

Sylwia WERBIŃSKA-WOJCIECHOWSKA
Paweł ZAJĄC

USE OF DELAY-TIME CONCEPT IN MODELLING PROCESS OF TECHNICAL AND LOGISTICS SYSTEMS MAINTENANCE PERFORMANCE. CASE STUDY

ZASTOSOWANIE KONCEPCJI OPÓŹNIEŃ CZASOWYCH W PROCESIE MODELOWANIA UTRZYMANIA W STANIE ZDATNOŚCI SYSTEMÓW TECHNICZNYCH I LOGISTYCZNYCH. STUDIUM PRZYPADKU*

Article presents an overview of some recent developments in the area of modelling of technical systems' maintenance decisions with the use of delay-time concept. Thus, the literature overview from 1984-2012 in the analysed research area is given. Next, there is characterised the implementation algorithm for delay time analysis use in the area of logistic systems maintenance performance. Later, the example of methodology of using delay-time analysis implementation in the area of logistic system of ten forklifts performance analysis is investigated.

Keywords: *delay-time concept, maintenance, logistic system.*

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z modelowaniem utrzymania systemów logistycznych w stanie zdadności z wykorzystaniem koncepcji opóźnień czasowych. Przedstawiono przegląd literatury z badanego obszaru obejmujący okres 1984-2012. Następnie został omówiony algorytm postępowania w procesie implementacji koncepcji opóźnień czasowych w obszarze utrzymania w stanie zdadności systemów logistycznych. W ostatnim punkcie, został przedstawiony przykład zastosowania opracowanej metodyki do oceny niezawodności i oczekiwanych kosztów obsługiwanego dziesięciu wózków widłowych funkcjonujących w wybranym systemie.

Słowa kluczowe: *koncepcja opóźnień czasowych, utrzymanie zdadności, system logistyczny.*

Symbols used in the paper

c_b	– expected cost of repair
c_{con}	– the expected consequence costs for the supported system and its environment caused by failure occurrence in logistics system
c_i	– cost of inspection action performance
c_{ir}	– expected repair costs during the implementation of inspections
$C(T)$	– function of the expected maintenance costs of a system
$C_C(T)$	– function of the expected consequences costs for the supported system and its environment
C_{utrz}	– the total expected maintenance costs of a system in one inspection cycle
d	– time of inspection action performance
d_b	– random time of system downtime caused by its failure
$E_d(T)$	– function of system expected downtime
$E(h)$	– expected value of delay time
$F(T)$	– cumulative distribution function of the time between failures of a system
$f(T)$	– probability density function of the time between failures of a system
$f_1(T)$	– probability density function of the time to the first failure
$F_h(h)$	– cumulative distribution function of the random variable delay time h
$f_h(h)$	– probability density function of the random variable delay time h

h	– random variable for delay time
k	– constant intensity of system failures occurrence
$MTBF$	– Mean Time Between Failures
$MTTR$	– Mean Time To Repair
$P_b(T)$	– function for system downstate probability
$R(T)$	– system reliability function
T	– the time between system consecutive inspection actions performance
T_{opt}	– the optimal time between system consecutive inspection actions performance

1. Introduction

Effective performance of logistics systems/networks and supply chains requires a proper definition of e.g. time relations which occur between the system's facilities and its processes. This issue has gained particular importance over the last 30 years. On the one hand, this is connected with the increased awareness of managers regarding the need to control the operating costs of technical systems and the logistics systems that support them. On the other hand, the increased availability of methods and tools to support the modelling process provides the opportunity to study and solve new problems within the analysed scientific area [87].

The problem of time delays is typical for many physical or technical systems, and has been raised e.g. in biology, mechanics and economics [38]. Time in logistic systems is traditionally seen with respect to [10]:

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

- execution time of (internal and external) placed customer's order - specifying the time between the moment the order has been placed by the customer and its completion. In this case, the concept of time is relative to the level of supported enterprise performance as perceived by the customer,
- resource efficiency in the basic processes of the supported enterprise. For instance, in the case of manufacturing systems, the concept of time is directly related to minimizing downtime and optimizing capacity utilization,
- duration of various fundamental processes, covering the period from the time when all resources necessary to perform the process are ready for use, until the moment the result of the process has been achieved. The concept of time directly depends on the thorough identification of the process structure.

Therefore, accurate determination of the time relations in the logistic system will depend e.g. on the type of the modelled system (storage, transport, etc.), the type of operating task, the definition of the efficiency type that is essential in the system (e.g. whether one is interested in the system's efficiency within a certain time horizon), and the behaviour of the system during its downtime (whether a single failure should affect the reliability of the whole system). The basic classification of system models with a time resource, taking into account the above features, has been presented e.g. in [88, 89].

The article focuses on the issues associated with the maintenance modelling of logistics systems using *Delay Time Analysis* approach, with particular emphasis on the methodology applying the concept of delay time in practice. The second part of the article focuses on the analysis of an internal transport system of a manufacturing company in the metallurgical sector. The proposed methodology was used to assess the reliability and the expected maintenance costs of the operating forklifts.

2. Modelling of technical and logistical systems maintenance processes using delay time analysis

The papers published over the last 50 years cover a wide range of problems in the area of modelling and design of maintenance processes in technical facilities (maintenance theory). Issues often discussed in the literature regard the areas of reliability modelling or necessary supplies providing for operational processes performance of e.g. production and transportation systems (e.g. works [6, 46, 47, 65, 72, 75, 76]), or the uncertainty of operating data (e.g. works [7, 57, 93]). A basic overview of these research works was presented in one of the first articles – [62], and later developed and extended by the authors Valdez-Flores & Feldman in [74]. The importance of the tasks related to the analysed research area as well as its diversity is supported by many studies (e.g. [18, 52, 53, 54, 55, 61, 69, 77]), where the authors provide an overview of basic models of selecting an optimal maintenance strategy for both single- and multi-element systems. At the same time, papers focused to the issue of maintaining single-element systems have been analysed e.g. in [5, 36, 69, 77], and those focused on the optimization of operation processes of multi-element systems are given e.g. in [18, 34, 55, 59, 67, 71].

One of the basic tasks associated with technical systems maintenance involves inspection process implementation [18, 62]. In this area it is possible to use the delay-time concept, enabling the modelling of the consequences of the Inspection Policy implementation for technical facilities performance [23].

The presented approach, used to this day in the renewal processes theory in order to optimize the technical systems downtime caused by undetected failure (optimization of time period between consecutive inspection actions performance), has been the subject of analysis since the 1970s, e.g. by authors Christer, Waller and Whitelaw (e.g. [22, 23, 28, 29, 30, 32]). In this concept, it is assumed that the system/component failure does not occur suddenly, but is preceded by cer-

tain symptoms indicative of future damage [24]. The time between the moment u , where the first detectable signals of the forthcoming failure appear, and the moment the system is failed is called the time delay and is denoted by h [21, 24]. This issue has been investigated e.g. in the papers [43, 44, 58].

Known in the literature delay-time models can be classified into two main groups [81]:

- models for single-element systems and models for complex systems, treated as a single technical facility,
- models for multi-element systems.

This topic has been widely studied in literature, e.g. in [2, 8, 19, 20, 21, 24, 25, 48, 58, 64, 77, 78], where reviews of the literature in the area of applying the delay time concept are given, and in [43, 44, 58, 86], where attention was paid to the possibilities of using of delay time models in multi-element systems performance.

One of the first papers focused on modelling the time delay in single-element systems is [27]. In this paper, the author analyses the decision-making process of system maintenance (item replacement) based on a survey research implementation. Furthermore, in this area the authors analysed e.g. systems reliability issues (e.g. papers [4, 16, 22, 41, 94]), time delay parameter estimation problems (e.g. paper [9]), risk analyses (e.g. [82]), the implementation of semi-Markov processes (e.g. [31]), or system safety issues (e.g. [84]).

The basic delay time model for multi-element systems was presented e.g. in the papers [24, 29, 30, 82]. The basic assumptions of the model include a perfect inspection performance, independence of the operating system components, Poisson process of defects occurrence in the system, known $f_h(h)$ function, and a fixed period of inspection process d . For such assumptions, it is possible to determine the system failure probability $P_b(T)$, or a function of the expected system downtime $E_d(T)$.

Development of the mentioned model includes e.g. the assumption of a non-perfect inspection performance (e.g. [14, 21, 79, 80]) or a non-Poisson process of defect appearance in the system (e.g. [3]). Moreover, the problem of model parameters estimation has been presented (e.g. [21, 80, 81, 85]).

3. Methodology of delay time concept use in the modelling of technical and logistics systems maintenance processes performance

Literature provides many papers devoted to the application of the concept of time delays in the real-life systems performance. The main areas of model application include e.g. the production systems performance (e.g. [1, 45]), failure processes of gearboxes (e.g. [49]), modelling operation processes of: vehicle fleets (e.g. [28, 35, 40, 68]), fishing vessels (e.g. [63]) or medical equipment (e.g. [26]). An important area of potential application of the presented approach is the logistics systems performance.

The basic functions of logistics include effective and efficient management of: the flow of resources and storage of goods (raw materials, semi-finished and finished goods) and services, from their sources of origin to the place of consumption, and the information associated with the material flow in order to meet the needs and requirements of customers [91]. Therefore, in the area of business logistics, efficiency of logistics processes of actors participating in the logistics chain is based on maintaining a balance between: the increasing demand for basic and support resources, the shorter duration of the logistic tasks, and control of the costs throughout the entire chain [11, 90, 91], based on the three main logistics pillars given e.g. in [56].

At the same time, the problems of logistics can also be defined in the area of operation of technical systems [88]. Based on the basic literature on logistics engineering (e.g. [12, 13, 17]), using a systemic approach in logistics, there can be defined the logistical support sys-

tem, which according to [12, 17] is defined as *purposely organized technical system's subsystem to support its primary (operational) process performance through the integration of all activities associated with the effective and beneficial flows of material resources and the necessary information, and providing necessary for this process logistics resources (supporting equipment and control and measurement equipment)*. The presented definition refers on the one hand, to the life cycle of the system, on the other, includes both business logistics and military logistics characteristics.

The logistical considerations can be divided into two basic concepts of logistic support system reliability: upstate and its downstate, which can lead to e.g. [50]:

- disrupting or even preventing the execution of the current logistic task,
- inability to undertake new logistic tasks.

Taking into account the downstate of the support system, there should be defined a new perspective of the efficient and effective performance of the supported system, which requires analysing the logistics system inability for specific tasks performance, under certain conditions and at certain times, when a logistic request is randomly occurred in the system.

The available literature on reliability theory provides a number of papers on the subject of modelling and assessing the logistics systems performance, designed to support technical facilities that are subject to maintenance processes implementation. The developed models, however, are primarily limited to the analysis of the supply process providing the technical system with the necessary spare parts (e.g. [15]), taking into account the problem of ensuring the necessary number of repairmen and multi-echelon issues (e.g. [37, 66, 70]), without investigating the impact of the operation of other logistics elements on the supported system's reliability, dependability or availability.

Other aspects of the analysed research area, which require further analysis, regard to e.g. the area of assessment of the supply sources, inventory management problems, consideration of the storage limitations, and integration of logistic tasks with the objectives of the technical facilities maintenance strategy [51].

At the same time, over the last twenty years there has been observable an increase in interest in the issues of time management and analysis of the time relations observed in technical systems/facilities, including those involved in logistics. A review of the fundamental research issues related to the modelling of time relations in logistic chains are presented e.g. in [60].

Following this considerations and taking into account the complexity of the logistic support systems, proper modelling of their operation can be based on the delay time concept implementation. In this case, effective development of a logistics system performance model requires using appropriate methodology [45].

This problem is analysed e.g. in the paper [63], which presents an algorithm of applying the delay time concept in the operation of complex systems. Then, in [83], the authors proposed a modelling algorithm for inspection processes in multi-element systems performance, where the process of defects occurrence is of the NHPP type. Methodology of modelling time delays in production systems was discussed in [45]. The authors proposed an algorithm of maintenance optimization for the case of complex systems, which supplements the estimation of expected maintenance costs and model of expected period of downstate with the so-called model for assessing the consequences of failure (*environmental model*), which defines the effect of a malfunction of the production machine in a manufacturing company (e.g. production downtime).

The methodology of modelling the technical systems maintenance processes including the delay time concept when using the Monte Carlo simulation techniques were developed in [33]. The authors have proposed algorithms for the case of perfect/imperfect inspection and for the case of imperfect repair.

While developing the methodology for modelling the processes of technical systems maintenance, taking into account the delay time concept, it should be noted that the purpose of the model is usually to minimize the expected duration of system downtime $E_d(T)$, or the expected maintenance costs $C(T)$. At the same time, in the case of logistics systems performance, the impact of their components failures on the level of supported system performance and its environment is also important. The level of this impact can be expressed by the function of the expected logistic support system failure consequences costs $C_C(T)$. On the other hand, further considerations omit the possibility of performing a multi-criteria analysis.

The algorithm for the determination of the optimal time between the inspection actions performance T includes the following steps (Fig. 1) [33, 45, 83]:

- understanding the process of maintaining the selected system (e.g. determining the type of the involved maintenance operation, the relationship between the system's components),
- identifying the problems in the selected system operational process (e.g. long-term repair operations, frequent damage),
- preliminary definition of model assumptions (e.g. single-/multi-element system), specifying the type of operational and diagnostic data that can and should be collected in order to carry out the maintenance optimization,
- data collection and analysis – based on using subjective and objective methods,
- determining the assumptions of the model – based on the data and knowledge about the performed operational processes,
- estimating the basic parameters of the model – for example, functions $f_h(h)$ and $F_h(h)$ for the time delay parameter h , selecting the probability distribution for the time between failures or the repair time,
- defining optimization criteria – depending on the available operational data and model assumptions,
- estimating the function of the optimization criterion, designating the optimal period T ,
- determining the relationship between the expected value of the time delay parameter h and the optimal period T – in order to determine whether the delay time concept implementation allows for optimum solution obtainment (more info e.g. in [43, 44]).

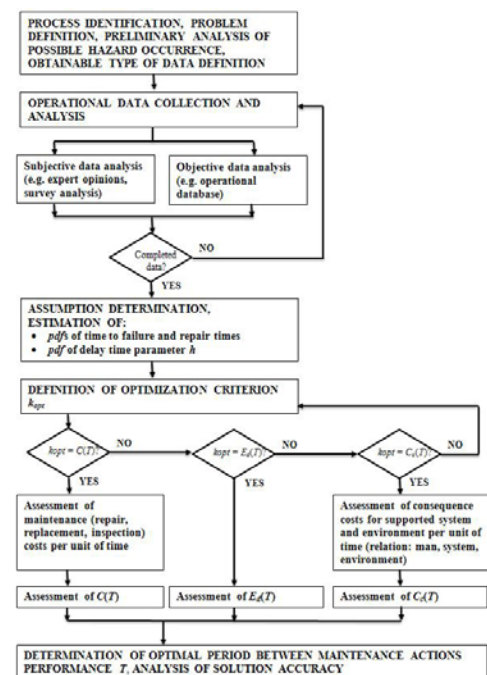


Fig. 1. The algorithm for assessment of optimal period T using the delay time concept. Own contribution based on [33, 45, 83]

One of the important issue is the method of determining the model's criterion functions. The form of the function will depend on the assumptions of the system. For example, in the case of a complex system, one of the basic models of the periodic inspection, based on the use of the delay time concept is the model of technical object periodic inspection presented in [30]. The basic assumptions of this model include:

- a) inspections are held at a fixed time T and last d time units,
- b) the cost of inspection action performance is c_i units,
- c) inspection operations are perfect, which means that all defects that can be detected during the inspection are identified,
- d) inspections are carried out independently of each other,
- e) failures are independent and occur in the system with a constant intensity k ,
- f) all defects detected during the inspection operation are removed during the inspection process,
- g) system failure lasts a short period of time d_b , compared to periods T and d ,
- h) the time delay h is independent of the failure intensity and has the known form of the functions $f_h(h)$ and $F_h(h)$.

With taking into account the assumptions defined as above, the function for system downtime probability $P_b(T)$ is given by [30]:

$$P_b(T) = \frac{1}{T} \int_0^T (T-h) f_h(h) dh \quad (1)$$

The expected downtime, defined by the function $E_d(T)$, can be described as follows [30]:

$$E_d(T) = \frac{kTd_b P_b(T) + d}{T + d} \quad (2)$$

At the same time, assuming the expected cost of repair c_b , the expected repair costs during the inspection actions performance c_{ir} , the expected maintenance cost within the period T can be described by the function $C(T)$ in the form [30, 45]:

$$C(T) = \frac{1}{(T+d)} \{kT [c_b P_b(T) + c_{ir} (1 - P_b(T))] + c_i\} \quad (3)$$

Moreover, the expected consequences costs for the supported system and its environment caused by failure occurrence in logistics system can be presented as follows:

$$C_C(T) = \frac{1}{(T+d)} \{kT c_{con} P_b(T)\} \quad (4)$$

where: c_{con} – the expected consequence costs for the supported system and its environment caused by failure occurrence in logistics system (e.g. related to the loss of life, degree of damage to the supported system, the delay in the implementation of fundamental processes, etc.)

Simulation model for multi-element systems performance with taking into account delay time concept implementation was developed e.g. in the papers [42, 43, 44].

4. Case study

In order to demonstrate the applicability of the discussed methodology for using the concept of time delays in logistic systems performance, an analysis of a manufacturing company (non-ferrous metal

smelter) was carried out. The study focused on the process of operation of forklift trucks, which are used in the manufacturing plant.

The analysed forklift trucks primarily support manufacturing processes performance, take deliveries of materials and support warehouses, where goods are stored after leaving the production line. The most important workplace for forklifts is the production line. A forklift is used in the smelter batch storehouse next to the elevator that supplies the furnace. The operator's task is to take the batch with a forklift from the ramp or the yard (according to the production requirements), insert it into the elevator, which takes the batch to the smelter. The work here is done continuously and remains uninterrupted under a three-shift work. Around 350 tons of feed material is melted during one shift. Two tracks directed to support the production work about 14 mth¹ per one shift. The working conditions are variable, as in the case of taking deliveries. Additionally, forklifts which support production often dispose of liquid material at high temperatures, reaching up to 900°C. In such instances, the temperature inside the cabin rises rapidly to about 65°C.

Another place of forklift work is the unloading ramp, where it takes batches of material delivered by rail and the yard, where supplies delivered by car fleet are stored. 4÷6 forklifts are simultaneously deployed at the railway platform to unload wagons with batches for production, which include 5÷24 metal sheets weighing about 1800 kg each. The daily delivery by rail consists of 19 wagons.

An equivalent workplace for operators working on the railway platform is the yard, where they unload trucks loaded with the same batches as railway wagons. This is where batch weighing about 2500 kg each are delivered. About 300 tons are delivered daily. Work in these areas takes place in variable and severe weather conditions. Forklifts must deal with huge overloads associated with heat, snow and frequent glaze when wheels lips are frequent. The plant is usually dusty. The situation is similar on the loading ramp, which is why forklifts have a triple filtration system and are inspected more frequently.

Apart from the main places of the work, which involve handling production and receiving supplies, forklifts carry out a number of other tasks related to the maintenance of other departments of the plant. For example, their work involves daily supply of departments with technical gases, salts and chemicals, technical materials delivered from storage, necessary for maintaining production, supplying the packing departments with steel tapes and stretch tapes, which are used to pack finished goods.

The data necessary for the reliability analysis performance include the operational and maintenance data of ten electric forklifts of the selected brand, covering the period of operation from January 2000 to February 2013. These data contain the exact information about operational performance of forklifts, durations of repairs and planned maintenance actions, identification of the items replaced and all defects that occurred during that time.

