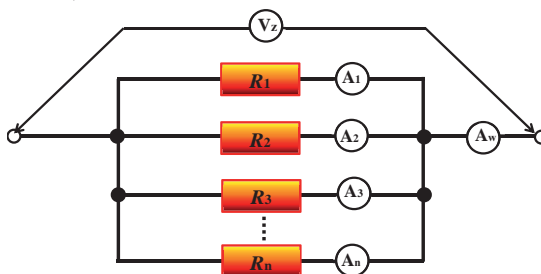
**Tabela 6.1**

#### Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego

Lp.	$E$	$R_w$	$U_w$	$I$	$R_{odb}$	$U_{odb}$
	V	$\Omega$	V	A	$\Omega$	V
1.	18	1,0			1	
2.	20	0,9			2	
3.	22	0,8			3	
4.	24	0,7			4	
5.	27	0,6			5	
6.	18	0,5			6	
7.	20	1,0			7	
8.	22	0,9			8	
9.	24	0,8			9	
10.	27	0,7			10	
11.	18	0,6			11	
12.	20	0,5			12	
13.	22	1,0			13	
14.	24	0,9			14	
15.	27	0,8			15	
16.	12	0,7			16	
17.	16	0,6			17	

## 6.2.1.2. Równoległe łączenie oporników

**Zadanie:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu w obwodzie jak na rys 6.2 dla parametrów wykazanych w poniższej tabeli (tabela 6.2).



Rys. 6.2. Układ elektryczny złożony z równoległe połączonych oporników

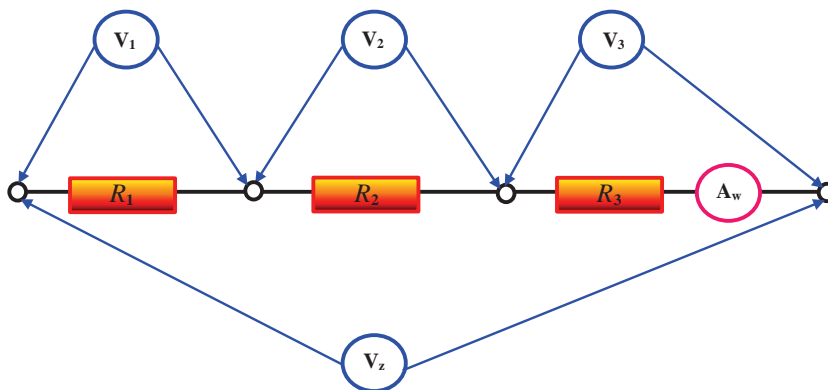
Tabela 6.2

Równoległe połączenie oporników w obwodzie prądu stałego

Lp.	$V_z$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	A	A	A	A
1.	18	1,0	0,6	0,8	0,7				
2.	20	0,9	1,0	0,9	0,8				
3.	22	0,8	0,9	1,0	0,9				
4.	24	0,7	0,8	0,9	1,0				
5.	27	0,6	0,7	0,8	0,9				
6.	18	0,5	0,6	0,7	0,8				
7.	20	1,0	0,5	0,6	0,7				
8.	22	0,9	1,0	0,5	0,6				
9.	24	0,8	0,9	1,0	0,5				
10.	27	0,7	0,8	0,9	1,0				
11.	18	0,6	0,7	0,8	0,9				
12.	20	0,5	0,6	0,7	0,8				
13.	22	1,0	0,5	0,6	0,7				
14.	24	0,9	1,0	0,5	0,6				
15.	27	0,8	0,9	1,0	0,5				
16.	12	0,7	0,8	0,9	1,0				
17.	16	0,6	0,7	0,8	0,9				

### 6.2.1.3. Szeregowe łączenie oporników

**Zadanie:** Proszę obliczyć wartość spadków napięć ( $V_1, V_2, V_3$ ) w obwodzie jak na rys. 6.3. dla parametrów wykazanych w tabeli 6.3.



**Rys. 6.3.** Układ elektryczny złożony z szeregowo połączonych oporników

**Tabela 6.3**

Szeregowe połączenie oporników w obwodzie prądu stałego

Lp.	$V_z$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	V	V	V
1.	18	1,0	0,6	0,8			
2.	20	0,9	1,0	0,9			
3.	22	0,8	0,9	1,0			
4.	24	0,7	0,8	0,9			
5.	27	0,6	0,7	0,8			
6.	18	0,5	0,6	0,7			
7.	20	1,0	0,5	0,6			
8.	22	0,9	1,0	0,5			
9.	24	0,8	0,9	1,0			
10.	27	0,7	0,8	0,9			
11.	18	0,6	0,7	0,8			
12.	20	0,5	0,6	0,7			
13.	22	1,0	0,5	0,6			
14.	24	0,9	1,0	0,5			
15.	27	0,8	0,9	1,0			
16.	12	0,7	0,8	0,9			
17.	16	0,6	0,7	0,8			

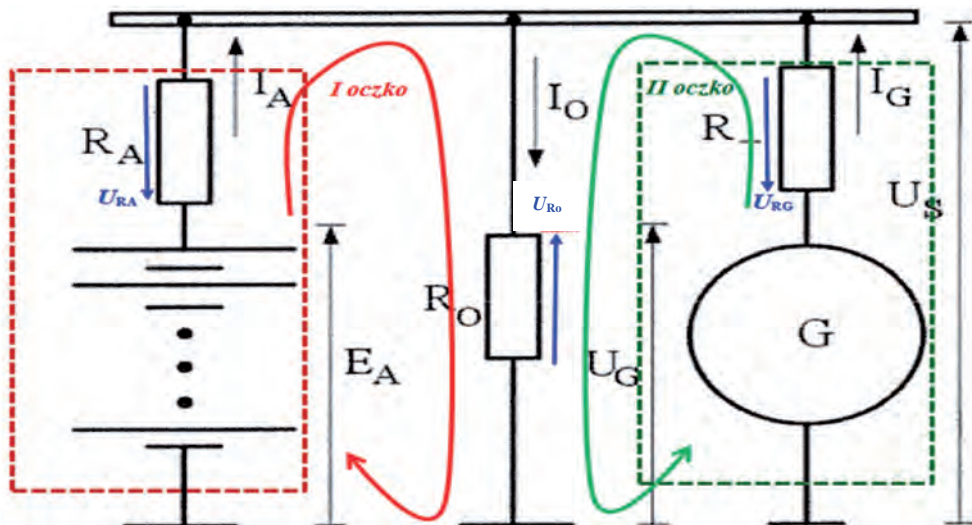


### 6.2.1.4. Prawa Kirchhoffa dla prądu stałego i ich zastosowanie

Obliczanie parametrów obwodu elektrycznego za pomocą praw Kirchhoffa należy do klasyki elektrotechniki. W zasadzie II prawo Kirchhoffa jest rozwiniętym prawem Ohma dla obwodu elektrycznego. Obliczanie parametrów obwodu elektrycznego z wykorzystaniem równań z I i II prawa Kirchhoffa jest metodą pracochłonną i czasochłonną, gdyż wymaga rozwiązywania układu wielu równań (liczba równań musi być równa liczbie niewiadomych), wielu przekształceń i podstawień, przy których łatwo jest o pomyłkę.

Metoda ta w zasadzie jest stosowana w praktyce do mało rozwiniętych schematów elektrycznych. Znacznie szybsze, ale i mniej proste są inne metody, jak np. metoda napięć węzłowych, oczkowa, czy metoda źródła zastępczego. Nie eliminuje to jednak metody Kirchhoffa z programu edukacyjnego.

**Zadanie 1:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć w obwodzie jak na rys. 6.4 dla równoległego połączenia prądnicy prądu stałego i baterii akumulatorowej, pracujących na jeden odbiornik elektryczny, dla jednakowych źródeł SEM, przy jednakowych rezystancjach źródeł, a także proszę obliczyć brakujące wartości zawarte w tabeli 6.4.



Rys. 6.4. Schemat ideowy prądnicy i pokładowej baterii akumulatorowej w połączeniu równoległym

**Tabela 6.4**

**Prawa Kirchhoffa dla prądu stałego. Cz. I – jednakowe rezystancje źródeł: prądnicy i akumulatora**

Lp.	$E_A$	$R_A$	$U_{RAw}$	$U_{RA}$	$I_A$	$R_o$	$U_{Ro}$	$U_G$	$R_G$
	V	$\Omega$	V	V	A	$\Omega$	V	V	$\Omega$
1.	18	1,0				1		18	1,0
2.	20	0,9				2		20	0,9
3.	22	0,8				3		22	0,8
4.	24	0,7				4		24	0,7
5.	27	0,6				5		27	0,6
6.	18	0,5				6		18	0,5
7.	20	1,0				7		20	1,0
8.	22	0,9				8		22	0,9
9.	24	0,8				9		24	0,8
10.	27	0,7				10		27	0,7
11.	18	0,6				11		18	0,6
12.	20	0,5				12		20	0,5
13.	22	1,0				13		22	1,0
14.	24	0,9				14		24	0,9
15.	27	0,8				15		27	0,8
16.	12	0,7				16		12	0,7
17.	16	0,6				17		16	0,6

gdzie:  $U_{RAw}$  – spadek napięcia na rezystancji wewnętrznej baterii akumulatorowej;  $U_{RA}$  – napięcie zewnętrzne baterii akumulatorowej;  $E_A$  – siła elektromotoryczna baterii akumulatorowej.

**Zadanie 2:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć w obwodzie jak na rys. 6.4 dla równoległego połączenia prądnicy prądu stałego i baterii akumulatorowej, pracujących na jeden odbiornik elektryczny, dla „silnej” prądnicy i „słabej” akumulatora, przy jednakowych rezystancjach źródeł, a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabeli 6.5.

**Tabela 6.5**

**Prawa Kirchhoffa dla prądu stałego. Cz. II – dla „silnej” prądnicy i „słabej” akumulatora**

Lp.	$E_A$	$R_A$	$U_{RAw}$	$U_{RA}$	$I_A$	$R_o$	$U_{Ro}$	$U_G$	$R_G$
	V	$\Omega$	V	V	A	$\Omega$	V	V	$\Omega$
1.	20	1,0				1		22	1,0
2.	22	0,9				2		24	0,9
3.	24	0,8				3		26	0,8
4.	26	0,7				4		28	0,7

cd. tab. 6.5

5.	29	0,6				5		31	0,6
6.	20	0,5				6		22	0,5
7.	22	1,0				7		24	1,0
8.	24	0,9				8		26	0,9
9.	26	0,8				9		28	0,8
10.	29	0,7				10		31	0,7
11.	20	0,6				11		22	0,6
12.	22	0,5				12		24	0,5
13.	24	1,0				13		26	1,0
14.	26	0,9				14		28	0,9
15.	29	0,8				15		31	0,8
16.	14	0,7				16		16	0,7
17.	18	0,6				17		20	0,6

**Zadanie 3:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć w obwodzie jak na rys. 6.4 dla równoległego połączenia prądnicy prądu stałego i baterii akumulatorowej, pracujących na jeden odbiornik elektryczny, dla „słabej” prądnicy i „silnego” akumulatora, przy jednakowych rezystancjach źródeł, a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabeli 6.6.

Tabela 6.6

Prawa Kirchhoffa dla prądu stałego. Cz. III – dla „słabej” prądnicy i „silnego” akumulatora

Lp.	$E_A$	$R_A$	$U_{RAw}$	$U_{RA}$	$I_A$	$R_0$	$U_{R_0}$	$U_G$	$R_G$
	V	$\Omega$	V	V	A	$\Omega$	V	V	$\Omega$
1.	20	1,0				1		18	1,0
2.	22	0,9				2		20	0,9
3.	24	0,8				3		22	0,8
4.	26	0,7				4		24	0,7
5.	29	0,6				5		27	0,6
6.	20	0,5				6		18	0,5
7.	22	1,0				7		20	1,0
8.	24	0,9				8		22	0,9
9.	26	0,8				9		24	0,8
10.	29	0,7				10		27	0,7
11.	20	0,6				11		18	0,6
12.	22	0,5				12		20	0,5
13.	24	1,0				13		22	1,0
14.	26	0,9				14		24	0,9
15.	29	0,8				15		27	0,8
16.	14	0,7				16		12	0,7
17.	18	0,6				17		16	0,6

## 6.2.2. Obwody prądu przemiennego

### 6.2.2.1. Krótki wykład o liczbach zespolonych

W podrozdziale 2.3.4.2 został omówiony opis matematyczny obwodów prądu przemiennego bez zastosowania liczb zespolonych. W podrozdziale 2.3.2 przedstawiono opis matematyczny oporności stawianej przez elementy pojemnościowe i indukcyjne z zastosowaniem liczb zespolonych – w układach prądu przemiennego są to najkorzystniejsze formy rozpatrywania elementów obwodu elektrycznego zawierających pojemności i indukcyjności, tj. elementy zawierające składową bierną.

Należy pamiętać, że składowa urojona ma przed wartością literę  $j$ , która oznacza graficzne przesunięcie składowej biernej o  $90^\circ$  względem składowej czynnej, czyli rezystancji czynnej. Zatem zgodnie z (6.1) dla kąta  $-90^\circ$ , przy danej wartości zapisuje się  $-j$ , np. dla składowej biernej kondensatora wartość urojona wynosi:

$$-j \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Natomiast zgodnie z (6.2) dla kąta  $+90^\circ$ , przy danej wartości zapisuje się  $+j$ , np. dla składowej biernej kondensatora wartość urojona wynosi:  $+j2 \cdot \pi \cdot f \cdot C$ . Jednocześnie należy pamiętać, że  $j$  ma wymiar algebraiczno-formalno-liczbowy, stąd ogólnie przyjmuje się:

$$j = \sqrt{-1} \quad (6.1)$$

a więc:

$$j^2 = -1 \quad (6.2)$$

Należy także pamiętać o uwzględnianiu tych zależności podczas wyznaczania części urojonych.

Każda liczba zespolona składa się z części rzeczywistej  $a$  oraz urojonej  $jb$ . Ich interpretacja graficzna jest przedstawiana na płaszczyźnie liczb zespolonych, gdzie na osi pionowej (oznaczanej jako „*Im*” od francuskiego słowa *Imagine*) przedstawiono składową urojoną, a na poziomej składową rzeczywistą (oznaczaną *Re*). Zatem gdy istnieje potrzeba zobrazowania impedancji cewki indukcyjnej rzeczywisty-

stej (złożonej z oporności czynnej  $R_L$  oraz ze składowej biernej  $X_L$ , to można to przedstawić na płaszczyźnie liczb zespolonych w postaci jak na rys. 6.5. Wartość impedancji  $Z_L$  (w tym przypadku: cewki indukcyjnej rzeczywistej) ma dwie składowe graficzne, które są jednocześnie odzwierciedleniem parametrów elektrycznych, tj. oporności czynnej oraz oporności biernej.

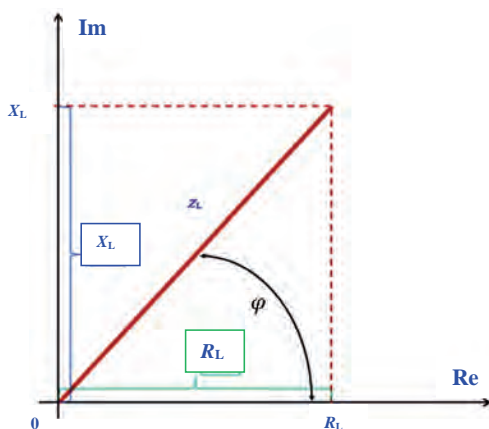
Obowiązują ogólnie znane [103, 213] zależności z geometrii analitycznej oraz twierdzenie Pitagorasa. Stąd dochodzi się do trójkątów oporności (dla cewki indukcyjnej rzeczywistej – rys. 2.13). Po przemnożeniu przez wartość natężenia prądu otrzymuje się spadek napięcia  $U_L$ , który jest już wektorem i może być (w przypadku cewki indukcyjnej rzeczywistej) przedstawiony jak na rys. 6.6. Ma on dwa wektory składowe:

- 1) wektor napięcia składowej rzeczywistej  $U_R$ , czyli w tym przypadku spadek napięcia na oporności rzeczywistej;
- 2) wektor napięcia składowej urojonej  $U_{XL}$ , czyli w tym przypadku spadek napięcia na oporności biernej.

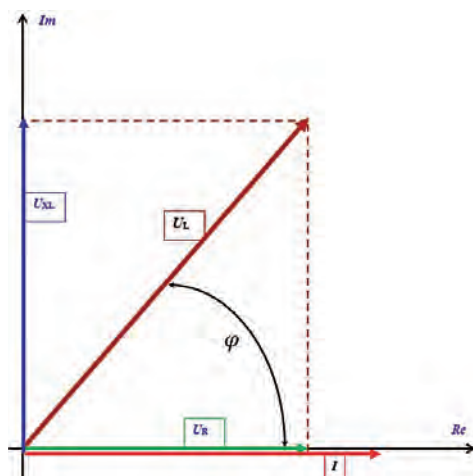
Na rys. 6.6 można jeszcze zauważyć kąt  $\varphi$ , który jest kątem nachylenia pomiędzy osią rzeczywistą a urojoną. Jest to jednocześnie kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorem prądu a napięcia znany już z „klasycznej” elektrotechniki bez zastosowania liczb zespolonych.

W teorii liczb zespolonych upraszczają się procesy sumowania, mnożenia i dzielenia zarówno wartości skalarnych (w rozpatrywanym przypadku: impedancji), jak też wektorowych, czyli wektory napięć chwilowych i wektory prądu chwilowego, co ma miejsce:

- 1) przy dodawaniu i odejmowaniu, gdzie oddzielnie dodaje się lub odejmuje składowe rzeczywiste i oddzielnie składowe urojone. Przykładowo, dla obwodu szeregowego  $R, L$  oraz źródła napięcia, wektor natężenia prądu utożsamia się z wektorem poziomym (rys. 6.6, wektor  $I$ );
- 2) przy dzieleniu wartości zespolonych, gdzie dzieli się wartości modułów wektorów (lub wartości skalarnych), zaś kąty przesunięcia fazowego są odejmowane;
- 3) przy mnożeniu wartości zespolonych, gdzie mnożone są wartości modułów wektorów (lub wartości skalarnych), zaś kąty przesunięcia fazowego są dodawane.



**Rys. 6.5.** Impedancja cewki indukcyjnej (dławika) w układzie współrzędnych prostokątnych liczb zespolonych [37]



**Rys. 6.6.** Spadek napięcia na cewce indukcyjnej (dławiku) w układzie współrzędnych prostokątnych liczb zespolonych [37]

Poniższe dane do zadania są podane w postaci algebraicznej, tzn. składają się z sumy algebraicznej wartości rzeczywistej oraz z wartości urojonej (z literą  $j$  przed wartością). Jednocześnie dla wygody liczącego podczas realizacji procesu dzielenia i mnożenia liczb zespolonych dobrze jest korzystać z postaci wykładniczej, tzn.:

$$\widehat{Z}_L = Z_L \cdot e^{-j\varphi} \quad (6.3)$$

gdzie:  $e$  – jest podstawą logarytmu naturalnego i w warunkach niniejszego zadania jest tylko formą, a nie treścią;  $\varphi$  – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy prądem a napięciem, zwany także argumentem, przy czym znak minus w wykładniku jest zarezerwowany dla cewki indukcyjnej, a znak plus dla kondensatora, – moduł impedancji cewki indukcyjnej rzeczywistej, wyrażony poniższym wzorem:

$$Z_L = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (6.4)$$

Należy zauważyć, że wartość w postaci zespolonej (określoną wzorem 6.3.) zapisuje się z dodatkowym znakiem nad symbolem parametru („daszkiem” lub linią poziomą pod symbolem), zaś symbol modułu parametru (określony wzorem 6.4.) bez takiego znaku.

#### 6.2.2.2. Prawo Ohma dla odcinka obwodu prądu przemiennego – spadek napięcia na pojedynczej impedancji

Prawo Ohma w swej podstawowej, prostej postaci dla odcinka obwodu prądu stałego (oporność równa ilorazowi napięcia i natężenia prądu – wzór (2.7)) z uwagi na trywialność rozwiązań nie była eksponowana w zakresie niniejszej monografii w rozdziałach 1–5. Jeżeli wykorzystuje się matematykę bez zastosowania liczb zespolonych, to rozwiązania są również trywialne (2.12). Jednakże dla obwodu prądu przemiennego sprawa się nieco komplikuje – odbiorniki energii elektrycznej często składają się z kondensatorów, indukcyjności i oporności czynnej, czyli wnoszą przesunięcie fazowe. Ponadto impedancja odbiorników o charakterze indukcyjnym albo pojemnościowym zależy w istotny sposób od częstotliwości źródła zasilającego. Dlatego warto się nad tymi obliczeniami na chwilę zatrzymać. Teoria obliczeń dla tego przypadku została opisana w podrozdziale 2.3.1.

**Zadanie:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć dla cewki (dławika) indukcyjnej rzeczywistej, a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabelach 6.7–6.10, a następnie wykreślić trójkąty oporności (analogiczny jak na rys. 2.13) oraz napięć (analogiczny jak na rys. 2.14) oraz przedstawić ww. parametry na płaszczyźnie liczb zespolonych.

**Tabela 6.7**

**Prawo Ohma dla cewki indukcyjnej rzeczywistej bez użycia liczb zespolonych dla częstotliwości 400 Hz**

Lp.	$E$	$f$	$L$	$X_L$	$U_L$	$R_L$	$U_R$	$\varphi$	$Z_L$	$I$
	V	Hz	mH	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$^\circ$	$\Omega$	A
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	18	400	0,6752			1,70				
2.	20	400	0,7878			1,98				
3.	22	400	0,7596			1,91				
4.	24	400	0,6752			1,70				
5.	27	400	0,5908			1,48				
6.	18	400	0,5064			1,27				
7.	20	400	0,5908			1,48				
8.	22	400	0,6752			1,70				
9.	24	400	0,7596			1,91				
10.	27	400	0,6752			1,70				
11.	18	400	0,5908			1,48				
12.	20	400	0,5064			1,27				
13.	22	400	0,5908			1,48				
14.	24	400	0,6752			1,70				
15.	27	400	0,7596			1,91				
16.	12	400	0,6752			1,70				
17.	16	400	0,5908			1,48				

**Tabela 6.8**

**Prawo Ohma dla cewki indukcyjnej rzeczywistej bez użycia liczb zespolonych dla częstotliwości 800 Hz**

Lp.	$E$	$f$	$L$	$X_L$	$U_L$	$R_L$	$U_R$	$\varphi$	$Z_L$	$I$
	V	Hz	mH	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$^\circ$	$\Omega$	A
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	18	800	0,3376			9				
2.	20	800	0,3939			10				
3.	22	800	0,3798			11				
4.	24	800	0,3376			12				
5.	27	800	0,2954			13,5				
6.	18	800	0,2532			9				
7.	20	800	0,2954			10				
8.	22	800	0,3376			11				
9.	24	800	0,3798			12				
10.	27	800	0,3376			13,5				
11.	18	800	0,2954			9				



12.	20	800	0,2532			10				
13.	22	800	0,2954			11				
14.	24	800	0,3376			12				
15.	27	800	0,3798			13,5				
16.	12	800	0,3376			6				
17.	16	800	0,2954			8				

Tabela 6.9

Prawo Ohma dla cewki indukcyjnej rzeczywistej bez użycia liczb zespolonych dla częstotliwości 1600 Hz

Lp.	$E$	$f$	$L$	$X_L$	$U_L$	$R_L$	$U_R$	$\varphi$	$Z_L$	$I$
	V	Hz	mH	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$^\circ$	$\Omega$	A
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	18	1600	0,1688			1,70				
2.	20	1600	0,1969			1,98				
3.	22	1600	0,1899			1,91				
4.	24	1600	0,1688			1,70				
5.	27	1600	0,1477			1,48				
6.	18	1600	0,1266			1,27				
7.	20	1600	0,1477			1,48				
8.	22	1600	0,1688			1,70				
9.	24	1600	0,1899			1,91				
10.	27	1600	0,1688			1,70				
11.	18	1600	0,1477			1,48				
12.	20	1600	0,1266			1,27				
13.	22	1600	0,1477			1,48				
14.	24	1600	0,1688			1,70				
15.	27	1600	0,1899			1,91				
16.	12	1600	0,1688			1,70				
17.	16	1600	0,1477			1,48				

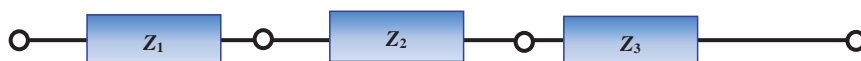
**Tabela 6.10**

**Prawo Ohma dla cewki indukcyjnej rzeczywistej bez użycia liczb zespolonych dla częstotliwości 4400 Hz**

Lp.	$E$	$f$	$L$	$X_L$	$U_L$	$R_L$	$U_R$	$\varphi$	$Z_L$	$I$
	V	Hz	mH	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	°	$\Omega$	A
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	18	4400	0,0614			1,70				
2.	20	4400	0,0716			1,98				
3.	22	4400	0,0691			1,91				
4.	24	4400	0,0614			1,70				
5.	27	4400	0,0537			1,48				
6.	18	4400	0,0460			1,27				
7.	20	4400	0,0537			1,48				
8.	22	4400	0,0614			1,70				
9.	24	4400	0,0691			1,91				
10.	27	4400	0,0614			1,70				
11.	18	4400	0,0537			1,48				
12.	20	4400	0,0460			1,27				
13.	22	4400	0,0537			1,48				
14.	24	4400	0,0614			1,70				
15.	27	4400	0,0691			1,91				
16.	12	4400	0,0614			1,70				
17.	16	4400	0,0537			1,48				

**6.2.2.3. Prawo Ohma dla odcinka obwodu prądu przemiennego – spadek napięcia na obwodzie szeregowym impedancji**

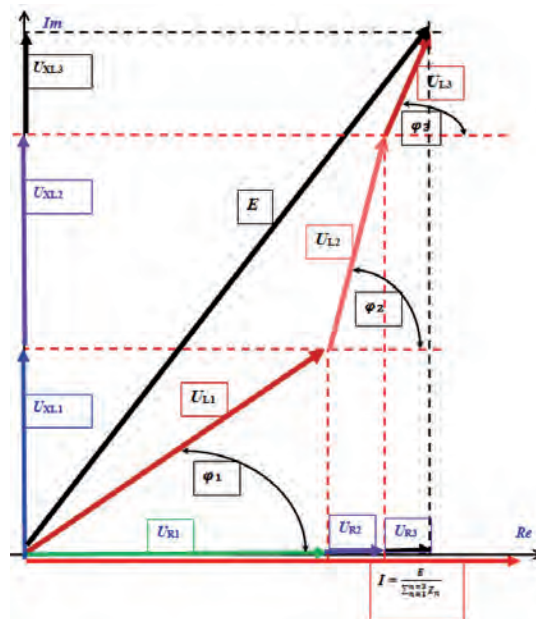
Obwód szeregowy złożony z kilku (np. trzech – rys. 6.7) modułów impedancji rozpatruje się analogicznie jak dla prądu stałego w sensie operowania na modułach impedancji, jeżeli ich wartości są liczbowo podane. Korzysta się wówczas ze wzorów (2.34)–(2.38).



**Rys. 6.7.** Szeregowe połączenie modułów impedancji

Podobnie jednak jak w poprzednim podrozdziale sprawa się nieco komplikuje, gdy są podane tylko wartości indukcyjności albo pojemności – wnoszą przesunięcie fazowe. Ponadto, jak już wspomniano, impedancja odbiorników zawierających indukcyjność albo pojemność zależy w istotny sposób od częstotliwości źródła zasilającego, zaś przy rozbudowanych obwodach szeregowych wygodnie jest korzystać z liczb zespolonych.

Dla obwodów szeregowych zalecane jest korzystanie z postaci algebraicznej tych liczb. Należy dodawać algebraicznie osobno części rzeczywiste i osobno części urojone. Równocześnie zaleca się, żeby dla obwodu szeregowego policzyć najpierw moduł impedancji wypadkowej, a następnie natężenie prądu  $I$  i dopiero po tym spadki napięcia, w tym składowe napięcia (rys. 6.8). Przy mnożeniu i dzieleniu wygodniejsza jest natomiast forma wykładnicza zapisu – moduły wartości odpowiednio dzieli się lub mnoży, a przesunięcie fazowe (argument funkcji) dodaje się (przy mnożeniu) lub odejmuje (przy dzieleniu).



**Rys. 6.8.** Trójkąty napięć dla szeregowego połączenia trzech cewek indukcyjnych rzeczywistych

**Zadanie 1:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć dla trzech szeregowo połączonych cewek (dławików) indukcyjnych rzeczywistych, a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabeli 6.11.

**Tabela 6.11**

**Szeregowe połączenie trzech cewek indukcyjnych rzeczywistych bez użycia liczb zespolonych**

Lp.	$U_z$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$I$
	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	V	V	V	A
1.	18	1	0,6	0,8				
2.	20	0,9	1	0,9				
3.	22	0,8	0,9	1				
4.	24	0,7	0,8	0,9				
5.	27	0,6	0,7	0,8				
6.	18	0,5	0,6	0,7				
7.	20	1	0,5	0,6				
8.	22	0,9	1	0,5				
9.	24	0,8	0,9	1				
10.	27	0,7	0,8	0,9				
11.	18	0,6	0,7	0,8				
12.	20	0,5	0,6	0,7				
13.	22	1	0,5	0,6				
14.	24	0,9	1	0,5				
15.	27	0,8	0,9	1				
16.	12	0,7	0,8	0,9				
17.	16	0,6	0,7	0,8				

**Zadanie 2:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć dla trzech szeregowo połączonych cewek (dławików) indukcyjnych rzeczywistych – proszę obliczyć brakujące wartości przedstawione w tabelach 6.12–6.17, a następnie wykreślić trójkąty oporności (analogiczny jak na rys. 2.13) oraz napięć (analogiczny jak na rys. 2.14) na płaszczyźnie liczb zespolonych.

**Tabela 6.12**

**Szeregowe połączenie trzech jednakowych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 1)**

Lp.	$E$	$f$	$L_1$	$X_{L1}$	$U_{L1}$	$R_{L1}$	$U_{R1}$	$\varphi_1$	$Z_{L1}$			$U_{L1}$		
	V	Hz	mH	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	°	$a_1$	$jb_1$	Moduł	$a_1$	$jb_1$	Moduł
				$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$		$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	V	V	V
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1.	18	400	0,2251			0,5657								
2.	20	400	0,2626			0,6600								
3.	22	400	0,2532			0,6364								
4.	24	400	0,2251			0,5657								
5.	27	400	0,1969			0,4950								
6.	18	400	0,1688			0,4243								

7.	20	400	0,1969			0,4950											
8.	22	400	0,2251			0,5657											
9.	24	400	0,2532			0,6364											
10.	27	400	0,2251			0,5657											
11.	18	400	0,1969			0,4950											
12.	20	400	0,1688			0,4243											
13.	22	400	0,1969			0,4950											
14.	24	400	0,2251			0,5657											
15.	27	400	0,2532			0,6364											
16.	12	400	0,2251			0,5657											
17.	16	400	0,1969			0,4950											

Tabela 6.13

Szeregowe połączenie trzech jednakowych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 2)

Lp.	$E$	$f$	$L_2$	$X_{L2}$	$U_{L2}$	$R_{L2}$	$U_{R2}$	$\varphi_2$	$Z_{L2}$			$U_{L2}$		
	V	Hz	mH	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	°	$a_2$	$jb_2$	Modul	$a_1$	$jb_1$	Modul
									$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	V	V	V
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1.	18	400	0,2251			0,5657								
2.	20	400	0,2626			0,6600								
3.	22	400	0,2532			0,6364								
4.	24	400	0,2251			0,5657								
5.	27	400	0,1969			0,4950								
6.	18	400	0,1688			0,4243								
7.	20	400	0,1969			0,4950								
8.	22	400	0,2251			0,5657								
9.	24	400	0,2532			0,6364								
10.	27	400	0,2251			0,5657								
11.	18	400	0,1969			0,4950								
12.	20	400	0,1688			0,4243								
13.	22	400	0,1969			0,4950								
14.	24	400	0,2251			0,5657								
15.	27	400	0,2532			0,6364								
16.	12	400	0,2251			0,5657								
17.	16	400	0,1969			0,4950								

**Tabela 6.14**

Szeregowe połączenie trzech jednakowych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 3)

Lp.	E	f	L <sub>3</sub>	X <sub>L3</sub>	U <sub>L3</sub>	R <sub>L3</sub>	U <sub>R3</sub>	φ <sub>3</sub>	Z <sub>L3</sub>			U <sub>L3</sub>			I
									a <sub>3</sub>	jb <sub>3</sub>	Modul	a <sub>1</sub>	jb <sub>1</sub>	Modul	A
									Ω	Ω	Ω	V	V	V	A
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1.	18	400	0,2251			0,5657									
2.	20	400	0,2626			0,6600									
3.	22	400	0,2532			0,6364									
4.	24	400	0,2251			0,5657									
5.	27	400	0,1969			0,4950									
6.	18	400	0,1688			0,4243									
7.	20	400	0,1969			0,4950									
8.	22	400	0,2251			0,5657									
9.	24	400	0,2532			0,6364									
10.	27	400	0,2251			0,5657									
11.	18	400	0,1969			0,4950									
12.	20	400	0,1688			0,4243									
13.	22	400	0,1969			0,4950									
14.	24	400	0,2251			0,5657									
15.	27	400	0,2532			0,6364									
16.	12	400	0,2251			0,5657									
17.	16	400	0,1969			0,4950									

**Tabela 6.15**

Szeregowe połączenie trzech różnych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 1)

Lp.	E	f	L <sub>1</sub>	X <sub>L1</sub>	U <sub>L1</sub>	R <sub>L1</sub>	U <sub>R1</sub>	φ	Z <sub>L1</sub>			U <sub>L1</sub>			
									a <sub>1</sub>	jb <sub>1</sub>	Modul	a <sub>1</sub>	jb <sub>1</sub>	Modul	
									Ω	Ω	Ω	V	V	V	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1.	18	400	0,2813			0,4243									
2.	20	400	0,2532			0,7071									
3.	22	400	0,2251			0,6364									
4.	24	400	0,1969			0,5657									
5.	27	400	0,1688			0,4950									
6.	18	400	0,1407			0,4243									
7.	20	400	0,2813			0,3536									
8.	22	400	0,2532			0,7071									
9.	24	400	0,2251			0,6364									
10.	27	400	0,1969			0,5657									

Lp.	$E$	$f$	$L_1$	$X_{L1}$	$U_{L1}$	$R_{L1}$	$U_{R1}$	$\varphi$	$Z_{L1}$			$U_{L1}$		
	V	Hz	mH	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$^\circ$	$a_1$	$jb_1$	Modul	$a_1$	$jb_1$	Modul
									$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	V	V	V
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
11.	18	400	0,1688			0,4950								
12.	20	400	0,1407			0,4243								
13.	22	400	0,2813			0,3536								
14.	24	400	0,2532			0,7071								
15.	27	400	0,2251			0,6364								
16.	12	400	0,1969			0,5657								
17.	16	400	0,1688			0,4950								

Tabela 6.16

Szeregowe połączenie trzech różnych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 2)

Lp.	$E$	$f$	$L_2$	$X_{L2}$	$U_{L2}$	$R_{L2}$	$U_{R2}$	$\varphi_2$	$Z_{L1}$			$U_{L2}$		
	V	Hz	mH	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$^\circ$	$a_2$	$jb_2$	Modul	$a_1$	$jb_1$	Modul
										$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	V	V
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1.	18	400	0,1688			0,4243								
2.	20	400	0,2813			0,7071								
3.	22	400	0,2532			0,6364								
4.	24	400	0,2251			0,5657								
5.	27	400	0,1969			0,4950								
6.	18	400	0,1688			0,4243								
7.	20	400	0,1407			0,3536								
8.	22	400	0,2813			0,7071								
9.	24	400	0,2532			0,6364								
10.	27	400	0,2251			0,5657								
11.	18	400	0,1969			0,4950								
12.	20	400	0,1688			0,4243								
13.	22	400	0,1407			0,3536								
14.	24	400	0,2813			0,7071								
15.	27	400	0,2532			0,6364								
16.	12	400	0,2251			0,5657								
17.	16	400	0,1969			0,4950								

**Tabela 6.17**

**Szeregowe połączenie trzech różnych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 3)**

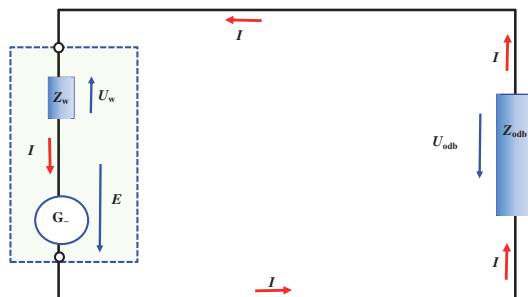
Lp.	$E$	$f$	$L_3$	$X_{L3}$	$U_{L3}$	$R_{L3}$	$U_{R3}$	$\varphi_3$	$Z_{L1}$			$U_{L3}$			$I$
	V	Hz	mH	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$^\circ$	$a_3$	$jb_3$	Moduł	$a_1$	$jb_1$	Moduł	A
									$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	V	V	V	A
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1.	18	400	0,2251			0,5657									
2.	20	400	0,2532			0,6364									
3.	22	400	0,2813			0,7071									
4.	24	400	0,2532			0,6364									
5.	27	400	0,2251			0,5657									
6.	18	400	0,1969			0,4950									
7.	20	400	0,1688			0,4243									
8.	22	400	0,1407			0,3536									
9.	24	400	0,2813			0,7071									
10.	27	400	0,2532			0,6364									
11.	18	400	0,2251			0,5657									
12.	20	400	0,1969			0,4950									
13.	22	400	0,1688			0,4243									
14.	24	400	0,1407			0,3536									
15.	27	400	0,2813			0,7071									
16.	12	400	0,2532			0,6364									
17.	16	400	0,2251			0,5657									

**6.2.2.4. Prawo Ohma dla całego obwodu prądu przemiennego bez użycia liczb zespolonych**

Prawo Ohma dla całego obwodu prądu przemiennego ma podobne zastosowanie jak dla prądu stałego:

1. Podobne są relacje pomiędzy rezystancją wewnętrzną źródła a rezystancją obciążenia – przy wzroście impedancji obciążenia w stosunku do rezystancji wewnętrznej źródła rośnie „wydajność zewnętrzna” źródła, czyli większa część siły elektromotorycznej źródła odkłada się na impedancji wewnętrznej.
2. Powyższe proporcje utrzymują się wraz ze zwiększaniem siły elektromotorycznej źródła oczywiście na proporcjonalnie wyższym poziomie napięciowym.





Rys. 6.9. Schemat ideowy prądnicy prądu przemiennego i impedancji

**Zadanie:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć w obwodzie jak na rys. 6.9, a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabeli 6.18.

Tabela 6.18

Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego bez użycia liczb zespolonych

Lp.	$E$	$Z_w$	$U_w$	$I$	$Z_{odb}$	$U_{odb}$
	V	$\Omega$	V	A	$\Omega$	V
1.	18	1,0			1	
2.	20	0,9			2	
3.	22	0,8			3	
4.	24	0,7			4	
5.	27	0,6			5	
6.	18	0,5			6	
7.	20	1,0			7	
8.	22	0,9			8	
9.	24	0,8			9	
10.	27	0,7			10	
11.	18	0,6			11	
12.	20	0,5			12	
13.	22	1,0			13	
14.	24	0,9			14	
15.	27	0,8			15	
16.	12	0,7			16	
17.	16	0,6			17	

6.2.2.5. Prawo Ohma dla całego obwodu prądu stałego z zastosowaniem liczb zespolonych

**Zadanie:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć w obwodzie jak na rys. 6.9, korzystając z rachunku liczb zespolonych, a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabelach 6.19 oraz 6.20.

**Tabela 6.19**  
**Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego z zastosowaniem liczb zespolonych przy impedancji wewnętrznej i zewnętrznej o charakterze indukcyjnym o module impedancji wewnętrznej źródła równej impedancji obciążenia**

Lp	E		Z <sub>w</sub>				U <sub>w</sub>			I	Z <sub>odb</sub>				U <sub>odb</sub>			
	V	Ω	a	jb	Mo- dul	φ	a	jb	Mo- dul	φ	a	jb	Mo- dul	φ	a	jb	Mo- dul	φ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1.	18	0,5	0,5								0,5	0,5						
2.	20	0,45	0,45								1	1						
3.	22	0,4	0,4								1,5	1,5						
4.	24	0,35	0,35								2	2						
5.	27	0,3	0,3								2,5	2,5						
6.	18	0,25	0,25								3	3						
7.	20	0,5	0,5								3,5	3,5						
8.	22	0,45	0,45								4	4						
9.	24	0,4	0,4								4,5	4,5						
10.	27	0,35	0,35								5	5						
11.	18	0,3	0,3								5,5	5,5						
12.	20	0,25	0,25								6	6						
13.	22	0,5	0,5								6,5	6,5						
14.	24	0,45	0,45								7	7						



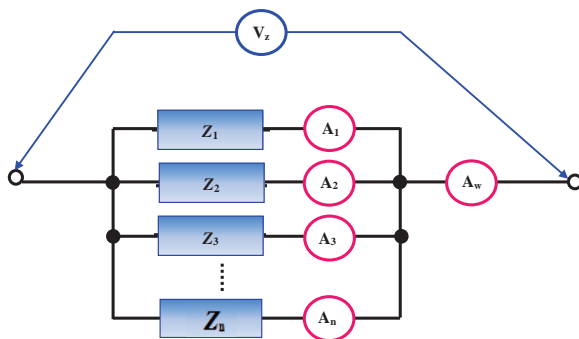
**Tabela 6.20**  
**Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego z zastosowaniem liczb zespolonych przy impedancji wewnętrznej i zewnętrznej o charakterze indukcyjnym o module impedancji wewnętrznej  $Z_w$  mniejszej niż moduł impedancji obciążenia  $Z_{odb}$**

Lp	E		$Z_w$				$U_w$				I	$Z_{odb}$				$U_{odb}$			
	V	°	a	jb	Mo- dul	$\varphi$	a	jb	Mo- dul	$\varphi$		a	jb	Mo- dul	$\varphi$	a	jb	Mo- dul	$\varphi$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1.	18	0,5	0,5								1,41	1,41							
2.	20	0,45	0,45								1,27	1,27							
3.	22	0,4	0,4								1,13	1,13							
4.	24	0,35	0,35								0,99	0,99							
5.	27	0,3	0,3								0,85	0,85							
6.	18	0,25	0,25								0,71	0,71							
7.	20	0,5	0,5								1,41	1,41							
8.	22	0,45	0,45								1,27	1,27							
9.	24	0,4	0,4								1,13	1,13							
10.	27	0,35	0,35								0,99	0,99							
11.	18	0,3	0,3								0,85	0,85							
12.	20	0,25	0,25								0,71	0,71							
13.	22	0,5	0,5								1,41	1,41							
14.	24	0,45	0,45								1,27	1,27							



### 6.2.2.6. Równoległe łączenie modułów impedancji

**Zadanie:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu w obwodzie jak na rys. 6.10, a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabeli 6.21.



Rys. 6.10. Schemat ideowy równoległego połączenia modułów impedancji

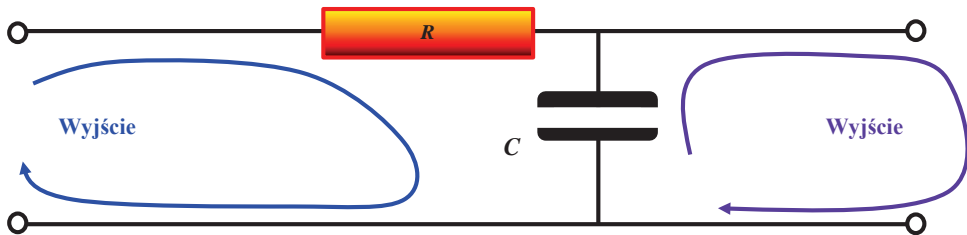
Tabela 6.21

Równoległe połączenie modułów impedancji w obwodzie prądu przemiennego

Lp.	$V_z$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	A	A	A	A
1.	18	1,0	0,6	0,8	0,7				
2.	20	0,9	1,0	0,9	0,8				
3.	22	0,8	0,9	1,0	0,9				
4.	24	0,7	0,8	0,9	1,0				
5.	27	0,6	0,7	0,8	0,9				
6.	18	0,5	0,6	0,7	0,8				
7.	20	1,0	0,5	0,6	0,7				
8.	22	0,9	1,0	0,5	0,6				
9.	24	0,8	0,9	1,0	0,5				
10.	27	0,7	0,8	0,9	1,0				
11.	18	0,6	0,7	0,8	0,9				
12.	20	0,5	0,6	0,7	0,8				
13.	22	1,0	0,5	0,6	0,7				
14.	24	0,9	1,0	0,5	0,6				
15.	27	0,8	0,9	1,0	0,5				
16.	12	0,7	0,8	0,9	1,0				
17.	16	0,6	0,7	0,8	0,9				

### 6.2.3. Obwody RLC

#### 6.2.1.1. Filtr pasywny RC – charakterystyki częstotliwościowe



**Rys. 6.11.** Przykładowy filtr pasywny RC, zwany w technice impulsowej członem całkującym rzeczywistym, gdzie:  $R$  – rezystancja kabla, np.  $20\text{ m}\Omega$  + rezystancja bezpieczników + rezystancja połączeń, np.  $0,6\text{ m}\Omega$  oraz rezystancja styków stycznika, np.  $0,25\text{ m}\Omega$  + rezystancja poszycia w obwodzie powrotnym;  $C$  – pojemność kondensatora, np.  $4\text{ }\mu\text{F}$

Transmitancję (tj. wzmocnienie/tłumienie w postaci widmowej, tj. w funkcji częstotliwości napięcia wejściowego) filtra RC przedstawionego na rys. 6.11, można przedstawić w postaci:

$$G(\omega) = \frac{u_{wy}}{u_{we}} \quad (6.5)$$

Transmitancję tę można przedstawić w postaci ilorazu impedancji wyjściowej do wejściowej:

$$G(j\omega) = \frac{X_C}{R + jX_C} \quad (6.6)$$

czyli:

$$G(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (6.7)$$

Moduł (tj. wartość wzmocnienia/tłumienia) można wyznaczyć z trójkąta Pitagorasa:

$$|G(\omega)| = \frac{\frac{1}{\omega C}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}} \quad (6.8)$$

a więc po wymnożeniu licznika i mianownika równania przez  $\omega C$ , można otrzymać:

$$|G(\omega)| = \frac{1}{\omega CR + 1} \quad (6.9)$$

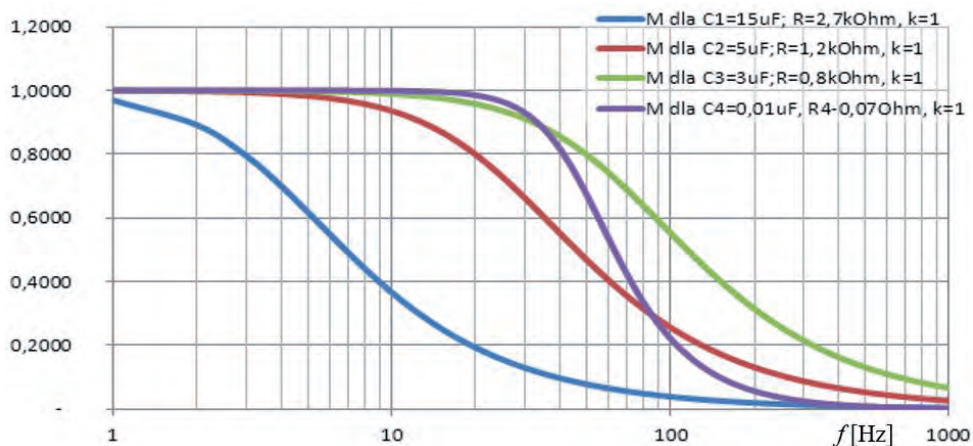
gdzie: iloczyn RC jest wartością stałej czasowej, czyli:

$$|G(\omega)| = \frac{1}{\tau\omega + 1} \quad (6.10)$$

Wiedząc, że wartość pulsacji wyraża się wzorem:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (6.11)$$

można wyznaczyć charakterystyki modułów transmitancji, czyli charakterystyki wzmocnienia lub tłumienia w funkcji częstotliwości napięcia wejściowego filtra RC (rys. 6.12).



