

Nr 2 (42)/2009

ISSN 1507-2711

Cena: 25 zł³

EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOŚĆ

MAINTENANCE AND RELIABILITY



**Polskie Naukowo-Techniczne
Towarzystwo Eksploatacyjne (Warszawa)**

POLISH MAINTENANCE SOCIETY (WARSAW)

Rada Naukowa

Prof. dr hab. inż. Andrzej Niewczas

*Prezes Zarządu PNTTE, Warszawa
Przewodniczący Rady Naukowej*

Prof. dr ing. habil. Holm Altenbach

Martin Luther Universität, Halle - Wittenberg, Niemcy

Prof. dr hab. inż. Zoja Bednarek

Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa

Prof. dr hab. inż. Jan Dąbrowski

Politechnika Białostocka, Białystok

Prof. dr hab. inż. Sławczo Denczew

Politechnika Warszawska, SNTiS w Płocku

Prof. dr hab. Miłosz P. Wnuk

University of Wisconsin - Milwaukee, USA

Prof. dr hab. inż. Andrzej Kusz

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Lublin

Prof. Štefan Liščák

Žylinska Universita, Žylin, Słowacja

Prof. Vaclav Legat

Czech University of Agriculture, Praga, Czechy

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkiusz

Politechnika Poznańska, Poznań

Prof. dr ir. Gilbert De Mey

University of Ghent, Belgia

Dr hab. inż. Zdzisław Chłopek, prof. PW

Politechnika Warszawska, Warszawa

Dr Ilia Frenkel

Negev Academic College of Engineering, Israel

Dr hab. inż. Tomasz Nowakowski, prof. PW

Politechnika Wrocławska, Wrocław

Prof. Leonas Povilas Lingaitis

Vilnius Gediminas Technical University, Wilno, Litwa

Prof. dr hab. inż. Stanisław Radkowski

Politechnika Warszawska, Warszawa

Prof. dr hab. inż. Marek Orkisz

Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

Prof. dr hab. inż. Stanisław Piasecki

Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa

Prof. dr hab. inż. Leszek Piaseczny

Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia

Prof. dr hab. inż. Andrzej Seweryn

Politechnika Białostocka, Białystok

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Smalko

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa

Prof. Andrzej Sobiesiak

University of Windsor, Canada

Prof. dr hab. inż. Marian Szczerek

Instytut Technologii Eksploatacji, Radom

Prof. Katsumi Tanaka

Kyoto University, Kyoto, Japonia

Dr hab. inż. Jan Szybka, prof. AGH

Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Prof. Irina Yatskiv

Riga Transport and Telecommunication Institute, Latvia

Dofinansowano przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Kwartalnik indeksowany w Journal Citation Reports (JCR Science Edition) oraz Science Citation Index Expanded (SciSearch®)

The Journal indexed and abstracted in the Journal Citation Reports/Science Edition and Science Citation Index Expanded (SciSearch®)

Kwartalnik notowany na liście czasopism punktowanych MNiSzW oraz indeksowany w bazach danych Baztech i Federacji Bibliotek Cyfrowych.

Wszystkie artykuły naukowe otrzymały dwie pozytywne recenzje wykonane przez niezależnych recenzentów.

Zespół redakcyjny:

Dr inż. Dariusz Mazurkiewicz (redaktor naczelny, sekretarz Rady Naukowej)

Dr inż. Anna Rudawska (sekretarz redakcji)

Dr inż. Leszek Semotiuk (skład i łamanie)

Dr inż. Krzysztof Olszewski

Wydawca:

Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, Warszawa

Patronat naukowy:

Polska Akademia Nauk O/Lublin

Adres do korespondencji:

Eksploatacja i Niezawodność - redakcja

20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36

tel: (0-81) 5384229, fax: (0-81) 5384229

e-mail: office@ein.org.pl

http://www.ein.org.pl

Nakład:

550 egzemplarzy

SPIS TREŚCI - CONTENTS

Nauka i Technika

Wei PENG, Hong-Zhong HUANG, Xiaoling ZHANG, Yu LIU, Yanfeng LI	
Reliability Based Optimal Preventive Maintenance Policy of Series-parallel systems	4
Stanisław LEGUTKO	
Trendy rozwoju utrzymania ruchu urządzeń i maszyn Development Trends in Machines Operation Maintenance	8
Marcin KOWALCZYK, Jerzy CZMOCHOWSKI, Eugeniusz RUSIŃSKI	
Budowa modelu diagnozowania stanów awaryjnych organów roboczych koparki wieloczerpakowej Construction of diagnostic models of the states of developing fault for working parts of the multi-bucket excavator	17
Tadeusz SMOLNICKI, Mariusz STAŃCO	
Wybrane aspekty eksploatacji wielkogabarytowych łożysk tocznych Selected aspects of the maintenance of large-size rolling bearings	25
Marek HAWRYLUK, Maciej ZWIERZCHOWSKI	
Analiza strukturalna matryc stosowanych do kucia na ciepło w aspekcie ich trwałości Structural analysis of hot forging dies with regard to their life	31
Zdzisław CHŁOPEK, Piotr LASKOWSKI	
Charakterystyki emisji zanieczyszczeń wyznaczone metodą Monte Carlo Pollutant emission characteristics determined using the Monte Carlo method	42
Andrzej ADAMKIEWICZ, Łukasz JARZĘCKI	
Analiza porównawcza cech eksploatacyjnych układów ruchowych statków typu RoPax Comparative analysis of operational properties of propulsion systems of RoPax type ships	52
Sławomir JUŚCIŃSKI, Wiesław PIEKARSKI	
Analiza procesu zaopatrzenia w części zamienne do ciągników i maszyn rolniczych w oparciu o outsourcing usług logistycznych An analysis of a supply process of spare parts for agricultural tractors and machines based on logistic services outsourcing	63
Ryszard WYCZÓŁKOWSKI, Grzegorz MATYSIAK	
Rozwój inteligentnego systemu monitorowania rozdzielczej sieci wodociągowej The development of an intelligent monitoring system of a local water supply network	71
Przemysław RAJEWSKI, Cezary BEHRENDT, Paweł KRAUSE	
Analiza warunków pracy polskich statków rybackich Analysis of operating conditions of polish fishing vessels	76
Anna BURDUK, Edward CHLEBUS	
Ocena ryzyka w systemach produkcyjnych o równoległej strukturze niezawodnościowej Evaluation of the risk in production systems with a parallel reliability structure	84
Aktualności PNTTE	
Nowe wydawnictwa rekomendowane przez PNTTE	96

PENG W., HUANG H-Z., ZHANG X., LIU Y., LI Y.: **Reliability Based Optimal Preventive Maintenance Policy of Series-parallel systems**; EiN nr 2/2009, s. 4-7.

To reduce the maintenance cost and improve the effectiveness of the maintenance activities in series-parallel systems, a preventive maintenance (PM) decision model for series-parallel systems subject to reliability was developed. This model considered the effect of failure maintenance on PM cycle and the restriction of system reliability in maintenance decision making, thus can help decision-maker to arrange appropriate and effective maintenance activities. Finally, an example was given to validate the proposed model.

LEGUTKO S.: **Trendy rozwoju utrzymania ruchu urządzeń i maszyn**; EiN nr 2/2009, s. 8-16.

W pracy przedstawiono trendy rozwojowe utrzymania ruchu urządzeń i maszyn. Scharakteryzowano trzy okresy i trzy sposoby podejścia do utrzymania ruchu urządzeń i maszyn. Wśród koncepcji, które się pojawiły najważniejsze to: RCM (Reliability Centred Maintenance) – utrzymanie ruchu skierowane na niezawodność (strategia wg niezawodności) i TPM (Total Productive Maintenance) – całościowe utrzymanie ruchu zorientowane na produktywność (lub w wolnym przekładzie – utrzymanie ruchu zintegrowane z produkcją). Inne współczesne koncepcje utrzymania ruchu maszyn, takie jak 5S i samodzielne przeglądy techniczne zostały również zaprezentowane. W końcowej części pracy pokazano zależność jakości utrzymania ruchu maszyn technologicznych i jakości wyrobów.

KOWALCZYK M., CZMOCHOWSKI J., RUSIŃSKI E.: **Budowa modelu diagnozowania stanów awaryjnych organów roboczych koparki wieloczerpakowej**; EiN nr 2/2009, s. 17-24.

Przedstawiony w pracy sposób tworzenia modelu (diagnoza) układu napędowego koparki wieloczerpakowej kołowej stosowanej w górnictwie węgla brunatnego pozwala opracować skuteczny sposób diagnozowania stanów rozwijającej się awarii. Aby opracować taki model, niezbędne było przeprowadzenie pomiarów obciążeń w celu określenia dystrybucyjności momentu urabiającego. Zastosowano metody probabilistyczne do oceny stanu w szczególności procesu działaniowego zabezpieczającego przed wystąpieniem awarii.

SMOLNICKI T., STAŃCO M.: **Wybrane aspekty eksploatacji wielkogabarytowych łożysk tocznych**; EiN nr 2/2009, s. 25-30.

Zapewnienie odpowiedniej trwałości węzła obrotu z wielkogabarytowym łożyskiem tocznym, ze względu na koszty oraz dostępność zamienników jest zagadnieniem o dużej wadze. Dla katalogowych łożysk wieńcowych, montowanych w większej liczbie identycznych maszyn możliwe jest określenie powtarzalnych parametrów eksploatacyjnych. W przypadku dużych łożysk wielkogabarytowych jest to utrudnione ze względu na indywidualne cechy każdej maszyny. Omówiono najważniejsze czynniki wpływające na trwałość węzła obrotu. Opisano kryterium oceny trwałości resztkowej.

HAWRYLUK M., ZWIERZCHOWSKI M.: **Analiza strukturalna matryc stosowanych do kucia na ciepło w aspekcie ich trwałości**; EiN nr 2/2009, s. 31-41.

Na trwałość narzędzi stosowanych w procesach kucia wpływa wiele czynników mających niekiedy przeciwstawny charakter. Żywotność matryc zależy od poprawnego ich zaprojektowania i wykonania, z uwzględnieniem odpowiedniej obróbki cieplno-chemicznej oraz mechanicznej adekwatnej do wybranego materiału, kolejności przeprowadzania kolejnych zabiegów obróbki cieplnej, a także od warunków, w jakich przebiega sam proces kucia (temperatura narzędzi i wstępniaka, geometria materiału wsadowego, prędkość procesu, rodzaj i ilość środka smarnego zapewniającego optymalne warunki trybologiczne. Innym istotnym parametrem jest rodzaj zastosowanego materiału na narzędzia. Należy wziąć pod uwagę, że producenci stali stosują swoje procedury, a skład chemiczny dla tego samego materiału może się znacznie różnić. To wszystko ma istotny wpływ na końcową jakość produktu. Przykładem wyrobu, dla którego wymagana jest wysoka trwałość narzędzi, jest odkuwka obudowy przegubki homokinetycznej. Obecnie w produkcji wielkoseryjnej takiej odkuwki stosuje się metodę wielooperacyjnego kucia na ciepło i zimno w matrycach zamkniętych ze złożonym schematem odkształcania – wyciskanie współbieżne z przeciwbieżnym. Ze względu na bardzo wysokie naciski jednostkowe, wyciężenie materiału matryc jest często tak wysokie, że prowadzi to do ich przedwczesnego zużycia i niszczenia (trwałość poniżej 2000 sztuk).

CHŁOPEK Z., LASKOWSKI P.: **Charakterystyki emisji zanieczyszczeń wyznaczone metodą Monte Carlo**; EiN nr 2/2009, s. 42-51.

W pracy przedstawiono pionierski sposób badań ekologicznych właściwości silników spalinowych z zastosowaniem metody Monte Carlo do wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych. Formalnie wprowadzono pojęcia oraz usystematyzowano zagadnienia związane z emisją zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych. Przedstawiono wyniki badań empirycznych wykonanych dla rzeczywistego obiektu oraz wyznaczono charakterystyki emisji zanieczyszczeń w symulowanych warunkach pseudoprzypadkowych.

LEGUTKO S.: **Development Trends in Machines Operation Maintenance**; EiN nr 2/2009, s. 8-16.

The trends in machines operation maintenance have been presented in the paper. Three methods and three periods of machines operation maintenance have been characterized. Among the concepts which have appeared, the most important ones are RCM (Reliability Centred Maintenance) – reliability oriented operation maintenance and TPM (Total Productive Maintenance) - general productivity oriented operation maintenance or operation maintenance integrated with production. Other contemporary concepts of operation maintenance as the 5S method and operator's own technical inspection have been presented too. At the end of the paper interrelationship of the quality of technological machines operation maintenance and the quality of products has been shown.

KOWALCZYK M., CZMOCHOWSKI J., RUSIŃSKI E.: **Construction of diagnostic models of the states of developing fault for working parts of the multi-bucket excavator**; EiN nr 2/2009, s. 17-24.

The way of constructing a power transmission model (diagnoser) of the multi-scoop wheel excavator used in brown coal mining, presented in the study, helps prepare an effective method of diagnosing the states of developing fault. In order to develop such model/diagnoser it was necessary to measure the loads to determine the distribution function of the mining moment. The probability methods were used for determining the state of initiating activities to protect against fault.

SMOLNICKI T., STAŃCO M.: **Selected aspects of the maintenance of large-size rolling bearings**; EiN nr 2/2009, s. 25-30.

Because of the high cost and limited availability of replacements it is vitally important to ensure proper durability of the slewing unit incorporating a large-size rolling bearing. For catalogue rim bearings installed on a larger number of identical machines it is possible to determine recurring operating parameters. In the case of large-size bearing, this is rather difficult because of the unique features of each machine. Major factors affecting the life of the slewing unit are discussed. The criterion for assessing residual durability is described.

HAWRYLUK M., ZWIERZCHOWSKI M.: **Structural analysis of hot forging dies with regard to their life**; EiN nr 2/2009, s. 31-41.

Many (sometimes antagonistic) factors affect the durability of tools used in forging. The life of dies depends on how well they were designed and made, including the thermochemical treatment and mechanical working, the sequence of steps in the thermal treatment and the forging process conditions (the tool and preform temperature, the charge material geometry, the process rate, the kind and amount of lubricant ensuring optimum tribological conditions). Another critical parameter is the kind of tool material. One should note that steel producers use their own procedures whereby the composition of the same steel may differ considerably between them. All this significantly affects the final quality of the product. An example of a product for which highly durable tools are required is a forging of the constant-velocity universal joint casing. Currently in large-lot production the casing is manufactured through cold and hot multioperation forging in closed dies with a complex deformation configuration (forward and backward extrusion). Because of the very high unit pressures the effort of the die material is often so high that it results in the premature wear out and failure of the dies (life below 2000 units).

CHŁOPEK Z., LASKOWSKI P.: **Pollutant Emission Characteristics Determined Using the Monte Carlo Method**; EiN nr 2/2009, s. 42-51.

This paper presents a pioneering method for investigating the environmental properties of internal combustion engines using the Monte Carlo method to determine the characteristics of vehicle pollutant emissions. Concepts and questions relating to the pollutant emissions of vehicles are formally introduced and systematized. The results of empirical research on a real object are presented, as are the pollutant emission characteristics under simulated pseudo-random conditions.

ADAMKIEWICZ A., JARZĘCKI Ł.: **Analiza porównawcza cech eksploatacyjnych układów ruchowych statków typu RoPax**; EiN nr 2/2009, s. 52-62.

W artykule przedstawiono genezę powstania statków typu RoPax. Opisano i poddano analizie główne układy napędowe najczęściej stosowane na tego typu statkach: układ spalinowo-mechaniczny, spalinowo-elektryczny oraz układ hybrydowy. Określono moce holowania przyjętych do analizy jednostek: referencyjnej i hipotetycznej z układem napędowym hybrydowym. Przeprowadzono analizę energetyczną porównywanych układów napędowych i dobrano ich główne elementy. Porównano cechy eksploatacyjne analizowanych układów ruchowych statków.

JUŚCIŃSKI S., PIEKARSKI.: **Analiza procesu zaopatrzenia w części zamiennie do ciągników i maszyn rolniczych w oparciu o outsourcing usług logistycznych**; EiN nr 2/2009, s. 63-70.

W artykule zaprezentowano zadania logistyki przy sprzedaży części zamiennych do ciągników i maszyn rolniczych. Omówiono wykorzystanie outsourcingu w realizacji usług transportowych. Przeprowadzono badania wpływu zjawiska sezonowości na poziom outsourcingu w usługach przewozowych części zamiennych do ciągników i maszyn rolniczych, wykonywanych przez firmy kurierskie. Wyznaczono wartość indeksów sezonowych dla badanego okresu i poddano ocenie rozkład ich zmian w aspekcie zespołu upraw polowych wykonywanych zgodnie z kalendarzem zabiegów agrotechnicznych.

WYCZÓLKOWSKI R., MATYSIAK G.: **Rozwój inteligentnego systemu monitorowania rozdzielczej sieci wodociągowej**; EiN nr 2/2009, s. 71-75.

W artykule przedstawiono rozwój inteligentnego systemu monitorowania sieci wodociągowej. Głównym zadaniem systemu jest wykrywanie i lokalizowanie awarii sieci wodociągowej. Wejściami do modelu są dane z czujników przepływu zainstalowanych na sieci, zaś wyjściami informacja o wykryciu wycieku i jego lokalizacji. Podstawową zaletą tej koncepcji systemu diagnozowania sieci wodociągowej jest możliwość przybliżonej lokalizacji uszkodzeń sieci w oparciu o ograniczoną liczbę czujników na niej zainstalowanych. System oparty jest o sztuczne sieci neuronowe, które klasyfikują stany sieci (sprawna, wyciek w zdefiniowanym obszarze sieci). Artykuł przedstawia prace prowadzone w celu ulepszenia metody budowy klasyfikatora, będącego zasadniczym elementem systemu i zwiększenia dokładności jego wskazań.

RAJEWSKI P., BEHRENDT C., KRAUSE P.: **Analiza warunków pracy polskich statków rybackich**; EiN nr 2/2009, s. 76-83.

