

Andrzej KSIĄŻKIEWICZ
Jerzy JANISZEWSKI

LOW VOLTAGE RELAY CONTACT RESISTANCE CHANGE INFLUENCE BY SHORT-CIRCUIT CURRENT

ZMIANA REZYSTANCJI ZESTYKOWEJ PRZEKAŹNIKÓW NISKIEGO NAPIĘCIA POD WPŁYWEM DZIAŁANIA PRĄDÓW ZWARCIOWYCH*

Electromagnetic relays are exposed to switching phenomena during its service life. These phenomena may include making of a short circuit, resulting in current flow of significant value for the relay contacts. This current influences the contacts surface and thus the value of the contact resistance, which is an important exploitation parameter for electromagnetic relays. The aim of the study is to analyze the impact of current flow of substantial value on the electric contact resistance of the relay contacts. Significant changes in the resistance after each switching cycle is observed.

Keywords: relays, contact materials, contact resistance.

Przełączniki elektromagnetyczne w trakcie swojej eksploatacji są narażone na niekorzystne zjawiska łączeniowe. Do narażeń tych można zaliczyć m.in. załączenie obwodu zwartego, co skutkuje przepływem prądu o znacznej wartości przez styki przełącznika. Przepływ tego prądu, któremu w początkowej fazie może także towarzyszyć łuk elektryczny, wpływa na stan powierzchni styków, a tym samym na wartość rezystancji zestykowej, będącej istotnym parametrem eksploatacyjnym przełączników. Celem pracy jest analiza oddziaływania procesów załączania prądu o znacznej wartości na rezystancję zestykową przełączników. Obserwowane są znaczne zmiany tej rezystancji po każdym cyklu łączeniowym.

Słowa kluczowe: przełączniki, materiały stykowe, rezystancja zestykowa.

1. Introduction

Electromagnetic relays are commonly used to connect circuitry with moderate values of the switching current (i. e. the medium current circuits) at a voltage not exceeding 1000 V. They are used inter alia as actuators in the building automation systems (eg. KNX, LCN, LonWorks) or in drivers and the programmable relays (Easy, NEED). They differ among themselves with a structure, purpose, and technical parameters. In regard to the contacts of connectors made of different materials, in literature, there are often presented results of research carried out as well in normal operation as in terms of specific exposures. These studies, however, are often focused on the low voltage (<50 V) direct current circuits [8]. Similar research were performed by Morin [16], Neuhaus [17] or Doublet [6], who independently conducted similar work for contacting materials for low voltage direct current circuits. Research related to processes of switching in circuits of medium voltage alternating current are focused on current ranges from a few to several kA [1, 9]. A noticeable is the lack of research in the field of low- and medium current AC switches at currents close to normal and short-circuit working conditions which may occur in low voltage electrical installations, that usually do not exceed 1 kA. Within the scope of modeling simulation studies are being conducted on the heating rail and contact connections with complex shapes, configurations and utilizing a variety of conductive materials [10].

Relays for connecting the receiving circuits are exposed to unfavorable processes. These phenomena may include closing overload and short-circuit currents, which may lead to shortening the life of relays or, in extreme cases, their total damage. The article describes the impact of switching short-circuit on the change of the contact re-

sistance. Relays with three different contacting materials have been investigated.

Contact resistance of the connector is the important performance parameter. It is important that during the utilisation of the relay this resistance reaches values as small as possible and simultaneously do not differed significantly in time. Among other things, associated with its heating the safe working load of the relay depends on its value [15]. The contact resistance value is dependent on [7, 14]:

- shape resistance R_k ,
- tarnish resistance R_n .

The resultant value of contact resistance (transition) is equal to:

$$R_z = R_k + R_n \quad (1)$$

The tarnish resistance R_n is difficult to determine analytically, since it depends on multiple, sometimes random, factors including: temperature, humidity, contact material. The shape resistance R_k mainly depends on the resistivity and hardness of the contact material. To its description the single-point model with elliptical, equipotential current flowlines is often used [5, 7]. The actual contact area is much smaller than the apparent (nominal) surface of the contact point. This model can be considered correct, at low contact pressure forces used in relays.

The value of the contact resistance is affected by the material used for the contact rivet. As used may be the contact points of pure metals, including copper, silver, gold, platinum, palladium, tungsten or molybdenum. More often alloys and sinters, such as silver-copper, silver-cadmium, silver-palladium, silver-cadmium oxide, silver-tungsten, silver-nickel, silver-tin oxide are used [3]. Contacts may be

(*) Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny w elektronicznym wydaniu kwartalnika na stronie www.ein.org.pl

covered with an additional layer of material with the aim of improving their certain properties (eg. resistance to material migration). Tin, silver or gold coverages are used. Coverage of the contact with the tin layer leads to a slight increase of the contact resistance relative to the uncoated material. Silver layer has the opposite effect, it reduces the contact resistance transition [19]. At present the most widely used-contact materials, in medium power low-voltage AC relays are sinters of silver with: nickel $AgNi$, cadmium oxide $AgCdO$ and tin oxide $AgSnO_2$. The properties of each materials are as follows [3, 23]:

- $AgNi$: exhibits a low material migration, is not resistant to the influence of sulfur and its compounds and is prone to oxides formation,
- $AgCdO$: sulfur-sensitive material, characterized by resistance to welding, its application promotes the process of the electric arc extinguishing, is also resistant to material migration,
- $AgSnO_2$: the material is characterized by high thermal stability and material migration resistance, characterized by a stable contact resistance transition.

Materials made as silver-metal or silver-metal oxide are generally having a high resistance to welding [21]. The frequency and strength of welding during switching increases proportionately to the value of switching current arc, while the arc burning time has no such influence [17]. The force of contact welding does not exhibit the dependence on the static contact pressure force. It is however dependent on the speed of movement of the movable contact. These considerations are valid primarily for contacts made of pure silver [17].