**Rys. 6.12.** Wartość modułu transmitancji modelu elektronicznego układu inercyjnego pierwszego rzędu w funkcji częstotliwości, gdzie oś wartości impedancji jest liniowa, zaś oś częstotliwości logarytmiczna

**Zadanie 1:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu w obwodzie jak na rys. 6.12, a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabeli 6.22.

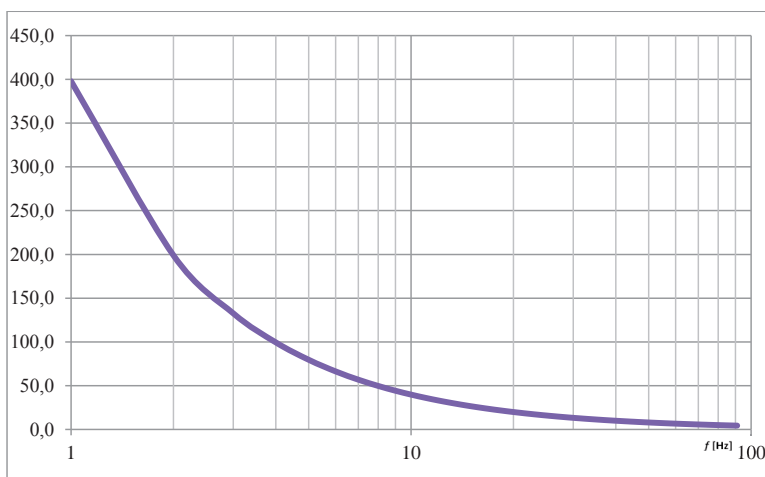


Tabela 6.22

Wartości prądów w obwodzie całkowitym obciążonym odbiornikiem

Lp.	$E_z$	$R_1$	$C$	$R_{odb}$	$f$	$I_z$	$I_C$	$I_{odb}$
	V	$\Omega$	$\mu\text{F}$	$\Omega$	kHz	A	A	A
1.	18	1,0	0,6	0,8	1			
2.	20	0,9	1,0	0,9	2			
3.	22	0,8	0,9	1,0	3			
4.	24	0,7	0,8	0,9	4			
5.	27	0,6	0,7	0,8	5			
6.	18	0,5	0,6	0,7	6			
7.	20	1,0	0,5	0,6	7			
8.	22	0,9	1,0	0,5	8			
9.	24	0,8	0,9	1,0	9			
10.	27	0,7	0,8	0,9	10			
11.	18	0,6	0,7	0,8	11			
12.	20	0,5	0,6	0,7	12			
13.	22	1,0	0,5	0,6	13			
14.	24	0,9	1,0	0,5	14			
15.	27	0,8	0,9	1,0	15			
16.	12	0,7	0,8	0,9	16			
17.	16	0,6	0,7	0,8	17			

**Zadanie 2:** Proszę wykreślić charakterystykę impedancji kondensatora przedstawionego na rys. 6.8 w funkcji częstotliwości, a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabeli 6.23.



Rys. 6.13. Oporność bierna kondensatora w funkcji częstotliwości

Tabela 6.23

Charakterystyka częstotliwościowa impedancji kondensatora

Lp.	C	$X_c [\Omega]$											
		0,4	1	2	3	4	5	6	7	10	20	30	90
	$\mu\text{F}$	kHz											
1.	8												
2.	7												
3.	6												
4.	5												
5.	4												
6.	3												
7.	2												
8.	1												
9.	0,9												
10.	0,8												
11.	0,7												
12.	0,6												
13.	0,5												
14.	0,4												
15.	0,3												
16.	0,2												
17.	0,1												

**Zadanie 3:** Proszę wykreślić charakterystykę impedancji wejściowej filtra przedstawionego na rys. 6.13 w funkcji częstotliwości, a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabeli 6.24.

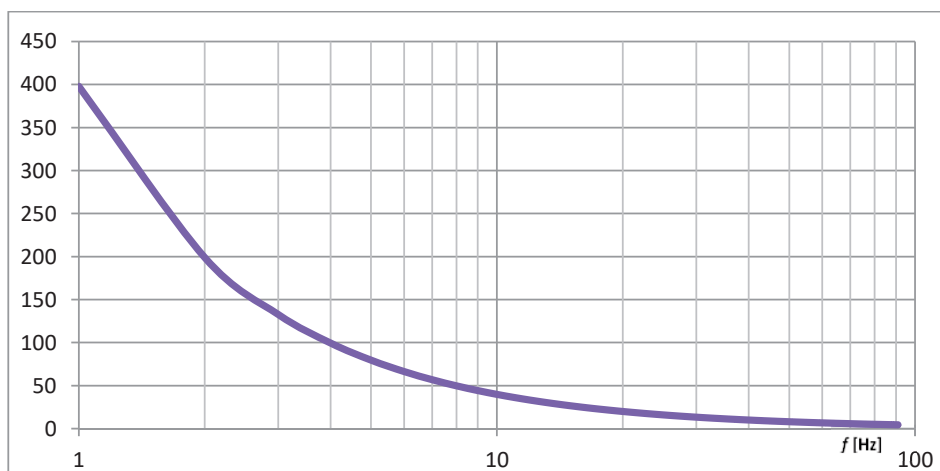
Tabela 6.24

Zestawienie częstotliwości rezonansowej dla obwodu szeregowego RLC

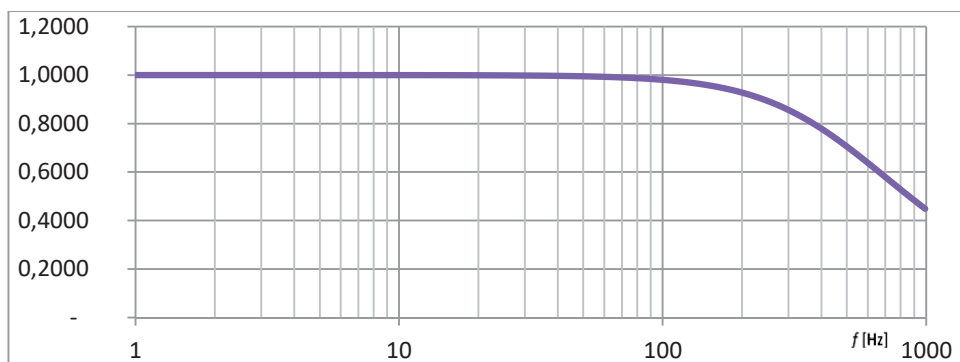
Lp.	C	$X_{we} [\Omega]$											
		0,4	1	2	3	4	5	6	7	10	20	30	90
	$\mu\text{F}$	kHz											
1.	8												
2.	7												
3.	6												
4.	5												
5.	4												
6.	3												
7.	2												
8.	1												
9.	0,9												
10.	0,8												

11.	0,7												
12.	0,6												
13.	0,5												
14.	0,4												
15.	0,3												
16.	0,2												
17.	0,1												

**Zadanie 4:** Proszę wykreślić charakterystykę transmitancji filtra przedstawionego na rys. 6.14 w funkcji częstotliwości, a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabeli 6.25.



Rys. 6.14. Impedancja wejściowa filtra RC w funkcji częstotliwości



Rys. 6.15. Wzmocnienie/tłumienie filtra RC w funkcji częstotliwości

**Tabela 6.25**

**Charakterystyka transmitancji (tłumienia) filtra LC (w rozpatrywanym przypadku: obwodu całkującego rzeczywistego) w funkcji częstotliwości**

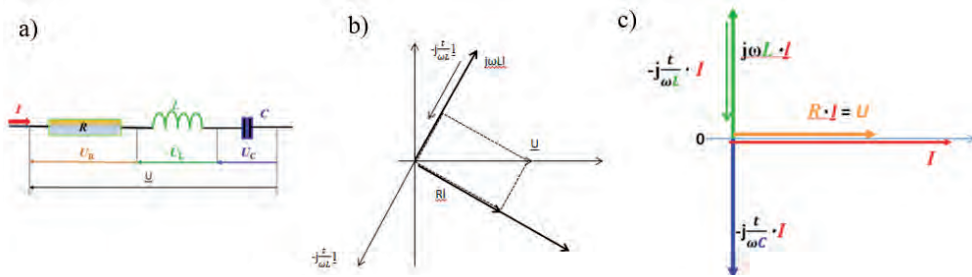
Lp.	C	[-]											
		0,4	1	2	3	4	5	6	7	10	20	30	90
	μF	kHz											
1.	8												
2.	7												
3.	6												
4.	5												
5.	4												
6.	3												
7.	2												
8.	1												
9.	0,9												
10.	0,8												
11.	0,7												
12.	0,6												
13.	0,5												
14.	0,4												
15.	0,3												
16.	0,2												
17.	0,1												

**6.2.1.2. Filtry rezonansowe RLC**

Zjawisko rezonansu elektrycznego układu szeregowego RLC (rys. 6.16a) zostało szczegółowo omówione w podrozdziałach:

- 2.3.1. Opis matematyczny oporności stawianej przez elementy pojemnościowe i indukcyjne bez zastosowania liczb zespolonych,
- 2.3.2. Opis matematyczny układów elektrycznych czynnych i biernych z zastosowaniem liczb zespolonych.

Spadki napięć na cewce indukcyjnej  $U_L$  oraz  $U_C$  na pojemności kondensatora (idealnego) są względem siebie przesunięte w fazie o kąt  $180^\circ$  (rys. 6.16b) dla każdej częstotliwości generowanej ze źródła zasilającego. W związku z tym z chwilą osiągnięcia przez źródło zasilające częstotliwości drgań własnych, określonej wzorem (2.19), kompensują się wzajemnie (rys. 6.16c) [2, 16, 27, 108].



**Rys. 6.16.** Gałąź szeregową złożoną z elementów idealnych R, L, C: a) schemat połączeń; b) wykres wektorowy przy przeważającej reaktancji indukcyjnej; c) wykres wektorowy gałęzi szeregowej w stanie rezonansu [108]

Na rys. 6.17 przedstawiono schemat zastępczy gałęzi szeregowej zawierający obok opornika  $R$  cewkę rzeczywistą i kondensator rzeczywisty. Cewkę (dławik) zastąpiono układem szeregowym cewki idealnej o indukcyjności  $L$  i opornika o rezystancji  $R_L$  równej rezystancji drutu nawojowego cewki.

Kondensator rzeczywisty zastąpiono układem równoległym kondensatora idealnego o pojemności  $C$  i opornika o konduktancji (przewodności)  $G_{rc}$  równej odwrotności oporności skrośnej izolacji (izolatora pomiędzy okładzinami kondensatora rzeczywistego), tj.:

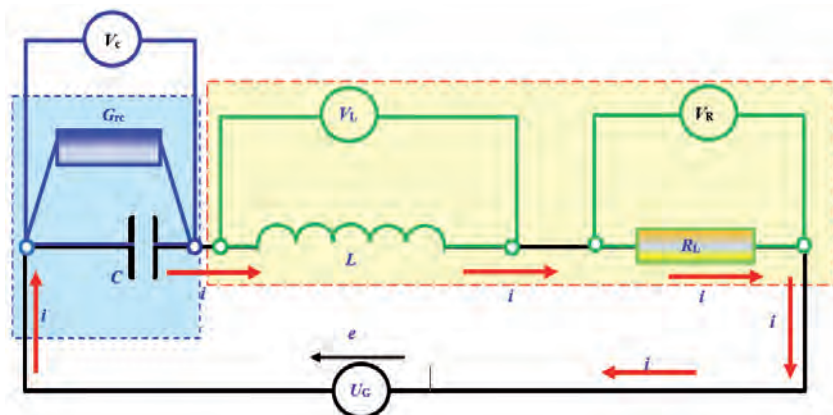
$$G_{rc} = \frac{1}{R_c} \quad (6.12)$$

Zazwyczaj rezystancja skrośna kondensatora  $R_c$  jest bardzo wysoka, rzędu dziesiątek, a nawet setek  $G\Omega$ , w związku z czym wartość  $G_{rc}$  jest tak mała w porównaniu z wartością przewodności biernej  $G_{xc}$  będącej odwrotnością oporności biernej kondensatora, tj.:

$$G_{xc} = \frac{1}{X_c} \quad (6.13)$$

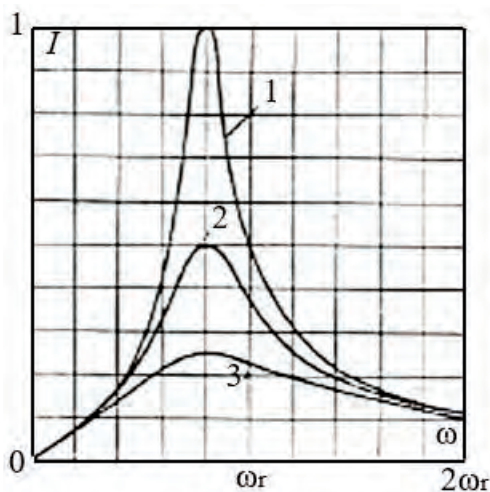
$$G_{xc} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (6.14)$$

Z powyższych rozważań oraz ze wzorów (6.1) i (6.2) wynika, że w połączeniu równoległym przewodność izolatora kondensatora można traktować jako pomijalnie małą.



Rys. 6.17. Schemat zastępczy gałęzi szeregowej złożonej z elementów idealnych:  $R_L$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $G_{rc}$

Jak wspomniano na początku rozdziału 2.3.2, z chwilą osiągnięcia przez źródło zasilające częstotliwości drgań własnych (określonej wzorem (2.20)) kompensują się wzajemnie wartości reaktancji biernych kondensatora i indukcyjności [108, 120]. W związku z tym, zgodnie z prawem Ohma dla odcinka obwodu, w chwili rezonansu uzyskuje się najwyższą wartość natężenia prądu w obwodzie (rys. 6.18). Rezonans może być osiągnięty przez zmianę co najmniej jednego z parametrów:  $L$ ,  $C$  lub  $f$ .



Rys. 6.18. Charakterystyki częstotliwościowe natężenia prądu w szeregowym obwodzie złożonym z kondensatora i dławika (cewki indukcyjnej z rdzeniem) w funkcji zmian pulsacji  $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ ) przy stałej amplitudzie źródła zasilania oraz niezmiennych wartościach  $L$ ,  $C$ : 1.  $R = R_1$ ; 2.  $R = 2 \cdot R_1$ ; 3.  $R = 4 \cdot R_1$  [108]

Zazwyczaj sporządzane są charakterystyki rezonansowe przy zmianie jednego z parametrów, przy założeniu, że dwa pozostałe nie ulegają zmianie oraz że napięcie zasilające (prąd przemienny) ma stałą wartość skuteczną.

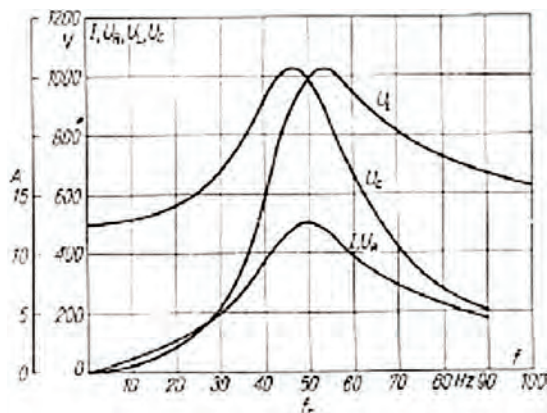
W obwodach elektroenergetycznych naziemnych krajowej sieci częstotliwość zwykle ma wartość prawie stałą (w godzinach szczytu autorzy stwierdzili max 48 Hz), zaś w godzinach najmniejszego zapotrzebowania energetycznego (latem o świcie) 52 Hz [39, 186]. W lotniczych systemach pokładowych występuje znacznie większa zmiana częstotliwości, np. w systemach bez stabilizacji prędkości obrotowej od 300 do 900 Hz [1, 26, 64, 127]. W tym wypadku obwody rezonansowe są stosowane w specjalnych skrzynkach sterowania i regulacji, gdzie dla odbiorników prądu przemiennego są elementami czułymi częstotliwościowo i załączają energię na odbiorniki przy 360 Hz wzwyż.

W obwodach radiotechnicznych zjawisko rezonansu wykorzystuje się do strojenia obwodów stacji odbiorczej do częstotliwości stacji nadawczej [2, 7]. W tym przypadku istnieje możliwość uzyskania jak najbardziej stromej krzywej rezonansu, czyli musi być zapewniona wysoka dobroć obwodu rezonansowego.

Wartości spadków napięcia  $U_L$  (na cewce indukcyjnej) oraz  $U_C$  (na kondensatorze) mogą osiągnąć napięcia większe niż napięcie zasilające (rys. 6.17), przy czym są one tym większe, im większe jest napięcie zasilające, a tym samym są one tym większe, im większy jest stosunek  $\frac{X_L}{R}$ . Zjawisko to określa się jako występowanie przepięć rezonansowych.

Oczywiście, przepięcia te nie mają nic wspólnego z perpetuum mobile – jak wcześniej wspomniano oba napięcia są przesunięte względem siebie o  $180^\circ$  (rys. 6.14). Poprawnie więc charakterystyka  $U_C(f)$  na rys. 6.17 powinna być przedstawiona w wartościach ujemnych, tj. poniżej poziomu zerowej wartości napięcia. W związku z tym w warunkach rezonansu napięcia  $U_L$  i  $U_C$  wzajemnie się znoszą, zatem prawo Ohma dla obwodu zamkniętego jest więc całkowicie spełnione.

W czasie rezonansu największe wartości  $U_L$  (na cewce indukcyjnej rzeczywistej o znacznej rezystancji drutu nawojowego) nie będzie równe  $U_C$  (na kondensatorze). Oczywiście wartość natężenia prądu w obwodzie w czasie rezonansu będzie wtedy znacznie niższa (niż przy bardzo małej wartości rezystancji cewki indukcyjnej, w rozpatrywanym przypadku: dławika) i spadek napięcia zarówno na kondensatorze, jak i na cewce indukcyjnej będzie niższy niż wartość skuteczna napięcia źródła.



**Rys. 6.19.** Charakterystyki częstotliwościowe natężenia prądu w szeregowym obwodzie złożonym z kondensatora i dławika (cewki indukcyjnej z rdzeniem) w funkcji zmian pulsacji  $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ ) przy stałej amplitudzie źródła zasilania oraz niezmienianych wartościach  $L, C$ : 1.  $R = R_1$ ; 2.  $R = 2 \cdot R_1$ ; 3.  $R = 4 \cdot R_1$  [108]

Filtry rezonansowe stosowane w bloku transformatorowo-prostowniczym (BTP) mają za zadanie zwierać konkretne harmoniczne na wyjściu bloku transformatorowo-prostowniczego. Złożone są z dławika i kondensatora(-ów) – rys. 6.19. Częstotliwość własną obwodu rezonansowego wyznacza się ze wzoru (2.19). Częstotliwości własne tych obwodów rezonansowych są zwykle przesunięte tak, aby swym „zwieraniem” eliminowały skrajne częstotliwości, jakie pojawiają się przy zmianach częstotliwości prądu przemiennego podczas zmieniania się prędkości obrotowej.

Zatem, prądnice prądu przemiennego (napędzane z przekładni głównej) śmigłowca mają częstotliwość znamionową napięcia wyjściowego  $f_N = 400 \pm 10\%$ , tj. 360–440 Hz. Prędkość obrotowa wału wyjściowego przekładni głównej nie może się zmieniać w zbyt szerokich przedziałach, gdyż grozi to m.in. połamaniem łopat wirnika nośnego. Takich ograniczeń nie mają prądnice prądu przemiennego zamontowane na samolotach, gdyż ich częstotliwość napięcia wyjściowego może się zmieniać od 300 do 900 Hz [1, 26, 64, 127]. W związku z tym częstotliwości pierwszej harmonicznej pulsacji po prostowniku półprzewodnikowym (mostek Gretza) wynoszą dla prostownika:

1. 2-pulsowego:
  - a) dla śmigłowców od  $f_{\min} = 720$  Hz do  $f_{\max} = 880$  Hz,
  - b) dla samolotów od  $f_{\min} = 600$  do  $f_{\max} = 1800$  Hz;
2. 6-pulsowego mogą się zmieniać (rys. 6.15):
  - a) dla śmigłowców od  $f_{\min} = 2160$  Hz do  $f_{\max} = 2640$  Hz,
  - b) dla samolotów od  $f_{\min} = 1800$  do  $f_{\max} = 5400$  Hz;

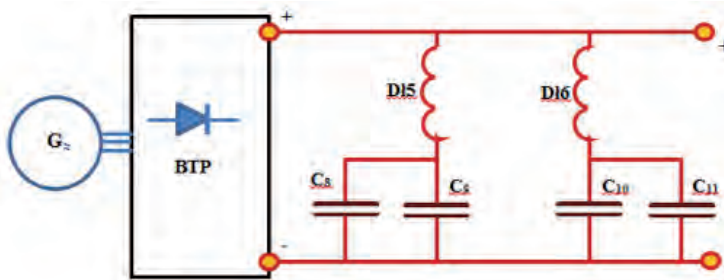


3. 12-pulsowej częstotliwości te będą dwukrotnie większe, tj.:

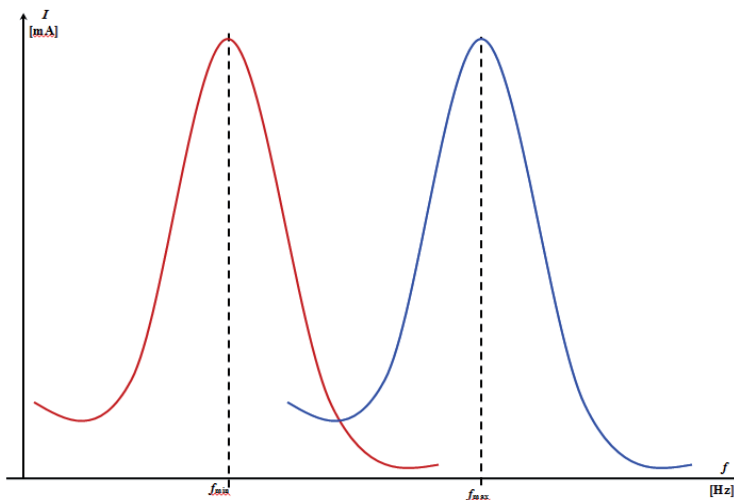
a) dla śmigłowców od  $f_{\min} = 4,32$  kHz do  $f_{\max} = 5,28$  kHz,

b) dla samolotów od  $f_{\min} = 3,6$  kHz do  $f_{\max} = 10,8$  kHz.

Na te skrajne częstotliwości powinny być ustawione częstotliwości drgań własnych poszczególnych układów rezonansowych.



**Rys. 6.20.** Schemat blokowo-idealowy bloku transformatorowo-prostowniczego z dwoma filtrami rezonansowymi na wyjściu [45]



**Rys. 6.21.** Charakterystyka zmian natężenia prądu w obwodzie rezonansowym w funkcji częstotliwości dla bloku transformatorowo-prostowniczego z dwoma filtrami rezonansowymi na wyjściu

**Zadanie 1:** Proszę obliczyć i wykreślić charakterystykę obu filtrów rezonansowych, zakładając rezystancję wyjściową (wewnętrzzną) bloku transformatorowo-prostowniczego równą  $1 \Omega$ , a także proszę obliczyć brakujące wartości w tabelach 6.26–6.31.

**Tabela 6.26**

Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmonicznych (pasmo 720–880 Hz) dla BTP 2-pulsowego dla śmigłowców

$E$	$f_{\min}$	$I_{\max}$	$X_{L1}$	$U_{L1}$	$X_{C1}$	$U_{C1}$	$C_8$	$C_9$	$L_{D05}$	$R_1$	$f_{\max}$	$I_{2\max}$	$X_{L2}$	$U_{L2}$	$X_{C2}$	$U_{C2}$	$C_{10}$	$C_{11}$	$L_{D06}$	$R_2$
Lp.	V	Hz	$\Omega$	V	$\Omega$	V	$\mu\text{F}$	$\mu\text{F}$	mH	$\Omega$	Hz	A	$\Omega$	V	$\Omega$	V	$\mu\text{F}$	$\mu\text{F}$	mH	$\Omega$
1.	28,5	720	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
2.	28,5	720					5	5		0,001	880						2	2		0,001
3.	28,5	720					5	5		0,057	880						2	2		0,057
4.	28,5	720					5	5		0,246	880						2	2		0,246
5.	28,5	720					5	5		0,694	880						2	2		0,694
6.	28,5	720					5	5		1,569	880						2	2		1,569
7.	28,5	720					5	5		3,081	880						2	2		3,081
8.	28,5	720					5	5		5,482	880						2	2		5,482
9.	28,5	720					5	5		9,066	880						2	2		9,066
10.	28,5	720					5	5		14,169	880						2	2		14,169
11.	28,5	720					5	5		21,169	880						2	2		21,169
12.	28,5	720					5	5		30,486	880						2	2		30,486
13.	28,5	720					5	5		42,582	880						2	2		42,582
14.	28,5	720					5	5		57,961	880						2	2		57,961
15.	28,5	720					5	5		77,169	880						2	2		77,169
16.	28,5	720					5	5		100,794	880						2	2		100,794
17.	28,5	720					5	5		129,466	880						2	2		129,466
18.	28,5	720					5	5		163,857	880						2	2		163,857
19.	28,5	720					5	5		204,681	880						2	2		204,681
20.	28,5	720					5	5		252,694	880						2	2		252,694
							5	5		308,694	880						2	2		308,694

**UWAGA 1:** W obliczeniach częstotliwości należy posługiwać się wzorem (2.19) na częstotliwość rezonansową danego obwodu.

**UWAGA 2:** Wszystkie wartości zadane w powyższej tabelicy podane są w wartościach skutecznych.

**Tabela 6.27**  
**Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmonicznych (pasmo 600–1800 Hz) dla BTP 2-pulsowego dla samolotów**

Lp.	E	V	$f_{\min}$	$I_{\max}$	$X_{L1}$	$U_{L1}$	$X_{C1}$	$U_{C1}$	$C_8$	$C_9$	$L_{DIS}$	$R_1$	$f_{\max}$	$I_{\max}$	$X_{L2}$	$U_{L2}$	$X_{C2}$	$U_{C2}$	$C_{10}$	$C_{11}$	$L_{D06}$	$R_2$
			Hz																			
1.	28,5	600	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
2.	28,5	600	5	5					5	5		0,001	1800						2	2		0,001
3.	28,5	600	5	5					5	5		0,057	1800						2	2		0,057
4.	28,5	600	5	5					5	5		0,246	1800						2	2		0,246
5.	28,5	600	5	5					5	5		0,694	1800						2	2		0,694
6.	28,5	600	5	5					5	5		1,569	1800						2	2		1,569
7.	28,5	600	5	5					5	5		3,081	1800						2	2		3,081
8.	28,5	600	5	5					5	5		5,482	1800						2	2		5,482
9.	28,5	600	5	5					5	5		9,066	1800						2	2		9,066
10.	28,5	600	5	5					5	5		14,169	1800						2	2		14,169
11.	28,5	600	5	5					5	5		21,169	1800						2	2		21,169
12.	28,5	600	5	5					5	5		30,486	1800						2	2		30,486
13.	28,5	600	5	5					5	5		42,582	1800						2	2		42,582
14.	28,5	600	5	5					5	5		57,961	1800						2	2		57,961
15.	28,5	600	5	5					5	5		77,169	1800						2	2		77,169
16.	28,5	600	5	5					5	5		100,794	1800						2	2		100,794
17.	28,5	600	5	5					5	5		129,466	1800						2	2		129,466
18.	28,5	600	5	5					5	5		163,857	1800						2	2		163,857
19.	28,5	600	5	5					5	5		204,681	1800						2	2		204,681
20.	28,5	600	5	5					5	5		252,694	1800						2	2		252,694
	28,5	600	5	5					5	5		308,694	1800						2	2		308,694

**Tabela 6.28**  
**Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmonicznych (pasmo 2160–2640 Hz) dla BTP 6-pulsowego dla śmigłowców**

Lp.	E		f <sub>min</sub> Hz	I <sub>1Max</sub> A	X <sub>L1</sub> Ω	U <sub>L1</sub> V	X <sub>C1</sub>   Ω	U <sub>C1</sub> V	C <sub>8</sub> μF	C <sub>9</sub> μF	L <sub>015</sub> mH	R <sub>1</sub> Ω	f <sub>max</sub> Hz	I <sub>2Max</sub> A	X <sub>L2</sub> Ω	U <sub>L2</sub> V	X <sub>C2</sub>   Ω	U <sub>C2</sub> V	C <sub>10</sub> μF	C <sub>11</sub> μF	L <sub>016</sub> mH	R <sub>2</sub> Ω
	V	1																				
1.	28,5	2160							5	5		0,001	2640						2	2		0,001
2.	28,5	2160							5	5		0,057	2640						2	2		0,057
3.	28,5	2160							5	5		0,246	2640						2	2		0,246
4.	28,5	2160							5	5		0,694	2640						2	2		0,694
5.	28,5	2160							5	5		1,569	2640						2	2		1,569
6.	28,5	2160							5	5		3,081	2640						2	2		3,081
7.	28,5	2160							5	5		5,482	2640						2	2		5,482
8.	28,5	2160							5	5		9,066	2640						2	2		9,066
9.	28,5	2160							5	5		14,169	2640						2	2		14,169
10.	28,5	2160							5	5		21,169	2640						2	2		21,169
11.	28,5	2160							5	5		30,486	2640						2	2		30,486
12.	28,5	2160							5	5		42,582	2640						2	2		42,582
13.	28,5	2160							5	5		57,961	2640						2	2		57,961
14.	28,5	2160							5	5		77,169	2640						2	2		77,169
15.	28,5	2160							5	5		100,794	2640						2	2		100,794
16.	28,5	2160							5	5		129,466	2640						2	2		129,466
17.	28,5	2160							5	5		163,857	2640						2	2		163,857
18.	28,5	2160							5	5		204,681	2640						2	2		204,681
19.	28,5	2160							5	5		252,694	2640						2	2		252,694
20.	28,5	2160							5	5		308,694	2640						2	2		308,694

**Tabela 6.29**  
**Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmonicznych (pasmo 1800–5400 Hz) dla BTP 6-pulsowego dla samolotów**

<i>E</i>	$f_{\min}$	$I_{\max}$	$X_{L1}$	$U_{L1}$	$X_{C1}$	$U_{C1}$	$C_8$	$C_9$	$L_{DK}$	$R_1$	$f_{\max}$	$I_{2\max}$	$X_{L2}$	$U_{L2}$	$X_{C2}$	$U_{C2}$	$C_{10}$	$C_{11}$	$L_{DK}$	$R_2$
V	Hz	A	$\Omega$	V	$\Omega$	V	$\mu\text{F}$	$\mu\text{F}$	mH	$\Omega$	Hz	A	$\Omega$	V	$\Omega$	V	$\mu\text{F}$	$\mu\text{F}$	mH	$\Omega$
1.	28,5	1800					5	5		0,001	5400						2	2		0,001
2.	28,5	1800					5	5		0,057	5400						2	2		0,057
3.	28,5	1800					5	5		0,246	5400						2	2		0,246
4.	28,5	1800					5	5		0,694	5400						2	2		0,694
5.	28,5	1800					5	5		1,569	5400						2	2		1,569
6.	28,5	1800					5	5		3,081	5400						2	2		3,081
7.	28,5	1800					5	5		5,482	5400						2	2		5,482
8.	28,5	1800					5	5		9,066	5400						2	2		9,066
9.	28,5	1800					5	5		14,169	5400						2	2		14,169
10.	28,5	1800					5	5		21,169	5400						2	2		21,169
11.	28,5	1800					5	5		30,486	5400						2	2		30,486
12.	28,5	1800					5	5		42,582	5400						2	2		42,582
13.	28,5	1800					5	5		57,961	5400						2	2		57,961
14.	28,5	1800					5	5		77,169	5400						2	2		77,169
15.	28,5	1800					5	5		100,794	5400						2	2		100,794
16.	28,5	1800					5	5		129,466	5400						2	2		129,466
17.	28,5	1800					5	5		163,857	5400						2	2		163,857
18..	28,5	1800					5	5		204,681	5400						2	2		204,681
19	28,5	1800					5	5		252,694	5400						2	2		252,694
20.	28,5	1800					5	5		308,694	5400						2	2		308,694

**Tabela 6.30**  
**Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmonicznych (pasmo 4,32–5,28 kHz) dla BTP 12-pulsowego dla śmigłowców**

Lp.	E	$f_{min}$	$I_{1Max}$	$XL1$	$U/L1$	$ XC1 $	$UC1$	C8	C9	LDI5	R1	$f_{Max}$	$I2Max$	$XL2$	$U/L2$	$ XC2 $	$UC2$	C10	C11	LDI6	R2
	V	Hz	A	$\Omega$	V	$\Omega$	V	$\mu F$	$\mu F$	mH	$\Omega$	Hz	A	$\Omega$	V	$\Omega$	V	$\mu F$	$\mu F$	mH	$\Omega$
1.	28,5	4320	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
2.	28,5	4320						5	5		0,001	5280						2	2		0,001
3.	28,5	4320						5	5		0,057	5280						2	2		0,057
4.	28,5	4320						5	5		0,246	5280						2	2		0,246
5.	28,5	4320						5	5		0,694	5280						2	2		0,694
6.	28,5	4320						5	5		1,569	5280						2	2		1,569
7.	28,5	4320						5	5		3,081	5280						2	2		3,081
8.	28,5	4320						5	5		5,482	5280						2	2		5,482
9.	28,5	4320						5	5		9,066	5280						2	2		9,066
10.	28,5	4320						5	5		14,169	5280						2	2		14,169
11.	28,5	4320						5	5		21,169	5280						2	2		21,169
12.	28,5	4320						5	5		30,486	5280						2	2		30,486
13.	28,5	4320						5	5		42,582	5280						2	2		42,582
14.	28,5	4320						5	5		57,961	5280						2	2		57,961
15.	28,5	4320						5	5		77,169	5280						2	2		77,169
16.	28,5	4320						5	5		100,794	5280						2	2		100,794
17.	28,5	4320						5	5		129,466	5280						2	2		129,466
18.	28,5	4320						5	5		163,857	5280						2	2		163,857
19.	28,5	4320						5	5		204,681	5280						2	2		204,681
20.	28,5	4320						5	5		252,694	5280						2	2		252,694
								5	5		308,694	5280						2	2		308,694

**Tabela 6.31**  
**Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmonicznych (pasmo 3,6–10,8 kHz) dla BTP 12-pulsowego dla samolotów**

$E$	$f_{\min}$	$I_{\max}$	$X_{L1}$	$U_{L1}$	$X_{C1}$	$U_{C1}$	$C_8$	$C_9$	$L_{DIS}$	$R_1$	$f_{\max}$	$I_{Z\max}$	$X_{L2}$	$U_{L2}$	$X_{C2}$	$U_{C2}$	$C_{10}$	$C_{11}$	$L_{p06}$	$R_2$
Lp.	V	Hz	A	$\Omega$	V	$\Omega$	V	$\mu\text{F}$	$\mu\text{F}$	mH	$\Omega$	Hz	A	$\Omega$	V	V	$\mu\text{F}$	$\mu\text{F}$	mH	$\Omega$
1.	28,5	3600					5	5		0,001	10800						2	2		0,001
2.	28,5	3600					5	5		0,057	10800						2	2		0,057
3.	28,5	3600					5	5		0,246	10800						2	2		0,246
4.	28,5	3600					5	5		0,694	10800						2	2		0,694
5.	28,5	3600					5	5		1,569	10800						2	2		1,569
6.	28,5	3600					5	5		3,081	10800						2	2		3,081
7.	28,5	3600					5	5		5,482	10800						2	2		5,482
8.	28,5	3600					5	5		9,066	10800						2	2		9,066
9.	28,5	3600					5	5		14,169	10800						2	2		14,169
10.	28,5	3600					5	5		21,169	10800						2	2		21,169
11.	28,5	3600					5	5		30,486	10800						2	2		30,486
12.	28,5	3600					5	5		42,582	10800						2	2		42,582
13.	28,5	3600					5	5		57,961	10800						2	2		57,961
14.	28,5	3600					5	5		77,169	10800						2	2		77,169
15.	28,5	3600					5	5		100,794	10800						2	2		100,794
16.	28,5	3600					5	5		129,466	10800						2	2		129,466
17.	28,5	3600					5	5		163,857	10800						2	2		163,857
18.	28,5	3600					5	5		204,681	10800						2	2		204,681
19.	28,5	3600					5	5		252,694	10800						2	2		252,694
20.	28,5	3600					5	5		308,694	10800						2	2		308,694

## 6.3. Zadania związane z ogólną charakterystyką lotniczych urządzeń elektrycznych

### 6.3.1. Ogólna charakterystyka LUE – obwody prądu stałego

#### 6.3.1.1. Typowe wartości napięć prądu stałego

1. Proszę wymienić typowe znamionowe wartości napięć prądu stałego współczesnych statków powietrznych.
2. Proszę określić poziomy normatywny sieci prądu stałego 28 V dla układów zasilanych z prądnic komutatorowych prądu stałego:
  - a) przedziały zmian w stanie ustalonym przy normalnym działaniu układu zasilania elektrycznego (NSSL),
  - b) przedziały zmian w stanie ustalonym przy awaryjnym działaniu układu zasilania elektrycznego (ESSL),
  - c) przedziały zmian w stanie ustalonym przy nienormalnym działaniu układu zasilania elektrycznego (ASSL).

#### 6.3.1.2. Przerwy w zasilaniu

Kiedy i na jak długo mogą wystąpić przerwy w zasilaniu odbiornika prądu stałego w stanie ustalonym [141]:

1. dla „nowej” techniki wojskowej klasyfikowanej w normie (NO-15-A200:2016, pkt. 2.3.3.3) parametrami znamionowymi:
  - a) przy normalnym działaniu układu zasilania elektrycznego (NSSL),
  - b) przy awaryjnym działaniu układu zasilania elektrycznego (ESSL),
  - c) przy nienormalnym działaniu układu zasilania elektrycznego (ASSL);
2. dla „starej” techniki wojskowej klasyfikowanej w normie (NO-15-A200:2016, pkt. 2.3.3.3) parametrami dopuszczalnymi:
  - a) przy normalnym działaniu układu zasilania elektrycznego (NSSL),
  - b) przy awaryjnym działaniu układu zasilania elektrycznego (ESSL),
  - c) przy nienormalnym działaniu układu zasilania elektrycznego (ASSL).

#### 6.3.1.3. Pulsacja napięcia

**Zadanie:** Proszę określić wartość względną pulsacji (kryteria wg NO-15-A200:2016 [141], pkt. 2.5.2.2 Pulsacja napięcia) i wpisać do tabel 6.32 i 6.33. Proszę wskazać pulsacje złobkowe oraz komutatorowe (rys. 6.22 i 6.23) i opisać



przyczyny ich powstawania. Wskazane wykorzystanie materiału zawartego w rozdziałach: 4.2.1.2; 4.2.3;

Tabela 6.32

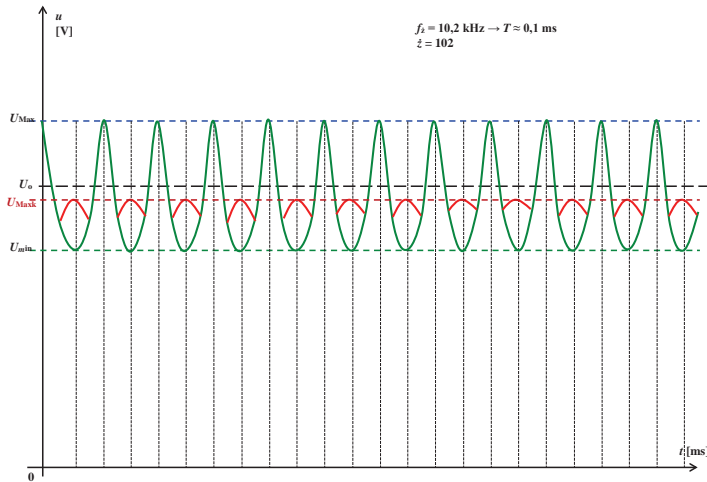
Obliczenia wartości względnej i bezwzględnej pulsacji prądnicy komutatorowej prądu stałego przy jej obciążeniu powyżej  $100\%I_N$

Lp.	$U_{Maxk}$	$U_{maxz}$	$U_o$	$U_{min}$	$U_p$	$k_p$	Uwagi
	V	V	V	V	V	%	
1.	30,1	29,8	29,4	28,7			
2.	29,7	29,4	29	28,3			
3.	29,3	29	28,6	27,9			
4.	28,9	28,6	28,2	27,5			
5.	28,5	28,2	27,8	27,1			
6.	28,1	27,8	27,4	26,7			
7.	27,7	27,4	27	26,3			
8.	27,3	27	26,6	25,9			
9.	26,9	26,6	26,2	25,5			
10.	26,5	26,2	25,8	25,1			
11.	26,1	25,8	25,4	24,7			
12.	25,7	25,4	25	24,3			
13.	25,3	25	24,6	23,9			
14.	24,9	24,6	24,2	23,5			
15.	24,5	24,2	23,8	23,1			
16.	24,1	23,8	23,4	22,7			
17.	23,7	23,4	23	22,3			
18.	23,3	23	22,6	21,9			
19.	22,9	22,6	22,2	21,5			
20.	22,5	22,2	21,8	21,1			
21.	22,1	21,8	21,4	20,7			
22.	21,7	21,4	21	20,3			
23.	21,3	21	20,6	19,9			
24.	20,9	20,6	20,2	19,5			
25.	20,5	20,2	19,8	19,1			
26.	20,1	19,8	19,4	18,7			
27.	19,7	19,4	19	18,3			
28.	19,3	19	18,6	17,9			
29.	18,9	18,6	18,2	17,5			
30.	18,5	18,2	17,8	17,1			
31.	30,1	29,8	29,4	28,7			
32.	29,7	29,4	29	28,3			
33.	29,3	29	28,6	27,9			
34.	28,9	28,6	28,2	27,5			

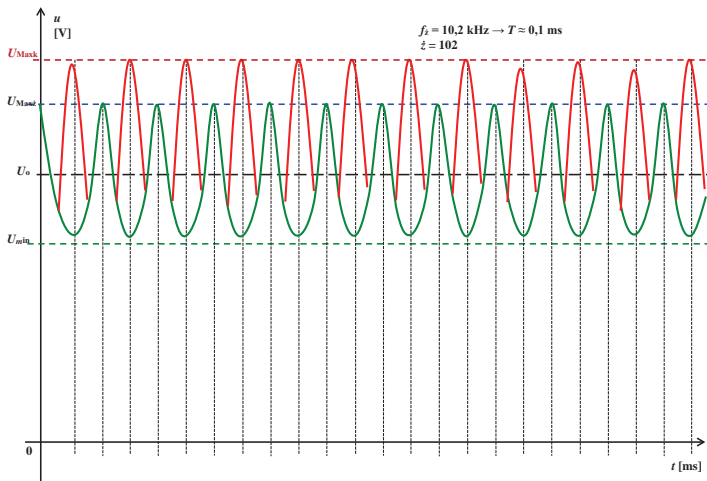
Tabela 6.33

Obliczenia wartości względnej i bezwzględnej pulsacji prądnicy komutatorowej prądu stałego przy jej obciążeniu poniżej 10% $I_N$

Lp.	$U_{Maxk}$	$U_{maxz}$	$U_o$	$U_{min}$	$U_p$	$k_p$	Uwagi
	V	V	V	V	V	%	
1.	29,5	29,8	29,4	28,7			
2.	29,1	29,4	29	28,3			
3.	28,7	29	28,6	27,9			
4.	28,3	28,6	28,2	27,5			
5.	27,9	28,2	27,8	27,1			
6.	27,5	27,8	27,4	26,7			
7.	27,1	27,4	27	26,3			
8.	26,7	27	26,6	25,9			
9.	26,3	26,6	26,2	25,5			
10.	25,9	26,2	25,8	25,1			
11.	25,5	25,8	25,4	24,7			
12.	25,1	25,4	25	24,3			
13.	24,7	25	24,6	23,9			
14.	24,3	24,6	24,2	23,5			
15.	23,9	24,2	23,8	23,1			
16.	23,5	23,8	23,4	22,7			
17.	23,1	23,4	23	22,3			
18.	22,7	23	22,6	21,9			
19.	22,3	22,6	22,2	21,5			
20.	21,9	22,2	21,8	21,1			
21.	21,5	21,8	21,4	20,7			
22.	21,1	21,4	21	20,3			
23.	20,7	21	20,6	19,9			
24.	20,3	20,6	20,2	19,5			
25.	19,9	20,2	19,8	19,1			
26.	19,5	19,8	19,4	18,7			
27.	19,1	19,4	19	18,3			
28.	18,7	19	18,6	17,9			
29.	18,3	18,6	18,2	17,5			
30.	17,9	18,2	17,8	17,1			
31.	30,1	29,8	29,4	28,7			
32.	29,7	29,4	29	28,3			
33.	29,3	29	28,6	27,9			
34.	28,9	28,6	28,2	27,5			



**Rys. 6.22.** Pulsacje napięcia stałego przy obciążeniu prądowym prądnicy komutatorowej prądu stałego poniżej 10%  $I_N$



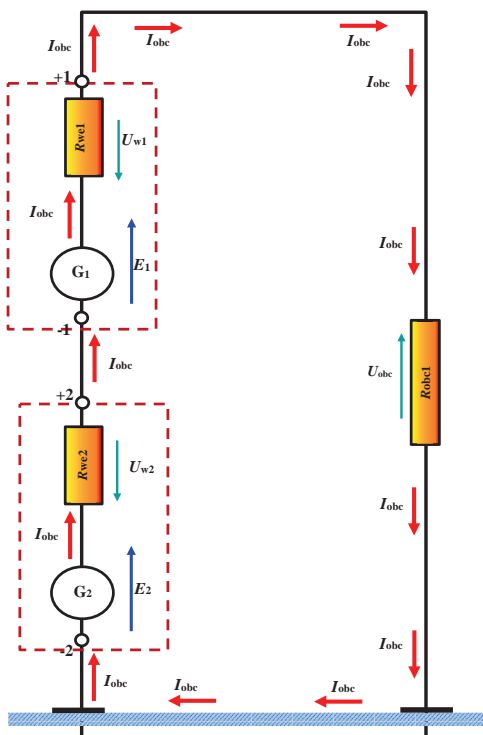
**Rys. 6.23.** Pulsacje napięcia stałego przy obciążeniu prądowym prądnicy komutatorowej prądu stałego powyżej 100%  $I_N$

#### 6.3.1.4. Szeregowe łączenie źródeł napięcia jako szczególny przypadek prawa Ohma dla całego obwodu

Zdarza się często, że prąd lub napięcie, jakie można otrzymać z pojedynczego źródła napięcia, nie wystarczają do zasilania odbiorników. Wówczas zachodzi potrzeba łączenia kilku źródeł napięcia w połączenie szeregowo – rys. 6.24 (zwiększenie

szeniu napięcia) lub równoległe (zwiększenie prądu). W LUE stosuje się często szeregowe i równoległe łączenie źródeł napięcia:

- a) w „starej” technice rozruchu w czasie rozruchu bezpośredniego silnika głównego TW-2 następuje najpierw szeregowe, a potem równoległe łączenie dwóch źródeł prądu stałego, gdzie po przestawieniu w połączenie szeregowe wzrasta wydajnie prędkość sprężarki silnika niezbędna do odpowiedniego sprężenia mieszanki w komorze spalania;
- b) we wszystkich stosowanych bateriach lotniczych stosuje się szeregowe łączenie ogniw akumulatorowych, przy czym pojedyncze ogniwa mają zbyt niską wartość napięcia, aby mogły współpracować z pokładową siecią prądu stałego 28,5 V<sub>DC</sub>.



**Rys. 6.24.** Szeregowe połączenie źródeł napięciowych, gdzie:  $E_1$  – siła elektromotoryczna źródła napięcia nr 1;  $E_2$  – siła elektromotoryczna źródła napięcia nr 1;  $R_{w1}$  – oporność wewnętrzna źródła napięcia nr 1;  $R_{w2}$  – oporność wewnętrzna źródła napięcia nr 1;  $R_{obc}$  – oporność obciążenia

Cechą charakterystyczną **układu szeregowego** jest to, że przez wszystkie jego elementy płynie ten sam prąd, wobec czego największy prąd, jaki można uzyskać

nie przekracza prądu znamionowego źródła o najmniejszym prądzie znamionowym.