W artykule przedstawiono warunki pracy polskich statków rybackich połowiących na M. Bałtyckim, podano najczęściej spotykane awarie. Zaproponowano kryteria oceny ryzyka takich awarii i ich oddziaływania na środowisko.

BURDUK A., CHLEBUS E.: **Ocena ryzyka w systemach produkcyjnych o równoległej strukturze niezawodnościowej**; EiN nr 2/2009, s. 84-95.

System produkcyjny zdefiniowano zgodnie z teorią systemów, natomiast ryzyko jako synonim zawodności. Takie podejście umożliwiło dekompozycję systemu produkcyjnego na obszary oraz na wyznaczenie struktury niezawodnościowej systemu produkcyjnego. Artykuł prezentuje metodę wyznaczania ryzyka dla systemu produkcyjnego o strukturze równoległej. Metoda wyznaczania ryzyka dla produkcyjnej struktury równoległej została zweryfikowana w przedsiębiorstwie produkującym ramy wózków wagonów, tramwajów i lokomotyw.

ADAMKIEWICZ A., JARZĘCKI Ł.: **Comparative Analysis of Operational Properties of Propulsion Systems of RoPax Type Ships**; EiN nr 2/2009, s. 52-62.

The article presents the origins of RoPax type ships. Main propulsion systems most often used on ships of this type have been analysed i.e the diesel-mechanical system, the diesel-electric system as well as the hybrid system. The towrope horsepowers of the analysed units have been determined: the reference one and the hypothetical one with the hybrid propulsion system. Energy analysis of the compared systems has been carried out and their main elements have been chosen. Operational properties of the analysed ship propulsion systems have been compared.

JUŚCIŃSKI S., PIEKARSKI.: **An analysis of a supply process of spare parts for agricultural tractors and machines based on logistic services outsourcing**; EiN nr 2/2009, s. 63-70.

In this article the aims of logistics in sale of the spare parts for tractors and agricultural machines are presented. The outsourcing in providing of transport services is discussed. The research on the influence of phenomenon of seasonality on the level of outsourcing in the transport of spare parts for tractors and agricultural machines by courier companies is conducted. The value of seasonal indices for the examined period is outlined. Also the layout of their changes from the perspective of agricultural complex and in accordance with agriculture calendar is judged.

WYCZÓLKOWSKI R., MATYSIAK G.: **The development of an intelligent monitoring system of a local water supply network**; EiN nr 2/2009, s. 71-75.

The paper presents the development of monitoring system of intelligent water supply network. The main task of this system is water leakage detection and localization. For inputs, this system uses information from flow sensors, mounted on the pipeline network, while the output is a piece of information about leakage detection and localization. The main advantage of this system is a possibility of approximate leakage localization using only a limited number of installed sensors. The system is based on an artificial neural network which classified the states of network (leakage in defined part of network, no leakage). In the paper, some developments and attempts to improve the sensitivity and accuracy of this system, and develop the method of classifier building were described.

RAJEWSKI P., BEHRENDT C., KRAUSE P.: **Analysis of operating conditions of polish fishing vessels**; EiN nr 2/2009, s. 76-83.

This article presents the conditions of Polish fishing vessels operating in the Baltic Sea. Most common failures and proposed methods of assessing the risk of such failures are given, as well as the effects on the marine environment.

BURDUK A., CHLEBUS E.: **Evaluation of the risk in production systems with a parallel reliability structure**; EiN nr 2/2009, s. 84-95.

The production system was defined in accordance with systems theory, while the risk was treated as a synonym of unreliability. This approach allowed decomposing the production system into several areas and determining the reliability structure of the production system. This paper presents a method of determining the risk for a production system with a parallel structure. The method of determining the risk for a parallel structure of production was verified in a production company, which manufactures bogie frames for railway cars, trams and railway engines.

Wei PENG
Hong-Zhong HUANG
Xiaoling ZHANG
Yu LIU
Yanfeng LI

RELIABILITY BASED OPTIMAL PREVENTIVE MAINTENANCE POLICY OF SERIES-PARALLEL SYSTEMS

To reduce the maintenance cost and improve the effectiveness of the maintenance activities in series-parallel systems, a preventive maintenance (PM) decision model for series-parallel systems subject to reliability was developed. This model considered the effect of failure maintenance on PM cycle and the restriction of system reliability in maintenance decision making, thus can help decision-maker to arrange appropriate and effective maintenance activities. Finally, an example was given to validate the proposed model.

Keywords: Series-parallel systems, preventive maintenance, reliability based maintenance.

1. Introduction

PM can improve machine availability and minimize related maintenance cost by arranging maintenance activities before system failure. It's an important policy to guarantee reliability of system. Because of its significance during whole life cycle of machine, researches have been conducted to establish its model [3,5,8]. After Barlow presented the simple PM model [1], many optimization models have been established in recent years. Such as Tsai presented periodic PM of a system with deteriorated components [9], and Duarte proposed an algorithm to solve the previous problem for equipment in order to ensure its availability [4].

However, these models mentioned above were established to minimize maintenance cost without considering system reliability. In addition, with the increase of system complexity, serial or parallel model cannot describe the system perfectly. Instead, compound structure system is widely used in practical engineering. This paper established a PM model which meets reliability restriction in series-parallel systems. Genetic Algorithm (GA) is applied to obtain the optimal parameters. The application of this model can be used for on-site maintenance scheduling.

This paper is organized as follows. Section 2 illustrates the detailed process of the construction of the PM decision model under concrete background and premises. In section 3, an example is presented to validate and analyze the PM model for series-parallel systems under reliability restriction. Section 4 is the conclusions of the paper.

2. PM Decision Model

2.1. Series-parallel systems model

The series-parallel system [6] is illustrated as Figure 1.

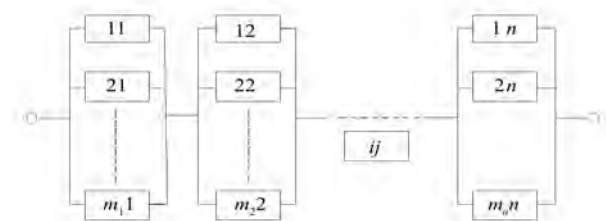


Fig. 1. Serial-parallel system

2.2. Basic assumptions

In order to construct and analyze the model, we assume that [2,7]:

- 1) Failure maintenance will be taken immediately after the occurrence of failure within the preventive maintenance cycle T_{PM} , and it will result in the beginning of next PM cycle.
- 2) Preventive maintenance will alter and reduce the failure rate in some degree. The effect is decided by age reduction factor α_i and failure acceleration factor A_i .
- 3) The time in which a subsystem is not available due to PM activity is negligible compared with the time elapsed between consecutive activities.

2.3. Maintenance cost model

Based on the assumptions mentioned above, the total cost during the whole system running time T_H is:

$$C_{Total} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (C(T_{PM})_i \times r_p + C_f N(i, j) + \varphi_i C_d(i)) \quad (1)$$

Where m is the number of subsystem in series-parallel systems, n is the total PM times of subsystem i during T_H . $C(T_{PM})_i$ is the PM cost of each component in series-parallel systems in per PM cycle, C_f is the cost of a failure maintenance per component in per PM cycle, $r(T_{PM})_i$ is probability of a PM activity in one preventive cycle, $N(i, j)$ is failure times in the i subsystem before the j th preventive maintenance, $C_d(i)$ is the system delay loss due to subsystem i maintenance activity, which can be calculated by $LT_{PM}(i)$ (L means the production delay loss in unit time, and $T_{PM}(i)$ means delay time when subsystem i does preventive maintenance).

Actually, it may not affect the system when one or two components in one subsystem breakdown in the serial-parallel mode, even if all the components in the same subsystem need maintenance activities, the maintenance can be arranged in the nonproductive time to reduce production loss. When the subsystem is a serial structure, system delay correlation factor φ_i is equal to 1 and it will cause productive loss, otherwise equal to 0[6].

2.4. Failure rate and failure times

Demopoulos presented that preventive maintenance can neither renew the system nor maintain the same failure rate [3], therefore, age reduction model was considered. Later, age reduction factor α_i was proposed to reflect the effect to the failure rate after PM. Based on this factor, we present failure acceleration factor A_i which reflects the changing speed of failure rate [6].

Assume i subsystem's PM cycle as $T_{PM}(i)$, after j th maintenance activity, its failure rate has been reduced to the status $\alpha_i T_{PM}(i)$ before this PM. Consider that: PM may influence failure rate curvature, so failure acceleration factor A_i is used. The recursion relationship of failure rate λ_j before the j th preventive maintenance, can be expressed like this:

$$\begin{aligned} \lambda_1(t) &= \lambda(t) \\ \lambda_2(t) &= A_i \lambda_1(t + T_{PM}(i) - \alpha_i T_{PM}(i)) \\ &\vdots \\ \lambda_j(t) &= A_i \lambda_{j-1}(t + T_{PM}(i) - \alpha_i T_{PM}(i)) \end{aligned}$$

Simplify:

$$\lambda_j(t) = \left(\prod_{i=1}^{j-1} A_i \right) \lambda(t + (j-1)(T_{PM}(i) - \alpha_i T_{PM}(i))) \quad (2)$$

It should be noted that:

- 1) The range of α_i is $0 < \alpha_i < 1$, which describes the degree of age reduction of the i th subsystem. The larger α_i is, the more effective the preventive maintenance makes.
- 2) A_i which represents the i th subsystem failure acceleration factor should satisfy $A_i > 0$. $A_i > 1$ means preventive maintenance accelerates the failure rate, $A_i = 1$ means no effect and $0 < A_i < 1$ represents the deceleration of the rate.

Before the j th PM, failure times in the i th subsystem can be written as:

$$\begin{aligned} N(i, j) &= \int_0^{T_{PM}(i)} \lambda(t) dt = \\ &= \int_0^{T_{PM}(i)} \left(\prod_{i=1}^{j-1} A_i \right) \lambda(t + (j-1)(T_{PM}(i) - \alpha_i T_{PM}(i))) dt \end{aligned} \quad (3)$$

2.5. Reliability restriction

During the implementation of PM, we must make sure that the system should be reliable enough so as to accomplish the production tasks. Subsystem's reliability is:

$$R_i(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(t) dt\right) \quad (4)$$

According to Equation (2), (4), when running into time t after j th PM activity, the i th subsystem's reliability is:

$$R_i(t) = \exp\left(-\int_0^{t + j(T_{PM}(i) - \alpha_i T_{PM}(i))} \lambda_i(t) dt\right) \quad (5)$$

Thus, the system reliability $R(T)$ at time T can be written as,

$$R(T) = \prod_{j=1}^n \left\{ 1 - \prod_{i=1}^{m_j} (1 - R_{ij}(t)) \right\} \quad (6)$$

Assume the reliability requirement for i th subsystem is R_{i0} and system reliability is R_0 , the reliability constraints of the optimization model is,

$$R_i(t) \geq R_{i0} \quad (7)$$

$$R(T) \geq R_0 \quad (8)$$

and preventive maintenance time restriction is

$$T_{PM}(i) \leq T_{PM0} \quad (9)$$

2.6. Optimization model

According to above analysis, the objective function is:

$$\begin{aligned} \min f(T) &= \min (C_{Total}(T)) = \\ &= \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (C(T_{PM})_i \times r_p + C_f N(i, j) + \varphi_i C_d(i)) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } R_i(t) \geq R_{i0}$$

$$\text{s.t. } R(T) \geq R_0$$

$$\text{s.t. } T_{PM}(i) \leq T_{PM0}$$

The design variable is

$$\bar{T}_{PM} = [T_{PM}(1), T_{PM}(2), T_{PM}(3), \dots, T_{PM}(m)]^T$$

where m is the number of subsystems.

It should be indicated that the optimization model is a non-linear problem. Simplification of the system is necessary. In this paper, we will only analyze the minimal divided model of the system, as is prevented by Figure 2.

3. Example

Assume the complicated system can be divided into the structure as shown in Figure 2. Failure rate of every subsystem follows Weibull distribution as Eq. (11).

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \quad (11)$$

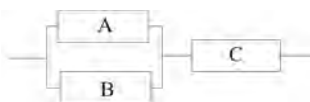


Fig. 2. Serial-parallel model

3.1. System initialization

Initialization of subsystem is shown in Table 1.

Tab. 1. System initialization

Sub-system	m	η	C_r	C_{pm}	a	A	φ
A	2.2	220	200	600	0.95	1.0	0
B	2.2	220	200	600	0.95	1.0	0
C	2	200	240	650	0.9	0.99	1

$T_H=600.0$ Hours, $C_L=800$, $R_{10}=R_{20}=R_{30}=0.8$, $R_0=0.8$.

3.2. Calculation

There are many local optimum solutions when the model is complex. To obtain the global optimum solution and avoid

dropping into the local ones, we utilized the Genetic Algorithm (GA) to solve the problem and validated the result by Direct Search Toolbox. The flowchart of GA is shown in Figure 3.

3.3. Result analysis

Figure 4 describes the relation between reliability and PM cycle while Figure 5 gives the minimal PM cost that can satisfy reliability requirement.

When the system and its subsystems can satisfy reliability requirement in each PM cycle, we say that the system satisfies reliability requirement. At this moment, the optimal maintenance cycle with minimum maintenance cost is $T_{PM}=[75,75,54.55]^T$. This can be regarded as the best preventive strategy with the minimal cost 26342.8389.

4. Conclusions

In this paper, we proposed a PM model for a series-parallel systems under consideration of reliability restriction. This makes it possible to guarantee more reliable operation for machines and devices. An example is given and the result show that the proposed model has good performance for maintenance decision-making. In the future research, two questions need further investigation:

- 1) With the increase of system's complexity, decision model becomes more complicated. In addition, selection of a suitable method to obtain the global optimum solution is also necessary.
- 2) We should consider some factors (such as the criticality of each subsystem) in the process of reliability allocation.

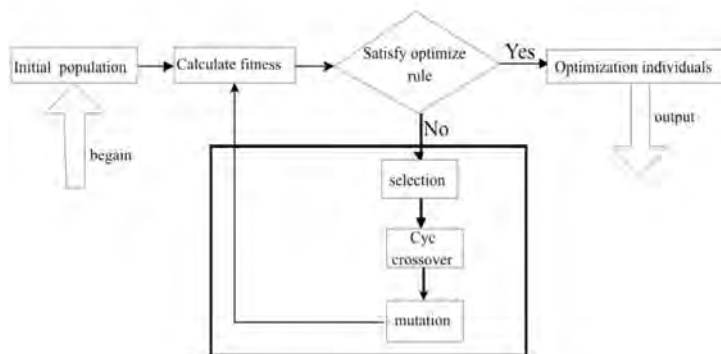


Fig. 3. Flowchart of GA

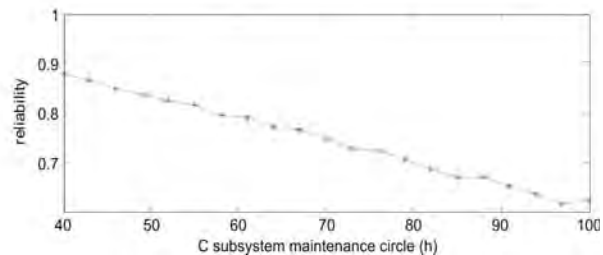
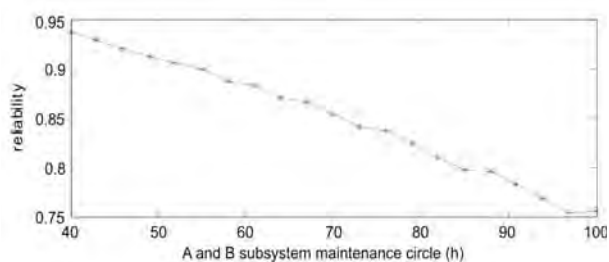


Fig. 4. Relation between reliability and PM

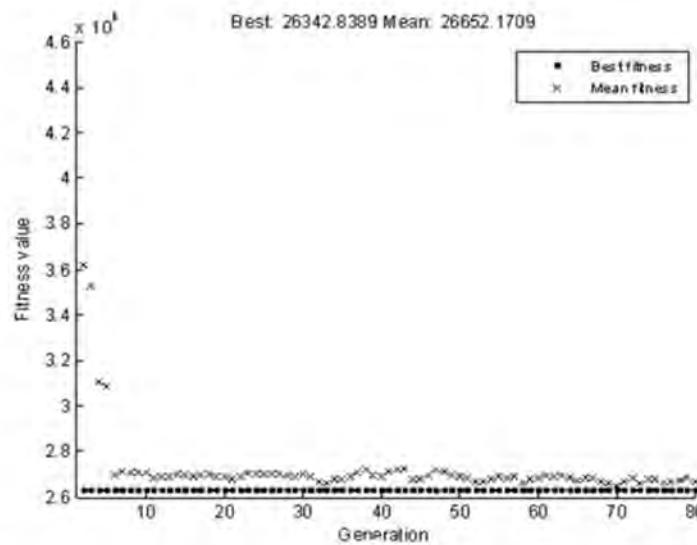


Fig. 5. Minimal PM cost

This research was partially supported by the National Natural Science Foundation of China under contract number 50775026 and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China under contract number 20060614016.

5. References

1. Barlow R, Hunter L. Optimum preventive maintenance policies. *European Journal of Operational Research* 1960; 8: 90-100.
2. Bris R, Chatelet E, Yalaoui F. New method to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems. *Reliability Engineering and System Safety* 2003; 82(3): 247-255.
3. Dedopoulos I T, Smeers Y. An age reduction approach for finite horizon optimization of preventive maintenance for single units subject to random failure. *Computers and Industrial Engineering* 1998; 34(3): 643-654.
4. Duarte J A, Caldeira J A, C T A, Trigo T P. Optimization of the preventive maintenance plan of a series components system. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2006; 83(4): 244-248.
5. Jardine A K S. *Maintenance replacement and reliability*. New York: CRC Press, 2006.
6. Liu Y, Huang H Z, Miao Q. Research on modeling and optimizing the preventive maintenance decision of series-parallel systems. *Proceedings of the First International Conference on Maintenance Engineering* 2006; 696-701.
7. Mao Z, Song B, Li Z, Hu B. Optimal method to minimize the preventive maintenance cost of parallel systems. *Journal of System Simulation* 2005; 17(4): 819-821.
8. Sim S H, Endrenyi J. Optimal preventive maintenance with repair. *IEEE Transactions on Reliability* 1988; 37(1): 92-96.
9. Tsai Y-T, Wang K-S, Teng H-Y. Optimizing preventive maintenance for mechanical components using genetic algorithms. *Reliability Engineering and System Safety* 2001; 74(1): 89-97.