2. Testing set

Miniature relays, using two previously mentioned contact materials, that is, $AgNi$ and $AgSnO_2$, were subjected to research. For the later one two types of contacts, full and bimetal, have been tested. Bimetallic rivets are usually made by powder metallurgy technology or in the case of using metal oxides internal oxidation. Full rivets are often produced from the wire made of the contact material and their shape is obtained in the process of cold forging treatment. Electrical diagram of the testing set is shown in figure 1. The system is powered directly from the low voltage power network 230 V_{AC}. The circuit is protected against short circuits and overloads by circuit breakers with a rated operational current 16 A and B, C and D characteristic, and a general purpose fuse gG 16. For each protection device a single switching

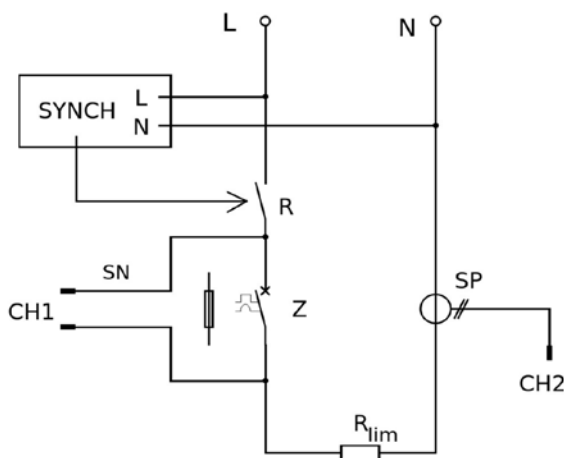


Fig. 1. Testing set electrical diagram: R – tested relay, Z – circuit protection: circuit breaker or fuse, R_{lim} – limiting resistor, SYNCH – synchronizing device, SP – current probe, SN – voltage probe, CH1, CH2 – oscilloscope channels

attempt with each of said contact material was made. By using the synchronizing device the moment of relay switching with the selected voltage phase repeatable testing conditions were obtained. As phase switching the zero crossing voltage was selected. Expected short circuit current was limited by resistor to the value of 320 A ($I_m = 453$ A). The average value of short circuit current peak for all samples was 413 A. The value lower than the expected may results from limiting it by the circuit protection device.

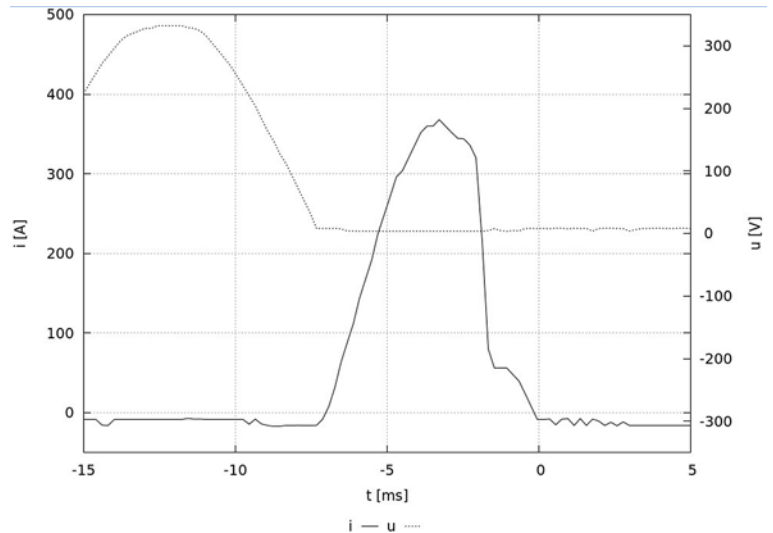


Fig. 2. The oscillogram of current intensity in the test circuit and voltage between contacts of the relay for randomly selected sample

The course of current intensity and voltage between rivets were recorded by oscilloscope using current and voltage probes. An exemplary oscillogram is shown in the figure 2. Relays were connected to the set through a dedicated switching slot. Resistance measurement was performed with four-wire Kelvin method using low resistance meter MI3252 by Metrel. For obtained results taken into account the resistance of the current paths transition of socket and relay was applied, to determine the value of searched contact resistance as closes as possible.

3. The results of measurements

Three types of relays with contacts made of the previously mentioned materials were tested. Each of them has been subjected to one switching trial. Before and after the circuit current switching test the transition resistance was measured. Attempts were performed in two ways, for relays both conditioned and not conditioned. As conditioning the author understands the mechanical processing of contacts by making a specified number of cycles (performed without electrical load). Conditioning of contacts affects the initial value of contact resistance [11]. The number of cycles for conditioning operations amounted to two thousand. For such number of cycles the contact resistance stabilization succeeded, and the differences between consecutive measurements showed little fluctuations. The tests were performed for various commonly used, overcurrent protections. Based on these results an attempt to demonstrate whether there is an additional factor that could affect the outcome was made. Average values of contact resistance for these cases, divided into relays subjected to conditioning and non-conditioned, are shown in table 1. These results do not distinguish between contact resistance values of the applied protection device because there was no such relationship in the applied test.

Changing the value of contact resistance for relays both conditioned and non-conditioned, depending on the contact material, for all tests carried out, is shown in figures 3 and 4. Contact resistance for

two cases after conditioning increased. Only for the AgNi there was a decrease of this value. This may be due to the fact that the material is characterized by the lowest value of the hardness in comparison to other (Tab. 2). Changing the structure of the contact point during switching operations, because of mechanical impact of the movable contact on the stationary one, might be possible due to the lower hardness of the material of the contact. This leads to increase of the actual contact surface area and thereby reduce the contact resistance. In other cases the opposite effect, that are loadless switching operations lead to an increase in contact resistance, was observed. Area of surface deformation of the contact point is dependent on the resistance of the material for welding. The smaller the resistance the greater the contact surface is changed [22]. The working hypothesis to explain the relationship is as follows. Unused contact point is characterized by a certain irregular surface on which micro elevations appear. These micro-elevations, upon first linking may increase the number of contact points, leading to a reduction of contact resistance. During the conditioning the contact surface of the contact point changes by mechanically removing of micro-elevations. After this operation, the surface of the contact point reaches the correct for itself target shape, for which a fair thesis becomes the single point of contact. Along with the change of the surface of the contact point changes its tarnish layer. Because the time between individual stages of research (conditioning – measurement of resistance – switching test – measurement of resistance) was as short as possible, the impact of the tarnish layers on the final result was marginal.