Przed połączeniem szeregowym napięcia należy zwrócić uwagę na ich rezystancje wewnętrzne, tj. połączenie w szereg źródła napięcia o małej rezystancji wewnętrznej ze źródłem o bardzo dużej rezystancji wewnętrznej może wywołać wręcz przeciwny skutek w postaci wypadkowego napięcia na zaciskach takiego tandemu źródeł, które może być niższe niż pojedynczego źródła. Tendencja ta jest tym większa, im:

- większe jest zróżnicowanie rezystancji wewnętrznej pomiędzy dwoma źródłami,
- większe jest natężenie prądu pobierane przez odbiornik, czyli im mniejsza jest wartość rezystancji obciążenia (rys. 6.24, element  $R_{obc}$ ), czyli innymi słowy im większa jest moc znamionowa  $P_{Nodb}$  odbiornika.

**Zadanie:** Proszę obliczyć brakujące wartości przedstawione w tabeli 6.34.

Tabela 6.34

Szeregowe połączenie źródeł prądu stałego jako szczególny przypadek prawa Ohma dla obwodu zamkniętego

Lp.	$E_1$	$R_{w1}$	$U_{+1-1}$	$E_2$	$R_{w2}$	$U_{+2-2}$	$R_{odb}$	$U_{obc}$	$I_{obc}$	$P_{obc}$	$P_{Nodb}$
	V	$\Omega$	V	V	$\Omega$	V	$\Omega$	V	V	$\Omega$	$\Omega$
1.	8	0,005		8	0,003		0,08		182		11250
2.	10	0,005		10	0,003		0,08		227		11250
3.	12	0,005		12	0,003		0,08		273		11250
4.	14	0,005		14	0,003		0,08		318		11250
5.	16	0,005		16	0,003		0,08		364		11250
6.	18	0,005		18	0,003		0,08		409		11250
7.	20	0,005		20	0,003		0,08		455		11250
8.	22	0,005		22	0,003		0,08		500		11250
9.	24	0,005		24	0,003		0,08		545		11250
10.	26	0,005		26	0,003		0,08		591		11250
11.	28	0,005		28	0,003		0,08		636		11250
12.	30	0,005		30	0,003		0,08		682		11250
13.	8	0,007		8	0,003		0,08		178		11250
14.	10	0,007		10	0,003		0,08		222		11250
15.	12	0,007		12	0,003		0,08		267		11250
16.	14	0,007		14	0,003		0,08		311		11250
17.	16	0,007		16	0,003		0,08		356		11250
18.	18	0,007		18	0,003		0,08		400		11250
19.	20	0,007		20	0,003		0,08		444		11250
20.	22	0,007		22	0,003		0,08		489		11250
21.	24	0,007		24	0,003		0,08		533		11250

Lp.	$E_1$	$R_{w1}$	$U_{+1-1}$	$E_2$	$R_{w2}$	$U_{+2-2}$	$R_{odb}$	$U_{obc}$	$I_{obc}$	$P_{obc}$	$P_{Nodb}$
	V	$\Omega$	V	V	$\Omega$	V	$\Omega$	V	V	$\Omega$	$\Omega$
22.	26	0,007		26	0,003		0,08		578		11250
23.	28	0,007		28	0,003		0,08		622		11250
24.	30	0,007		30	0,003		0,08		667		11250
25.	8	0,005		8	0,003		0,05		276		18000
26.	10	0,005		10	0,003		0,05		345		18000
27.	12	0,005		12	0,003		0,05		414		18000
28.	14	0,005		14	0,003		0,05		483		18000
29.	16	0,005		16	0,003		0,05		552		18000
30.	18	0,005		18	0,003		0,05		621		18000
31.	20	0,005		20	0,003		0,05		690		18000
32.	22	0,005		22	0,003		0,05		759		18000
33.	24	0,005		24	0,003		0,05		828		18000
34.	26	0,005		26	0,003		0,05		897		18000
35.	28	0,005		28	0,003		0,05		966		18000
36.	30	0,005		30	0,003		0,05		1034		18000
37.	8	0,007		8	0,003		0,05		267		18000
38.	10	0,007		10	0,003		0,05		333		18000
39.	12	0,007		12	0,003		0,05		400		18000
40.	14	0,007		14	0,003		0,05		467		18000
41.	16	0,007		16	0,003		0,05		533		18000
42.	18	0,007		18	0,003		0,05		600		18000
43.	20	0,007		20	0,003		0,05		667		18000
44.	22	0,007		22	0,003		0,05		733		18000
45.	24	0,007		24	0,003		0,05		800		18000
46.	26	0,007		26	0,003		0,05		867		18000
47.	28	0,007		28	0,003		0,05		933		18000
48.	30	0,007		30	0,003		0,05		1000		18000
49.	8	0,003		8	0,003		0,05		286		18000
50.	10	0,003		10	0,003		0,05		357		18000
51.	12	0,003		12	0,003		0,05		429		18000
52.	14	0,003		14	0,003		0,05		500		18000
53.	16	0,003		16	0,003		0,05		571		18000
54.	18	0,003		18	0,003		0,05		643		18000
55.	20	0,003		20	0,003		0,05		714		18000
56.	22	0,003		22	0,003		0,05		786		18000
57.	24	0,003		24	0,003		0,05		857		18000
58.	26	0,003		26	0,003		0,05		929		18000
59.	28	0,003		28	0,003		0,05		1000		18000
60.	30	0,003		30	0,003		0,05		1071		18000
61.	8	0,003		8	0,003		0,08		186		11250
62.	10	0,003		10	0,003		0,08		233		11250
63.	12	0,003		12	0,003		0,08		279		11250
64.	14	0,003		14	0,003		0,08		326		11250
65.	16	0,003		16	0,003		0,08		372		11250
66.	18	0,003		18	0,003		0,08		419		11250

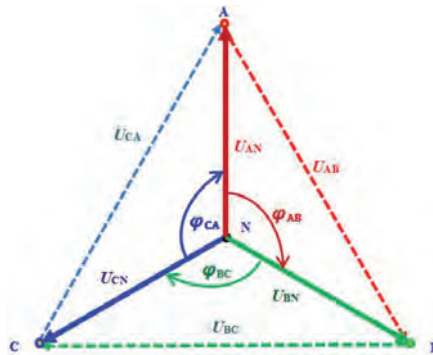
Lp.	$E_1$	$R_{w1}$	$U_{+1-1}$	$E_2$	$R_{w2}$	$U_{+2-2}$	$R_{odb}$	$U_{obc}$	$I_{obc}$	$P_{obc}$	$P_{Nodb}$
	V	$\Omega$	V	V	$\Omega$	V	$\Omega$	V	V	$\Omega$	$\Omega$
67.	20	0,003		20	0,003		0,08		465		11250
68.	22	0,003		22	0,003		0,08		512		11250
69.	24	0,003		24	0,003		0,08		558		11250
70.	26	0,003		26	0,003		0,08		605		11250
71.	28	0,003		28	0,003		0,08		651		11250
72.	30	0,003		30	0,003		0,08		698		11250

### 6.3.2. Ogólna charakterystyka LUE – obwody prądu przemiennego

#### 6.3.2.1. Wartość napięcia fazowego, przewodowego, wartość skuteczna, szczytowa i międzyszczytowa dla obwodu trójfazowego prądu przemiennego

Zgodnie z rozważaniami zawartymi w rozdziale 3, za punkt wyjścia w sieciach prądu trójfazowego uznane jest napięcie fazowe, tzn. napięcie pomiędzy zaciskiem fazowym (rys. 3.5, szczegół A, B lub C) a zaciskiem neutralnym (rys. 3.5, szczegół N).

**Zadanie:** Proszę uzupełnić brakujące parametry w tabeli 6.35 dla układu trójfazowego jak na rys. 6.25. Następnie w kolumnie „Uwagi” wpisać, czy wszystkie parametry w danym wierszu są zgodne z normą. W przypadku gdy chociaż jeden parametr (w danym wierszu tabeli w kolumnach 2-13) jest niezgodny, proszę uzasadnić.



**Rys. 6.25.** Wykres wektorowy napięć fazowych i międzyszczytowych źródła, gdzie:  $\varphi_{CA}$ ,  $\varphi_{CA}$ ,  $\varphi_{CA}$  – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorami napięciowymi; N – punkt neutralny (zerowy);  $U_{AN}$ ,  $U_{BN}$ ,  $U_{CN}$  – wartość skuteczna napięć fazowych;  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  – wartość skuteczna napięć przewodowych (międzyszczytowych); A, B, C – zaciski fazowe

Tabela 6.35

Parametry nieobciążonej prądnicy trójfazowej prądu przemiennego

Lp.	$U_{AN}$	$U_{BN}$	$U_{CN}$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{ANpp}$	$U_{BNpp}$	$U_{CNpp}$	$\varphi_{AB}$	$\varphi_{BC}$	$\varphi_{CA}$	Uwagi
	V	V	V	V	V	V	V	V	V	°	°	°	
1.	98	98	98							120	120		14
2.	100	100	100							120	120		
3.	102	102	102							120	120		
4.	104	104	104							120	120		
5.	106	106	106							120	120		
6.	108	108	108							120	120		
7.	110	110	110							120	120		
8.	112	112	112							125		120	
9.	114	114	114							125		120	
10.	116	116	116							125		120	
11.	118	118	118							125		120	
12.	120	120	120							125		120	
13.	122	122	122							125		120	
14.	124	124	124							123		120	
15.	126	126	126							123		120	
16.	128	128	128							123		120	
17.	130	130	130							122		120	
18.	132	132	132							122		120	
19.	134	134	134							121		120	
20.	136	136	136							121		120	

6.3.2.2. Prawa Ohma i Kirchhoffa dla obwodu trójfazowego prądu przemiennego

Jednofazowe prądnice prądu przemiennego stosuje się tylko przy niewielkich mocach (rzędu 8 kVA), a i to zwykle mają strukturę trójfazową uzwojeń z wykorzystaniem dwóch faz. Obecnie na pokładach statków powietrznych montuje się tylko prądnice trójfazowe, gdyż umożliwiają uzyskanie większej sprawności energetycznej.

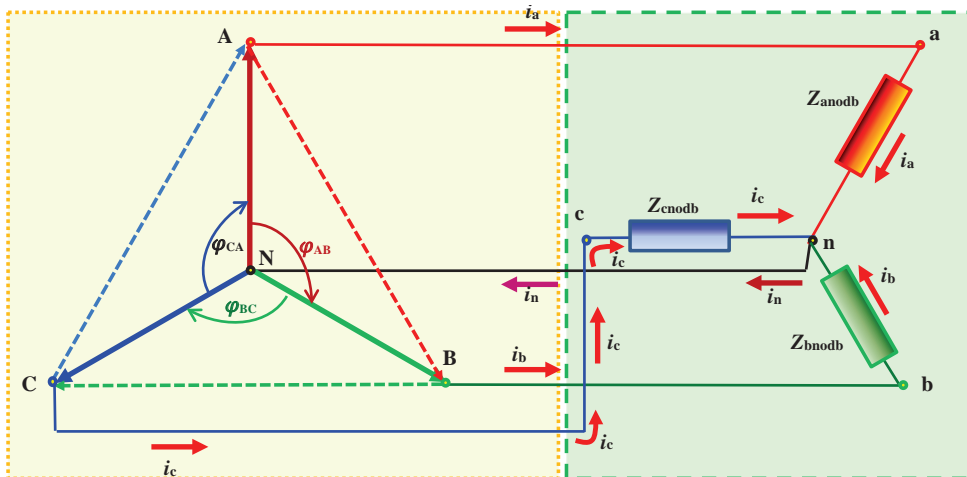
W poprzednim zadaniu należało obliczyć tylko dane formalne, przekształcając napięcie fazowe na międzyprzewodowe, wartość skuteczną na międzyszczytowa itp. W tym punkcie należy powtórzyć wcześniej wykonywane obliczenia dotyczące obwodu jednofazowego dla struktury trójfazowej. Wymagają one zarówno większej wyobraźni przestrzennej, jak też oczywiście znajomości praw elektrotechniki.

Należy wstępnie pamiętać, że przesunięcie fazowe pomiędzy wektorami fazowymi dla nieobciążonej prądnicy wynosi:



$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = 0 \quad (6.15)$$

Jeśli dla stanu jałowego prądnicy powyższy warunek nie jest spełniony, oznacza to, iż doszło do poważnego uszkodzenia wewnętrznego prądnicy. Jeśli jednak w stanie jałowym przesunięcie fazowe będzie spełniało wymagania normatywne, np. w normalnych warunkach zasilania przesunięcie pomiędzy wektorami napięć fazowych  $\varphi = 120^\circ \pm 3^\circ$ , to zapewne prądnica jest sprawna, a powodem przekroczenia przesunięcia fazowego jest niezrównoważenie obciążeń w poszczególnych fazach. Wówczas też w przewodzie zerowym pojawia się prąd wyrównawczy (rys. 6.26, szczególnie  $i_n$ ).



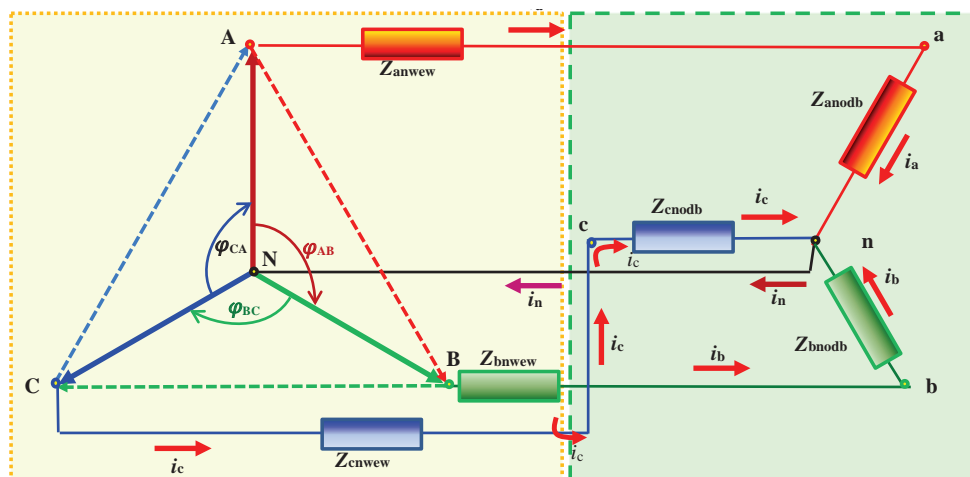
**Rys. 6.26.** Prądnica „idealna” (impedancja wewnętrzna pomijalnie mała) i odbiornik trójfazowy, gdzie: A, B, C – zaciski fazowe;  $\varphi_{CA}$ ,  $\varphi_{CA}$ ,  $\varphi_{CA}$  – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorami napięciowymi; N – punkt neutralny (zerowy) prądnicy; A, B, C – zaciski fazowe prądnicy; a, b, c – zaciski fazowe trójfazowego odbiornika energii elektrycznej; n – punkt neutralny (zerowy) trójfazowego odbiornika energii elektrycznej;  $Z_{an}$ ,  $Z_{bn}$ ,  $Z_{cn}$  – wartość impedancji poszczególnych faz trójfazowego odbiornika energii elektrycznej;  $i_{an}$ ,  $i_{bn}$ ,  $i_{cn}$  – wartość natężenia prądu w poszczególnych fazach trójfazowego odbiornika energii elektrycznej;  $i_n$  – wartość natężenia prądu wyrównawczego (płynącego w przewodzie zerowym) pomiędzy punktami neutralnymi prądnicy (N) i odbiornika (n)

Wartość tego prądu spełnia I prawo Kirchhoffa.

Praktycznie biorąc, aby obliczyć wartości napięć i prądów układu trójfazowego (prądnica + odbiornik trójfazowy), na każdym wektorze napięć fazowych źródła napięcia trójfazowego powinno się ustawić osobny układ współrzędnych prosto-

kątnych zespolonych, i wówczas dopiero rysować wektory napięć. Dla początkujących korzystne jest wręcz rozpatrywanie każdej fazy osobno, podanie położenia wektorów napięć w postaci wykładniczej i dopiero po obliczeniu wypadkowych wektorów napięć łączenie tych wektorów (w postaci algebraicznej lub graficznej) w układ trójfazowy.

Należy też pamiętać, że podobnie jak dla prądnic jednofazowych każda faza ma swoją impedancję wewnętrzną (zwykle o charakterze indukcyjnym), na której odkłada się pewna wartość napięcia przy podłączeniu obciążenia (rys. 6.27).



**Rys. 6.27.** Prądnica „rzeczywista” (z uwzględnieniem impedancji wewnętrznej) i odbiornik trójfazowy, gdzie: A, B, C – zaciski fazowe;  $\varphi_{CA}$ ,  $\varphi_{CA}$ ,  $\varphi_{CA}$  – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorami napięciowymi; N – punkt neutralny (zerowy) prądnicy; A, B, C – zaciski fazowe prądnicy;  $Z_{anwew}$ ,  $Z_{bnwew}$ ,  $Z_{cnwew}$  – wartość impedancji wewnętrznych poszczególnych faz prądnicy trójfazowej; a, b, c – zaciski fazowe trójfazowego odbiornika energii elektrycznej; n – punkt neutralny (zerowy) trójfazowego odbiornika energii elektrycznej;  $Z_{anodb}$ ,  $Z_{bnodb}$ ,  $Z_{cnodb}$  – wartość impedancji poszczególnych faz trójfazowego odbiornika energii elektrycznej;  $i_{an}$ ,  $i_{bn}$ ,  $i_{cn}$  – wartość natężenia prądu w poszczególnych fazach trójfazowego odbiornika energii elektrycznej;  $i_n$  – wartość natężenia prądu wyrównawczego (płynącego w przewodzie zerowym) pomiędzy punktami neutralnymi prądnicy (N) i odbiornika (n)

W tym zakresie na wstępie należy rozpatrzeć prądnicę trójfazową o wartościach sił elektromotorycznych, czyli trzech wektorach rozstawionych co  $120^\circ$ , przedstawiających trzy wektory fazowe SEM prądnicy trójfazowej (6.16), analogicznie jak na prezentowanym rys. 6.27:

$$E_{AN} \cdot e^{-(j\omega t + \varphi_{ANo})} + E_{BN} \cdot e^{-(j\omega t + \varphi_{BNo})} + E_{CN} \cdot e^{-(j\omega t + \varphi_{CNo})} \quad (6.16)$$

gdzie, zgodnie z rys. 6.27:

$$\varphi_{ANo} = 0^\circ,$$

$$\varphi_{BNo} = -120^\circ,$$

$$\varphi_{CNo} = +120^\circ.$$

Należy też pamiętać, że każdy z wektorów SEM musi pokryć zapotrzebowanie energetyczne zarówno impedancji wewnętrznej, jak i impedancji zewnętrznej (prawo Ohma dla obwodu zamkniętego) – rys. 6.28. Inaczej mówiąc, każdy wektor SEM fazowego musi być sumą geometryczną spadku napięcia na impedancji wewnętrznej i spadku napięcia na impedancji zewnętrznej (impedancji łącznej obciążenia prądnicy). Podobne rozważania prowadzone były dla obwodu jednofazowego w podrozdziale 6.2.2.2 (na rys. 6.8 SEM źródła jednofazowego jest sumą spadków napięć na trzech impedancjach).

W niniejszych rozważaniach ograniczono liczbę impedancji do dwóch, tj. impedancji wewnętrznej źródła i jednego odbiornika trójfazowego (rys. 6.27). Zatem, z prawa Ohma dla obwodu zamkniętego, otrzymać można dla każdej z faz:

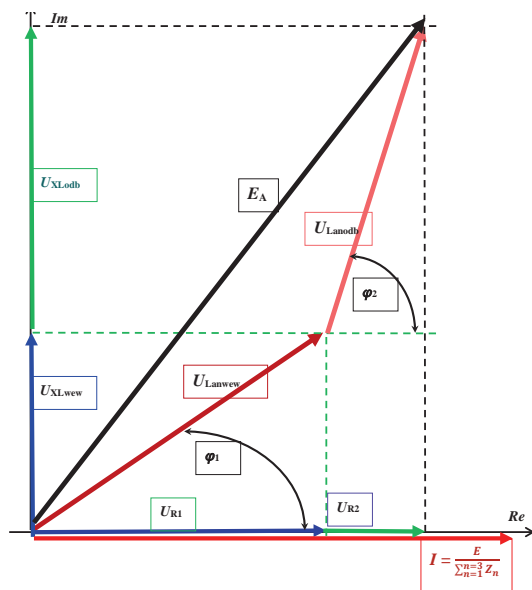
$$E_{AN} \cdot e^{-(j\omega t + 0^\circ)} = i_a \cdot U_{wew} \cdot e^{-(j\omega t + 0^\circ + \varphi_{ANwew})} + i_a \cdot U_{odb} \cdot e^{-(j\omega t + 0^\circ + \varphi_{anodb})} \quad (6.17)$$

$$E_{BN} \cdot e^{-(j\omega t + 120^\circ)} = i_a \cdot U_{wew} \cdot e^{-(j\omega t + 120^\circ + \varphi_{BNwew})} + i_a \cdot U_{odb} \cdot e^{-(j\omega t + 120^\circ + \varphi_{bnodb})} \quad (6.18)$$

$$E_{CN} \cdot e^{-(j\omega t - 120^\circ)} = i_a \cdot U_{wew} \cdot e^{-(j\omega t - 120^\circ + \varphi_{CNwew})} + i_a \cdot U_{odb} \cdot e^{-(j\omega t - 120^\circ + \varphi_{cnodb})} \quad (6.19)$$

Tak więc dla każdej z faz obciążonej odbiornikiem o charakterze indukcyjnym pierwotny (wynikający z geometrii ustawienia mocowania uzwojeń twornika (na obudowie prądnicy trójfazowej) wektor napięcia fazowego dozna obrotu fazowego (w kierunku przeciwnym do kierunku obrotu wskazówek zegara) z powodu przesunięć fazowych wynikających z:

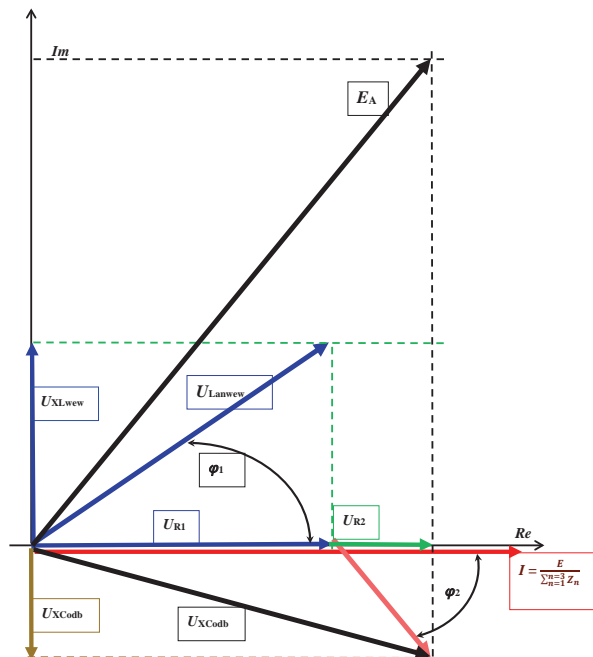
- a) przesunięcia fazowego na oporności biernej indukcyjnej uzwojenia prądnicy,
- b) przesunięcia fazowego na oporności biernej indukcyjnej odbiornika.



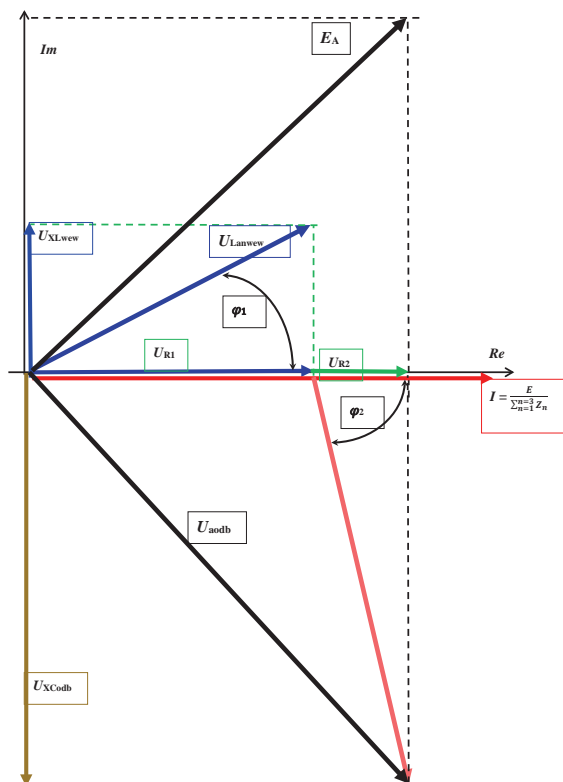
**Rys. 6.28.** Prądnicą i odbiornik trójfazowy o charakterze indukcyjnym w postaci wektorów napięć fazowych dla fazy A, gdzie:  $E_A$  – siła elektromotoryczna wytwarzana w fazie A prądnicą;  $U_{Lanwew}$  – spadek napięcia na impedancji wewnętrznej fazy A prądnicą;  $U_{R1}$  – spadek napięcia na składowej czynnej (rezystancji) impedancji wewnętrznej fazy A prądnicą;  $U_{XLwew}$  – spadek napięcia na składowej biernej (indukcyjnej) impedancji wewnętrznej fazy A prądnicą;  $\varphi_1$  – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorem prądu a wektorem napięciowym uzwojenia prądnicą (dla fazy A) tu także pomiędzy składową czynną a składową bierną impedancji uzwojeń fazy A prądnicą;  $U_{Lanodb}$  – spadek napięcia na impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej;  $U_{R2}$  – spadek napięcia na składowej czynnej (rezystancji) impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej;  $U_{XLodb}$  – spadek napięcia na składowej biernej (indukcyjnej) impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej;  $\varphi_2$  – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorem prądu a wektorem napięciowym odbiornika energii elektrycznej (dla fazy A) tu także pomiędzy składową czynną a składową bierną impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej

Należy również rozważyć, co się będzie działo z przesunięciami fazowymi przy obciążeniu trójfazowym o charakterze pojemnościowym. W literaturze dotyczącej energetycznych linii przesyłowych przewija się problem kompensacji mocy biernej indukcyjnej poprzez dołączanie „kontrujać” je pojemności fazowej (rys. 6.29). Wówczas w przewodach elektrycznych płynie tylko energia użyteczna bez składowej biernej i przewody przesyłowe są mniej przeciążane. Bardzo przypomina to uzyskiwanie stanu rezonansu napięć (tj. znoszenie się składowej biernej elektrycznej cewki indukcyjnej ze składową bierną kondensatora – rys. 2.23) w układzie sze-

regowym RLC, omawiane w punkcie 6.2.1.2. Wówczas płynie prąd o największej wartości, jednocześnie napięcia na kondensatorze oraz na cewce indukcyjnej są także największe (ale o przeciwnych znakach) – rys. 6.30 – często przewyższające SEM źródła. Relacje te zostały omówione w podrozdziałach 2.3.1 oraz 6.2.1.2.



**Rys. 6.29.** Prądnica i odbiornik trójfazowy o charakterze pojemnościowym częściowo kompensujący składową bierną indukcyjną (uzwojeń prądnicy) w postaci wektorów napięć fazowych dla fazy A, gdzie:  $E_A$  – siła elektromotoryczna wytwarzana w fazie A prądnicy;  $U_{Lanwew}$  – spadek napięcia na impedancji wewnętrznej fazy A prądnicy;  $U_{R1}$  – spadek napięcia na składowej czynnej (rezystancji) impedancji wewnętrznej fazy A prądnicy;  $U_{XLwew}$  – spadek napięcia na składowej biernej (indukcyjnej) impedancji wewnętrznej fazy A prądnicy;  $\varphi_1$  – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorem prądu a wektorem napięciowym uzwojenia prądnicy (dla fazy A) tu także pomiędzy składową czynną a składową bierną impedancji uzwojeń fazy A prądnicy;  $U_{Lanodb}$  – spadek napięcia na impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej;  $U_{R2}$  – spadek napięcia na składowej czynnej (rezystancji) impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej;  $U_{XCodb}$  – spadek napięcia na składowej biernej (pojemnościowej) impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej;  $\varphi_2$  – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorem prądu a wektorem napięciowym odbiornika energii elektrycznej (dla fazy A) tu także pomiędzy składową czynną a składową bierną impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej;  $U_{odb}$  – napięcie fazowe na zaciskach odbiornika (pojemnościowego) fazy A



**Rys. 6.30.** Prądnicą i odbiornik trójfazowy o charakterze pojemnościowym przekompensowany w postaci wektorów napięć fazowych dla fazy A – spadek napięcia na odbiorniku (pomimo spadku napięcia na impedancji wewnętrznej prądnic) jest większy niż SEM prądnic, gdzie:  $E_A$  – siła elektromotoryczna wytwarzana w fazie A prądnic;  $U_{Lanwew}$  – spadek napięcia na impedancji wewnętrznej fazy A prądnic;  $U_{R1}$  – spadek napięcia na składowej czynnej (rezystancji) impedancji wewnętrznej fazy A prądnic;  $U_{XLwew}$  – spadek napięcia na składowej biernej (indukcyjnej) impedancji wewnętrznej fazy A prądnic;  $\varphi_1$  – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorem prądu a wektorem napięciowym uzwojenia prądnic (dla fazy A) tu także pomiędzy składową czynną a składową bierną impedancji uzwojeń fazy A prądnic;  $U_{Lanodb}$  – spadek napięcia na impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej;  $U_{R2}$  – spadek napięcia na składowej czynnej (rezystancji) impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej;  $U_{XCodb}$  – spadek napięcia na składowej biernej (pojemnościowej) impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej;  $\varphi_2$  – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorem prądu a wektorem napięciowym odbiornika energii elektrycznej (dla fazy A) tu także pomiędzy składową czynną a składową bierną impedancji fazy A odbiornika energii elektrycznej;  $U_{odb}$  – napięcie fazowe na zaciskach odbiornika (pojemnościowego) fazy A

Bardzo ciekawy jest, znany z literatury [169, 170] dotyczącej energetycznych linii przesyłowych, przypadek obciążenia o charakterze pojemnościowym przy znaczącej rezystancji przewodów. Jak już sygnalizowano w punkcie 4.3.1.1 niniejszej monografii, takie obciążenie, często obserwowane w przypadku długich, krajowych i międzynarodowych, linii przesyłowych, powoduje podbicia napięcia wynikające ze składowej biernej pojemności pomiędzy linią a ziemią oraz z pojemności fazowej odbiorników. Co więcej przy odłączaniu odbiornika trójfazowego o znacznych pojemnościach powstają znaczne przepięcia. Przepięcia są tym wyższe, im wyższą pojemność ma odbiornik na końcu linii przesyłowej. Jest to intuicyjnie zrozumiałe z uwagi na to, że kondensatory gromadzą ładunek elektryczny i z opóźnieniem go oddają. Podczas stanów ustalonych jest podobnie (rys. 6.29): kiedy składowa bierna pojemnościowa obciążenia (łącznie z pojemnością linii przesyłowej) przewyższa składową bierną indukcyjną prądnicy (generatora), następuje tzw. przekompensowanie układu i napięcie fazowe na odbiorniku przewyższa napięcie fazowe na prądnicy (rys. 6.30).

**Zadanie:** proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć w obwodzie jak na rys. 6.27, korzystając z rachunku liczb zespolonych. Proszę również obliczyć brakujące wartości w tabelach 6.36–6.38.

Algorytm postępowania:

1. Obliczyć impedancję danej fazy.
2. Obliczyć natężenie prądu każdej z faz.
3. Obliczyć spadek napięcia na odbiorniku – ocenić, czy spełnia wymagania normatywne:
  - a) asymetria napięć fazowych, np. w warunkach normalnego zasilania dla „nowej” techniki wojskowej  $\Delta U \leq 3 \text{ V}$ , dla „starej” techniki wojskowej  $\Delta U \leq 4 \text{ V}$ ,
  - b) asymetria obciążeń prądowych pomiędzy fazami, jeśli producent prądnicy nie podaje inaczej, zwykle dopuszcza się asymetrię nie większą niż 10% średniego prądu fazowego.
4. Obliczyć przesunięcia fazowe na odbiornikach – ocenić względne przesunięcie fazowe pomiędzy wektorami spadku napięcia na impedancji poszczególnych napięć fazowych odbiorników, ocenić czy parametry spełniają wymagania normatywne (w warunkach normalnego zasilania odchylenie od równomiernego przesunięcia  $120^\circ$  wynosi  $\pm 3^\circ$ ).
5. Obliczyć prąd w przewodzie zerowym, zazwyczaj przyjmuje się dla lotniczych sieci trójfazowych, że nie powinien przekraczać 50% natężenia uśrednionego prądu fazowego.

**Tabela 6.36**

Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego z zastosowaniem liczb zespolonych przy impedancji wewnętrznej i zewnętrznej o charakterze indukcyjnym, o module impedancji wewnętrznej źródła równej impedancji obciążenia dla fazy AN obwodu trójfazowego

	$E$	$Z_{aneww}$				$U_{aneww}$				$I$	$Z_{anodb}$				$U_{anodb}$			
		a	jb	Mo- dul	$\varphi$	a	jb	Mo- dul	$\varphi$		a	jb	Mo- dul	$\varphi$	a	jb	Mo- dul	$\varphi$
	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$^{\circ}$	V	V	V	A	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$^{\circ}$	V	V	V	$^{\circ}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1.	18	0,5	0,5							0,5	0,5							
2.	20	0,45	0,45							1	1							
3.	22	0,4	0,4							1,5	1,5							
4.	24	0,35	0,35							2	2							
5.	27	0,3	0,3							2,5	2,5							
6.	18	0,25	0,25							3	3							
7.	20	0,5	0,5							3,5	3,5							
8.	22	0,45	0,45							4	4							
9.	24	0,4	0,4							4,5	4,5							
10.	27	0,35	0,35							5	5							
11.	18	0,3	0,3							5,5	5,5							
12.	20	0,25	0,25							6	6							
13.	22	0,5	0,5							6,5	6,5							
14.	24	0,45	0,45							7	7							
15.	27	0,4	0,4							7,5	7,5							
16.	12	0,35	0,35							8	8							
17.	16	0,3	0,3							8,5	8,5							
18.	18	0,95	0,30							0,95	0,30							





**Tabela 6.37**

**Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego z zastosowaniem liczb zespolonych przy impedancji wewnętrznej i zewnętrznej o charakterze indukcyjnym, o module impedancji wewnętrznej źródła równej impedancji obciążenia dla fazy BN obwodu trójfazowego**

Lp.	E		Zbnwew				Ubnwew			I	Zbnodb				Ubnodb					
	V	Ω	a	jb	Mo- dul	φ	a	jb	Mo- dul		φ	a	jb	Mo- dul	φ	a	jb	Mo- dul	φ	
1	2	3	4	5	6	0	7	8	9	10	A	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1.	18	0,5	0,5										0,5	0,5						
2.	20	0,45	0,45										1	1						
3.	22	0,4	0,4										1,5	1,5						
4.	24	0,35	0,35										2	2						
5.	27	0,3	0,3										2,5	2,5						
6.	18	0,25	0,25										3	3						
7.	20	0,5	0,5										3,5	3,5						
8.	22	0,45	0,45										4	4						
9.	24	0,4	0,4										4,5	4,5						
10.	27	0,35	0,35										5	5						
11.	18	0,3	0,3										5,5	5,5						
12.	20	0,25	0,25										6	6						
13.	22	0,5	0,5										6,5	6,5						
14.	24	0,45	0,45										7	7						
15.	27	0,4	0,4										7,5	7,5						
16.	12	0,35	0,35										8	8						
17.	16	0,3	0,3										8,5	8,5						
18.	18	0,95	0,30										0,95	0,30						



**Tabela 6.38**

Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego z zastosowaniem liczb zespolonych przy impedancji wewnętrznej i zewnętrznej o charakterze indukcyjnym, o module impedancji wewnętrznej źródła równy impedancji obciążenia dla fazy CN obwodu trójfazowego

Lp.	E		Z <sub>enwew</sub>				U <sub>enwew</sub>				I	Z <sub>enadb</sub>				U <sub>enadb</sub>			
	V	Ω	a	jb	Mo- dul	φ	a	jb	Mo- dul	φ		a	jb	Mo- dul	φ	a	jb	Mo- dul	φ
1	2	3	4	5	6	10	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1.	18	0,5	0,5								0,5	0,5							
2.	20	0,45	0,45								1	1							
3.	22	0,4	0,4								1,5	1,5							
4.	24	0,35	0,35								2	2							
5.	27	0,3	0,3								2,5	2,5							
6.	18	0,25	0,25								3	3							
7.	20	0,5	0,5								3,5	3,5							
8.	22	0,45	0,45								4	4							
9.	24	0,4	0,4								4,5	4,5							
10.	27	0,35	0,35								5	5							
11.	18	0,3	0,3								5,5	5,5							
12.	20	0,25	0,25								6	6							
13.	22	0,5	0,5								6,5	6,5							
14.	24	0,45	0,45								7	7							
15.	27	0,4	0,4								7,5	7,5							
16.	12	0,35	0,35								8	8							
17.	16	0,3	0,3								8,5	8,5							
18.	18	0,95	0,30								0,95	0,30							

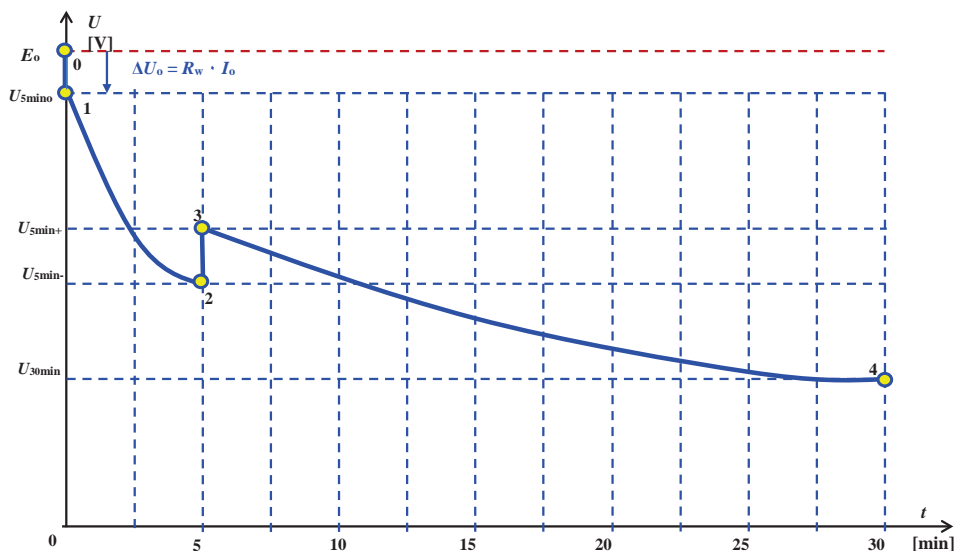


## 6.4. Zadania związane z eksploatacją i konstrukcją baterii elektrycznych

### 6.4.1. Współdziałanie baterii akumulatorowych z siecią pokładową prądu stałego

#### 6.4.1.1. Praca baterii akumulatorowej w czasie awarii podstawowego źródła zasilania prądu stałego

W podrozdziale 4.6 omówiono zagadnienia związane z rolą i przeznaczeniem baterii lotniczej na pokładach statków powietrznych. Bardzo ważną funkcją jest zagwarantowanie zasilania w sytuacji awaryjnej, gdy prądnice pokładowe ulegną awarii. Zgodnie z przepisami [141] pilot powinien w ciągu 5 min odłączyć wszystkie odbiorniki energii elektrycznej, które w danych warunkach nie są niezbędne do bezpiecznego powrotu do najbliższego lotniska. Łączny czas pracy baterii zapewniający utrzymanie wartości napięcia na zaciskach odbiorników nie mniej niż 18 V nie może być krótszy niż 30 min (rys. 6.31).



**Rys. 6.31.** Przebieg zmian napięcia na zaciskach odbiorników w czasie wyładowywania energii elektrycznej pokładowej baterii akumulatorowej – rysunek poglądowy

Podczas symulacji matematycznej powyższej sytuacji awaryjnej należy uwzględnić rezystancję wewnętrzną akumulatora. Ogólnie rzecz biorąc, rezystan-

cja wewnętrzna ogniwa akumulatorowego kwasowego jest odwrotnie proporcjonalna do pojemności [208]. Obowiązuje tu wzór empiryczny:

$$r_w = \frac{k}{Q} \quad (6.20)$$

gdzie:  $r_w$  – wewnętrzna rezystancja pojedynczego ogniwa akumulatorowego [ $\Omega$ ],  $k$  – współczynnik rezystancji wewnętrznej [ $\Omega \cdot \text{Ah}$ ],  $Q$  – pojemność ogniwa.

Tak więc im większa jest pojemność ogniwa, tym mniejsza jest jego rezystancja. Całkowita rezystancja akumulatora złożonego z  $n$  ogniw wynosi:

$$R_{wa} = \sum_{i=1}^{i=n} r_{wi} \quad (6.21)$$

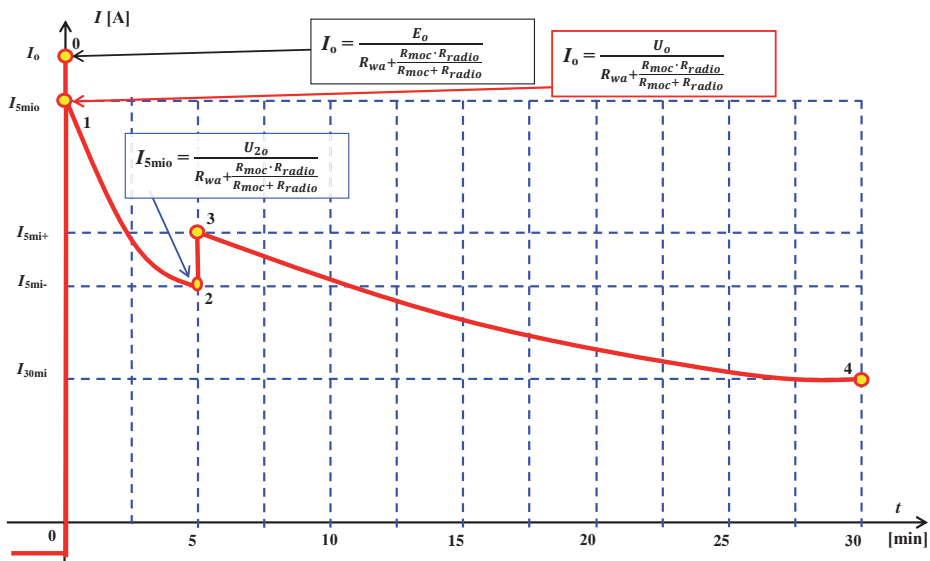
W podrozdziale 4.6.7 omówiono charakterystyki akumulatorów kwasowych. Wzór (4.63) przedstawia uniwersalną formę obliczania pojemności elektrycznej pokładowej baterii elektrycznej – może być wyrażona w postaci całki, czyli inaczej biorąc pola powierzchni pod krzywą (monotonicznie zmniejszającego się) natężenia prądu rozładowania w obwodzie elektrycznym (rys. 6.32–6.34). Pole to jest miarą ubytku pojemności pokładowej baterii akumulatorowej w czasie wyładowywania energii elektrycznej. Jeśli nie znamy dokładnych charakterystyk rozładowania, do celów praktycznych można zastosować metodę iteracyjną, tj. obliczanie dla małych przyrostów czasu, np. co 0,5 min, ubytku pojemności (rys. 6.33) i wyznaczania dla kolejnego przyrostu czasu bieżącej pojemności, ze wzoru:

$$Q_i = Q_{i-1} - (I_{i-1} \cdot \Delta t_{i-1}) \quad (6.22)$$

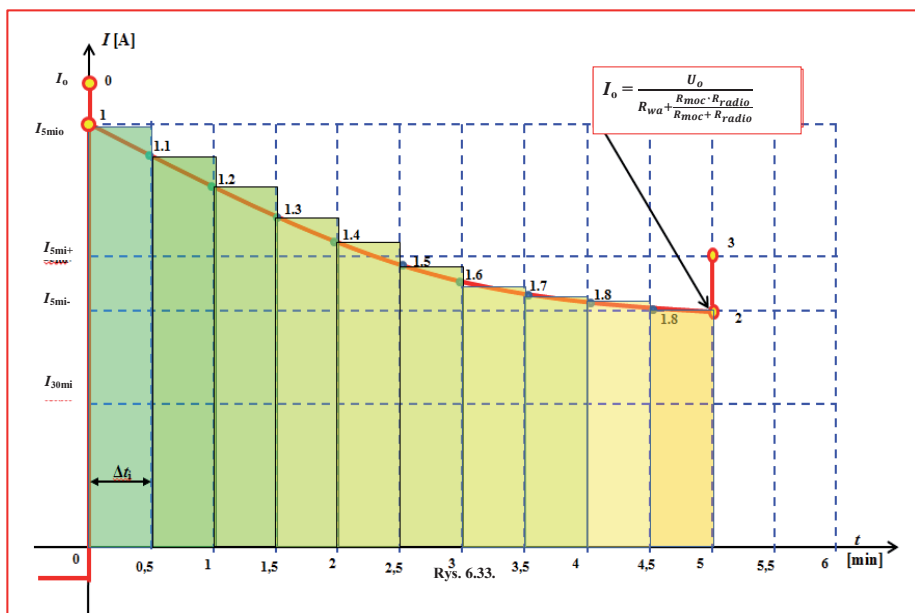
gdzie:  $Q_i$  – pojemność ogniwa w rozpatrywanym  $i$ -tym odcinku czasu,  $Q_{i-1}$  – ubytek pojemności w poprzednim (w stosunku do rozpatrywanego) odcinku czasu,  $I_{i-1}$  – natężenie prądu wyładowania ogniwa (lub baterii akumulatorowej) w poprzednim (w stosunku do rozpatrywanego) odcinku czasu,  $\Delta t_{i-1}$  – przyrost czasu wyrażony wzorem:

$$\Delta = t_i - t_{i-1} \quad (6.23)$$

W niniejszym zadaniu zakładamy pomijalnie małą rezystancję przewodów połączeniowych, tj. że napięcie na zaciskach pokładowej baterii akumulatorowej jest równe napięciu na zaciskach odbiorników energii elektrycznej.

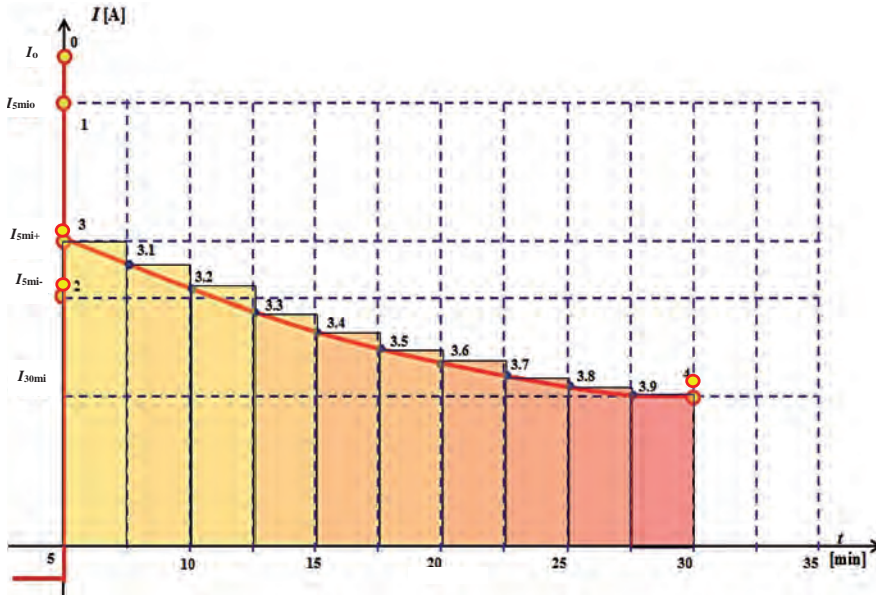


Rys. 6.32. Przebieg zmian natężenia prądu w czasie wyladowywania energii elektrycznej pokładowej baterii akumulatorowej



Rys. 6.33. Przebieg zmian natężenia prądu w czasie wyladowywania energii elektrycznej pokładowej baterii akumulatorowej i obliczanie ubytku pojemności dla czasu trwania I etapu rozładowania (pierwsze 5 min od wystąpienia awarii) zliczanie iteracyjne z krokiem co 0,5 min





**Rys. 6.34.** Przebieg zmian natężenia prądu w czasie wyładowywania energii elektrycznej pokładowej baterii akumulatorowej i obliczanie ubytku pojemności dla czasu trwania II etapu rozładowania (od 5 do 30 min od wystąpienia awarii) zliczanie iteracyjne z krokiem co 2,5 min

**Zadanie 1:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć na zaciskach odbiorników (na szynie podwójnego zasilania), jeżeli rezystancje obciążenia mocy (niekonieczne do lotu w warunkach awaryjnych)  $R_{moc}$  oraz rezystancje odbiorników niezbędnych do bezpiecznego lądowania  $R_{radio}$  przyjmą parametry jak w tabeli 6.39. Proszę obliczyć i narysować przebieg zmian wartości napięcia na szynie podwójnego zasilania, tu: na zaciskach zasilania odbiorników niezbędnych do bezpiecznego lotu, i ocenić, czy bateria akumulatorowa w stanie naładowania spełnia wymagania bezpieczeństwa.