Prof. Hong-Zhong Huang, Ph.D.

Xiaoling Zhang, Ph.D.

Yu Liu, Ph.D.

Yanfeng Li, Ph.D.

School of Mechanical, Electronic, and Industrial Engineering
University of Electronic Science and Technology of China
Chengdu, Sichuan, 610054, P. R. China

Wei Peng, Mr.

Zhongshan Institute
University of Electronic Science and Technology of China
Zhongshan, Guangdong, 528402, P.R.China

TRENDY ROZWOJU UTRZYMANIA RUCHU URZĄDZEŃ I MASZYN

DEVELOPMENT TRENDS IN MACHINES OPERATION MAINTENANCE

W pracy przedstawiono trendy rozwojowe utrzymania ruchu urządzeń i maszyn. Scharakteryzowano trzy okresy i trzy sposoby podejścia do utrzymania ruchu urządzeń i maszyn. Wśród koncepcji, które się pojawiły najważniejsze to: RCM (Reliability Centered Maintenance) – utrzymanie ruchu skierowane na niezawodność (strategia wg niezawodności) i TPM (Total Productive Maintenance) – całościowe utrzymanie ruchu zorientowane na produktywność (lub w wolnym przekładzie – utrzymanie ruchu zintegrowane z produkcją). Inne współczesne koncepcje utrzymania ruchu maszyn, takie jak 5S i samodzielne przeglądy techniczne zostały również zaprezentowane. W końcowej części pracy pokazano zależność jakości utrzymania ruchu maszyn technologicznych i jakości wyrobów.

Słowa kluczowe: eksploatacja maszyn, utrzymanie ruchu maszyn, RCM, TPM.

The trends in machines operation maintenance have been presented in the paper. Three methods and three periods of machines operation maintenance have been characterized. Among the concepts which have appeared, the most important ones are RCM (Reliability Centred Maintenance) – reliability oriented operation maintenance and TPM (Total Productive Maintenance) - general productivity oriented operation maintenance or operation maintenance integrated with production. Other contemporary concepts of operation maintenance as the 5S method and operator's own technical inspection have been presented too. At the end of the paper interrelationship of the quality of technological machines operation maintenance and the quality of products has been shown.

Keywords: machines operation, maintenance, RCM, TPM.

1. Rozwój koncepcji utrzymania ruchu urządzeń i maszyn, idea systematycznego i systemowego podejścia do utrzymania ruchu

Wzrastający udział bezpośrednich kosztów utrzymania ruchu w kosztach zmiennych przedsiębiorstwa, jak również sytuacja konkurencyjna, w jakiej znajdują się obecnie przedsiębiorstwa, zmuszają do intensywnego poszukiwania możliwości ich zmniejszenia. Wiele wskaźników pokazuje, że – co zresztą wiadomo już od wielu lat – rośnie nie tylko znaczenie samego utrzymania urządzeń w sprawności eksploatacyjnej, ale rosną także, absolutnie i relatywnie, koszty utrzymania tej sprawności. Stosunek kosztów utrzymania ruchu do obrotu kształtuje się na poziomie 4 – 13% (w zależności od branży) [6].

Analiza sposobów podejścia do utrzymania ruchu urządzeń i maszyn, dokonywana w perspektywie czasowej, pozwala na wyróżnienie trzech okresów [1, 3, 5], które ewolucyjnie przechodzą jeden w drugi (rys. 1):

- I. Okres reaktywnego utrzymania ruchu (reactive maintenance) – remonty po pojawieniu się uszkodzenia.
- II. Okres prewencyjnego utrzymania ruchu (preventive maintenance) – planowo - zapobiegawcze remonty.
- III. Okres prognostycznego (proaktywnego) utrzymania ruchu (predictive (proactive) maintenance) – inspekcje zapobiegawcze, monitorowanie stanu technicznego, udział operatorów urządzeń i maszyn w utrzymaniu ruchu, RCM, TPM, 5S, samodzielne przeglądy.

Okres pierwszy, trwający od zarania stosowania urządzeń i maszyn do mniej więcej początku drugiej wojny światowej, charakteryzował się doraźnym reagowaniem na wystąpienie uszkodzeń – dominowało więc reaktywne podejście do utrzymania ruchu (reactive maintenance). W tym czasie, z uwagi na stosunkowo niski poziom mechanizacji, wystąpienie awarii nie miało dużego wpływu na ciągłość produkcji. Dlatego, upraszcza-

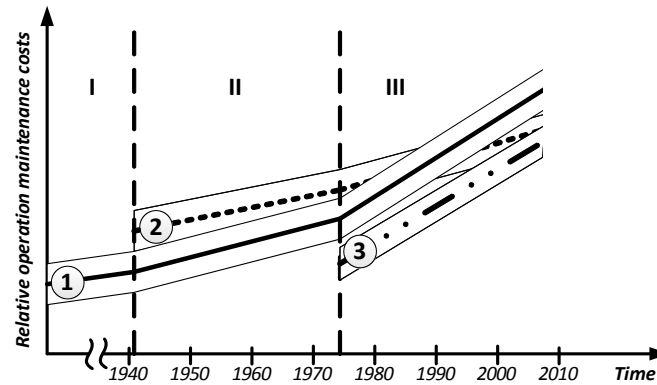
1. Concept development, the idea of systematic and systemic approach to operation maintenance

The increasing contribution of direct operation maintenance costs to the variable costs of an enterprise, as well as competition, necessitate intensive search for the possibility to reduce those costs. Many indices show that not only the importance of machine operation maintenance increases, but so do the absolute and relative costs of that maintenance (it has been known for many years). The ratio of the operation maintenance costs to the turnover, depending on the branch, is 4 – 13 % [6].

An analysis of the approaches to operation maintenance in time perspective allows for the distinction of three periods [1, 3, 5] which evolve one into another (Fig. 1):

- I. The period of reactive maintenance – repairs when a failure appears,
- II. The period of preventive maintenance – planned and preventive repairs,
- III. The period of predictive-proactive maintenance – preventive inspections, technical condition monitoring, participation of the machine operators in the operation maintenance, RCM, TPM, 5S, operator's own inspections.

The first period, from the beginning of the use of machines and devices to approximately the beginning of the Second World War, was characterized by immediate reactions to failures, i.e. reactive operation maintenance dominated. At that time, due to relatively low level of mechanization, failures had not significant influence on production continuity. Therefore, with some simplification, it can be stated that preventive actions were not necessary except cleaning and lubrication. Machines and devices were simple in their design and the service of them did not require high qualifications. Major service actions, such as machine overhaul, units' repairs or regeneration



Rys. 1. Trzy okresy rozwoju (I, II, III) i trzy sposoby (1, 2, 3) zapewniania ruchu urządzeń i maszyn: I), 1) - reaktywne utrzymanie ruchu (reactive maintenance) – remonty po pojawieniu się uszkodzenia; II), 2) - prewencyjne utrzymanie ruchu (preventive maintenance) – planowo - zapobiegawcze remonty; III), 3) - prognostyczne (proaktywne) utrzymanie ruchu [predictive (proactive) maintenance] – inspekcje zapobiegawcze, monitorowanie stanu technicznego, udział operatorów urządzeń i maszyn w utrzymaniu ruchu, RCM, TPM, 5S, samodzielne przeglądy

Fig.1. Three periods of development (I, II, III) and three methods (1, 2, 3) of machines operation maintenance: I) - reaktywne utrzymanie ruchu (reactive maintenance) – remonty po pojawieniu się uszkodzenia; II), 2) - prewencyjne utrzymanie ruchu (preventive maintenance) – planowo - zapobiegawcze remonty; III), 3) - prognostyczne (proaktywne) utrzymanie ruchu [predictive (proactive) maintenance] – inspekcje zapobiegawcze, monitorowanie stanu technicznego, udział operatorów urządzeń i maszyn w utrzymaniu ruchu, RCM, TPM, 5S, samodzielne przeglądy

jąc nieco zagadnienie, można powiedzieć, że nie było potrzeby wykonywania działań zapobiegawczych z wyjątkiem czyszczenia i smarowania. Urządzenia i maszyny były proste w konstrukcji i łatwe w utrzymaniu, a obsługa ich nie wymagała wysokich kwalifikacji. Ważniejsze czynności obsługowe, takie jak remont maszyn, naprawa zespołów czy regeneracja części, wykonywane były jako reakcja na pojawianie się uszkodzeń. Przedsiębiorstwa zorientowane były przede wszystkim na produkt i produkcję, uznając utrzymanie ruchu jedynie jako działalność pomocniczą, niedającą się zaplanować i której koszt jest trudny do przewidzenia. Pogląd ten był konsekwencją przekonania, że intensywność uszkodzeń obiektów technicznych zależy od ich wieku i związana jest z fizycznym starzeniem się.

Podczas II wojny światowej nastąpiło zmniejszenie dostępności siły roboczej, a jednocześnie wystąpił wzrost zapotrzebowania na wyroby przemysłowe, zwłaszcza dla wojska, co wywołało zwiększenie stopnia mechanizacji parku maszynowego. Od lat pięćdziesiątych wiele typów maszyn technologicznych było już sterowanych numerycznie, a ich konstrukcja stawała się coraz bardziej złożona. Wpływ znaczenia niesprawnego urządzenia na utrzymanie ciągłości produkcji znacznie wzrósł. Istotne były wówczas pytania, czy można przeciwdziałać wystąpieniu uszkodzenia i w jaki sposób powinno się to czynić. Pojawiła się wtedy koncepcja systemu planowo-zapobiegawczych remontów, którego istotą jest podejmowanie czynności obsługowych w ustalonych odstępach czasu lub po wykonaniu określonej ilości pracy (strategia według resursu).

Charakterystycznymi cechami tego przełomu w myśleniu na temat utrzymania ruchu w tamtym czasie było:

- powstanie koncepcji zapobiegania uszkodzeniom (prewencyjne utrzymanie ruchu), spowodowane zwiększeniem zależności procesów wytwarzania od stanu urządzeń i maszyn oraz zmiana poglądów na intensywność uszkodzeń,
- wzrost znaczenia systemów planowania i sterowania utrzymaniem ruchu spowodowany wzrostem kosztów utrzymania ruchu w porównaniu do innych kosztów operacyjnych,

of parts were performed as a reaction to failures. Enterprises were oriented for the product and manufacturing, considering operation maintenance as an auxiliary activity, which cannot be planned, and the cost of which is hardly predictable. That opinion was a consequence of the conviction that the intensity of failures of technical objects depends on their age and is related to their growing physically old.

During the Second World War the availability of labour decreased while the demand for industrial products, particularly those for the military forces, grew. This necessitated a higher level of mechanization of the stock of machines. Since the fifties many technological machine types were already numerically controlled and their design was increasingly complicated. The influence of a failing device on the production continuity has also grown. The question whether a failure can be prevented and how this should be effected have become important. The concept of a system of planned preventive repairs has appeared. Its essence is servicing machines and devices at predetermined time intervals or after a predetermined work is performed (strategic acc. to operational potential).

At that time, the change in thinking about operation maintenance has resulted in:

- the concept of failure prevention (preventive operation maintenance), because the manufacturing processes have become more dependent on the condition of machines and devices and the opinion on the failure intensity has changed,
- increase of the importance of the systems of planning and control of operation maintenance due to the increase of operation maintenance costs as compared to other operation costs,
- interest of enterprise management in the extension of technical object life due to the increase of the capital engaged in the machines and devices.

- zainteresowanie zarządu przedsiębiorstwa wydłużeniem czasu eksploatacji obiektów technicznych spowodowane wzrostem wartości kapitału zaangażowanego w urządzenia i maszyny.

Zastosowanie strategii wg resursu (systemu planowo-zapobiegawczych remontów) to początek myślenia w kategoriach systemu, jeżeli chodzi o utrzymanie ruchu. Od tego momentu można mówić o systemach utrzymania ruchu urządzeń i maszyn.

Strategia prewencyjnego utrzymania ruchu nie sprawdza się w przypadkach występowania znaczącej liczby uszkodzeń we wczesnej fazie użytkowania. Ten fakt oraz dalszy intensywny rozwój produkcji przemysłowej (zwiększenie liczby eksploatowanych urządzeń i maszyn o coraz większej wartości) zmieniły spojrzenie na sposoby utrzymania ruchu. Wg [3] połowa lat siedemdziesiątych XX. wieku to początek nowego podejścia do utrzymania ruchu (początek III okresu rozwoju metod utrzymania ruchu – por. rys. 1), którego kluczowym elementem było zapewnienie bezuszkodzeniowej pracy urządzeń i maszyn w całym okresie ich użytkowania. W tym czasie charakterystycznymi cechami produkcji przemysłowej rzutującymi na sposób myślenia o utrzymaniu ruchu były [1]:

- intensywne zmiany w przemyśle polegające na wzroście ilości, różnorodności i stopnia skomplikowania obiektów technicznych oraz automatyzacji i robotyzacji procesów wytwarzania,
- nowe możliwości wykonania prac w zakresie utrzymania ruchu spowodowane rozwojem narzędzi diagnostyki technicznej,
- nowe koncepcje organizacji i zarządzania przedsiębiorstwem, szczególnie ogólnosiękatowe dążenie do zarządzania zapasami w duchu koncepcji Just In Time (JIT) oraz doskonalenie jakości wyrobów metodyką Total Quality Management (TQM),
- wzrost kosztów utrzymania ruchu, w niektórych gałęziach przemysłu; jest to najwyższy lub drugi z kolei element kosztów operacyjnych. W rezultacie w ciągu 30 lat koszty utrzymania ruchu stały się priorytetem w zakresie kontroli kosztów,
- stałe podwyższanie standardów bezpieczeństwa i higieny pracy oraz kwestie ochrony środowiska naturalnego. Z roku na rok rośnie liczba wymagań prawnych, które należy przestrzegać i dostarczać obiektywne dowody ich stosowania,
- nowe poglądy na związek pomiędzy fizycznym starzeniem się maszyn i urządzeń a intensywnością uszkodzeń.

Konsekwencją wymienionych zmian było powstanie nowych koncepcji utrzymania ruchu maszyn i urządzeń. Klasyczne podejścia podkreślały znaczenie przeglądów i remontów, nowe obejmują również:

- narzędzia do wspierania decyzji: ocena ryzyka, modele intensywności uszkodzeń i analiza ich efektów oraz systemy ekspertowe,
- nowe techniki utrzymania ruchu, np. monitorowanie stanu,
- zmiany w myśleniu o organizacji prowadzące do współuczestnictwa (partycypacji) i pracy zespołowej.

Wśród koncepcji, które się wtedy pojawiły najważniejsze to RCM (Reliability Centered Maintenance) – utrzymanie ruchu skierowane na niezawodność (strategia wg niezawodności) i TPM (Total Productive Maintenance) – całościowe utrzymanie ruchu zorientowane na produktywność (lub w wolnym przekładzie – utrzymanie ruchu zintegrowane z produkcją).

The application of the strategy acc. to operational potential (the system of planned and preventive repairs) is a start of new thinking in terms of a system as regards operation maintenance. From that moment one can speak about systems of operation maintenance of machines and devices.

The strategy of preventive operation maintenance is not successful when a significant number of failures occur at an early stage of utilization. This fact and the further development of industrial production (increasing number of utilized machines and devices of growing value have changed the attitude to the methods of operation maintenance. According to Moubray [3] in the middle of the nineteen seventies the new approach to the operation maintenance has begun (beginning of the III period of the development of operation maintenance methods – compare Fig. 1), the most important element of which was the assurance of trouble free operation of machines and devices in the whole period of their exploitation. At that time, the characteristic features of industrial production, influencing the way of thinking of operation maintenance were [1]:

- significant changes in industry – increase of the number, variety and complexity of technical objects as well as automation and robot utilization in manufacturing processes;
- new possibilities of performing operation maintenance works resulting from the development of technical diagnostic tools;
- new concepts of enterprise organisation and management, particularly the world-wide tendency to manage the inventories according to the Just-In-Time principle (JIT) and improvement of product quality by the method of Total Quality Management (TQM);
- increase of the operation maintenance costs; in some branches of industry it is the highest or the second highest element of operation costs and, as a result, in 30 years operation maintenance costs have become a priority in the cost control;
- constant raising of the standards of industrial safety and the questions of environment protection: the number of legal requirements to be observed with proofs of the observance;
- new understanding of the relationship between the physical age of machines and devices and the intensity of failures.

A consequence of the above changes was new concepts of operation maintenance of machines and devices. In the classical approaches, the importance of inspections was emphasized, in the new ones the attention has also been drawn to:

- auxiliary tools for decision making, such as: risk assessment, models of failure intensity and analysis of failure results, expert systems,
- new techniques of operation maintenance, e.g. condition monitoring,
- modified understanding of organisation leading to participation and team work.

Among the concepts which have appeared then, the most important ones are RCM (Reliability Centered Maintenance – reliability oriented operation maintenance (strategy according to reliability) and TPM (Total Productive Maintenance) - general productivity oriented operation maintenance or operation maintenance integrated with production).

2. Utrzymanie ruchu zorientowane na niezawodność (RCM)

Opublikowanie koncepcji RCM na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku było pod wieloma względami milowym krokiem na drodze doskonalenia metod utrzymania ruchu. RCM to według [3] procedura polegająca na określaniu niezbędnych działań utrzymania w sprawności eksploatacyjnej urządzenia lub maszyny z uwzględnieniem warunków użytkowania. Pod uwagę brane jest ich znaczenie dla przebiegu procesu produkcyjnego i jakości wyrobu. Uwzględniana jest także kwestia warunków pracy, stanu technicznego oraz historia eksploatacji maszyny. Utrzymanie ruchu zorientowane na niezawodność jest szczególnie polecane w przypadku zagrożenie zdrowia i bezpieczeństwa publicznego.