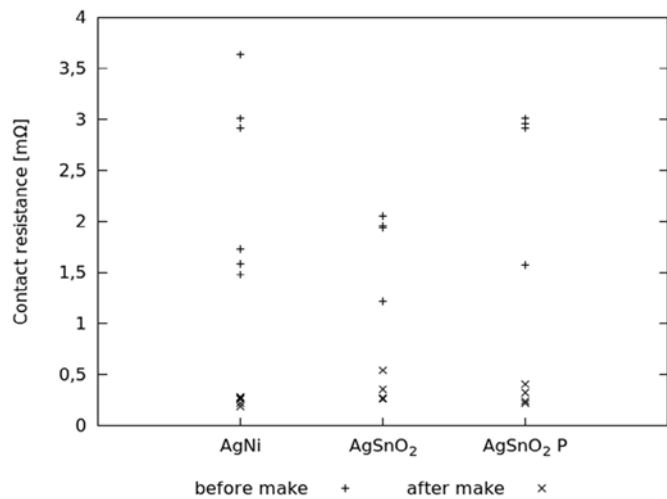


Fig. 3. Change of the contact resistance under the influence of switching the short circuit current; non-conditioned relays: P – relay with full rivets

Table 1. Average values of the conditioned and non-conditioned relays contact resistance, before and after the short circuit switch test was performed,

No.	Contact material	The average value of the contact resistance before test [mΩ]	The average value of the contact resistance after test [mΩ]
Non-conditioned relays			
1	AgNi	2,3927	0,2502
2	AgSnO ₂	1,7909	0,1262
3	AgSnO ₂ P	2,6162	0,3014
Conditioned relays			
1	AgNi	0,6252	0,3850
2	AgSnO ₂	6,4300	0,4040
3	AgSnO ₂ P	8,6381	0,2467
P – relay with full rivets			

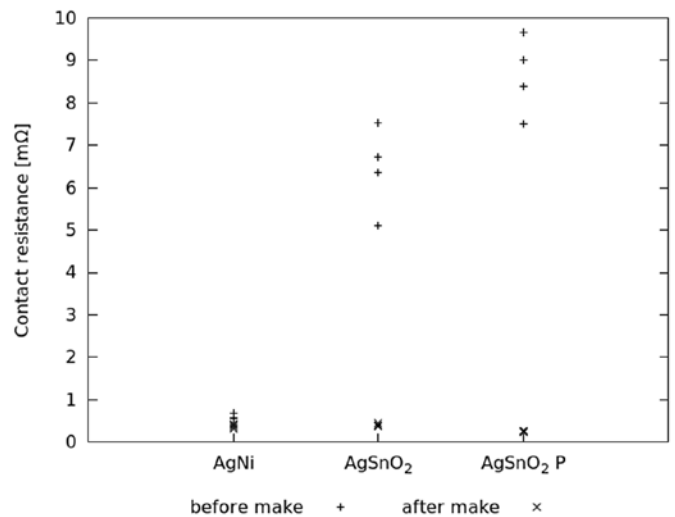


Fig. 4. Change of the contact resistance under the influence of switching the short circuit current; conditioned relays: P – relay with full rivets

Table 2. Selected properties of contact materials used in low-voltage relays [20]

Material	Density	Hardness	Thermal conductivity at 20°C	Electrical conductivity
	[kg/m ³]	[HB]	[W/K·m]	10 ⁻⁸ [Ωm]
AgNi	10 300	50	350	1,84
AgSnO ₂ / AgSnO ₂ P	9 900	70	307	2,04

From Table 1 it also follows that regardless of the initial value of the contact resistance, after attempting to switch short-circuit current, the resistance significantly decreases.

When switching the short circuit current the pre-ignition arc or contact bounce during the conduction of electricity may occur. The fact which phenomenon occurs contributes to contacts welding force [4].

Both of these phenomena affect very negatively on the condition of the contact point and lead to the appearance of the electric arc. With the increase in the value of the switching current intensity increases the loss of mass of the contact point [2, 18, 21]. In addition, the arc can lead to a strong local heating of the arc spot, even above the melting point of the contact material [12]. If at least on the surface of one of the contact points the contact material will be melted and at the same time after contact occurs, there will be welding of contacts [13]. Original contact materials' properties change when the contact area or composition of the material changes [22]. The composition can be altered by the thermal influence of current. These relationships are correct primarily for connecting currents with considerable intensity, on the order of several kilo amperes.

4. Summary

The occurrence of the short circuit current in the electrical installation is most often the result of an emergency and as such is a unconsolidated event. Based on the results of measurements it can be seen that the short circuit current switching via relay significantly affects the value of its contact resistance. For each of the registered cases there was a decrease of contact resistance values. Its low value can be considered decent, if only because of lower power losses and lower temperature rise of the contact point of the relay during normal use. Conditioning of contacts is substantially affecting the contact resistance. You can not clearly determine whether this operation will result in its increase or decrease. For contacts made of AgNi there was a decrease of this

value, whereas for both contacts performed of AgSnO_2 it increased significantly. Regardless of the initial value of contact resistance after the short circuit current switching test this resistance was significantly decreased. Knowledge of contact resistance value under normal operating conditions could be used to indirectly assess the state the contacts surface. In further studies it is expected to develop methods for assessing the state of wear of the surface on the basis of the change in contact resistance.

The research is funded under purpose subsidy for scientific research or development works and the tasks associated with it, for the development of young scientists and doctoral students at the Faculty of Electrical Engineering Poznan University of Technology No. 04/41/DSMK/4133.