Rozpatrywana bateria składa się z 12 ogniw połączonych szeregowo i ma pojemność znamionową  $Q_N = 28$  Ah oraz zróżnicowany poziom naładowania  $Q_0$  w chwili wystąpienia awarii. Dla ułatwienia przyjmujemy, że w czasie wyładowywania energii zgromadzonej w ogniwach akumulatorowych ich rezystancja wewnętrzna nie ulega zmianie. Wartość napięcia bez obciążenia na zaciskach baterii na początku rozpatrywanego procesu ma wartość  $E_0$ . Zakładamy, że w procesie rozładowywania SEM nie ulega zmianie. Pojemność początkowa baterii i jednocześnie pojedynczego ogniwa wynosi  $Q_0$  (patrz tabela 6.40, kolumna 2).

Należy obliczyć wartość pojemności  $Q_0$ , napięcia na zaciskach odbiorników, zakładając stabilną wartość I etapu rozładowania i oddzielnie:

- 1) rezystancję wewnętrzną poszczególnych ogniw oraz rezystancję 12 ogniw połączonych szeregowo,
- 2) uderzeniowe natężenie prądu  $I_o$  w chwili awarii,
- 3) natężenie prądu w stanie ustalonym,
- 4) napięcie na zaciskach odbiorników  $U_1$  – na początku awarii, tj. na początku (trwającego 5 min) okresu, kiedy włączone są wszystkie odbiorniki energii elektrycznej, załączone są zarówno odbiorniki mocy ( $R_{moc}$ ), jak i odbiorniki niezbędne do bezpiecznego lądowania ( $R_{radio}$ ),
- 5) ubytek pojemności w baterii  $\Delta Q_{5mi}$  – pod koniec (trwającego 5 min) okresu, kiedy włączone są wszystkie odbiorniki energii elektrycznej, załączone są zarówno odbiorniki mocy ( $R_{moc}$ ), jak i odbiorniki niezbędne do bezpiecznego lądowania ( $R_{radio}$ ),
- 6) pojemność baterii  $Q_{5mi}$  – pod koniec (trwającego 5 min) okresu, kiedy włączone są wszystkie odbiorniki energii elektrycznej, załączone są zarówno odbiorniki mocy ( $R_{moc}$ ), jak i odbiorniki niezbędne do bezpiecznego lądowania ( $R_{radio}$ ),
- 7) natężenie prądu  $I_{5min+}$  przy obciążeniu baterii przez odbiorniki niezbędne do bezpiecznego lądowania ( $R_{radio}$ ),
- 8) napięcie na zaciskach odbiorników  $U_{5min+}$  przy obciążeniu baterii przez odbiorniki niezbędne do bezpiecznego lądowania ( $R_{radio}$ ),
- 9) ubytek pojemności w baterii  $\Delta Q_{5-30mi}$  w II etapie rozładowania, tj. przy obciążeniu baterii przez odbiorniki niezbędne do bezpiecznego lądowania ( $R_{radio}$ ),
- 10) pojemność baterii  $Q_{30mi}$  – po 30 min od wystąpienia awarii.

**Tabela 6.39**  
**Obliczenia charakterystyki rozładowania 12-ogniowej lotniczej baterii akumulatorowej kwasowej w warunkach awaryjnego zasilania – dane**

I.p.	$Q_0$	$E_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	$k_9$	$k_{10}$	$k_{11}$	$k_{12}$	$R_{\text{innc}}$	$R_{\text{radio}}$
	Ah	V	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega \cdot \text{Ah}$	$\Omega$	$\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1.	30	30	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,11	0,11	0,11	0,11	0,3	4
2.	30	29	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,11	0,11	0,11	0,11	0,03	0,3	4
3.	30	28	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,11	0,11	0,11	0,11	0,04	0,03	0,3	4
4.	30	27	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,11	0,11	0,11	0,11	0,05	0,04	0,03	0,3	4
5.	30	26	0,1	0,09	0,08	0,07	0,11	0,11	0,11	0,11	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
6.	30	25	0,1	0,09	0,08	0,11	0,11	0,11	0,11	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
7.	30	24	0,1	0,09	0,11	0,11	0,11	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
8.	28	30	0,1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
9.	28	29	0,11	0,11	0,11	0,11	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
10.	28	28	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,11	0,11	0,11	0,11	0,3	4
11.	28	27	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,11	0,11	0,11	0,11	0,03	0,3	4
12.	28	26	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,11	0,11	0,11	0,11	0,04	0,03	0,3	4
13.	28	25	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,11	0,11	0,11	0,11	0,05	0,04	0,03	0,3	4
14.	28	24	0,1	0,09	0,08	0,07	0,11	0,11	0,11	0,11	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
15.	28	23	0,1	0,09	0,08	0,11	0,11	0,11	0,11	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
16.	26	27	0,1	0,09	0,11	0,11	0,11	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4

cd. tab. 6.39

Lp.	Q <sub>0</sub> Ah	E <sub>0</sub> V	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	k <sub>5</sub>	k <sub>6</sub>	k <sub>7</sub>	k <sub>8</sub>	k <sub>9</sub>	k <sub>10</sub>	k <sub>11</sub>	k <sub>12</sub>	R <sub>radio</sub>	
			Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah	Ω·Ah
17.	26	26	0,1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
18.	26	25	0,11	0,11	0,11	0,11	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
19.	26	24	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,11	0,11	0,11	0,11	0,3	4
20.	26	23	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,12	0,04	0,11	0,11	0,11	0,11	0,03	0,3	4
21.	26	22	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,11	0,11	0,11	0,11	0,04	0,03	0,3	4
22.	24	25	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,11	0,11	0,11	0,11	0,05	0,04	0,03	0,3	4
23.	24	24	0,1	0,09	0,08	0,07	0,11	0,11	0,11	0,11	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
24.	24	23	0,1	0,09	0,08	0,11	0,11	0,11	0,11	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
25.	24	22	0,1	0,09	0,11	0,11	0,11	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
26.	24	21	0,1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
27.	22	23	0,11	0,11	0,11	0,11	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,3	4
28.	22	22	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,11	0,11	0,11	0,11	0,3	4
29.	22	21	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,11	0,11	0,11	0,11	0,03	0,3	4
30.	22	20	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,11	0,11	0,11	0,11	0,04	0,03	0,3	4
31.	22	19	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,11	0,11	0,11	0,11	0,05	0,04	0,03	0,3	4

**Tabela 6.40**  
**Obliczenia charakterystyki rozładowania 12-ogniowej lotniczej baterii akumulatorowej kwasowej w warunkach awaryjnego zasilania pokładowej sieci elektroenergetycznej – wyniki obliczeń**

Lp.	Q <sub>a</sub>	E <sub>o</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>4</sub>	r <sub>5</sub>	r <sub>6</sub>	r <sub>7</sub>	r <sub>8</sub>	r <sub>9</sub>	r <sub>10</sub>	r <sub>11</sub>	r <sub>12</sub>	R <sub>w</sub>	I <sub>o</sub>	U <sub>o</sub>	I <sub>statek</sub>	U <sub>statek</sub>	Q <sub>statek</sub>	I <sub>statek</sub>	U <sub>statek</sub>	Q <sub>statek</sub>	Q <sub>statek</sub>	U <sub>wagi</sub>	
	Ah	V	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	A	V	A	V	Ah	A	V	Ah	%	%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1.	30	30																								
2.	30	29																								
3.	30	28																								
4.	30	27																								
5.	30	26																								
6.	30	25																								
7.	30	24																								
8.	28	30																								
9.	28	29																								
10.	28	28																								
11.	28	27																								
12.	28	26																								
13.	28	25																								
14.	28	24																								
15.	28	23																								
16.	26	27																								



Legenda do tabel 6.39 i 6.40:

- $r_1-r_{12}$  – rezystancja wewnętrzna kolejnych ogniw akumulatorowych,
- $R_w$  – rezystancja łączna pokładowej baterii akumulatorowej (12 ogniw połączonych szeregowo),
- $I_o$  – prąd początkowy pobierany z baterii w chwili wystąpienia awarii prądniczki pokładowej, tj. przejście na zasilanie pokładowej sieci elektroenergetycznej z pokładowej baterii akumulatorowej,
- $U_{5\min o}$  – napięcie na zaciskach odbiorników energii elektrycznej w chwili wystąpienia awarii prądniczki pokładowej, tj. przejście na zasilanie pokładowej sieci elektroenergetycznej z pokładowej baterii akumulatorowej,
- $I_{5\min -}$  – prąd pobierany z baterii po 5 min od wystąpienia awarii prądniczki pokładowej tuż przed wyłączeniem odbiorników mocy,
- $U_{5\min -}$  – napięcie na zaciskach odbiorników energii elektrycznej po 5 min od wystąpienia awarii prądniczki pokładowej tuż przed wyłączeniem odbiorników mocy,
- $I_{5\min +}$  – prąd pobierany z baterii po 5 min od wystąpienia awarii prądniczki pokładowej tuż po wyłączeniu odbiorników mocy,
- $U_{5\min +}$  – napięcie na zaciskach odbiorników energii elektrycznej po 5 min od wystąpienia awarii prądniczki pokładowej tuż po wyłączeniu odbiorników mocy,
- $I_{30\min}$  – prąd pobierany z baterii po 30 min od wystąpienia awarii prądniczki pokładowej,
- $U_{30\min}$  – napięcie na zaciskach odbiorników energii elektrycznej po 30 min od wystąpienia awarii prądniczki pokładowej.

#### **6.4.1.2. Praca baterii akumulatorowej jako wsparcie podstawowego źródła zasilania prądu stałego przy chwilowym wzroście zapotrzebowania prądowego**

Patrz zadania zawarte w punkcie poprzednim.

### **6.4.2. Bateria akumulatorowa jako obiekt obsługiwany**

#### **6.4.2.1. Wybrane parametry podstawowych typów baterii akumulatorowych**

W podrozdziale 4.6 opisano podstawowe typy i rodzaje baterii stosowanych na pokładach statków powietrznych. Podano tam maksymalne i znamionowe wartości poszczególnych typów i rodzajów lotniczych ogniw akumulatorowych, które stanowią pewien praktyczny odnośnik w czasie ich ładowania i rozładowywania w komplecie baterii akumulatorowej. Parametry te (wartości przybliżone do celów rozwiązywania zadań w niniejszej monografii) przedstawiono w tabeli 6.41.

Tabela 6.41

Zestawienie parametrów napięciowych podstawowych ogniw akumulatorowych

Lp.	Rodzaj ogniwa akumulatorowego	$U_{min}$	$U_N$	$U_{MAX}$	Wady	Zalety
		V	V	V		
1	Kwasowe	1,5	1,7	2,35	Poniżej $U_{min}$ może dojść do nieodwracalnego zasiar-czenia płyty; bardzo duży ciężar; źle znosi wysokie prądy wy-ladowania; ma najwyższą masę na jednostkę po-jemności; opary elektrolitu są bardzo agresywne w szczególności do włókien sztucznych (dobrze zabezpieczają przed kwasem tylko ubiory wełniane).	Bardzo wysoka sprawność elek-tryczna $\eta_{elektrum}$ od 80% do 90% dla wyładowania 5godzinnym prądem $I_5$ (druga pozycja po ba-teriach srebrowo-cynkowych); powyżej wartości prądu znacznie zmniejsza sprawność elektrycz-ną; niska cena (najniższa z wy-mienionych w tabeli).
2	Zasadowe kadmo-wo-niklowe, np. KSX-25P	0,75	1,10	1,25	Poniżej $U_{min}$ może dojść do przetarcia separatorów na skutek tworzenia się kryształów bezwodnika, tzw. dendrytów.	Wysoka trwałość, rzędu 3–5 lat i więcej; niska cena (po bateriach kwasowych).
3	Zasadowe srebro-wo-cynkowe, np. SCK-45B (MiG-29)	1,2	1,55	1,86	Niska trwałość, rzędu 100–150 cykli ładowania-wy-ladowania; okres eksploatacji najkrótszy z wymie-nionych w tabelicy, tu: ok. 12 miesięcy.	Niska masa (druga po litowo-jonowych, z prezentowanych w tabelicy) na jednostkę pojemno-ści – 4 razy lżejszy niż kwasowy.
4	Litowo-jonowe	2,75	3,6	4,3	W zasadzie nie można mówić o gazowaniu, gdyż „elektrolitem” jest tu żel (np. siarczan litu), który podczas przeładowania łatwo może ulec przegrza-niu, a nawet wybuchowemu paleniu, gdyż nie ma tu wodnego roztworu jak w innych bateriach, który stabilizuje tam temperaturę; wysoka cena (najwyż-sza z prezentowanych w tabelicy); konieczność stoso-wania elektroniki do pomiaru temperatury i sterowa-nia procesem ładowania i wyładowania baterii oraz systemem chłodzenia wymuszonego.	Bardzo niska masa na jednostkę pojemności – 2 razy lżejszy niż srebrowo-cynkowy; brak pozostłości pojemności (nieużytecznej, zwanej duktem), której nie można pobrać z baterii.



Należy jednocześnie wspomnieć, że większość firm produkujących lotnicze baterie akumulatorowe przyjęła następujące oznaczenia:

- 1) pierwsze cyfry oznaczają liczbę ogniw akumulatorowych baterii,
- 2) następne typ baterii,
- 3) na końcu pojemność znamionową baterii.

Przykładowo, bateria kadmowo-niklowa typu 20KXS-25 ma 20 ogniw (pierwsze cyfry przed oznaczeniem typu baterii) i pojemność znamionową 25 Ah (ostatnie dwie cyfry po typie baterii).

Ponadto, zgodnie z większością przepisów do lotu wolno dopuścić baterię, która podczas ostatniego kontrolnego rozładowania wykazała 80% pojemności znamionowej. Nie ma sztywnych przepisów na napięcie wyjściowe pokładowej baterii akumulatorowej, musi ona jednak zapewnić napięcie na swoich zaciskach od 24 V do 29,4 V. Jednocześnie napięcie lotniczej baterii akumulatorowej nie powinno być podczas rozładowania niższe niż 18 V (pod obciążeniem).

**Zadanie:** W oparciu o informacje zawarte w punkcie 6.4.2.1 proszę uzupełnić tabelę 6.42 dla rzeczywistych i fikcyjnych typów baterii akumulatorowych.

Tabela 6.42

Zestawienie parametrów baterii akumulatorowych

Lp.	Rodzaj baterii akumulatorowej	„Typ” baterii	„Typ” ogniwa	Pojemność znamionowa		Parametry ogniwa		Parametry baterii akumulatorowej			Uwagi
				$Q_N$ Ah	$Q_{Ah}$	$U_{min}$ V	$U_N$ V	$U_{MAX}$ V	$U_{min}$ V	$U_N$ V	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Kwasowe	12SAM-28	SAM28								
2	Kwasowe	12SEL-60	SEL-60								
3	Zasadowe kadmowo-niklowe	20XXX-55									
4	Zasadowe kadmowo-niklowe	20KSX-25P									
5	Zasadowe srebrowo-cynkowe, np. SCK-45B (MiG-29)	15SCS-45B	SCS-45B								
6	Zasadowe srebrowo-cynkowe			50							
7	Litowo-jonowe			40							W zasadzie nie można mówić o gazowaniu, gdyż „elektrolitem” jest tu żel (np. siarczan litu), który podczas przeładowania łatwo może ulec przegrzaniu, a nawet wybuchowemu paleniu

### 6.4.2.2. Kontrolne rozładowanie baterii akumulatorowej

W podrozdziale 4.6.5 wspomniano o konieczności przeprowadzania okresowego kontrolnego rozładowania pokładowej baterii akumulatorowej, które oprócz dostarczenia informacji o wartości pojemności baterii powoduje też „samooczyszczenie” baterii. W podrozdziale 4.6.7 stwierdzono, że rzeczywista pojemność akumulatora zależy od warunków, w jakich odbywa się rozładowanie, dlatego producenci podają pojemność znamionową w Ah. Stwierdzono również, że znamionowa pojemność elektryczna akumulatora jest to ilość energii, jaką można otrzymać od całkowicie naładowanego akumulatora przy rozładowywaniu go do napięcia granicznego w warunkach znamionowych. Rozładowanie to zwykle polega na tym, że bateria rozładowywana jest takim prądem, przy którym zostaje ona wyczerpana np. w ciągu 5 godzin (mówimy wówczas o tzw. 5-godzinnym prądzie rozładowującym) w temp. 15–20°C przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym. Bateria kadmowo-niklowa typu 20KSX-25 mająca 20 ogniw i pojemność znamionową 25 Ah będzie zatem miała 5-godzinny prąd wyładowania  $I_5 = 5$  A.

Podczas napełniania elektrolitem wytwórnia niekiedy zaleca ładowanie 20-godzinnym prądem w celu rozwinięcia się powierzchni czynnych płyt ogniw akumulatorowych.

Podczas ładowania lub rozładowania nie cała pojemność elektryczna zostaje później odzyskana. Dla każdego rodzaju baterii literatura [139, 142, 208] podaje sprawność elektryczną ładowania/rozładowania dla 5-godzinnego prądu wyładowania ( $I_5$ ), którą wyraża się wzorem:

$$\eta_{elakum} = \frac{Q_{wy}}{Q_{wej}} \cdot 100\% \quad (6.24)$$

gdzie:  $Q_{wy}$  – pojemność wyjściowa uzyskana podczas wyładowania [Ah];  $Q_{wej}$  – pojemność wejściowa uzyskana podczas ładowania [Ah];

co można zapisać wzorami:

$$Q_{wy} = I_5 \cdot \Delta t_{wy} \quad (6.25)$$

gdzie:  $\Delta t_{wy}$  – czas trwania kontrolnego rozładowania [h];

$$Q_{wej} = I_5 \cdot \Delta t_{wej} \quad (6.26)$$

gdzie:  $\Delta t_{wej}$  – czas trwania ładowania [h].

Sprawność elektryczna ładowania/rozładowania dla 5-godzinne go prądu wyładowania ( $I_5$ ), według literatury [139, 142, 208], dla poszczególnych rodzajów baterii akumulatorowych wynosi:

- a) dla baterii kwasowej –  $\eta_{\text{elakum}}$  od 80% do 90%,
- b) dla baterii kadmowo-niklowej –  $\eta_{\text{elakum}}$  od 72% do 83%,
- c) dla baterii srebrowo-cynkowej –  $\eta_{\text{elakum}}$  od 88% do 95%.

Dla każdego rodzaju baterii może być określana także sprawność energetyczną (rzadziej stosowaną) ładowania/rozładowania dla 5-godzinne go prądu wyładowania ( $I_5$ ), którą wyraża się wzorem:

$$\eta_L = \frac{W_{\text{wy}}}{W_{\text{wej}}} \cdot 100\% \quad (6.27)$$

gdzie:  $W_{\text{wy}}$  – energia wyjściowa uzyskana podczas wyładowania [Wh];  $W_{\text{wej}}$  – energia wejściowa uzyskana podczas ładowania [Wh];  
co można zapisać wzorami:

$$W_{\text{wy}} = U_a \cdot I_5 \cdot \Delta t_{\text{wy}} \quad (6.28)$$

gdzie:  $U_a$  – wartość napięcia na zaciskach baterii akumulatorowej uśredniona dla cyklu rozładowania;  $\Delta t_{\text{wy}}$  – czas trwania kontrolnego rozładowania [h]:

$$W_{\text{wej}} = U_a \cdot I_5 \cdot \Delta t_{\text{wej}} \quad (6.29)$$

gdzie:  $U_a$  – wartość napięcia na zaciskach baterii akumulatorowej uśredniona dla cyklu rozładowania;  $\Delta t_{\text{wej}}$  – czas trwania kontrolnego rozładowania [h].

Sprawność energetyczna ładowania/rozładowania dla 5-godzinne go prądu wyładowania ( $I_5$ ) dla poszczególnych rodzajów baterii akumulatorowych wynosi [139, 142, 208]:

- a) dla baterii kwasowej –  $\eta_L \approx 75\%$ ,
- b) dla baterii kadmowo-niklowej –  $\eta_L$  od 45% do 55%,
- c) dla baterii srebrowo-cynkowej –  $\eta_L$  od 75% do 95%.

Dla prądów ładowania/rozładowania wyższych niż  $I_5$  sprawności będą niższe. W tym miejscu należy zaznaczyć, że dla baterii srebrowo-cynkowej zmiany te są prawie niezauważalne.

Podczas ładowania wszelkich typów i rodzajów baterii akumulatorowych zaleca się przerwanie ładowania lub zmniejszenie natężenia prądu ładowania w przypadku silnego gazowania ogni. Może ono spowodować:

- a) spęcznienie naczyń (ogniw),  
 b) wyrzucanie oparów (mikrokropel) elektrolitu, który osiadając na obudowie staje się przewodnikiem dla prądu samorozładowania.

W czasie kontrolnego sprawdzenia pojemności wytwórnice baterii akumulatorowych zalecają następujące etapy:

1. Rozładowanie uzupełniające do poziomu  $U_{\min}$ .
2. I ładowanie – naładowanie według cyklu do pojemności quasi-znamionowej.
3. Rozładowanie kontrolne – wyładowanie prądem  $I_5$  (5-godzinnym) – prąd jest stabilizowany poprzez regulację opornikiem rozładowującym, czas jest mierzony od momentu podłączenia obciążenia (wyładowującego) do uzyskania  $U_{\min}$ .
4. II ładowanie – ładowanie prądem  $I_5$  (5-godzinnym) – prąd jest stabilizowany poprzez regulację opornikiem rozładowującym, czas jest mierzony od momentu podłączenia obciążenia do uzyskania  $U_{\max}$ .

**Zadanie 1:** W oparciu o informacje zawarte w punktach 6.4.2.1 i 6.4.2.2 proszę uzupełnić tabelę 6.43 dla rzeczywistych i fikcyjnych typów lotniczych baterii akumulatorowych.

Tabela 6.43

Zestawienie parametrów lotniczych baterii akumulatorowych do celu wykonania ćwiczenia projektowego

Dane formalne				Pojemność znamionowa	Parametry ogniwa			Parametry baterii akumulatorowej			Uwagi	
Lp.	Rodzaj baterii akumulatorowej	„Typ” baterii	„Typ” ogniwa		$Q_N$	$U_{\min}$	$U_N$	$U_{\max}$	$U_{\min}$	$U_N$		$U_{\max}$
					Ah	V	V	V	V	V		V
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Kwasowe	12SAM-28	SAM28									
2	Kwasowe	12SEL-60										

Dane formalne												
Lp.	Rodzaj baterii akumulatorowej	„Typ” baterii	„Typ” ogniwa	Pojemność znamionowa	Parametry ogniwa			Parametry baterii akumulatorowej			Uwagi	
				Q <sub>N</sub>	U <sub>min</sub>	U <sub>N</sub>	U <sub>MAX</sub>	U <sub>min</sub>	U <sub>N</sub>	U <sub>MAX</sub>		
				Ah	V	V	V	V	V	V		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
3	Zasadowe kadmowo-niklowe	20XXX-55										
4	Zasadowe kadmowo-niklowe	20KSX-25P										
5	Zasadowe srebrowo-cynkowe, np. SCK-45B (MiG-29)	15SCS-45B	SCS-45B									
6	Zasadowe srebrowo-cynkowe			50								

**Zadanie 2:** Proszę zaprojektować kontrolne sprawdzenie pojemności (4 etapy), zakładając sprawność elektryczną  $\eta_{elakum}$ , tj. iloraz pojemności „włożonej” do pojemności uzyskanej – wzór (6.23):

- 1) dla baterii kwasowej  $\eta_{elakum} = 85\%$ ,
- 2) dla baterii kadmowo-niklowej  $\eta_{elakum} = 77\%$ ,
- 3) dla baterii srebrowo-cynkowej –  $\eta_{elakum} = 91\%$ .

**Uwaga!** Dla 1 etapu (rozładowanie uzupełniające) nie wnosimy poprawki na sprawność baterii.

Wyniki ww. kontrolnego sprawdzenia pojemności (4 etapy) proszę wpisać w tabeli 6.44. Według tego wzoru wypełniamy parametry kontrolnego sprawdzenia pojemności osobno dla każdego rodzaju baterii akumulatorowej:

- kwasowej,
- kadmowo-niklowej,
- srebrowo-cynkowej.

Tabela 6.44

Zestawienie parametrów związanych z procesem kontrolnego rozładowania lotniczej baterii akumulatorowej po zdemontowaniu z SP

Lp.	I5	Sprawność elektryczna			1 etap – rozładowanie uzupełniające		2 etap – I ładowanie			3 etap – rozładowanie kontrolne			4 etap – II ładowanie		
					Pozostałość pojemności resztkowej w stosunku do wartości znamionowej pojemności baterii (QN)		Czas trwania wyładowania	Pojemność znamionowa + straty pojemności	Pojemność do załadowania przez zasilacz	Czas wyładowania przy prądzie wyładowania $I = I5$	Pojemność wyjściowa do 3 etapu	Czas trwania wyładowania	Pojemność uzyskana w czasie kontrolnego rozładowania	Pojemność znamionowa	Pojemność do załadowania przez zasilacz
		$\eta_{elakum}$		Qresz	$\Delta t_{rest}$	Q2	Qwej	$\Delta t2$	Q3-1	$\Delta t3$	Q	QN	Qwej	$\Delta t4$	
		A	-	%	Ah	h	Ah	Ah	h	Ah	h	Ah	Ah	Ah	h
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
1			10												
2			20												
3			30												
4			40												
5			50												
6			60												

## 6.5. Zadania związane z lotniczymi prądnicami prądu stałego

### 6.5.1. Podstawowe parametry prądnicy prądu stałego

#### 6.5.1.1. Obliczanie rozplywu prądów dla bocznikowej prądnicy prądu stałego pod obciążeniem

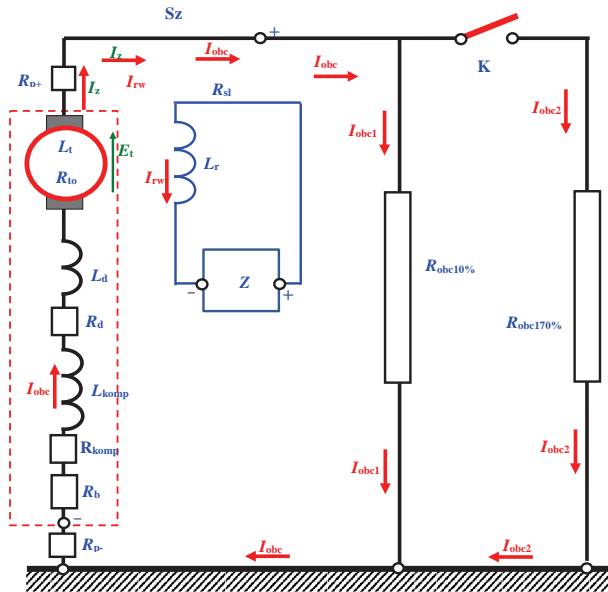
W podrozdziale 4.2.1 stwierdzono, że komutatorowe prądnice prądu stałego używane na statkach powietrznych są prądnicami samowzbudnymi, to znaczy takimi, w których prąd przepływający przez uzwojenie wzbudzenia prądnicy płynie pod wpływem siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu twornika tej samej maszyny. Jest to tzw. układ prądnicy bocznikowej – uzwojenie wzbudzenia jest podłączone jak bocznik, tj. równolegle, do uzwojenia wirnika, czyli twornika (bo tu wytwarza się energia elektryczna) [37, 80, 96, 101, 106]. W ten sposób uniezależniamy się od obcego źródła zasilania, którego SEM musiałaby być przyłożona na zaciski uzwojenia wzbudzenia. Jednocześnie istnieje druga cecha korzystna – prądnica bocznikowa jest odporna na zwarcia – przy dużych przeciążeniach, np. przy zwarciu wyjściowego przewodu siłowego do masy statku powietrznego nie grozi nam pożar maszyny, gdyż wówczas napięcie wyjściowe prądnicy przy kolejnych przyrostach prądowych szybko zmniejsza swoją wartość (rys. 4.55).

**Zadanie 1:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć na zaciskach odbiorników w obwodzie jak na rys. 6.35, tj. dla prądnicy obcowzbudnej (uzwojenia wzbudzenia zasilane z zasilacza prądu stałego – rys. 6.31, blok Z), w stanie ustalonym dla 10% i dla 170% obciążenia znamionowego prądnicy ( $I_N = 400$  A, tj. moc  $P_N = 40$  kW), tj. przy  $I_{obc10\%} = 42$  A do  $I_{obc170\%} = 715$  A, co odpowiada zmianie oporności z  $R_{obc10\%} = 0,5$   $\Omega$  do  $\Sigma R = 0,04$   $\Omega$ , posługując się pozostałymi danymi zestawionymi w tabeli 6.45.

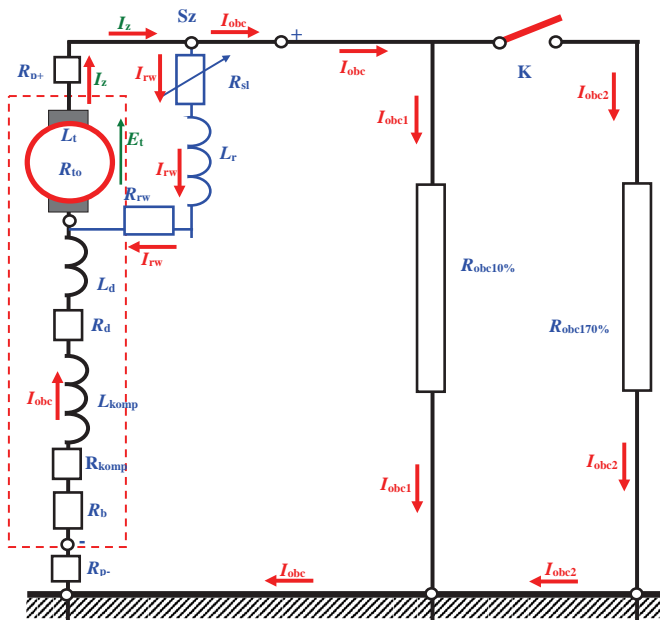
**Zadanie 2:** Proszę obliczyć wartość natężenia prądu oraz spadków napięć na zaciskach odbiorników w obwodzie jak na rys. 6.36, tj. dla prądnicy bocznikowej, w stanie ustalonym dla 10% i dla 170% obciążenia znamionowego prądnicy ( $I_N = 400$  A, tj. moc  $P_N = 40$  kW), tj. przy  $I_{obc10\%} = 42$  A do  $I_{obc170\%} = 715$  A, co odpowiada zmianie oporności z  $R_{obc10\%} = 0,5$   $\Omega$  do  $\Sigma R = 0,04$   $\Omega$ , posługując się pozostałymi danymi zestawionymi w tabeli 6.46.

W tabeli tej użyto dodatkowych (względem poprzedniej) oznaczeń:  $I_z$  – natężenie prądu w tworniku prądnicy;  $U_z$  – napięcie twornika (na uzwojeniach wirnika).





Rys. 6.35. Schemat ideowy prądnicy obcowzbudnej z biegunami komutacyjnymi, gdzie: Z – zasilacz prądu stałego uzwojenia wzbudzenia



Rys. 6.36. Schemat ideowy prądnicy bocznikowej GS-12T (Su-22) z biegunami komutacyjnymi, gdzie: Sz – zacisk uzwojenia wzbudzenia

**Tabela 6.45**

**Obliczenia wartości napięć i prądów w obwodzie obciążenia prądniczy komutatorowej prądu stałego obcowszbudnej**

I.p.	$R_{obc10\%}$		$R_{obc170\%}$		$R_{to}$	$L_{to}$	$R_{sl}$	$R_{rw}$	$L_{rw}$	$R_d$	$L_d$	$R_{komp}$	$L_{komp}$	$R_b$	$R_{p-}$	$I_{obc10\%}$	$U_{obc10\%}$	$I_{obc170\%}$	$U_{obc170\%}$
	$E$	$R$	$\Omega$	$\Omega$															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1.	58	0,5	0,04	0,3	0,0041	0,018	0,5	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,4				
2.	60	0,5	0,04	0,4	0,055	0,018	0,6	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,5				
3.	62	0,5	0,04	0,5	0,065	0,018	0,7	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,6				
4.	64	0,5	0,04	0,3	0,075	0,018	0,8	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,7				
5.	66	0,5	0,04	0,4	0,085	0,018	0,9	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,8				
6.	55	0,5	0,04	0,5	0,095	0,018	1,0	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,9				
7.	57	0,5	0,04	0,3	0,1000	0,018	1,1	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,1				
8.	59	0,5	0,04	0,4	0,1184	0,018	1,2	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,2				
9.	61	0,5	0,04	0,5	0,0041	0,018	1,3	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,3				
10.	63	0,5	0,04	0,3	0,055	0,018	1,4	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,4				
11.	65	0,5	0,04	0,4	0,065	0,018	1,5	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,5				
12.	56	0,5	0,04	0,5	0,075	0,018	1,6	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,6				
13.	58	0,5	0,04	0,3	0,085	0,018	1,7	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,7				
14.	60	0,5	0,04	0,4	0,095	0,018	1,8	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,8				
15.	62	0,5	0,04	0,3	0,1000	0,018	1,8	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,9				
16.	64	0,5	0,04	0,4	0,1184	0,018	1,9	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	2,0				
17.	66	0,5	0,04	0,5	0,1255	0,018	2,0	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	2,1				

Tabela 6.46

Obliczenia wartości napięć i prądów w obwodzie obciążenia prądniczy komutatorowej prądu stałego bocznikowej

I.p.	Parametry dane do zadania nr 2																						
	$E$	$R_{obc10\%}$	$R_{obc70\%}$	$R_{pp}$	$R_{to}$	$L_{to}$	$R_{s1}$	$R_{rv}$	$L_{rv}$	$R_d$	$L_d$	$R_{komp}$	$L_{komp}$	$R_b$	$R_p$	10%			170%				
V	$\Omega$	$\Omega$	m $\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	mH	$\Omega$	$\Omega$	mH	$\Omega$	mH	$\Omega$	mH	m $\Omega$	m $\Omega$	$I_z$	$U_z$	$I_{obc10\%}$	$U_{obc10\%}$	$I_z$	$U_z$	$I_{obc70\%}$	$U_{obc70\%}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1.	58	0,5	0,04	0,3	0,0041	0,018	0,5	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,4								
2.	60	0,5	0,04	0,4	0,055	0,018	0,6	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,5								
3.	62	0,5	0,04	0,5	0,065	0,018	0,7	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,6								
4.	64	0,5	0,04	0,3	0,075	0,018	0,8	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,7								
5.	66	0,5	0,04	0,4	0,085	0,018	0,9	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,8								
6.	55	0,5	0,04	0,5	0,095	0,018	1,0	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	0,9								
7.	57	0,5	0,04	0,3	0,1000	0,018	1,1	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,1								
8.	59	0,5	0,04	0,4	0,1184	0,018	1,2	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,2								
9.	61	0,5	0,04	0,5	0,0041	0,018	1,3	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,3								
10.	63	0,5	0,04	0,3	0,055	0,018	1,4	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,4								
11.	65	0,5	0,04	0,4	0,065	0,018	1,5	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,5								
12.	56	0,5	0,04	0,5	0,075	0,018	1,6	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,6								
13.	58	0,5	0,04	0,3	0,085	0,018	1,7	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,7								
14.	60	0,5	0,04	0,4	0,095	0,018	1,8	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,8								
15.	62	0,5	0,04	0,3	0,1000	0,018	1,8	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	1,9								
16.	64	0,5	0,04	0,4	0,1184	0,018	1,9	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	2,0								
17.	66	0,5	0,04	0,5	0,1255	0,018	2,0	1,284	27,17	0,0013	0,005	0,0015	0,005	50	2,1								

### 6.5.1.2. Obliczanie strumienia magnetycznego stojana maszyny prądu stałego

W niniejszym punkcie będą wykonywane obliczenia obwodów magnetycznych agregatów LUE. Obliczanie obwodu magnetycznego polega zazwyczaj na takim doborze kształtu obwodu, rodzaju (wybór właściwości istotnych pod kątem parametrów elektrycznych lub magnetycznych) materiałów na rdzenie lub uzwojenia, aby w poszczególnych elementach obwodu uzyskać wymagane wartości strumienia magnetycznego  $\Phi$  lub indukcji  $B$  (np. w szczelinie powietrznej pomiędzy obwodem wirnika prądnicy a płaszczyzną nabiegownika stojana [14, 44, 73-74, 153, 172, 192, 203]. Zagadnienia te były już częściowo omawiane we wcześniejszych podrozdziałach:

- 4.2.2. Kompensacja oddziaływania twornika,
- 4.2.5. Dane prądnicy komutatorowej na przykładzie prądnicy komutatorowej prądu stałego GS12T z samolotu Su-22;

przedstawione zostały podstawowe zależności dotyczące obwodu magnetycznego maszyny elektrycznej prądu stałego ujęte m.in. we wzorach 4.15–4.24 oraz 4.39. Wzory te wpisują się w ciąg logiczny podstawowych praw elektrotechniki, omawianych w podrozdziale 2.3.4. Podstawowe prawa elektrotechniki:

- a) prawo Ohma dla odcinka obwodu, w tym dla szeregowego i równoległego łączenia oporników,
- b) prawo Ohma dla całego obwodu,
- c) I prawo Kirchhoffa – wzory: (2.33) i (2.41),
- d) II prawo Kirchhoffa – wzory: (2.34) i (2.42).

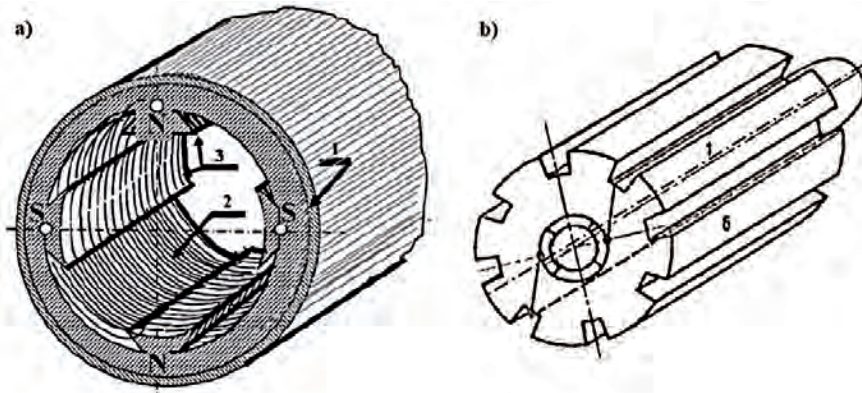
Tak więc możemy dla obwodów magnetycznych mówić przez analogię mówić o:

- a) prawie Ohma dla odcinka obwodu magnetycznego, w tym dla szeregowego i równoległego łączenia elementów magnetycznych – wzory: (4.3); (4.9),
- b) prawie Ohma dla całego obwodu magnetycznego – wzór (4.3),
- c) I prawie Kirchhoffa dla obwodu magnetycznego,
- d) II prawie Kirchhoffa.

W zakresie tematycznym LUE poczesne miejsce zajmuje projektowanie i obliczanie obwodów magnetycznych prądnic pokładowych. Maszyny te spełniają na pokładach statków powietrznych funkcję głównego źródła zasilania. Aby poprawnie obliczać ich obwody magnetyczne, należy zapoznać się z ich konstrukcją. W tym miejscu ograniczymy się do prądnic prądu stałego. Prądnica taka, jak częściowo opisano to już we wcześniejszych podrozdziałach (np. 4.2.1.2.), składa się z:

- a) korpusu (rys. 6.37a, element 1),
- b) nabiegowników stojana (rys. 6.37a, element 3 oraz szczegóły N i S),

- c) wirnika (rys. 6.37b) składającego się z pakietu odizolowanych od siebie blach krzemowych.

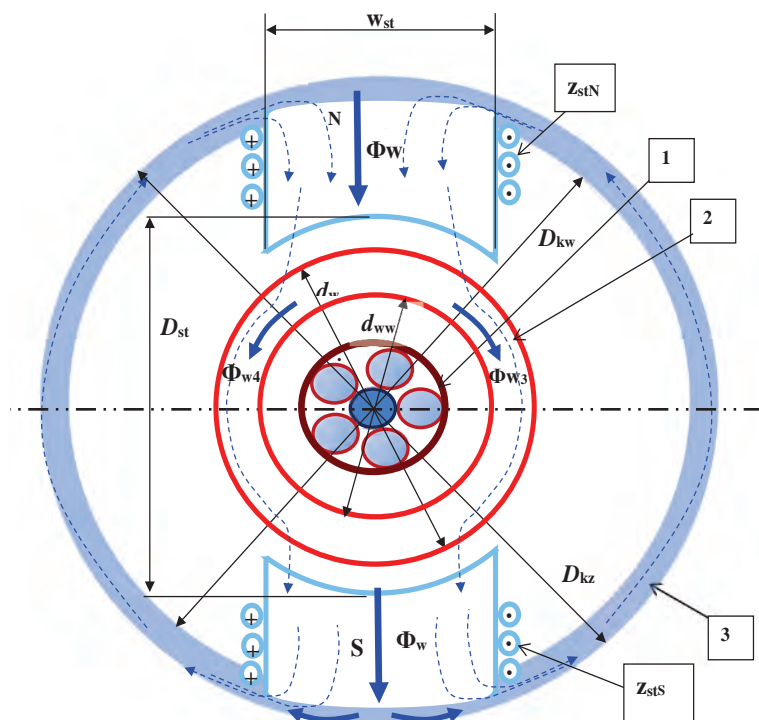


**Rys. 6.37.** Widok aksonometryczny obwodu magnetycznego prądnicy prądu stałego: a) stojan, gdzie: 1 – cylindryczny korpus (odlew ze staliwa); 2 – magnetowód wewnętrzny – pakiet blach krzemowych (występuje w prądnicach prądu przemiennego – w prądnicach prądu stałego jego funkcję zwykle pełni korpus prądnicy); 3 – nabiegunniki stojana; N – biegun północny; S – biegun południowy; b) wirnik

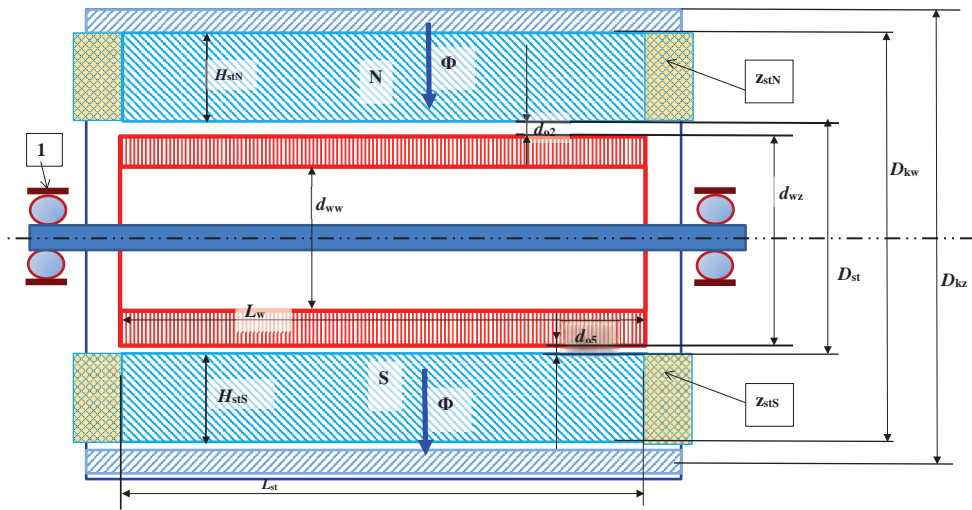
Jak opisano w punkcie 4.2.1.2. (*Konstrukcja i działanie komutatorowej prądnicy prądu stałego*), warunkiem koniecznym działania prądnicy jest nadanie jej wirnikowi prędkości kątowej  $\omega_m$  (przekazywanej od sprzęgniętego z nim silnika turboodrzutowego) oraz zapewnienie strumienia wzbudzenia wytwarzanego przez stojan prądnicy [2, 27, 96, 101, 108, 119]. Strumień magnetyczny stojana  $\Phi_w$  wywołany jest przepływem  $I_w \cdot z_w$  (zwanym też siłą magnetomotoryczną), jaki wytwarza prąd wzbudzenia (magnesujący) przepływający przez uzwojenie wzbudzenia nawinięte na elementy  $z_{stN}$ ,  $z_{stS}$  (rys. 6.38 i 6.39). Wytwarzany przez siłę magnetomotoryczną  $\Theta$  (iloczyn natężenia prądu i liczby zwojów  $I_w \cdot z$ ) strumień magnetyczny  $\Phi_w$  (analog prądu elektrycznego w klasycznej elektrotechnice) przepływa przez kolejne odcinki obwodu magnetycznego prądnicy, czyli:

- 1) górny nabiegunnik stojana (rys. 6.38 i 6.39, element N); jednocześnie na tym nabiegunniku nawinięte jest uzwojenie wzbudzenia o  $z$  zwojach (rys. 6.38, szczególnie  $z_{stN}$ ) – analogia do elektrycznego źródła zasilania prądu stałego nr 1;
- 2) szczelinę powietrzną pomiędzy górnym nabiegunnikiem stojana a rdzeniem wirnika (rys. 6.39, szczególnie  $d_{o2}$ );
- 3) prawą część rdzenia wirnika (rys. 6.38 i 6.39, element 2) – analogia do kabla plusowego;

- 4) lewą część rdzenia wirnika (rys. 6.38 i 6.39, element 2) – analogia do kabla plusowego;
- 5) szczelinę powietrzną pomiędzy górnym nabiegunnikiem stojana a rdzeniem wirnika (rys. 6.39, szczegół  $d_{o5}$ );
- 6) dolny nabiegunnik stojana (rys. 6.38 i 6.39, element S); jednocześnie na tym nabiegunniku nawinięte jest uzwojenie wzbudzenia o  $z$  zwojach (rys. 6.38, szczegół  $z_{stS}$ ) – analogia do elektrycznego źródła zasilania prądu stałego nr 2;
- 7) prawą część korpusu prądnicy (rys. 6.38 i 6.39, element 3) – analogia do kabla minusowego – połowa strumienia  $\Phi_w$  ( $\Phi_4 \approx \Phi_w$  ( $\Phi_4 \approx \frac{1}{2} \Phi_w$ ));
- 8) lewą część korpusu prądnicy (rys. 6.38 i 6.39, element 3) – analogia do kabla minusowego – połowa strumienia  $\Phi_w$  ( $\Phi_5 \approx \Phi_w$  ( $\Phi_5 \approx \frac{1}{2} \Phi_w$ )).