Istotę podejścia RCM ilustruje siedem podstawowych pytań sformułowanych w 1999 roku przez International Society of Automotive Engineers [wg 1]:

1. Jakie funkcje spełnia obiekt techniczny i jakie odpowiadają im standardy osiągnięć (np. wydajności, klasy jakości produktu, kosztu eksploatacji, bezpieczeństwa) w kontekście bieżących zadań produkcyjnych?
2. W jaki sposób obiekt może zawieść w spełnianiu funkcji (w jaki sposób powstają uszkodzenia)?
3. Co może być przyczyną każdego z uszkodzeń funkcjonalnych?
4. Jakie mogą być skutki każdego z tych uszkodzeń (co się dzieje, kiedy występuje uszkodzenie)?
5. Jakie znaczenie ma każdy ze skutków tych uszkodzeń?
6. Co można zrobić, aby przewidzieć lub zapobiec każdemu z uszkodzeń?
7. Co powinno być zrobione, gdy nie można znaleźć odpowiedniego działania „proaktywnego” – zapobiegawczego?

Kluczowe w omawianej koncepcji jest pojęcie uszkodzenia (awarii). Rozróżnia się tzw. *awarię funkcjonalną*, która stanowi niemożność całego uszkodzenia albo jej zespołu lub części do wykonywania funkcji czyli do spełniania określonych warunków bądź standardów działania oraz *awarię potencjalną* – przez co rozumie się fizycznie dające się zidentyfikować oznaki, że nastąpi awaria funkcjonalna. RCM w dużym stopniu wykorzystuje monitorowanie w celu przewidywania punktu potencjalnej awarii. Umożliwia to sytuację, w której każda część może zrealizować swój pełen okres eksploatacji, a dzięki pomiarom obniżania się odporności na uszkodzenia oraz obrazowanie tendencji w wynikach tych pomiarów można przewidzieć punkt awarii.

RCM jest wykorzystywane do stworzenia systemu utrzymania ruchu od podstaw. Harmonogram prac jest zdecydowanie mniejszy niż ten powstający dzięki metodom tradycyjnym. Mniej pracy rutynowej oznacza, że pozostałe zadania można wykonać lepiej. Wraz z eliminacją nieproduktywnych zadań prowadzi to w konsekwencji do bardziej efektywnego utrzymania ruchu. Ogólny schemat metody RCM przedstawiono na rysunku 2.

Poprawne zrozumienie kroków wdrażania RCM przyczynia się w sposób zdecydowany do poprawy efektywności utrzymania ruchu. Sukces jednakże odnosi się tylko w przypadku, gdy wiele uwagi poświęcone jest planowaniu, temu jak i kto wykonuje analizy, audytom i pracy zespołowej.

Szczególne znaczenie, podczas wdrażania RCM, przypisuje się pracy zespołowej. W praktyce bowiem, specjaliści utrzyma-

2. Reliability oriented operation maintenance

Publishing of the RCM concept at the turn of the nineteen seventies and eighties was, in many aspects, a milestone in the way of improving the operation maintenance methods. According to Moubray [3] RCM is a procedure of determining the actions necessary to maintain machine's or device's efficiency considering the conditions of utilization. Their importance for the production process and for the product quality is taken into consideration. Furthermore, consideration is also given to the working conditions, technical condition and the history of the machine utilization. Reliability oriented operation maintenance is particularly recommended in the cases of public health and safety hazard.

The essence of the RCM approach is illustrated by the seven basic questions formulated by the International Society of Automotive Engineers [acc. to 1]:

1. What functions does the technical object fulfil and what performance standards correspond to it (e.g. productivity, product quality class, service cost, safety) as related to the current production assignments?
2. In what way can the object fail to fulfil its functions (in what way do failures arise)?
3. What can be the reason of each functional failure?
4. What can be the results of each of those failures (what happens when a failure occurs)?
5. What is the significance of each of the failure results?
6. What can be done in order to predict or prevent each of the failures?
7. What should be done if an adequate “proactive – preventive” action cannot be found?

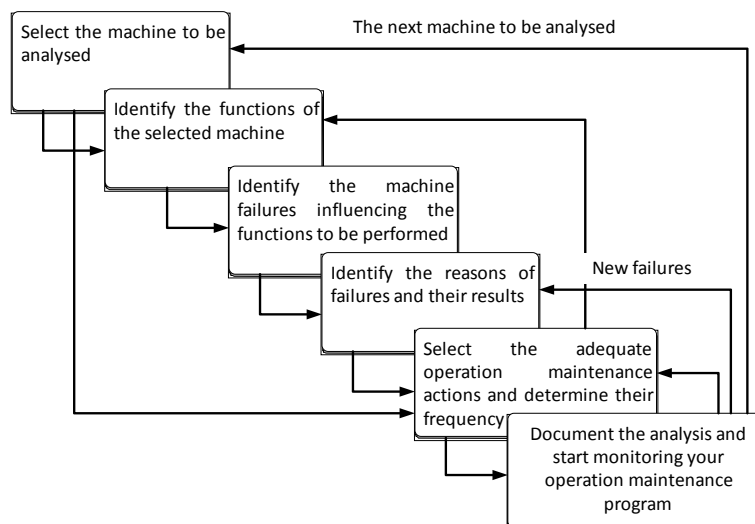
The key notion in the concept under discussion is failure. Two kinds of failures can be distinguished: a so-called **functional failure** is inability of the whole machine or its unit to perform its function, i.e. to meet the predetermined conditions or standards of operation; a **potential failure** is understood as physically identifiable symptoms indicating that a functional failure is about to take place.

In the RCM procedure, monitoring is largely used for the prediction of potential failure points. Due to that each part can realize its whole service period. The measurements of failure resistance decrease and illustration of the tendency in their results allow for the prediction of the point of failure.

The RCM procedure is used for the creation of the system of operation maintenance. The working schedule is significantly shorter than in the traditional methods. Less routine work means that the other tasks can be performed better. Combined with the elimination of unproductive tasks, this leads to more effective operation maintenance. A general layout of the RCM method can be seen in Fig. 2.

Correct understanding of the RCM implementation steps contributes to the improvement of operation maintenance effectiveness. Success, however, is reached only if much attention is devoted to planning, to the determination of how and who performs the analyses, to audits and team work.

In the implementation of the RCM, special importance is attributed to team work. This is because, in practice, the operation maintenance specialists cannot answer the seven RCM questions on their own, particularly when the questions concerning the functions, their fulfilment, effects and results of failures. That is why the requirements concerning operation mainte-



Rys. 2. Ogólny schemat postępowania w metodzie RCM [wg 1]

Fig. 2. General layout of the procedure in the RCM method [acc. to 1]

nia ruchu nie są w stanie samodzielnie udzielić odpowiedzi na podstawowe siedem pytań RCM. Dotyczy to szczególnie pytań związanych z funkcjami, ich realizacją, efektami i konsekwencjami awarii. Z tego powodu przegląd wymagań dotyczących utrzymania ruchu powinien być wykonywany przez małe zespoły, których członkami są operatorzy urządzeń i maszyn. Praca w zespole umożliwia nie tylko uzyskanie dostępu do wiedzy i opinii każdego z uczestników, ale również umożliwia zdobycie rozległej wiedzy dotyczącej działania urządzeń i maszyn.

3. Całościowe utrzymanie ruchu zorientowane na produktywność (utrzymanie ruchu zintegrowane z produkcją) TPM

TPM jest koncepcją znaną dla trzeciego okresu rozwoju idei utrzymania ruchu. Według S. Nakajimy [4] utrzymanie ruchu maszyn i urządzeń to zapewnienie im właściwej „kondycji zdrowotnej”. Definiuje on TPM, jako działanie realizowane przez każdego pracownika będącego członkiem niewielkiego zespołu w celu zapewnienia wzrostu produktywności urządzeń i maszyn.

Koncepcja TPM obejmuje swoim zakresem utrzymanie ruchu w całym przedsiębiorstwie, a jego wdrożenie związane jest między innymi z:

- zidentyfikowaniem i wyeliminowaniem podstawowych strat występujących na stanowisku pracy: strat dostępności (awarie maszyn i urządzeń, regulację i wymianę narzędzi), strat osiągnięć (bezczynność, zmniejszona prędkość operacji) i strat jakości (braki i przeróbki, straty na partie próbne),
- przygotowaniem programu zapewniającego autonomiczną realizację prac utrzymania ruchu,
- zaplanowaniem działań dla komórki organizacyjnej odpowiedzialnej za prowadzenie prac utrzymania ruchu
- podniesieniem umiejętności pracowników odpowiedzialnych za utrzymanie ruchu,
- przygotowaniem programu ukierunkowanego na optymalizację pracy nowych maszyn i urządzeń.

Istotną cechą TPM jest wprowadzenie autonomicznego utrzymania urządzeń i maszyn przez operatorów, czyli zintegro-

nance should be checked by small teams, the members of which are operators of the machines and devices. Team work allows one to learn the knowledge and opinions of each member, but also to acquire vast knowledge concerning the functioning of machines and devices.

3. General productivity oriented operation maintenance (operation maintenance integrated with production)

The TPM concept is characteristic of the third period of operation maintenance development. According to Nakajima [4] operation maintenance of machines and devices is keeping them in proper “health condition”. He defines TPM as an action performed by each employee, being a member of a small team, in order to ensure increase of the productivity of machines and devices.

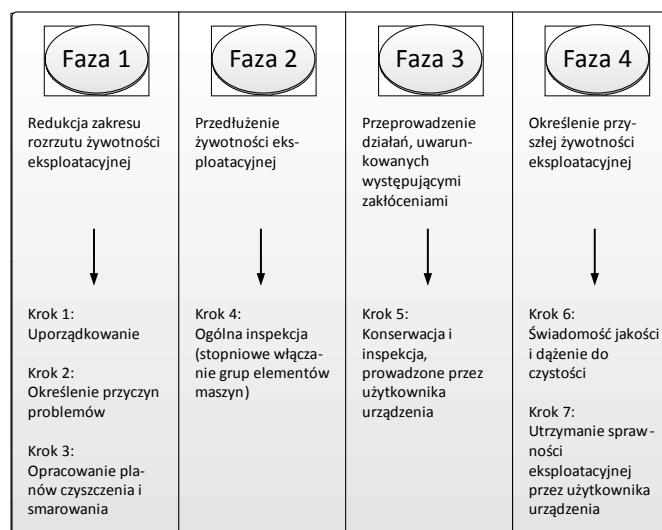
The TPM concept includes operation maintenance in the whole enterprise and its implementation involves, among others:

- identification and elimination of the basic losses occurring on the work stand: loss of availability (machine failures, adjustment and tool exchange), losses of performance (idling, decreased operation speed) and quality loss (rejects and modifications, losses due to test batches),
- preparation of a program ensuring autonomous realisation of the operation maintenance works,
- planning of the activity for the organization unit responsible for the operation maintenance works,
- improvement of the skills of the staff responsible for operation maintenance,
- preparation of a program oriented for optimization of the work of new machines and devices.

An important feature of the TPM is the introduction of autonomous keeping of machines and devices by their operators, i.e. integration of many basic service actions with the produc-

wanie wielu podstawowych czynności obsługowych z procesem produkcyjnym. Włączenie operatorów w prace na rzecz utrzymania ruchu oraz przekazanie im odpowiedzialności i uprawnień, pozwala lepiej wykorzystać posiadaną przez nich wiedzę na temat urządzeń i maszyn, wzmacnia poczucie własnej wartości u operatorów i umożliwia im świadomy udział w realizacji celów przedsiębiorstwa.

Japoński model TPM zakłada cztery fazy i siedem kroków (rys. 3) tego systemu.



Rys. 3. Kroki i fazy TPM [6]

Fig. 3. TPM steps and phases [6]

Zrealizowanie kroku siódmego – docelowego stwarza sytuację, w której operator urządzenia lub maszyny podejmuje:

- konserwację;
- czynności inspekcyjne polegające początkowo przede wszystkim na „zajrzeniu” bez narzędzi i „posłuchaniu”; należy dążyć do możliwości stosowania narzędzi pomiarowych i w tym celu odpowiednio przeszkolić użytkownika urządzenia;
- proste prace naprawcze, jak wymiana zużytych części. Poza tym, operator urządzenia lub maszyny współdziała ze służbą utrzymania ruchu podczas przestoju urządzenia.

Koncepcja TPM nie jest uniwersalnym rozwiązaniem dla wszystkich przedsiębiorstw. Jak podaje S. Nakajima [4]: „Tryb i szczegóły wykorzystania systemu TPM w celu maksymalnego zwiększenia efektywności urządzeń i maszyn należy dostosować w praktyce do indywidualnych możliwości przedsiębiorstwa. Każda firma musi opracować własny plan działania, uwzględniający wymagania i problemy charakterystyczne dla specyfiki przedsiębiorstwa, branży, metod produkcji i stanu posiadanych urządzeń i maszyn”.

Zastosowanie wspólnej koncepcji TPM i RCM przyczynia się do powstania efektu synergii w obszarze utrzymania ruchu [1]. Efekt ten jest możliwy dzięki temu, że połączone zostają praca inżynierów utrzymania ruchu (RCM) i operatorów urządzeń i maszyn (TPM). Odnotowano przykład skutecznego wdrożenia obu tych koncepcji w przedsiębiorstwie branży motoryzacyjnej. Dzięki umiejętnemu połączeniu TPM i RCM w przedsiębiorstwie tym zidentyfikowano obszary, w których operatorzy mogą unikać, zapobiegać lub dostatecznie wcześniej wykrywać awarie. Doprowadziło to do ograniczenia czynności naprawczych i umożliwiło zaangażowanie pracowników służby utrzymania ruchu w problemy wymagające specjalistycznej wiedzy. W wyniku podjętych działań dostępność obiektów technicznych wzrosła aż o 50%.

tion process. The incorporation of the operators in the works for operation maintenance and the transfer of responsibility to them allows for a better utilization of the knowledge they possess, reinforces their sense of their own value and makes them aware of their participation in the achievement of the enterprise’s objectives.

In the Japanese model of the TPM, four phases and seven steps of the system are assumed (Fig. 3).

When the seventh – final - step is executed, the machine or device operator takes over:

- conservation;
- inspection activities meaning initially “having a look” without tools and “listening” – the user should be adequately trained to enable him to apply measurement tools;
- simple repairs, such as exchange of worn parts, the operator also co-operates with the operation maintenance staff during the machine shutdown.

The TPM concept is not a universal solution for all enterprises. Nakajima [4] says: “The mode and details of the TPM system utilization for maximum increase of the effectivity of machines should be adapted in practice to the individual possibilities of each enterprise. Each company must elaborate its own plan of activity considering the specific requirements characteristic of the plant, branch, production methods and the condition of the machines and devices in its possession”.

When combined TPM and RCM concepts are applied, synergistic effect arises in operation maintenance [1]. The effect is possible due to the fact that the work of operation maintenance engineers (RCM) and that of machine and device operators (TPM) is combined. An example of successful implementation of both those concepts has been recorded in an automotive enterprise. Due to skilful combination of TPM and RCM, the enterprise has found the areas, in which the operators could avoid failures, prevent them or detect them sufficiently early. This has resulted in reduction of repairs and made it possible to engage the operation maintenance staff in problems requiring expert knowledge. As a result of the undertaken actions the availability of the technical objects has risen by as much as 50%.

4. Inne współczesne koncepcje związane z utrzymaniem ruchu

TPM wykorzystuje niektóre elementy innych wcześniej sformułowanych pomysłów organizacji stanowiska pracy oraz obserwacji urządzeń i maszyn w trakcie wykonywania ich normalnych zadań.

Jedną z takich koncepcji jest **metoda 5S** nazywana też praktykami 5S, której założeniem jest dbałość o dyscyplinę, porządek i skrupulatne gospodarowanie. Nazwa 5S pochodzi od japońskich słów:

- seiri – selekcja (pozbądź się rzeczy niepotrzebnych),
- seiso – sprzątanie (posprzątaj miejsce pracy)
- seiton - systematyka (miejsce na wszystko i wszystko na swoim miejscu),
- seiketsu – schludność (ustalaj standardy),
- shitseke – samodyscyplina (utrzymuj standardy).

Praktyki 5S to zorganizowany program angażujący wszystkich zatrudnionych do utrzymania czystych, uporządkowanych i bezpiecznych stanowisk roboczych. Jest to jedna z dróg ku pełnemu zaangażowaniu pracowników na rzecz jakości i niezawodności maszyn. Chociaż często określane jako „gospodarność”, prawdziwe znaczenie 5S zawiera w sobie znacznie więcej, niż to, co się ogólnie rozumie pod pojęciem gospodarności. Jest to metoda systematycznego wpajania dyscypliny, standaryzacji i dążenia do perfekcji.

5S stwarza środowisko, które ma istotne znaczenie podczas wdrażania innych tzw. *najlepszych praktyk*:

- 5S jest pierwszym krokiem do tworzenia u operatorów poczucia własności i dumy w stosunku do miejsca pracy,
- 5S jest istotnym krokiem do zwiększenia dbałości o urządzenia i ich konserwację przez działania prewencyjne i wczesne wykrywanie usterek,
- 5S umożliwia skracanie czasu przygotowania i przebrojenia maszyn dzięki redukcji czasu zużywanego na poszukiwanie odpowiednich części i narzędzi,
- 5S ułatwia rozwiązywanie problemów przez ujawnianie nieprawidłowości,
- 5S wspomaga kontrolę jakości przez eliminowanie zanieczyszczonych produktów i błędów operatora.

Samodzielne przeglądy techniczne (SP) to procedura opracowana na podstawie tych samych założeń, co TPM [2]. Początkowo wszelkie obserwacje funkcjonowania urządzeń i maszyn dokonywane są przez operatorów w trakcie ich normalnych zadań, jak np. obserwacja oprzyrządowania lub sprawdzanie określonych elementów z dnia na dzień, z wykorzystaniem efektów fizycznych takich jak zapach, odgłosy, drgania, temperatura, obserwacja wzrokowa, zmiany wyglądu, konieczność zastosowania siły itp., by następnie, po odbyciu szkolenia wykonywać samodzielnie inspekcje i brać na siebie pełną odpowiedzialność za przeglądy, konserwację, czyszczenie, regulacje i drobne naprawy oraz dążyć stale do udoskonalenia.