References

1. Borkowski P. Arc erosion of contacts on switching high currents. Archives of Electrical Engineering 2004; 53: 259-287.
2. Borkowski P. Nowoczesne metody badań zestyków elektrycznych. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2013.
3. Celiński Z. Materiałoznawstwo elektrotechniczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2011.
4. Chen Z.K, Witter G.J. A Study of Dynamic Welding of Electrical Contacts with Emphasis on the Effects of Oxide Content for Silver Tin Indium Oxide Contacts. Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2010; 56: 1-6.
5. Ciok Z. Procesy Łączeniowe w układach elektroenergetycznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 1983.
6. Doublet L, Ben Jemaa N, Hauner F, Jeannot D. Make arc erosion and welding tendency under 42 VDC in automotive area. Proceedings of the Forty-Ninth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts; 2003:158-162.
7. Holm R. Electric Contacts. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1981
8. Kharin S.N, Sarsengeldin M. Influence of Contact Materials on Phenomena in a Short Electrical Arc. Key Engineering Materials 2012; 510-511: 321-329, <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.510-511.321>.
9. Kolimas Ł. Analysis of the making arcing time during current switching. Przegląd Elektrotechniczny 2008; 84: 72-74.
10. Kolimas Ł. Modelowanie i analiza rozptyłu temperatury w torach wieloprądowych i zestykach. Przegląd Elektrotechniczny 2014; 9: 183-186.
11. Książkiewicz A. Change of electric contact resistance of an electromagnetic relay during switching operations without electric load. 5th International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists InterTech 2012; 5: 257-260
12. Książkiewicz A, Janiszewski J. Electrical contact temperature change after short-circuit current. Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering 2014; 78: 65-70.
13. Książkiewicz A, Janiszewski J, Batura R. Influence of short-circuit AC currents on electrical contact resistance of low voltage relays. Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering 2012; 70: 99-103.
14. Kulas S. Tory prądowe i układy zestykowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2008.
15. Maksymiuk J, Pochanke Z. Obliczenia i badania diagnostyczne aparatury rozdzielczej. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2001.
16. Morin L, Jemaa N.B, Jeannot D. Make arc erosion and welding in the automotive area, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 2000; 23: 240-246, <http://dx.doi.org/10.1109/6144.846760>
17. Neuhaus A.R, Rieder W.F, Hammerschmidt M. Influence of Electrical and Mechanical Parameters on Contact Welding in Low Power Switches. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 2004; 27: 4-11, <http://dx.doi.org/10.1109/TCAPT.2004.825777>.
18. Pons F, Cherkaoui M. An electrical arc erosion model valid for high current: Vaporization and Splash Erosion. Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2008; 54: 9-14, <http://dx.doi.org/10.1109/holm.2008.ecp.15>.
19. Sawada S, Shimizu K, Hattori Y, Tamai T, Iida K. Analysis of Contact Resistance Behavior for Electric Contacts with Plating Layer. Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2010; 56: 1-8, <http://dx.doi.org/10.1109/holm.2010.5619560>.
20. Thurston M. O. Electrical Contacts. Fundamentals, Applications and Technology. Taylor & Francis Group LLC, 2007.
21. Walczuk E, Borkowski P, Książek S, Missol W, Rdzawski Z, Durst K. Evaluation of Basic Electrical Parameters of Silver-Based Contact Materials of Different Chemical Composition and Manufacturing Technology. Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2010; 56: 1-8, <http://dx.doi.org/10.1109/holm.2010.5619550>.
22. Zhenbiao L, Lichun C, Jiyan Z. The metallurgical research on contact surface deterioration of AgNi, AgW, AgFe, AgCu contact materials. Proceedings of the Forty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 1995; 41: 346-349.
23. www.repol.com.pl, 2014. Relpol. Przekazniki.

Andrzej KSIĄŻKIEWICZ

Jerzy JANISZEWSKI

Faculty of Electrical Engineering

Poznan University of Technology

Piotrowo 3a, 60-965 Poznan, Poland

E-mail: andrzej.ksiazkiewicz@put.poznan.pl,

jerzy.janiszewski@put.poznan.pl

Andrzej Książkiewicz

Jerzy Janiszewski

Wydział Elektryczny
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań
E-mail: andrzej.ksiazkiewicz@put.poznan.pl,
jerzy.janiszewski@put.poznan.pl

Faculty of Electrical Engineering
Poznan University of Technology
Piotrowo 3a, 60-965 Poznan

Zmiana rezystancji zestykowej przekaźników niskiego napięcia pod wpływem działania prądów zwarciovych

Low voltage relay contact resistance change influence by short-circuit current

Słowa kluczowe: przekaźniki, materiały stykowe, rezystancja zestykowa

Keywords: relays, contact materials, contact resistance

Streszczenie: Przekaźniki elektromagnetyczne w trakcie swojej eksploatacji są narażone na niekorzystne zjawiska łączeniowe. Do narażeń tych można zaliczyć m.in. załączenie obwodu zwartego, co skutkuje przepływem prądu o znacznej wartości przez styki przekaźnika. Przepływ tego prądu, któremu w początkowej fazie może także towarzyszyć łuk elektryczny, wpływa na stan powierzchni styków, a tym samym na wartość rezystancji zestykowej, będącej istotnym parametrem eksploatacyjnym przekaźników. Celem pracy jest analiza oddziaływania procesów załączania prądu o znacznej wartości na rezystancję zestykową przekaźników. Obserwowane są znaczne zmiany tej rezystancji po każdym cyklu łączeniowym.

Abstract: Electromagnetic relays are exposed to switching phenomena during its service life. These phenomena may include making of a short circuit, resulting in current flow of significant value for the relay contacts. This current influences the contacts surface and thus the value of the contact resistance, which is an important exploitation parameter for electromagnetic relays. The aim of the study is to analyze the impact of current flow of substantial value on the electric contact resistance of the relay contacts. Significant changes in the resistance after each switching cycle is observed.

1. Wstęp

Przekaźniki elektromagnetyczne są powszechnie stosowane w celu łączenia obwodów o umiarkowanych wartościach natężenia prądu łączeniowego (tzw. obwody średnioprądowe), przy napięciach nieprzekraczających 1000 V. Wykorzystuje się je między innymi jako elementy wykonawcze w systemach automatyki budynkowej (np. KNX, LCN, LonWorks) czy w sterownikach i przekaźnikach programowalnych (Easy, NEED). Różnią się one między sobą budową, przeznaczeniem, a także parametrami technicznymi. W odniesieniu do styków łączników, wykonanych z różnych materiałów, w literaturze często prezentowane są rezultaty badań przeprowadzonych zarówno w warunkach normalnej eksploatacji, jak i w warunkach wystąpienia szczególnych narażeń. Badania te jednak koncentrują się często na niskonapięciowych (< 50 V) obwodach prądu stałego [8]. Podobne badania wykonali Morin [16], Neuhaus [17] czy Doublet [6], którzy niezależnie od siebie prowadzili prace dla

podobnych materiałów stykowych, lecz dla obwodów niskonapięciowych o niewielkim natężeniu prądu stałego. Badania związane z procesami łączeniowymi w obwodach prądu przemiennego średniego napięcia koncentrują się na zakresach prądu od kilku do kilkunastu kA [1, 9]. Dostrzegalny jest brak badań w zakresie nisko- i średnioprądowych łączników prądu przemiennego przy prądach zbliżonych do normalnych warunków pracy oraz zwarciovych, które mogą występować w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia, nieprzekraczających zwykle 1 kA. W zakresie modelowania prowadzone są badania symulacyjne dotyczące nagrzewania połączeń szyn i zestyków o skomplikowanych kształtach, konfiguracjach i wykorzystujących różnorodne materiały przewodzące [10].

Przełączniki przeznaczone do łączenia obwodów odbiorczych narażone są na pewne niekorzystne procesy. Do zjawisk tych można zaliczyć łączenie prądów przeciążeniowych i zwarciovych, mogące prowadzić do skrócenia czasu eksploatacji przełączników bądź, w skrajnych przypadkach, ich całkowitego uszkodzenia. W artykule opisano wpływ załączenia zwartych obwodów odbiorczych na zmianę rezystancji zestykowej. Zbadane zostały przełączniki z trzema różnymi materiałami stykowymi.