4.1. The operational process of forklifts and analysis of operational data

The routes of forklift movement are variable and depend in particular on the tasks that the forklift performs. The most frequent and regular operations include loading the furnace – production support and reception of supplies. After a short briefing at the beginning of each shift, the operator lists the equipment they collect in the so-called forklift work report. In this report, the operator makes the following entry (operator entry based on the example of forklift truck no. 4 dated

1) 1 motohour (pl. *motogodzina*) (mth) – according to the definition given by the Polish Language Dictionary PWN [39] – an hour of engine operating.

Standard unit of measurement used to assess operational time of lift pallet trucks; among others engine hours counter level is given for periodic maintenance and repair actions performance in the forklift's Maintenance Log, which according to e.g. the Act of Law of 21 December 2000 on technical supervision [73] is an obligatory for owners/users of forklifts since 18th of August, 2003.

29-10-2010); Date of collection: 29-10-2010 Shift: I, mileage at the beginning of shift: 3207 mth, condition of the truck: here, the operator inspects the equipment. If the truck is not failed, they sign the "Forklift available"; if not, they describe the malfunction or damage in the place of failure information. They then sign the report in "Equipment in use". After making such an entry in the report, the operator goes to their place of work, such as furnace loading place or unloading supplies place. The operator moves around the batch storehouse, the yard and the loading ramp, which are covered with asphalt and concrete. Work on the aforementioned date during first shift lasts from 7.00 a.m. to 3.00 p.m. The daily average limit of moto-hours worked by a forklift in these areas is approximately 7 mth. The operator, who drives back to the department at the end of their shift shall return the equipment, also making an entry in the report: they shall sign "Equipment return", enter the amount of work made – in this case 7 mth. At this stage, there should be any comments following the shift regarding the operation of the machine filled in, or if any failures were noted, the operator is required to make the entry in the "Failure" box as well. The abovementioned forklift which moves around the described routes and locations travels around 170 mth monthly. It covers as many as 2000 mth per year. During this time, the forklift truck undergoes 20 OT-1 maintenance procedures (every 100 mth), which involve the following steps:

1. purging the entire forklift truck (engine, oil coolers, water coolers),
2. inspection of all fluids,
3. replacing air filters – fuses,
4. lubricating all lubrication points in the forklift,
5. tire control,
6. control of the forklift truck's moving parts (suspension, steering system, elements of the mast and carriage),
7. checking the technical condition of the chains and carriage,
8. visual inspection of the equipment.

In addition, approximately every 500 mth, OT-2 maintenance procedures are performed. Apart from the activities performed within the framework of OT-1, these consist of the following additional steps:

1. replacement of engine oil with the oil filter,
2. replacement of all air filters.

In addition to carrying out the specified maintenance operation, at least once a year, after driving about 1700 mth, the forklift undergoes replacement of hydraulic oil (65 litres) and gear oil (15 litres). Furthermore, the truck uses two sets of front tires and four sets of rear tires. During this time, it also burns about 5500 litres of diesel.

Figures 2 and 3 illustrate the route of forklift trucks when handling the production – loading the smelter and unloading deliveries with melting batches.

Forklift truck working on the production (loading the furnace) works an average of about 6-7 mth within one shift. Maintenance staff who carry out the repair and warranty maintenance of equipment convert 1 moto hour to 100 kilometres.

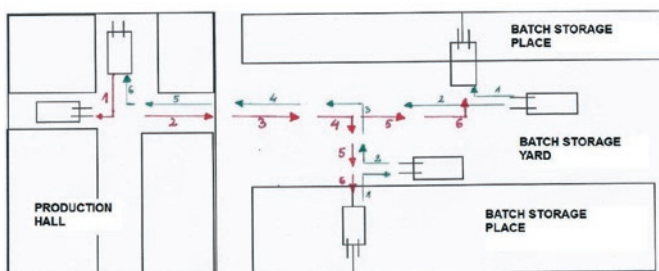


Fig. 2. Diagram of the route of the forklift loading the smelter (red line – driving of forklift for batch taken from batch storage yard, blue line – driving of forklift with batch to the melting furnace)

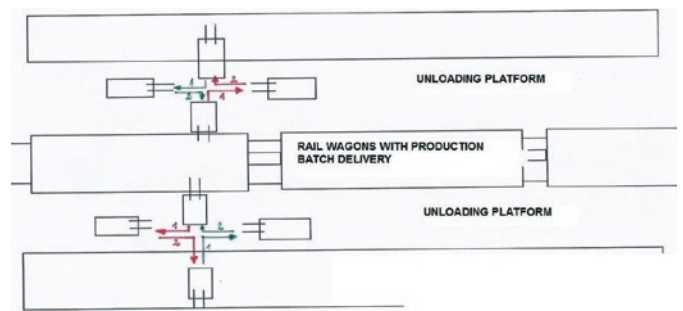


Fig. 3. Diagram of the route of the forklift working in unloading site (red line – driving of forklifts with batch taken from rail wagon to the place of batch storage, blue line – driving of forklifts for batch being on the rail wagon)

There are usually four forklifts working in the unloading site for deliveries on the unloading ramp and yard, and each of them runs approx. 5 mth during each shift.

The non-ferrous metal smelter currently has twelve 4-ton Komatsu forklifts (analysis covered ten trucks). The advantages of this type of forklift include their simple and compact design, easy handling, low failure rate, large, broad and specialized service facilities. In addition, minimal electronics in the trucks, a 5-cylinder drive unit, powered by a simple injection pump with injectors causes makes the truck extremely easy to operate and use, both for the operator and the mechanic.

The electric forklift is a repairable object, i.e. one that is subject to repair following a failure.² Reliability analysis of the test objects was carried out on the basis of the maintenance report containing information about mileage, the list of repairs and data of maintenance and repair times. Basic data obtained during the analysis of the forklift operation process has been presented in Table 1.

Table 1. Operational parameters of analysed forklifts

Forklift No.	Mileage (mth)	Number of defects	MTBF(h)	MTTR(h)
1	3685	97	38.0	5.6
2	3636	82	44.3	6.5
3	5513	100	55.1	6.3
4	7310	107	68.3	6.4
5	1876	26	72.2	5.5
7	3624	79	45.9	6.6
8	2684	51	52.6	7.3
9	4374	89	49.1	7.8
10	4990	50	99.8	6.6
11	5224	67	78.0	6.4

The study of the 10 trucks allowed for the determination of e.g. the time to first failure. The probability distribution of working time to the first failure can be described by the Weibull distribution (Fig. 4). It was also possible to determine the reliability function $R(t)$, Cumulative distribution function $F(t)$, or the probability density function of time to the truck's failure $f(t)$. The data analysis was based on the program Weibull++ v. 6 (ReliaSoft Co., USA) implementation, which allowed e.g. choosing the probability distribution of the random variable for the lifetime. It is a log-normal distribution (Fig. 5).

In the analysed time period, there were 748 defects observable in the systems of the frame and carriage body, electrical installations and equipment, hydraulic system, as well as lifting, drive, steering, and braking systems.

² As defined in the PNTTE operation dictionary [92]

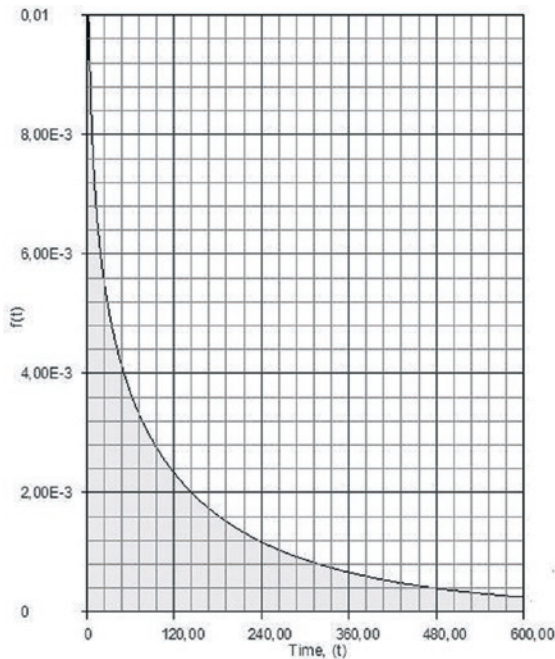


Fig. 4. Function $f_1(t)$ of the density of the probability distribution of the time to the first failure

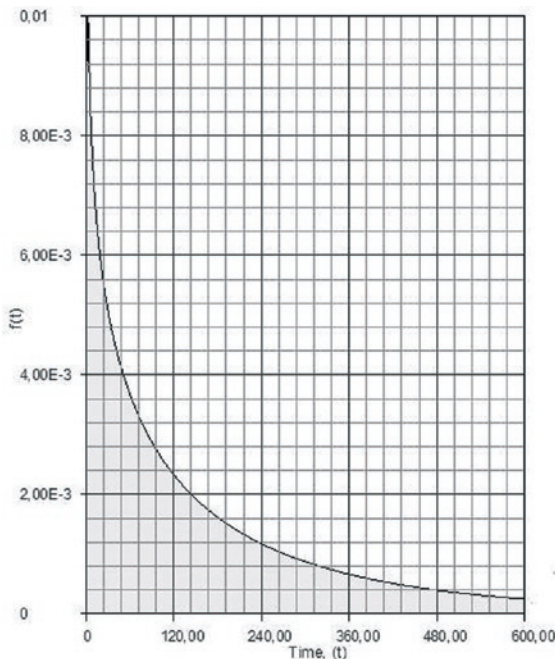


Fig. 5. Function $f(t)$ of the density of the probability distribution of the time between failures

Table 2. General operating costs of a forklift truck in 2010

The overall cost of maintaining forklift trucks in 2010 [PLN]						
Forklift:	Cost of diesel consumption	Preventive maintenance costs	Tire replacement costs	The costs of handling operations*	Salary of the mechanic / conservator	The average annual cost of maintenance:
W-4	26 413.24	3 800.00	8 573.98	7 488.60	3 000.00 PLN	49 275.82
W-6	24 975.72	4 030.00	7 524.52	7 488.60	3 000.00 PLN	47 018.84
W-10	26 356.12	3 800.00	8 573.98	7 488.60	3 000.00 PLN	49 218.70
W-11	23 309.72	3 800.00	8 573.98	7 488.60	3 000.00 PLN	46 172.30
Total:						191 685.66

* costs include e.g. periodic replacements of hydraulic oil and testing made by Office of Technical Inspections

The weak link in the analysed forklift are the elements comprising the rear suspension of the truck. This is where elements of swivel connectors wear easily, as well as parts fastening crossovers between the rear wheel and the rear twist beam axle. The noticed problem concerned the rapid wear and tear of these elements without prior warning signs of future damage – no noticeable backlash occurs prior to failure. As a result, the rapid wear of these elements usually results in breakage and crumbling of connector bearings and swivel bolts, which leads to breakdowns and equipment downtime. Another drawback of the currently used forklift trucks is the fact that they do not have cabins fitted as standard. Cabins are fitted additionally in separate plants that deal with forklift facilities. These cabins also lack air conditioning and a suitable design to facilitate the work of the operator.

4.2. Maintenance costs for forklift trucks

The next step of research analysis covered an economic analysis of the forklifts. The obtained results are shown for the four trucks of the same type, equipped with a 4-cylinder engine with a displacement of 3200 cm³ and power of 63,000 KW, working in the same areas and performing the same operational tasks: warehouse work, production support and unloading supplies. Tables 2 and 3 summarize the total operating costs in 2010 and 2011. During this period, the unit cost of OT-1 and OT-2 maintenance amounted to 230 PLN and 750 PLN. The cost of testing made by Office of Technical Inspections allowing the truck to work amounted to another 520 PLN in 2010 and 560 PLN in 2011.

The average cost per man-hour for the service department employee was estimated at 20 PLN, which allows determining the average cost of labour for repair/replacement at 130 PLN. The average cost of repairing a forklift truck has been set at 2500 PLN, and the average cost of truck maintenance (repair/replacement) during inspection action performance including man labour - at the level of 1500 PLN.

Due to the lack of data, it is impossible to estimate the cost of the consequences of damage to a forklift truck for the supported system (production system) and its environment.

4.3. Analysis of the maintenance process of forklift trucks using the delay time concept

In order to use the algorithm shown in the Section 3, it is necessary to estimate a number of parameters. Due to the inability to estimate the cost parameters including the assessment of the impact of forklifts downtime on the production process, the process of selecting the optimal period T shall be analysed, using the criterion of the expected period of system downtime and the expected maintenance costs.

The analysed system is a multi-element system. The basic parameters were estimated as follows:

- a) the inspection action performance time d was estimated at 2 h,
- b) the time required to remove the failures d_b was 6.5h (mean time of all repairs registered for the ten forklifts),
- c) the total operating time during the test period was (for 10 trucks) 42916 mth,

Table 3. General operating costs of a forklift truck in 2011

The overall cost of maintaining forklift trucks in 2011 [PLN]						
Forklift:	Cost of diesel consumption	Preventive maintenance costs	Tire replacement costs	The costs of handling operations*	Salary of the mechanic / conservator	The average annual cost of maintenance:
W-4	28 728.00	5 470.00	10 851.20	7 488.60	3 000.00	55 537.80
W-6	37 700.25	7 890.00	7 524.52	8 516.80	3 000.00	64 631.57
W-10	40 446.00	7 140.00	11 900.66	10 991.80	3 000.00	73 478.46
W-11	32 382.00	6 680.00	10 851.20	8 338.60	3 000.00	61 251.80
Total:						254 899.63

* costs include e.g. periodic replacements of hydraulic oil and testing made by Office of Technical Inspections

- d) the fixed intensity k of system failures occurrence has been set at $k = 0.017155$ per moto hour,
- e) MTBF at 58.29 mth, with standard variation of 88.24 mth.

In the present case, it is assumed that the process of the system failures is a Poisson process with a constant intensity k at 0.017155 failure/mth.

After estimating the parameter data, there should be also specified the time delay h , which is assumed to be independent of the failure intensity and has a well-known form of the function $f_h(h)$ and $F_h(h)$. In the case of the operation of the analysed technical facilities, there is no historical data about the u time moments of the occurrence of symptoms of forthcoming failures. Therefore, there is no reliable information as to which probability distribution should be used to model the time delay parameter to obtain the best results. On the other hand, based on the paper [42] it is crucial to know the expected time delay period of $E(h)$, while the probability distributions of the variable have a lesser impact on the model results. Therefore, the article focuses on the case, in which the time delay parameter is described by exponential distribution, and the probability density function is as follows:

$$f_h(h) = \lambda e^{-\lambda h} \tag{5}$$

Using the designated parameters and substituting function (1) in the equation (2), the expected system downtime $E_d(T)$ can be described as follows:

$$E_d(T) = \frac{kT \left[\frac{1}{T} \int_0^T (T-h) f_h(h) dh \right] d_b + d}{T + d} \tag{6}$$

Substituting the system parameters and the formula (5) to equation (6) will give the following:

$$E_d(T) = \frac{(0,017155T) \left[\frac{1}{T} \int_0^T (T-h) \lambda e^{-\lambda h} dh \right] 6,5 + 2}{T + 2} \tag{7}$$

Taking into account the average failure rate of λ in the equation (7) (in the analysed case, $\lambda = k = 0.017155$) the results are presented in the graph shown in Fig. 6. For this particular case, the optimal time between the consecutive inspection actions performance is 61 mth.

Then, substituting functions (1) and (5) to the formula (3), the expected maintenance costs of forklifts per time unit in the operating cycle can be described by the following formula:

$$C(T) = \frac{1}{(T+d)} \left\{ kT \left[c_{ir} + \frac{1}{T} (c_b + c_{ir}) \int_0^T (T-h) f_h(h) dh \right] + c_i \right\} \tag{8}$$

which allows reaching the following:

$$C(T) = \frac{1}{(T+2)} \left\{ 0,017155 \cdot T \left[1500 + \frac{1}{T} (2500 + 1500) \int_0^T (T-h) \lambda e^{-\lambda h} dh \right] + 250 \right\} \tag{9}$$

Figure 7 shows the cost results of the system performance. In the present case, the optimal time period T_{opt} is 45 mth, with the total expected costs of system maintenance at the level of 1 602 PLN per operating cycle ($C(45)$ equal to 35.60 PLN). In the case of leaving the optimal time period T_{opt} at 61 mth (according to the formula (7)) - the total expected maintenance costs amounted to approximately 2 531 PLN per operating cycle, which gives a nominal increase of 929 PLN (costs $C(61) = 35.88$ PLN).

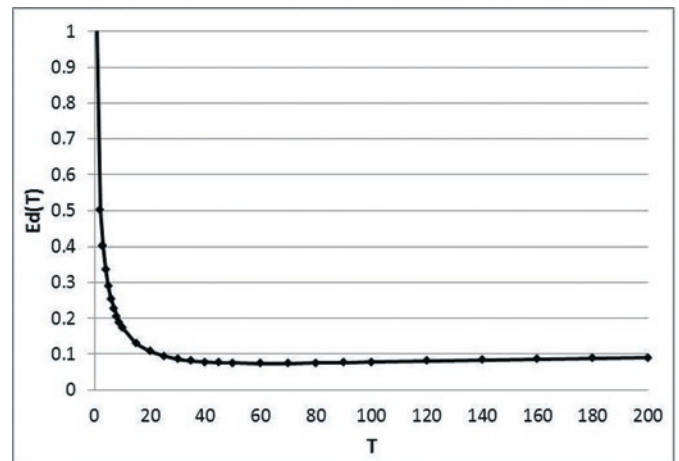


Fig. 6. Function $E_d(T)$ when the time delay parameter is described exponentially

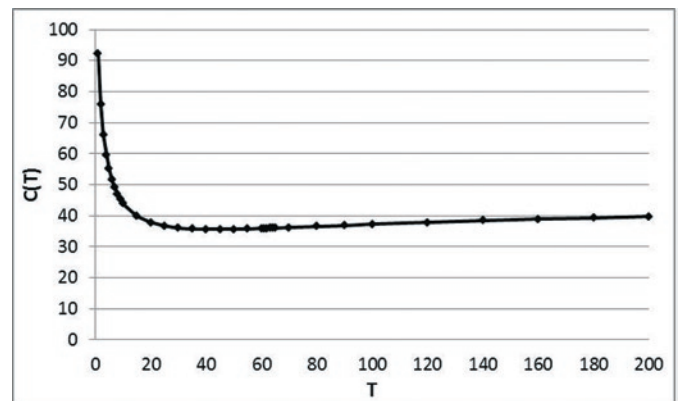


Fig. 7. Function $C(T)$ when the time delay parameter is described exponentially

4.4. Maintenance costs for forklift trucks

In order to analyse the influence of model parameters' levels changes on the level of the analysed functions $E_d(T)$ and $C(T)$, a sensitivity analysis has been conducted. In the first step, the effect of time parameters on the level of the expected period of operating forklifts downtime has been explored. One of the parameters that can affect the results of the model is the average time of system inspection d . Prolonging the period d will affect the extension of period T_{opt} and result in a higher expected period of system downtime, as shown in Table 4 and Figure 8.

The second parameter, whose effect on the level of function $E_d(T)$ was analysed, is the mean repair time d_b . The results of the analysis are shown in Table 5 and Figure 9. As expected, the shorter mean system repair time, the longer the period T_{opt} and the lower the expected period of downtime. A similar effect is obtained when extending the mean time between failures, but in this case the changes are almost imperceptible – extending MTBF by nearly 100% extends the T_{opt} by only 9 mth (Table 6).