Różnica pomiędzy zasadami 5S a samodzielnymi przeglądami jest często opisywana w sposób następujący - (tabl. 1): 5S dotyczy miejsca pracy, a samodzielne przeglądy – urządzeń i maszyn.

Samodzielne przeglądy to tzw. *najlepsza praktyka* stosowana przez operatorów, którzy podejmują odpowiedzialność za opiekę i podstawową konserwację urządzeń przez ich poprawną obsługę, utrzymanie w czystym stanie, smarowanie oraz regularną kontrolę. Jeżeli w wyniku przeprowadzonej inspekcji urządzenia wykryty zostanie problem, operator sam wykonuje

4. Other contemporary concepts of operation maintenance

In the TPM system, some elements of other, previously formulated concepts of work stand organization and observation of machines when performing their normal work have been used. One of them is the **5S method** known also as the 5S practices, assuming good discipline, order and careful management. The name of 5S comes from Japanese words:

- seiri – selection (get rid of unnecessary things),
- seiso – tidying (tidy your working place),
- seiton – systematics (a place for everything and everything in its place),
- seiketsu – neatness (establish standards),
- shitseke – self-discipline (keep the standards).

The 5S practice is an organized program engaging all the employees in keeping clean, tidy and safe working stands. This is one of the ways leading to full engagement of the employees in the quality and reliability of machines. Although the practice is often defined as “thriftiness”, the true meaning of 5S is much broader than what is generally understood under thriftiness. It is a method of systematic teaching discipline, standardization and attempting at perfection.

The 5S method allows for creation of an environment that is of significant importance during implementation of other so called best practices:

- it is the first step towards the sense of property and pride of the place of work,
- it is an important step towards better care for the devices and their maintenance by preventive actions and early detection of defects,
- it allows for shortening of machine preparation due to reduction of time necessary to find adequate parts and tools,
- it facilitates problem solution by showing incorrectness,
- it boosts quality control by eliminating contaminated products and operator mistakes.

Operator’s own technical inspections (OTI) are procedure based on the same assumptions as TPM [2]. Initially, all the observations of machine and device functioning are performed by the operators during their normal works as, for example, watching the instrumentation, or day-to-day checking of predetermined elements with the use of physical effects such as smell, sounds, vibration, temperature, sight observation, changes of appearance, necessity to apply force etc. Then, after training, the operators perform inspections on their own, take full responsibility for the inspections, maintenance, cleaning, adjustments and small repairs; they also permanently attempt at improvements.

The difference between the 5S principles and the operator’s own inspections are often described in the following way (tab. 1): 5S concern the place of work, but operator’s own inspections – machines and devices.

Operator’s own inspections are the so called **best practice** used by operators who take the responsibility for the equipment and the basic maintenance by their correct service, keeping clean, lubrication and regular checks. If a problem is detected as a result of inspection, the operator performs small repairs himself and notifies the servicing staff about serious failures. Advantages of operator’s own inspections are as follows:

- lower machine failure frequency,
- higher machine efficiency,

Tab. 1. Porównanie samodzielnych przeglądów i 5S [2]
 Tab. 1. A comparison of operator's own technical inspections and the 5S [2]

Samodzielne przeglądy / Operator's own technical inspections	5S
Etap 1. Wstępne czyszczenie Stage 1. Initial cleaning	<ul style="list-style-type: none"> Sortowanie – akcja związana z usunięciem niepotrzebnych przedmiotów / sorting – action related to removal of unnecessary objects Czyszczenie – wstępne czyszczenie / cleaning – initial cleaning
Etap 2. Eliminacja źródeł zanieczyszczeń oraz obszarów niedostępnych Stage 2. Elimination of contamination sources and inaccessible areas	<ul style="list-style-type: none"> Czyszczenie – ułatwianie czyszczenia / cleaning – facilitation of cleaning
Etap 3. Ustalenie standardów czyszczenia, smarowania i sprawdzania Stage 3. Establishment of cleaning, lubrication and checking standards	<ul style="list-style-type: none"> Czyszczenie / cleaning Standaryzacja / standardization
Etap 4. Ogólna inspekcja urządzenia Stage 4. General inspection of the device	<ul style="list-style-type: none"> „Czyszczenie i myślenie” / “cleaning and thinking”
Etap 5. Samodzielna inspekcja Stage 5. Operator's own inspection	<ul style="list-style-type: none"> „Czyszczenie i myślenie” / “cleaning and thinking” Standaryzacja / standardization
Etap 6: Kontrola i zarządzanie miejscem pracy Stage 6. Working stand control and management	<ul style="list-style-type: none"> Organizacja z wykorzystaniem pomocy wizualnych / organization with the use of visual aids Standaryzacja / standardization
Etap 7. W pełni autonomiczne przeglądy Stage 7. Fully autonomous inspections	<ul style="list-style-type: none"> Utrzymywanie dyscypliny / keeping discipline

drobne naprawy, a poważniejsze awarie zgłasza mechanikom.

Korzyści z samodzielnych przeglądów to:

- mniejsza awaryjność maszyn,
- większa efektywność maszyn,
- dłuższy okres użytkowania maszyn,
- większe poczucie własności i odpowiedzialności,
- pracownicy działu utrzymania ruchu mają większą ilość czasu na bardziej zaawansowane utrzymanie ruchu i analizę przyczyn awarii
- lepsze wykorzystanie potencjalnych umiejętności operatorów,
- utrzymanie ruchu zajmuje mniej czasu.

5. Podsumowanie

Sposób utrzymania ruchu określonych urządzeń i maszyn zależy od ich charakterystyki konstrukcyjnej i roli, jaką spełniają w procesie produkcyjnym. Urządzenia skomplikowane, kosztowne i pracujące w zautomatyzowanych liniach technologicznych powinny być utrzymywane bardzo starannie. Ich awaria powoduje, bowiem przestój całej linii. Strategię eksploatacyjną należy, więc dostosować do konkretnych urządzeń i maszyn oraz warunków ich eksploatacji. Można zatem, w praktyce warsztatowej, spotkać się obecnie z zastosowaniem każdego z podejść pokazanych na rysunku 1.

Analizując natomiast współczesne koncepcje (z III okresu – rys. 1) utrzymania ruchu obiektów technicznych można zauważyć odmienną w identyfikowaniu i rozwiązywaniu problemów oraz postrzeganiu roli utrzymania ruchu w przedsiębiorstwie w stosunku do lat ubiegłych [1]. Nowe podejście do utrzymania ruchu charakteryzuje się przede wszystkim [1, 3]:

- unikaniem, redukowaniem lub eliminowaniem uszkodzeń, a nie tylko zapobieganiem,
- uwzględnieniem w ramach utrzymania ruchu bezpieczeństwa ludzi i ochrony środowiska naturalnego, jakości produktu i poziomu obsługi klientów, a nie tylko kosztów,
- odejściem od poglądu wiążącego wiek urządzeń i maszyn z intensywnością ich uszkodzeń,
- określeniem częstotliwości działań utrzymania ruchu na podstawie symptomów uszkodzeń, a nie na podstawie wskaźników awaryjności urządzeń i maszyn,

- longer machine utilization period,
- better sense of property and responsibility,
- the operation maintenance staff have more time for more advanced operation maintenance, and analysis of failure reasons,
- better utilization of the operator's potential skills,
- less time for operation maintenance.

5. Conclusions

The method of operation maintenance of specific machines and devices depends on their design characteristics and the role they play in the production process.

Complicated, expensive devices working in automated technological lines should be maintained very carefully as their failure causes shutdown of the whole line. Therefore, the exploitation strategy should be adapted to the specific machines and devices and to the working conditions. Consequently, in workshop practice, one can find each of the approaches shown in Fig.1.

When analysing the contemporary concepts of operation maintenance (those of period III – Fig. 1) one can observe different identification and solution of problems and different perception of the role of operation maintenance in an enterprise as compared to periods I and II [1]. The new approach to operation maintenance is characterized by [1, 3]:

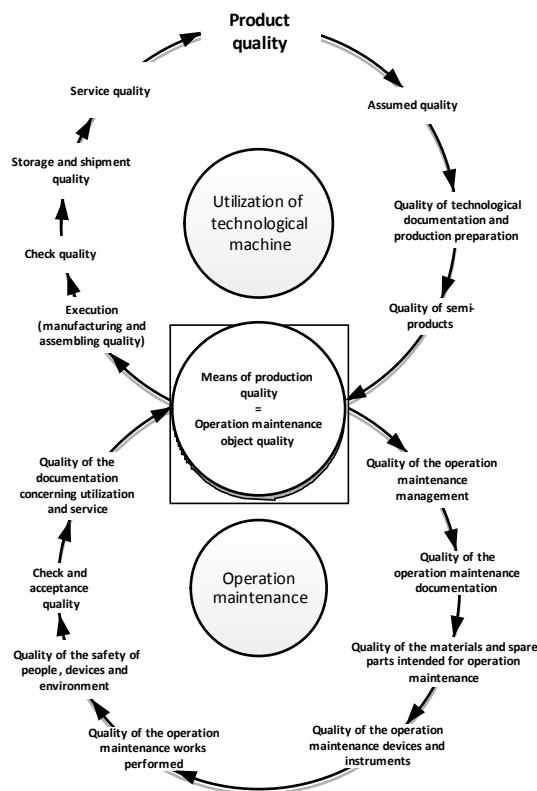
- avoidance, reduction or elimination of failures, not only preventing them;
- incorporation of people's safety and natural environment protection, product quality and the level of customer service, and not only costs, into the operation maintenance;
- abandoning of the opinion relating the age of the machines with the intensity of their failures;
- determination of the frequency of operation maintenance actions basing on failure symptoms, not on the failure frequency indices;

- opracowywaniem wspólnych metod utrzymania ruchu tylko dla maszyn identycznych, których zasady eksploatacji, funkcje i oczekiwane standardy realizacji są również identyczne,
- samodzielnym opracowywaniem programów utrzymania ruchu w przedsiębiorstwie przy rozsądnym uwzględnieniu zaleceń producenta, a nie traktowaniem producenta jako jedyne uprawnionego do ich opracowania,
- opracowaniem programów utrzymania ruchu przez służbę utrzymania ruchu i operatorów, a nie tylko przez służbę utrzymania ruchu,
- uznaniem zaangażowania pracowników (wszystkich poziomów zarządzania) w działania utrzymania ruchu jako kluczowego czynnika sukcesu, a nie tylko działań technicznych realizowanych przez służbę utrzymania ruchu,
- uznaniem utrzymania ruchu jako strategicznego obszaru przedsiębiorstwa, a nie tylko jako gospodarki pomocniczej.

Utrzymanie ruchu jest ze-
spolone z wysiłkami przedsię-
biorstwa produkcyjnego ma-
jącymi na celu wytworzenie
produktu o wysokiej jakości. Ja-
kość środków produkcji (a więc
urządzeń i maszyn) decydująca
w dużej mierze o jakości wyro-
bów, zależna jest, bowiem od
jakości czynności utrzymania
ruchu (rys. 4).

- elaboration of common operation maintenance methods only for identical machines whose exploitation principles, functions and expected execution standards are identical
- elaboration of operation maintenance programs by the enterprise itself with reasonable consideration of the manufacturer's, not treating him as the only one authorized to elaborate recommendations;
- elaboration of programs of operation maintenance by the operation maintenance staff and the operators, not only by the operation maintenance staff;
- recognition of the engagement of the employees of all management levels, not only the technical actions of the operation maintenance staff as the key factor of success;
- recognition of operation maintenance as a strategic area of the enterprise, not only as an auxiliary service.

Operation maintenance is
involved in the production en-
terprise's attempts at manufactur-
ing high quality product. It is so
because the quality of the means
of production (i.e. machines and
devices), to a large extent deter-
mining product quality, depends
on the quality of operation main-
tenance (Fig. 4).



Rys. 4. Współzależność kręgu jakościowego produktu od kręgu jakościowego utrzymania ruchu [6]

Fig. 4. The dependence of the product quality circle on the operation maintenance circle [6]

6. References

1. Jasiulewicz - Kaczmarek M., Współczesne koncepcje utrzymania ruchu infrastruktury technologicznej przedsiębiorstwa, w: Koncepcje zarządzania systemami wytwórczymi, Poznań: Wydawca Instytut Inżynierii Zarządzania Politechniki Poznańskiej, 2005: 127–134.
2. Materiały szkoleniowe firmy CCA, 2001.
3. Moubay J., Maintenance management – a new paradigm, Maintenance, 1996; 11: 1.
4. Nakajima S., Introduction to TPM, Portland, Productivity Press, 1988.
5. Piersiala S., Trzecieliński S., Systemy utrzymania ruchu, w: Koncepcje zarządzania systemami wytwórczymi, Poznań: Wydawca Instytut Inżynierii Zarządzania Politechniki Poznańskiej, 2005: 114–126.
6. Werner G.W., Praktyczny poradnik konserwacji maszyn i urządzeń, Warszawa: Wydawnictwo Alfa-Weka, 1998.

Prof. dr hab. inż. Stanisław LEGUTKO

Politechnika Poznańska

Instytut Technologii Mechanicznej

Ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

tel.: + 48 61 665 25 77, fax: + 48 61 665 22 00

e-mail: stanislaw.legutko@put.poznan.pl

BUDOWA MODELU DIAGNOZOWANIA STANÓW AWARYJNYCH ORGANÓW ROBOCZYCH KOPARKI WIELOCZERPAKOWEJ

CONSTRUCTION OF DIAGNOSTIC MODELS OF THE STATES OF DEVELOPING FAULT FOR WORKING PARTS OF THE MULTI-BUCKET EXCAVATOR

Przedstawiony w pracy sposób tworzenia modelu (diagnozera) układu napędowego koparki wieloczerpakowej kołowej stosowanej w górnictwie węgla brunatnego pozwala opracować skuteczny sposób diagnozowania stanów rozwijającej się awarii. Aby opracować taki model, niezbędne było przeprowadzenie pomiarów obciążeń w celu określenia dystrybuanty momentu urabiającego. Zastosowano metody probabilistyczne do oceny stanu wszczęcia procesy działaniowego zabezpieczającego przed wystąpieniem awarii.

Słowa kluczowe: dynamika układów napędowych, monitorowanie, zabezpieczenia przeciążeniowe.

The way of constructing a power transmission model (diagnoser) of the multi-scoop wheel excavator used in brown coal mining, presented in the study, helps prepare an effective method of diagnosing the states of developing fault. In order to develop such model/diagnoser it was necessary to measure the loads to determine the distribution function of the mining moment. The probability methods were used for determining the state of initiating activities to protect against fault.

Keywords: overload protection, diagnoser, power transmission systems.

1. Wprowadzenie

Układ napędowy mechanizmu urabiającego koparki wieloczerpakowej [4] należy do najbardziej dynamicznie obciążonych zespołów maszyny. Wartości ekstremalne obciążeń wymiarują elementy konstrukcyjne niskoobrotowe w tym szczególnie elementy połączenia przekładni z kołem czerpakowym. Zależą one od warunków pracy maszyny i w przypadku utworów trudnourabialnych mogą być wielokrotnie wyższe od nominalnego momentu urabiającego na kole czerpakowym. W publikacjach [6,7,9,10] podaje się, że wartość tego momentu może być nawet pięciokrotnością momentu nominalnego. Tak wysokie wartości momentu urabiającego powodują wzrosty wartości naprężeń, które są szczególnie niebezpieczne powodując zmniejszenie trwałości zmęczeniowej lub uszkodzenie doraźne elementów układu napędowego oraz ustroju nośnego koparki [1,2]. W celu zabezpieczenia się przed skutkami takich przeciążeń proponuje się zastosowanie układu diagnostycznego, diagnozera. Układ ten rejestrując zmiany momentu urabiającego z określonym prawdopodobieństwem przewiduje stany krytyczne i powoduje zadziałanie zabezpieczenia, np. odłączenie części układu napędowego. W celu zdefiniowania układu diagnostycznego należy przeprowadzić pomiary ciągłe zmian momentu urabiającego w celu wyznaczenia dystrybuanty obciążeń, zbudować model (diagnozer) układu napędowego oraz ocenić prawidłowość funkcjonowania systemu zabezpieczającego.

1. Introduction

The power transmission system of the mining mechanism of the multi-scoop wheel excavator [4] belongs to the machine parts with the greatest dynamic load. The extreme load values influence the dimensions of the low speed construction elements, in particular the elements of the transmission connection with the scoop wheel. They depend on the conditions in which the machine works and in the case of hard formations they may be several times higher than the nominal mining moment of the scoop wheel. The literature [6,7,9,10] says that this moment may be even five times higher than the nominal one. Such high values of the mining moment increase the stress which is particularly dangerous leading to decrease in fatigue life or short-term damage of the power transmission elements and the carrying structure of the excavator [1,2]. In order to protect the machine against such overloading it is suggested to use a diagnoser. This system, by recording changes in the mining moment, is able to predict, with a specific probability, critical states and triggers off the protection measure, e.g. by switching off parts of the power transmission system. To define the diagnostic system it is necessary to carry out continuous measurements of the mining moment and define the load distribution function, to construct a model (diagnoser) of the power transmission system and assess the correctness of the protection system work.

2. Pomiary obciążeń elementów układu napędowego

Wskazanie wartości ekstremalnej obciążeń elementów mechanizmu urabiania jest utrudnione ze względu na różnorodność w budowie układów napędowych i warunków urabiania koparek. Potrzeba ich optymalnego doboru występuje np. w przypadku modernizacji układu napędowego [8]. Pozyskanie informacji o obciążeniach ekstremalnych w miejscu dokonywania przebudowy może odbywać poprzez:

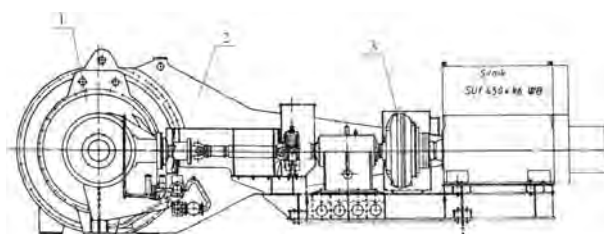
1. pomiar na elemencie konstrukcyjnym w miejscu dokonywania przebudowy,
2. pomiar na dostępnym członie mechanizmu poza miejscem dokonywania przebudowy i obliczanie z uwzględnieniem przełożeń pomiędzy stopniami [6],
3. zastosowanie diagnosty układu napędowego, którego stan modelowy jest dostrajany poprzez pomiar na obiekcie w dostępnych miejscach [5,6],
4. prowadzenie symulacji numerycznych na modelu układu napędowego [6,7].