Rezystancja zestykowa łącznika elektroenergetycznego jest jego istotnym parametrem eksploatacyjnym. Ważne, aby rezystancja ta w okresie eksploatacji przełącznika osiągała możliwie małe wartości, jednocześnie nie ulegała znacznym zmianom w czasie. Od jej wartości zależy między innymi dopuszczalne obciążenie robocze przełącznika, związane z jego nagrzewaniem [15]. Wartość rezystancji zestykowej zależy od [7, 14]:

- rezystancji kształtu R_k ,
- rezystancji warstw nalotowych R_n .

Wypadkowa wartość rezystancji zestyku (przejścia) jest równa:

$$R_z = R_k + R_n \quad (1)$$

Rezystancja warstw nalotowych R_n jest trudna do ustalenia analitycznie, ponieważ zależy od wielu, czasem przypadkowych, czynników, w tym od: temperatury otoczenia, wilgotności, materiału stykowego. Rezystancja kształtu R_k zależy przede wszystkim od rezystywności i twardości materiału stykowego. Do jej opisu często stosowany jest model jednopunktowy z eliptycznymi, ekwipotencjalnymi liniami rozprywu prądu [5, 7]. Rzeczywista powierzchnia styczności jest znacznie mniejsza niż pozorna (nominalna) powierzchnia styczki. Model ten można uznać za słuszny, przy niewielkich siłach docisku styków stosowanych w przełącznikach.

Na wartość rezystancji zestyku wpływ ma materiał zastosowany na styczki. Stosowane mogą być styczki z czystych metali, w tym z: miedzi, srebra, złota, platyny, palladu, wolframu czy molibdenu. Częściej korzysta się ze stopów i spieków, takich jak: srebro-miedź, srebro-kadm, srebro-pallad, srebro-tlenek kadmu, srebro-wolfram, srebro-nikiel, srebro-tlenek cyny [3]. Styczki mogą zostać pokryte dodatkową warstwą materiału, mającą na celu polepszenie ich niektórych właściwości (np. odporności na wędrowkę materiału). Stosowane są pokrycia z cyny, srebra lub złota. Pokrycie styku warstwą cyny prowadzi do nieznacznego wzrostu rezystancji zestyku w stosunku do materiału niepowleczonego. Warstwa srebra ma skutek odwrotny, zmniejsza wartość rezystancji przejścia zestyku [19]. Obecnie najczęściej stosowane materiały stykowe, w niskonapięciowych przełącznikach prądu przemiennego średniej mocy, to spieki srebra z: nikiem $AgNi$, tlenkiem kadmu $AgCdO$ i tlenkiem cyny $AgSnO_2$. Właściwości poszczególnych materiałów są następujące [3, 23]:

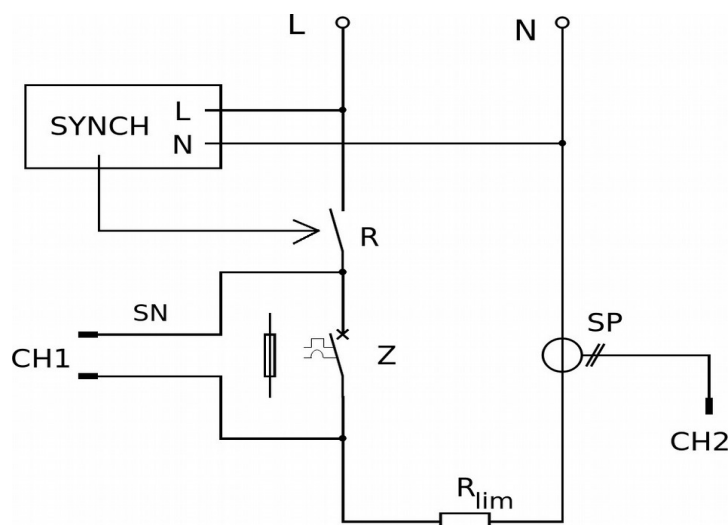
- $AgNi$: wykazuje małą wędrowkę materiału, jest nieodporny na działanie siarki i jej związków oraz jest skłonny do tworzenia tlenków,
- $AgCdO$: materiał wrażliwy na siarkę, cechuje się odpornością na spawanie, jego zastosowanie sprzyja procesowi gaszenia łuku elektrycznego, jest też odporny na wędrowkę materiału,

- $AgSnO_2$: materiał odznacza się wysoką stabilnością termiczną i odpornością na wędrówkę materiału, cechuje się stabilną rezystancją przejścia zestyku.

Materiały wykonane jako srebro-metal lub srebro-tlenek metalu z reguły wykazują wysoką odporność na szepianie [21]. Częstotliwość występowania oraz siła szepień przy załączaniu wzrasta proporcjonalnie do wartości natężenia prądu łuku załączeniowego, podczas gdy czas palenia się łuku takiego wpływu już nie ma [17]. Siła szepienia styków nie wykazuje zależności od statycznej siły docisku styków. Jest natomiast zależna od prędkości poruszania się styku ruchomego. Rozważania te są słuszne przede wszystkim dla styków wykonanych z czystego srebra [17].