**Rys. 6.38.** Przekrój poprzeczny obwodu magnetycznego prądnicy prądu stałego, gdzie: 1 – łożysko podporowe wirnika prądnicy; 2 – wirnik (twornik) prądnicy; 3 – korpus prądnicy; N, S – bieguny (nabiegunniki) stojana prądnicy;  $Z_{stN}$ ,  $Z_{stS}$  – uzwojenia stojana (obwód wzbudzenia);  $D_{st}$  – średnica pomiędzy nabiegunnikami stojana;  $D_{kw}$  – średnica wewnętrzna korpusu prądnicy;  $D_{kz}$  – średnica zewnętrzna korpusu prądnicy



**Rys. 6.39.** Przekrój podłużny obwodu magnetycznego prądnicy prądu stałego, gdzie: 1 – łożysko podporowe wirnika prądnicy; 2 – wirnik (twornik) prądnicy; 3 – korpus prądnicy; N, S – bieguny (nabiegunniki) stojana prądnicy;  $Z_{stN}$ ,  $Z_{stS}$  – uzwojenia stojana (obwód wzbudzenia);  $D_{st}$  – średnica pomiędzy nabiegunnikami stojana;  $D_{kw}$  – średnica wewnętrzna korpusu prądnicy;  $D_{kz}$  – średnica zewnętrzna korpusu prądnicy

Stosując wzory 4.15–4.24 i 4.39, przepływ strumienia magnetycznego  $\Phi_w$  przez kolejne odcinki obwodu magnetycznego prądnicy prądu stałego można opisać przez analogię do:

- 1) prawa Ohma dla odcinka obwodu, w tym dla szeregowego łączenia oporników:
  - a) oporność magnetyczna górnego nabiegunnika (północny N):

$$R_{\mu 1N} = \frac{l_{stN}}{\mu_{1N} \cdot S_{1N}} \quad (6.30)$$

gdzie:  $\mu_{1N}$  – przenikalność magnetyczna górnego nabiegunnika stojana (bieguna N);  $S_{1N}$  – pole przekroju poprzecznego górnego nabiegunnika stojana (bieguna N);  $l_{stN}$  – długość drogi pokonywanej przez strumień magnetyczny  $\Phi_w$  w czasie przechodzenia przez górny nabiegunnik stojana (bieguna N), tu: wysokość nabiegunnika, tj.  $l_{stN} = w_{stN}$ .

Pole przekroju poprzecznego górnego nabiegunnika stojana (bieguna N) można wyznaczyć ze wzoru:

$$S_{1N} = w_{stN} \cdot L_{st} \quad (6.31)$$

gdzie:  $w_{stN}$  – szerokość nabiegownika (rys. 6.38, szczegół  $w_{stN}$ );  $L_{st}$  – długość stojana (rys. 6.39, szczegół  $L_{st}$ );

- b) oporność magnetyczna szczeliny powietrznej  $d_{o1}$  pomiędzy górnym nabiegownikiem stojana (N) a rdzeniem wirnika:

$$R_{\mu 2 d o N} = \frac{d_{o1}}{\mu_{2 d o} \cdot S_{1N}} \quad (6.32)$$

gdzie:  $\mu_{2 d o}$  – przenikalność magnetyczna szczeliny powietrznej;  $S_{1N}$  – pole przekroju poprzecznego górnego nabiegownika stojana (bieguna N) – można wyznaczyć ze wzoru (6.30);  $d_{o1}$  – długość szczeliny powietrznej pomiędzy górnym nabiegownikiem stojana (bieguna N) a powierzchnią wirnika;

- c) oporność magnetyczna prawej części rdzenia wirnika (rys. 6.38 i 6.39, element 2):

$$R_{\mu 3 w} = \frac{l_{3w}}{\mu_{3w} \cdot S_{3w}} \quad (6.33)$$

gdzie:  $\mu_{3w}$  – przenikalność magnetyczna rdzenia wirnika;  $S_{3w}$  – pole przekroju poprzecznego rdzenia wirnika;  $l_{3w}$  – długość drogi strumienia magnetycznego po prawej stronie rdzenia wirnika – w przybliżeniu długość średnia połowy obwodu wirnika – może być wyrażona wzorem:

$$l_{3w} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{d_{wz} + d_{ww}}{2} \quad (6.34)$$

Pole przekroju poprzecznego rdzenia wirnika można wyznaczyć ze wzoru:

$$S_{3w} = (d_{wz} - d_{ww}) L_w \quad (6.35)$$

- d) oporność magnetyczna lewej części rdzenia wirnika (rys. 6.38 i 6.39, element 2):

$$R_{\mu 4 w} = \frac{l_{4w}}{\mu_{4w} \cdot S_{4w}} \quad (6.36)$$

gdzie:  $\mu_{4w}$  – przenikalność magnetyczna rdzenia wirnika;  $S_{4w}$  – pole przekroju poprzecznego rdzenia wirnika – dla symetrycznego rdzenia wirnika pole to można wyznaczyć ze wzoru (6.33);  $l_{4w}$  – długość drogi strumienia magnetycznego pokonywana po lewej części rdzenia wirnika – zwykle równe jest  $l_{3w}$ ;



- e) oporność magnetyczna szczeliny powietrznej  $d_{o5}$  pomiędzy dolnym nabiegunnikiem stojana (S) a rdzeniem wirnika:

$$R_{\mu 5 d o S} = \frac{d_{o5}}{\mu_{5 d o} \cdot S_{5 S}} \quad (6.37)$$

gdzie:  $\mu_{5N}$  – przenikalność magnetyczna dolnego nabiegownika stojana (bieguna S);  $S_{5N}$  – pole przekroju poprzecznego dolnego nabiegownika stojana (bieguna S);  $d_{o5}$  – długość szczeliny powietrznej pomiędzy dolnym nabiegunnikiem stojana (bieguna S) a powierzchnią wirnika;

- f) oporność magnetyczna dolnego nabiegownika (południowy S):

$$R_{\mu 6 N} = \frac{w_{stS}}{\mu_{6 N} \cdot S_{6 S}} \quad (6.38)$$

gdzie:  $\mu_{6S}$  – przenikalność magnetyczna dolnego nabiegownika stojana (bieguna N);  $S_{6S}$  – pole przekroju poprzecznego górnego nabiegownika stojana (bieguna N) – zwykle nabiegunki mają te same wymiary, więc wartość tę można wyznaczyć ze wzoru (6.30);  $w_{stS}$  – wysokość nabiegownika stojana (bieguna S);

- g) oporność magnetyczna prawej część korpusu prądnicy:

$$R_{\mu 7 k} = \frac{l_{7k}}{\mu_{7k} \cdot S_{7k}} \quad (6.39)$$

gdzie:  $\mu_{7k}$  – przenikalność magnetyczna korpusu prądnicy;  $S_{7k}$  – pole przekroju poprzecznego podłużnego prawej połowy korpusu prądnicy obliczonego jako iloczyn  $r_{ksr}$  i  $L_{st}$ , gdzie:  $L_{st}$  – długość korpusu w zakresie obejmowanym przez strumień stojana;  $r_{ksr}$  – średnia długość promienia, po którym przepływa strumień magnetyczny z prawej strony korpusu prądnicy.

Pole przekroju poprzecznego korpusu prądnicy można wyznaczyć ze wzoru:

$$S_{7k} = (D_{kz} - D_{kw}) L_{st} / 2 \quad (6.40)$$

Średnią długość obwodu, po którym przepływa strumień magnetyczny z prawej strony korpusu prądnicy, można wyznaczyć ze wzoru:

$$l_{7k} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{ksr} \quad (6.41)$$

gdzie:

$$r_{ksr} = (D_{kz} + D_{kw})/4 \quad (6.42)$$

h) oporność magnetyczna lewej część korpusu prądnicy:

$$R_{\mu 8k} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{ksr} \quad (6.43)$$

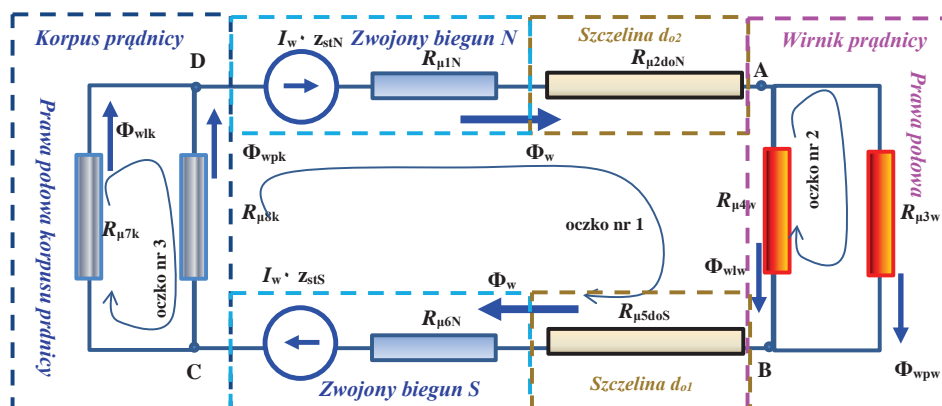
gdzie:  $\mu_{8k}$  – przenikalność magnetyczna lewej połowy korpusu prądnicy;  $S_{8s}$  – pole przekroju podłużnego lewej połowy korpusu prądnicy – można dla symetrycznego korpusu wyznaczyć ze wzoru (6.38);  $L_{st}$  – długość korpusu w zakresie obejmowanym przez strumień stojana;  $R_{ksr}$  – średnia długość obwodu, po którym przepływa strumień magnetyczny z lewej strony korpusu prądnicy.

**UWAGA 1:** Nie uwzględniamy strumienia podłużnego wchodzącego od strony łożysk tocznych.

**UWAGA 2:** Nie uwzględniamy strumienia rozproszenia „omijającego” rdzeń wirnika.

**UWAGA 3:** Zakładamy pracę na prostoliniowej części charakterystyki magnesowania, tak więc i stałą wartość przenikalności magnetycznej.

Połączenia oporności magnetycznej można przedstawić w postaci schematu zastępczego (rys. 6.40).



Rys. 6.40. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego prądnicy prądu stałego

2) prawa Ohma dla całego obwodu magnetycznego:

$$\sum_{i=1}^{i=2} I_i \cdot z_{sti} = \sum_{i=1}^{i=8} R_{\mu i} \cdot \Phi_w \quad (6.44)$$

3) I prawa Kirchhoffa:

– dla węzła A (rys. 6.40, szczegół A):

$$\Phi_w = \Phi_{wlw} + \Phi_{wpw} \quad (6.45)$$

– dla węzła C (rys. 6.40, szczegół C):

$$\Phi_w = \Phi_{wlk} + \Phi_{wpk} \quad (6.46)$$

4) II prawa Kirchhoffa – rozpisujemy analogicznie jak spadki napięć oddzielnie dla każdego oczka:

– dla oczka nr 1:

$$I_w \cdot z_{stN} - \Phi_w \cdot R_{\mu 1N} - \Phi_w \cdot R_{\mu 2doN} - \Phi_w \cdot R_{\mu ABw} - \Phi_w \cdot R_{\mu 5doN} - \Phi_w \cdot R_{\mu 6N} + I_w \cdot z_{stS} = 0 \quad (6.47)$$

gdzie:  $R_{\mu ABw}$  – wypadkowa rezystancja magnetyczna równoległego połączenia rezystancji magnetycznej lewej i prawej strony rdzenia wirnika (rys. 6.40, elementy  $R_{\mu 4w}$  oraz  $R_{\mu 3w}$ ) – rezystancję tę można wyliczyć analogicznie jak we wzorze (2.28) na rezystancję wypadkową dwóch oporników połączonych równolegle, np. dla węzła AB (rys. 6.40, elementy  $R_{\mu 3w}$ ,  $R_{\mu 4w}$ ), tj. dla przepływu przez wirnik prądu:

$$R_{\mu ABw} = \frac{R_{\mu 3w} \cdot R_{\mu 4w}}{R_{\mu 3w} + R_{\mu 4w}} \quad (6.48)$$

Analogicznie dla węzła C-D, tj. dla odcinka przepływu pola magnetycznego przepływającego przez korpus prądnicy:

$$R_{\mu ABw} = \frac{R_{\mu 7k} \cdot R_{\mu 8k}}{R_{\mu 7k} + R_{\mu 8k}} \quad (6.49)$$

– dla oczka nr 2:

$$\Phi_{wpw} \cdot R_{\mu 3w} - \Phi_{wpw} \cdot R_{\mu 4w} = 0 \quad (6.50)$$

– dla oczka nr 3:

$$\Phi_{wpk} \cdot R_{\mu 8k} - \Phi_{wlk} \cdot R_{\mu 7k} = 0 \quad (6.51)$$

**Zadanie 1:** Proszę obliczyć brakujące wartości przedstawione w tabelach 6.47 i 6.48, zakładając, że strumień magnetyczny i oporności magnetyczne w wirniku oraz w korpusie prądniczy rozkładają się równomiernie, oraz że punkt pracy położony jest na odcinku prostoliniowym charakterystyki magnesowania.

**Tabela 6.47**

**Zestawienie parametrów obwodu magnetycznego prądniczy prądu stałego – część I**

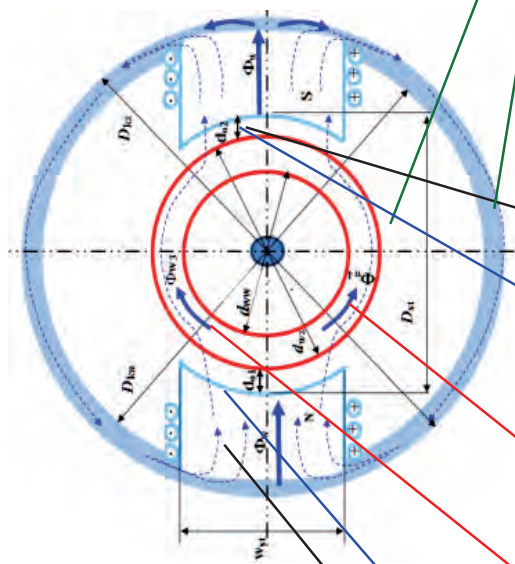
Lp.	Iw	zstN	zstS	wstN	wstS	Lst	Lw	μr1N	μr6N	μr3w	μr4w	μr7k	μr8k	Dkz	Dkw	dwz	dww	do2	do5	HstS		Uwagi		
																				mm	mm			
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23	
1	5	20	20	30	30	140	140	6000	6000	8800	8800	600	600	200	180	140	100	0,10	0,1					
2	6	23	23	32	32	160	160	6100	6100	8900	8900	630	630	210	190	150	110	0,15	0,15					
3	7	26	26	34	34	180	180	6200	6200	9000	9000	660	660	220	200	160	120	0,20	0,2					
4	8	29	29	36	36	200	200	6300	6300	9100	9100	690	690	230	210	170	130	0,25	0,25					
5	9	32	32	38	38	220	220	6400	6400	9200	9200	720	720	240	220	180	140	0,30	0,3					
6	10	35	35	40	40	240	240	6500	6500	9300	9300	750	750	250	230	190	150	0,35	0,35					
7	11	38	38	42	42	260	260	6600	6600	9400	9400	780	780	260	240	200	160	0,40	0,4					
8	12	41	41	44	44	280	280	6700	6700	9500	9500	810	810	270	250	210	170	0,45	0,45					
9	13	44	44	46	46	300	300	6800	6800	9600	9600	840	840	280	260	220	180	0,50	0,5					
10	14	47	47	48	48	320	320	6900	6900	9700	9700	870	870	290	270	230	190	0,55	0,55					
11	15	50	50	50	50	340	340	7000	7000	9800	9800	900	900	300	280	240	200	0,60	0,6					
12	16	53	53	52	52	360	360	7100	7100	9900	9900	930	930	310	290	250	210	0,65	0,65					
13	17	56	56	54	54	380	380	7200	7200	10000	10000	960	960	320	300	260	220	0,70	0,7					
14	18	59	59	56	56	400	400	7300	7300	10100	10100	990	990	330	310	270	230	0,75	0,75					
15	19	62	62	58	58	420	420	7400	7400	10200	10200	1020	1020	340	320	280	240	0,80	0,8					

cd. tab. 6.47

Lp.	Iw	zstN	zstS	wstN	wstS	Lst	Lw	μr1N	μr6N	μr3w	μr4w 4w	μr7k	μr8k	Dkz	Dkw	dwz	dww	do2	do5	HstS		Uwagi
																				mm	mm	
1	A	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
16		65	65	60	60	440	440	7500	7500	10300	10300	1050	1050	350	330	290	250	0,85	0,85			
17		68	68	62	62	460	460	7600	7600	10400	10400	1080	1080	360	340	300	260	0,90	0,9			
18		71	71	64	64	480	480	7700	7700	10500	10500	1110	1110	370	350	310	270	0,95	0,95			
19		20	20	30	30	140	140	6000	6000	8800	8800	600	600	200	180	140	100	0,10	0,1			
20		23	23	32	32	160	160	6100	6100	8900	8900	630	630	210	190	150	110	0,15	0,15			
21		26	26	34	34	180	180	6200	6200	9000	9000	660	660	220	200	160	120	0,20	0,2			
22		29	29	36	36	200	200	6300	6300	9100	9100	690	690	230	210	170	130	0,25	0,25			
23		32	32	38	38	220	220	6400	6400	9200	9200	720	720	240	220	180	140	0,30	0,3			
24		35	35	40	40	240	240	6500	6500	9300	9300	750	750	250	230	190	150	0,35	0,35			
25		38	38	42	42	260	260	6600	6600	9400	9400	780	780	260	240	200	160	0,40	0,4			
26		41	41	44	44	280	280	6700	6700	9500	9500	810	810	270	250	210	170	0,45	0,45			
27		44	44	46	46	300	300	6800	6800	9600	9600	840	840	280	260	220	180	0,50	0,5			
28		47	47	48	48	320	320	6900	6900	9700	9700	870	870	290	270	230	190	0,55	0,55			
29		50	50	50	50	340	340	7000	7000	9800	9800	900	900	300	280	240	200	0,60	0,6			
30		53	53	52	52	360	360	7100	7100	9900	9900	930	930	310	290	250	210	0,65	0,65			
31		56	56	54	54	380	380	7200	7200	10000	10000	960	960	320	300	260	220	0,70	0,7			
32		59	59	56	56	400	400	7300	7300	10100	10100	990	990	330	310	270	230	0,75	0,75			
33		62	62	58	58	420	420	7400	7400	10200	10200	1020	1020	340	320	280	240	0,80	0,8			
34		65	65	60	60	440	440	7500	7500	10300	10300	1050	1050	350	330	290	250	0,85	0,85			
35		68	68	62	62	460	460	7600	7600	10400	10400	1080	1080	360	340	300	260	0,90	0,9			

Tabela 6.48

Zestawienie parametrów obwodu magnetycznego prądu stałego – część II



Lp.	$S_{1N}$ mm <sup>2</sup>	$R_{11N}$ 1/H	$R_{12abN}$ 1/H	$l_{1w}$ mm	$S_{1w}$ mm <sup>2</sup>	$R_{13w}$ 1/H	$S_{1w}$ mm <sup>2</sup>	$R_{14w}$ 1/H	$R_{15abw}$ 1/H	$S_{1es}$ mm <sup>2</sup>	$R_{16es}$ 1/H	$S_{17s}$ mm <sup>2</sup>	$S_{18s}$ mm <sup>2</sup>	$r_{kur}$ mm	$l_{7k}$ mm	$R_{17k}$ 1/H	$R_{18k}$ 1/H	$R_{19Dw}$ 1/H	$\Sigma R_{\mu}$ 1/H	$\Sigma I \cdot z$ A	$\Phi_w$ mWb
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1																					
2																					
3																					
.....																					
35																					

**UWAGA:** symbole w nagłówku tablicy 6.48 takie same jak na rys. 6.38 – 6.40, tzn.:

- $S_{1N}$  – pole przekroju poprzecznego górnego nabiegunnika stojana (bieguna N);  
 $R_{\mu 1N}$  – oporność magnetyczna górnego nabiegunnika (północny N)  
 $R_{\mu 2doN}$  – oporność magnetyczna szczeliny powietrznej  $d_{o1}$  pomiędzy górnym nabiegunnikiem stojana (N) a rdzeniem wirnika;  
 $l_{3w}$  – długość drogi strumienia magnetycznego po prawej stronie rdzenia wirnika;  
 $S_{3w}$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego prawej części rdzenia wirnika;  
 $R_{\mu 3w}$  – oporność magnetyczna prawej części rdzenia wirnika;  
 $S_{4w}$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego lewej części rdzenia wirnika;  
 $R_{\mu 4w}$  – oporność magnetyczna lewej części rdzenia wirnika;  
 $R_{\mu ABw}$  – wypadkowa rezystancja magnetyczna równoległego połączenia rezystancji magnetycznej lewej i prawej strony rdzenia wirnika (wg rys. 6.40. – oporność magnetyczna pomiędzy punktami A-B);  
 $S_{6S}$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego dolnego nabiegunnika (południowy S);  
 $R_{\mu 5doS}$  – oporność magnetyczna szczeliny powietrznej  $d_{o5}$  pomiędzy dolnym nabiegunnikiem stojana (S) a rdzeniem wirnika;  
 $R_{\mu 6S}$  – oporność magnetyczna dolnego nabiegunnika (południowy S);  
 $S_{7S}$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego podłużnego prawej połowy korpusu prądnicy;  
 $S_{8S}$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego podłużnego lewej połowy korpusu prądnicy;  
 $r_{ksr}$  – wartość średnia promienia korpusu prądnicy;  
 $l_{7k}$  – średnia długość obwodu (magnetycznego), po którym przepływa strumień magnetyczny z prawej strony korpusu prądnicy;  
 $R_{\mu 7k}$  – oporność magnetyczna prawej połowy korpusu prądnicy;  
 $R_{\mu 8k}$  – oporność magnetyczna lewej połowy korpusu prądnicy;  
 $R_{\mu CDw}$  – wypadkowa rezystancja magnetyczna równoległego połączenia rezystancji magnetycznej lewej i prawej strony korpusu prądnicy (wg rys. 6.40. – oporność magnetyczna pomiędzy punktami C-D);  
 $\Sigma R_{\mu}$  – wypadkowa (sumaryczna) oporność magnetyczna prądnicy;  
 $\Sigma I \cdot z$  – wypadkowa (sumaryczna) siła magneto-motoryczna prądnicy;  
 $\Phi_w$  – wypadkowy (sumaryczny) strumień magnetyczny prądnicy.

Wskazówki: Proponuje się wykonać następujące czynności:

1. Obliczyć wysokość nabiegowników stojana.
2. Obliczyć pola przekroju poprzecznego poszczególnych elementów obwodu magnetycznego wzbudzenia prądnicy:
  - a) nabiegownika N (tab. 6.48, kolumna 2, oznaczenie  $S_{1N}$ ),
  - b) szczeliny powietrznej górnej, tu: proszę przyjąć równe wartości pola powierzchni nabiegownika N,
  - c) wirnika (osobno lewa i osobno prawa strona) – zakładamy symetryczność przepływu i symetryczność oporności magnetycznej,
  - d) szczeliny powietrznej dolnej, tu: proszę przyjąć równe wartości pola powierzchni nabiegownika S,
  - e) nabiegownika S,
  - f) korpusu prądnicy (osobno lewa i osobno prawa strona).
3. Obliczyć długości ww. odcinków obwodów magnetycznych, tj. długość drogi, którą pokonuje strumień magnetyczny  $\Phi_w$  przepływając przez ww. elementy obwodu magnetycznego.
4. Obliczyć rezystancję magnetyczną poszczególnych odcinków obwodu magnetycznego (rys. 6.40, szczegóły:  $R_{\mu 1}$ ;  $R_{\mu 2doN}$ ; ...)
5. Obliczyć wartość oporności magnetycznej dla odcinków zrównoległych:
  - a) dla węzła A-B – wzór (6.41);
  - b) dla węzła A-B – wzór (6.41);
6. Obliczyć rezystancję magnetyczną całkowitą obwodu magnetycznego  $\Sigma R_{\mu}$ .
7. Obliczyć łączną wartość siły magnetomotorycznej (z obydwu uzwojeń, tj. z obydwu nabiegowników)  $\Sigma(I \cdot z)$ .
8. Obliczyć wartość strumienia magnetycznego stojana prądnicy  $\Phi_w$ .

**UWAGA 1:** Należy uwzględnić, że zgodnie ze wzorem (2.4) wartość przenikalności magnetycznej jest iloczynem:

- a) przenikalności magnetycznej powietrza ( $\mu_0$ ) – przyjmujemy wartość  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ;
- b) przenikalności magnetycznej względnej – wartości do powyższego zadania zestawiono w tabeli 6.47 w kolumnach 9–14.

**UWAGA 2:** Należy przestrzegać konsekwentnie jednostek miar SI – przede wszystkim przed podstawieniem wartości długości i pola powierzchni do wzoru na oporność magnetyczną przeliczyć z mm oraz mm<sup>2</sup> na m i m<sup>2</sup>.



### 6.5.1.3. Obliczanie SEM twornika

W prądniccy prądu stałego wartość siły elektromotorycznej indukowanej w pojedynczym lub wielokrotnym zezwoju ukształtowanym w postaci ramki (umocowanym na wirniku) wyraża się wzorem (4.14). Oczywiście wartość chwilowa zwiększa się  $z$ -krotnie, gdzie  $z$  – liczba zwojów w ramce. Jest to sygnał prądu przemiennego. Dopiero prostownik elektromaszynowy, zwany powszechnie komutatorem, powoduje ukształtowanie przebiegu w formie ukazanej na rys. 4.25a.

Wzór (4.14) sugeruje, że wytwarzanie elektryczności w przewodzie elektrycznym może się odbywać tylko poprzez przemianę energii wirującej ramki przewodzącej umocowanej na wirniku prądniccy. W zasadzie kiedy genialny angielski naukowiec-samouk Michael Faraday odkrył doświadczalnie powstawanie SEM w obwodzie elektrycznym, przemieszczał on magnes stały w bezrdzeniowej cewce elektrycznej w postaci jednego zwartego zezwoju (rys. 4.50). Okazało się, że przemieszczanie magnesu trwałego do wnętrza zwoju wywołuje odwrotny kierunek przepływu prądu niż przy jego wyciąganiu (rys. 4.50a,b). Przy kolejnych doświadczeniach okazało się, że im więcej było zezwojów, tym większa wartość SEM indukowała się na zaciskach tej cewki. Jednocześnie im szybciej przesuwany był magnes, tym większa wartość SEM była indukowana. Zależność tę można zapisać wzorem na wartość chwilową siły elektromotorycznej:

$$e(t) = -z \cdot \frac{d\Phi_w}{dt} \quad (6.52)$$

Warto jeszcze wspomnieć o jednostkach strumienia magnetycznego oraz o jego wstępnej interpretacji fizycznej. Strumień magnetyczny ( $\Phi$ ) jest to łączna liczba linii magnetycznych. Indukcja magnetyczna ( $B$ ) jest to wartość strumienia magnetycznego podzielona przez powierzchnię przekroju poprzecznego danego elementu obwodu magnetycznego albo inaczej gęstość linii magnetycznych na jednostkę powierzchni do niego prostopadłej – wzór (4.6). Jednostką indukcji magnetycznej jest tesla, co można zapisać:

$$[B] = [T] \quad (6.53)$$

Większość urządzeń ma indukcję magnetyczną mniejszą od 1 T, dlatego stosuje się jednostkę mT albo gauss [Gs], przy czym:

$$1 [T] = 10^4 [Gs] \quad (6.54)$$

Jednostką strumienia magnetycznego ( $\Phi$ ) jest weber [Wb]. Jeżeli strumień magnetyczny wzrasta z prędkością 1 Wb/s to na końcach przewodnika elektrycznego o długości 1 m indukuje się SEM o wartości skutecznej  $E = 1$  V.

**Zadanie 1:** Proszę obliczyć wartość chwilową SEM pojedynczego zewoju w kolejnych położeniach kątowych  $\varphi$  zgodnie z tabelą 6.49, oraz narysować wektor SEM. Proszę również obliczyć wartość strumienia magnetycznego oraz wymiary biegunów wzbudzenia. Następnie wykonać rysunek zmian napięcia na końcu zwoju:

- a) bez komutatora,
- b) z komutatorem.

Tabela 6.49

Obliczanie SEM pojedynczej ramki zezwoju wirnika

Lp.	Dane		Wartość chwilowa SEM przy określonym położeniu kątowym $\varphi$ zezwoju w postaci ramki																		Uwagi			
	$\Phi_w$	z	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480	510		540	570	600
	Wb	-	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V		V	V	V
1	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
2																								
3																								
.....																								
35																								

## 6.6. Zadania związane z lotniczymi prądnicami prądu przemiennego i prostownikami

### 6.6.1. Transformatory

Wraz z rozwojem energetyki naziemnej wzrastało zapotrzebowanie na energię elektryczną, gdyż umożliwiała ona szybką i stosunkowo tanią przemianę w inne rodzaje energii, jak napęd maszyn mechanicznych, oświetlenie, pokrycia galwaniczne itd. W podrozdziale 4.3.1 przedstawiono rys historyczny rozwoju energetyki naziemnej i wytłumaczono, dlaczego sieci prądu przemiennego Nicoli Tesli wypierały elektrownie i sieci przesyłowe prądu stałego budowane przez Thomasa Edisona. Przypominając – tuż po wygenerowaniu z prądnicy prądu przemiennego napięcie mogło być podnoszone (wówczas zwykle do 15 kV) i doprowadzane na znaczną odległość kilkuset kilometrów do dużych miast, gdzie transformatory obniżały je do poziomu użytecznego dla konsumentów – zwykle 110 V albo 220 V, 60 Hz. Po podwyższeniu napięcia ta sama moc mogła być przesyłana cieńszym przewodem, dzięki czemu oszczędzano na masie żyły przewodzącej, zmniejszano straty cieplne i zmniejszano ich masę, co zmniejszało także masę ich podpór. Istotną rolę w systemie prądu przemiennego pełniły transformatory. One to odpowiadały za podnoszenie i obniżanie napięcia w sieci.

Materiały związane z fizykalnymi podstawami działania transformatora przedstawiono w punkcie 4.5.1.3. Podstawowy opis matematyczny związany z tą tematyką zawarto we wzorach 4.44–4.49.

**Zadanie 1:** Przyjmując liczbę uzwojeń pierwotnych 3,5 zwoju/V, proszę obliczyć brakujące parametry w tabeli 6.50 dla nieobciążonego prądowo (znajdującego się w tzw. stanie jałowym) transformatora trójfazowego lotniczego ( $f = 400$  Hz) o konfiguracji Y/Y oraz narysować przebiegi wejściowe i wyjściowe z oznaczeniem wartości napięć. Parametry wejściowe transformatora oznaczono kolorem, tak więc w lp. 1–18 mamy do czynienia z transformatorem obniżającym (stara technika lotnicza), a w lp. 19–36 z transformatorem zwiększającym (nowa technika lotnicza) napięcie. Należy pamiętać, że dla transformatora przyjmuje się oznaczenia faz (tu: w indeksach dolnych oznaczeń napięć):

- dla strony wysokiego napięcia duże litery: A, B, C np.  $E_{AN}$ ,  $E_{BN}$ ,  $E_{CN}$ ,
- dla strony niskiego napięcia małe litery: a, b, c np.  $E_{an}$ ,  $E_{bn}$ ,  $E_{cn}$ .

Tabela 6.50

Obliczanie parametrów transformatora

Lp.	$E_{AN}$		$E_{BN}$		$E_{CN}$		$E_{an}$		$E_{bn}$		$E_{cn}$		$Z_{AN}$	$Z_{BN}$	$Z_{CN}$	$Z_{an}$	$Z_{bn}$	$Z_{cn}$	Uwagi	
	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14							
1	108,0	108,0	108,0	18,0	18,0	18,0														
2	108,7	108,7	108,7	18,7	18,7	18,7														
3	109,4	109,4	109,4	19,4	19,4	19,4														
4	110,1	110,1	110,1	20,1	20,1	20,1														
5	110,8	110,8	110,8	20,8	20,8	20,8														
6	111,5	111,5	111,5	21,5	21,5	21,5														
7	112,2	112,2	112,2	22,2	22,2	22,2														
8	112,9	112,9	112,9	22,9	22,9	22,9														
9	113,6	113,6	113,6	23,6	23,6	23,6														
10	114,3	114,3	114,3	24,3	24,3	24,3														
11	115,0	115,0	115,0	25,0	25,0	25,0														
12	115,7	115,7	115,7	25,7	25,7	25,7														
13	116,4	116,4	116,4	26,4	26,4	26,4														
14	117,1	117,1	117,1	27,1	27,1	27,1														
15	117,8	117,8	117,8	27,8	27,8	27,8														
16	118,5	118,5	118,5	28,5	28,5	28,5														
17	119,2	119,2	119,2	29,2	29,2	29,2														
18	119,9	119,9	119,9	29,9	29,9	29,9														
19	170	170	170	108	108	108														
20	176,5	176,5	176,5	108,7	108,7	108,7														

cd. tab. 6.50

Lp.	$E_{AN}$	$E_{BN}$	$E_{CN}$	$E_{an}$	$E_{bn}$	$E_{cn}$	$Z_{AN}$	$Z_{BN}$	$Z_{CN}$	$Z_{an}$	$Z_{bn}$	$Z_{cn}$	Uwagi
	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
21	183,0	183,0	183,0	109,4	109,4	109,4							
22	189,5	189,5	189,5	110,1	110,1	110,1							
23	196,0	196,0	196,0	110,8	110,8	110,8							
24	202,5	202,5	202,5	111,5	111,5	111,5							
25	209,0	209,0	209,0	112,2	112,2	112,2							
26	215,5	215,5	215,5	112,9	112,9	112,9							
27	222,0	222,0	222,0	113,6	113,6	113,6							
28	228,5	228,5	228,5	114,3	114,3	114,3							
29	235,0	235,0	235,0	115	115	115							
30	241,5	241,5	241,5	115,7	115,7	115,7							
31	248,0	248,0	248,0	116,4	116,4	116,4							
32	254,5	254,5	254,5	117,1	117,1	117,1							
33	261,0	261,0	261,0	117,8	117,8	117,8							
34	267,5	267,5	267,5	118,5	118,5	118,5							
35	274,0	274,0	274,0	119,2	119,2	119,2							
36	280,5	280,5	280,5	119,9	119,9	119,9							

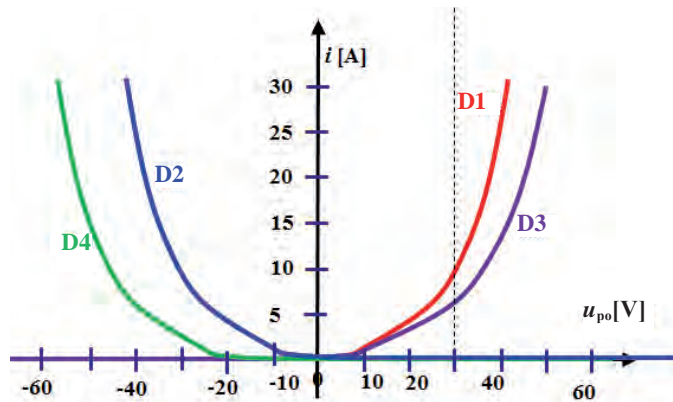
**UWAGA:** Zgodnie z ogólnie przyjętą w elektrotechnice zasadą wszystkie wartości napięć podane są w wartościach skutecznych.

## 6.6.2. Prostowniki

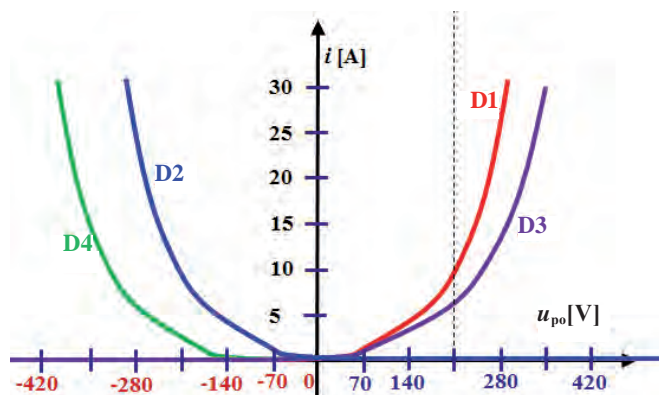
**Zadanie 1:** Proszę obliczyć brakujące wartości szczytowe napięcia na obciążeniu układu mostka Gretza przedstawione w tabeli 6.51 oraz narysować ich przebiegi analogicznie jak na rys. 4.102 przy zestawieniu charakterystyk poszczególnych diod zestawionych w tabelicy 6.51 oraz poglądowo przedstawionych na rys. 6.42 i 6.43.

Zadanie ma uzmysłowić zmianę kształtu przebiegu napięcia na wyjściu mostka Gretza oraz wpływ charakterystyk na kształt tego napięcia. Charakterystyki diod prostowniczych zastosowanych w zadaniu przedstawiono w tabeli 6.52.

Parametry wejściowe transformatora oznaczono kolorem – należy pamiętać, że na mostek prostownikowy przykładane jest napięcie wyjściowe transformatora.



Rys. 6.41. Charakterystyki czterech diod niskonapięciowych do zadania



Rys. 6.42. Charakterystyki czterech diod wysokonapięciowych do zadania

**Tabela 6.51**

**Obliczanie wybranych parametrów mostka Gretza oraz wybranych parametrów**

Lp.	$E_{we}$	$e_{wemax}$	$E_{wy}$	$e_{wymax}$
	V	V	V	V
1	2		5	
1	108,0		18,0	
2	108,7		18,7	
3	109,4		19,4	
4	110,1		20,1	
5	110,8		20,8	
6	111,5		21,5	
7	112,2		22,2	
8	112,9		22,9	
9	113,6		23,6	
10	114,3		24,3	
11	115,0		25,0	
12	115,7		25,7	
13	116,4		26,4	
14	117,1		27,1	
15	117,8		27,8	
16	118,5		28,5	
17	119,2		29,2	
18	119,9		29,9	
19	170		108	
20	176,5		108,7	
21	183,0		109,4	
22	189,5		110,1	
23	196,0		110,8	
24	202,5		111,5	
25	209,0		112,2	
26	215,5		112,9	
27	222,0		113,6	
28	228,5		114,3	
29	235,0		115	
30	241,5		115,7	
31	248,0		116,4	
32	254,5		117,1	
33	261,0		117,8	
34	267,5		118,5	
35	274,0		119,2	
36	280,5		119,9	



Tabela 6.52

Charakterystyki diod prostowniczych zastosowanych w zadaniu

Lp.	D1		D2		D3		D4	
	$u_{po}$	$i$	$u_{po}$	$i$	$u_{po}$	$i$	$u_{po}$	$i$
	V	A	V	A	V	A	V	A
1	2	3						
1	10	1	10	1,5	10	1,5	10	0,5
2	20	4,5	20	4,5	20	3,5	20	1
3	30	10	30	10	30	6	30	2,6
4	40	27	40	25	40	15	40	6
5	50	50	50	60	50	30	50	15
1	70	1	70	3	70	1,5	70	0,3
2	140	5	140	5	140	4	140	1
3	210	10	210	10	210	7	210	3
4	280	27	280	25	280	13,5	280	6,5
5	350	57	350	53	350	30	350	15

## 6.7. Zadania związane z podstawowymi wymaganiami na sieć elektroenergetyczną

Ze źródeł energii elektrycznej, np. prądnicy, zasila się zwykle znaczną liczbę odbiorników elektrycznych. Odbiorniki mogą być łączone szeregowo lub równolegle. Przy połączeniu szeregowym przez wszystkie odbiorniki płynie ten sam prąd. Wyłączenie jednego odbiornika powoduje przerwę w obwodzie, a tym samym wyłączenie wszystkich szeregowo połączonych odbiorników. Dlatego szeregowo łączy się odbiorniki o jednakowym prądzie znamionowym, użytkowane jednocześnie, np. komplety lamp choinkowych, żarniki lamp nadawczych, żarówki w starych typach oświetlenia wewnętrznego tramwajów, żarówki do podświetlenia światłowodów na panelach desek rozdzielczych w kabinie pilotów techniki lotniczej z lat 60. XX w.

Znacznie dogodniejsze i powszechnie dzisiaj stosowane we współcześnie konstruowanej technice lotniczej jest równoległe łączenie odbiornika, włączanego i wyłączanego za pomocą oddzielnego wyłącznika – uszkodzenie (przerwa w obwodzie) jednego z odbiorników nie powoduje wyłączenia innych odbiorników energii elektrycznej. Cechą charakterystyczną równoległego łączenia jest to, że wszystkie

równolegle połączone odbiorniki otrzymują jednakowe napięcie. Napięcie znamionowe, na które odbiornik został wykonany, powinno odpowiadać napięciu sieci zasilającej. Pobór prądu z sieci przez poszczególne odbiorniki jest przy danym napięciu wprost proporcjonalny do ich mocy znamionowej.

Przewody zasilające (dla sieci jedнопrzewodowej prądu stałego kabel elektryczny plusowy + obwód powrotny złożony z przewodów minusowych i kadłuba na drodze przepływu prądu powrotnego) łączące źródło napięcia z odbiornikami odznaczają się pewną rezystancją. Prąd o natężeniu  $I$ , przepływając przez te przewody, wywołuje na nich spadek napięcia, wskutek czego napięcie na zaciskach źródła i napięcie na odbiorniku różnią się między sobą. Chcąc odbiornikom zapewnić żądane napięcie, należy zwiększyć napięcie źródła o wartość napięcia równą spadkowi napięcia na przewodach doprowadzających. Oczywiście pod pojęciem spadku napięcia na przewodzie lotniczym rozumiemy cały ciąg rezystancji pomiędzy zaciskami źródła a zaciskami odbiornika, tj. rezystancje:

- 1) przewodów elektrycznych (plusowych dla prądu stałego albo fazowych dla prądu przemiennego),
- 2) styczników,
- 3) bezpiecznikach,
- 4) szynach rozdzielczych,
- 5) bocznikach amperomierzy,
- 6) przewodach minusowych,
- 7) przewodów minusowych,
- 8) kadłuba na drodze przepływu prądu powrotnego.

Normy lotnicze (punkt 3.4.2.3) dla sieci prądu stałego  $V_{DC}$  ustalają dla stanu ustalonego dla głównego źródła zasilania (prądnicy pokładowej):

- a) łączny spadek napięcia na przewodach, stycznikach, szynach itp. pomiędzy zaciskiem „+” źródła energii elektrycznej a zaciskiem „+” odbiornika energii elektrycznej od  $-2\text{ V}$  do  $0\text{ V}$ ;
- b) spadek napięcia na przewodzie minusowym w stanie ustalonym nie większy niż  $0,3\text{ V}$ ;
- c) przedziały zmian w stanie ustalonym przy normalnym działaniu układu zasilania elektrycznego (NSSL) od  $24\text{ V}$  do  $29\text{ V}$ ;
- d) rezystancję pojedynczego styku mechanicznego konstrukcji kadłuba statku powietrznego, przez który przepływa prąd powrotny, nie większą niż  $600\ \mu\Omega$ ;
- e) spadek napięcia na styczniku w odniesieniu do jego prądu znamionowego:
  - dla „starej” techniki, konstruowanej przed rokiem 80. XX w. nie większy niż  $150\text{ mV}$ ,

- dla „nowej” techniki, konstruowanej po roku 80. XX w. nie większy niż 50 mV.

### 6.7.1. Obliczanie parametrów użytkowych okablowania statku powietrznego

**Zadanie 1:** Proszę obliczyć masę miedzi w sieci elektrycznej jedнопроводowej jak na rys. 6.44 dla parametrów zestawionych w tabeli 6.53. W tabeli podano moc odbiorników prądu stałego 28,5 V oraz długość linii przesyłowych:

1. Linia przesyłowa 270 V<sub>DC</sub> z gondoli lewego silnika do szyny nr 1 (główniej szyny zbiorczej) –  $L_L$ .
2. Linia przesyłowa 270 V<sub>DC</sub> z gondoli prawego silnika do szyny nr 1 (główniej szyny zbiorczej) –  $L_P$ .
3. Linia przesyłowa 270 V<sub>DC</sub> z szyny nr 1 do szyny nr 4 (w kabinie pilotów) –  $L_K$ .
  - a) linia przesyłowa 28,5 V<sub>DC</sub> z szyny nr 4 (w kabinie pilotów) do odbiornika energii elektrycznej „Odb.1” (w kabinie pilotów) –  $L_{4o1}$ ;
  - b) linia przesyłowa 28,5 V<sub>DC</sub> z szyny nr 4 (w kabinie pilotów) do odbiornika energii elektrycznej „Odb.2” (w kabinie pilotów) –  $L_{4o2}$ .
4. Linia przesyłowa 270 V<sub>DC</sub> z szyny nr 1 (główniej szyny zbiorczej) do szyny nr 2 (w przedziale pasażerskim) –  $L_P$ .
  - a) linia przesyłowa 28,5 V<sub>DC</sub> z szyny nr 2 (w przedziale pasażerskim) do odbiornika energii elektrycznej „Odb.3” –  $L_{2o3}$ ;
  - b) linia przesyłowa 28,5 V<sub>DC</sub> z szyny nr 2 (w przedziale pasażerskim) do odbiornika energii elektrycznej „Odb.4” –  $L_{2o4}$ .

Ponadto przyjęto oznaczenia:

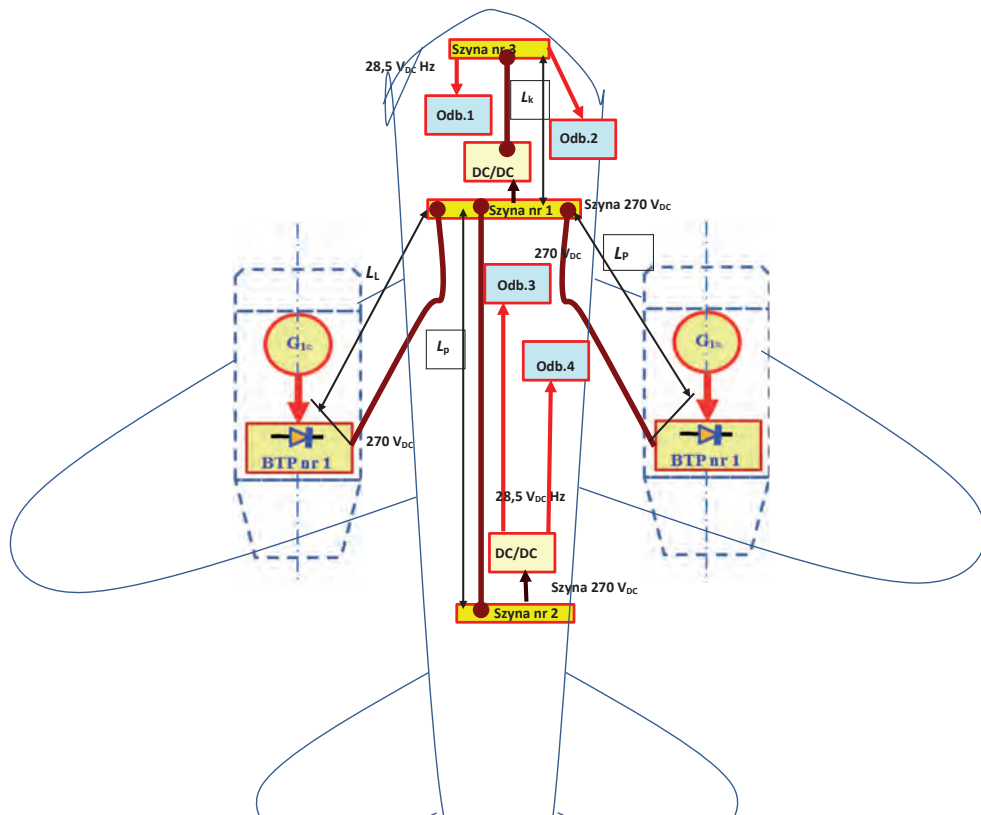
$U_{G1}$  – wartość napięcia na zaciskach bloku transformatorowo-prostowniczego BTP1,

$U_{G2}$  – wartość napięcia na zaciskach bloku transformatorowo-prostowniczego BTP2,

$P_1, P_2, P_3, P_4$  – wartość mocy (czynnej) odbiorników energii elektrycznej, kolejno odbiorników z rys. 6.44: Odb.1, Odb.2, Odb.3, Odb.4.

Przewody minusowe odbiorników dobrać o średnicy przekroju poprzecznego równej polu poprzecznemu żyły przewodzącej „plusowej”. Spadki napięcia w obwodzie powrotnym (na szwach kadłuba) należy pominąć, jak również straty energii na przetwarzanie (np. w bloku transformatorowo-prostownicznym BTP lub w przetworniku DC/DC). Zakładamy, że przy przewodach przyłączonych do każdej z szyn są diody półprzewodnikowe zabezpieczające przed przepływem prądu

dów wyrównawczych. Do obliczeń masy żył przewodzących przyjęć gęstość miedzi  $8,96 \text{ g/cm}^3$  oraz gęstość dopuszczalną prądu  $J_N = 3,1 \text{ A/mm}^2$ .