Pomiary obciążeń przeprowadzono na koparce typu KWK 1200 (rys. 1.) eksploatowanej w Kopalni Węgla Brunatnego Turów. W układzie napędowym tej koparki (rys. 2) nie ma zabezpieczeń ograniczających przyrosty dynamiczne obciążeń podczas uderzeń. Pomiary obciążeń ekstremalnych, np. podczas uderzenia czerpaka o kamień, wykonano według metody 1 i 2. W pierwszym przypadku układ pomiarowy zamontowano bezpośrednio na wale koła czerpakowego, pomiędzy kołem a przekładnią, jak pokazano na rys. 3. Przykładowy przebieg momentu skręcającego podczas urabiania nadkładu z licznymi wtrąceniami kamieni pokazano na rys. 4. Na wykresie widoczne są przyrosty obciążenia spowodowane zderzeniami skutkującymi zatrzymaniem mechanizmu urabiania. Nadwyżki dynamiczne momentu skręcającego na wale koła czerpakowego w przypadkach kolizji skutkującymi wyłączeniem układu napędowego dochodziły do sześciokrotności momentu nominalnego. W drugim przypadku układ pomiarowy zamontowano na dźwigni momentowej, a dokładnie na łączniku tej dźwigni z konstrukcją wysięgnika koła czerpakowego (rys. 5). W tym przypadku pokazano przebieg momentu skręcającego podczas urabiania węgla (rys. 6). Obciążenia pokazane tutaj są znacznie niższe i nie przekraczają nawet połowy maksymalnego momentu dopuszczalnego dla tego układu.



Rys. 1. Koparka KWK 1200, KWB Turów

Fig. 1. Excavator KWK 1200, Brown Coal Mine Turów



Rys.2. Układ napędowy: 1 – przekładnia główna, 2 – dźwignia momentowa, 3 – sprzęgło

Fig. 2. Power transmission system: 1 – main transmission, 2 – moment lever, 3 – clutch

2. Measurements of the power transmission elements' load

It is difficult to determine the extreme load value for elements of the mining mechanism due to the differences in the transmission systems' construction and conditions in which excavators work. It is necessary to choose an optimum one e.g. while modernising a power transmission system [8]. The information on extreme loads in the place of modernisation may be acquired by:

1. measurement at the construction element at the point of modernisation;
2. measurement at the construction element accessible, other than the point of modernisation, calculated taking into consideration the shift between the stages [6];
3. using a diagnoser of the power transmission system, the model state of which is adjusted by measurements at the accessible places on the site [5, 6];
4. carrying out numerical simulations on the power transmission model [6,7].

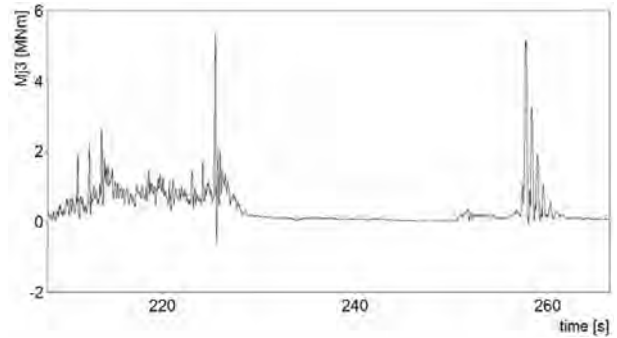
The loads were measured for excavator KWK 1200 (fig. 1) used in the Brown Coal Mine Turów. The power transmission system of this excavator (fig. 2) has no protections limiting the dynamic increases of loads during surges. The measurements of extreme loads, e.g. when a scoop hits rock were carried out using methods 1 and 2. In the first case the measurement system was installed directly on the shaft of the scoop wheel, between the wheel and transmission, as indicated in fig. 3. The example of the torque while mining an overlayer with numerous rock intrusions is presented in fig. 4. The diagram shows increases of load connected with collisions stopping the mining mechanism.

The dynamic surplus of torque at the scoop wheel shaft in the case of collision switching off the power transmission system reached the six-fold value of the nominal moment. In the second case the measurement system was installed at the moment lever, and more exactly at the joint of this lever with the structure of the scoop wheel arm (fig. 5). In this case the torque while coal mining was shown (fig. 6). These loads are much smaller and do not exceed even one half of the maximum permissible moment for this system.



Rys. 3. Przygotowanie układu pomiarowego i widok układu tensometrycznego do pomiaru momentu skręcającego na wale koła czerpakowego

Fig. 3. Preparing a measurement system and the strain gauge set for measuring the torque at the scoop wheel shaft



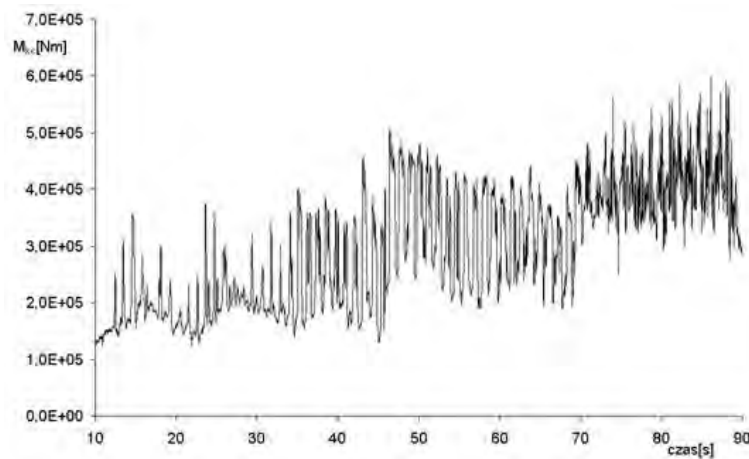
Rys. 4. Fragment przebiegu momentu skręcającego wal koła czerpakowego podczas urabiania nadkładu z licznymi wtrąceniami nieurabialnymi

Fig. 4 Part of the torque applied to the scoop wheel shaft while mining an overlayer with numerous non-mining intrusions



Rys. 5. Lokalizacja czujnika tensometrycznego na łączniku dźwigni momentowej

Fig. 5. Localisation of a strain gauge at the joint of the momentum lever



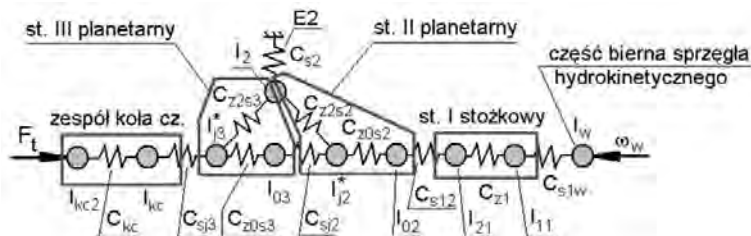
Rys. 6. Fragment zarejestrowanego przebiegu momentu na dźwigni momentowej podczas urabiania pokładu węgla

Fig. 6. Part of the torque recorded at the moment lever while mining a coal layer

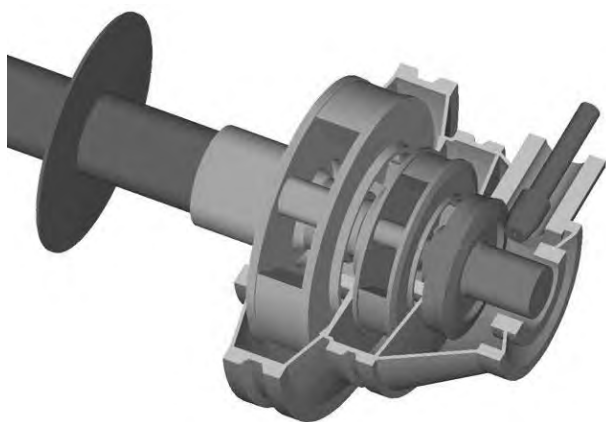
3. Model układu napędowego do diagnozowania stanów przekrytycznych

W celu przeprowadzenia symulacji numerycznych lub do diagnozowania stanu układu napędowego budowany jest model (diagnozer). Elementy mechanizmu urabiania modelowane są elementami sprężystymi i masowymi. Model ten jest uproszczony do niezbędnego minimum, z uwagi na krótki czas w dyspozycji – od chwili wejścia w stan zagrożenia do chwili, po której nie jest możliwe zrealizowanie skutecznego procesu działaniowego z wykorzystaniem istniejącego układu wykonawczego. Przykładowy model (diagnozer) pokazano na rys. 7. Sztywności i momenty bezwładności tego modelu wyznaczone zostały m.in. z użyciem modeli 3D elementów układu napędowego (rys. 8). Jego stan modelowy dostrajany jest cyklicznie do stanu diagnozowanego układu i służy do diagnozowania stanów zagrożenia. Może być też wykorzystywany do wyznaczania wartości ekstremalnych obciążeń w układzie napędowym i ustroju nośnym.

Stałe w modelu ostatecznie dobierane są na podstawie wyników badań na obiekcie. Realizuje się to podczas procedury skalowania, tj. w trakcie jednej z prób przeprowadzonych na maszynie po zadaniu skoku jednostkowego obciążenia [1,3] przy narożu czepaka (gwałtowne odciążenie napędu) przy zahamowanym układzie napędowym. Wyznaczone częstotliwości drgań własnych powinny być zgodne z częstotliwościami w modelu. Na przebiegu (rys. 9) widoczne są odcinki pomiędzy fragmentami sinusoid oznaczające kasowanie luzów w układzie. Dalszą weryfikację modelu można dokonać na podstawie wyników badań na maszynie podczas pracy (rys. 3 i 4). Dotychczasowe wyniki badań na obiekcie fizycznym i symulacji numerycznych wskazują bardzo istotne znaczenie podatności wysięgnika koła czepakowego w szacowaniu wartości ekstremalnej obciążeń.



Rys. 7. Model – diagnozer układu napędowego koła czepakowego
Fig. 7. Model/diagnoser of the scoop wheel transmission system

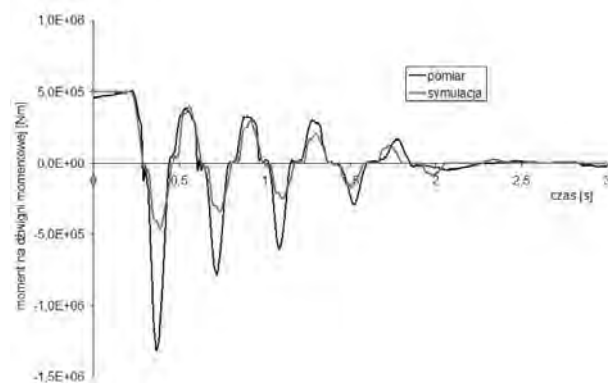


Rys. 8. Model 3D elementów układu napędowego koła czepakowego
Fig. 8. 3D model of elements of the scoop wheel transmission system

3. Power transmission model for diagnosing pre-critical states

In order to carry out numerical simulations or diagnose the condition of the power transmission system a model (diagnoser) is constructed. Elements of the mining mechanism are modelled with elastic and solid parts. This model is simplified due to shortage of time – between the start of the threatening situation and the time when it is impossible to implement any action using the existing system. An example of the model (diagnoser) is presented in fig. 7. The stiffness and moment of inertia of this model were determined using among others 3D models of power transmission elements (fig. 8). Its model state is adjusted regularly to the state of the diagnosed system and is used for diagnosing fault threats. It can also be used for determining extreme values of loads in the power transmission system and the carrying structure.

The constant values for a model are ultimately chosen basing on the measurements on the machine. It is obtained in the course of a calibration procedure, that is one of tests on the machine after setting a range of a unit load [1,3] at the corner of the scoop (sudden relief of the power transmission system) with a stopped power transmission system. The determined frequencies of free vibrations should correspond to the frequencies in the model. The diagram (fig. 9) shows sections between the sinusoid fragments which indicate the process of alleviating backlash in the system. A model may be further verified basing on the results of measurements carried out on a working machine (fig. 3 and 4). The results of the test carried out so far on the physical object and numerical simulations indicate importance of the scoop wheel arm susceptibility in the process of determining the maximum load values.



Rys. 9. Porównanie przebiegów momentu na dźwigni momentowej uzyskanych w wyniku pomiaru na obiekcie i przeprowadzenia symulacji

Fig. 9. Comparison of torque at the moment lever obtained while measuring on the site and simulating

4. Analiza obciążeń – kryteria oceny metody diagnostycznej

W sytuacji gdy czas wzrostu awarii nie wystarcza do przeprowadzenia wystarczająco krótkiego procesu diagnozowania i odparowania awarii szansą na ocenę sytuacji technicznej można upatrywać w symptomach poprzedzających stan zagrożenia. Dotychczasowe doświadczenia w obrębie koparek kołowych wskazują, że udary wywołane uderzeniem naczynia koła czerpakowego w przeszkodę trudnourabialną często poprzedzone są jednym lub kilkoma słabszymi udarami (rys. 4). Najprostszą w realizacji diagnozę może dokonać poprzez porównanie wyniku pomiaru obciążenia mechanizmu urabiania. Każdemu pomiarowi przypisywane byłoby zdarzenie osiągnięcia jednego z trzech wytypowanych przedziałów obciążeń (naprężeń): 1 – dopuszczalnego, 2 – granicznego, 3 – krytycznego (awaryjnego). Przedział 3 odcięty jest od dołu wartością krytyczna obciążeń w_{kr} , której ze względów na wytrzymałość lub trwałość elementów konstrukcyjnych należy bezwzględnie unikać. Ze względu na losowość symptomu diagnostycznego wartość graniczna w_{gr} wyznaczana byłaby okresowo dla danych warunków urabiania i stanowiłaby kompromis pomiędzy wykrywalnością udarów, a możliwym spadkiem wydajności maszyny.

Do oceny metody i doboru w_{gr} zestawiane byłyby zdarzenia w odstępie równym czasowi pomiędzy wysypami. Oznaczenie w wprowadzono umownie w celu uniezależnienia się od rozpatrywanej wielkości (siła, moment siły, odkształcenie, naprężenie).

W założeniu metody diagnozowania okres kroku diagnostycznego t_k (rys. 4.2) równy jest okresowi wysypów T_w :

$$T_w = \frac{1}{f_w} \quad (1)$$

gdzie f_w oznacza częstotliwość wysypów zależną od prędkości obrotowej koła czerpakowego i liczby czerpaków.

Rozpatrując możliwość wykorzystania chwilowych wzrostów obciążenia poprzedzających udar awaryjny należy uwzględnić prawdopodobieństwo podjęcia właściwej decyzji. W metodzie diagnozowania wskazano cztery możliwe sytuacje (rys. 11), które mogą zajść w trakcie pracy maszyny i im przyporządkowano następujące prawdopodobieństwa:

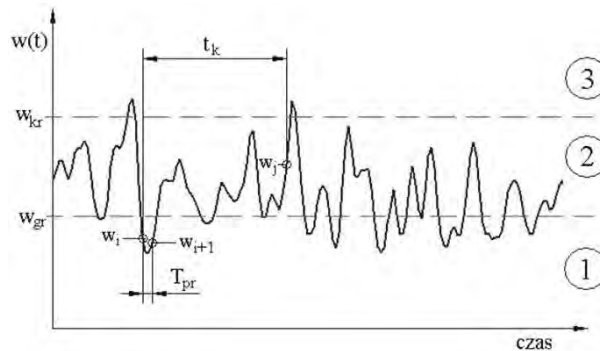
- PWA – prawdopodobieństwo wykrycia awarii,

4. Load analysis – evaluation criteria of the diagnostic method

When the time of the fault development is not sufficient for carrying out a short fault diagnosing and preventing process, the chance of evaluating the technical situation lies in the symptoms preceding the fault threat. The experience gathered so far with respect to wheel excavators indicates that the strokes connected with the scoop hitting a hard surface are frequently preceded with one or more less serious strokes (fig. 4). The simplest diagnostic method is comparison of the measurement results of the mining mechanism load. Each measurement would be ascribed one of the three scopes of load (stress): 1- permissible, 2 – border, 3 – critical (fault). Scope 3 is limited from below with a critical load value w_{kr} which should be avoided

because of the durability or resistance of structural elements. Because of the random character of the diagnostic symptom, the border value w_{gr} would be determined on a regular basis for the specific mining conditions, and would be a compromise between the stroke detectability and possible fall of the machine efficiency.

To evaluate the method and choice of w_{gr} the events taking place in time equal to time between unloading would be used. The symbol w was used to get independent from the variable discussed (force, moment of force, distortion, stress).



Rys. 10. Przedziały obciążeń: 1 – dopuszczalny dla normalnej pracy, 2 – graniczny, 3 - krytyczny (awaryjny)

Fig. 10. Scopes of load: 1 – permissible for normal works, 2 – border, 3 – critical (fault)

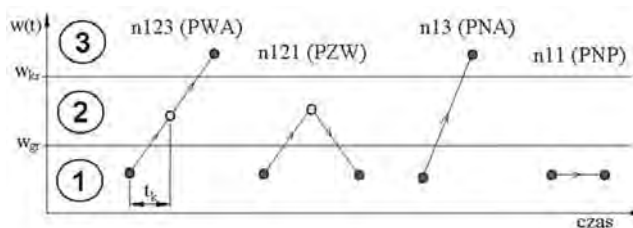
The diagnostic method assumes that the period of the diagnostic step t_k (fig. 4.2) is equal to the period of unloading T_w :

$$T_w = \frac{1}{f_w} \quad (1)$$

where f_w means the frequency of unloading dependent on the rotational speed of the scoop wheel and the number of scoops.