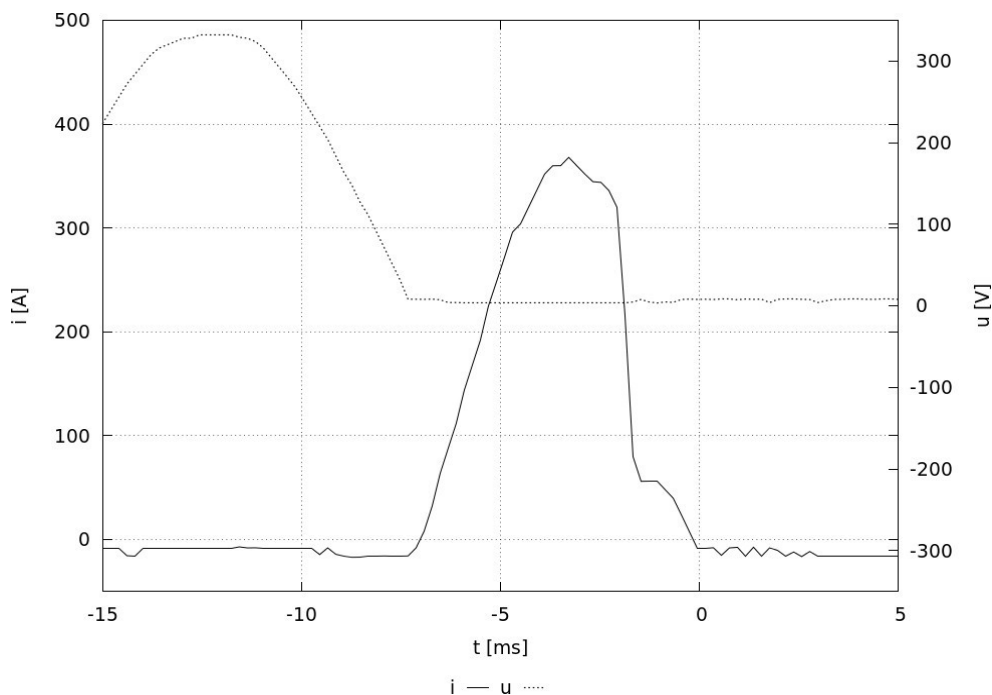
2. Układ probierczy

Badaniom zostały poddane przekaźniki miniaturowe, wykorzystujące dwa wymienione wcześniej materiały stykowe, czyli $AgNi$ i $AgSnO_2$. Dla drugiego z nich badaniom zostały poddane dwa rodzaje styków: w wykonaniu bimetalowym oraz w wykonaniu pełnym. Nity bimetalowe wykonywane są najczęściej w technologii metalurgii proszkowej lub, w przypadku wykorzystania tlenków metali, wewnętrznego utleniania. Nity pełne produkowane są najczęściej z drutów, wykonanych z danego materiału stykowego, a ich kształt uzyskiwany jest w procesach obróbki kucia na zimno. Schemat elektryczny układu probierczego przedstawiony został na rysunku 1. Układ zasilany jest bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia 230 V_{AC}. Obwód zabezpieczony jest przed skutkami zwarcia i przeciążeń poprzez wyłączniki instalacyjne o prądzie znamionowym roboczym 16 A i charakterystyce B, C oraz D, a także bezpiecznikiem ogólnego przeznaczenia gG 16. Dla każdego zabezpieczenia wykonano pojedynczą próbę łączeniową z każdym z wymienionych materiałów stykowych. Dzięki wykorzystaniu urządzenia synchronizującego moment załączenia przekaźnika z wybraną fazą napięcia uzyskano powtarzalność warunków probierczych. Jako fazę załączania wybrano przejście napięcia przez zero. Spodziewane natężenie prądu zwarciovego zostało ograniczone poprzez rezystor do wartości 320 A ($I_m = 453$ A). Średnia wartość szczytowa prądu zwarciovego dla wszystkich prób wyniosła 413 A. Wartość niższa niż spodziewana może wynikać z ograniczania jej przez aparat zabezpieczający obwód.



Rys. 1. Schemat elektryczny układu probierczego: R - badany przekaźnik, Z - zabezpieczenie obwodu: wyłącznik instalacyjny lub bezpiecznik, R_{lim} - rezystor ograniczający, SYNCH - urządzenie synchronizujące, SP - sonda prądowa, SN - sonda napięciowa, CH1, CH2 - kanały oscyloskopu

Przebieg natężenia prądu oraz napięcie między stykami rejestrowane były metodą oscyloskopową z wykorzystaniem sond prądowej i napięciowej. Przykładowy oscylogram przedstawiono na rysunku 2. Przekładniki były przyłączone do układu poprzez dedykowane gniazdo łączeniowe. Pomiar rezystancji wykonywano czteroprzewodową metodą Kelvina za pomocą miernika małych rezystancji MI3252 firmy Metrel. Do otrzymanych wyników zastosowano poprawkę uwzględniającą rezystancję przejścia torów prądowych samego gniazda oraz przekładnika, tak aby jak najdokładniej wyznaczyć wartość poszukiwanej rezystancji zestykowej.

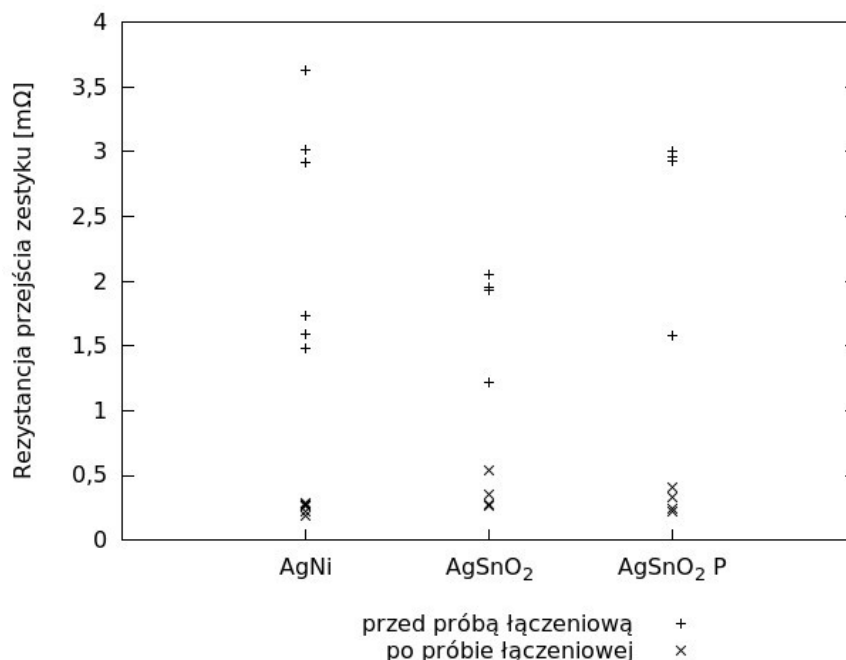


Rys. 2. Oscylogram przebiegu natężenia prądu w obwodzie probierczym i napięcia między stykami przekładnika dla losowo wybranej próby