**Rys. 6.43.** Schemat sieci wysokonapięciowej do zadania nr 1

Wskazówki:

1. Obliczyć indywidualny pobór prądowy przy napięciu znamionowym  $U_N = 28,5 \text{ V}$ :

$$I_i = \frac{P_i}{U_N} \quad (6.55)$$

2. Obliczyć łączne zapotrzebowanie prądowe  $\Sigma I_{28,5}$  odbiorników o napięciu znamionowym 28,5 V:

$$\Sigma I_{28,5} = \sum_{i=1}^{i=7} I_i \quad (6.56)$$

3. Obliczyć łączne natężenie prądu pobierane z BTP wysokonapięciowych 270 V z proporcji napięć znamionowych:

$$\Sigma I_{\text{BTP}} = \frac{28,5}{270} \cdot \Sigma I_{28,5} \quad (6.57)$$

4. Zakładając symetrię rozkładu, przyjąć równomierne obciążenie prądowe obu BTP.  
5. Obliczyć natężenie prądu płynącego pomiędzy BTP1 a szyną nr 1; oraz pomiędzy BTP2 a szyną nr 1:

$$I_{\text{BTP1}} = I_{\text{BTP2}} = \frac{1}{2} \cdot \Sigma I_{\text{BTP}} \quad (6.58)$$

6. Obliczyć natężenie prądu płynącego pomiędzy szyną nr 1 a szyną nr 4 (kabina pilotów):

- a) zsumować natężenie prądu odbiorników nr 1 i 2 – wartość  $\Sigma I_{1-2}$ , tj. łączny pobór prądu obydwu odbiorników zainstalowanych w kabinie (rys. 6.44, elementy: Odb.1, Odb.2):

$$\Sigma I_{1-2} = I_1 + I_2 \quad (6.59)$$

- b) obliczyć łączne natężenie prądu pobierane z (wysokonapięciowej 270 V) szyny nr 1 z proporcji napięć znamionowych analogicznie jak w pkt. 3, wykorzystując wzór (6.58).

**Zadanie 2:** Analogicznie jak w zadaniu 1, proszę obliczyć masę miedzi w sieci elektrycznej jedнопrzewodowej jak na rys. 6.44, jednakże w miejsce odcinków sieci o napięciu znamionowym 270 V<sub>DC</sub> zastosować napięcie znamionowe 28,5 V<sub>DC</sub>, dla parametrów zestawionych w tabeli 6.54.

**Tabela 6.53**

Obliczanie masy miedzi w elektrycznej sieci kablowej jedнопроводовой высоконапѐтowej 270 V<sub>DC</sub>

Lp.	UG1	UG2	ZL= Lp	SL=Sp	mL= mL	Lk	Sk	mk	Lk1= Lk2	Sk1	mk1	Sk2	mk2	Lpp	Spp	mpp	L.3	S3	m3	L204	S204	m204	P1	P2	P3	P4	Σm
	V	V	m	mm2	kg	m	mm2	cm2	kg	m	V	W	W	W	W	W	W	W	W	A	A	A	A	A	A	A	kg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	170	170	8			1,00			0,50				20			14				18			74	75	126	127	
20	176,5	176,5	10			1,25			0,63				21			14,7				18,9			124	125	226	227	
21	183	183	12			1,50			0,75				22			15,4				19,8			174	175	326	327	
22	189,5	189,5	14			1,75			0,88				23			16,1				20,7			224	225	426	427	
23	196	196	16			2,00			1,00				24			16,8				21,6			274	275	526	527	
24	202,5	202,5	18			2,25			1,13				25			17,5				22,5			324	325	626	627	
25	209	209	20			2,50			1,25				26			18,2				23,4			374	375	726	727	
26	215,5	215,5	22			2,75			1,38				27			18,9				24,3			424	425	826	827	
27	222	222	24			3,00			1,50				28			19,6				25,2			474	475	926	927	
28	228,5	228,5	26			3,25			1,63				29			20,3				26,1			524	525	1026	1027	
29	235	235	28			3,50			1,75				30			21				27			574	575	1126	1127	
30	241,5	241,5	30			3,75			1,88				31			21,7				27,9			624	625	1226	1227	
31	248	248	32			4,00			2,00				32			22,4				28,8			674	675	1326	1327	
32	254,5	254,5	34			4,25			2,13				33			23,1				29,7			724	725	1426	1427	
33	261	261	36			4,50			2,25				34			23,8				30,6			774	775	1526	1527	
34	267,5	267,5	38			4,75			2,38				35			24,5				31,5			824	825	1626	1627	
35	274	274	40			5,00			2,50				36			25,2				32,4			874	875	1726	1727	



**Tabela 6.54**

**Obliczanie masy miedzi w elektrycznej sieci kablowej jedнопроводовой niskonapięciowej 28,5 V<sub>DC</sub>**

Lp.	U <sub>G1</sub>	U <sub>G2</sub>	L <sub>p</sub> = L <sub>p</sub>	S <sub>p</sub> = S <sub>p</sub>	m <sub>L</sub> = m <sub>L</sub>	L <sub>k</sub>	S <sub>k</sub>	m <sub>k</sub>	L <sub>k2</sub> = L <sub>k2</sub>	S <sub>k1</sub>	m <sub>k1</sub>	S <sub>k2</sub>	m <sub>k2</sub>	L <sub>pp</sub>	S <sub>pp</sub>	m <sub>pp</sub>	L <sub>o</sub>	S <sub>o</sub>	m <sub>o</sub>	L <sub>304</sub>	S <sub>304</sub>	m <sub>304</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	Σm
	V	V	m	mm <sup>2</sup>	kg	m	mm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	kg	m	V	W	W	W	W	W	W	W	W	A	A	A	A	A	A	A	A
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	170	170	8			1,00			0,50					20			14			18			74	75	126	127	
20	176,5	176,5	10			1,25			0,63					21			14,7			18,9			124	125	226	227	
21	183	183	12			1,50			0,75					22			15,4			19,8			174	175	326	327	
22	189,5	189,5	14			1,75			0,88					23			16,1			20,7			224	225	426	427	
23	196	196	16			2,00			1,00					24			16,8			21,6			274	275	526	527	
24	202,5	202,5	18			2,25			1,13					25			17,5			22,5			324	325	626	627	
25	209	209	20			2,50			1,25					26			18,2			23,4			374	375	726	727	
26	215,5	215,5	22			2,75			1,38					27			18,9			24,3			424	425	826	827	
27	222	222	24			3,00			1,50					28			19,6			25,2			474	475	926	927	
28	228,5	228,5	26			3,25			1,63					29			20,3			26,1			524	525	1026	1027	
29	235	235	28			3,50			1,75					30			21			27			574	575	1126	1127	
30	241,5	241,5	30			3,75			1,88					31			21,7			27,9			624	625	1226	1227	
31	248	248	32			4,00			2,00					32			22,4			28,8			674	675	1326	1327	
32	254,5	254,5	34			4,25			2,13					33			23,1			29,7			724	725	1426	1427	
33	261	261	36			4,50			2,25					34			23,8			30,6			774	775	1526	1527	
34	267,5	267,5	38			4,75			2,38					35			24,5			31,5			824	825	1626	1627	
35	274	274	40			5,00			2,50					36			25,2			32,4			874	875	1726	1727	



cd. tab. 6.54

	$U_{G1}$	$U_{G2}$	$L_1 = L_p$	$S_1 = S_p$	$m_1 = m_L$	$L_k$	$S_k$	$m_k$	$L_{k1} = L_{k2}$	$S_{k1}$	$m_{k1}$	$S_{k2}$	$m_{k2}$	$L_{pp}$	$S_{pp}$	$m_{pp}$	$L_5$	$S_5$	$m_3$	$L_{204}$	$S_{204}$	$m_{204}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$\Sigma m$	
I.p.	V	V	m	mm <sup>2</sup>	kg	m	mm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	kg	m	V	W	W	W	W	W	W	W	A	A	A	A	A	A	A	A	A	kg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
36	280,5	280,5	42			5,25		2,63					37				25,9			33,3			924	925	1826	1827		
37	170	170	8			1,00		0,50					20				14			18			974	975	1926	1927		
38	176,5	176,5	10			1,25		0,63					21				14,7			18,9			1024	1025	2026	2027		
39	183	183	12			1,50		0,75					22				15,4			19,8			1074	1075	2126	2127		
40	189,5	189,5	14			1,75		0,88					23				16,1			20,7			1124	1125	2226	2227		
41	196	196	16			2,00		1,00					24				16,8			21,6			1174	1175	2326	2327		
42	202,5	202,5	18			2,25		1,13					25				17,5			22,5			1224	1225	2426	2427		
43	209	209	20			2,50		1,25					26				18,2			23,4			1274	1275	2526	2527		
44	215,5	215,5	22			2,75		1,38					27				18,9			24,3			1324	1325	2626	2627		
45	222	222	24			3,00		1,50					28				19,6			25,2			1374	1375	2726	2727		
46	228,5	228,5	26			3,25		1,63					29				20,3			26,1			1424	1425	2826	2827		
47	235	235	28			3,50		1,75					30				21			27			1474	1475	2926	2927		
48	241,5	241,5	30			3,75		1,88					31				21,7			27,9			1524	1525	3026	3027		
49	248	248	32			4,00		2,00					32				22,4			28,8			1574	1575	3126	3127		
50	254,5	254,5	34			4,25		2,13					33				23,1			29,7			1624	1625	3226	3227		
51	261	261	36			4,50		2,25					34				23,8			30,6			1674	1675	3326	3327		
52	267,5	267,5	38			4,75		2,38					35				24,5			31,5			1724	1725	3426	3427		
53	274	274	40			5,00		2,50					36				25,2			32,4			1774	1775	3526	3527		
54	280,5	280,5	42			5,25		2,63					37				25,9			33,3			1824	1825	3626	3627		

### 6.7.2. Skłonność odbiornika prądu stałego do wyłączania na skutek zbyt dużej oporności obwodu kablowego. Zastosowanie praktyczne szeregu AWG

**Zadanie 1:** Proszę obliczyć wartości napięć na zaciskach odbiorników w kablowej sieci elektrycznej (wysokonapięciowej 270 V<sub>DC</sub>), analogicznej jak w zadaniu nr 1 w punkcie 6.7.1, przy założeniu, że działa tylko jedna prądnicą (druga jest odłączona). W tym celu kolejno wykonać następujące czynności:

1. Dobrać pole przekroju poprzecznego przewodów według szeregu AWG (American Wire Gauge), posługując się danymi z tabeli 6.55 – dobrana wartość wyliczona jest w zadaniu 1 w punkcie 6.7.1 w mm<sup>2</sup> (tab. 6.53, kolumny: 5, 8, 11, 13, 16, 19, 22) – teraz korzystając z tabeli 6.55 należy dobrać przewód o takim samym polu przekroju (albo nieco większym, jeżeli w tabeli 6.55 nie ma takiego samego).
2. Obliczyć rezystancje poszczególnych odcinków przewodów elektrycznych, korzystając z tabeli 6.55 – rezystancja właściwa żyły miękkiej pokrytej cyną (tab. 6.55, kolumna 5). Obliczyć rezystancję odbiorników energii elektrycznej z danych znamionowych (moc znamionowa, napięcie znamionowe).
3. Narysować schemat zastępczy rezystancji.
4. Obliczyć wypadkową rezystancję (równoległą) odbiorników Odb.1 i Odb.2.
5. Obliczyć wypadkową rezystancję (równoległą) odbiorników Odb.3 i Odb.4.
6. Obliczyć wypadkową rezystancję (szeregową) liczoną od szyny nr 1 do Odb.1 i Odb.2 łącznie.
7. Obliczyć wypadkową rezystancję (szeregową) liczoną od szyny nr 1 do Odb.3 i Odb.4 łącznie.
8. Obliczyć wypadkową rezystancję (równoległą) rezystancji obliczonej z pkt 7 i pkt 8.
9. Obliczyć (z prawa Ohma dla obwodu zamkniętego przy założeniu zerowej rezystancji wewnętrznej źródła) natężenie prądu pobierane z BTP1.
10. Obliczyć (z prawa Ohma dla odcinka obwodu elektrycznego) spadek napięcia na kablu łączącym BTP1 z szyną nr 1.
11. Obliczyć (z prawa Ohma dla obwodu zamkniętego) natężenie prądu płynącego przez przewód łączący szynę nr 1 (przewód elektryczny o długości  $L_k$ ) z szyną nr 3.
12. Obliczyć (z prawa Ohma dla odcinka obwodu elektrycznego) spadek napięcia na odcinku kablowym łączącym szynę nr 3 z odbiornikiem ODB.1.
13. Obliczyć (z prawa Ohma dla odcinka obwodu elektrycznego) spadek napięcia na odbiorniku ODB.1 – wstawić wartość do tablicy 6.56 jako  $U_1$ .

14. Obliczyć (z prawa Ohma dla odcinka obwodu elektrycznego) spadek napięcia na odcinku kablowym łączącym szynę nr 3 z odbiornikiem ODB.2.
15. Obliczyć (z prawa Ohma dla odcinka obwodu elektrycznego) spadek napięcia na odbiorniku ODB.2 – wstawić wartość do tablicy 6.56 jako  $U_2$ .
16. Obliczyć (z prawa Ohma dla obwodu zamkniętego) natężenie prądu płynącego przez przewód łączący szynę nr 1 (przewód elektryczny o długości  $L_{pp}$ ) z szyną nr 2.
17. Obliczyć (z prawa Ohma dla odcinka obwodu elektrycznego) spadek napięcia na odcinku kablowym łączącym szynę nr 2 z odbiornikiem ODB.3.
18. Obliczyć (z prawa Ohma dla odcinka obwodu elektrycznego) spadek napięcia na odbiorniku ODB.3 – wstawić wartość do tablicy 6.56 jako  $U_3$ .
19. Obliczyć (z prawa Ohma dla odcinka obwodu elektrycznego) spadek napięcia na odcinku kablowym łączącym szynę nr 2 z odbiornikiem ODB.4.
20. Obliczyć (z prawa Ohma dla odcinka obwodu elektrycznego) spadek napięcia na odbiorniku ODB.4 – wstawić wartość do tablicy 6.56 jako  $U_4$ .
21. Oporność drogi powrotnej prądu przez kadłub statku powietrznego proszę pominać.
22. Wyniki zanotować w tabelach 6.56 i 6.57.

**Zadanie 2:** Proszę obliczyć napięcie na zaciskach odbiorników w kablowej sieci elektrycznej (niskonapięciowej 28,5 V), analogicznej jak w zadaniu nr 1 w punkcie 6.7.1, przy założeniach analogicznych jak w zadaniu 1. Wyniki zanotować w tabelach 6.58 i 6.59.

Tabela 6.55

## Obliczanie rezystancji żyły przewodzącej

Parametry geometryczne żyły przewodzącej		Rezystancja właściwa $\rho$ żyły [ $\Omega/\text{km}$ ]				
wg AWG	pole przekroju poprzecznego $S$ [ $\text{mm}^2$ ]	miedzianej miękkiej, pokrytej			ze stopu miedzi (z kadmem), pokrytej	
		srebrem	niklem	cyną	srebrem	niklem
1	2	3	4	5	6	7
30	0,057	342,38	376,38	368,56	399,16	440,64
28	0,089	216,92	230,86	233,24	252,96	268,6
26	0,154	130,56	143,48	140,42	152,32	167,96
24	0,241	82,62	88,06	89,08	96,56	102,34
22	0,382	51,34	54,4	55,08	59,5	63,24
20	0,616	31,25	33,22	33,59	36,38	38,76
18	0,963	19,41	20,74	21,18	-	-
16	1,229	15,37	16,18	16,35	-	-
14	1,941	9,79	10,2	10,4	-	-
12	3,085	6,46	6,73	6,87	-	-
12	2,976	6,70	6,98	7,12	-	-
8	4,740	2,237	2,36	2,383	-	-
6	11,921	1,421	1,482	1,513	-	-
4	13,589	0,897	0,935	0,952	-	-
2	21,593	0,578	0,602	0,622	-	-
1	33,696	0,473	0,489	0,506	-	-
0	41,398	0,367	0,384	0,394	-	-
00	52,951	0,289	0,303	0,313	-	-
000	67,392	0,231	0,241	0,241	-	-
0000	84,367	0,184	0,19	0,19	-	-

Tabela 6.56

Obliczanie spadków napięcia w elektrycznej sieci kablowej jedнопроводowej wysoконapięciowej 270 V<sub>DC</sub> oraz napięć na zaciskach odbior-  
ników energii elektrycznej 28,5 V<sub>DC</sub>, cz. 1 – obliczanie rezystancji kabli plusowych

Lp.	U <sub>G1</sub>	U <sub>G2</sub>	L <sub>L1</sub> = L <sub>p</sub>	AWG	R <sub>L1</sub>	L <sub>k</sub>	AWG	R <sub>k</sub>	L <sub>G1</sub> = L <sub>G2</sub>	AWG	R <sub>L1</sub>	AWG	R <sub>k2</sub>	L <sub>pp</sub>	AWG	R <sub>pp</sub>	L <sub>3</sub>	AWG	R <sub>3</sub>	L <sub>304</sub>	AWG	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	
	V	V	m	--	Ω	m	--	Ω	kg	--	Ω	--	Ω	W	--	Ω	W	Ω	--	Ω	A	--	Ω	Ω	Ω	Ω
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1	170	0	8			1,00			0,50					20			14			18						
20	176,5	0	10			1,25			0,63					21			14,7			18,9						
21	183	0	12			1,50			0,75					22			15,4			19,8						
22	189,5	0	14			1,75			0,88					23			16,1			20,7						
23	196	0	16			2,00			1,00					24			16,8			21,6						
24	202,5	0	18			2,25			1,13					25			17,5			22,5						
25	209	0	20			2,50			1,25					26			18,2			23,4						
26	215,5	0	22			2,75			1,38					27			18,9			24,3						
27	222	0	24			3,00			1,50					28			19,6			25,2						
28	228,5	0	26			3,25			1,63					29			20,3			26,1						
29	235	0	28			3,50			1,75					30			21			27						
30	241,5	0	30			3,75			1,88					31			21,7			27,9						
31	248	0	32			4,00			2,00					32			22,4			28,8						
32	254,5	0	34			4,25			2,13					33			23,1			29,7						
33	261	0	36			4,50			2,25					34			23,8			30,6						
34	267,5	0	38			4,75			2,38					35			24,5			31,5						
35	274	0	40			5,00			2,50					36			25,2			32,4						

cd. tab. 6.56

Lp.	$U_{G1}$	$U_{G2}$	$I_{L1} = I_p$	AWG	$R_{L1}$	$L_k$	AWG	$R_k$	$L_{k1} = L_{k2}$	AWG	$R_{k1}$	AWG	$R_{k2}$	$I_{pp}$	AWG	$R_{pp}$	$L_3$	AWG	$R_3$	$L_{304}$	AWG	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
	V	V	m	--	$\Omega$	m	--	$\Omega$	kg	--	$\Omega$	--	$\Omega$	W	--	$\Omega$	W	W	$\Omega$	A	--	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
36	280,5	0	42			5,25			2,63					37			25,9			33,3					
37	170	0	8			1,00			0,50					20			14			18					
38	176,5	0	10			1,25			0,63					21			14,7			18,9					
39	183	0	12			1,50			0,75					22			15,4			19,8					
40	189,5	0	14			1,75			0,88					23			16,1			20,7					
41	196	0	16			2,00			1,00					24			16,8			21,6					
42	202,5	0	18			2,25			1,13					25			17,5			22,5					
43	209	0	20			2,50			1,25					26			18,2			23,4					
44	215,5	0	22			2,75			1,38					27			18,9			24,3					
45	222	0	24			3,00			1,50					28			19,6			25,2					
46	228,5	0	26			3,25			1,63					29			20,3			26,1					
47	235	0	28			3,50			1,75					30			21			27					
48	241,5	0	30			3,75			1,88					31			21,7			27,9					
49	248	0	32			4,00			2,00					32			22,4			28,8					
50	254,5	0	34			4,25			2,13					33			23,1			29,7					
51	261	0	36			4,50			2,25					34			23,8			30,6					
52	267,5	0	38			4,75			2,38					35			24,5			31,5					
53	274	0	40			5,00			2,50					36			25,2			32,4					
54	280,5	0	42			5,25			2,63					37			25,9			33,3					

Tabela 6.57

Obliscanie spadków napięcia w elektrycznej sieci kablowej jednoprzewodowej wysokonapięciowej 270 V<sub>DC</sub> oraz napięć na zaciskach odbiorników energii elektrycznej 28,5 V<sub>DC</sub>, cz. 2 – obliczanie napięcia na zaciskach odbiornika

Lp.	U <sub>G1</sub>	U <sub>G2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	R <sub>odb.1</sub>	R <sub>odb.2</sub>	R <sub>odb.3</sub>	R <sub>odb.4</sub>	R <sub>ind.1</sub>	R <sub>sub.2</sub>	R <sub>ind.3</sub>	R <sub>sub.4</sub>	R <sub>odb.1</sub>	R <sub>odb.2</sub>	R <sub>odb.3</sub>	R <sub>odb.4</sub>	ΔR	ΔI	ΔU <sub>1</sub>	U <sub>int</sub>	U <sub>301</sub>	U <sub>201</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>				
	V	V	A	A	A	A	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	A	V	V	V	V	V	V	V	V			
1	2	3	24	25	26	27	23	24	25	26	23	24	25	26	23	24	25	26	23	24	24											
1	170	0	74	75	126	127																										
20	176,5	0	124	125	226	227																										
21	183	0	174	175	326	327																										
22	189,5	0	224	225	426	427																										
23	196	0	274	275	526	527																										
24	202,5	0	324	325	626	627																										
25	209	0	374	375	726	727																										
26	215,5	0	424	425	826	827																										
27	222	0	474	475	926	927																										
28	228,5	0	524	525	1026	1027																										
29	235	0	574	575	1126	1127																										
30	241,5	0	624	625	1226	1227																										
31	248	0	674	675	1326	1327																										
32	254,5	0	724	725	1426	1427																										
33	261	0	774	775	1526	1527																										
34	267,5	0	824	825	1626	1627																										
35	274	0	874	875	1726	1727																										
36	280,5	0	924	925	1826	1827																										

cd. tab. 6.57

Lp.	$U_{c1}$		$U_{c2}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$R_{sub1}$	$R_{sub2}$	$R_{sub3}$	$R_{sub4}$	$R_{sub1}$	$R_{sub2}$	$R_{sub3}$	$R_{sub4}$	$R_{sub1}$	$R_{sub2}$	$R_{sub3}$	$R_{sub4}$	$R_{sub12}$	$R_{sub34}$	$\Delta R$	$\Delta I$	$\Delta U_L$	$U_{M1}$	$U_{M3}$	$U_{2M}$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$
	V	V	V	A	A	A	A	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	A	V	V	V	V	V	V	V	V
1	2	3	24	25	26	27	23	24	25	26	26	23	24	25	26	26	23	24	25	26	23	24	24	A	V	V	V	V	V	V	V
37	170	0	974	975	1926	1927																									
38	176,5	0	1024	1025	2026	2027																									
39	183	0	1074	1075	2126	2127																									
40	189,5	0	1124	1125	2226	2227																									
41	196	0	1174	1175	2326	2327																									
42	202,5	0	1224	1225	2426	2427																									
43	209	0	1274	1275	2526	2527																									
44	215,5	0	1324	1325	2626	2627																									
45	222	0	1374	1375	2726	2727																									
46	228,5	0	1424	1425	2826	2827																									
47	235	0	1474	1475	2926	2927																									
48	241,5	0	1524	1525	3026	3027																									
49	248	0	1574	1575	3126	3127																									
50	254,5	0	1624	1625	3226	3227																									
51	261	0	1674	1675	3326	3327																									
52	267,5	0	1724	1725	3426	3427																									
53	274	0	1774	1775	3526	3527																									
54	280,5	0	1824	1825	3626	3627																									



**Tabela 6.58**  
**Obliczanie spadków napięcia w elektrycznej sieci kablowej jedнопроводowej wysokonapięciowej 270 V<sub>DC</sub> oraz napięć na zaciskach odbior-  
 ników energii elektrycznej 28,5 V<sub>DC</sub>, cz. 1 – obliczanie rezystancji kabli plusowych**

Lp.	U <sub>ci</sub>	U <sub>cz</sub>	L <sub>p</sub> <sup>+</sup> L <sub>p</sub>	AWG	R <sub>l</sub>	L <sub>k</sub>	AWG	R <sub>k</sub>	L <sub>01</sub> <sup>+</sup> L <sub>02</sub>	AWG	R <sub>01</sub>	AWG	R <sub>02</sub>	L <sub>pp</sub>	AWG	R <sub>pp</sub>	L <sub>3</sub>	AWG	R <sub>3</sub>	L <sub>04</sub>	AWG	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	
	V	V	m	--	Ω	m	--	Ω	kg	--	Ω	--	Ω	W	--	Ω	W	W	--	Ω	A	--	Ω	Ω	Ω	Ω
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	170	0	8		1,00				0,50					20			14				18					
20	176,5	0	10		1,25				0,63					21			14,7				18,9					
21	183	0	12		1,50				0,75					22			15,4				19,8					
22	189,5	0	14		1,75				0,88					23			16,1				20,7					
23	196	0	16		2,00				1,00					24			16,8				21,6					
24	202,5	0	18		2,25				1,13					25			17,5				22,5					
25	209	0	20		2,50				1,25					26			18,2				23,4					
26	215,5	0	22		2,75				1,38					27			18,9				24,3					
27	222	0	24		3,00				1,50					28			19,6				25,2					
28	228,5	0	26		3,25				1,63					29			20,3				26,1					
29	235	0	28		3,50				1,75					30			21				27					
30	241,5	0	30		3,75				1,88					31			21,7				27,9					
31	248	0	32		4,00				2,00					32			22,4				28,8					
32	254,5	0	34		4,25				2,13					33			23,1				29,7					
33	261	0	36		4,50				2,25					34			23,8				30,6					
34	267,5	0	38		4,75				2,38					35			24,5				31,5					
35	274	0	40		5,00				2,50					36			25,2				32,4					
36	280,5	0	42		5,25				2,63					37			25,9				33,3					

cd. tab. 6.58

I.p.	$U_{c1}$	$U_{c2}$	$L_4 = L_p$	AWG	$R_L$	$L_k$	AWG	$R_k$	$L_{k1} = L_{k2}$	AWG	$R_{k1}$	AWG	$R_{k2}$	$L_{pp}$	AWG	$R_{pp}$	$L_3$	AWG	$R_3$	$L_{3st}$	AWG	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
	V	V	m	--	$\Omega$	m	--	$\Omega$	kg	--	$\Omega$	--	$\Omega$	W	--	$\Omega$	W	--	$\Omega$	A	--	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
37	170	0	8			1,00			0,50					20			14			18					
38	176,5	0	10			1,25			0,63					21			14,7			18,9					
39	183	0	12			1,50			0,75					22			15,4			19,8					
40	189,5	0	14			1,75			0,88					23			16,1			20,7					
41	196	0	16			2,00			1,00					24			16,8			21,6					
42	202,5	0	18			2,25			1,13					25			17,5			22,5					
43	209	0	20			2,50			1,25					26			18,2			23,4					
44	215,5	0	22			2,75			1,38					27			18,9			24,3					
45	222	0	24			3,00			1,50					28			19,6			25,2					
46	228,5	0	26			3,25			1,63					29			20,3			26,1					
47	235	0	28			3,50			1,75					30			21			27					
48	241,5	0	30			3,75			1,88					31			21,7			27,9					
49	248	0	32			4,00			2,00					32			22,4			28,8					
50	254,5	0	34			4,25			2,13					33			23,1			29,7					
51	261	0	36			4,50			2,25					34			23,8			30,6					
52	267,5	0	38			4,75			2,38					35			24,5			31,5					
53	274	0	40			5,00			2,50					36			25,2			32,4					
54	280,5	0	42			5,25			2,63					37			25,9			33,3					

Tabela 6.59

Obliczanie spadków napięcia w elektrycznej sieci kablowej jedнопроводовой высоконапряжённой 270 V<sub>DC</sub> oraz napięć na zaciskach odbior-  
ników energii elektrycznej 28,5 V<sub>DC</sub>, cz. 2 – obliczanie rezystancji kabli plusowych

Lp.	$U_{G1}$	$U_{G2}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$R_{\text{ob1.1}}$	$R_{\text{ob1.2}}$	$R_{\text{ob1.3}}$	$R_{\text{ob1.4}}$	$R_{\text{ob1.1}}$	$R_{\text{ob1.2}}$	$R_{\text{ob1.3}}$	$R_{\text{ob1.4}}$	$R_{\text{ob1.1}}$	$R_{\text{ob1.2}}$	$R_{\text{ob1.3}}$	$R_{\text{ob1.4}}$	$R_{\text{ob1.1}}$	$R_{\text{ob1.2}}$	$R_{\text{ob1.3}}$	$R_{\text{ob1.4}}$	$\Delta R$	$\Delta U_L$	$U_{1M}$	$U_{3M}$	$U_{2M}$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$			
	V	V	A	A	A	A	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	A	V	V	V	V	V	V	V			
1	2	3	24	25	26	27	23	24	25	26	23	24	25	26	23	24	25	26	23	24	25	26	23	24	24									
1	170	0	74	75	126	127																												
20	176,5	0	124	125	226	227																												
21	183	0	174	175	326	327																												
22	189,5	0	224	225	426	427																												
23	196	0	274	275	526	527																												
24	202,5	0	324	325	626	627																												
25	209	0	374	375	726	727																												
26	215,5	0	424	425	826	827																												
27	222	0	474	475	926	927																												
28	228,5	0	524	525	1026	1027																												
29	235	0	574	575	1126	1127																												
30	241,5	0	624	625	1226	1227																												
31	248	0	674	675	1326	1327																												
32	254,5	0	724	725	1426	1427																												
33	261	0	774	775	1526	1527																												
34	267,5	0	824	825	1626	1627																												
35	274	0	874	875	1726	1727																												

cd. tab. 6.59

Lp.	$U_{c1}$	$U_{c2}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$R_{\text{ob.1}}$	$R_{\text{ob.2}}$	$R_{\text{ob.3}}$	$R_{\text{ob.4}}$	$R_{\text{ob.1}}$	$R_{\text{ob.2}}$	$R_{\text{ob.3}}$	$R_{\text{ob.4}}$	$R_{\text{ob.1,2}}$	$R_{\text{ob.3,4}}$	$\Delta R$	$\Delta I$	$\Delta U_L$	$U_{1M}$	$U_{3M}$	$U_{2M}$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$		
	V	V	A	A	A	A	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	A	A	V	V	V	V	V	V	V	V	
1	2	3	24	25	26	27	23	24	25	26	23	24	25	26	23	24	24	24										
36	280,5	0	924	925	1826	1827																						
37	170	0	974	975	1926	1927																						
38	176,5	0	1024	1025	2026	2027																						
39	183	0	1074	1075	2126	2127																						
40	189,5	0	1124	1125	2226	2227																						
41	196	0	1174	1175	2326	2327																						
42	202,5	0	1224	1225	2426	2427																						
43	209	0	1274	1275	2526	2527																						
44	215,5	0	1324	1325	2626	2627																						
45	222	0	1374	1375	2726	2727																						
46	228,5	0	1424	1425	2826	2827																						
47	235	0	1474	1475	2926	2927																						
48	241,5	0	1524	1525	3026	3027																						
49	248	0	1574	1575	3126	3127																						
50	254,5	0	1624	1625	3226	3227																						
51	261	0	1674	1675	3326	3327																						
52	267,5	0	1724	1725	3426	3427																						
53	274	0	1774	1775	3526	3527																						
54	280,5	0	1824	1825	3626	3627																						

# 7

## PODSUMOWANIE

Książka składa się z siedmiu rozdziałów:

1. Wstęp
2. Podstawowe wiadomości z elektrotechniki
3. Ogólna charakterystyka LUE – budowa i wymagania
4. Lotnicze źródła energii elektrycznej
5. Problematyka eksploatacji pokładowej sieci elektroenergetycznej
6. Ćwiczenia
7. Podsumowanie.

W kolejnych rozdziałach omówiono następujące zagadnienia:

We Wstępie autorzy podjęli próbę wytłumaczenia, jak istotną rolę odgrywa zrozumienie wiedzy z zakresu lotniczych urządzeń elektrycznych w pracy zawodowej w lotnictwie: w praktyce eksploatacyjnej lub konstrukcyjnej.

W rozdziale 2 „Podstawowe wiadomości z elektrotechniki” pokrótce przypomniano najważniejsze informacje z: podstaw elektrotechniki, teorii sygnałów, radioelektroniki i matematyki, niezbędne do zrozumienia rozdziałów 3–5 oraz do rozwiązywania zadań z rozdziału 6.

W rozdziale 3 „Ogólna charakterystyka LUE – budowa i wymagania” przedstawiono:

- 1) Kompendium wiedzy formalnej dotyczącej definicji podstawowych zagadnień niezbędnych do zrozumienia podstawowych zjawisk zachodzących w elektrycznej sieci pokładowej (punkt 3.2.1 Podstawowe definicje i wymagania dotyczące LUE).
- 2) Znormalizowane wartości napięć sieci elektrycznych, interpretację normatywną modulacji: częstotliwości (FM) oraz amplitudy (AM) – punkt 3.2.2.
- 3) Charakterystyki stanu nieustalonego (punkty 3.2.2.1–3.2.2.3 Przedstawione zostały tu limity stanu przejściowego zwykle pomijane w edukacji politechnicznej

dla grup awionicznych, inżynierii i eksploatacji lotniczej urządzeń elektrycznych.

4) Warunki pracy urządzeń elektrycznych (punkt 3.2.3). Ta część ma za zadanie przybliżyć wiele wątków praktycznych, „wzmacniając” je wyciągami z przepisów lotniczych i norm. Omówione zostały klasyfikacje pracy temperowej, zasady rozmieszczania i stosowania urządzeń sterujących w kabinie, napędy prądnic lotniczych (budowa i różnorodne rozwiązania mechanicznej skrzynki napędów), jak również podstawowe funkcje układu elektroenergetycznego statku powietrznego. Na koniec przedstawiono współpracę naziemnego źródła zasilania (LZE) z siecią pokładową statku powietrznego. Jest to rzadko poruszany temat, znany tylko w wąskim gronie specjalistów i pracowników zakładów produkcyjnych. Znajdzie tu Czytelnik wiele ciekawych, objętych nakazami międzynarodowymi wskazówek konstrukcyjno-eksploatacyjnych, jak:

a) nadrzędność energii z LZE nad energią pokładowych źródeł energii elektrycznej – z chwilą podłączenia kabla wydawczego LZE zaczyna zasilac pokładowe urządzenia elektryczne, oczywiście po automatycznym odłączeniu ewentualnie zasilających ich pokładowych źródeł energii elektrycznej;

b) zasada jednego uziemienia obwodu elektrycznego – po podłączeniu kabla wydawczego LZE utworzony w ten sposób obwód elektryczny może mieć tylko jeden punkt połączony z masą ziemi – punkt uziemienia statku powietrznego (połączony z zaciskiem minusowym pokładowej sieci elektrycznej). Tak więc minus naziemnego źródła zasilania (LZE, np. typu Ground Power) nie może swojego źródła energii elektrycznej (swojej prądnicy lub bloku prostowniczego) przyłączać do masy ziemi – przewód minusowy od tego źródła energii elektrycznej może być uziemiony dopiero w punkcie uziemienia statku powietrznego. Jednocześnie korpus statku powietrznego nie może się stykać metalicznie z korpusem LZE. Wynika to z prostych zasad elektrotechniki – podczas zwiększania poboru prądu przez odbiorniki pokładowe energii elektrycznej (np. podczas rozruchu) na przewodzie minusowym odkłada się coraz większy spadek napięcia, który utworzyłby (przy istnieniu dwóch punktów uziemienia tak utworzonego obwodu) dwa punkty uziemienia o różnym potencjale. Pomiędzy tymi dwoma punktami popłynąłby wówczas prąd wyrównawczy. Natężenie tego prądu byłoby ilorazem wartości różnicy potencjałów i rezystancji obwodu pomiędzy tymi punktami. Natężenie tego prądu mogłoby osiągnąć znaczne wartości i byłoby źródłem zagrożenia pożarowego. W języku praktyków takie zróżnicowanie potencjałów dwóch lub kilku punktów uziemień nazywane jest kolizją mas.

W rozdziale 4 „Lotnicze źródła energii elektrycznej” omówiono podstawy działania oraz rozwiązania konstrukcyjne podstawowych źródeł energii elektrycznej:

- 1) Lotnicze komutatorowe prądnice prądu stałego (podrozdział 4.2). Pomimo że prądnice te już od lat 70. XX w. ustępują miejsca bardziej wydajnym prądnicom prądu przemiennego, to wiele zjawisk dla nich charakterystycznych można wykorzystać w analizie zjawisk zachodzących w najnowocześniejszych prądnicach. Niektóre problemy dobrze znane w teorii i praktyce komutatorowych prądnic prądu stałego nie były rozpatrywane w prądnicach prądu przemiennego, jak np. reakcja twornika na zwiększające się natężenie prądu obciążenia. W prądnicach prądu stałego stosowane są uzwojenia kompensacyjne, które niejako automatyzują proces przeciwdziałania negatywnym skutkom reakcji twornika. Wspomniane zjawisko dla obwodów prądu stałego powoduje przegrzewanie przewodów i destrukcję cieplno-łukową wycinków komutatorowych. W prądnicach prądu przemiennego nie ma komutatora, więc nie ma z tym problemów. Jednakże precyzyjne pomiary i rozważania teoretyczne uwidaczniają w takim przypadku spadek mocy użytecznej. Te negatywne zjawiska będą się powiększały wraz ze wzrostem poziomu obciążenia prądowego o charakterze pojemnościowym, wnoszonego przez bloki elektroniczne i nowoczesne oświetlenie LED. Za swój obowiązek autorzy uznali przygotowanie przyszłego konstruktora systemów elektroenergetycznych do sprostania tym wyzwaniom w nowoczesnej technice lotniczej.
- 2) Prądnice prądu przemiennego (podrozdział 4.3). Już prądnice prądu przemiennego udowodniły zwiększenie ilorazu dysponowanej mocy do masy własnej prądnicy. Jeszcze większego przełomu dokonały prądnice trójfazowe.
- 3) Prostowniki (podrozdział 4.5). Głównym tematem tego rozdziału są bloki transformatorowo-prostownicze (BTP), które stały się szczególnie istotne w konstrukcjach lotniczych powstałych po 2000 r. w sieciach 270 V<sub>DC</sub>. Bloki transformatorowo-prostownicze stały się niezbędne w konstruowanych aktualnie sieciach elektroenergetycznych statków powietrznych, do zasilania prądem stałym licznych odbiorników prądu stałego 28,5 V, które wobec wycofywania komutatorowych prądnic prądu stałego byłyby pozbawione zasilania. Z konstrukcją tych bloków wiążą się problemy:
  - a) konstruowania transformatorów, m.in. konfiguracji połączeń;
  - b) działania diod prostowniczych;
  - c) konstruowania filtrów.

Konstrukcja i działanie każdego z tych bloków jest dla odpowiednich specjalistów (np. elektroników) prosta i niejako „oczywista”, lecz z uwagi na wysokie moce, minimalizację wymiarów i ciężaru, wysokie napięcie i wysokie wymaga-

nia jakościowe energii stawiane przez normy i przepisy dla lotniczych systemów energetycznych ich konstruowanie stanowi istotne wyzwanie. Aktualnie są seryjnie stosowane 12-pulsowe BTP, co umożliwia zmniejszenie strat na filtrowanie w porównaniu z wcześniej stosowanymi 6-pulsowymi. Autorzy uważają, że konstruowanie BTP o coraz większej pulsowości (18-pulsowe, 24-pulsowe itd.) będzie poprawiało parametry jakościowe energii i zmniejszało masę urządzenia.

- 4) Lotnicze baterie elektryczne (podrozdział 4.6). Ich możliwości gromadzenia energii elektrycznej nie da się przecenić i pomimo istnienia różnorodnych, tzw. pierwotnych źródeł energii elektrycznej przemieniającej w coraz bardziej wydajny sposób różnego rodzaju energię (mechaniczną, świetlną, cieplną, atomową, chemiczną, promieniowanie kosmiczne) w prąd elektryczny, to w chwili awarii pierwotnego źródła energii elektrycznej to właśnie lotnicza bateria elektryczna przejmuje zasilanie odbiorników pokładowych.
- 5) Równoległa praca źródeł energii elektrycznej (podrozdział 4.7). Trywialna w teorii, np. dla wykładowców podstaw elektrotechniki, staje się całkiem skomplikowana, kiedy się rozpatruje rzeczywistą sieć elektroenergetyczną oraz stany awarii podstawowych źródeł zasilania.

Rozdział 5 „Problematyka eksploatacji pokładowej sieci elektroenergetycznej” obfituje w liczne zagadnienia, z pozoru oderwane od siebie i słabo opisane w literaturze z dziedziny elektrotechniki, ale dobrze znane (przynajmniej w skutkach, tj. z powodu pogorszenia charakterystyk użytkowych odbiorników energii elektrycznej, w tym samowylączenie – głównie odbiorników małej mocy) eksploatującemu długotrwale (powyżej 15 lat) dany egzemplarz statku powietrznego oraz diagnostom z Instytutu technicznego Wojsk Lotniczych, którzy w ramach przedłużenia resursu poszczególnych statków powietrznych prowadzą w tej dziedzinie systematyczne pomiary. Omówiono:

- 1) Podstawowe rodzaje sieci elektroenergetycznej statku powietrznego (podrozdział 5.1). Podstawy budowy sieci kablowej jedno – i dwuprzewodowej. Szczególną uwagę poświęcono sieci jedнопrzewodowej, w której obwód powrotny zamyka się poprzez kadłub statku powietrznego, co zmniejszyło ciężar przewodów miedzianych prawie o połowę. Jednakże ten rewolucyjny spadek masy okablowania miał i swoje skutki negatywne, związane m.in. ze zwiększeniem poziomu zakłóceń radiowych, zwiększeniem się rezystancji w obwodzie powrotnym (kadłub statku powietrznego) na skutek zmian korozyjnych [261, 262], co pociąga za sobą zmniejszenie napięcia użytecznego przychodzącego na zaciski wejściowe odbiornika. Szczególnie groźne wydają się styki powodujące modulacje przepływu prądu na skutek drgań mechanicznych.



2) Podstawowe problemy stanu przejściowego (punkt 5.1.2.3). Jest to kontynuacja zagadnienia poruszanego w punkcie 3.4.2 „Charakterystyka typowych napięć oraz wymagań i norm jakościowych”, gdzie omówiono te zagadnienia od strony wymagań normatywnych. W punkcie 5.1.2.3 przedstawiono sposób pomiaru parametrów stanu przejściowego w realizacji praktycznej:

- a) skokową zmianę obciążenia;
- b) odpowiedź układu regulacji w postaci chwilowego zmniejszenia (przy dociążeniu układu) albo zwiększenia (przy zrzucie obciążenia prądowego) napięcia na szynie odbiorników;
- c) obliczanie (całkowanie) pola powierzchni dla przebiegu napięcia przy jego chwilowym zmniejszeniu albo zwiększeniu powyżej poziomu normatywnego;
- d) tworzenie prostokątnego impulsu zastępczego;
- e) przyrównanie impulsu zastępczego do krzywych normatywnych przedstawionych w punkcie 3.4.2.

W punkcie 4.2.5 na przykładzie prądnicy komutatorowej prądu stałego GS-12T 3s z samolotu Su-22 przedstawiono również, jak w czasie długotrwałej eksploatacji zwiększa się czas trwania impulsu zastępczego, czyli jak zwiększa się obniżenie napięcia podczas skokowego zwiększenia natężenia prądu obciążenia wraz ze zwiększaniem rezystancji kadłuba podczas wieloletniej eksploatacji statku powietrznego. Równocześnie system staje się wolniejszy w swej samoregulacji, nawet po wymianie regulatora napięcia na nowy. Jest to jednocześnie przesłanka do stwierdzenia, że pokładowy system elektroenergetyczny ma wielowektorowe powiązania z systemem płatowca i nie może być rozpatrywany w formie modelu oderwanego, co jest możliwe w naziemnych systemach elektroenergetycznych.

3) Drogę powrotną prądu elektrycznego – przewodowy minusowe i neutralne (punkt 5.1.3). Jest to kontynuacja przepisów normatywnych ujętych w rozdz. 3, gdzie przedstawiono wytyczne normatywne odnośnie metalizacji i uziemienia statku powietrznego. Kwestia drogi powrotnej prądu elektrycznego także była wspomniana w rozdz. 3 przy omawianiu współpracy LZE z siecią pokładową statku powietrznego. Zgodnie z przedmiotowymi normami wszystkie elementy kadłuba muszą być połączone w jedną całość, tak aby możliwie maksymalnie zminimalizować różnice potencjałów pomiędzy elementami metalowymi konstrukcji statku powietrznego w różnych okolicznościach:

- a) podczas przemieszczania się statku powietrznego w strefie chmur burzowych, gdy istnieje ryzyko uderzenia pioruna i przepływu prądu wyładowania przez kadłub statku powietrznego;
- b) przy elektryzowaniu się elementów zewnętrznych statku powietrznego przemieszczających się w strugach suchego powietrza;

c) przy przepływie prądów powrotnych (przez kadłub statku powietrznego) pomiędzy źródłem a odbiornikiem energii elektrycznej

Podkreślono konieczność wyprowadzenia uziemienia oraz przewodu minusowego z danego bloku odbiornika energii elektrycznej tylko w postaci jednego zacisku. Zmniejsza to skutki tzw. kolizji mas, tj. powstawania zróżnicowanych potencjałów poszczególnych elementów kadłuba, którego skutkiem jest przepływ prądów wyrównawczych.

- 4) W punkcie 5.2.1.2 opisano zjawisko powstawania wyładowań elektrostatycznych w atmosferze i ich oddziaływanie na statek powietrzny. Szczególną uwagę poświęcono elementom kadłuba nieprzewodzącym, jak kopułki diademetyczne układów radioelektronicznych, np. radarów pokładowych. Na powierzchni takich materiałów w silnym polu elektrycznym wytwarzanym przez chmury burzowe dochodzi do gromadzenia silnych ładunków elektrostatycznych, których gwałtowne rozładowanie może spowodować silne zakłócenia. Co więcej, kopułki takie rozdzielają kadłub od wysuniętych elementów metalowych, np. wystający z przodu statku powietrznego wysięgnik ciśnień powietrznych. Prąd pioruna, uderzając w taki wysięgnik, wchodzi w okablowanie wewnętrzne, np. w obwód elektryczny ogrzewania odbiornika ciśnień powietrznych, powodując detonację żyły przewodzącej, która zamienia się w ułamku sekundy w chmurę gazową o dużej prężności, powodując wybuchowe uszkodzenie kopułki diademetycznej. Wówczas następuje często „oślepienie” pilota przez odrywające się kawałki kopułki oraz zakłócenie opływu aerodynamicznego. Aby tego uniknąć, stosuje się specjalne iskrowniki oraz elektryczne przewody i taśmy metalizacji.

## LITERATURA

1. Abu-Rub H., Malinowski M., Al-Haddad K. (red.): *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*. First Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2014.
2. Adamiec M.: *Podstawy elektrotechniki i elektroniki dla studentów Wydziału Mechanicznego*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2018.
3. Adkins B., Philipp W., Hossle A.: *Electrical machines for aircraft*. Proceedings of the IEE Part A: *Power Engineering*, 103(1S), 116-127, 1956, <http://digitallibrary.theiet.org/content/journals/10.1049/pi-a.1956.0017>.
4. Aerospace Industries Association of America: *The 1938 Aircraft Year Book*. Washington, D.C: Aeronautical Chamber of Commerce of America.
5. Aerospace Industries Association of America: *The 1939 Aircraft Year Book*. Washington, D.C: Aeronautical Chamber of Commerce of America.
6. Airbus: *WRC-15 Agenda Item 1.17 – Industry’s Motivation*. EC – CEPT Workshop on World Radiocommunication Conference, 2015.
7. Aleksiejew W.J., Barukow F.J. i in.: *Radioelektronika*, cz. 3. WKŁ, Warszawa 1973.
8. Andrejewicz J.: *Drgania deterministyczne układów dyskretnych*. WNT, Warszawa 1993.
9. Amborski K., Pawluk K.: *Alessandro Volta i jego ogniwa*. „Maszyny Elektryczne – Ze-szyty Problemowe”. 4/2017 (116), s. 139–142, 2017
10. Attard P.: *Nested commutator expansion for the commutation function*. November 2021, DOI: 10.1088/978-0-7503-4055-7ch9, [w:] *Quantum Statistical Mechanics in Classical Phase Space*.
11. Augustyn S.: *Problemy związane z eksploatacją śmigłowców bojowych*. Tom 3: Problemy eksploatacyjne wielkogabarytowych obiektów technicznych, [w:] *Eksploatacja systemów tribologicznych*, red. D. Ozima, Kielce 2013.
12. Awrejcewicz J., Wodzicki W.: *Podstawy automatyki. Teoria i przykłady*. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2001.
13. Bajorek J., Gołębiowski L., Posiewała W.: *Obwody elektryczne. Laboratorium minikomputerowe*. Rzeszów 1996.
14. Bajorek Z.: *Maszyny elektryczne*. WNT, Warszawa 1980.