Considering the possibilities of using the temporary load increases preceding the fault stroke, it is necessary to provide for the probability of making a correct decision. For the diagnostic method four possible situations were indicated (fig. 11), that may occur during the machine operating, with the following probabilities:

- PWA – probability of fault detection,



Rys. 11. Aksjomat szacowania prawdopodobieństw

Fig. 11. Axiom of evaluating probability

- *PZW* – prawdopodobieństwo zbędnego wyłączenia maszyny lub zmiany parametrów urabiania, np. prędkości obrotu wsięgnika koła decydującej o grubości odcinanego wióra,
- *PNA* – prawdopodobieństwo niewykrycia awarii – przejście ze stanu 1 do stanu 3 bez wykrycia stanu z przedziału 2,
- *PNP* – prawdopodobieństwo normalnej pracy (w zakresie obciążeń dopuszczalnych) – pozostanie w przedziale 1.

Wystąpienie jednego z tych zdarzeń wyklucza pozostałe wytypowane, a inne możliwe zdarzenia nie są rozpatrywane z punktu metody diagnozowania, dlatego suma prawdopodobieństw jest równa jeden.

Jeśli poszczególne zdarzenia (obserwacje) są ciągiem losowych niezależnych wzajemnie i od czasu obserwacji, należących do zbiorowości opisanej dystrybuantą $F(w)$ i funkcją gęstości prawdopodobieństwa $g(w)$, która jest znana, wtedy prawdopodobieństwa osiągnięcia poszczególnych zakresów obciążeń w i przechodzenia między nimi możliwe są do obliczenia [5,6].

Kolejnym założeniem metody diagnozowania jest okresowe dostrajanie się diagnozera do aktualnych warunków urabiania. Nastawa diagnozera w_{gr} byłaby dobierana na podstawie stosunku (1) wyrażającego skuteczność wykrywania (prognozowania) stanów awaryjnych SM (skuteczność metody) i PZW będącego ujemnym skutkiem stosowania metody.

$$SM = \frac{PWA}{PWA + PNA} \quad (2)$$

Prawdopodobieństwa PWA , PNA , PZW i PNP szacowane byłyby na podstawie okresowo dokonywanych rozkładów statystycznych wyników pomiarów. Szukana w_{gr} dobierana byłaby wg następujących kryteriów:

$$\frac{PWA(w_{gr})}{PWA(w_{gr}) + PNA(w_{gr})} = SM(w_{gr}) \geq SM_{min} \quad (3)$$

oraz

$$PZW(w_{gr}) \leq PZW_{max} \quad (4)$$

Wartości SM_{min} i PZW_{max} dobierane byłyby przez eksploatatora. Pewną niedogodnością przedstawionego powyżej sposobu wyznaczania wartości granicznej obciążenia napędu czy naprężenia w wybranym miejscu struktury nośnej maszyny jest brak możliwości oszacowania prawdopodobieństw PWA i PNA w sytuacji, gdy w zbiorze wyników pomiarów nie zostanie przekroczona wartość krytyczna w_{kr} . Wówczas jedynym kryterium do wyznaczania w_{gr} pozostaje warunek (4).

Na rysunku 12 przedstawiono przykładowy rozkład prawdopodobieństw PWA , PNA , PZW i PNP w zależności od przyjętej wartości granicznej, przy czym posłużono się stosunkiem w_{gr}/w_{kr} . Do sporządzenia rozkładu posłużył przebieg momentu (rys. 13) na kole czerpakowym mierzony na łączniku dźwigni momentowej z konstrukcją nośną koparki.

Do wyznaczenia prawdopodobieństw przyjęto $w_{kr} = 5 \cdot 10^5$ Nm i $w_{min} = 0$. Próbką liczyła 30200 punktów, a $t_k = 1,12$ s co odpowiada częstotliwości wysypów. Dla analizowanego przebiegu skuteczność wczesnego wykrywania przekroczeń w_{kr} dla stosunku $w_{gr}/w_{kr} = 0,8$ sięga 50% przy $PZW = 0,02$ (rys. 14).

Rozkłady prawdopodobieństw wystąpienia przedziału obciążeń dopuszczalnych P1 i przejścia do przedziału obciążeń 1

- PZW – probability of unnecessary switch-off of the machine or change of the mining parameters, e.g. the speed of the wheel arm rotation determining the thickness of the chip cut,
- PNA – probability of a failure to detect a fault; change from the state 1 to state 3 without determining the state from scope 2,
- PNP – probability of a normal work (with respect to permissible loads), staying in scope 1.

Occurrence of one of these probabilities excludes the rest selected, and other possible situations are not taken into consideration from the method of diagnosing point of view, that is why the probabilities total sum equals one.

If particular events (observations) are a sequence of unrelated random values independent from the observation period, belonging to the set described with a distribution function $F(w)$ and a function of probability density $g(w)$ which is known, it is possible to calculate the probability of particular load scopes w and passage between them [5,6].

Another assumption of the diagnostic method is period adjustment of the diagnoser to the current mining conditions. The adjustment of the diagnoser w_{gr} would be chosen basing on the relation (1) expressing the effectiveness of detecting (prognosing) the faults SM (method effectiveness) and PZW being an adverse effect of applying the method.

$$SM = \frac{PWA}{PWA + PNA} \quad (2)$$

The probabilities marked as PWA , PNA , PZW and PNP would be evaluated basing on the periodic statistical distribution of measurement results, w_{gr} would be chosen according to the following criteria:

$$\frac{PWA(w_{gr})}{PWA(w_{gr}) + PNA(w_{gr})} = SM(w_{gr}) \geq SM_{min} \quad (3)$$

and

$$PZW(w_{gr}) \leq PZW_{max} \quad (4)$$

SM_{min} and PZW_{max} values would be chosen by the operator. A certain drawback of the abovementioned method of calculating the border value of the transmission system load or stress in a given place of the carrying structure of the machine is the inability to evaluate the probabilities PWA and PNA when the critical value w_{kr} is not exceeded in the measurement results. In such a situation the only criterion for determining w_{gr} is the condition (4).

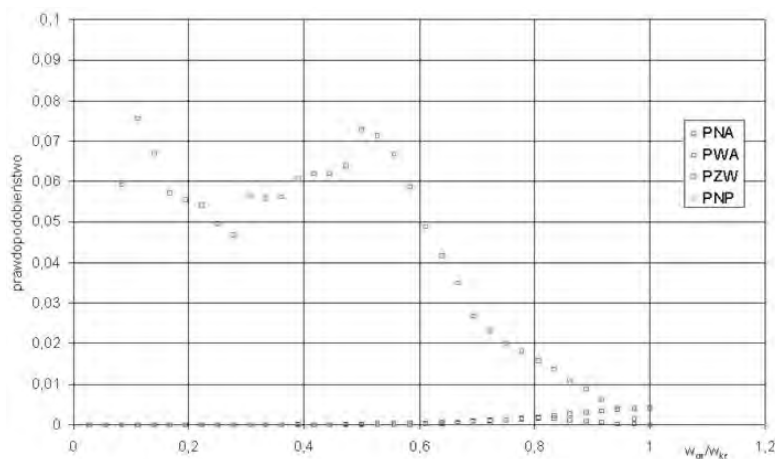
In figure 12 the example distribution of probabilities PWA , PNA , PZW and PNP is presented depending on the assumed border value, where the relation w_{gr}/w_{kr} was used. To prepare the distribution scheme the moment run (fig. 13) on the scoop wheel was used, as measured at the joint of the moment lever with the carrying structure of the excavator.

To calculate the probability the following values were assumed $w_{kr} = 5 \cdot 10^5$ Nm and $w_{min} = 0$. The sample consisted of 30200 points, and $t_k = 1.12$ s which corresponds to the frequency of unloading. For the analysed run the effectiveness of early w_{kr} exceeding detection for the relation $w_{gr}/w_{kr} = 0.8$ equals 50% where $PZW = 0.02$ (fig. 14).

The distribution of probabilities of the occurrence of the permissible loads P1 and passage to this scope presented in fig.

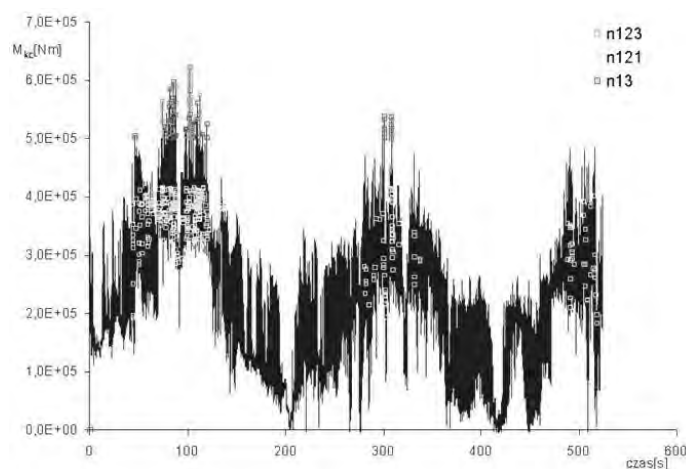
przedstawione na rys. 15 wyrażają charakter obwodowej siły kopania. Gdyby obciążenie układu napędowego podczas kopania miało charakter czysto losowy, wtedy rozkłady przedstawione na rys. 15 powinny się pokrywać. Tak jednak nie jest. Odchylenia rozkładów: P11 od P1 tak jak na rys. 15 nie tylko świadczą, o zależnościach sąsiednich zdarzeń osiągnięcia poszczególnych zakresów obciążeń, ale również wskazują, że parametry kryterialne metody PZW i SM (rys. 14) są korzystniejsze dla oceny metody niż dla przebiegów czysto losowych.

15 indicate the character of the circumferential digging force. If the transmission system load during digging was purely random, the distribution diagrams presented in fig. 15 should be identical. This is not, however, the case. The distortions between P11 and P1 distributions, as indicated in fig. 15, not only testify to the fact of neighbouring events reaching the specific load scopes, but also indicate that the critical parameters of PZW and SM method (fig. 14) are more advantageous for evaluating the method than for the purely random runs.



Rys. 12. Prawdopodobieństwa PWA, PNA, PZW i PNP w zależności od w_{gr}

Fig. 12. Probabilities PWA, PNA, PZW and PNP dependent on w_{gr}



Rys. 13. Analizowany przebieg momentu na dźwigni momentowej. Markerami zaznaczono punkty, w których zakończyła się identyfikacja wyróżnionych ciągów zdarzeń

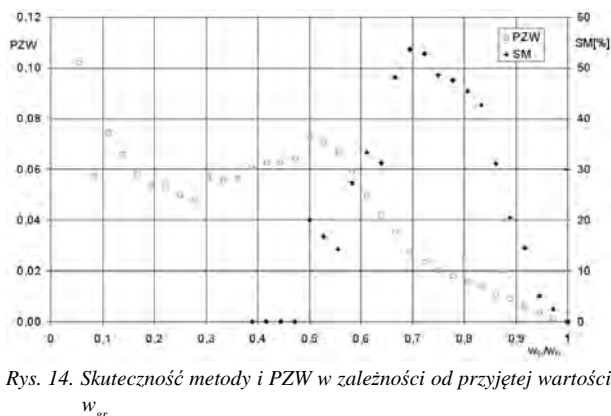
Fig. 13. The analysed run of the moment on the moment lever. The points where the identification of the separated sequences of events ended are marked with a marker

5. Podsumowanie

Pozyskiwanie wiedzy o obciążeniach układu napędowego koła czerpakowego może odbywać się przy użyciu metod doświadczalnych, numerycznych i ich kombinacji. Zaprezentowano metodę budowy modeli do diagnozowania stanów przedkrytycznych oraz metodykę oceny stanu zagrożenia i podjęcia czynności zapobiegawczych.

5. Conclusions

The knowledge on the power transmission loads of the scoop wheel may be acquired using empirical or numerical methods, or a combination of the two. The study presents methods of constructing models for diagnosing pre-critical states and the methodology of assessing the risk and undertaking preventive measures.



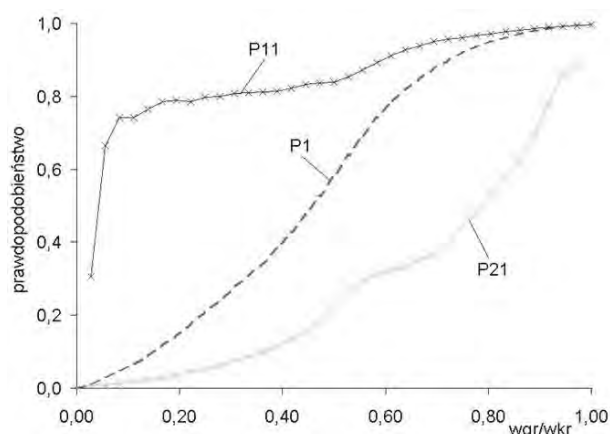
Rys. 14. Skuteczność metody i PZW w zależności od przyjętej wartości w_{gr}

Fig. 14. Effectiveness of the method and PZW depending on the assumed w_{gr} value

Zaprezentowana metodyka umożliwia oszacowanie parametrów SM i PZW do oceny metody diagnostycznej lub systemu bezpieczeństwa. Obciążenia mechanizmu urabiania mają charakter probabilistyczno-deterministyczny, a otrzymywane wartości kryterialne SM i PZW silnie zależą od amplitud i częstotliwości składowych harmonicznym przebiegów obciążeń.

6. References

1. Babiarsz S., Dudek D. Kronika awarii i katastrof maszyn podstawowych w polskim górnictwie odkrywkowym, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
2. Bosnjak S., Zrnić N., Simonović A., Momčilović D. Failure analysis of the end eye connection of the bucket wheel excavator portal tie-rod support, Engineering Failure Analysis 2009; 16: 740-750.
3. Dudek D. Elementy dynamiki maszyn roboczych. OWPW, 1994.
4. Hawrylak H., Sobolski R. Maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego. Katowice 1967.
5. Kowalczyk M. Diagnozowanie bezpieczeństwa maszyn w stanach rozwijającej się awarii. Systems 2004.
6. Kowalczyk M. Metoda diagnozowania maszyn w stanach przeciążeń awaryjnych, Praca doktorska, IKiEM PWr., Preprint Nr 11/2005, Wrocław, 2005.
7. Rusiński E., Iluk A., Woronowicz M. Untersuchung der dynamischen Belastung des Schaufelradantriebs eines Baggers mit Hilfe von Simulationen. Braunkohle 1998; 1: 15-20.
8. Rusiński E., Kowalczyk M., Czmochoński J. Wybrane zagadnienia modernizacji połączenia wału koła czerpakowego z przekładnią planetarną, Górnictwo i Geoinżynieria. 2007; 31: 533-542.
9. Schlecht B. Effektive Überlastsicherung in Schaufelradantrieben.. Braunkohle 1998; 3: 389-394.
10. Wocka N. Dynamika procesu urabiania i jej wpływ na obciążalność elementów zespołu urabiania przy koparkach kołowych pracujących w utworach urabialnych. Węgiel Brunatny 2001; 3.



Rys. 15. Rozkłady prawdopodobieństw wystąpienia zakresu obciążeń dopuszczalnych P1 i przejścia do tego zakresu

Fig. 15. Distribution of probabilities of the occurrence of the permissible loads P1 and passage to this scope

The presented methodology makes it possible to evaluate SM and PZW parameters to evaluate the diagnostic method or the security system. The loads of the mining mechanism are probabilistic and deterministic in character, and the critical SM and PZW values obtained are strongly dependent on the amplitudes and the frequencies of the harmonic components of the loads.

Dr inż. Marcin KOWALCZYK
Dr hab. inż. Jerzy CZMOCHOWSKI
Prof. dr hab. inż. Eugeniusz RUSIŃSKI

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
 Politechnika Wroclawska
 Wybrzeże Wyspiańskiego 27
 50-370 Wrocław, Polska
 e-mail: jerzy.czmochowski@pwr.wroc.pl
 e-mail: marcin.kowalczyk@pwr.wroc.pl
 e-mail: eugeniusz.rusinski@pwr.wroc.pl

WYBRANE ASPEKTY EKSPLOATACJI WIELKOGABARYTOWYCH ŁOŻYSK TOCZNYCH

SELECTED ASPECTS OF THE MAINTENANCE OF LARGE-SIZE ROLLING BEARINGS

Zapewnienie odpowiedniej trwałości węzła obrotu z wielkogabarytowym łożyskiem tocznym, ze względu na wysoki koszt oraz dostępność zamienników jest zagadnieniem o dużej wadze. Dla katalogowych łożysk wieńcowych, montowanych w większej liczbie identycznych maszyn możliwe jest określenie powtarzalnych parametrów eksploatacyjnych. W przypadku dużych łożysk wielkogabarytowych jest to utrudnione ze względu na indywidualne cechy każdej maszyny. Omówiono najważniejsze czynniki wpływające na trwałość węzła obrotu. Opisano kryterium oceny trwałości resztkowej.

Słowa kluczowe: wielkogabarytowe łożyska toczne, zużycie odkształceniowe, trwałość łożyska.

Because of the high cost and limited availability of replacements it is vitally important to ensure proper durability of the slewing unit incorporating a large-size rolling bearing. For catalogue rim bearings installed on a larger number of identical machines it is possible to determine recurring operating parameters. In the case of large-size bearing, this is rather difficult because of the unique features of each machine. Major factors affecting the life of the slewing unit are discussed. The criterion for assessing residual durability is described.

Keywords: slewing bearings, deformation wear, bearing service life.

1. Wprowadzenie

Wielkogabarytowe łożyska toczne stosowane są od prawie 80 lat do łożyskowania węzłów obrotu nadwozi maszyn roboczych oraz dźwigów i obecnie w zasadzie wyparły inne rozwiązania techniczne. Są one powszechnie stosowane w maszynach podstawowych górnictwa odkrywkowego i w tych maszynach osiągają największe średnice [1]. Koszt ich stanowi od kilku dziesiątych do kilku procent wartości nowej maszyny, jednak ich awaria prowadzi do zatrzymania całej maszyny i często znacznie większych kosztów, związanych z długotrwałym przestojem maszyny, ze względu na to, że łożyska do dużych maszyn, nawet te katalogowe, produkowane są na zamówienie. Czas oczekiwania może osiągnąć nawet 6 miesięcy. Przechowywanie na stanie magazynowym przedsiębiorstwa zamienników wymaga z kolei zamrożenia dużych środków finansowych. Niezbędny jest zatem taki dobór parametrów węzła łożyskowego, aby zapewnić odpowiednio długą eksploatację oraz opracowanie metody prognozowania trwałości użytkowej łożyska.