3. Wyniki pomiarów

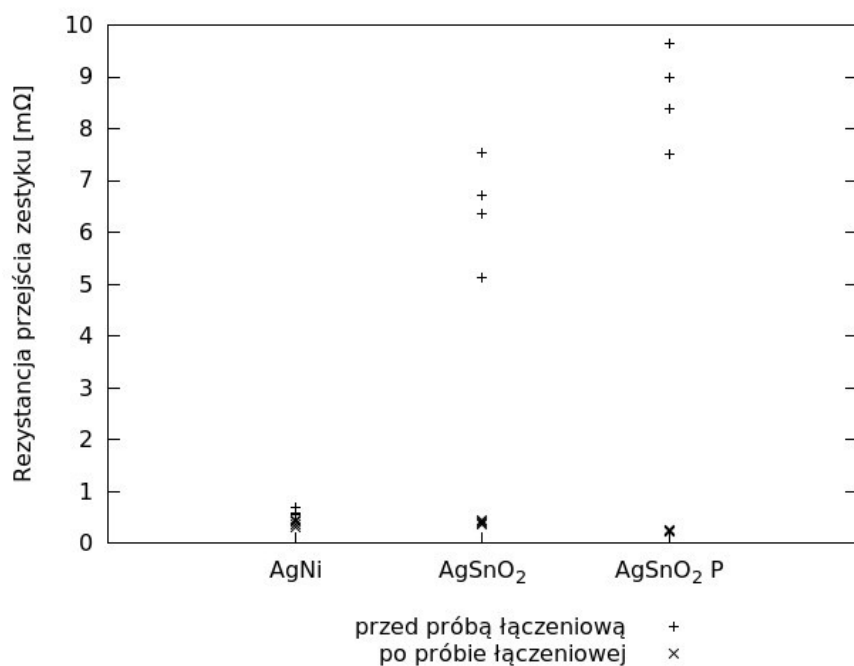
Przetestowane zostały trzy modele przekładników ze stykami wykonanymi z wcześniej wymienionych materiałów. Każdy z nich poddany był pojedynczej próbie łączeniowej. Przed oraz po przeprowadzeniu próby załączania prądu zwarciovego dokonano pomiaru rezystancji przejścia. Próby wykonano w dwójnasób, a mianowicie dla przekładników kondycjonowanych, jak i niekondycjonowanych. Pod pojęciem kondycjonowania autor rozumie mechaniczną obróbkę styków poprzez wykonanie określonej liczby cykli łączeniowych (wykonanych bez obciążenia elektrycznego). Kondycjonowanie styków wpływa na początkową wartość rezystancji zestykowej [11]. Liczba cykli łączeniowych dla operacji kondycjonowania wynosiła dwa tysiące. Dla takiej liczby cykli następowała stabilizacja wartości rezystancji zestykowej, a różnice pomiędzy kolejnymi pomiarami wykazywały niewielkie wahania. Próby wykonywane były dla różnych, stosowanych powszechnie, zabezpieczeń przetężeniowych. Na podstawie tych wyników podjęto próbę wykazania czy istnieje dodatkowy czynnik, który mógłby wpływać na wynik. Średnie wartości rezystancji zestykowej dla omawianych przypadków, z podziałem na przekładniki poddane kondycjonowaniu i niekondycjonowane, przedstawiono w tabelicy 1. Wyniki te nie rozróżniają wartości rezystancji zestykowej od zastosowanego zabezpieczenia, ponieważ w zakresie stosowanych prądów probierczych nie stwierdzono takiej zależności.

Zmiana wartości rezystancji zestykowej, dla przekaźników kondycjonowanych i niekondycjonowanych, w zależności od materiału stykowego, dla wszystkich wykonanych prób, przedstawiona została na rysunkach 3 oraz 4. Rezystancja zestykowa dla dwóch przypadków po kondycjonowaniu wzrosła. Tylko dla *AgNi* nastąpił spadek wartości tej wielkości. Wynikać to może z faktu, że materiał ten charakteryzuje się najmniejszą wartością twardości w porównaniu do pozostałych (tab. 2). Zmiana struktury powierzchni stycki podczas operacji łączeniowych, czyli mechanicznego uderzenia styku ruchomego o nieruchomy, możliwa jest ze względu na mniejszą twardość materiału stykowego. Prowadzi to do zwiększenia rzeczywistej powierzchni styku a tym samym do zmniejszenia wartości rezystancji zestykowej. W pozostałych przypadkach obserwowany efekt był odwrotny, czyli bezprądowe operacje łączeniowe prowadziły do wzrostu rezystancji zestykowej. Obszar deformacji powierzchni stycki zależy jest od odporności danego materiału na szepianie. Im mniejsza ta odporność tym większa jest zmieniona powierzchnia styku [22]. Robocza hipoteza wyjaśniająca taką zależność jest następująca. Stycka nieużywana charakteryzowana jest pewną nieregularną powierzchnią, na której pojawiają się mikrowzniesienia. Te mikrowzniesienia, przy pierwszym łączeniu, mogą zwiększyć liczbę punktów styku, co prowadzi do zmniejszenia wartości rezystancji zestykowej. Podczas kondycjonowania styków ulega zmianie powierzchnia stycki, w tym mikrowzniesienia są z niej mechanicznie usuwane. Po tej operacji powierzchnia stycki osiąga właściwy sobie docelowy kształt, dla którego słuszna staje się teza styku jednopunktowego. Razem ze zmianą powierzchni stycki ulega zmianie jej warstwa nalotowa. Ponieważ czas pomiędzy poszczególnymi etapami badania (kondycjonowanie - pomiar rezystancji - próba łączeniowa - pomiar rezystancji) był możliwie krótki, to wpływ warstwy nalotowej na końcowy wynik będzie znikomy. Z tablicy 1 wynika również, że niezależnie od początkowej wartości rezystancji zestyku, po próbie załączania prądu zwarciovego, rezystancja ta znacząco maleje.



Rys. 3. Zmiana rezystancji zestykowej pod wpływem załączania prądu zwarciovego; przekaźniki niekondycjonowane: P - przekaźnik ze stykami w wykonaniu pełnym

Przy załączaniu prądu zwarciovego może pojawić się wstępny zapłon łuku lub wystąpić odskok styków podczas przewodzenia tego prądu. To, które zjawisko wystąpi, ma wpływ na siłę szepienia styków [4].



Rys. 4. Zmiana rezystancji zestykowej pod wpływem załączania prądu zwarciovego; przekaźniki kondycjonowane: P - przekaźnik ze stykami w wykonaniu pełnym

Tab. 1. Średnie wartości rezystancji zestykowej dla przekaźników kondycjonowanych i niekondycjonowanych, przed i po wykonanej próbie załączenia obwodu zwartego

Lp.	Materiał stykowy	Średnia wartość rezystancji zestyku przed próbą [mΩ]	Średnia wartość rezystancji przejścia zestyku po próbie [mΩ]
Przekaźniki niekondycjonowane			
1	AgNi	2,3927	0,2502
2	AgSnO ₂	1,7909	0,1262
3	AgSnO ₂ P	2,6162	0,3014
Przekaźniki kondycjonowane			
1	AgNi	0,6252	0,3850
2	AgSnO ₂	6,4300	0,4040
3	AgSnO ₂ P	8,6381	0,2467
P - przekaźnik ze stykami w wykonaniu pełnym			