Table 4. The sensitivity analysis of function $E_d(T)$ to changes in the mean period of system inspection d

d [h]	T_{opt} [mth]	$E_d(T_{opt})$
1	40	0.055939
2	61	0.074431
3	80	0.086954
4	100	0.096334
5	140	0.103483
6	180	0.109056

Table 5. The sensitivity analysis of function $E_d(T)$ to changes in the mean repair time d_b

d_b [h]	T_{opt} [mth]	$E_d(T_{opt})$
3	120	0.046513
4	90	0.055834
5	80	0.063951
6	65	0.071084
6.5	61	0.074431
7	60	0.077679
8	52	0.083695
9	50	0.089396
10	45	0.094662

Table 6. The sensitivity analysis of function $E_d(T)$ to changes in the mean time between failures

MTBF [h]	T_{opt} [h]	$E_d(T_{opt})$
40	55	0.086446
45	58	0.082585
50	58	0.079197
58.29	61	0.074431
65	63	0.071165
70	64	0.069003
80	65	0.065251
100	70	0.059305

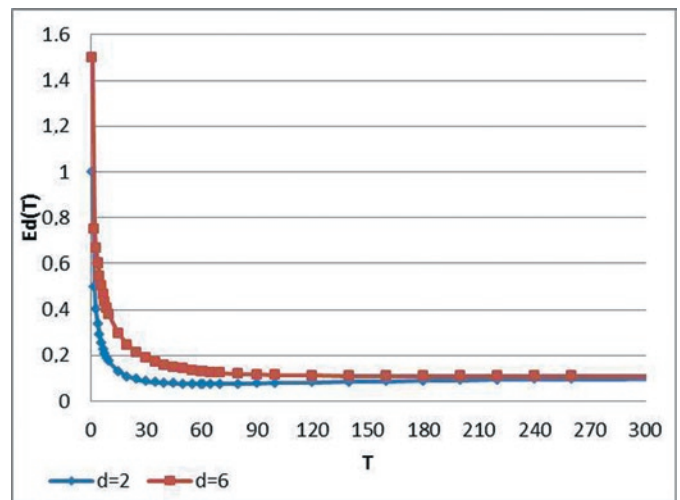


Fig. 8. Function $E_d(T)$ upon changing the mean duration of system inspection d

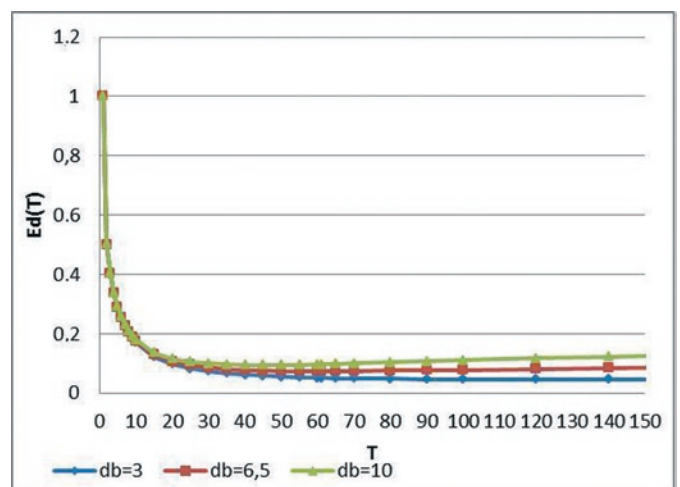


Fig. 9. Function $E_d(T)$ upon changing the mean repair time d_b

In the second part of the analysis, the effect of economic parameters on the level of the expected system maintenance costs per time unit $C(T)$ has been explored. The evaluation analysis includes the change in the mean cost c_i , mean cost c_{ir} , and mean cost c_b .

As shown in Table 7 and in Figure 10, the increase of mean cost c_i to the level of costs of preventive inspections allowing forklift operation, the optimal period T_{opt} has been increased by 100% while changing the expected maintenance costs per time unit by approximately 5 PLN (and changing the total expected cost of system maintenance per operating cycle by more than 2 000 PLN).

In accordance with the opinion of experts, in the case of assessing the change in the average cost c_{ir} , the mean value of this cost in the long term is rather expected to decrease. This in turn will result in shortening an optimal of the period T_{opt} (Table 8, Figure 11).

The last analysed parameter is the average cost of system repair c_b . In the event of forklift trucks failure occurrence, the operations involve the replacement/repair of items such as rod ends, actuators, or computers, where the repair costs far outweigh the amount of 2 500 PLN. On the other hand, there are many repairs whose cost does not exceed 1 000 PLN. Therefore, the change in the cost has been estimated at -500 PLN to +1 000 PLN relative to the base level of this input parameter (Table 9, Figure 12). As expected, the more expensive the repair operation, the shorter the period T should be. If the expected cost of repair increase to 3 500 PLN, there is a noticeable shortening of the optimal period T_{opt} by 33%, which will reduce the total expected costs of maintaining the system in the operational cycle

to around 1 200 PLN with an expected cost per time unit at 39.97 PLN (an increase by 4.17 PLN/mth).

Table 7. The sensitivity analysis of function $C(T)$ to changes in the mean cost of system inspection c_i

c_i [PLN]	T_{opt} [mth]	$C(T_{opt})$ [PLN]	C_{utrz} [PLN]
130	25	32.21	805.32
250	45	35.59	1601.77
400	70	38.24	2677.08
560	90	40.22	3619.85

Table 8. The sensitivity analysis of function $C(T)$ to changes in the mean cost of system repair performed during inspection action c_{ir}

c_{ir} [PLN]	T_{opt} [mth]	$C(T_{opt})$ [PLN]	C_{utrz} [PLN]
1000	35	29.62	1036.88
1500	45	35.59	1601.78
2000	70	41.03	2871.84

Table 9. The sensitivity analysis of function $C(T)$ to changes in the mean cost of system repair c_b

c_b [PLN]	T_{opt} [mth]	$C(T_{opt})$ [PLN]	C_{utrz} [PLN]
2000	70	32.54	2277.96
2500	45	35.59	1601.78
3000	35	37.88	1325.80
3500	30	39.78	1193.46

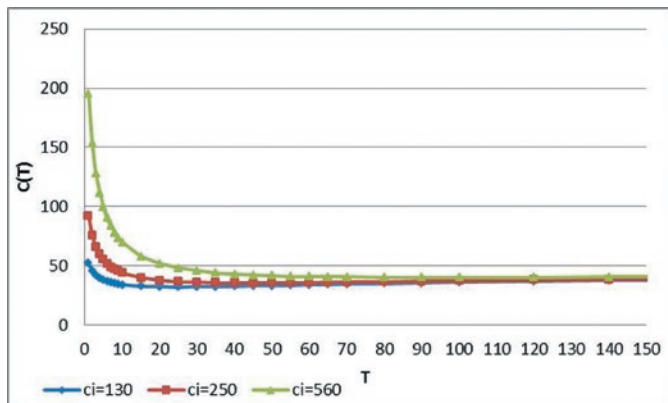


Fig. 10. Function $C(T)$ upon changing the mean cost of system inspection c_i

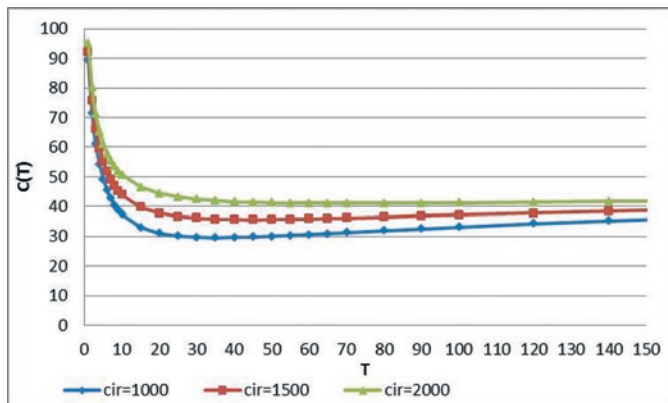


Fig. 11. Function $C(T)$ upon changing the mean cost of repair made during system inspection action performance c_{ir}

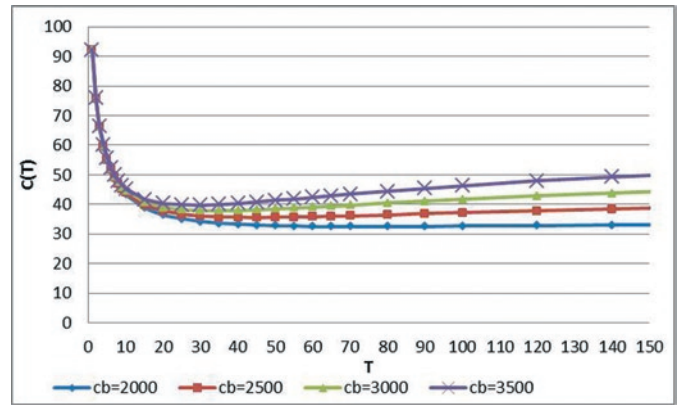


Fig. 12. Function $C(T)$ upon changing the mean cost of facility repairs c_b

5. Summary

Analysis and proper selection of maintenance strategies for logistic support systems is one of the most important aspects discussed in literature. In the present case, the lack of reliability in the forklifts' operational tasks performance would have prevented the proper performance of the metallurgical plant, which would expose the company to significant financial losses due to e.g. production downtime.

In the present case, there have been applied the algorithm for the selection of the optimal period T_{opt} for the operation of forklift trucks in the selected production system. Under the adopted assumptions the optimal period T_{opt} has been determined at 61 mth, taking into account the criterion of expected period of downtime $E_d(T)$, and at 45 mth when considering the economic criterion $C(T)$. However, the lack of data made it impossible to analyse the optimization of the period T with consideration of the criterion of the expected consequence costs of the forklift failure. Therefore, future research directions should expand the presented analysis by a third evaluation process following the collection of the necessary operational and economic data.

Meanwhile, in the present case, the optimal period T_{opt} , equal to 61 mth, assuming a three-shift work system, and an average of 7 mth worked per shift, means that the period of inspection is approximately 3 days. Taking into account the working conditions of forklift trucks, this approximation appears to be credible.

The article focuses on presenting the applicability of the delay time concept to determine the optimal interval between inspections performance. The proposed methodology can be supportive for managers in their decision-making process, including determining the proper operational time of technical objects. This article is a continuation of work on the issue related to delay time modelling for multi-element systems, as presented in the papers [20, 30, 31, 38]. In their research work, the authors will focus in subsequent steps on identifying the opportunities for the application of delay time models to assess the performance of real-life technical systems (e.g. consideration of imperfect inspections), or the development of mathematical models for multi-element systems with time delays. This will allow defining the fundamental principles of selecting a preventive maintenance policy from the point of view of the person managing the operation of the technical system.

Acknowledgments

Authors are appreciate reviewer for his valuable comments that have helped us to improve the paper.

References

1. Akbarov A., Christer A. I. H., Wang W. Problem identification in maintenance modelling: a case study. *International Journal of Production Research* 2008; 46(4): 1031-1046, <http://dx.doi.org/10.1080/00207540600960708>.
2. Alzubaidi H. J. Maintenance modelling of a major hospital complex. PhD thesis. Salford: University of Salford, 1993.
3. Ascher H. E., Kobbacy K. A. H. Modelling preventive maintenance for deteriorating repairable systems. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 1995; 6: 85-99.
4. Attia A. F. Estimation of the reliability function using the delay-time models. *Microelectronics Reliability* 1997; 37(2): 323-327, [http://dx.doi.org/10.1016/S0026-2714\(96\)00012-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0026-2714(96)00012-1).
5. Aven T., Dekker, R. A useful framework for optimal replacement models. *Reliability Engineering and System Safety* 1997; 58(1): 61-67, [http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320\(97\)00055-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320(97)00055-0).
6. Babiarz B. An introduction to the assessment of reliability of the heat supply systems. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2006; 83(4): 230-235, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.02.002>.
7. Bajda A., Wrażeń M., Laskowski D. Diagnostics the quality of data transfer in the management of crisis situation. *Electrical Review* 2011;87(9A): 72-78.
8. Baker R. D., Christer A. H. Review of delay-time OR modelling of engineering aspects of maintenance. *European Journal of Operational Research* 1994; 73: 407-422, [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90234-8](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(94)90234-8).
9. Baker R. D., Wang W. Estimating the delay-time distribution of faults in repairable machinery from failure data. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 1992; 3: 259-281.
10. Bartezzaghi E., Spina G., Verganti R. Lead-time models of business processes. *International Journal of Operations and Production Management* 1994; 14(5): 5-20, <http://dx.doi.org/10.1108/01443579410056768>.
11. Beamon B. M. Supply chain Design and Analysis: Models and Methods. *International Journal of Production Economics* 1998; 55(3): 281-294, [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00079-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00079-6).
12. Blanchard B. S. Logistics engineering and management. Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River, 2004.
13. Blanchard B. S. Logistics Requirements: Established From The Beginning. *SOLETech* 2002; 5.1: 1-6.
14. Cai J., Zhu L. A delay-time model with imperfect inspection for aircraft structure subject to a finite time horizon. *Proc. of IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services* 2011. 15-8 Sept. 2011, Nanjing, China, <http://dx.doi.org/10.1109/GSIS.2011.6044102>.
15. Catuneanu V. M., Moldovan C., Popentin, Fl., Gheorghin M. Optimum system availability and spare allocation. *Microelectronic Reliability* 1988; 28(3): 353-357, [http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714\(88\)90388-5](http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714(88)90388-5).
16. Cerone P. On a simplified delay time model of reliability of equipment subject to inspection monitoring. *Journal of the Operational Research Society* 1991; 42(6): 505-511, <http://dx.doi.org/10.1038/sj/jors/0420607>, <http://dx.doi.org/10.1057/jors.1991.98>, <http://dx.doi.org/10.2307/2583457>.
17. Chaberek M. Makro- i mikroekonomiczne aspekty wsparcia logistycznego. Wyd. U.G.: Gdańsk, 2002.
18. Cho I. D., Parlar M. A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research* 1991; 51: 1-23, [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(91\)90141-H](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(91)90141-H).
19. Choi K-M. Semi-Markov and Delay Time Models of Maintenance. PhD thesis. Salford: University of Salford, 1997.
20. Christer A. H. A Review of Delay Time Analysis for Modelling Plant Maintenance. in: *Stochastic Models in Reliability and Maintenance*, Osaki S. (ed.), Berlin Heidelberg: Springer, 2002, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-24808-8_4.
21. Christer A. H. Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance. *Journal of the Operational Research Society* 1999; 50: 1120-1137, <http://dx.doi.org/10.2307/3010083>, <http://dx.doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600837>.
22. Christer A. H. Delay-time model of reliability of equipment subject to inspection monitoring. *Journal of the Operational Research Society* 1987; 38(4): 329-334, <http://dx.doi.org/10.2307/2582056>, <http://dx.doi.org/10.1057/jors.1987.54>.
23. Christer A. H. Modelling inspection policies for building maintenance. *Journal of the Operational Research Society* 1982; 33: 723-732, <http://dx.doi.org/10.2307/2634320>, <http://dx.doi.org/10.1057/jors.1982.161>.
24. Christer A. H., Redmond D. F. Revising models of maintenance and inspection. *International Journal of Production Economics* 1992; 24: 227-234, [http://dx.doi.org/10.1016/0925-5273\(92\)90134-S](http://dx.doi.org/10.1016/0925-5273(92)90134-S).
25. Christer A. H., Redmond D. F. A recent mathematical development in maintenance theory. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry* 1990; 2: 97-108.
26. Christer A. H., Scarf P. A. A robust replacement model with applications to medical equipment. *Journal of the Operational Research Society* 1994; 45(3): 261-275, <http://dx.doi.org/10.2307/2584160>, <http://dx.doi.org/10.1057/jors.1994.39>.
27. Christer A. H., Waller W. M. A Descriptive model of capital plant replacement. *Journal of the Operational Research Society* 1987; 38(6): 473-477, <http://dx.doi.org/10.1057/jors.1987.84>, <http://dx.doi.org/10.2307/2582760>.
28. Christer A. H., Waller W. M. An operational research approach to planned maintenance: modelling P.M. for a vehicle fleet. *Journal of the Operational Research Society* 1984; 35(11): 967-984, <http://dx.doi.org/10.1057/jors.1984.193>, <http://dx.doi.org/10.2307/2582454>.
29. Christer A. H., Waller W. M. Reducing production downtime using delay-time analysis. *Journal of the Operational Research Society* 1984; 35(6): 499-512, <http://dx.doi.org/10.1057/jors.1984.103>, <http://dx.doi.org/10.2307/2581797>.
30. Christer A. H., Waller W. M. Delay Time Models of Industrial Inspection Maintenance Problems. *Journal of the Operational Research Society* 1984; 35(5): 401-406, <http://dx.doi.org/10.1057/jors.1984.80>, <http://dx.doi.org/10.2307/2581368>.
31. Christer A.H., Wang W., Choi K., Van der Duyn Schouten F. A. The robustness of the semi-Markov and delay time single-component inspection models to the Markov assumption. *IMA Journal of Management Mathematics* 2001; 12: 75-88, <http://dx.doi.org/10.1093/imaman/12.1.75>.
32. Christer A. H., Whitelaw J. An operational research approach to breakdown maintenance: problem recognition. *Journal of the Operational Research Society* 1983; 34(11): 1041-1052, <http://dx.doi.org/10.2307/2581013>, <http://dx.doi.org/10.1057/jors.1983.235>.
33. Cunningham A., Wang W., Zio E., Allanson D., Wall A., Wang J. Application of Delay-time Analysis via Monte Carlo Simulation. *Journal of Marine Engineering and Technology* 2011; 10(3): 57-72.