15. Bajorek Z.: *Teoria maszyn elektrycznych*. PWN, Warszawa 1982.
16. Balik R., Nowak M.: *Jakość energii elektrycznej – stan obecny i perspektywy*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 7-8, 2005.
17. Baranowski B., Głowala S., Mostowski R., Pohl P., Sydor M., Torzyński D., Wielocha G., Zabłocki M.: *Podstawy konstrukcji napędów maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
18. Baranowski K., Welo A.: *Symulacja układów elektronicznych*. Spice Design Center, Mikom, Warszawa 1996.
19. Barczewski R.: *Poliharmoniczna filtracja rekreacyjna – diagnostycznie zorientowana metoda analizy sygnału*. Materiały X Szkoły Diagnostyki. Poznań–Zajęczkowo 1992.
20. Baszkiewicz J., Kamiński M.: *Korozja materiałów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
21. Bertinov A.I.: *Aircraft Electrical Generation*. Air Force System Command, 1959.
22. Będkowski L.: *Lotnicze urządzenia elektryczne. Regulacja napięcia prądnic pokładowych*. Zeszyt 4, WAT wew. 638/77, Warszawa 1977.
23. Białkowski G.: *Mechanika klasyczna. Mechanika punktu materialnego i bryły sztywnej*. PWN, Warszawa 1973.
24. Biuletyn P/O/U/R/5608/E/2014: *Aneks nr 3 dotyczący eksploatacji i rezerwu samolotów Su-22M4 i Su-22UM3K po wykonanym remoncie weryfikacyjnym*. WZL nr 2 S.A, ITWL, zatwierdzony Główny Inżynier Wojsk Lotniczych, 2020.
25. Bociek S., Gruszewski J.: *Układy sterowania automatycznego samolotem*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1999.
26. Boice W.K., Levoy L.G.: *Basic considerations in selection of electric systems for large aircraft*. Electrical Engineering, Vol. 63, pp. 279-287, 1944.
27. Bolkowski S.: *Elektrotechnika*. Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2005.
28. Bolkowski S.: *Teoria obwodów elektrycznych*. Warszawa 1995.
29. Brombach J., Lucken A., Nya B., Johannsen M., Schulz D.: *Comparison of different electrical HVDC-architectures for aircraft application*. Electrical Systems for Aircraft. Railway and Ship Propulsion (ESARS), s. 1-6, Oct. 2012.
30. Brożek. D.: *Uszkodzenia sieci elektrycznych statków powietrznych*. Przegląd WLOP, 2003.
31. Brzózka J., Dorobczyński L.: *MATLAB środowisko obliczeń naukowo-technicznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
32. Cannon R.H.: *Dynamika układów fizycznych*. WNT, Warszawa 1973.
33. CASA C-295M. C-295: *Electrical System Description and Operation*. MI-295-3-056-I. 10 July, 2012.
34. Chłędowski M., Pieniążek J.: *Podstawy automatyki w ćwiczeniach i zadaniach*. Wydanie II, Rzeszów 2009.

35. Ciężak P., Gębura A. i in. *Problemy korozyjne struktury połączenia metalizacyjnego poszycia statku powietrznego – wybrane problemy*. Journal of KONBiN 2021; 51 (4): 91-106. DOI: 10.2478/jok-2021-0046.
36. Danielecki S., Tkaczuk S.: *Eksplorowanie samolotów jako dyscyplina wiedzy po 100 latach doświadczeń*. Biuletyn WAT, Vol. LXIV, nr 4, 2015.
37. Dąbrowski T.: *Lotnicze urządzenia elektryczne. Lotnicze prądnice pokładowe*. Zeszyt 4, WAT wew. 639/77, Warszawa 1977.
38. *DC Starter-Generator Solutions*. Thales Group, 2014.
39. De Abreu J.P., De Sa J.S., Prado C.C.: *Harmonic voltage distortion in isolated electric systems*. 7th International Conference „Electrical Power Quality and Utilization”, Kraków 2003.
40. Dobrowolski A., Jachna Z., Majda E., Wierzbowski M.: *Elektronika, ależ to bardzo proste*. Wydawnictwo BTC, Warszawa 2005.
41. Dobrowolski A., Komur P., Sowiński A.: *Projektowanie i analiza wzmacniaczy małosygnałowych*. Wydawnictwo BTC, Warszawa 2013.
42. Dobrowolski A.: *Pod maską SPICE’A – metody i algorytmy analizy układów elektronicznych*. Wydawnictwo BTC, Warszawa 2004.
43. Dowództwo Generalne Rodzajów Sił zbrojnych: *Samolot Su-22M4 – Instrukcja techniki pilotowania (wariant anglosaski)*. Wydawnictwo MON, Warszawa 2015.
44. Dubicki B.: *Maszyny elektryczne*. Tom 1: *Maszyny prądu stałego*. PWN, Warszawa 1965.
45. DWL Lot. 2031/80: *Śmigłowiec Mi-24D – Opis techniczny – Osprzęt*. Poznań 1980.
46. DWL Lot. 2560/86: *Silnik 89 – Opis techniczny*. Poznań 1988.
47. DWL Lot. 2596/87: *Samolot Su-22M4 – Aerodynamika praktyczna*. Poznań 1987.
48. DWL Lot. 2729/88: *Samolot 52UM3K. Książka 8, Osprzęt*. Część 1: *Wyposażenie elektryczne, urządzenia oświetleniowe – Opis techniczny i działanie*. Poznań 1990.
49. DWLiOP sygn. WLOP 4/90: *Samolot MiG-29. Książka 4, Osprzęt*. Część I: *Wyposażenie elektryczne, Opis techniczny i działanie* (z kompletu dokumentacji technicznej nr GK473A). Wydanie II. Warszawa 2004.
50. Dzik M.: *Bezpieczeństwo lotów w lotnictwie wojskowym – czynniki i okoliczności wpływające na powstawanie wypadków i incydentów lotniczych*. Obronność – Zeszyty Naukowe Wydziału Zarządzania i Dowodzenia Akademii Obrony Narodowej nr 1(5), 2013.
51. EADS PZL „Warszawa-Okęcie S.A.: *Samolot PZL-130 TC – II ORLIK. Opis techniczny*. Część 2: Osprzęt. Warszawa 2004.
52. EN-2282:1996 *Lotnictwo i kosmonautyka – Charakterystyka elektrycznej sieci pokładowej statków powietrznych*.
53. Fagot J., Magne P.: *Teoria modulacji częstotliwości*. WKŁ, Warszawa 1965.
54. Flisowski Z.: *Technika wysokich napięć*. WNT, Warszawa 2005.
55. Gajda J., Sroka R.: *Pomiary kąta fazowego – metody, układy, algorytmy*. Kraków 2000.

56. Gajo Z., Kocimowski B., Kulpa K., Nałęcz M., Urbaś A.: *Sygnały i systemy. Ćwiczenia laboratoryjne*. red. J. Wojciechowski. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
57. Gębura A.: *Oddziaływanie pioruna na statki latające – powstawanie i przeciwdziałanie*, Informator ITWL nr 73/91. Warszawa 1991.
58. Gębura A. (red.): *Diagnostowanie zespołów napędowych śmigłowców metodą FAM-C*. Wyd. ITWL. Warszawa 2021.
59. Gębura A., Radoń T.: *Uszkodzenia prądnic i styczników lotniczych w trudnych warunkach operacyjnych*. Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, nr 30, 2012.
60. Gębura A., Radoń T., Tokarski T.: *Cechy diagnostyczne parametrów napięcia wyjściowego lotniczych prądnic pokładowych prądu stałego*, [w:] Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika Z. 63 Awionika, Tom 2, 2004.
61. Gębura A., Radoń T.: *Pulsacje napięcia wyjściowego jako źródło informacji diagnostycznych o komutatorowych prądnicach prądu stałego*. Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, nr 33, 2013.
62. Gębura A., Radoń T.: *Struktura rezystancji metalizacji płatowca – sposoby diagnozowania*. [w:] „Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej”, t. 8, red. J. Lewitowicz, L. Cwojdzński, M. Kowalski, R. Szczepanik, Wydawnictwo ITWL, Warszawa 2012.
63. Gębura A., Tokarski T.: *Cechy diagnostyczne parametrów napięcia wyjściowego lotniczych prądnic pokładowych prądu stałego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 213, Mechanika z. 63, Awionika, tom 2, 2004.
64. Gębura A., Tokarski T.: *Wybrane problemy sterowania pokładowymi systemami prądu stałego i przemiennego*. Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Vol. 36, 2015.
65. Gębura A. i in.: *Metodyka nr 1/42/99 – Samolot MiG-29 – Przegląd instalacji elektroenergetycznej samolotów MiG-29*, Warszawa 1999.
66. Gębura A. i in.: *Metodyka nr 3 – Samolot MiG-29 – Pomiar spadków napięć na stykach urządzeń komutacyjnych i w obwodach elektrycznych samolotów MiG-29*, Warszawa 1999.
67. Gębura A. i in.: *Metodyka nr 4/42/99 – Samolot MiG-29 – Pomiar jakości energii wybranych pokładowych źródeł napięcia samolotów MiG-29*, Warszawa 1999.
68. Gębura A., Biarda D.: *Badania kwalifikacyjne, metodyka nr 127. Typ: PZL-130 „ORLIK TB”. Węzeł elektroenergetyczny i pokładowa sieć elektryczna, badania w locie*, niepublikowane – dostępne w Bibliotece Naukowej ITWL (nr BT ITWL 9989/I), Warszawa 1991.
69. Gębura A., Karpiński M.: *Badania kwalifikacyjne, metodyka nr 8. Typ: PZL-130 „ORLIK” TC. Węzeł elektroenergetyczny i pokładowa sieć elektryczna, badania naziemne*, niepublikowane – dostępne w Bibliotece Naukowej ITWL, Warszawa 1991.
70. Gębura A., Kowalska D., Tokarski T.: *Badania przyspieszonego starzenia przewodów elektrycznych*. Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, nr 17, 2003.

71. Gębura A.: *Pulsacje napięcia wyjściowego prądnicy pokładowej prądu stałego źródłem informacji diagnostycznej o stanie układu napędowego*. Scientific Problems of Machines Operation And Maintenance, 2003.
72. Gębura A.: *Cechy diagnostyczne składowej pulsacji prądnic prądu stałego*. Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, nr 16, 2003.
73. Glinka T.: *Maszyny elektryczne i transformatory – Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka*. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych. Komel, Katowice 2015.
74. Glinka T.: *Maszyny elektryczne i transformatory*. Wydanie I. Warszawa 2018.
75. Golde W.: *Układy elektroniczne*, tom 1. WNT, Warszawa 1970.
76. Gosiewski Z., Siemieniako F.: *Automatyka*. Tom 2: *Synteza układów*. Dział Wydawnictw Politechniki Białostockiej, 2007.
77. Grenda B., Turzańska H.: *Czynnik ludzki i jego wpływ na bezpieczeństwo lotów*. Wydawnictwo Akademii Sztuki Wojennej, Warszawa 2016.
78. Gutenbaum J.: *Problemy teorii regulatorów*. WNT, Warszawa 1978.
79. Hewitt P.G.: *Fizyka wokół nas*. PWN, Warszawa 2020.
80. Hockmeyer I.O.: *The generation and regulation of electric power in aircraft: a survey of design features of generators and their control – Electrical Engineers – Part II – Power Engineering*. Journal of the Institution of Engineers, vol. 93, p. 2, 1946.
81. Holejko D., Kościelny W., Niewczas W.: *Zbiór zadań z podstaw automatyki*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1980.
82. Hołdyński G., Skibko Z.: *Analiza zjawiska odkształceń prądów i napięć na przykładzie wybranego obiektu widowskiego*. Elektro.info, 11/2014, <https://www.elektro.info.pl/artukul/miernictwo/58629,analiza-zjawiska-odksztalcen-pradow-i-napiec-na-przykladzie-wybranego-objektu-widowskiego>.
83. ISO 1540: *Aerospace — Characteristics of aircraft electrical systems*.
84. Izydorczyk J., Płonka G., Tyma G.: *Teoria sygnałów*. Wydawnictwo Helion, 2006.
85. Januszajtis A. (red.): *Fizyka – ilustrowana encyklopedia dla wszystkich*. WNT, Warszawa 1985.
86. Januszajtis A.: *Fizyka dla politechnik*. PWN, Warszawa 1986.
87. Jaworski B., Dietlaf A., Miłkowska L., Siergiejew G.: *Kurs fizyki. Elektryczność i magnetyzm*, tom 2. PWN, Warszawa 1984.
88. Jia Y., Rajashekara K.: *Induction Machine for More Electric Aircraft: Enabling New Electrical Power System Architectures*. IEEE Electrification Magazine, vol. 5, 2017.
89. Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R.: *Podstawy teorii sterowania*. WNT, Warszawa 2005.
90. Kaczorek T.: *Macierze w automatyce i elektrotechnice*. WNT, Warszawa 1984.
91. Karasov M.F.: *Komutacja kolektorowych maszyn postoiionnego toka*. Moskwa 1961.
92. Karta kontrolna remont (naprawa) – *Prądnica prądu stałego GS-12T 3s*. WZL-2S.A. 0355H nr instrukcji 1879, Bydgoszcz 2016.

93. Karta kontrolna remont weryfikacyjny – *Sprawdzenie i regulacja węzła energetycznego podczas próby silników*. WZL-2S.A. 0355H nr instrukcji 1063, Bydgoszcz 2014.
94. Kasprzyk J.: *Programowanie sterowników przemysłowych*. WNT, Warszawa 2006.
95. Kobayashi T.: *1100 kV Substation: Basic Design/Specifications of GIS for UHV AC and its Verification Test and Site*. „IEEJ transactions on electrical and electronic engineering”. Vol. 4, Iss. 1, 2009, John Wiley.
96. Kolber P., Perczyński D.: *Elektrotechnika i elektronika – badanie obcowzbudnej prądni-cy prądu stałego*. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy. Bydgoszcz 2011.
97. Kopczyk M., Osińska-Broniarz M.: *Akumulator-ekologiczna alternatywa źródła energii dla napędu w systemie transportu*. Zeszyty problemowe – Maszyny elektryczne nr 2/213 (99).
98. Kościelny W.: *Materiały pomocnicze do nauczania podstaw automatyki*. Oficyna Wy-dawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
99. Kowal J.: *Podstawy automatyki*, tom 1, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydak-tyczne, Kraków 2006.
100. Kowal J.: *Podstawy automatyki*, tom 2, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydak-tyczne, Kraków 2007.
101. Kozłowski J.: *Laboratorium elektrotechniki teoretycznej*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
102. Król A., Mroczko J.: *Symulacja i optymalizacja układów elektronicznych*. Wydawnic-two Naukowe, Poznań 2000.
103. Krysicki W., Włodarski L.: *Analiza matematyczna w zadaniach*. PWN, Warszawa 1993.
104. Krzyż J., Ławrynowicz J.: *Elementy analizy zespolonej*. WNT, Warszawa 1981.
105. Kula S.: *Systemy teletransmisyjne*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004.
106. Kulebakin W., Morozowski W., Sindiejew J.: *Lotnicze elektroenergetyczne urządzenia pokładowe*. Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1958.
107. Kulszczyk S. i in.: *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze*. Oficyna Wydawnicza Poli-techniki Warszawskiej. Warszawa 2004.
108. Kurdziel R.: *Podstawy elektrotechniki*. Warszawa 1972.
109. Kwaśniewski J.: *Sterowniki PLC w praktyce inżynierskiej*. Wydawnictwo BTC, Legio-nowo 2008.
110. Legierski T., Wyrwał J., Kasprzyk J., Hajda J.: *Programowanie sterowników PLC*. Gli-wice 1998.
111. Leśniczak A. i in.: *Kompleksowa ocena stanu technicznego samolotów Su-22 na pod-stawie wyników badań i weryfikacji wykonanych w procesie remontu weryfikacyjnego oraz opracowanie zaleceń profilaktycznych do eksploatacji samolotów po remoncie*. BT ITWL 1830/I, Warszawa 2018.



112. Lewitowicz J., Szelmanowski A., Gębura A., Pazur A., Franczuk E., Tokarski T.: *Badanie zjawiska zniekształceń stref magnetycznie obojętnych w lotniczych komutatorowych prądnicach prądu stałego*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 11/2019.
113. Lewitowicz J.: *Podstawy eksploatacji statków powietrznych*, tom 3: *Systemy eksploatacji statków powietrznych*. Wydawnictwo ITWL, Warszawa 2006.
114. Lewitowicz J. (red.): *Podstawy eksploatacji statków powietrznych*, tom 4: *Badania eksploatacyjne statków powietrznych*. Wydawnictwo ITWL, Warszawa 2007.
115. Lewitowicz J.: *Podstawy eksploatacji statków powietrznych*, tom 6: *Eksploatacyjne problemy w projektowaniu i modernizacji statków powietrznych*. Wydawnictwo ITWL, Warszawa 2012.
116. Liwshitz-Garik M.: *Direct-current machines*. Van Nostrand Company, New York 1962.
117. Lukin I., Liubimov W.W.: *Sistemy eliektrosnabzhenija samolietov i viertalietov*. Wydawnictwo Transport, Moskwa 1970.
118. Madonna V., Giangrande P., Galea M.: *Electrical Power Generation in Aircraft: review, challenges and opportunities*, May 2018. DOI: 10.1109/TTE.2018.2834142IEEE.
119. Masiewicz S., Paul S.: *Podstawy elektrotechniki – Cz. 1*, Państwowe Wydawnictwa Szkolnictwa Zawodowego, Warszawa 1968.
120. Masiewicz S., Paul S.: *Podstawy elektrotechniki – Cz. 2*, Państwowe Wydawnictwa Szkolnictwa Zawodowego, Warszawa 1972.
121. Matsuda T.: *Generalized commutation theory of large DC machines*. September 1974. *Electrical Engineering in Japan* 94(5):82-9. DOI: 10.1002/ej.4390940513.
122. Metodyka nr 245/OP/43/18: *Metodyka pomiarów jakości energii elektrycznej pokładowych źródeł prądu samolotu Su-22M4*. ITWL, Warszawa 2018.
123. Mazan B., Detka T.: *Eksperymentalne badanie wpływu temperatury ogniwa litowo-jonowego na pojemność i dokładność obliczeń stopnia naładowania*. *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* Nr 2/2019 (122).
124. Michalski L., Eckerson K.: *Pomiary temperatury*. WNT. Warszawa 1980.
125. Michna M.: *Samolot bardziej elektryczny*. Gdańsk 2011, dostęp online dn. 8.08.2023: <https://eia.pg.edu.pl/documents/1189298/9754019/3-wyklad%2002.pdf>.
126. Mikulski J.: *Podstawy automatyki – Liniowe układy regulacji*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
127. Milewski Z.: *Aerodynamika konstrukcja i systemy statku powietrznego*. Wydawnictwo WAT, Warszawa 2008.
128. MIL-S-24749(SH) Military specification: grounding straps and bosses, electromagnetic, general specification for (13-AUG-1990).
129. MIL-STD-704: *Military Standard – Electric Power – Aircraft – Characteristics and Utilization of (06 Oct 1959) Superseding MIL-E-7894A*.
130. NO-17-A202 *Statki powietrzne. Elektryczne układy rozruchu i zapłonu silników turbinowych. Podstawowe wymagania i badania*

131. MIL-STD-1795A *Lightning protection of aerospace Vehicles and hardware* (Ochrona odgromowa statków powietrznych i oprzyrządowania).
132. Moir I., Seabridge A.: *Design and Development of Aircraft Systems*. Second Edition. John Wiley & Sons Ltd., 2013.
133. MON-DWL Lot. 1758/76: *Samolot S-32MK – Opis techniczny i eksploatacja oddzielnych przyrządów i agregatów osprzętu*. Nr arch. WZL2 S.A nr 2470/J, Poznań 1976.
134. MON-DWL Lot. 2458/85: *Samolot 54K – Osprzęt, Wyposażenie elektryczne, urządzenia oświetleniowe. Opis techniczny i działanie*. Poznań 1987.
135. MON-DWL: *Samolot S-54K. Książka 8, Osprzęt. Część I: Wyposażenie elektryczne, urządzenia oświetleniowe – Opis techniczny i eksploatacja*. Lot. 2458/85, Poznań 1987.
136. Muhammad A., Mubashir H.R.: *Principle of DC Generator*. January 2015. DOI: 10.4018/978-1-4666-8441-6.ch002.
137. NO-06-A108:2021 – *Sprzęt wojskowy – Ogólne wymagania techniczne, metody kontroli i badań – Metody oceny zgodności z wymaganiami konstrukcyjnymi*.
138. NO-15-A204 *Wojskowe statki powietrzne. Rozmieszczenie elementów sterujących obwodów elektrycznych w kabinie. Wymagania*.
139. NO-16-A204 *Lotnicze kwasowe baterie akumulatorowe*.
140. NO-17-A206:2018 *Wojskowe statki powietrzne – Naziemne układy zasilania elektroenergetycznego – Wymagania*.
141. NO-15-A200:2016 *Wojskowe statki powietrzne – Pokładowe układy zasilania elektrycznego – Podstawowe parametry, wymagania i badania*.
142. NO-16-A206 *Wojskowe statki powietrzne. Lotnicze zasadowe baterie akumulatorowe. Wymagania i badania*.
143. Ogata K.: *Modern Control Engineering*. Prentice Hall International, Inc., New York 1997.
144. Orear J.: *Fizyka*, tom 2. WNT, Warszawa 1993.
145. Osiewski J., Szabatin J.: *Podstawy teorii obwodów*, tom 3. WKŁ, Warszawa 1995.
146. Otnes R.K., Enohnson L.: *Analiza numeryczna szeregów czasowych*. WNT, Warszawa 1978.
147. Owczarek J.: *Elektryczne maszynowe elementy automatyki*. WNT, Warszawa 1983.
148. Padfield G.D.: *Dynamika lotu śmigłowców. Teoria i wykorzystanie właściwości lotnych i modeli symulacyjnych*. WKiŁ, Warszawa 1998 [tytuł oryginału: *Helicopter Flight of Flying Qualities and Smulation Modeling*].
149. Papoulis A.: *Sygnaly i obwody*. WKiŁ, Warszawa 1988.
150. Paszek S.: *Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. WNT, Warszawa 1986.
151. Paśko M., Walczak J.: *Teoria sygnałów*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Dział Telekomunikacja nr 16, Gliwice 1999.
152. Pizoń A.: *Elektrohydrauliczne analogowe i cyfrowe układy automatyki*. WNT, Warszawa 1995.

153. Plamitzer M.A.: *Maszyny elektryczne*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986.
154. PN-87/E-02050 *Izolacja elektryczna urządzeń elektrycznych – klasyfikacja według ciepłoodporności*.
155. PN-EN 12312-20+A1:2012 *Urządzenia i sprzęt do obsługi naziemnej statków powietrznych – wymagania szczegółowe – Część 20: Urządzenia do naziemnego zasilania energią elektryczną*.
156. PN-EN 3373-001 *Lotnictwo i kosmonautyka Końcówki oczkowe i łączniki przedłużające do zagniatania na przewodach elektrycznych Część 001: Warunki techniczne*.
157. PN-ISO 461-1:2007 *Statki powietrzne – Złącza do naziemnego zasilania statków powietrznych – Część 1: Wymagania dotyczące konstrukcji, własności użytkowych i badań*.
158. PN-ISO 461-2:1997 *Statki powietrzne – Złącza naziemnego zasilania energią elektryczną – Wymiary*.
159. Polak Z.: *Materiały pomocnicze do ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotu podstawy automatyki*. WSOSP, KAISS. Dęblin 2006.
160. Piccolino M.: *Animal electricity and the birth of electrophysiology: The legacy of Luigi Galvani*. „Brain Research Bulletin”. 46 (5), s. 381–407, 1998. DOI: 10.1016/S0361-9230(98)00026-4.
161. Przybylczak M., Walkowiak M., Jankowski M., Osińska-Broniarz M., Lota G.: *Materiały i mechanizmy procesów elektrochemicznych w ogniwie litowo-siarkowym*. Wiadomości Chemiczne. 2022, 76, 7-8. DOI: 10.53584/wiadchem.2022.7.5.
162. Puzdrowska P.: *Metoda wyznaczania stałej czasowej termopary na podstawie pomiaru szybkozmiennnej temperatury spalin wylotowych silnika o ZS*. Scientific Journal of Gdynia Maritime University, Nr 108/2018, DOI: 10.26408/108.10.
163. PZL-Świdnik S.A.: *Śmigłowiec PZL W-3WA – Instrukcja obsługi technicznej*. Wyd. PZLŚwidnik S.A., Świdnik 2012.
164. PZL-Świdnik S.A.: *Śmigłowiec SW-4 – Instrukcja obsługi technicznej – tom 2*. Dokument nr AE 66.02.01.0 IOT, Świdnik 2005.
165. Technical Commission for Aeronautics RTCA DO 160: *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*.
166. Raport nr 045/OP/43/22: *Badania instalacji elektroenergetycznej samolotu Su22-M4 nr 8101 – w czasie próby silników*. ITWL, Warszawa 2022.
167. Raport nr 173/OP/43/21: *Badania instalacji elektroenergetycznej samolotu Su22-M4 nr 37817 – w czasie próby silników*. ITWL, Warszawa 2021.
168. Raport nr 274/OP/43/17: *Badania instalacji elektroenergetycznej samolotu Su22-M4 nr 37819 – w czasie próby silników*. ITWL, Warszawa 2017.
169. Rakowska A.: *Aspekty techniczno-ekonomiczne związane z projektowaniem, budową i eksploatacją wielotorowych kablowych linii przesyłowych o maksymalnym napięciu 400 kV*, Opracowanie badawczo-naukowe nr IE 41-730/JGU/05, Poznań 2005.
170. Rawa H.: *Elektryczność i magnetyzm*, PWN, Warszawa 1994.

171. RK 015.429: *Riegulator naprazienija ugolnyj RN-180M – Rukowodstvo po kapitalnemu riemontu*. Moskwa 1977.
172. Ronkowski M., Michna M., Kostro G, Kutt F.: *Maszyny elektryczne wokół nas*. Politechnika Gdańska 2009–2010.
173. Samolot 54K Książka 8, *Osprzęt, Część IV: Technologia obsługi okresowych. Wyposażenie elektryczne*. Lot. 2358/84, Poznań 1987.
174. *Samolot M-28B „Bryza”: Jednolity zestaw obsługi technicznych samolotu. Część 2: Osprzęt/Uzbrojenie*. Mielec 2003.
175. *Samolot M-28B/PT „Skytruck”: Technologia wykonywania obsługi okresowych i specjalnych samolotu. Część 2: Osprzęt/Uzbrojenie*. Nr sygnatury PRG/Z/12/2 /2006, Mielec 2006.
176. *Samolot M-28B/PT-GC „Skytruck” z awioniką Glass Cockpit: Album schematów elektrycznych samolotu „M28B/PT” z awioniką Glass Cockpit T2/2. Część 2. Osprzęt/Uzbrojenie*. Nr sygnatury PRG/Z/15/2010, Mielec, sierpień 2010.
177. *Samolot M-28B/PT-GC „Skytruck” z awioniką Glass Cockpit: Opis techniczny samolotu. M28B/PT z silnikami PT6A-65B i śmigłami pięciolopatowymi Hartzell oraz z awioniką Glass Cockpit. Część 2: Osprzęt*. Nr sygnatury DRG/Z/ 03/2010, Mielec 2010.
178. *Samolot M-28B/PT-GC „Skytruck” z awioniką Glass Cockpit: Technologia wykonywania obsługi okresowych i specjalnych samolotu. Część 2: Osprzęt/Uzbrojenie*. Nr sygnatury DRG/Z/ 07/2010, Mielec 2010.
179. Sapiro D.N.: *Elektroaboruowanije somolietov*. Wydawnictwo Maszinostrojenie. Moskwa 1977.
180. Sarlioglu B., Morris C.T.: *More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft*. IEEE Transactions on Transportation Electrification. Vol. 1, 2015.
181. Sciascera C., Giangrande P., Brunson C. in.: *Optimal design of an electro-mechanical actuator for aerospace application*. Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Japan, 2015.
182. Setlak L., Ruda E.: *Przegląd, analiza i symulacja wybranych komponentów elektroenergetycznego systemu zasilania EPS samolotu zgodnych z trendem samolotu zelektryfikowanego MEA*. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, nr 3/2015 (107), Katowice 2015.
183. Setlak L., Ruda E.: *Review, analysis and simulation of advanced technology solutions in power electronics systems (PES) of more electric aircraft*. World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol: 9, No: 10, 2015.
184. Setlak L., Ruda E.: *Współczesne rozwiązania technologiczne, analiza i symulacja wybranych komponentów architektury HVDC samolotów zgodnych z koncepcją MEA/AEA*. Przegląd Elektrotechniczny, NR 2/2017.
185. Siemieniako F., Gosiewski Z.: *Automatyka*. Tom 1: *Modelowanie i analiza układów*. Dział Wydawnictw Politechniki Białostockiej, Białystok 2006.

186. Sikorski T., Ruczewski P., Lobos T.: *Czasowo-częstotliwościowa reprezentacja sygnałów niestacjonarnych w systemach elektrycznych*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 2, 2005.
187. Skorko M.: *Fizyka – podręcznik dla studentów wyższych technicznych studiów zawodowych dla pracujących*. PWN, Warszawa 1981.
188. Skup Z.: *Podstawy automatyki i sterowania*. Politechnika Warszawska, Warszawa 2012.
189. Skvarenina T.L. (red.): *The power electronics handbook*. CRC Press LLC, 2002.
190. Slenski G., Kuźniar J.: *Wire Integrity Field Survey of USAF Legacy Aircraft*. NATO R&T Organization Symposium on Aging Mechanisms & Control. Manchester 2001.
191. Sobkowski J.: *Częstotliwościowa analiza sygnałów*. Wydawnictwo MON, Warszawa 1979.
192. Solbut A.: *Maszyny elektryczne 2 – Maszyny prądu stałego, maszyny synchroniczne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2019.
193. Sprawozdanie 238/OP/43/18: *Diagnostyka techniczna prądnicy prądu stałego GS12T 3s z określonym położeniem szczotek względem strefy neutralnej*. Warszawa 2018.
194. Sprawozdanie nr SP-147/31/2015: *Badania i ocena stanu technicznego samolotu Su-22M4 nr 30304 w czasie remontu weryfikacyjnego*. ITWL, Warszawa 2016.
195. Sprawozdanie nr SP-148/31/2015: *Badania i ocena stanu technicznego samolotu Su22-M4 nr 37817 w czasie remontu weryfikacyjnego*. ITWL, Warszawa 2016.
196. Sprawozdanie nr SP-149/31/2015: *Badania i ocena stanu technicznego samolotu Su-22M4 nr 30201 w czasie remontu weryfikacyjnego*. ITWL, Warszawa 2016.
197. Sprawozdanie nr SP-2/31/2017: *Badania i ocena stanu technicznego samolotu Su-22M4 nr 37819 w czasie remontu weryfikacyjnego*. ITWL. Warszawa 2017.
198. Sradomski W.: *MATLAB. Praktyczny podręcznik modelowania*. Helion, Gliwice, 2015.
199. [Ssdservice.pl/FTP-serwer/Elektrotechnika/transformatory/transf](http://ssdservice.pl/FTP-serwer/Elektrotechnika/transformatory/transf).
200. STANAG 7073 ED.2 *Connectors for aircraft electrical servicing power*.
201. Staniszewski R.: *Sterowanie zespołów napędowych*. WKŁ, Warszawa 1980.
202. Staszewski J.: *Podstawy Automatyki – zbiór zadań*. Dolnośląska Biblioteka Cyfrowa. Wrocław 2012.
203. Stein Z.: *Maszyny i napęd elektryczny*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1985.
204. Strojny J.: *Bezpieczeństwo użytkowania urządzeń elektrycznych*, INPE nr 37, Wydawnictwo COSIW, Warszawa 2011.
205. Strojny J.: *Vademecum elektryka. Poradnik dla inżynierów, techników i studentów*. Wyd. Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, Warszawa 2004.
206. Szabatin J.: *Podstawy teorii sygnałów*, WKŁ, Warszawa 1982.
207. Szczebiakov A.A.: *Avtomatika awiacionnych i raketnych silowych ustanovok*. Wydawnictwo Maszinstroenie, Moskwa 1965.

208. Szefostwo Wojsk Łączności MON: *Akumulatory zasadowe, srebrowo-cynkowe i kwasowe – dane znamionowe i zasady uruchamiania, eksploatacji oraz przechowywania*. Wyd. MON, sygn. Łączn. 396/69, Warszawa 1970.
209. Szelmanowski A., Głyda K., Tokarski T., Gajewski T., Kalisiak M., Sekuła A.: *Protokół Nr 68/43/15 – Badania możliwości samoczynnego zadziałania instalacji przeciwpożarowej SSP-FK śmigłowca Mi-8 nr 660 przy zaniku/spadku napięcia zasilania*. ITWL, Warszawa 2015.
210. Szelmanowski A., Zieja M., Głyda K., Tokarski T.: *Research method of dynamic capability of an actuating block of the SSP-FK aircraft fire suppression system in false alarm aspect*. Journal of KONES, Vol. 23, pp. 525-532, 2016.
211. Szmulc T., Werewka J.: *Analiza i projektowanie systemów komputerowych czasu rzeczywistego o różnym stopniu rozproszenia*. Kraków 2001.
212. Szopliński Z.: *Badania i projektowanie układów regulacji*. WNT, Warszawa 1975.
213. Szymczak T., Rabiej S., Pielesz A., Desselberg J.: *Tablice matematyczne, fizyczne, chemiczne, astronomiczne*. Bielsko-Biała 2003.
214. Śmigłowiec Mi-2: *Opis techniczny osprzęt*. WSK "PZL-Świdnik". Świdnik 1977.
215. Śmigłowiec Mi-8: *Opis osprzętu*. Lot 1236/69, Warszawa 1971.
216. Takahaskhi Y., Rabins M.J., Auslander D.M.: *Sterowanie i systemy dynamiczne*. WNT, Warszawa 1976.
217. Tertil Z.: *Ocena komutacji maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowych*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 6, 1982.
218. Tertil Z.: *Ocena komutacji maszyn elektrycznych w warunkach przemysłowych*. Przegląd Elektrotechniczny, nr 2, 1964.
219. Tokarski T., Gębura A.: *Analiza możliwości doprowadzenia układu zasilania elektrycznego prądu stałego samolotów Su-22 do samoregulacji napięcia zgodnie z wymaganiami Normy Obronnej NO-15-A200: 2007 z uwzględnieniem wyników badań wykonanych w czasie remontu weryfikacyjnego*. Sprawozdanie Nr 177/OP/43/16 – BT ITWL 8623/50, Warszawa 2016.
220. Tokarski T., Gębura A.: *Przeprowadzenie na stanowisku w WZL-1 S.A. w Łodzi badań trzech prądnic prądu stałego GS-12T 3s przy udziale przedstawicieli WZL-2 S.A. i ITWL*. Sprawozdanie Nr 101/OP/43/17 – BT ITWL 8977/50, Warszawa 2017.
221. Tokarski T., Kalisiak M.: *Dokumentacja agregatów wykorzystywanych w badaniach: Diagnostyka techniczna prądnicy prądu stałego GS-12T 3s z określonym położeniem szczotek względem strefy neutralnej*. Sprawozdanie 238/OP/43/18 – Załącznik nr 1. BT ITWL 10624/50, Warszawa 2018.
222. Tokarski T., Kalisiak M.: *Metodyka sprawdzenia i regulacji położenia szczotek względem strefy neutralnej prądnicy prądu stałego GS-12T 3s*. Dok. nr 236/OP/43/18 Sprawozdanie 238/OP/43/18 – Załącznik nr 3. BT ITWL 10624/50, Warszawa 2018.
223. Tokarski T., Kalisiak M.: *Opis techniczny i instrukcja eksploatacji stanowiska ze zmodernizowanym goniometrem do sprawdzenia i regulacji położenia szczotek prądnicy*

- prądu stałego GS-12T 3s względem strefy neutralnej. Dok. nr 225/OP/43/18 – Sprawozdanie 238/OP/43/18 Załącznik nr 2, BT ITWL 10624/50, Warszawa 2018.*
224. Tokarski T., Kalisiak M.: *Opracowanie projektów stanowiska i metodyki do sprawdzenia położenia szczotek prądnicy prądu stałego GS-12T względem strefy neutralnej. BTITWL 8863/51, Warszawa 2017.*
225. Tokarski T., Kalisiak M.: *Stanowisko do badania i regulacji położenia szczotek komutatorowej prądnicy prądu stałego GS-12T 3s względem strefy neutralnej. Wzór użytkowy W.128337. Numer prawa wyłącznego Ru.072444 ogłoszono 07.03.2022.*
226. Tokarski T., Kalisiak M.: *Układ do pomiaru położenia szczotek prądnicy prądu stałego względem strefy neutralnej. Opis patentowy PL 238723 B1, ogłoszono 27.09.2021 r. WUP 26/21.*
227. Tokarski T.: *Evaluation of direct current electric power systems of the aircraft based on characteristics of a transient state. Diagnostyka, Vol. 20, No 1, 81-91 2019.*
228. Tokarski T.: *Kształtowanie charakterystyk komutatorowej prądnicy prądu stałego statku powietrznego. Praca doktorska, 561/506 BT ITWL, Warszawa, 2023.*
229. Tomczyk A., Rzucidło P.: *Systemy pośredniego sterowania dla samolotu ogólnego przeznaczenia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.*
230. Urbanek K.: *Ogniwa litowo-jonowe wysokiej mocy: przegląd materiałów katodowych. Wiadomości Chemiczne, nr. 72, 2018.*
231. Walentyłowicz J.: *Historia rozwoju silników cieplnych. Wydawnictwo Naukowe, Instytut Lotnictwa. Warszawa 2011.*
232. Warmiński J.: *Nieliniowe postacie drgań – układy dyskretne. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011.*
233. Wasiluk W.: *Poradnik inżyniera elektryka – tom 2. WNT, Warszawa 2007.*
234. Węgrzyn S.: *Podstawy automatyki. PWN. Warszawa 1980.*
235. Wikipedia: Caspar Wessel, [https://pl.wikipedia.org/wiki/Caspar\\_Wessel](https://pl.wikipedia.org/wiki/Caspar_Wessel)
236. Wikipedia: Alessandro Volta, [https://pl.wikipedia.org/wiki/Alessandro\\_Volta](https://pl.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta)
237. Wikipedia: Luigi Galvani, [https://pl.wikipedia.org/wiki/Luigi\\_Galvani](https://pl.wikipedia.org/wiki/Luigi_Galvani)
238. Wojnar A.: *Teoria sygnałów. WNT. WNT, Warszawa 1988.*
239. Wróbel T.: *Studium teoretyczne i eksperymentalne zagadnienia pulsacji napięcia prądnic tachometrycznych prądu stałego. Dodatek do biuletynu WAT nr 3 (259), Warszawa 1974.*
240. WZL-2 S.A.: *Karta technologiczna nr TK4/2016/157 – RN-180M – regulacje i sprawdzenia. Bydgoszcz 2016.*
241. WZL-2 S.A.: *Proces technologiczny remontu (naprawy) i warunki techniczne – Prądnic prądu stałego GS12T 3s. Bydgoszcz 2013.*
242. WZL-2 S.A.: *Warunki techniczne remontu skrzynek RK i aparatury komutacyjnej samolotu Su-22. Bydgoszcz 2014.*
243. Wróblewski A. K.: *Historia fizyki: od czasów najdawniejszych do współczesności. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.*

244. Zadencki R.: *Analiza uszkodzeń samolotów wielozadaniowych F-16 Block 52+ podczas ich eksploatacji*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 2020.
245. Zuchowicz K.: *Elektryczność statyczna w lotnictwie oraz sposoby zabezpieczenia przed jej skutkami*, Prace Instytutu Lotnictwa, WNT, 1976.
246. Zhao X., Guerrero J.M., Wu X.: *Review of Aircraft Electric Power Systems and Architectures*. International Energy Conference (ENERGYCON), IEEE 2014.
247. Żurek J. (red.): *Żywotność śmigłowców*. ITE, Radom 2006.



## SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2.1.	Pojedynczy przebieg napięcia przemiennego sinusoidalnego .....	31
Rys. 2.2.	Dwa przebiegi napięcia przemiennego .....	32
Rys. 2.3.	Rezystor w układzie prądu przemiennego .....	33
Rys. 2.4.	Charakterystyka częstotliwościowa rezystora.....	33
Rys. 2.5.	Charakterystyka prądowo-napięciowa rezystora .....	33
Rys. 2.6.	Cewka indukcyjna w układzie prądu przemiennego.....	35
Rys. 2.7.	Charakterystyka częstotliwościowa oporności biernej cewki indukcyjnej.....	35
Rys. 2.8.	Charakterystyki prądowo-napięciowe kondensatora przy stałej częstotliwości prądu.....	36
Rys. 2.9.	Kondensator w układzie prądu przemiennego .....	37
Rys. 2.10.	Charakterystyka częstotliwościowa kondensatora.....	37
Rys. 2.11.	Charakterystyka prądowo-napięciowa kondensatora przy stałej częstotliwości prądu.....	38
Rys. 2.12.	Typowe charakterystyki elektrycznych elementów nieliniowych .....	39
Rys. 2.13.	Przebieg odkształcony: a) przebieg podstawowy trójkątny; b) składowe sinusoidalne na tle przebiegu podstawowego; c) prążki amplitudowe Fouriera w funkcji częstotliwości .....	41
Rys. 2.14.	Przebieg odkształcony przez lokalne nasycanie cewki indukcyjnej z rdzeniem ferromagnetycznym zasilanej prądem przemiennym o częstotliwości 400 Hz.....	42
Rys. 2.15.	Układ do pomiaru przesunięcia fazowego cewki indukcyjnej.....	45
Rys. 2.16.	Trójkąt oporności dla dwóch cewek indukcyjnych przy jednakowej oporności czynnej i różnych wartościach indukcyjności własnej .....	46
Rys. 2.17.	Trójkąt napięć i prądów dla dwóch cewek indukcyjnych przy jednakowej oporności czynnej i różnych wartościach indukcyjności własnej .....	46
Rys. 2.18.	Trójkąt napięć i prądów dla cewki indukcyjnej przy zwiększaniu oporności czynnej obwodu elektrycznego (bez zmiany wartości indukcyjności własnej) .....	47
Rys. 2.19.	Charakterystyka częstotliwościowa oporności biernej cewki indukcyjnej.....	48
Rys. 2.20.	Charakterystyka częstotliwościowa impedancji cewki indukcyjnej przy znaczącej wartości jej oporności czynnej.....	48

Rys. 2.21.	Schemat zastępczy obwodu elektrycznego prądu przemiennego złożonego z kondensatora, cewki indukcyjnej i oporności czynnej .....	49
Rys. 2.22.	Wyznaczanie częstotliwości rezonansowej metodą graficzną .....	50
Rys. 2.23.	Zmiana natężenia prądu szeregowego obwodu rezonansowego w pobliżu częstotliwości rezonansowej.....	50
Rys. 2.24.	Zmiana natężenia prądu szeregowego obwodu rezonansowego w pobliżu częstotliwości rezonansowej.....	54
Rys. 2.25.	Podstawowy uniwersalny obwód prądu stałego .....	56
Rys. 2.26.	Szeregowe połączenie oporników .....	56
Rys. 2.27.	Spadki napięć dla szeregowego połączenie oporników .....	57
Rys. 2.28.	Równoległe połączenie oporników .....	57
Rys. 2.29.	Obwód elektryczny prądu stałego z dwoma źródłami napięć prądu stałego ....	59
Rys. 2.30.	Prawo Ohma dla obwodu elektrycznego prądu przemiennego.....	59
Rys. 2.31.	Szeregowe połączenie impedancji .....	60
Rys. 2.32.	Spadki napięć przy szeregowym połączeniu impedancji w obwodzie prądu przemiennego.....	60
Rys. 2.33.	Spadki napięć przy szeregowym połączeniu impedancji w obwodzie prądu przemiennego.....	61
Rys. 2.34.	Obwód elektryczny prądu przemiennego z dwoma źródłami napięć prądu przemiennego.....	62
Rys. 2.35.	Przebieg wyjściowy napięcia 115 V 400 Hz odkształcony do kształtu trójkątnego bez składowej stałej (współczynnik wypełnienia 50%) .....	63
Rys. 2.36.	Przebieg prostokątny impulsów ze składową stałą o współczynniku wypełnienia 25% .....	64
Rys. 2.37.	Przebieg prostokątny rzeczywisty – przebieg prostokątny o współczynniku wypełnienia 90% .....	65
Rys. 2.38.	Stany przejściowe prądnicy prądu stałego – odpowiedź na skokowe zaciążenie.....	66
Rys. 2.39.	Przebieg napięcia: a) ładowania; b) rozładowania kondensatora (przez rezystor R) jako przykład pogładowy graficznego wyznaczania stałej czasowej .....	67
Rys. 3.1.	Ogólny schemat blokowy układu elektroenergetycznego statku powietrznego	70
Rys. 3.2.	Wykres obciążenia źródeł prądu podczas: a) przygotowania lotu; b) uruchomienia zespołu napędowego; c) kołowania na start; d) startu; e) lotu po trasie; f) lądowania .....	71
Rys. 3.3.	Podstawowe schematy prądnic prądu stałego .....	72
Rys. 3.4.	Schemat zespolonej prądnicy prądu stałego z komutatorem półprzewodnikowym .....	73
Rys. 3.5.	Schemat wektorowy kolejności faz i oznaczeń.....	79
Rys. 3.6.	Modulacja amplitudy przebiegu napięcia 115 V, 400 Hz.....	84
Rys. 3.7.	Przedziały zmian składowych częstotliwości Fouriera obwiedni napięcia.....	84
Rys. 3.8.	Przedziały zmian modulacji częstotliwościowej prądu przemiennego.....	85
Rys. 3.9.	Przebieg napięcia zmodulowanego częstotliwościowo .....	86
Rys. 3.10.	Obwiednie równoważnych funkcji skokowych obwiedni napięcia przejściowego prądu przemiennego – parametry dopuszczalne.....	88

Rys. 3.11.	Obwiednie równoważnych funkcji skokowych obwiedni napięcia przejściowego prądu przemiennego – parametry znamionowe.....	88
Rys. 3.12.	Obwiednie równoważnych funkcji skokowych impulsów szpilkowych na zaciskach odbiorników energii elektrycznej prądu stałego i przemiennego.....	89
Rys. 3.13.	Przedziały zmian częstotliwości stanu przejściowego dla układu zasilania elektrycznego – parametry dopuszczalne .....	90
Rys. 3.14.	Przedziały zmian częstotliwości stanu przejściowego dla układu zasilania elektrycznego – parametry znamionowe .....	90
Rys. 3.15.	Obwiednie równoważnych funkcji skokowych układu zasilania elektrycznego prądu przemiennego o niestabilizowanej częstotliwości.....	94
Rys. 3.16.	Przedziały zmian składowych harmonicznnych pulsacji napięcia stałego – parametry dopuszczalne.....	96
Rys. 3.17.	Przedziały zmian składowych harmonicznnych pulsacji napięcia stałego – parametry znamionowe.....	97
Rys. 3.18.	Przedziały zmian równoważnych funkcji skokowych napięcia prądu stałego w układach zasilania elektrycznego zasilanych z prądnic prądu stałego 28 V – parametry dopuszczalne.....	98
Rys. 3.19.	Przedziały zmian równoważnych funkcji skokowych napięcia prądu stałego w układach zasilania elektrycznego zasilanych z prądnic prądu stałego 28 V – parametry znamionowe .....	98
Rys. 3.20.	Przedziały zmian równoważnych funkcji skokowych napięcia prądu stałego w układach zasilania elektrycznego, w których źródło energii elektrycznej jest zespołem transformatorowo-prostowniczym zasilanym ze źródła energii elektrycznej prądu przemiennego o stabilizowanej częstotliwości .....	99
Rys. 3.21.	Typowe pochylenia tablic przyrządów – elementy sterujące obwodów elektrycznych – wariant nr 1 – dla elementów sterujących w zakreskowanych obszarach – elementy sterujące „do góry” dla stanu włączenia, „do dołu” do wyłączenia .....	102
Rys. 3.22.	Typowe pochylenia tablic przyrządów – elementy sterujące obwodów elektrycznych – wariant nr 2 – dla elementów sterujących w zakreskowanych obszarach – elementy sterujące „do przodu” dla stanu włączenia, „do tyłu” do wyłączenia .....	102
Rys. 3.23.	Pulpit górny sterowania pokładowymi źródłami prądu stałego ze śmigłowca Mi-2 .....	104
Rys. 4.1.	Schemat prądnicy komutatorowej prądu stałego z przebiegiem napięcia .....	111
Rys. 4.2.	Wyznaczanie kierunku SEM i prądu w przewodzie elektrycznym poruszającym siłą F w polu magnetycznym stojana prądnicy za pomocą reguły prawej dłoni.....	112
Rys. 4.3.	Schemat ideowy prądnicy bocznikowej z biegunami komutacyjnymi.....	113
Rys. 4.4.	Pakiet wirnika prądnicy w czasie montażu .....	114
Rys. 4.5.	Pojedynczy zezwój przygotowany do montażu w wirniku (tworniku) komutatorowej prądnicy prądu stałego.....	115
Rys. 4.6.	Wirnik (twornik) komutatorowej prądnicy prądu stałego przygotowany do zamontowania zezwoju – dwa żłobki wyłożone preszpanem .....	115