Tab. 2. Wybrane właściwości materiałów stykowych stosowanych w niskonapięciowych przekaźnikach [20]

Materiał	Gęstość	Twardość	Przewodność cieplna przy 20 °C	Przewodność elektryczna
	[kg/m ³]	[HB]	[W/K·m]	10 ⁻⁸ [Ωm]
AgNi	10 300	50	350	1,84
AgSnO ₂ / AgSnO ₂ P	9 900	70	307	2,04

Obydwa te zjawiska wpływają bardzo niekorzystnie na stan styczek i prowadzą do pojawienia się łuku elektrycznego. Wraz ze wzrostem wartości natężenia prądu łączeniowego wzrasta ubytek masy styczki [2, 18, 21]. Oprócz tego łuk elektryczny może prowadzić do silnego, lokalnego nagrzewania plamki łukowej, nawet powyżej temperatury topnienia materiału stykowego [12]. Jeżeli przynajmniej na powierzchni jednej styczki materiał stykowy ulegnie roztopieniu i w tym samym czasie nastąpi zetknięcie się styków, wtedy nastąpi szczepienie styków [13]. Pierwotne właściwości materiału stykowego ulegają zmianie, gdy zmieni się powierzchnia styku lub skład danego materiału [22]. Skład może ulec zmianie poprzez ciepłe oddziaływanie prądu. Zależności te są prawdziwe przede wszystkim przy łączeniu prądów o znacznym natężeniu, rzędu kilku kiloamperów.

4. Podsumowanie

Wystąpienie prądu zwarciovego w instalacji elektrycznej jest najczęściej wynikiem sytuacji awaryjnej i jako takie jest to zdarzenie jednostkowe. Na podstawie przedstawionych wyników pomiarów można zauważyć, że załączanie prądu zwarciovego przez przełącznik istotnie wpływa na wartość jego rezystancji zestykowej. Dla każdego z zarejestrowanych przypadków nastąpiło zmniejszenie wartości rezystancji zestykowej. Niska jej wartość może być uznana za porządną, chociażby ze względu na mniejsze straty mocy i mniejszy wzrost temperatury punktu styku podczas normalnej eksploatacji przełącznika. Kondycjonowanie styków wpływa w istotny sposób na rezystancję zestykową. Nie można jednoznacznie określić czy operacja ta spowoduje jej wzrost lub spadek. Dla styków wykonanych z $AgNi$ nastąpił spadek tej wartości, natomiast dla obu wykonanych styków z $AgSnO_2$ nastąpił znaczący wzrost. Niezależnie od początkowej wartości rezystancji zestykowej po wykonaniu próby załączania prądu zwarciovego rezystancja ta w sposób znaczący zmalała. Znajomość wartości rezystancji zestykowej w normalnych warunkach eksploatacyjnych mogłaby posłużyć do pośredniej oceny stanu powierzchni styków. W dalszych badaniach przewiduje się opracować metody oceny stanu zużycia tej powierzchni na podstawie stopnia zmiany rezystancji zestykowej.

Badania są finansowane w ramach dotacji celowej na prowadzenie badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nim związanych, służące rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej nr **04/41/DSMK/4133**.

Literatura

1. Borkowski P. Arc erosion of contacts on switching high currents. Archives of Electrical Engineering 2004; 53: 259-287.
2. Borkowski P. Nowoczesne metody badań zestyków elektrycznych. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2013.
3. Celiński Z. Materiałoznawstwo elektrotechniczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2011.
4. Chen Z.K, Witter G.J. A Study of Dynamic Welding of Electrical Contacts with Emphasis on the Effects of Oxide Content for Silver Tin Indium Oxide Contacts. Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2010; 56: 1-6.
5. Ciok Z. Procesy Łączeniowe w układach elektroenergetycznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 1983.

6. Doublet L, Ben Jemaa N, Hauner F, Jeannot D. Make arc erosion and welding tendency under 42 VDC in automotive area. *Proceedings of the Forty-Ninth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*; 2003:158-162.
7. Holm R. *Electric Contacts*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1981
8. Kharin S.N, Sarsengeldin M. Influence of Contact Materials on Phenomena in a Short Electrical Arc. *Key Engineering Materials* 2012; 510-511: 321-329.
9. Kolimas Ł. Analysis of the making arcing time during current switching. *Przegląd Elektrotechniczny* 2008; 84: 72-74.
10. Kolimas Ł. Modelowanie i analiza rozptyłu temperatury w torach wielkopiędowych i zestykach. *Przegląd Elektrotechniczny* 2014; 9: 183-186.
11. Książkiewicz A. Change of electric contact resistance of an electromagnetic relay during switching operations without electric load. 5th International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists InterTech 2012; 5: 257-260
12. Książkiewicz A, Janiszewski J. Electrical contact temperature change after short-circuit current. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* 2014; 78: 65–70.
13. Książkiewicz A, Janiszewski J, Batura R. Influence of short-circuit AC currents on electrical contact resistance of low voltage relays. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* 2012; 70: 99-103.
14. Kulas S. *Tory prądowe i układy zestykowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2008.
15. Maksymiuk J, Pochanke Z. *Obliczenia i badania diagnostyczne aparatury rozdzielczej*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2001.
16. Morin L, Jemaa N.B, Jeannot D. Make arc erosion and welding in the automotive area, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 2000; 23: 240-246.
17. Neuhaus A.R, Rieder W.F, Hammerschmidt M. Influence of Electrical and Mechanical Parameters on Contact Welding in Low Power Switches. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 2004; 27: 4-11.
18. Pons F, Cherkaoui M. An electrical arc erosion model valid for high current: Vaporization and Splash Erosion. *Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* 2008; 54: 9-14.
19. Sawada S, Shimizu K, Hattori Y, Tamai T, Iida K. Analysis of Contact Resistance Behavior for Electric Contacts with Plating Layer. *Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* 2010; 56: 1-8.
20. Thurston M. O. *Electrical Contacts. Fundamentals, Applications and Technology*. Taylor & Francis Group LLC, 2007.
21. Walczuk E, Borkowski P, Książek S, Missol W, Rdzawski Z, Durst K. Evaluation of Basic Electrical Parameters of Silver-Based Contact Materials of Different Chemical Composition and Manufacturing Technology. *Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* 2010; 56: 1-8.
22. Zhenbiao L, Lichun C, Jiyun Z. The metallurgical research on contact surface deterioration of AgNi, AgW, AgFe, AgCu contact materials. *Proceedings of the Forty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* 1995; 41: 346-349.
23. www.relpol.com.pl, 2014. Relpol. Przekładniki.