34. Dekker R., Roelvink I. F. K. Marginal cost criteria for preventive replacement of a group of components. *European Journal of Operational Research* 1995; 84: 467-480, [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0346-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0346-Y).
35. Desa M. I., Christer A. H. Modelling in the absence of data: a case study of fleet maintenance in a developing country. *Journal of the Operational Research Society* 2001; 52: 247-260, <http://dx.doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601107>.
36. Frostig E. Comparison of maintenance policies with monotone failure rate distributions. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 2003; 19: 51-65, <http://dx.doi.org/10.1002/asmb.485>.
37. Gross D., Pinkus C. E. Designing a support system for repairable items. *Computers & Operations Research* 1979; 6: 59-68, [http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548\(79\)90017-0](http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548(79)90017-0).
38. Hennet J-C., Tarbouriech S. Stability conditions of constrained delay systems via positive invariance. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 1998; 8: 265-278, [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1239\(199803\)8:3<265::AID-RNC311>3.3.CO;2-#](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1239(199803)8:3<265::AID-RNC311>3.3.CO;2-#), [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1239\(199803\)8:3<265::AID-RNC311>3.0.CO;2-8](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1239(199803)8:3<265::AID-RNC311>3.0.CO;2-8), <http://sjp.pwn.pl/sjp/motogodzina;2484786> (dostęp: 15.12.2014r.).
39. Jardine A. K. S., Hassounah M. I. An optimal vehicle-fleet inspection schedule. *Journal of the Operational Research Society* 1990; 41(9): 791-799, <http://dx.doi.org/10.1057/jors.1990.116>, <http://dx.doi.org/10.2307/2583494>.
40. Jia X., Christer A. H. A periodic testing model for a preparedness system with a defective state. *IMA Journal of Management Mathematics* 2002; 13: 39-49, <http://dx.doi.org/10.1093/imaman/13.1.39>.
41. Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S. Analysis of maintenance models' parameters estimation for technical systems with delay time. *Eksplatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2014; 16(2): 288-294.
42. Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S. Economical effectiveness of Delay Time approach using in Time-Based maintenance modelling. Proc. of PSAM 11 & ESREL 2012 Conference, 25-29 June 2012, Helsinki, Finland.
43. Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S. Analysis of Block-Inspection Policy parameters from economical and availability point of view. Proc. of PSAM 11 & ESREL 2012 Conference, 25-29 June 2012, Helsinki, Finland.
44. Jones B., Jenkinson I., Wang J. Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry. *Reliability Engineering and System Safety* 2009; 94: 111-124, <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2007.12.005>.
45. Kierzkowski A. Reliability models of transportation system of low cost airlines. In: *Reliability, risk and safety: back to the future*. Ale B. J. M., Papazoglou J. A., Zio E., Raton, B (eds). CRC Press: London 2010.
46. Kierzkowski A., Kowalski M., Magott J., Nowakowski T. Maintenance process optimization for low-cost airlines. Proc. of PSAM 11 & ESREL 2012 Conference, 25-29 June 2012, Helsinki, Finland.
47. Lee C. Applications of delay time theory to maintenance practice of complex plant. PhD work. T.I.M.E. Research Institute. Salford: University of Salford, 1999.
48. Leung F., Kit-leung M. Using delay-time analysis to study the maintenance problem of gearboxes. *International Journal of Operations & Production Management* 1996; 16(12): 98-105, <http://dx.doi.org/10.1108/01443579610151779>.
49. Lewitowicz J. Risk in logistics (in Polish). *Logistyka* 2007; 5: 1-6.
50. Melo M. T., Nikel S., Saldanha da Gama F.: Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers & Operations Research* 2005; 33(1): 181-208, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2004.07.005>.
51. Młyńczak M., Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S. Technical systems maintenance models classification (in Polish). In: *Technical systems maintenance problems, monograph (in Polish)*. Siergiejczyk M. (ed.) Warsaw: Warsaw University of Technology Publishing House, 2014.
52. Nakagawa T. A summary of discrete replacement policies. *European Journal of Operational Research* 1984; 17: 382-392, [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(84\)90134-6](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(84)90134-6).
53. Nicolai R. P., Dekker R. A review of multi-component maintenance models. Proc. of European Safety and Reliability Conference ESREL 2007, eds. Aven, T. & Vinnem, J.E., Leiden: CRC Press/Balkema: 289-296.
54. Nicolai R. P., Dekker R. Optimal maintenance of multicomponent systems: a review. *Economic Institute Report* 2006.
55. Nowakowski T. Analysis of modern trends of logistics technology development. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2011; 11(3):699-706, [http://dx.doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60110-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60110-1).
56. Nowakowski T. Problems with analyzing operational data uncertainty. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2010; 10(3): 95-109. [http://dx.doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60139-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60139-3),
57. Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S. Developments of time dependencies modeling concepts, *Advances in safety, reliability and risk management*. Proc. of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2011, Troyes, France, 18-22 September 2011. Leiden: CRC Press/Balkema: 832-838.
58. Nowakowski T., Werbińska S. On problems of multicomponent system maintenance modeling. *International Journal of Automation and Computing* 2009; 6(4): 364-378, <http://dx.doi.org/10.1007/s11633-009-0364-4>.
59. Nowakowski T., Werbińska S. Chosen problems of logistic chain performance assessment (in Polish). In: *Chosen issues of applied logistics (in Polish)*. Bukowski L. (ed). Krakow: Publ. House of AGH University Science of Technology, 2009.
60. Pham H., Wang H. Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research* 1996; 94: 425-438, [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(96\)00099-9](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(96)00099-9), [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00099-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00099-9).
61. Pierskalla W. P., Voelker J. A. A survey of maintenance models: the control and surveillance of deteriorating systems. *Naval Research Logistics Quarterly* 1976; 23: 353-388, <http://dx.doi.org/10.1002/nav.3800230302>.
62. Pillay A., Wang J., Wall A. D., Ruxton T. A maintenance study of fishing vessel equipment using delay-time analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 2001; 7(2): 118-127, <http://dx.doi.org/10.1108/13552510110397421>.
63. Redmond D. F. Delay Time Analysis in Maintenance. PhD thesis. Salford: University of Salford, 1997.
64. Restel F. J. Train punctuality model for a selected part of railway transportation system. Proc. of 22nd Annual Conference on European Safety and Reliability ESREL 2013. 29 September-02 October 2013, Amsterdam, the Netherlands, 2014.
65. Sarkar J. Li F. Limiting average availability of a system supported by several spares and several repair facilities. *Statistics and Probability Letters* 2006; 76: 1965-1974, <http://dx.doi.org/10.1016/j.spl.2006.04.046>.
66. Scarf P. A. On the application of mathematical models in maintenance. *European Journal of Operational Research* 1997; 99: 493-506, <http://>

- dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00316-5.
67. Scarf P. A., Bouamra O. On the application of a capital replacement model for a mixed fleet. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 1995; 6: 39-52.
 68. Sherif Y. S. Reliability analysis: Optimal inspection & maintenance schedules of failing equipment. *Microelectronics and Reliability* 1982; 22(1): 59-115, [http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714\(82\)90051-8](http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714(82)90051-8).
 69. Subramanian R., Natarajan R. An n-unit standby redundant system with r repair facilities and preventive maintenance. *Microelectronics Reliability* 1982; 22(3): 367-377, [http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714\(82\)90011-7](http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714(82)90011-7).
 70. Thomas L. C. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems. *Reliability Engineering* 1986; 16: 297-309, [http://dx.doi.org/10.1016/0143-8174\(86\)90099-5](http://dx.doi.org/10.1016/0143-8174(86)90099-5).
 71. Tomaszek H., Jaształ M., Zieja M. Application of the Paris formula with $M=2$ and the variable load spectrum to a simplified method for evaluation of reliability and fatigue life demonstrated by aircraft components. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15(4): 297-303.
 72. Ustawa z dnia 21 grudnia 2000 r. o dozorcze technicznym (the Act of Law of 21 December 2000 on technical supervision).
 73. Valdez-Flores C., Feldman R. A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. *Naval Research Logistics* 1989; 36: 419-446, [http://dx.doi.org/10.1002/1520-6750\(198908\)36:4<419::AID-NAV3220360407>3.0.CO;2-5](http://dx.doi.org/10.1002/1520-6750(198908)36:4<419::AID-NAV3220360407>3.0.CO;2-5).
 74. Valis D., Koucky M., Zak L. On approaches for non-direct determination of system deterioration. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2012; 14(1): 33-41.
 75. Valis D., Zak L., Pokora O. Engine residual technical life estimation based on tribo data. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16(2): 203-210.
 76. Wang H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research* 2002; 139: 469-489, [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00197-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00197-7).
 77. Wang W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modeling. *Reliability Engineering and System Safety* 2012; 106: 165-178, <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2012.04.004>.
 78. Wang W. Modeling planned maintenance with non-homogeneous defect arrivals and variable probability of defect identification. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2010; 2: 73-78.
 79. Wang W. Delay time modelling for optimized inspection intervals of production plant. In: *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Ben-Daya, M., Duffuaa, S. O., Raouf, A., Knezevic, J., Ait-Kadi, D. (eds.). London: Springer, 2009, http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84882-472-0_19.
 80. Wang W. Delay time modelling. In: *Complex system maintenance handbook*. Kobbacy, A. H., Prabhakar Murthy, D. N. (eds.). London: Springer, 2008, http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7_14.
 81. Wang W. A delay time based approach for risk analysis of maintenance activities. *Journal of the Safety and Reliability Society* 2003; 23(1): 103-113.
 82. Wang W., Christer A. H. Solution algorithms for a nonhomogeneous multi-component inspection model. *Computers & Operations Research* 2003; 30: 19-34, [http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548\(01\)00074-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00074-0).
 83. Wang W., Christer A. H. A modelling procedure to optimize component safety inspection over a finite time horizon. *International Quality and Reliability Engineering* 1997; 13: 217-224, [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1638\(199707\)13:4<217::AID-QRE107>3.3.CO;2-G](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1638(199707)13:4<217::AID-QRE107>3.3.CO;2-G), [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1638\(199707\)13:4<217::AID-QRE107>3.0.CO;2-P](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1638(199707)13:4<217::AID-QRE107>3.0.CO;2-P).
 84. Wen-yua LV, Wang W. Modelling preventive maintenance of production plant given estimated PM data and actual failure times. *Proc. of International Conference on Management Science and Engineering* 2006, 5-7 October 2006, Lille.
 85. Werbińska-Wojciechowska S. Problems of logistics systems modelling with the use of DTA approach. *Logistics and Transport* 2012; 2: 63-74.
 86. Werbińska-Wojciechowska S. Modelling of time relations in production systems (in Polish). *Logistyka* 2010; 2: 1-10.
 87. Werbińska S. Model of logistic support for means of transport operational system performance (in Polish). PhD. Thesis. Wrocław: Wrocław University of Technology, 2008.
 88. Werbińska S. Reliability model for logistic support system with time relations (in Polish). *Logistyka* 2007; 3: 1-12.
 89. Witkowski K., Kiba-Janiak M., Seniuk S. Map of Logistics processes as a part of creating an enterprise supply chain in the metallurgical company. *Proc. of 21st International Conference on Metallurgy and Materials*, 23-25 May, 2012, Brno Czech Republic.
 90. www.cscmp.org (dostęp: 20.10.2014r.).
 91. www.eksploatacja.waw.pl/index.php.php?s=4000 (dostęp: 20.10.2014r.).
 92. Zajac M., Kierzkowski A. Uncertainty assessment in semi Markov methods for Weibull functions distributions. In: *Advances in Safety, Reliability and Risk Management – Proc. of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2011*. 18-22 September 2011, Troyes France.
 93. Zhao J., Chan A. H. C., Roberts C., Madelin K. B. Reliability evaluation and optimisation of imperfect inspections for a component with multi-defects. *Reliability Engineering and Systems Safety* 2007; 92: 65-73, <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2005.11.003>.

Sylwia WERBIŃSKA-WOJCIECHOWSKA

Paweł ZAJĄC

Faculty of Mechanical Engineering

Department of Operation of Logistic Systems, Transportation
Systems and Hydraulic Systems

Wrocław University of Technology

ul. Wybrzeże Wyspińskiego 27, 50-370, Wrocław, Poland

e-mail: sylwia.werbinska@pwr.edu.pl, pawel.zajac@pwr.edu.pl

Sylwia Werbińska-Wojciechowska, Paweł Zajac

Wydział Mechaniczny, Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych
Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, Polska
e-mail: sylwia.werbinska@pwr.edu.pl, pawel.zajac@pwr.edu.pl

Zastosowanie koncepcji opóźnień czasowych w procesie modelowania utrzymania w stanie zdatności systemów technicznych i logistycznych. Studium przypadku.

Słowa Kluczowe: koncepcja opóźnień czasowych, utrzymanie zdatności, system logistyczny

Abstrakt: W artykule przedstawiono zagadnienia związane z modelowaniem utrzymania systemów logistycznych w stanie zdatności z wykorzystaniem koncepcji opóźnień czasowych. Przedstawiono przegląd literatury z badanego obszaru obejmujący okres 1984-2012. Następnie został omówiony algorytm postępowania w procesie implementacji koncepcji opóźnień czasowych w obszarze utrzymania w stanie zdatności systemów logistycznych. W ostatnim punkcie, został przedstawiony przykład zastosowania opracowanej metodyki do oceny niezawodności i oczekiwanych kosztów obsługiwanego dziesięciu wózków widłowych funkcjonujących w wybranym systemie.

Symbole wykorzystane w pracy:

- c_b – oczekiwany koszt naprawy
- c_{con} – oczekiwane koszty konsekwencji dla systemu wspieranego i otoczenia, wywołane pojawieniem się uszkodzenia systemu logistycznego
- c_i – koszt realizacji operacji kontroli stanu systemu
- c_{ir} – oczekiwany koszt naprawy realizowanej podczas operacji kontroli stanu systemu
- $C(T)$ – funkcja oczekiwanych kosztów utrzymania systemu
- $C_C(T)$ – funkcja oczekiwanych kosztów konsekwencji pojawienia się uszkodzenia dla systemu wspieranego i otoczenia
- C_{utr} – całkowite oczekiwane koszty utrzymania systemu w cyklu obsługiwanego
- d – czas realizacji operacji kontroli stanu systemu
- d_b – losowy czas niezdatności systemu w wyniku jego uszkodzenia
- $E_d(T)$ – funkcja oczekiwanego czasu niezdatności systemu
- $E(h)$ – oczekiwana wartość opóźnienia czasowego
- $F(T)$ – funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas poprawnej pracy systemu
- $f(T)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas poprawnej pracy systemu
- $f_1(T)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa opisująca czas do pierwszego uszkodzenia systemu
- $F_h(h)$ – funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej opóźnienie czasowe h

$f_h(h)$	– funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej opóźnienie czasowe h
h	– zmienna losowa opisująca opóźnienie czasowe
k	– stała intensywność pojawiania się uszkodzeń w systemie
$MTBF$	– (ang. <i>Mean Time Between Failures</i>) średni czas między uszkodzeniami systemu
$MTTR$	– (ang. <i>Mean Time To Repair</i>) średni czas naprawy systemu
$P_b(T)$	– funkcja prawdopodobieństwa pojawienia się uszkodzenia systemu
$R(T)$	– funkcja niezawodności systemu
T	– okres między realizacją kolejnych operacji kontroli stanu systemu
T_{opt}	– optymalny okres między realizacją kolejnych operacji kontroli stanu systemu

1. Wprowadzenie

Efektywne funkcjonowanie systemów/sieci logistycznych czy łańcuchów dostaw wymaga poprawnego zdefiniowania m.in. relacji czasowych, występujących pomiędzy obiektami systemu i jego procesami. Problem ten nabrał szczególnego znaczenia na przestrzeni ostatnich 30 lat. Związane jest to z jednej strony ze wzrostem świadomości kadry zarządzającej odnośnie konieczności kontroli kosztów eksploatacji systemów technicznych oraz systemów logistycznych je wspierających. Z drugiej strony, większa dostępność metod i narzędzi wspierających procesy modelowania zapewnia możliwość badania i rozwiązywania nowych problemów z analizowanego obszaru naukowego [87].

Problem opóźnień czasowych charakteryzuje wiele fizycznych czy technicznych systemów i poruszany jest m.in. w biologii, mechanice czy ekonomii [38]. Czas w systemach logistycznych tradycyjnie postrzegany jest w odniesieniu do [10]:

- czasu realizacji zamówienia klienta (wewnętrznego oraz zewnętrznego) – określającego czas od chwili złożenia zamówienia przez klienta, do chwili jego pełnej realizacji. W tym przypadku koncepcja czasu jest odniesiona do poziomu funkcjonowania przedsiębiorstwa wspieranego postrzeganego przez klienta;
- efektywności wykorzystania zasobów w procesach podstawowych przedsiębiorstwa wspieranego. Przykładowo w przypadku systemów produkcyjnych koncepcja czasu jest bezpośrednio powiązana z minimalizacją czasów przestoju oraz optymalizacją wykorzystania mocy produkcyjnych;
- czasu trwania poszczególnych procesów podstawowych, obejmującego okres od chwili, kiedy wszystkie zasoby niezbędne do realizacji procesu są gotowe do wykorzystania, do chwili uzyskania efektu przeprowadzonego procesu. Koncepcja czasu bezpośrednio uzależniona jest od dokładności przeprowadzonej identyfikacji struktury procesu.

W związku z tym, prawidłowe określenie relacji czasowych w systemie logistycznym będzie zależało m.in. od rodzaju modelowanego systemu (magazynowy, transportowy, itp.), rodzaju zadania operacyjnego, definicji typu wydajności, jaki jest istotny w systemie (np. czy interesująca jest wydajność systemu w pewnym horyzoncie czasowym), oraz zachowania się systemu w chwili uszkodzenia (czy pojedyncze uszkodzenie powinno wpływać na niezawodność systemu). Podstawowa klasyfikacja modeli systemów z rezerwą czasową wraz z niezbędnymi informacjami, uwzględniająca wymienione cechy, została przedstawiona m.in. w pracach [88, 89].

W artykule skupiono się na przedstawieniu zagadnienia związanego z modelowaniem utrzymania w stanie zdatowności systemów logistycznych z wykorzystaniem analizy opóźnień czasowych (ang. *Delay Time Analysis*), ze szczególnym uwzględnieniem metodyki zastosowania koncepcji opóźnień czasowych (ang. *Delay Time concept*) w praktyce. W

drugiej części artykułu skupiono się na analizie systemu transportu bliskiego przedsiębiorstwa produkcyjnego z sektora metalurgicznego. Zastosowano proponowaną metodykę do oceny niezawodności i oczekiwanych kosztów eksploatacji pracujących wózków widłowych.

2. Modelowanie procesów utrzymania systemów technicznych i logistycznych z wykorzystaniem analizy opóźnień czasowych

Prace opublikowane na przestrzeni ostatnich 50. lat obejmują szeroki zakres problemów z obszaru modelowania i projektowania procesów utrzymania w stanie zdatności obiektów technicznych (ang. *maintenance theory*). Zagadnienia często poruszane w literaturze dotyczą obszaru modelowania niezawodności czy zapewnienia niezbędnych materiałów eksploatacyjnych w procesach eksploatacji m.in. systemów produkcyjnych, transportowych (np. prace [6, 46, 47, 65, 72, 75, 76]), czy niepewności danych eksploatacyjnych (np. prace [7, 57, 93]). Podstawowy przegląd tych prac został przedstawiony w jednym z pierwszych artykułów - [62], a następnie rozwinięty przez autorów Valdez-Flores & Feldman w [74]. Wagę zadań związanych z analizowanym obszarem badawczym oraz jego zróżnicowanie potwierdza szereg opracowań (m.in. [18, 52, 53, 54, 55, 61, 69, 77]), gdzie autorzy przedstawiają przegląd podstawowych modeli doboru optymalnej strategii obsługi systemów jedno- i wieloelementowych. Jednocześnie prace poświęcone zagadnieniu utrzymania w stanie zdatności systemów jednoelementowych są analizowane m.in. w [5, 36, 69, 77], natomiast optymalizacji procesów obsługi systemów wieloelementowych m.in. w [18, 34, 55, 59, 67, 71].

Jednym z podstawowych zadań związanych z utrzymaniem w stanie zdatności funkcjonalnej i zadaniowej obiektów technicznych jest proces kontroli stanu tych obiektów (ang. *Inspection process*) [18, 62]. W tym obszarze możliwe jest wykorzystanie koncepcji opóźnień czasowych, umożliwiającej modelowanie konsekwencji zastosowania polityki kontroli stanu systemu (ang. *Inspection Policy*) dla obiektów technicznych [23].

Dane podejście, wykorzystywane do dnia dzisiejszego w teorii procesów odnowy, w celu optymalizacji czasu niezdatności systemu technicznego spowodowanego nie wykrytym w porę jego uszkodzeniem (optymalizacja okresu pomiędzy kolejnymi przeglądami), od lat 70. XX w. jest przedmiotem analiz m.in. autorów Christer, Waller i Whitelaw (np. [22, 23, 28, 29, 30, 32]). W koncepcji tej, zakłada się iż uszkodzenie systemu/elementu nie następuje w sposób skokowy, lecz jest poprzedzone pojawieniem się pewnych symptomów świadczących o przyszłym uszkodzeniu [24]. Okres czasu od chwili u , w której pojawiają się pierwsze wykrywalne w trakcie przeglądu okresowego sygnały o pojawiającym się uszkodzeniu, do chwili uszkodzenia się systemu nazywany jest opóźnieniem czasowym i oznaczany przez h [21, 24]. Rozwinięcie danego zagadnienia można znaleźć m.in. w pracach [43, 44, 58].

Znane w literaturze modele opóźnień czasowych (ang. *Delay-time models*) można podzielić na dwie główne grupy [81]:

- modele dla systemów jednoelementowych oraz modele dla systemów złożonych (*complex systems*), traktowanych jako jeden obiekt techniczny;
- modele dla systemów wieloelementowych.