Rys. 4.7.	Wirnik (twornik) komutatorowej prądnicy prądu stałego – sposób mocowania klepek komutatora do konstrukcji wirnika .....	115
Rys. 4.8.	Wirnik (twornik) komutatorowej prądnicy prądu stałego – widok zewnętrzny .....	116
Rys. 4.9.	Półprzekrój prądnicy komutatorowej prądu stałego GS-12T 3s .....	118
Rys. 4.10.	Zmiany składowej pulsacji dla lotniczej prądnicy prądu stałego bez zwarcia, przy minimalnym obciążeniu .....	119
Rys. 4.11.	Kształt przebiegu składowej napięcia pulsacji dla prądnicy prądu stałego ....	120
Rys. 4.12.	Oddziaływanie twornika maszyny prądu stałego.....	121
Rys. 4.13.	Rozkład przepływów i indukcji w maszynie prądu stałego z biegunami pomocniczymi i uzwojeniem kompensacyjnym.....	123
Rys. 4.14.	Przekrój poprzeczny prądnicy prądu stałego – model uproszczony – przesunięcie strefy magnetycznie obojętnej prądnicy komutatorowej prądu stałego spowodowane oddziaływaniem pola poprzecznego wirnika (twornika) .....	124
Rys. 4.15.	Przekrój poprzeczny prądnicy prądu stałego – model uproszczony – sposób neutralizowania strumienia reakcji wirnika (twornika) poprzez uzwojenie kompensacyjne oraz uzwojenie bieguna dodatkowego (komutacyjnego).....	125
Rys. 4.16.	Oddziaływanie twornika przy przesunięciu szczotek ze strefy neutralnej.....	126
Rys. 4.17.	Przesunięcie strefy magnetycznie obojętnej prądnicy komutatorowej prądu stałego .....	127
Rys. 4.18.	Krzywa magnesowania prądnicy komutatorowej prądu stałego.....	127
Rys. 4.19.	Schemat blokowy systemu elektroenergetycznego prądu stałego samolotu Su-22.....	133
Rys. 4.20.	Widok zewnętrzny komutatorowej prądnicy prądu stałego GS-12T 3s.....	134
Rys. 4.21.	Schemat połączeń elektrycznych wewnętrznych prądnicy prądu stałego GS-12T 3s.....	135
Rys. 4.22.	Schemat zastępczy prądnicy bocznikowej z biegunami komutacyjnymi i uzwojeniem kompensacyjnym .....	136
Rys. 4.23.	Zmiany składowej pulsacji dla lotniczej prądnicy prądu stałego bez zwarcia .....	138
Rys. 4.24.	Kształt napięcia wyjściowego prądnicy prądu stałego w chwili uszkodzenia uzwojenia wirnika (zwarcia uzwojenia pośrodku jednego z uzwojeń) .....	139
Rys. 4.25.	Silnie skorodowane blachy krzemowe nabiegunników stojana prądnicy-rozrusznika GS-18.....	140
Rys. 4.26.	Ślady otarć (zeszlifowań) obwodowych na powierzchniach wirnika prądnicy-rozrusznika .....	141
Rys. 4.27.	Stalaktyty rdzy na nakrętkach śrub mocujących mostki uchwytów szczotkowych do korpusu prądnicy.....	141
Rys. 4.28.	Charakterystyki biegu jałowego bocznikowej prądnicy lotniczej .....	143
Rys. 4.29.	Charakterystyka biegu jałowego prądnicy prądu stałego GS-12T 3s w warunkach rzeczywistych.....	144
Rys. 4.30.	Charakterystyki zewnętrzne bocznikowej prądnicy lotniczej, gdzie: linia przerywana – bez regulatora; linia pozioma 28,5 V – z regulatorem .....	144

Rys. 4.31.	Charakterystyki regulacyjne prądnicy prądu stałego GS-12T 3s z przesuniętymi szczotkami względem strefy neutralnej w kierunku obrotów wirnika prądnicy o kąt $\alpha$ : $0^\circ$ , $1^\circ$ , $1,6^\circ$ , $2,2^\circ$ i $3,4^\circ$ na tle wartości wymaganych.....	145
Rys. 4.32.	Charakterystyka zmian rezystancji słupka węglowego w funkcji napięcia podawanego na zaciski cewki L1 i L2 (zaciski 6 i 2) węglowego regulatora napięcia RN-180M.....	148
Rys. 4.33.	Schemat połączeń zezwojów prądnicy GS-12T 3s.....	150
Rys. 4.34.	Wartości rezystancji poszczególnych zezwojów prądnicy $R_{j_0} = f(j)$ (promień wodzący) w funkcji numeracji zezwojów wirnika dla różnych czasów eksploatacji dla prądnic o zróżnicowanym czasie nalotu statku powietrznego.....	153
Rys. 4.35.	Wartości rezystancji średniej zezwojów prądnicy GS-12T w funkcji godzin nalotu otrzymane z populacji ośmiu prądnic.....	153
Rys. 4.36.	Charakterystyki zmian natężenia prądu w obwodzie wzbudzenia prądnicy od wartości minimalnej do maksymalnej.....	156
Rys. 4.37.	Wykres zmian temperatury powietrza otoczenia w zależności od wysokości, wg atmosfery wzorcowej.....	157
Rys. 4.38.	Wykres zmian mocy użytecznej prądnicy pokładowej w zależności od wysokości lotu.....	157
Rys. 4.39.	Typowy sposób chłodzenia prądnicy stosowany na silnikach samolotów napędzanych śmigłem z silnikiem tłokowym.....	160
Rys. 4.40.	Typowy sposób chłodzenia prądnicy stosowany na silnikach turbowalowych – chłodzenie powietrzem pobieranym z wentylatora mechanicznego (śmigłowce) lub z wentylatora mechanicznego.....	161
Rys. 4.41.	Typowy sposób chłodzenia prądnicy stosowany na pierwszych silnikach turbodrzutowych – chłodzenie powietrzem pobieranym z naporu powietrza chwytnikiem przednim zewnętrznym.....	161
Rys. 4.42.	Typowy sposób chłodzenia prądnicy stosowany na pierwszych silnikach turbodrzutowych – chłodzenie powietrzem pobieranym z naporu powietrza chwytnikiem przednim wewnętrznym.....	161
Rys. 4.43.	Typowy sposób chłodzenia prądnicy stosowany na silnikach turbodrzutowych – chłodzenie powietrzem pobieranym z naporu powietrza z tylnego chwytnika wewnętrznego oraz wykorzystanie zjawiska eżektorowego.....	162
Rys. 4.44.	Schemat wymuszonego chłodzenia powietrznego prądnicy.....	163
Rys. 4.45.	Schemat wymuszonego chłodzenia cieczowego prądnicy.....	163
Rys. 4.46.	Schemat wymuszonego chłodzenia cieczowego prądnicy – model cieplny prądnicy lotniczej GS-12T 3s.....	164
Rys. 4.47.	Dynamiczne procesy przejściowe zmian temperatury T1 wirnika prądnicy przy skokowej zmianie prądu obciążenia (z poziomu 0 do $I_z$ ) i zmiennej wartości prędkości obrotowej wirnika.....	166
Rys. 4.48.	Dynamiczne procesy przejściowe zmian temperatury T2 stojana prądnicy przy skokowej zmianie prądu obciążenia i stałej wartości prędkości obrotowej wirnika.....	167

Rys. 4.49.	Dynamiczne procesy przejściowe zmian rezystancji uzwojenia twornika przy skokowej zmianie prądu obciążenia (z poziomu 0 do $I_z$ ).....	168
Rys. 4.50.	Indukowania się siły elektromotorycznej w elektrycznym obwodzie zamkniętym na skutek przemieszczania magnesu trwałego zademonstrowany przez Michaela Faradaya .....	169
Rys. 4.51.	Jednofazowa prądnica prądu przemiennego .....	173
Rys. 4.52.	Trójfazowa prądnica prądu przemiennego .....	173
Rys. 4.53.	Prądnica trójfazowa bezstykowa prądu przemiennego GT-40PCz8 na śmigłowcu W-3WA Sokół.....	176
Rys. 4.54.	Przekrój prądnicy prądu przemiennego F-16.....	176
Rys. 4.55.	Widok ogólny prądnicy prądu przemiennego GT-40PCz6 .....	177
Rys. 4.56.	Prądnice prądu przemiennego stosowane w lotnictwie .....	178
Rys. 4.57.	Ideowy schemat prądnicy trójfazowej synchronicznej samowzbudnej (wzbudzenie realizowane własnym prostownikiem).....	178
Rys. 4.58.	Schemat ideowy prądnicy prądu przemiennego GT-40PCz6 .....	179
Rys. 4.59.	Prądnica trójfazowa bezstykowa prądu przemiennego w systemie elektroenergetycznym samolotu F-16.....	179
Rys. 4.60.	Charakterystyka biegu jałowego prądnicy synchronicznej prądu przemiennego.....	180
Rys. 4.61.	Charakterystyki zewnętrzne prądnicy synchronicznej.....	181
Rys. 4.62.	Wykres wskazowy obrazujący oddziaływanie twornika w prądnicy synchronicznej dla różnego rodzaju obciążenia .....	183
Rys. 4.63.	Schemat kinematyczny silnika turbowałowego GTD-350 śmigłowca Mi-2 ..	185
Rys. 4.64.	Schemat blokowy zespołu napędowego śmigłowca Mi-8 .....	186
Rys. 4.65.	Sposób mocowania prądnicy-rozrusznika GS-18MO do reduktora silnika TW-2-117 śmigłowca Mi-8 .....	186
Rys. 4.66.	Widok silnika TW2-117A (śmigłowca Mi-8) z prawej strony.....	187
Rys. 4.67.	Widok śmigłowca SW-4 Puszczki z prawej strony, z widoczną prądnicą-rozrusznikiem .....	188
Rys. 4.68.	Schemat blokowy zespołu napędowego śmigłowca Mi-17 .....	189
Rys. 4.69.	Schemat blokowy zespołu napędowego śmigłowca Mi-24 .....	190
Rys. 4.70.	Schemat kinematyczny skrzynki napędów prądnic śmigłowca Mi-24.....	191
Rys. 4.71.	Hydrauliczny napęd o stałej prędkości – schemat blokowy .....	192
Rys. 4.72.	Hydrauliczny napęd o stałej prędkości – schemat instalacji hydraulicznej ....	192
Rys. 4.73.	Hydrauliczny napęd o stałej prędkości – konstrukcja pompy i silnika hydraulicznego.....	193
Rys. 4.74.	Skrzynka napędów agregatów samolotu F-16 z wyróżnioną prądnicą główną.....	193
Rys. 4.75.	System elektroenergetyczny samolotu F-16 .....	194
Rys. 4.76.	Schemat kinematyczny dwusilnikowego zespołu napędowego samolotu MiG-29 .....	194
Rys. 4.77.	Agregat GP-21 z samolotu MiG-29 – złożony z e stabilizatora hydraulicznego oraz z prądnicy trójfazowej $S = 30$ kVA typ GT-30NŻ412.....	195
Rys. 4.78.	Złazce n-p półprzewodnika bez źródła zewnętrznego .....	198

Rys. 4.79.	Złącze n-p półprzewodnika w stanie przewodzenia.....	198
Rys. 4.80.	Złącze n-p półprzewodnika w stanie zaporowym, tj. bez przewodzenia.....	199
Rys. 4.81.	Diody półprzewodnikowe .....	200
Rys. 4.82.	Charakterystyka prądowo-napięciowa półprzewodnikowej diody prostowniczej.....	200
Rys. 4.83.	Prostowanie jednopółkwoke (jednopulsowe) przez pojedynczą diodę prostowniczą – zasada przetwarzania.....	201
Rys. 4.84.	Przebiegi napięcia wejściowego i wyjściowego prostownika jednopółkwokego (przez pojedynczą diodę prostowniczą).....	201
Rys. 4.85.	Mostek Gretza – prostowanie dwupółkwoke – przepływ prądu dla dodatniej półkwoki sinusoidy generowanej przez źródło prądu przemiennego G.....	202
Rys. 4.86.	Prostowanie dwupółkwoke (dwupulsowe) przez cztery diody w układzie mostka Gretza – zasada przetwarzania.....	202
Rys. 4.87.	Prostowanie przez mostek Gretza – prostowanie dwupółkwoke.....	203
Rys. 4.88.	Blok transformatorowo-prostowniczy jednofazowy dwupulsowy – prostowanie przez mostek Gretza – przedstawiono przepływ prądu dla górnej półkwoki sinusoidy.....	204
Rys. 4.89.	Blok transformatorowo-prostowniczy jednofazowy dwupulsowy – prostowanie przez mostek Gretza – przedstawiono przepływ prądu dla dolnej półkwoki sinusoidy.....	204
Rys. 4.90.	Blok transformatorowo-prostowniczy trójfazowy, 6-pulsowy .....	205
Rys. 4.91.	Transformator jednofazowy .....	207
Rys. 4.92.	Transformator trójfazowy .....	208
Rys. 4.93.	Uzwojenie transformatora trójfazowego połączone w gwiazdę „Y”.....	208
Rys. 4.94.	Uzwojenie transformatora trójfazowego połączone w trójkąt „D”.....	209
Rys. 4.95.	Uzwojenie transformatora trójfazowego połączone w zygzak „Z”.....	209
Rys. 4.96.	Najczęściej stosowane układy połączeń transformatorów trójfazowych dwuuzwojeniowych.....	211
Rys. 4.97.	Przesunięcia fazowe między napięciami UWN i UNN .....	213
Rys. 4.98.	Układ połączeń transformatora trójfazowego gwiazda/podwójna gwiazda stosowany przy prostownikach sześciopulsowych.....	216
Rys. 4.99.	Układ połączeń transformatora trójfazowego gwiazda/podwójna gwiazda stosowany przy prostownikach 12-pulsowych.....	216
Rys. 4.100.	Schemat ideowy bloku transformatorowo-prostowniczego 12-pulsowego.....	218
Rys. 4.101.	Filtr dolnoprzepustowy RC pierwszego rzędu.....	220
Rys. 4.102.	Przykładowa charakterystyka ogólna filtra dolnoprzepustowego RC .....	222
Rys. 4.103.	Przykładowa charakterystyka filtra dolnoprzepustowego RC dla przykładowych danych.....	222
Rys. 4.104.	Prostowanie przez mostek Gretza – prostowanie dwupółkwoke.....	223
Rys. 4.105.	Przebiegi napięcia prostowników .....	225
Rys. 4.106.	Schemat ideowy uproszczony bloku transformatorowo-prostowniczego typu WU-6A śmigłowca Mi-24 .....	226
Rys. 4.107.	Ideowy schemat elektryczny oraz prostownik DC na śmigłowcu Mi-24 .....	226

Rys. 4.108. Schemat sieci prądu stałego DC samolotu F-16 z rozmieszczeniem podstawowych urządzeń sieci.....	227
Rys. 4.109. Ideowy schemat elektryczny oraz prostownik DC stosowany na samolocie F-16.....	227
Rys. 4.110. Charakterystyka zewnętrzna bloku transformatorowo-prostowniczego.....	228
Rys. 4.111. Charakterystyka prądu jałowego transformatora.....	228
Rys. 4.112. Charakterystyka zmian wartości napięcia wyjściowego w funkcji prądu obciążenia transformatora.....	229
Rys. 4.113. Charakterystyka zwarcia transformatora – zmiany natężenia zwarcia i mocy w funkcji napięcia.....	230
Rys. 4.114. Charakterystyka sprawności transformatora w funkcji natężenia obciążenia w odniesieniu do wartości prądu znamionowego.....	231
Rys. 4.115. Widok bloku transformatorowo-prostowniczego typu WU-6A.....	232
Rys. 4.116. Montaż bloku transformatorowo-prostowniczego WU-6A do struktury śmigłowca.....	232
Rys. 4.117. Połączenie diody prostowniczej z radiatorem przed montażem.....	234
Rys. 4.118. Połączenie diody prostowniczej z radiatorem po montażu.....	235
Rys. 4.119. Widok z góry BTP typu WU-6A po zdemontowaniu pokrywy.....	235
Rys. 4.120. Opływ strumienia powietrznego chłodzącego podzespoły bloku transformatorowo-prostowniczego WU-6.....	235
Rys. 4.121. Blok transformatorowo-prostowniczy WU-6A zamontowany na śmigłowcu W-3WA Sokół – widok na półkę agregatów (przedział transportowy, za plecami pilota).....	236
Rys. 4.122. Bloki transformatorowo-prostownicze WU-6A zamontowane na śmigłowcu Mi-17.....	236
Rys. 4.123. Opływ strumienia powietrznego chłodzącego podzespoły bloku transformatorowo-prostowniczego WU-8.....	237
Rys. 4.124. Blok transformatorowo-prostowniczy WU-8.....	237
Rys. 4.125. Alessandro Volta.....	239
Rys. 4.126. Stos Alessandra Volty – pierwsza nowożytna elektryczna bateria akumulatorowa.....	239
Rys. 4.127. Gaston Planté (1843–1889) – twórca pierwszego działającego akumulatora kwasowo-ołowiowego.....	239
Rys. 4.128. Idea działania pierwszego akumulatora kwasowo-ołowiowego opracowanego przez Gastona Plantégo.....	239
Rys. 4.129. Wentylacja wnętrza baterii akumulatorowej.....	247
Rys. 4.130. Rozmontowany pojemnik akumulatorowy baterii akumulatorowej 12SAM-28 śmigłowca Mi-8.....	251
Rys. 4.131. Przewód elektryczny pojemnika akumulatorowego – miejsce penetracji elektrolitu.....	251
Rys. 4.132. Pokładowa kwasowa bateria akumulatorowa z pojemnikiem-kontenerem na pokładzie SP ze złączem wysokoprądowym spełniającym standardy rosyjskie.....	253
Rys. 4.133. Kołek stykowy złącza wysokoprądowego (przymocowany do konstrukcji płatowca statku powietrznego).....	254



Rys. 4.134. Pokładowa bateria akumulatorowa z pojemnikiem-kontenerem na pokładzie SP ze złączem wysokoprądowym spełniającym standardy NATO.....	255
Rys. 4.135. Pokładowa kwasowa bateria akumulatorowa ze złączem ruchomym spełniającym standardy NATO .....	255
Rys. 4.136. Akumulator ołowiowy .....	256
Rys. 4.137. Charakterystyka zewnętrzna ładowania i wyładowania ogniwa akumulatora ołowiowego.....	256
Rys. 4.138. Charakterystyki ładowania i rozładowania akumulatora ołowiowego .....	257
Rys. 4.139. Przykładowa charakterystyka napięcia na zaciskach wyjściowych lotniczego akumulatora kwasowego w funkcji obciążania .....	257
Rys. 4.140. Wygląd zewnętrzny baterii akumulatorowej kadmowo-niklowej 20NKBN-25 (Su-22) .....	262
Rys. 4.141. Charakterystyki rozładowania baterii akumulatorowej kadmowo-niklowej .....	263
Rys. 4.142. Wygląd zewnętrzny baterii akumulatorowej srebrowo-cynkowej 20SCS-45B (MiG29).....	264
Rys. 4.143. Ładownik w misji na Marsa Pathfinder zasilany w energię elektryczną z bateriami srebrowo-cynkowymi (Ag-Zn).....	265
Rys. 4.144. Łazik księżycowy wyposażony w baterie srebrowo-cynkowe .....	265
Rys. 4.145. Przykładowy wykres zależności SEM od stopnia wyładowania ogniwa (akumulatora) srebrowo-cynkowego SCK-45B z praktyki eksploatacyjnej autorów .....	266
Rys. 4.146. Charakterystyki porównawcze baterii akumulatorowych srebrowo-cynkowych, kadmowo-niklowych i ołowiowych: zależność pojemności jednostkowej (na 1 kg masy) od temperatury elektrolitu; b) zależność pojemności od natężenia prądu rozładowania .....	266
Rys. 4.147. Akumulator litowo-jonowy firmy Varta.....	267
Rys. 4.148. Akumulator Li-Ion firmy Motorola z telefonu komórkowego po zdjęciu obudowy – widoczny układ kontroli i nadzoru ładowania/rozładowania .....	268
Rys. 4.149. Zastosowanie prądnic o napędzie wiatrakowym w lotnictwie.....	269
Rys. 4.150. Śmigłowiec Mi-24W ma dwie trójfazowe prądnice prądu przemiennego z możliwością pracy równoległej .....	271
Rys. 4.151. Samoloty z instalacją elektroenergetyczną w technologii HV 270 V <sub>DC</sub> : a) Boeing B-787; b) Lockheed F22 Raptor .....	272
Rys. 4.152. Rozmieszczenie podstawowych podzespołów sieci elektroenergetycznej samolotu Su-22 .....	275
Rys. 4.153. Przykładowy system sterowania sieci prądu stałego złożony z dwóch prądnic komutatorowych prądu stałego i jednej prądnicy prądu przemiennego z blokiem transformatorowo-prostowniczym oraz z baterii akumulatorowej .....	276
Rys. 4.154. Przykładowy system sterowania sieci prądu stałego złożony z dwóch prądnic prądu przemiennego i jednej prądnicy prądu stałego oraz jednej przetwornicy (prądu stałego na przemienny) .....	277
Rys. 4.155. System zarządzania rozdziałem energii elektrycznej na samolocie B-767.....	278
Rys. 4.156. System zarządzania rozdziałem energii elektrycznej 270 V <sub>DC</sub> .....	279

Rys. 4.157. Praca równoległa prądnic z akumulatorem.....	281
Rys. 4.158. Charakterystyka obcowzbudnej komutatorowej prądnicy prądu stałego i pokładowej baterii pokładowej w czasie ładowania.....	281
Rys. 4.159. Charakterystyki współpracy prądnicy z akumulatorem koordynowane przez przełącznik spolaryzowany – idea przełączania .....	282
Rys. 4.160. Charakterystyki współpracy prądnicy z akumulatorem koordynowane przez przełącznik spolaryzowany – schemat blokowy .....	282
Rys. 4.161. Schemat ideowy pracy równoległej dwóch prądnic prądu stałego .....	283
Rys. 4.162. Idea pracy równoległej prądnic (trójfazowych) prądu przemiennego wspomaganą przez układ wyrównujący ich względne obciążenia.....	285
Rys. 4.163. Przykładowy sposób ułożenia kabli wydawczych stacjonarnego naziemnego układu zasilania statków powietrznych wg normy PN-EN 12312-20+A1:2012 .....	286
Rys. 4.164. LZE (agregat wielozadaniowy) typ M70D (produkcji włoskiej) etatowo stosowany do naziemnego zasilania samolotu M-346 Bielik.....	286
Rys. 4.165. Rysunek LZE na podwoziu samojezdnym z ruchomym wysięgnikiem – przykład .....	287
Rys. 4.166. Samojezdny LZE APA-5 na podwoziu samochodowym .....	288
Rys. 4.167. Samojezdny LZE LUZES-V na podwoziu samochodowym .....	288
Rys. 4.168. Elementy lotniskowego zasilania na śmigłowcu Mi-24 oraz wtyczka zasilania zewnętrznego SzRA-4003F .....	290
Rys. 4.169. Elementy lotniskowego zasilania oraz wtyczka zasilania zewnętrznego SzRAP-500 przyłączona do gniazda zasilania zewnętrznego SzRAP-500 śmigłowca Sokół.....	291
Rys. 4.170. Schemat podstawowy przykładowej automatyki kabla wydawczego LZE trójfazowego prądu przemiennego 115/200 V, 400 Hz.....	293
Rys. 4.171. Schemat podstawowy przykładowej automatyki kabla wydawczego LZE prądu stałego 28 V .....	294
Rys. 4.172. Schemat podstawowy przykładowej automatyki kabla wydawczego LZE jednofazowego prądu przemiennego 1x115 V, 400 Hz dla prądu obciążenia $I_{obc} > 10$ A.....	295
Rys. 4.173. Schemat podstawowy przykładowej automatyki kabla wydawczego LZE jednofazowego prądu przemiennego 1 x 115 V, 400 Hz dla prądu obciążenia $I_{obc} \leq 10$ A.....	296
Rys. 4.174. Schemat podstawowy LZE z trójfazowym źródłem energii elektrycznej prądu przemiennego 115/200 V, 400 Hz.....	297
Rys. 4.175. Przykładowa struktura LZE z przetwarzaniem elektromaszynowym umożliwiającą zasilanie elektryczne wszystkich obwodów WSP eksploatowanych w SZ RP .....	298
Rys. 4.176. Przykładowa struktura LZE z przetwarzaniem falownikowym.....	299
Rys. 5.1. Elektryczna instalacja dwuprzewodowa .....	302
Rys. 5.2. Elektryczna instalacja jedнопrzewodowa .....	302
Rys. 5.3. Urwana metalizacja ciągła sterowania lotkami samolotu Su-22.....	304
Rys. 5.4. Urwana metalizacja ciągła wysuwania slotu samolotu Su-22 .....	304

Rys. 5.5.	Urwana elastyczna linka metalizacji bocznikująca przegub układu sterowania statecznikami wysokości samolotu Su-22 .....	304
Rys. 5.6.	Uszkodzony przewód siłowy i przewody obwodu wzbudzenia prądnicy prądu stałego GS-12T 3s z samolotu Su-22.....	305
Rys. 5.7.	Uszkodzona prądnica-rozrusznik GSR-ST-12WT-2s z samolotu MiG-21 .....	306
Rys. 5.8.	Widok uszkodzonych szczotek z prądnicy-rozrusznika GSR-ST-12WT-2s z samolotu MiG21bis.....	306
Rys. 5.9.	Przykład „negatywnego” przebiegu napięcia w czasie badania stanu przejściowego układu zasilania prądu stałego 28,5 V samolotu Su-22 .....	307
Rys. 5.10.	Zmiany wartości napięcia minimalnego oraz czasu trwania impulsu przy stanach przejściowych .....	308
Rys. 5.11.	Schemat rozmieszczenia tabliczek minusowych na samolocie Su-22 .....	309
Rys. 5.12.	Tabliczka minusowa nr 3 samolotu Su-22UM.....	310
Rys. 5.13.	Obwód zasilania elektroenergetycznego samolotu Su-22 z uwzględnieniem obwodu powrotnego .....	311
Rys. 5.14.	Wyładowanie doziemne z chmury (a); Benjamin Franklin (1706–1790) – pierwszy badacz zjawiska wyładowań elektrostatycznych, który udowodnił elektryczną naturę pioruna (b).....	315
Rys. 5.15.	Zjawisko powstawania chmur burzowych.....	316
Rys. 5.16.	Proces wyładowania pioruna przez korpus statku powietrznego.....	317
Rys. 5.17.	Samolot CASA po uderzeniu pioruna podczas lądowania – ślady wypaleń od uderzenia pioruna w rejonie szyby przedniej kabiny pilotów .....	319
Rys. 5.18.	Samolot CASA po uderzeniu pioruna podczas lądowania – ślady wypaleń na kadłubie w rejonie śródłata .....	319
Rys. 5.19.	Sposób zabezpieczenia odbiornika ciśnień powietrza PWD przed uderzeniem pioruna .....	321
Rys. 5.20.	Sposób zabezpieczenia diamagnetycznej osłonie radaru w nosku kadłuba samolotu MiG-29.....	322
Rys. 5.21.	Paski odgromowe w diamagnetycznej osłonie radaru pogodowego umieszczonego w nosku kadłuba samolotu An-28.....	322
Rys. 5.22.	Śmigłowiec SW-4 o niemetalowej (kompozytowej) strukturze poszycia – pod wierzchnią powierzchnią lakierniczą jest nałożony (bezpośrednio na warstwę kompozytową) podkład elektroprzewodzący .....	326
Rys. 5.23.	Samolot MiG-29 – miejsca przykładania sond prądowych do pomiaru rezystancji poszycia .....	327
Rys. 5.24.	Szkic poglądowy mechaniczno-elektryczny pomiędzy sterami wysokości, tj. tzw. stabilizatorami.....	329
Rys. 5.25.	Zmiany wartości rezystancji metalizacji poszycia samolotu MiG-29 dla symulowanego zwiększenia do górnej granicy C, rezystancji lewego steru wysokości na tle równomiernego poziomu pozostałych rezystancji połączeń .....	329
Rys. 5.26.	Zmiany wartości rezystancji metalizacji poszycia samolotu MiG-29 dla symulowanego zwiększenia do górnej granicy D, rezystancji lewego steru wysokości na tle równomiernego poziomu pozostałych rezystancji połączeń .....	330

Rys. 5.27.	Zastosowanie warystorów i odgromników w układzie elektroenergetycznym śmigłowca W-3WA .....	332
Rys. 5.28.	Przykładowe podzespoły podlegające metalizacji ze strukturą statku powietrznego.....	333
Rys. 5.29.	Rozpraszacz ładunków elektrostatycznych (wyładowań atmosferycznych) ..	337
Rys. 5.30.	Rysunek poglądowy ukazujący drogę przepływu prądu pobierczego dla dużych powierzchni styków metalizacyjnych statku powietrznego .....	338
Rys. 5.31.	Linka metalizacji (stosowana warunkowo do połączenia metalizacyjnego ruchomych elementów konstrukcji) – wymiary i konstrukcja według normy militarnej USA MIL-S-24749(SH) – przykład nr 1 .....	340
Rys. 5.32.	Linka metalizacji (stosowana warunkowo do połączenia metalizacyjnego ruchomych elementów konstrukcji) – wymiary i konstrukcja według normy militarnej USA MIL-S-24749(SH) – przykład nr 2.....	341
Rys. 6.1.	Spadki napięć dla szeregowego połączenia oporników .....	350
Rys. 6.2.	Układ elektryczny złożony z równoległe połączonych oporników .....	351
Rys. 6.3.	Układ elektryczny złożony z szeregowo połączonych oporników .....	352
Rys. 6.4.	Schemat ideowy prądnicy i pokładowej baterii akumulatorowej w połączeniu równoległym.....	353
Rys. 6.5.	Impedancja cewki indukcyjnej (dławika) w układzie współrzędnych prostokątnych liczb zespolonych.....	358
Rys. 6.6.	Spadek napięcia na cewce indukcyjnej (dławiku) w układzie współrzędnych prostokątnych liczb zespolonych.....	358
Rys. 6.7.	Szeregowe połączenie modułów impedancji .....	362
Rys. 6.8.	Trójkąty napięć dla szeregowego połączenia trzech cewek indukcyjnych rzeczywistych .....	363
Rys. 6.9.	Schemat ideowy prądnicy prądu przemiennego i impedancji.....	369
Rys. 6.10.	Schemat ideowy równoległego połączenia modułów impedancji .....	374
Rys. 6.11.	Przykładowy filtr pasywny RC, zwany w technice impulsowej członem całkującym rzeczywistym.....	375
Rys. 6.12.	Wartość modułu transmitancji modelu elektronicznego układu inercyjnego pierwszego rzędu w funkcji częstotliwości, gdzie oś wartości impedancji jest liniowa, zaś oś częstotliwości logarytmiczna.....	376
Rys. 6.13.	Oporność bierna kondensatora w funkcji częstotliwości .....	377
Rys. 6.14.	Impedancja wejściowa filtra RC w funkcji częstotliwości .....	379
Rys. 6.15.	Wzmocnienie/tłumienie filtra RC w funkcji częstotliwości.....	379
Rys. 6.16.	Gałąź szeregową złożoną z elementów idealnych R, L, C: a) schemat połączeń; b) wykres wektorowy przy przeważającej reaktancji indukcyjnej; c) wykres wektorowy gałęzi szeregowej w stanie rezonansu.....	381
Rys. 6.17.	Schemat zastępczy gałęzi szeregowej złożonej z elementów idealnych: RL, L, C, $G_{re}$ .....	382
Rys. 6.18.	Charakterystyki częstotliwościowe natężenia prądu w szeregowym obwodzie złożonym z kondensatora i dławika (cewki indukcyjnej z rdzeniem) w funkcji zmian pulsacji $\omega$ ( $\omega = 2\pi f$ ) przy stałej amplitudzie źródła zasilania oraz niezmiennianych wartościach L, C: 1. $R = R_1$ ; 2. $R = 2 \cdot R_1$ ; 3. $R = 4 \cdot R_1$ .....	382

Rys. 6.19.	Charakterystyki częstotliwościowe natężenia prądu w szeregowym obwodzie złożonym z kondensatora i dławika (cewki indukcyjnej z rdzeniem) w funkcji zmian pulsacji $\omega$ ( $\omega = 2\pi f$ ) przy stałej amplitudzie źródła zasilania oraz niezmiennych wartościach $L, C$ : 1. $R = R_1$ ; 2. $R = 2 \cdot R_1$ ; 3. $R = 4 \cdot R_1$ .....	384
Rys. 6.20.	Schemat blokowo-ideowy bloku transformatorowo-prostowniczego z dwoma filtrami rezonansowymi na wyjściu .....	385
Rys. 6.21.	Charakterystyka zmian natężenia prądu w obwodzie rezonansowym w funkcji częstotliwości dla bloku transformatorowo-prostowniczego z dwoma filtrami rezonansowymi na wyjściu .....	385
Rys. 6.22.	Pulsacje napięcia stałego przy obciążeniu prądowym prądnicy komutatorowej prądu stałego poniżej 10% $I_N$ .....	395
Rys. 6.23.	Pulsacje napięcia stałego przy obciążeniu prądowym prądnicy komutatorowej prądu stałego powyżej 100% $I_N$ .....	395
Rys. 6.24.	Szeregowe połączenie źródeł napięciowych.....	396
Rys. 6.25.	Wykres wektorowy napięć fazowych i międzyfazowych źródła .....	399
Rys. 6.26.	Prądnica „idealna” (impedancja wewnętrzna pomijalnie mała) i odbiornik trójfazowy .....	401
Rys. 6.27.	Prądnica „rzeczywista” (z uwzględnieniem impedancji wewnętrznej) i odbiornik trójfazowy .....	402
Rys. 6.28.	Prądnica i odbiornik trójfazowy o charakterze indukcyjnym w postaci wektorów napięć fazowych dla fazy A.....	404
Rys. 6.29.	Prądnica i odbiornik trójfazowy o charakterze pojemnościowym częściowo kompensujący składową bierną indukcyjną (uzwojeń prądnicy) w postaci wektorów napięć fazowych dla fazy A .....	405
Rys. 6.30.	Prądnica i odbiornik trójfazowy o charakterze pojemnościowym przekompensowany w postaci wektorów napięć fazowych dla fazy A – spadek napięcia na odbiorniku (pomimo spadku napięcia na impedancji wewnętrznej prądnicy) jest większy niż SEM prądnicy.....	406
Rys. 6.31.	Przebieg zmian napięcia na zaciskach odbiorników w czasie wyładowywania energii elektrycznej pokładowej baterii akumulatorowej.....	414
Rys. 6.32.	Przebieg zmian natężenia prądu w czasie wyładowywania energii elektrycznej pokładowej baterii akumulatorowej .....	416
Rys. 6.33.	Przebieg zmian natężenia prądu w czasie wyładowywania energii elektrycznej pokładowej baterii akumulatorowej i obliczanie ubytku pojemności dla czasu trwania I etapu rozładowania (pierwsze 5 min od wystąpienia awarii) zliczanie iteracyjne z krokiem co 0,5 min.....	416
Rys. 6.34.	Przebieg zmian natężenia prądu w czasie wyładowywania energii elektrycznej pokładowej baterii akumulatorowej i obliczanie ubytku pojemności dla czasu trwania II etapu rozładowania (od 5 do 30 min od wystąpienia awarii) zliczanie iteracyjne z krokiem co 2,5 min.....	417
Rys. 6.35.	Schemat ideowy prądnicy obcowzbudnej z biegunami komutacyjnymi .....	433
Rys. 6.36.	Schemat ideowy prądnicy bocznikowej GS-12T (Su-22) z biegunami komutacyjnymi .....	433
Rys. 6.37.	Widok aksonometryczny obwodu magnetycznego prądnicy prądu stałego ...	437
Rys. 6.38.	Przekrój poprzeczny obwodu magnetycznego prądnicy prądu stałego .....	438

Rys. 6.39. Przekrój podłużny obwodu magnetycznego prądnicy prądu stałego .....	439
Rys. 6.40. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego prądnicy prądu stałego .....	442
Rys. 6.41. Charakterystyki czterech diod niskonapięciowych do zadania.....	455
Rys. 6.42. Charakterystyki czterech diod wysokonapięciowych do zadania.....	455
Rys. 6.43. Schemat sieci wysokonapięciowej do zadania nr 1 .....	460

## SPIS TABEL

Tabela 2.1.	Zestawienie częstotliwości rezonansowej dla obwodu szeregowego RLC ....	51
Tabela 3.1.	Przedziały zmian napięcia prądu przemiennego w układzie zasilania elektrycznego – parametry dopuszczalne.....	81
Tabela 3.2.	Przedziały zmian napięcia prądu przemiennego energii elektrycznej w stanie ustalonym na zaciskach odbiorników – parametry dopuszczalne ....	81
Tabela 3.3.	Przedziały zmian napięcia prądu przemiennego na zaciskach odbiorników energii elektrycznej – parametry znamionowe.....	82
Tabela 3.4.	Wartości odchyłek kąta przesunięcia fazowego.....	82
Tabela 3.5.	Wartości asymetrii napięć .....	82
Tabela 3.6.	Wartości częstotliwości prądu przemiennego dla stanu ustalonego.....	85
Tabela 3.7.	Wartości składowych modulacji częstotliwości.....	87
Tabela 3.8.	Przedziały zmian napięcia układu zasilania prądu stałego – parametry dopuszczalne .....	95
Tabela 3.9.	Przedziały zmian napięcia prądu stałego na zaciskach odbiorników energii elektrycznej – parametry znamionowe.....	95
Tabela 4.1.	Podstawowe układy połączeń uzwojeń transformatorów trójfazowych .....	210
Tabela 4.2.	Grupy połączeń transformatorów trójfazowych zalecane do pracy równoległej.....	214
Tabela 4.3.	Grupy połączeń transformatorów trójfazowych zalecane do pracy równoległej wraz z wykresami wskazowymi .....	215
Tabela 4.4.	Wartości skuteczne zakłóceń harmoniczných bloku prostowniczego WU-6A.....	234
Tabela 6.1.	Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego.....	350
Tabela 6.2.	Równoległe połączenie oporników w obwodzie prądu stałego .....	351
Tabela 6.3.	Szeregowe połączenie oporników w obwodzie prądu stałego.....	352
Tabela 6.4.	Prawa Kirchhoffa dla prądu stałego. Cz. I – jednakowe rezystancje źródeł: prądnicy i akumulatora.....	354
Tabela 6.5.	Prawa Kirchhoffa dla prądu stałego. Cz. II – dla „silnej” prądnicy i „słabej” akumulatora.....	354
Tabela 6.6.	Prawa Kirchhoffa dla prądu stałego. Cz. III – dla „słabej” prądnicy i „silnego” akumulatora.....	355

Tabela 6.7. Prawo Ohma dla cewki indukcyjnej rzeczywistej bez użycia liczb zespolonych dla częstotliwości 400 Hz.....	360
Tabela 6.8. Prawo Ohma dla cewki indukcyjnej rzeczywistej bez użycia liczb zespolonych dla częstotliwości 800 Hz.....	360
Tabela 6.9. Prawo Ohma dla cewki indukcyjnej rzeczywistej bez użycia liczb zespolonych dla częstotliwości 1600 Hz.....	361
Tabela 6.10. Prawo Ohma dla cewki indukcyjnej rzeczywistej bez użycia liczb zespolonych dla częstotliwości 4400 Hz.....	362
Tabela 6.11. Szeregowe połączenie trzech cewek indukcyjnych rzeczywistych bez użycia liczb zespolonych.....	364
Tabela 6.12. Szeregowe połączenie trzech jednakowych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 1).....	364
Tabela 6.13. Szeregowe połączenie trzech jednakowych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 2).....	365
Tabela 6.14. Szeregowe połączenie trzech jednakowych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 3).....	366
Tabela 6.15. Szeregowe połączenie trzech różnych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 1).....	366
Tabela 6.16. Szeregowe połączenie trzech różnych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 2).....	367
Tabela 6.17. Szeregowe połączenie trzech różnych cewek indukcyjnych rzeczywistych z użyciem liczb zespolonych (cz. 3).....	368
Tabela 6.18. Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego bez użycia liczb zespolonych.....	369
Tabela 6.19. Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego z zastosowaniem liczb zespolonych przy impedancji wewnętrznej i zewnętrznej o charakterze indukcyjnym o module impedancji wewnętrznej źródła równej modułowi impedancji obciążenia.....	370
Tabela 6.20. Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego z zastosowaniem liczb zespolonych przy impedancji wewnętrznej i zewnętrznej o charakterze indukcyjnym o module impedancji wewnętrznej źródła mniejszej niż moduł impedancji obciążenia.....	372
Tabela 6.21. Równoległe połączenie modułów impedancji w obwodzie prądu przemiennego.....	374
Tabela 6.22. Wartości prądów w obwodzie całkowym obciążonym odbiornikiem.....	377
Tabela 6.23. Charakterystyka częstotliwościowa impedancji kondensatora.....	378
Tabela 6.24. Zestawienie częstotliwości rezonansowej dla obwodu szeregowego RLC ..	378
Tabela 6.25. Charakterystyka transmitancji (tłumienia) filtra LC (w rozpatrywanym przypadku: obwodu całkowitego rzeczywistego) w funkcji częstotliwości.....	380
Tabela 6.26. Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmonicznnych (pasmo 720–880 Hz) dla BTP 2-pulsowego dla śmigłowców.....	386



Tabela 6.27. Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmoniczných (pasmo 600–1800 Hz) dla BTP 2-pulsowego dla samolotów.....	387
Tabela 6.28. Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmoniczných (pasmo 2160–2640 Hz) dla BTP 6-pulsowego dla śmigłowców.....	388
Tabela 6.29. Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmoniczných (pasmo 1800–5400 Hz) dla BTP 6-pulsowego dla samolotów.....	389
Tabela 6.30. Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmoniczných (pasmo 4,32–5,28 kHz) dla BTP 12-pulsowego dla śmigłowców.....	390
Tabela 6.31. Obliczenia parametrów filtrów rezonansowych zapewniających tłumienie podstawowych składowych harmoniczných (pasmo 3,6–10,8 kHz) dla BTP 12-pulsowego dla samolotów.....	391
Tabela 6.32. Obliczenia wartości względnej i bezwzględnej pulsacji prądnicz komutatorowej prądu stałego przy jej obciążeniu powyżej 100%IN.....	393
Tabela 6.33. Obliczenia wartości względnej i bezwzględnej pulsacji prądnicz komutatorowej prądu stałego przy jej obciążeniu poniżej 10%IN .....	394
Tabela 6.34. Szeregowe połączenie źródeł prądu stałego jako szczególny przypadek prawa Ohma dla obwodu zamkniętego .....	397
Tabela 6.35. Parametry nieobciążonej prądnicz trójfazowej prądu przemiennego .....	400
Tabela 6.36. Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego z zastosowaniem liczb zespolonych przy impedancji wewnętrznej i zewnętrznej o charakterze indukcyjnym, o module impedancji wewnętrznej źródła równej modułowi impedancji obciążenia dla fazy AN obwodu trójfazowego.....	408
Tabela 6.37. Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego z zastosowaniem liczb zespolonych przy impedancji wewnętrznej i zewnętrznej o charakterze indukcyjnym, o module impedancji wewnętrznej źródła równej modułowi impedancji obciążenia dla fazy BN obwodu trójfazowego .....	410
Tabela 6.38. Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego prądu przemiennego z zastosowaniem liczb zespolonych przy impedancji wewnętrznej i zewnętrznej o charakterze indukcyjnym, o module impedancji wewnętrznej źródła równej modułowi impedancji obciążenia dla fazy CN obwodu trójfazowego .....	412
Tabela 6.39. Obliczenia charakterystyki rozładowania 12-ogniowej lotniczej baterii akumulatorowej kwasowej w warunkach awaryjnego zasilania – dane .....	419
Tabela 6.40. Obliczenia charakterystyki rozładowania 12-ogniowej lotniczej baterii akumulatorowej kwasowej w warunkach awaryjnego zasilania pokładowej sieci elektroenergetycznej – wyniki obliczeń.....	421
Tabela 6.41. Zestawienie parametrów napięciowych podstawowych ogniów akumulatorowych.....	424
Tabela 6.42. Zestawienie parametrów baterii akumulatorowych .....	426

Tabela 6.43. Zestawienie parametrów lotniczych baterii akumulatorowych do celu wykonania ćwiczenia projektowego .....	429
Tabela 6.44. Zestawienie parametrów związanych z procesem kontrolnego rozładowania lotniczej baterii akumulatorowej po zdemontowaniu z SP.....	431
Tabela 6.45. Obliczenia wartości napięć i prądów w obwodzie obciążenia prądnicz komutatorowej prądu stałego obcowzbudnej.....	434
Tabela 6.46. Obliczenia wartości napięć i prądów w obwodzie obciążenia prądnicz komutatorowej prądu stałego bocznikowej.....	435
Tabela 6.47. Zestawienie parametrów obwodu magnetycznego prądnicz prądu stałego – część I.....	444
Tabela 6.48. Zestawienie parametrów obwodu magnetycznego prądnicz prądu stałego – część II .....	446
Tabela 6.49. Obliczanie SEM pojedynczej ramki zezwoju wirnika .....	451
Tabela 6.50. Obliczanie parametrów transformatora.....	453
Tabela 6.51. Obliczanie wybranych parametrów mostka Gretza oraz wybranych parametrów.....	456
Tabela 6.52. Charakterystyki diod prostowniczych zastosowanych w zadaniu .....	457
Tabela 6.53. Obliczanie masy miedzi w elektrycznej sieci kablowej jedнопrzewodowej wysokonapięciowej 270 V <sub>DC</sub> .....	462
Tabela 6.54. Obliczanie masy miedzi w elektrycznej sieci kablowej jedнопrzewodowej niskonapięciowej 28,5 V <sub>DC</sub> .....	464
Tabela 6.55. Obliczanie rezystancji żyły przewodzącej .....	468
Tabela 6.56. Obliczanie spadków napięcia w elektrycznej sieci kablowej jedнопrzewodowej wysokonapięciowej 270 V <sub>DC</sub> oraz napięć na zaciskach odbiorników energii elektrycznej 28,5 V <sub>DC</sub> , cz. 1 – obliczanie rezystancji kabli plusowych .....	469
Tabela 6.57. Obliczanie spadków napięcia w elektrycznej sieci kablowej jedнопrzewodowej wysokonapięciowej 270 V <sub>DC</sub> oraz napięć na zaciskach odbiorników energii elektrycznej 28,5 V <sub>DC</sub> , cz. 2 – obliczanie napięcia na zaciskach odbiornika.....	471
Tabela 6.58. Obliczanie spadków napięcia w elektrycznej sieci kablowej jedнопrzewodowej wysokonapięciowej 270 V <sub>DC</sub> oraz napięć na zaciskach odbiorników energii elektrycznej 28,5 V <sub>DC</sub> , cz. 1 – obliczanie rezystancji kabli plusowych .....	473
Tabela 6.59. Obliczanie spadków napięcia w elektrycznej sieci kablowej jedнопrzewodowej wysokonapięciowej 270 V <sub>DC</sub> oraz napięć na zaciskach odbiorników energii elektrycznej 28,5 V <sub>DC</sub> , cz. 2 – obliczanie rezystancji kabli plusowych .....	475