Temat ten jest szeroko analizowany w literaturze, m.in. w pracach [2, 8, 19, 20, 21, 24, 25, 48, 58, 64, 77, 78], gdzie przedstawiono przegląd literatury z obszaru zastosowania koncepcji opóźnień czasowych, oraz w pracach [43, 44, 58, 86], gdzie skupiono się na możliwościach stosowania modeli opóźnień czasowych w systemach wieloelementowych.

Jedną z pierwszych prac poświęconych modelowaniu opóźnień czasowych systemów jednoelementowych jest [27]. W pracy tej autor analizuje proces podejmowania decyzji w obszarze obsługiwanego systemu (wymiana elementu na nowy) w oparciu o badania ankietowe. Ponadto, w tym obszarze autorzy analizowali m.in. problemy nieuszkodzalności systemów (np. prace [4, 16, 22, 41, 94]), estymacji parametru opóźnienia czasowego (np. praca [9]), analizy ryzyka (np. [82]), implementacji procesów semi-Markova (np. [31]), czy bezpieczeństwa procesu kontroli stanu systemu (np. [84]).

Podstawowy model opóźnień czasowych dla systemów wieloelementowych został przedstawiony m.in. w pracach [24, 29, 30, 82]. Podstawowe założenia modelu obejmują perfekcyjny proces kontroli stanu systemu, niezależność funkcjonujących elementów systemu, proces Poissonowski pojawiania się defektów w systemie, znaną funkcję $f_h(h)$, oraz stały okres d kontroli stanu systemu. Dla tak przyjętych założeń, możliwe jest wyznaczenie prawdopodobieństwa uszkodzenia systemu $P_b(T)$, czy funkcji oczekiwanego czasu niezdatności systemu $E_d(T)$.

Rozwinięcie danego modelu obejmuje m.in. założenie o nie perfekcyjnej kontroli stanów systemu (np. [14, 21, 79, 80]), czy nie Poissonowski proces pojawiania się defektów w systemie (np. [3]). Ponadto, analizowany jest problem estymacji parametrów modelu (np. [21, 80, 81, 85]).

3. Metodyka zastosowania koncepcji opóźnień czasowych w procesie modelowania utrzymania w stanie zdatności systemów technicznych i logistycznych

W literaturze można znaleźć wiele prac poświęconych zastosowaniu koncepcji opóźnień czasowych w obszarze funkcjonowania systemów rzeczywistych. Podstawowe obszary aplikacji modeli obejmują m.in. procesy obsługiwanego systemu produkcyjnych (np. [1, 45]), procesy uszkodzeń skrzyni biegów autobusów (np. [49]), modelowania procesów obsługiwanego systemu: floty pojazdów (np. [28, 35, 40, 68]), statków rybackich (np. [63]), czy sprzętu medycznego (np. [26]). Ważnym obszarem potencjalnego zastosowania danego podejścia jest również funkcjonowanie systemów logistycznych.

Podstawowe funkcje logistyki obejmują skuteczne, wydajne i efektywne zarządzanie: przepływem zasobów i magazynowaniem dóbr (surowców, materiałów, półwyrobów i wyrobów gotowych) i usług, od źródeł ich pochodzenia do miejsca konsumpcji, oraz informacji, związanej z tym przepływem w celu zaspokojenia potrzeb i wymagań klientów [91]. W związku z tym, w obszarze logistyki przedsiębiorstwa efektywność procesów logistycznych podmiotów uczestniczących w łańcuchu logistycznym polega na utrzymaniu równowagi pomiędzy: wzrostem popytu na zasoby podstawowe i wspierające, coraz krótszym czasem realizacji zadań logistycznych a kontrolą kosztów w całym łańcuchu [11, 90, 91] w oparciu o trzy filary logistyki przedstawione m.in. w [56].

Jednocześnie, problemy logistyki można także zdefiniować w obszarze funkcjonowania systemów technicznych [88]. Realizacja procesu eksploatacji obiektu technicznego wymaga uwzględnienia funkcji wspierających przyjętego łańcucha logistycznego. Opierając się na podstawowej literaturze z zakresu inżynierii logistycznej (np. [12, 13, 17]), przy zastosowaniu podejścia systemowego w logistyce, można zdefiniować system wsparcia logistycznego, który wg [12, 17] jest określany jako *celowo zorganizowany podsystem systemu technicznego, wspierający jego proces podstawowy (eksploatacji) poprzez integrację wszystkich działań, związanych z efektywnym i korzystnym przepływem niezbędnych zasobów rzeczowych i informacyjnych oraz wspierający obsługę procesu eksploatacji w zakresie zapewnienia koniecznego dla tego procesu zaplecza logistycznego (wyposażenia wspierającego i kontrolno-pomiarowego)*. Przedstawiona definicja odnosi się z

jednej strony do cyklu istnienia systemu, a z drugiej strony obejmuje zarówno cechy logistyki przedsiębiorstwa jak i logistyki wojskowej.

W rozważaniach logistycznych wyróżnić można dwa podstawowe pojęcia dotyczące stanów niezawodnościowych systemu wsparcia logistycznego: zdalny do zrealizowania zadań, jakie stawia się systemowi logistycznemu oraz stan niezdatności, który może doprowadzić do, np. [50]:

- zakłócenia lub wręcz uniemożliwienia podjęcia realizacji bieżącego zadania logistycznego,
- niezdatności do podjęcia realizacji nowych zadań logistycznych.

Uwzględnienie stanu zawodności systemu wspierającego definiuje nowe spojrzenie na sprawne i efektywne funkcjonowanie systemu podstawowego, które wymaga przeanalizowania zdolności systemu logistycznego do realizacji określonych zadań, w określonych warunkach i w określonym czasie, kiedy losowo do systemu zostanie zgłoszona potrzeba logistyczna.

W dostępnej literaturze teorii niezawodności można znaleźć szereg prac, dotyczących zagadnienia modelowania i oceny poziomu funkcjonowania systemów logistycznych, projektowanych dla wsparcia obiektów technicznych podlegających procesom obsługi. Opracowane modele ograniczone są jednak przede wszystkim do analizy procesu zaopatrzenia systemu technicznego w niezbędne części wymienne (np. [15]) przy uwzględnieniu problemu zapewnienia niezbędnej liczby stanowisk obsługi/ekip remontowych (np. [37, 66, 70]) nie badając wpływu funkcjonowania innych elementów logistycznych na poziom niezawodności systemu wspieranego.

Inne zagadnienia omawianego obszaru, które wymagają dalszej analizy można wyróżnić m.in. w obszarze oceny źródeł dostaw, problemów zarządzania zapasami, uwzględnienia ograniczeń składowania zapasów oraz integracji zadań logistycznych z celami strategii obsługi obiektów technicznych [51].

Jednocześnie, na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat można zaobserwować wyraźny wzrost zainteresowania zagadnieniami zarządzania czasem czy analizy relacji czasowych występujących w systemach/obiektach technicznych, również w logistycznych. Przegląd podstawowych problemów badawczych związanych z modelowaniem relacji czasowych łańcuchów logistycznych przedstawiono m.in. w pracy [60].

Mając na względzie powyższe oraz biorąc pod uwagę stopień złożoności systemów wsparcia logistycznego, prawidłowe modelowanie procesów ich funkcjonowania może być oparte o wykorzystanie koncepcji opóźnień czasowych. W takim przypadku, efektywne opracowanie modelu obsługi systemu logistycznego wymaga zastosowania odpowiedniej metody postępowania [45].

Problem ten analizowany jest m.in. w pracy [63], gdzie przedstawiono algorytm zastosowania koncepcji opóźnień czasowych w obszarze funkcjonowania systemów złożonych. Następnie w pracy [83] autorzy zaproponowali algorytm modelowania procesu kontroli stanu systemów wieloelementowych, w których proces pojawiania się defektów jest typu NHPP. Metodyka modelowania opóźnień czasowych w systemach produkcyjnych została z kolei omówiona w pracy [45]. Autorzy zaproponowali algorytm postępowania dla przypadku funkcjonowania systemów złożonych, jednocześnie uzupełniając modele oszacowania oczekiwanych kosztów obsługi systemu i oczekiwanego okresu niezdatności o tzw. model oceny konsekwencji uszkodzenia (*environmental model*), definiujący wpływ uszkodzenia maszyny produkcyjnej na funkcjonowanie przedsiębiorstwa produkcyjnego (np. przestoje produkcji).

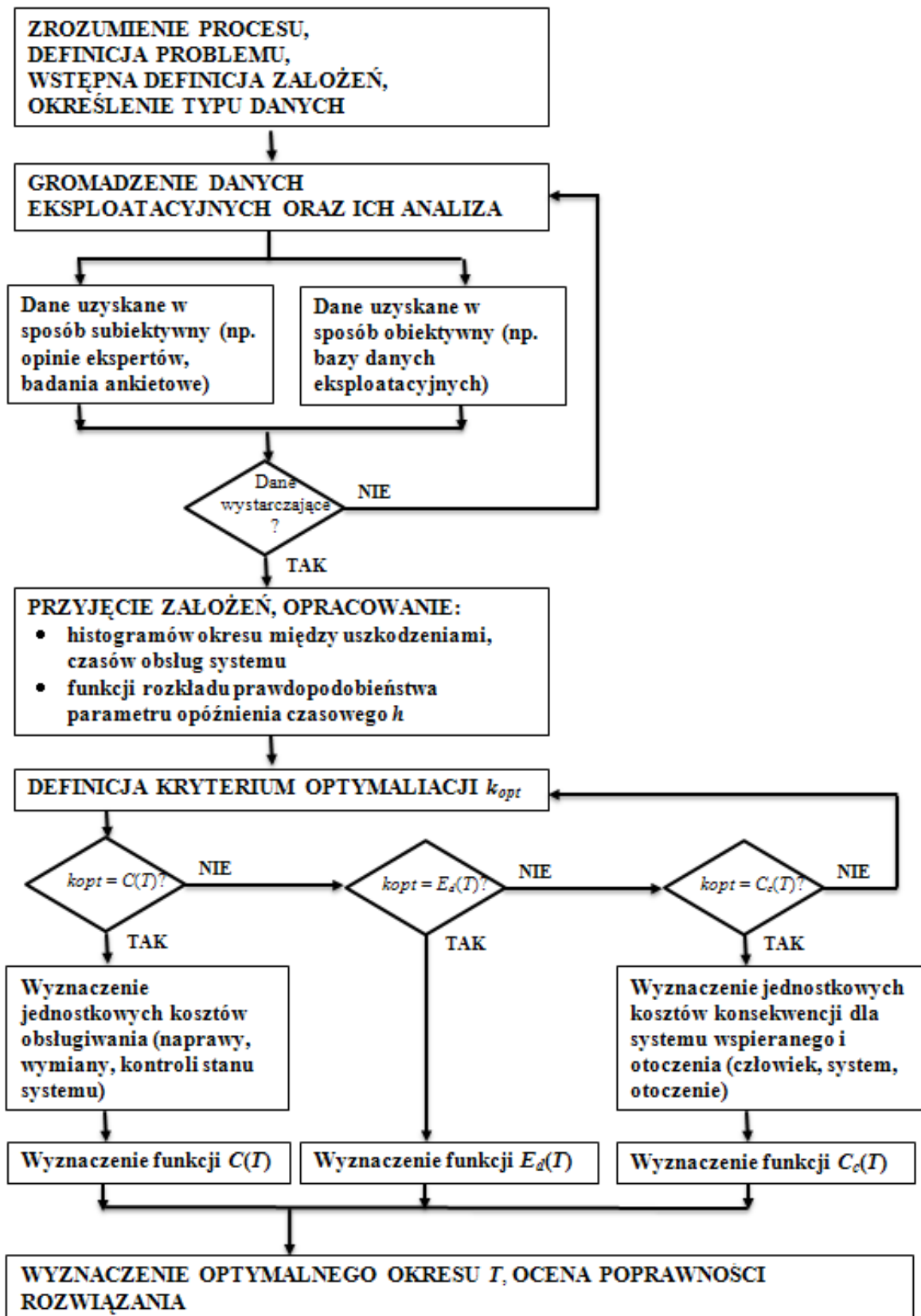
Metodyka modelowania procesów utrzymania w stanie zdalności systemów technicznych z uwzględnieniem koncepcji opóźnień czasowych w przypadku zastosowania

symulacji metodami Monte Carlo została opracowana w pracy [33]. Autorzy zaproponowali algorytmy postępowania dla przypadku perfekcyjnej/nieperfekcyjnej operacji kontroli stanu obiektu (*perfect/imperfect inspection*), oraz dla przypadku nieperfekcyjnej operacji naprawy (*imperfect repair*).

Opracowując metodykę modelowania procesów utrzymania w stanie zdatności systemów technicznych z uwzględnieniem koncepcji opóźnień czasowych, należy zwrócić uwagę iż celem modelu zwykle jest minimalizacja oczekiwanego czasu niezdatności systemu $E_d(T)$, lub oczekiwanych kosztów utrzymania $C(T)$. Jednocześnie, w przypadku funkcjonowania systemów logistycznych, istotny jest także wpływ procesu uszkodzeń ich elementów na poziom funkcjonowania systemu wspieranego oraz otoczenie. Poziom tego oddziaływania może być wyrażony poprzez funkcję oczekiwanych kosztów konsekwencji uszkodzenia systemu logistycznego $C_C(T)$. Z drugiej strony w dalszych rozważaniach pomija się możliwość przeprowadzania analizy wielokryterialnej.

Algorytm postępowania przy określeniu optymalnego okresu między realizacją operacji kontroli stanu systemu T obejmuje następujące etapy (rys. 1) [33, 45, 83]:

- zrozumienie procesu utrzymania w stanie zdatności wybranego systemu (np. określenie typu realizowanych operacji obsługiwanie, zależności między elementami systemu);
- określenie problemów w obszarze eksploatacji wybranego systemu (np. długotrwałe operacje naprawy, częste uszkodzenia);
- wstępna definicja założeń modelu (np. jedno-/wieloelementowy system), określenie typu danych eksploatacyjno-diagnostycznych, które mogą i powinny być gromadzone w celu przeprowadzenia optymalizacji procesów obsługiwanie;
- gromadzenie danych oraz ich analiza – w oparciu o wykorzystanie metod obiektywnych i subiektywnych;
- określenie założeń modelu – w oparciu o uzyskane dane i wiedzę o realizowanych procesach eksploatacji;
- oszacowanie podstawowych parametrów modelu – np. funkcji $f_h(h)$ i $F_h(h)$ parametru opóźnienia czasowego h , doboru rozkładu prawdopodobieństwa dla czasu między uszkodzeniami czy czasu obsługiwanie;
- definicja kryterium optymalizacji – w zależności od dostępnych danych eksploatacyjnych oraz przyjętych założeń modelu;
- oszacowanie funkcji kryterium optymalizacji, wyznaczenie optymalnego okresu T ;
- określenie relacji pomiędzy oczekiwaną wartością parametru opóźnienia czasowego i optymalnego okresu T – w celu określenia, czy koncepcja opóźnień czasowych pozwala uzyskać optymalne rozwiązanie (więcej informacji np. w pracach [43, 44]).



Rys. 1. Algorytm wyznaczenia optymalnego okresu T z wykorzystaniem koncepcji opóźnień czasowych

Opracowanie własne w oparciu o [33, 45, 83]

Istotny jest sposób wyznaczenia funkcji kryterialnych modelu. Postać funkcji będzie uzależniona od przyjętych założeń systemu. Przykładowo, dla przypadku systemu złożonego jednym z podstawowych modeli przeglądu okresowego, bazujących na zastosowaniu koncepcji opóźnień czasowych jest model kontroli okresowej stanu obiektu przedstawiony w pracy [30]. Podstawowe założenia omawianego modelu przyjmują, że:

- a) operacje kontroli stanu obiektu (*inspections*) odbywają się co ustalony czas T i trwają d jednostek czasu;
- b) koszt operacji kontroli stanu obiektu wynosi c_i jednostek;
- c) operacje kontroli stanu obiektu są perfekcyjne, co oznacza, że wszystkie defekty możliwe do wykrycia w trakcie kontroli są identyfikowane;
- d) operacje kontroli stanu obiektu są przeprowadzane niezależnie od siebie;
- e) uszkodzenia są niezależne i pojawiają się w systemie ze stałą intensywnością k ;
- f) wszystkie defekty, wykryte w trakcie operacji kontroli stanu obiektu są usuwane w czasie trwania procesu kontroli;
- g) uszkodzenia systemu trwają niedługi okres czasu d_b , w porównaniu do okresów T i d ;
- h) opóźnienie czasowe h uszkodzenia jest niezależnie od intensywności uszkodzeń oraz posiada znaną postać funkcji $f_h(h)$ i $F_h(h)$.

Przy tak zdefiniowanych założeniach funkcja prawdopodobieństwa pojawienia się uszkodzenia systemu $P_b(T)$ opisana jest wzorem [30]:

$$P_b(T) = \frac{1}{T} \int_0^T (T-h) f_h(h) dh \quad (1)$$

Oczekiwany czas niezdatności, definiowany funkcją $E_d(T)$, można opisać następująco [30]:

$$E_d(T) = \frac{kTd_b P_b(T) + d}{T + d} \quad (2)$$

Jednocześnie, przyjmując wartości oczekiwane kosztów naprawy c_b , oczekiwanych kosztów naprawy w trakcie realizacji operacji kontroli stanu obiektu c_{ir} , oczekiwany koszt utrzymania obiektu w okresie T można opisać funkcją $C(T)$ o postaci [30, 45]:

$$C(T) = \frac{1}{(T+d)} \{kT[c_b P_b(T) + c_{ir}(1 - P_b(T))] + c_i\} \quad (3)$$

Następnie oczekiwane koszty konsekwencji dla systemu wspieranego i otoczenia $C_c(T)$, wywołane pojawieniem się uszkodzenia systemu logistycznego można przedstawić jako:

$$C_c(T) = \frac{1}{(T+d)} \{kTc_{con} P_b(T)\} \quad (4)$$

gdzie:

c_{con} – oczekiwane koszty konsekwencji dla systemu wspieranego i otoczenia, wywołane pojawieniem się uszkodzenia systemu logistycznego (związane np. ze stratami w ludziach, poziomem uszkodzenia systemu wspieranego, opóźnieniem w realizacji procesów podstawowych, itp.)

Natomiast model symulacyjny dla systemów wieloelementowych opracowano m.in. w pracach [42, 43, 44].

4. Studium przypadku

W celu przedstawienia możliwości zastosowania omawianej metodyki zastosowania koncepcji opóźnień czasowych w systemach logistycznych, poddano analizie przedsiębiorstwo produkcyjne – hutę metali kolorowych. W ramach badań skupiono się na procesie eksploatacji wózków widłowych, wykorzystywanych w danym zakładzie produkcyjnym.

Analizowane wózki jezdniowe obsługują przede wszystkim procesy produkcji, przyjmują dostawy materiałów oraz obsługują magazyny wyrobów gotowych, gdzie trafiają wyroby z linii produkcyjnej. Najważniejszym miejscem pracy wózka widłowego jest linia produkcyjna. Wózek widłowy znajduje się w magazynie wsadu topielnego przy windzie towarowo – wsadowej, która zasila piec hutniczy. Zadaniem operatora jest pobieranie wsadu za pomocą wózka widłowego z rampy lub placu manewrowego (zgodnie z założeniami produkcyjnymi), włożenie go do windy wsadowej, skąd wsad trafia do pieca topielnego. Praca odbywa się tu w sposób ciągły, nieprzerwalny i tryzmianowy. W czasie jednej zmiany topi się około 350 ton materiału wsadowego. Dwa wózki skierowane do obsługi produkcji łącznie w ciągu jednej zmiany przepracowują około 14 mth¹. Warunki pracy są zmienne, podobnie jak w przypadku przyjmowania dostaw. Dodatkowo wózki obsługujące produkcję często wywożą ciekły materiał o wysokiej temperaturze, która sięga nawet 900°C. Wówczas temperatura w kabinie operatora wzrasta gwałtownie do około 65°C.

Kolejnym miejscem pracy wózka widłowego jest rampa rozładowcza, gdzie przyjmuje się dostawy materiału dostarczane drogą kolejową, oraz plac manewrowy, na który trafiają dostawy dostarczane taborem samochodowym. Na rampie kolejowej pracuje jednocześnie od 4 ÷ 6 wózków widłowych, które rozładowują wagony kolejowe z paczek wsadowych do produkcji, w których skład wchodzi 5 ÷ 24 blach o wadze ok. 1800 kg każda. Dzienna dostawa kolejowa składa się z 19 wagonów.

Równorzędnym miejscem pracy operatorów pracujących na rampie kolejowej jest plac manewrowy, gdzie rozładowują oni samochody ciężarowe z takich samych paczek, jak wagony kolejowe. Tu trafiają paczki wsadowe o wadze około 2500 kg każda. Dziennie dostarcza się ich około 300 ton. Praca w tych miejscach odbywa się w zmiennych i ciężkich warunkach atmosferycznych. Wózki muszą radzić sobie z olbrzymimi przeciążeniami związanymi z upałem, opadami śniegu i występującymi gołoledziami, kiedy dochodzi do boksowania kół. W zakładzie występuje ogólnie duże zapylenie i kurze. Podobna sytuacja ma miejsce na rampie rozładowczej, dlatego też wózki posiadają potrójny system filtrowania powietrza i są dokonywane częstsze przeglądy, polegające na przedmuchiwaniu dolotów powietrza i chłodnic.

Poza głównymi miejscami pracy, jakimi są obsługa produkcji czy przyjmowanie dostaw, wózki widłowe prowadzą w ciągu zmiany szereg innych prac związanych z utrzymaniem ruchu na rzecz pozostałych wydziałów zakładu. Są to tzw. prace gospodarcze. Do prac tych należy np. codzienne zaopatrywanie wydziałów w gazy techniczne, sole i środki chemiczne, dostarczanie z magazynów materiałów technicznych niezbędnych do utrzymania ruchu produkcyjnego, zaopatrywanie wydziałów pakowania w taśmy stalowe i strecz którymi są pakowane wyroby gotowe.

¹ 1 motogodzina (ang. *motohour*) (skrót: mth) – zgodnie z definicją zaproponowaną przez Słownik Języka Polskiego PWN [39] – godzina pracy silnika.

Jednostka miary standardowo wykorzystywana do oceny czasu eksploatacji wózków jezdniowych podnośnikowych; m.in. stan licznika motogodzin jest podawany dla czasów przeprowadzonych przeglądów okresowych, czy napraw w Dzienniku Konserwacji Wózka Widłowego, który m.in. zgodnie z ustawą o Dozorze Technicznym z dnia 21 grudnia 2000 r. od dnia 18 sierpnia 2003 r. [73] mają obowiązek prowadzić właściciele/użytkownicy wózków widłowych.

Dane niezbędne do przeprowadzenia analizy niezawodności obejmują dane serwisowe dziesięciu elektrycznych wózków widłowych wybranej marki, obejmujące okres eksploatacji od roku 2000 do lutego 2013. Zawierają dokładny przebieg pracy wózków, czasy trwania remontów i przeglądów, wyszczególnienie wymienianych elementów oraz wszelkich usterek, które wystąpiły w tym czasie.

4.1. Proces eksploatacji wózków widłowych i analiza danych eksploatacyjnych

Trasy pracy wózka widłowego są zmienne i zależą w szczególności od zadań, jakie wykonuje. Do najczęstszych i regularnych operacji należą załadunek pieca – obsługa produkcji i przyjmowanie dostaw. Operator po krótkiej odprawie na początku każdej zmiany wypisuje sprzęt, który pobiera, w tzw. raporcie pracy wózka widłowego. W raporcie tym operator dokonuje następującego wpisu (wpis operatora na przykładzie wózka widłowego nr. 4 z dnia 29-10-2010 roku): Data pobrania: 29-10-2010 r. Zmiana: I, stan licznika na początku zmiany: 3207 mth, stan techniczny wózka: tu operator dokonuje oględzin sprawdzających sprzęt. Jeśli wózek jest sprawny, to podpisuje w miejscu „*Wózek widłowy sprawny technicznie*”, jeśli nie, opisuje awarię lub uszkodzenie w miejscu awarii. Następnie podpisuje raport w miejscu „*Przyjmuję maszynę*”. Po dokonaniu takiego wpisu w raporcie operator udaje się w miejsce oddelegowania, czyli miejsce pracy, np. załadunek pieca lub rozładunek dostaw. Operator porusza się po magazynie wsadu, placu manewrowym i rampie rozładunkowej pokrytych asfaltem i betonem. Praca w wyżej wymienionym dniu na zmianie I. odbywa się od godziny 7.00 do godziny 15.00. Dzienny średni limit przepracowanych motogodzin przez wózek widłowy w wyżej wymienionych miejscach wynosi ok. 7 mth. Operator, który zjeżdża na koniec zmiany na wydział w celu zdania sprzętu, również dokonuje wpisu w raporcie pracy wózka widłowego: składa podpis w rubryce „*Zdający maszynę*”, wpisuje w rubryce ilość wykonanej pracy - w tym przypadku 7 mth. Jeśli po zmianie są jakieś uwagi dotyczące pracy maszyny lub zauważono jakąś awarię, operator ma obowiązek dokonać także wpisu w rubryce „*Awaria*”. Wyżej wymieniony wózek widłowy poruszający się po opisanych trasach i miejscach przejeżdża miesięcznie ok. 170 mth. Rocznie pokonuje nawet 2000 mth. W tym czasie w wózku widłowym zostaje wykonanych 20 obsługa profilaktycznych typu OT-1 (co 100 mth), w której skład wchodzi następujące czynności:

1. przedmuchiwanie całego wózka widłowego (silnik, chłodnice olejowe, wodne);
2. kontrola wszystkich płynów eksploatacyjnych;
3. wymiana filtrów powietrza – bezpieczników;
4. przesmarowanie wszystkich punktów smarnych wózka widłowego;
5. kontrola ogumienia;
6. kontrola części ruchomych wózka widłowego (zawieszenie, układ skrzętu, elementy masztu i karetki);
7. kontrola stanu technicznego łańcuchów i karetki;
8. wizualna kontrola sprzętu.

Ponadto, co ok. 500 mth wykonywane są przeglądy profilaktyczne typu OT-2. W ich skład, poza czynnościami wykonywanymi w ramach OT-1, wchodzi dodatkowo następujące czynności:

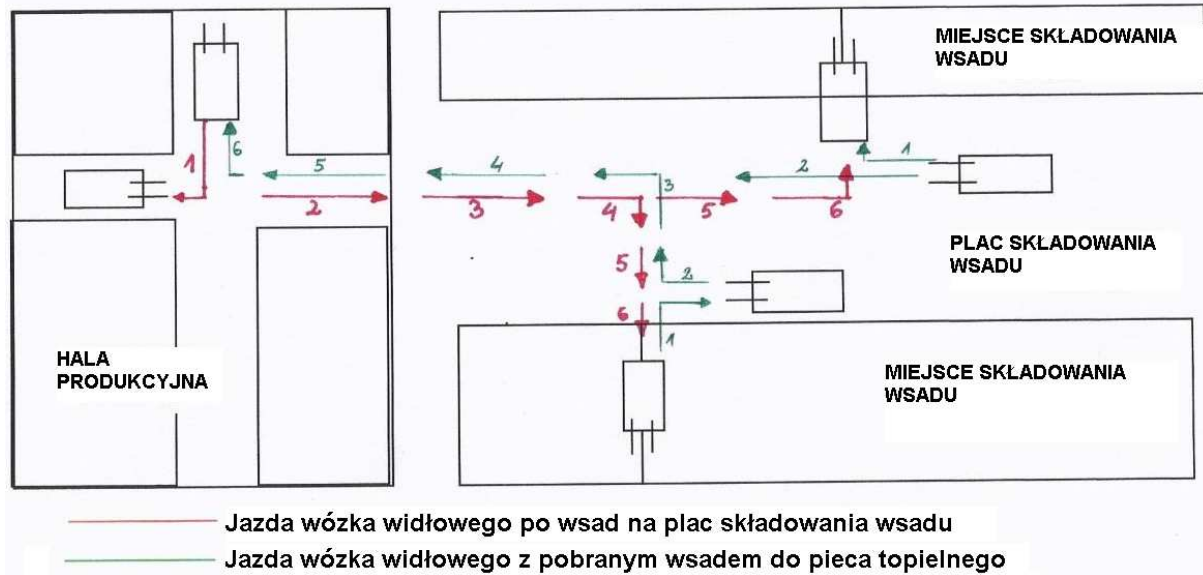
1. wymiana oleju silnikowego z filtrem oleju,
2. wymiana wszystkich filtrów powietrza.

Poza obsługami technicznymi przynajmniej raz do roku, po przejechaniu ok. 1700 mth. wózek widłowy ma wymieniany olej hydrauliczny 65 litrów i olej przekładniowy 15 litrów.

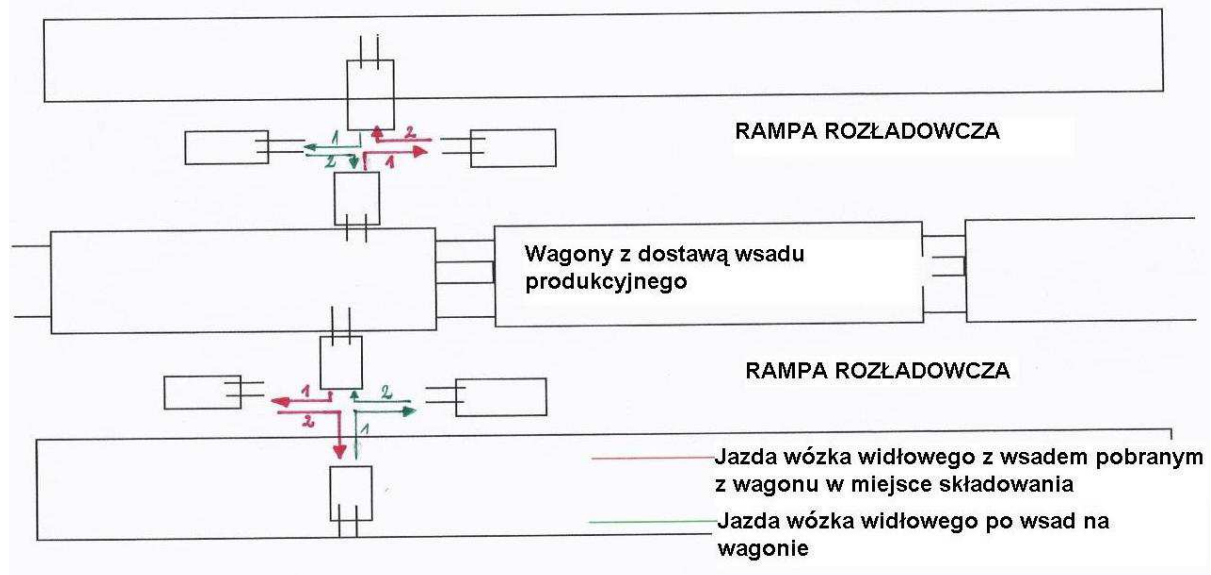
Ponadto wózek zużywa dwa komplety opon przednich i cztery komplety opon tylnych. W tym czasie także spala około 5500 litrów oleju napędowego.

Rysunki 2 i 3 obrazują trasę wózków widłowych przy obsłudze produkcji – załadunek pieca topielnego oraz pracę przy rozładunku dostawy z wsadem topielnym.

Wózek widłowy pracujący przy obsłudze produkcji – załadunek pieca w ciągu jednej zmiany pracuje średnio około 6-7 motogodzin. Pracownicy serwisu, którzy przeprowadzają naprawy i przeglądy gwarancyjne sprzętu przeliczają 1 mth na 100 kilometrów.



Rys. 2. Schemat trasy wózka widłowego pracującego przy załadunku pieca topielnego. Fot. JM.



Rys. 3. Schemat trasy wózka widłowego pracującego przy rozładunku dostaw. Fot. JM.

Średnio przy rozładunku dostaw na rampie rozładawczej i placu pracują cztery wózki widłowe i każdy z nich w ciągu jednej zmiany przepracowuje około 5 mth.

Obecnie zakład huty metali kolorowych dysponuje dwunastoma wózkami widłowymi czterotonowymi marki Komatsu (analizie poddano dziesięć sztuk). Do zalet tego typu

wózków widłowych należy ich prosta i zwarta konstrukcja, łatwość prowadzenia, mała awaryjność, duże, szerokie i wyspecjalizowane zaplecze serwisowe. Ponadto, minimum elektroniki w tych wózkach, 5 cylindrowa jednostka napędowa, zasilana zwykłą pompą wtryskową z wtryskiwaczami powoduje, że wózek staje się niezwykle prostą maszyną w obsłudze i użytkowaniu, zarówno dla operatora, jak i mechanika.

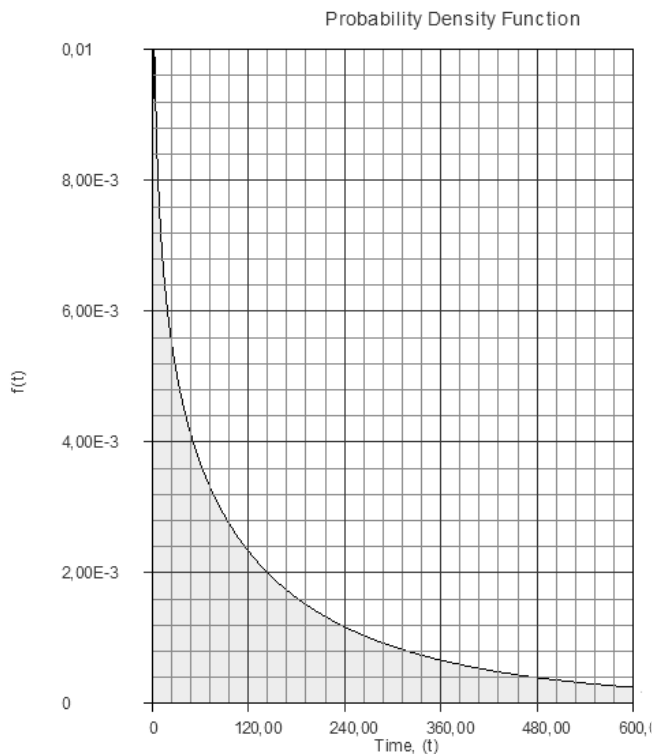
Elektryczny wózek widłowy jest obiektem naprawialnym, tj. obiektem który podlega operacji naprawy po uszkodzeniu². Analiza poziomu niezawodności badanego obiektu została przeprowadzona w oparciu o badania wspomnianego raportu pracy wózka widłowego, zawierającego informacje o przebiegach, wykazie remontów i przeglądów oraz czasach napraw. Podstawowe dane uzyskane w trakcie analizy procesu eksploatacji wózków przedstawione zostały w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry operacyjne analizowanych wózków widłowych

Nr wózka	Przebieg (mth)	Liczba uszkodzeń	MTBF(h)	MTTR (h)
1	3685	97	38,0	5,6
2	3636	82	44,3	6,5
3	5513	100	55,1	6,3
4	7310	107	68,3	6,4
5	1876	26	72,2	5,5
7	3624	79	45,9	6,6
8	2684	51	52,6	7,3
9	4374	89	49,1	7,8
10	4990	50	99,8	6,6
11	5224	67	78,0	6,4

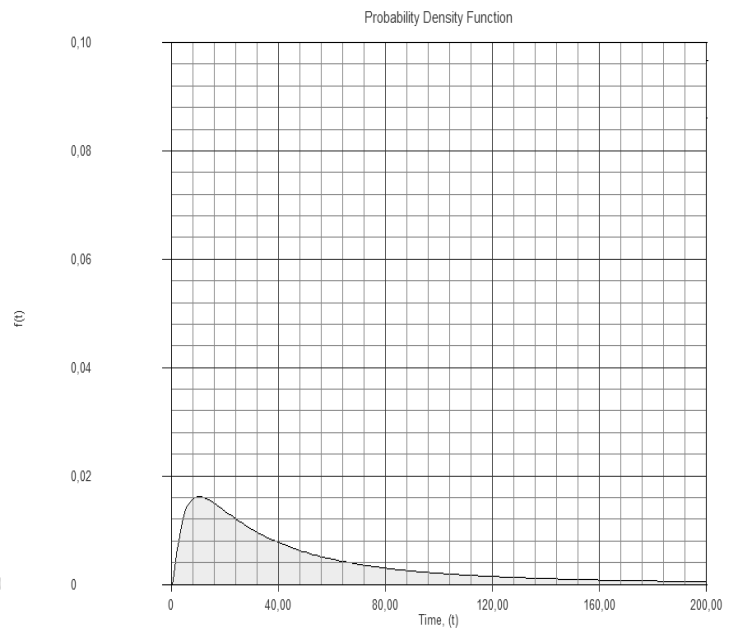
W wyniku badań 10-ciu wózków uzyskano m.in. realizacje czasu zdatności do pierwszego uszkodzenia. Rozkład prawdopodobieństwa czasu pracy wózków do pierwszego uszkodzenia można opisać rozkładem Weibulla (rys. 4). Możliwe było także wyznaczenie m.in. funkcji niezawodności $R(t)$, dystrybuanty $F(t)$, czy gęstości prawdopodobieństwa czasu do uszkodzenia wózka $f(t)$. Przy analizie danych wspomagano się programem Weibull++ v.6 (firmy ReliaSoft Co. USA), dzięki któremu m.in. dobrano rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej czasu poprawnej pracy. Jest nim rozkład lognormalny (rys. 5).

² Zgodnie z definicją podaną w Słowniku eksploatacyjnym PNTTE [92]



$\beta=0,7932, \eta=175,3214, \rho=0,9570$

Rys. 4. Funkcja $f_1(t)$ gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu do pierwszego uszkodzenia



Rys. 5. Funkcja $f(t)$ gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu między uszkodzeniami

W analizowanym okresie czasu zanotowano 748 uszkodzeń w układach ramy i karoserii wózka, instalacji i wyposażenia elektrycznego, w układzie hydraulicznym, podnoszenia, napędowym, kierowniczym, oraz hamulcowym.

Słabym ogniwem analizowanego wózka widłowego są elementy wchodzące w skład tylnego zawieszenia wózka. Dochodzi tu do zużywania się części łączników skrętu oraz części mocujących zwrotnice tylnego koła z belką skrętną. Zauważony problem dotyczył gwałtownego zużycia się tych elementów bez wcześniejszych oznak przyszłego uszkodzenia – nie powstają zauważalne wcześniej luzy. W efekcie nagłe zużycie tych elementów skutkuje zazwyczaj pękaniem i rozsypywaniem łożysk łączników i sworzni zwrotnic kół, co powoduje awarie i przestój maszyny. Inną wadą obecnych wózków widłowych jest fakt, że nie posiadają one seryjnie montowanych kabin. Kabin są montowane dodatkowo w oddzielnych zakładach, zajmujących się zabudową wózków widłowych. Brakuje w tych kabinach także klimatyzacji i odpowiedniej ergonomii ułatwiającej pracę operatora.

4.2. Koszty eksploatacji wózków widłowych

W kolejnym kroku poddano wózki widłowe analizie ekonomicznej. Wyniki przedstawiono dla czterech wózków tego samego typu wyposażonych w silnik 4 cylindrowy o pojemności skokowej 3200 cm³ i mocy 63,000 KW, pracujących w tych samych miejscach i wykonujących te same zadania operacyjne: prace gospodarcze, obsługa produkcji i rozładunek dostaw. W tabelach 2 i 3 przedstawiono zestawienie całkowitych kosztów eksploatacji w latach 2010 i 2011. W danym okresie jednostkowe koszty przeglądu profilaktycznego typu OT-1 i OT-2 wynosiły odpowiednio 230 PLN i 750 PLN. Koszt badań UDT dopuszczających wózek do pracy to kolejne 520 PLN w 2010r i 560 PLN w 2011r.

Tabela 2. Ogólne koszty eksploatacji wózka widłowego w roku 2010

ogólny koszt utrzymania wózków widłowych za rok 2010 [PLN]						
Wózek widłowy:	Koszty zużycia oleju napędowego	Koszty obsługi profilaktycznych	Koszty wymiany opon	Koszty operacji obsługiwan*	Wynagrodzenie mechanika/konserwatora	Średni koszt roczny utrzymania:
W-4	26 413,24	3 800,00	8 573,98	7 488,60	3 000,00 zł	49 275,82
W-6	24 975,72	4 030,00	7 524,52	7 488,60	3 000,00 zł	47 018,84
W-10	26 356,12	3 800,00	8 573,98	7 488,60	3 000,00 zł	49 218,70
W-11	23 309,72	3 800,00	8 573,98	7 488,60	3 000,00 zł	46 172,30
Razem:						191 685,66
* koszty obejmują m.in. operacje okresowej wymiany oleju hydraulicznego, czy badania UDT						

Tabela 3. Ogólne koszty eksploatacji wózka widłowego w roku 2011

ogólny koszt utrzymania wózków widłowych za rok 2010 [PLN]						
Wózek widłowy:	Koszty zużycia oleju napędowego	Koszty obsługi profilaktycznych	Koszty wymiany opon	Koszty operacji obsługiwan*	Wynagrodzenie mechanika/konserwatora	Średni koszt roczny utrzymania:
W-4	28 728,00	5 470,00	10 851,20	7 488,60	3 000,00	55 537,80
W-6	37 700,25	7 890,00	7 524,52	8 516,80	3 000,00	64 631,57
W-10	40 446,00	7 140,00	11 900,66	10 991,80	3 000,00	73 478,46
W-11	32 382,00	6 680,00	10 851,20	8 338,60	3 000,00	61 251,80
Razem:						254 899,63
* koszty obejmują m.in. operacje okresowej wymiany oleju hydraulicznego, czy badania UDT						

Średni koszt jednej roboczogodziny pracownika działu serwisu oszacowano na poziomie 20 zł, co pozwala na wyznaczenie średniego kosztu pracy przy realizacji operacji naprawy/wymiany na poziomie 130 PLN. Średni koszt naprawy wózka widłowego określono na poziomie 2500 PLN, a średni koszt obsługi wózka w trakcie realizacji operacji kontroli stanu systemu z uwzględnieniem pracy konserwatora – na poziomie 1500 PLN.

Ze względu na brak danych, nie ma możliwości oszacowania kosztów konsekwencji uszkodzenia wózka widłowego dla systemu wspieranego (system produkcji) i jego otoczenia.

4.3. Analiza procesu utrzymania w stanie zdatności wózków widłowych z wykorzystaniem koncepcji opóźnień czasowych

W celu wykorzystania przedstawionego w punkcie 3 algorytmu postępowania, niezbędne jest oszacowanie kilku parametrów. Ze względu na brak możliwości oszacowania parametrów kosztowych obejmujących ocenę wpływu niezdatności wózków widłowych na proces funkcjonowania systemu produkcji, analizie zostanie poddany proces doboru optymalnego okresu T przy uwzględnieniu kryterium oczekiwanego okresu niezdatności i oczekiwanych kosztów utrzymania systemu.

Analizowany system jest systemem wieloelementowym, przy czym podstawowe parametry zostały oszacowane na poziomie:

- czas trwania operacji kontroli stanu systemu d oszacowano na 2 h;
- czas niezbędny na usunięcie uszkodzenia d_b wyniósł 6,5 h (średni czas wszystkich napraw, zanotowanych wśród dziesięciu wózków);
- całkowity czas operacyjny w badanym okresie wyniósł (dla 10 wózków) 42916 roboczogodzin;

- d) stałą intensywność k pojawiania się uszkodzeń w systemie określono na poziomie $k = 0,017155$ na motogodzinę;
e) MTBF na poziomie 58,29 motogodzin, przy odchyleniu standardowym równym 88,24 motogodzin.

W analizowanym przypadku przyjęto, iż proces uszkodzeń w systemie ma charakter Poissonowski ze stałą intensywnością k na poziomie 0,017155 uszk/mth.

Po oszacowaniu danych parametrów, należało także określić opóźnienie czasowe h uszkodzenia, które jest w założeniu niezależnie od intensywności uszkodzeń oraz posiada znaną postać funkcji $f_h(h)$ i $F_h(h)$. W przypadku funkcjonowania analizowanych obiektów technicznych, nie ma danych historycznych o chwilach u wystąpienia pierwszych symptomów przyszłego uszkodzenia. W związku z tym brakuje wiarygodnej informacji, jakim rozkładem prawdopodobieństwa należy zamodelować parametr opóźnienia czasowego, aby otrzymać najlepsze wyniki. Z drugiej strony, bazując na wynikach pracy [42] przede wszystkim istotna jest wiedza o oczekiwanym okresie opóźnienia czasowego $E(h)$, natomiast rozkład prawdopodobieństwa tej zmiennej losowej w mniejszym stopniu wpływa na uzyskane wyniki modelu. Dlatego też, w artykule skupiono się na przypadku, w którym parametr opóźnienia czasowego jest opisany rozkładem wykładniczym, a funkcja gęstości prawdopodobieństwa przyjmuje postać:

$$f_h(h) = \lambda e^{-\lambda h} \quad (5)$$

Wykorzystując wyznaczone parametry, oraz podstawiając do wzoru (2) funkcję (1), oczekiwany czas niezdatności $E_d(T)$, można opisać następująco:

$$E_d(T) = \frac{kT \left[\frac{1}{T} \int_0^T (T-h) f_h(h) dh \right] d_b + d}{T + d} \quad (6)$$

Podstawiając parametry systemu oraz formułę (5) do równania (6) otrzymujemy:

$$E_d(T) = \frac{(0,017155T) \left[\frac{1}{T} \int_0^T (T-h) \lambda e^{-\lambda h} dh \right] 6,5 + 2}{T + 2} \quad (7)$$

Uwzględniając w równaniu (7) średnią intensywność uszkodzeń λ (w analizowanym przypadku $\lambda = k = 0,017155$), otrzymano wykres przedstawiony na rys. 6. Dla badanego przypadku, optymalny okres między operacjami kontroli stanu obiektu wynosi 61 mth.

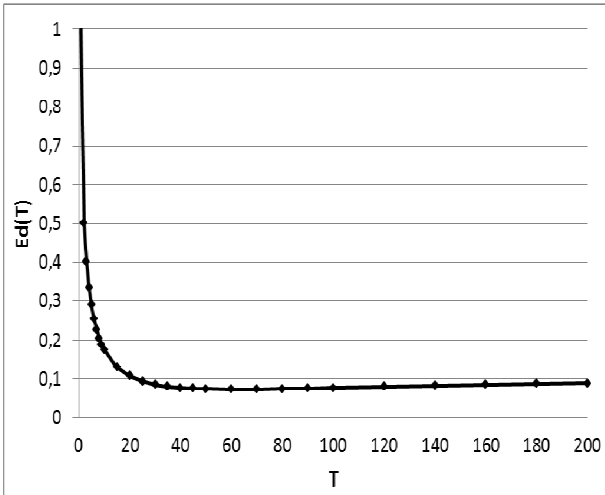
Następnie, podstawiając funkcję (1) oraz (5) do wzoru (3), oczekiwane koszty utrzymania wózków widłowych na jednostkę czasu w cyklu obsługiwanym można opisać wzorem:

$$C(T) = \frac{1}{(T + d)} \left\{ kT \left[c_{ir} + \frac{1}{T} (c_b + c_{ir}) \int_0^T (T-h) f_h(h) dh \right] + c_i \right\} \quad (8)$$

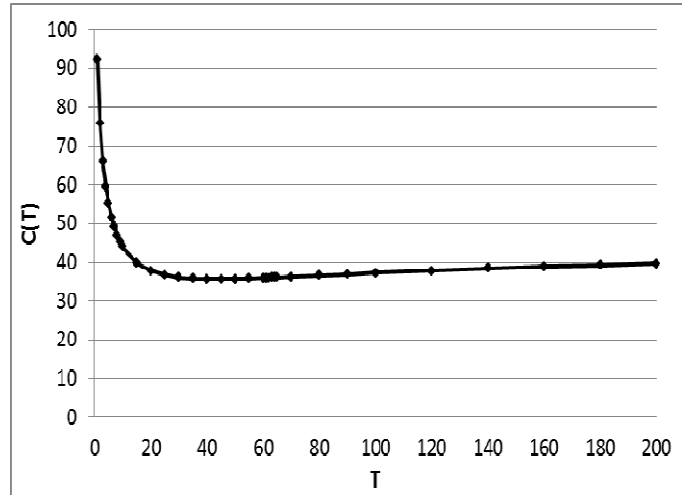
co pozwala na uzyskanie postaci:

$$C(T) = \frac{1}{(T + 2)} \left\{ 0,017155 \cdot T \left[1500 + \frac{1}{T} (2500 + 1500) \int_0^T (T-h) \lambda e^{-\lambda h} dh \right] + 250 \right\} \quad (9)$$

Na rys. 7 przedstawiono uzyskane wyniki ekonomiczne funkcjonowania badanego systemu. W analizowanym przypadku, optymalny okres T_{opt} wynosi 45 mth, przy całkowitych oczekiwanych kosztach utrzymania systemu na poziomie 1 602 PLN w cyklu obsługiwanym ($C(45)$ na poziomie równym 35,60 PLN). W przypadku pozostawienia optymalnego okresu T_{opt} na poziomie 61 mth (zgodnie z formułą (7)) – całkowite oczekiwane koszty utrzymania systemu wynosiły by ok 2 531 PLN w cyklu obsługiwanym, co daje nominalny wzrost o 929 PLN (koszty $C(61) = 35,88$ PLN).



Rys. 6. Funkcja $E_d(T)$ w sytuacji gdy parametr opóźnienia czasowego jest opisany rozkładem wykładniczym



Rys. 7. Funkcja $C(T)$ w sytuacji gdy parametr opóźnienia czasowego jest opisany rozkładem wykładniczym

4.4. Analiza wrażliwości modelu

W celu przeanalizowania wpływu zmiany parametrów modelu na poziom analizowanych funkcji $E_d(T)$ i $C(T)$ przeprowadzono analizę wrażliwości. W pierwszym kroku zbadano wpływ parametrów czasowych na poziom oczekiwanego czasu niezdatności funkcjonujących wózków widłowych. Jednym z parametrów, który może wpływać na uzyskane wyniki modelu jest średni czas operacji kontroli stanu systemu d . Wydłużenie czasu d wpływa na wydłużenie okresu T_{opt} oraz wyższy oczekiwany czas niezdatności systemu, jak przedstawiono w tabeli 4 oraz na rys. 8.

Drugim parametrem, którego wpływ na poziom funkcji $E_d(T)$ przeanalizowano, jest średni czas naprawy d_b . Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono w tabeli 5 oraz na rys. 9. Zgodnie z przewidywaniami, im krótszy średni czas naprawy systemu, tym dłuższy okres T_{opt} oraz niższy oczekiwany okres niezdatności. Podobny efekt uzyskujemy przy wydłużeniu średniego okresu między uszkodzeniami, jednakże w tym przypadku zmiany są prawie niezauważalne – wydłużenie MTBF o prawie 100% powoduje wydłużenie T_{opt} jedynie o 9 mth (Tabela 6).

Tabela 4. Analiza wrażliwości funkcji $E_d(T)$ na zmianę średniego czasu operacji kontroli stanu systemu d

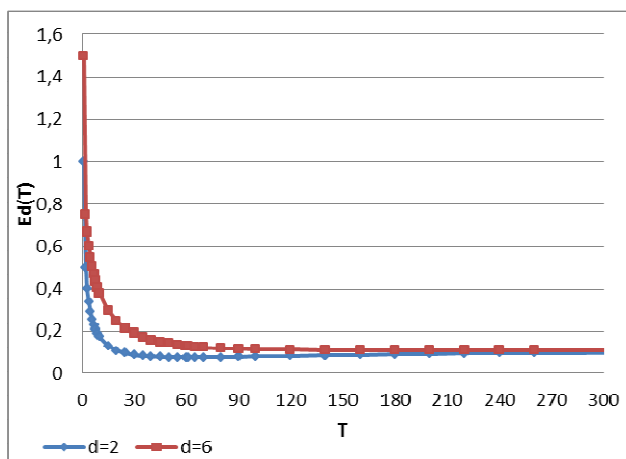
d [h]	T_{opt} [mth]	$E_d(T_{opt})$
1	40	0,055939
2	61	0,074431
3	80	0,086954
4	100	0,096334
5	140	0,103483
6	180	0,109056

Tabela 5. Analiza wrażliwości funkcji $E_d(T)$ na zmianę średniego czasu naprawy d_b

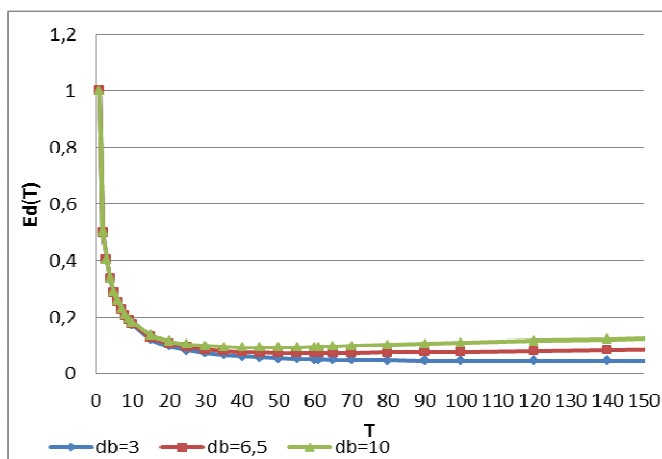
d_b [h]	T_{opt} [mth]	$E_d(T_{opt})$
3	120	0,046513
4	90	0,055834
5	80	0,063951
6	65	0,071084
6,5	61	0,074431
7	60	0,077679
8	52	0,083695
9	50	0,089396
10	45	0,094662

Tabela 6. Analiza wrażliwości funkcji $E_d(T)$ na zmianę średniego okresu między uszkodzeniami

MTBF [h]	T_{opt} [h]	$E_d(T_{opt})$
40	55	0,086446
45	58	0,082585
50	58	0,079197
58,29	61	0,074431
65	63	0,071165
70	64	0,069003
80	65	0,065251
100	70	0,059305



Rys. 8. Funkcja $E_d(T)$ przy zmianie średniego czasu operacji kontroli stanu systemu d



Rys. 9. Funkcja $E_d(T)$ przy zmianie średniego czasu naprawy d_b

W drugiej części analizy, zbadano wpływ parametrów ekonomicznych na poziom oczekiwanych kosztów utrzymania systemu w stanie zdatności w jednostce czasu $C(T)$. Ocenie poddano zmianę średniego kosztu c_i , średniego kosztu c_{ir} oraz średniego kosztu c_b .

Zgodnie z wynikami przedstawionymi w tabeli 7 i na rys. 10, podniesienie średniego kosztu c_i do poziomu kosztu badań profilaktycznych dopuszczających wózki widłowe do eksploatacji, optymalny okres T_{opt} zwiększa się o 100% przy zmianie oczekiwanego kosztu utrzymania w jednostce czasu o ok. 5 PLN (i zmianie całkowitego oczekiwanego kosztu utrzymania w stanie zdatności systemu w cyklu obsługiwanym o ponad 2 000 PLN).

W przypadku oceny zmiany średniego kosztu c_{ir} , zgodnie z opinią ekspertów oczekuje się raczej obniżenia średniej wartości tego kosztu w długim horyzoncie czasu. A to z kolei będzie skutkowało skróceniem optymalnego okresu T_{opt} (tabela 8, rys. 11).

Ostatnim analizowanym parametrem jest średni koszt naprawy systemu c_b . W przypadku uszkodzeń wózków widłowych, wyróżnia się wymianę/naprawę takich elementów jak np. końcówki drążków, siłownik, lub komputer, gdzie koszty napraw znacznie przewyższają kwotę 2 500 PLN. Z drugiej strony występuje bardzo wiele napraw, nie przekraczających 1 000 PLN. Dlatego też, oceniono zmianę wielkości tego kosztu od - 500 PLN do + 1 000 PLN w stosunku do danej wyjściowej (tabela 9, rys. 12). Zgodnie z oczekiwaniami, im droższa jest operacja naprawy tym zalecane jest skrócenie okresu T . W przypadku wzrostu oczekiwanego kosztu naprawy do poziomu 3 500 PLN, zauważa się

skrócenie optymalnej długości okresu T_{opt} o 33%, co pozwoli na obniżenie całkowitych oczekiwanych kosztów utrzymania systemu w cyklu obsługiwanego do poziomu ok. 1 200 PLN przy oczekiwanym koszcie w jednostce czasu na poziomie 39,97 PLN (wzrost o 4,17 PLN/mth).

Tabela 7. Analiza wrażliwości funkcji $C(T)$ na zmianę średniego kosztu operacji kontroli stanu systemu c_i

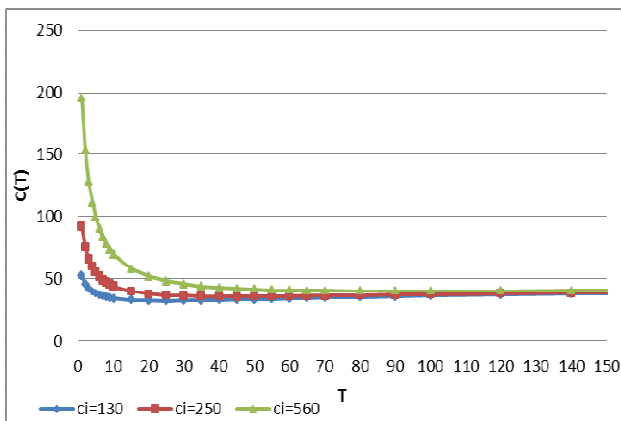
c_i [PLN]	T_{opt} [mth]	$C(T_{opt})$ [PLN]	C_{utr} [PLN]
130	25	32,21	805,32
250	45	35,59	1601,77
400	70	38,24	2677,08
560	90	40,22	3619,85

Tabela 8. Analiza wrażliwości funkcji $C(T)$ na zmianę średniego kosztu operacji kontroli stanu systemu wraz z odnową c_{ir}

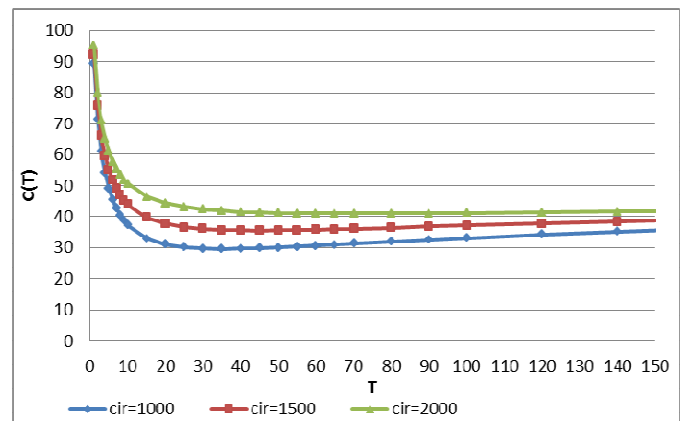
c_{ir} [PLN]	T_{opt} [mth]	$C(T_{opt})$ [PLN]	C_{utr} [PLN]
1000	35	29,62	1036,88
1500	45	35,59	1601,78
2000	70	41,03	2871,84

Tabela 9. Analiza wrażliwości funkcji $C(T)$ na zmianę średniego kosztu naprawy systemu c_b

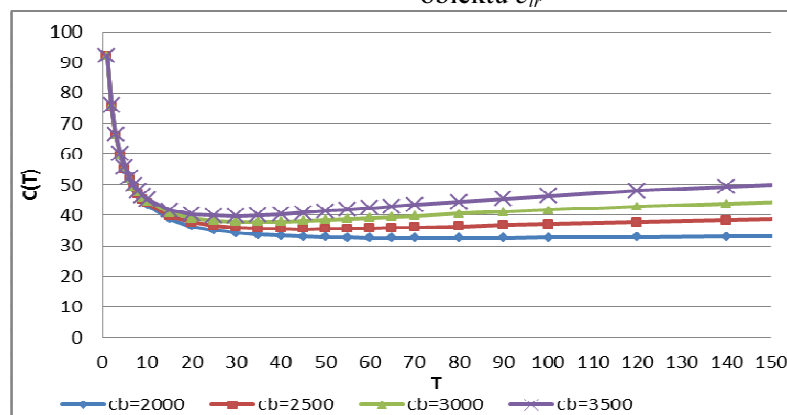
c_b [PLN]	T_{opt} [mth]	$C(T_{opt})$ [PLN]	C_{utr} [PLN]
2000	70	32,54	2277,96
2500	45	35,59	1601,78
3000	35	37,88	1325,80
3500	30	39,78	1193,46



Rys. 10. Funkcja $C(T)$ przy zmianie średniego kosztu operacji kontroli stanu systemu c_i



Rys. 11. Funkcja $C(T)$ przy zmianie średnich kosztów naprawy w trakcie realizacji operacji kontroli stanu obiektu c_{ir}



Rys. 12. Funkcja $C(T)$ przy zmianie średnich kosztów naprawy obiektu c_b

5. Podsumowanie

Analiza i właściwy dobór strategii obsługi systemu wsparcia logistycznego jest jednym z ważniejszych aspektów poruszanych w literaturze. W analizowanym przypadku, brak niezawodnej realizacji zadań operacyjnych przez wózki widłowe uniemożliwił by poprawne funkcjonowanie zakładu metalurgicznego, co naraziło by przedsiębiorstwo na znaczne straty finansowe spowodowane m.in. przestojem produkcyjnym.

W analizowanym przypadku zastosowano algorytm doboru optymalnego okresu T_{opt} dla funkcjonowania wózków widłowych w wybranym systemie produkcyjnym. Przy przyjętych założeniach określono optymalną długość okresu T_{opt} na poziomie 61 mth przy uwzględnieniu kryterium oczekiwanego okresu niezdatności $E_d(T)$ oraz na poziomie 45 mth, gdy rozpatrywane jest kryterium ekonomiczne $C(T)$. Jednakże, brak danych uniemożliwił przeprowadzenie analizy optymalizacji okresu T z uwzględnieniem kryterium oczekiwanych kosztów konsekwencji niezdatności wózków widłowych. Dlatego też, w przyszłych kierunkach badawczych zakłada się poszerzenie przedstawionej analizy o trzeci proces oceny, po zgromadzeniu niezbędnych danych eksploatacyjno-ekonomicznych.

Jednocześnie w analizowanym przypadku, optymalna długość okresu T_{opt} , równa 61 mth, przy założeniu tryzmiarowej pracy w systemie oraz przepracowaniu średnio 7 mth na zmianę, oznacza iż okres inspekcji w przybliżeniu wynosi 3 dni. Przy uwzględnieniu warunków użytkowania wózków widłowych, ta aproksymacja wydaje się być wiarygodna.

W artykule skupiono się na przedstawieniu możliwości zastosowania koncepcji opóźnień czasowych w celu określenia optymalnego okresu między obsługami obejmującymi kontrolę stanu zdatności obiektów technicznych. Zaproponowana metodyka postępowania może być wsparciem dla managerów w procesie decyzyjnym obejmującym określenie prawidłowego okresu eksploatacji obiektów technicznych. Artykuł jest kontynuacją prac nad zagadnieniem związanym z modelowaniem opóźnień czasowych dla systemów wieloelementowych, przedstawionych m.in. w pracach [20, 30, 31, 38]. W swoich pracach, w kolejnych krokach, autorzy skupią się na określeniu możliwości zastosowania modeli opóźnień czasowych do oceny funkcjonowania rzeczywistych systemów technicznych (np. uwzględnienie nieperfekcyjnych operacji diagnozowania stanu systemu), czy opracowania modeli matematycznych dla systemów wieloelementowych z opóźnieniem czasowym. Pozwoli to na określenie podstawowych zasad doboru polityki obsługi profilaktycznej z punktu widzenia osoby zarządzającej eksploatacją systemu technicznego.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować recenzentowi za cenne uwagi, które pomogły udoskonalić artykuł.

References

1. Akbarov A., Christer A. H., Wang W. Problem identification in maintenance modelling: a case study. *International Journal of Production Research* 2008; 46(4): 1031-1046.
2. Alzubaidi H. J. Maintenance modelling of a major hospital complex. PhD thesis. Salford: University of Salford, 1993.
3. Ascher H. E., Kobbacy K. A. H. Modelling preventive maintenance for deteriorating repairable systems. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 1995; 6: 85-99.
4. Attia A. F. Estimation of the reliability function using the delay-time models. *Microelectronics Reliability* 1997; 37(2): 323-327.
5. Aven T., Dekker, R. A useful framework for optimal replacement models. *Reliability Engineering and System Safety* 1997; 58(1): 61-67.
6. Babiarz B. An introduction to the assessment of reliability of the heat supply systems. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2006; 83(4): 230-235.
7. Bajda A., Wrażeń M., Laskowski D. Diagnostics the quality of data transfer in the management of crisis situation. *Electrical Review* 2011; 87(9A): 72-78.
8. Baker R. D., Christer A. H. Review of delay-time OR modelling of engineering aspects of maintenance. *European Journal of Operational Research* 1994; 73: 407-422.
9. Baker R. D., Wang W. Estimating the delay-time distribution of faults in repairable machinery from failure data. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 1992; 3: 259-281.
10. Bartezzaghi E., Spina G., Verganti R. Lead-time models of business processes. *International Journal of Operations and Production Management* 1994; 14(5): 5-20.
11. Beamon B. M. Supply chain Design and Analysis: Models and Methods. *International Journal of Production Economics* 1998; 55(3): 281-294.
12. Blanchard B. S. Logistics engineering and management. Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River, 2004.
13. Blanchard B. S. Logistics Requirements: Established From The Beginning. *SOLETech* 2002; 5.1: 1-6.
14. Cai J., Zhu L. A delay-time model with imperfect inspection for aircraft structure subject to a finite time horizon. *Proc. of IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services* 2011. 15-8 Sept. 2011, Nanjing, China.
15. Catuneanu V. M., Moldovan C., Popentin, Fl., Gheorghin M. Optimum system availability and spare allocation. *Microelectronic Reliability* 1988; 28(3): 353-357.
16. Cerone P. On a simplified delay time model of reliability of equipment subject to inspection monitoring. *Journal of the Operational Research Society* 1991; 42(6): 505-511.

17. Chaberek M. Makro- i mikroekonomiczne aspekty wsparcia logistycznego. Wyd. U.G.: Gdańsk, 2002.
18. Cho I. D., Parlar M. A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research* 1991; 51: 1-23.
19. Choi K-M. Semi-Markov and Delay Time Models of Maintenance. PhD thesis. Salford: University of Salford, 1997.
20. Christer A. H. A Review of Delay Time Analysis for Modelling Plant Maintenance. in: *Stochastic Models in Reliability and Maintenance*, Osaki S. (ed.), Berlin Heidelberg: Springer, 2002.
21. Christer A. H. Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance. *Journal of the Operational Research Society* 1999; 50: 1120-1137.
22. Christer A. H. Delay-time model of reliability of equipment subject to inspection monitoring. *Journal of the Operational Research Society* 1987; 38(4): 329-334.
23. Christer A. H. Modelling inspection policies for building maintenance. *Journal of the Operational Research Society* 1982; 33: 723-732.
24. Christer A. H., Redmond D. F. Revising models of maintenance and inspection. *International Journal of Production Economics* 1992; 24: 227-234.
25. Christer A. H., Redmond D. F. A recent mathematical development in maintenance theory. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry* 1990; 2: 97-108.
26. Christer A. H., Scarf P. A. A robust replacement model with applications to medical equipment. *Journal of the Operational Research Society* 1994; 45(3): 261-275.
27. Christer A. H., Waller W. M. A Descriptive model of capital plant replacement, *Journal of the Operational Research Society* 1987; 38(6): 473-477.
28. Christer A. H., Waller W. M. An operational research approach to planned maintenance: modelling P.M. for a vehicle fleet. *Journal of the Operational Research Society* 1984; 35(11): 967-984.
29. Christer A. H., Waller W. M. Reducing production downtime using delay-time analysis. *Journal of the Operational Research Society* 1984; 35(6): 499-512.
30. Christer A. H., Waller W. M. Delay Time Models of Industrial Inspection Maintenance Problems. *Journal of the Operational Research Society* 1984; 35(5): 401-406.
31. Christer A.H., Wang W., Choi K., Van der Duyn Schouten F. A. The robustness of the semi-Markov and delay time single-component inspection models to the Markov assumption. *IMA Journal of Management Mathematics* 2001; 12: 75-88.
32. Christer A. H., Whitelaw J. An operational research approach to breakdown maintenance: problem recognition. *Journal of the Operational Research Society* 1983; 34(11): 1041-1052.
33. Cunningham A., Wang W., Zio E., Allanson D., Wall A., Wang J. Application of Delay-time Analysis via Monte Carlo Simulation. *Journal of Marine Engineering and Technology* 2011; 10(3): 57-72.

34. Dekker R., Roelvink I. F. K. Marginal cost criteria for preventive replacement of a group of components. *European Journal of Operational Research* 1995; 84: 467-480.
35. Desa M. I., Christer A. H. Modelling in the absence of data: a case study of fleet maintenance in a developing country. *Journal of the Operational Research Society* 2001; 52: 247-260.
36. Frostig E. Comparison of maintenance policies with monotone failure rate distributions. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 2003; 19: 51-65.
37. Gross D., Pinkus C. E. Designing a support system for repairable items. *Computers & Operations Research* 1979; 6: 59-68.
38. Hennes J.-C., Tarbouriech S. Stability conditions of constrained delay systems via positive invariance. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 1998; 8: 265-278.
39. <http://sjp.pwn.pl/sjp/motogodzina;2484786> (dostęp: 15.12.2014r.).
40. Jardine A. K. S., Hassounah M. I. An optimal vehicle-fleet inspection schedule. *Journal of the Operational Research Society* 1990; 41(9): 791-799.
41. Jia X., Christer A. H. A periodic testing model for a preparedness system with a defective state. *IMA Journal of Management Mathematics* 2002; 13: 39-49.
42. Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S. Analysis of maintenance models' parameters estimation for technical systems with delay time. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2014; 16(2): 288-294.
43. Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S. Economical effectiveness of Delay Time approach using in Time-Based maintenance modelling. *Proc. of PSAM 11 & ESREL 2012 Conference, 25-29 June 2012, Helsinki, Finland.*
44. Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S. Analysis of Block-Inspection Policy parameters from economical and availability point of view. *Proc. of PSAM 11 & ESREL 2012 Conference, 25-29 June 2012, Helsinki, Finland.*
45. Jones B., Jenkinson I., Wang J. Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry. *Reliability Engineering and System Safety* 2009; 94: 111-124.
46. Kierzkowski A. Reliability models of transportation system of low cost airlines. In: *Reliability, risk and safety: back to the future.* Ale B. J. M., Papazoglou J. A., Zio E., Raton, B (eds). CRC Press: London 2010.
47. Kierzkowski A., Kowalski M., Magott J., Nowakowski T. Maintenance process optimization for low-cost airlines. *Proc. of PSAM 11 & ESREL 2012 Conference, 25-29 June 2012, Helsinki, Finland.*
48. Lee C. Applications of delay time theory to maintenance practice of complex plant. PhD work. T.I.M.E. Research Institute. Salford: University of Salford, 1999.
49. Leung F., Kit-leung M. Using delay-time analysis to study the maintenance problem of gearboxes. *International Journal of Operations & Production Management* 1996; 16(12): 98-105.
50. Lewitowicz J. Ryzyko w logistyce. *Logistyka* 2007; 5: 1-6.

51. Melo M. T., Nikel S., Saldanha da Gama F. Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers & Operations Research* 2005; 33(1): 181-208.
52. Młyńczak M., Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S. Klasyfikacja modeli utrzymania systemów technicznych. W: *Problemy utrzymania systemów technicznych*. Siergiejczyk M. (red.) Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2014.
53. Nakagawa T. A summary of discrete replacement policies. *European Journal of Operational Research* 1984; 17: 382-392.
54. Nicolai R. P., Dekker R. A review of multi-component maintenance models. *Proc. of European Safety and Reliability Conference ESREL 2007*, eds. Aven, T. & Vinnem, J.E., Leiden: CRC Press/Balkema: 289-296.
55. Nicolai R. P., Dekker R. Optimal maintenance of multicomponent systems: a review. *Economic Institute Report* 2006.
56. Nowakowski T. Analysis of modern trends of logistics technology development. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2011; 11(3): 699-706.
57. Nowakowski T. Problems with analyzing operational data uncertainty. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2010; 10(3): 95-109.
58. Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S. Developments of time dependencies modeling concepts, *Advances in safety, reliability and risk management. Proc. of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2011*, Troyes, France, 18-22 September 2011. Leiden: CRC Press/Balkema: 832-838.
59. Nowakowski T., Werbińska S. On problems of multicomponent system maintenance modeling. *International Journal of Automation and Computing* 2009; 6(4): 364-378.
60. Nowakowski T., Werbińska S. Wybrane problemy oceny łańcucha logistycznego. W: *Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej*. Bukowski L. (red). Kraków: Wydawnictwo AGH, 2009.
61. Pham H., Wang H. Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research* 1996; 94: 425-438.
62. Pierskalla W. P., Voelker J. A. A survey of maintenance models: the control and surveillance of deteriorating systems. *Naval Research Logistics Quarterly* 1976; 23: 353-388.
63. Pillay A., Wang J., Wall A. D., Ruxton T. A maintenance study of fishing vessel equipment using delay-time analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 2001; 7(2): 118-127.
64. Redmond D. F. *Delay Time Analysis in Maintenance*. PhD thesis. Salford: University of Salford, 1997.
65. Restel F. J. Train punctuality model for a selected part of railway transportation system. *Proc. of 22nd Annual Conference on European Safety and Reliability ESREL 2013*. 29 September-02 October 2013, Amsterdam, the Netherlands, 2014.
66. Sarkar J. Li F. Limiting average availability of a system supported by several spares and several repair facilities. *Statistics and Probability Letters* 2006; 76: 1965-1974.

67. Scarf P. A. On the application of mathematical models in maintenance. *European Journal of Operational Research* 1997; 99: 493-506.
68. Scarf P. A., Bouamra O. On the application of a capital replacement model for a mixed fleet. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 1995; 6: 39-52.
69. Sherif Y. S. Reliability analysis: Optimal inspection & maintenance schedules of failing equipment. *Microelectronics and Reliability* 1982; 22(1): 59-115.
70. Subramanian R., Natarajan R. An n-unit standby redundant system with r repair facilities and preventive maintenance. *Microelectronics Reliability* 1982; 22(3): 367-377.
71. Thomas L. C. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems. *Reliability Engineering* 1986; 16: 297-309.
72. Tomaszek H., Jaształ M., Zieja M. Application of the Paris formula with $M=2$ and the variable load spectrum to a simplified method for evaluation of reliability and fatigue life demonstrated by aircraft components. *Eksploracja i Niezawodność-Maintenance and Reliability* 2013; 15(4): 297-303.
73. Ustawa z dnia 21 grudnia 2000 r. o dozorcze technicznym (Dz.U. z 2013, poz. 963 z późn. zm.).
74. Valdez-Flores C., Feldman R. A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. *Naval Research Logistics* 1989; 36: 419-446.
75. Valis D., Koucky M., Zak L. On approaches for non-direct determination of system deterioration. *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2012; 14(1): 33-41.
76. Valis D., Zak L., Pokora O. Engine residual technical life estimation based on tribo data. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16(2): 203-210.
77. Wang H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research* 2002; 139: 469-489.
78. Wang W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modeling. *Reliability Engineering and System Safety* 2012; 106: 165-178.
79. Wang W. Modeling planned maintenance with non-homogeneous defect arrivals and variable probability of defect identification. *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2010; 2: 73-78.
80. Wang W. Delay time modelling for optimized inspection intervals of production plant. In: *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Ben-Daya, M., Duffuaa, S. O., Raouf, A., Knezevic, J., Ait-Kadi, D. (eds.). London: Springer, 2009.
81. Wang W. Delay time modelling. In: *Complex system maintenance handbook*. Kobbacy, A. H., Prabhakar Murthy, D. N. (eds.). London: Springer, 2008.
82. Wang W. A delay time based approach for risk analysis of maintenance activities. *Journal of the Safety and Reliability Society* 2003; 23(1): 103-113.
83. Wang W., Christer A. H. Solution algorithms for a nonhomogeneous multi-component inspection model. *Computers & Operations Research* 2003; 30: 19-34.

84. Wang W., Christer A. H. A modelling procedure to optimize component safety inspection over a finite time horizon. *International Quality and Reliability Engineering* 1997; 13: 217-224.
85. Wen-yua LV, Wang W. Modelling preventive maintenance of production plant given estimated PM data and actual failure times. *Proc. of International Conference on Management Science and Engineering* 2006, 5-7 October 2006, Lille.
86. Werbińska-Wojciechowska S. Problems of logistics systems modelling with the use of DTA approach. *Logistics and Transport* 2012; 2: 63-74.
87. Werbińska-Wojciechowska S. Modelowanie zależności czasowych w systemach produkcyjnych. *Logistyka* 2010; 2: 1-10.
88. Werbińska S. Model logistycznego wsparcia systemu eksploatacji środków transportu. Wrocław: Rozprawa doktorska Wydziału Mechanicznego PWr., 2008.
89. Werbińska S. Model niezawodności systemu wsparcia logistycznego z zależnością czasową. *Logistyka* 2007; 3: 1-12.
90. Witkowski K., Kiba-Janiak M., Seniuk S. Map of Logistics processes as a part of creating an enterprise supply chain in the metallurgical company. *Proc. of 21st International Conference on Metallurgy and Materials*, 23-25 May, 2012, Brno Czech Republic.
91. www.cscmp.org (dostęp: 20.10.2014r.).
92. www.eksploatacja.waw.pl/index.php.php?s=4000 (dostęp: 20.10.2014r.).
93. Zajac M., Kierzkowski A. Uncertainty assessment in semi Markov methods for Weibull functions distributions. In: *Advances in Safety, Reliability and Risk Management – Proc. of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2011*. 18-22 September 2011, Troyes France.
94. Zhao J., Chan A. H. C., Roberts C., Madelin K. B. Reliability evaluation and optimisation of imperfect inspections for a component with multi-defects. *Reliability Engineering and Systems Safety* 2007; 92: 65-73.