2. Wymagania stawiane łożyskom wielkogabarytowym

Podczas eksploatacji łożyska następuje cykliczne obciążanie bieżni, w wyniku przetaczania się elementów tocznych. Przykładowo liczba przetoczeń (liczba cykli obciążenia) L dla typowej koparki kołowej o dużym natężeniu pracy, przy założeniu 10 lat eksploatacji łożyska, 4000 godzin pracy rocznie i prędkości obrotowej nadwozia 4 obr/h przy 135 kulach wynosi 10,8 mln [11].

W tabeli 1 zestawiono liczbę ekwiwalentnych całkowitych obrotów nadwozia L_{eq} dla typowych maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego wg firmy RKS. Mniejsze łożyska wieńcowe np. stosowane w żurawiach portowych charakteryzują się większą szybkobieżnością, z czego wynika znacznie większa liczba cykli obciążenia niż dla maszyn podstawowych [10].

Należy zauważyć, że na liczbę cykli obciążenia ma także wpływ zmiana konfiguracji członu łożyskowanego w wyniku której następuje zmiana położenia środka ciężkości, nawet przy

1. Introduction

Large-size rolling bearings have been used in the body slewing units of engineering machines and cranes for nearly 80 years and today they have practically supplanted other technical solutions in this field. They are commonly used in basic surface mining machines, reaching the largest sizes in them [1]. Although they constitute from a few tenths of a percent to a few percent of the value of a new mining machine, their failure results in the stoppage of the whole machine and often entails high costs associated with long downtime since bearings for large machines (even catalogue bearings) are made to order. The waiting time can be as long as 6 months. On the other hand, keeping replacements in store would require freezing a lot of capital. Therefore what is needed are proper bearing node parameters ensuring long service, and a method of service life forecasting.

2. Requirements which large-size bearings must meet

As the bearing is working, its bearing raceway is subjected to cyclic loading by the rolling elements. For example, the number of rolling (load) cycles for a typical wheeled excavator at: high work intensity, a 10-year service life of the bearing, 4000 hours of work per annum, a body slewing speed of 4 slews/s/h and 135 balls amounts to 10.8 M [11].

Table 1 shows the number of equivalent full body slews (L_{eq}) for typical basic opencast mining machines, according to the RKS company. Smaller rim bearings, for example, the ones used in harbour cranes run at higher speeds whereby they are subjected to a much larger number of load cycles than in the case of basic mining machines [10].

One should note that the number of load cycles also depends on the borne unit configuration as a result of which the centre of gravity shifts, even at no slewing. In the case of a

Tab. 1. Liczba ekwiwalentnych całkowitych obrotów dla różnych maszyn roboczych i przeładunkowych [11]
 Tab. 1. Number of equivalent full slews for different engineering and handling machines [11].

Maszyzny robocze i przeładunkowe Engineering and handling machines	L_{eq} [obr.] L_{eq} [slews]	Maszyzny podstawowe górnictwa odkrywkowego Basic opencast mining machines	L_{eq} [obr.] L_{eq} [slews]
Żuraw samojezdny Self-propelled crane	3200	Zwałowarka Dumping conveyor	40000
Żuraw kontenerowy Container crane	63000	Koparka zgarniakowa Dragline excavator	160000
Koparka jednonacyniowa Single-bucket excavator	60000÷190000	Koparka kołowa klasy C Wheeled excavator class C	160000
Żuraw portowy Harbour crane	200000	Koparka kołowa klasy C-D Wheeled excavator class C-D	330000

braku jego obrotu. W przypadku zwałowarki może to np. być zmienny strumień transportowanego urobku.

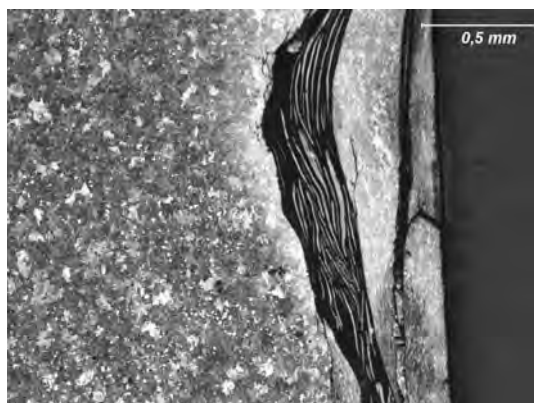
Odmienne niż dla konwencjonalnych łożysk należy wprowadzić oprócz pojęcia trwałości L , określanej jako liczba przetoczeń (cykli obciążenia) do wystąpienia pierwszych uszkodzeń (pittingu), także pojęcie trwałości użytkowej L_u , definiowanej jako liczba przetoczeń do utraty wypełniania przez łożysko swojej funkcji. W wolnobieżnych łożyskach może zachodzić duża rozbieżność pomiędzy trwałością, a trwałością użytkową [12].

Wskaźnikiem wyczerpania trwałości użytkowej dla łożysk o bieżniach monolitycznych miękkich jest zazwyczaj osiągnięcie granicznej wielkości zużycia bieżni. Ma ono początkowo postać zużycia odkształceniowego i dopiero w stadium końcowym zachodzi zmęczeniowe odspajanie materiału bieżni, który jest jednak ponownie zawalcowywany (rys. 1).

W łożyskach o bieżniach hartowanych zachodzi zmęczeniowe odspajanie materiału bieżni, a następnie złuszczyzny o dużej twardości bardzo szybko degradują całą bieżnię [6]. W tego typu łożyskach czas pomiędzy symptomami pierwszych uszkodzeń a całkowitą degradacją łożyska jest bardzo krótki, co pod względem zapewnienia ciągłości pracy maszyny jest zjawiskiem bardzo niekorzystnym (rys. 2).

3. Czynniki wpływające na czas eksploatacji

Na czas eksploatacji węzła obrotu wpływają liczne czynniki: konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne (rys. 3). Jednym z podstawowych jest ukształtowanie i sztywność podzespołów wsporczych [3].



Rys. 1. Odspojone i ponownie zawalcowane złuszczyzny w łożysku monolitycznym miękkim – widoczna warstwa smaru

Fig. 1. Spalls rolled back into raceway of soft monolithic bearing – visible film of lubricant

dumping conveyor, this may be caused by the changing flow of the transported output.

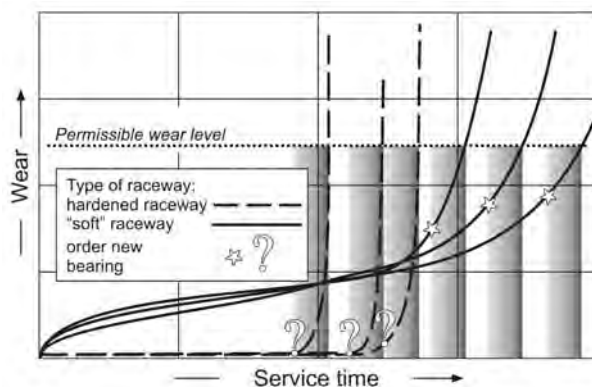
Unlike for conventional bearings, besides life L – defined as the number of rolling (load) cycles until pitting, one should also introduce the notion of service life L_s – defined as the number of rolling cycles until the bearing discontinues performing its function. In the case of slow-speed bearings there may be a large difference between their life and service life [12].

In the case of bearings with soft monolithic raceways, the fact that the bearing service life has ended is indicated by the fact that the ultimate wear-out of the raceway has been reached. Initially the wear-out manifests itself in deformation and only in the final stage, fatigue spalling of the raceway material occurs, with the latter being rolled back into the raceway (fig. 1).

In bearings with hardened raceways, fatigue spalling occurs and the hard spalls very quickly degrade the entire raceway [6]. In such bearings the time between the first symptoms of damage and the complete degradation of the bearing is very short, which is highly disadvantageous as regards the assurance of continuous machine operation (fig. 2).

3. Factors affecting service life

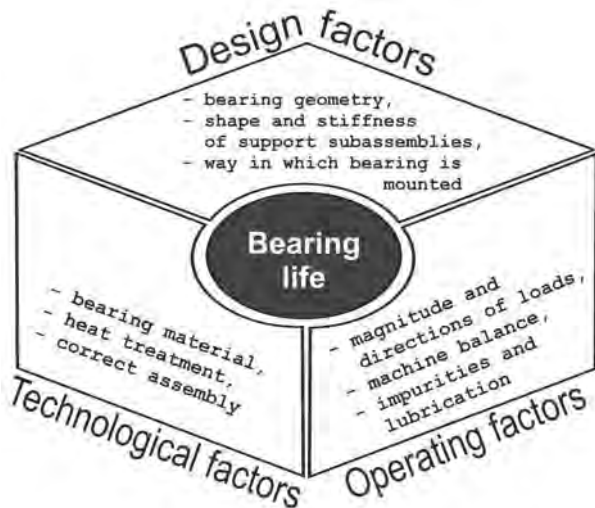
The time over which the slewing unit remains serviceable depends on design, technological and operating factors (fig. 3). One of the main determinants is the shape and stiffness of the support subassemblies [3]. For catalogue rim bearings installed



Rys. 2. Przebiegi zużycia bieżni dla łożysk o bieżniach hartowanych oraz dla bieżni monolitycznych miękkich

Fig. 2. Wear in case of hardened raceways and soft monolithic raceways

Dla katalogowych łożysk wieńcowych, montowanych w większej liczbie identycznych maszyn możliwe jest określenie powtarzalnych parametrów eksploatacyjnych [3]. W przypadku dużych łożysk wielkogabarytowych stosowanych np. w maszynach podstawowych górnictwa odkrywkowego lub maszynach przeładunkowych jest to utrudnione ze względu na indywidualne cechy każdej maszyny (każdego łożyska). Maszyny nawet tego samego typu, produkowane jednostkowo, różnią się w szczegółach konstrukcyjnych. Każda maszyna posiada inną historię eksploatacji, inaczej jest wyważona, inne są parametry powierzchni przylegania (przy montażu), niepowtarzalne jest widmo obciążeń. Na rysunku 4 zamieszczono diagram łączący liczbę lat bezawaryjnej pracy z obciążeniem właściwym kuli p_w , dla dwóch różnych stali: niestopowej stali w stanie normalizowanym oraz stali chromowo-molibdenowej w stanie ulepszonym. Wykres sporządzono na podstawie danych statystycznych, dotyczących koparek kołowych produkcji niemieckiej [9]. Przyjmuje się, że satysfakcjonujący jest 10-letni czas eksploatacji łożyska [2].



Rys. 3. Czynniki wpływające na trwałość łożyska obrotu nadwozia maszyny podstawowej górnictwa odkrywkowego

Fig. 3. Factors affecting life of basic opencast mining machine slewing unit bearing

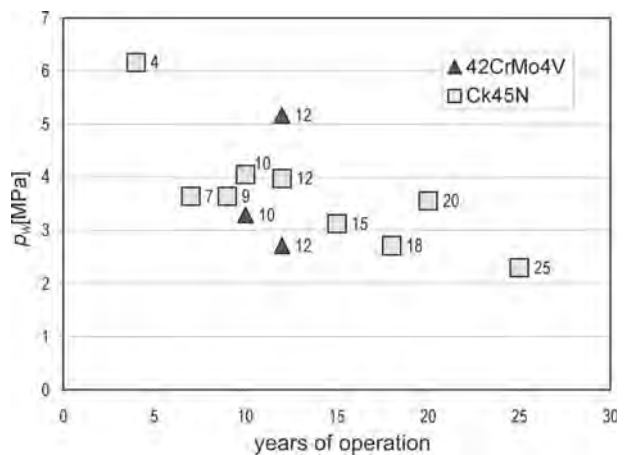
Znaczna ingerencja w podstawowe parametry konstrukcyjne łożyska jest podczas eksploatacji maszyny nieopłacalna, gdyż wiąże się to zazwyczaj z koniecznością przebudowy całego węzła obrotu. Wyjątkiem jest tu możliwość stosowania korekcji geometrii łożyska mającej na celu neutralizację wpływu nierównomiernej sztywności podzespołów współpracujących po obwodzie łożyska [7]. Przykładowy rozdział obciążenia na elementy toczne przed i po korekcji pokazano na rysunku 5. W skrajnych przypadkach możliwe jest zastąpienie łożyska o jednym szeregu kul, łożyskiem dwuszeregowym.

Większe pole do manewru zostawia dobór materiału łożyska oraz jego obróbki cieplnej i zastosowanie stali chromo-molibdenowej ulepszonej cieplnie. Wówczas znacznie maleje szybkość procesu zużycia odształceniowego [13]. Do opisu zużycia najlepsze przybliżenie wyników daje wzór w postaci:

$$\frac{\delta_{pt}}{d} = a \cdot n + b \quad (1)$$

in a larger number of identical machines it is possible to determine recurring operating parameters [3]. This would be rather difficult to do in the case of large-size bearings used in basic opencast mining machines and in handling machines because of the unique features of each machine (each bearing). Even same-type machines but manufactured individually differ in their design details. Each machine has a different operating history, is differently balanced, its (assembly) contact surface parameters are different and its load spectrum is unique. Figure 4 shows a diagram of the number of years of failure-free operation versus the specific load acting on the balls (p_w) for two different steels: normalized unalloyed steel and toughened chromium-molybdenum steel. The diagram is based on statistical data on German made wheeled excavators [9]. A ten-year bearing service life is considered to be satisfactory [2].

When the machine is in service, large intervention in the design bearing parameters is unprofitable since this usually entails alteration of the whole slewing unit. The exception here is bearing geometry correction aimed to neutralize the effect of



Rys. 4. Lata bezawaryjnej pracy łożysk wielkogabarytowych w koparkach produkcji niemieckiej w funkcji obciążenia właściwego kul, (przy symbolach podano średnicę łożyska w [m])

Fig. 4. Years of failure-free operation of large-size bearings in German made excavators versus specific load acting on balls (bearing diameter in [m] is given next to markers)

the nonuniform stiffness of the support subassemblies on the bearing's circumference [7]. An exemplary load distribution among the rolling elements before and after the correction is shown in fig. 5. In extreme cases, it is possible to replace a bearing with one row of balls with a double-row bearing.

There is more room for manoeuvre as regards bearing material selection and heat treatment and the use of toughened chromium-molybdenum steel. Then the rate of deformation wear considerably decreases [13]. The following formula gives the best approximation of the results:

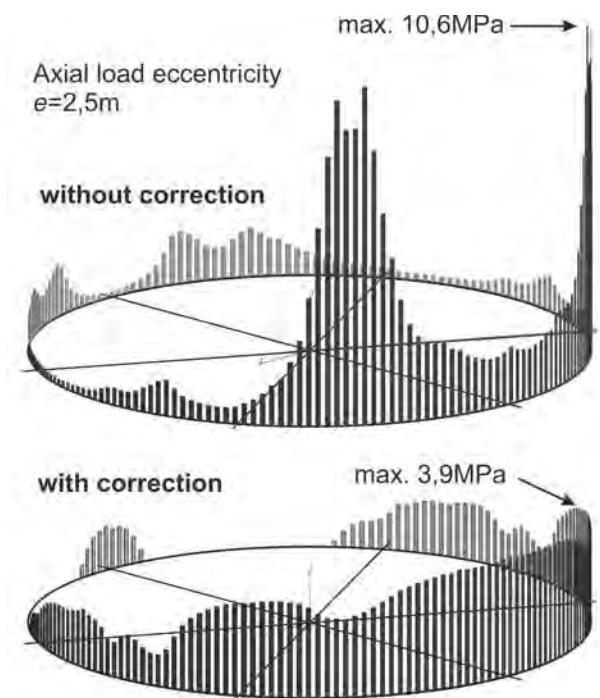
$$\frac{\delta_{pt}}{d} = a \cdot n + b \quad (1)$$

where δ_{pt} – raceway deformation wear, d – the ball diameter, n – the number of load cycles, a , b – constants dependent on rolling element specific load p_w defined as a ratio of the force loading the rolling element to the square of its diameter. Con-

gdzie δ_{pl} jest zużyciem odkształceniowym bieżni, d średnicą kuli, n liczbą cykli obciążenia, a a, b są stałymi zależnymi od obciążenia właściwego elementu tocznego p_w , definiowanego jako iloraz siły obciążającej element toczny do kwadratu jego średnicy. Stała a opisuje prędkość zużycia bieżni $d\delta_{pl}/dn$ od momentu gdy nastąpi stabilizacja zużycia materiału i zmienia się ona w zależności od obciążenia wykładniczo. Natomiast stała b opisuje zużycie odkształceniowe do momentu zanim nastąpi stabilizacja zużycia i zmienia się w zależności od obciążenia wg funkcji liniowej. W tabeli 2 przedstawiono funkcje zmiany szybkości zużycia odkształceniowego a dla dwóch powszechnie stosowanych stali [13]. Powyższe zależności wyznaczono na podstawie badań materiałowych i symulacji numerycznych metodą elementów skończonych [8,9,14].

Zastosowanie materiału o wyższej twardości możliwe jest jednak w przypadku podzespołów wsporczych o wystarczająco dużej i jednorodnie rozmieszczonej sztywności. Stal o wyższej granicy plastyczności rozwałcowuje się wolniej [4, 13], ale jest znacznie bardziej wrażliwa na przeciążenia wskutek wpływu postaci struktury wsporczej – przepływu obciążenia oraz imperfekcji geometrycznych, co w przypadku stali niestopowej normalizowanej nie ma istotnego wpływu.

Bardzo istotny jest przy stosowaniu stali ulepszonych cieplnie prawidłowo przeprowadzony proces montażu, a szczególnie zapewnienie odpowiedniej płaskości podzespołów wsporczych (rys. 6). W tym celu stosuje się wylewki epoksydowe lub obróbkę mechaniczną powierzchni pod łożysko po montażu podzespołów wsporczych. Zachowanie tak małych odchyłek w przypadku wymiany łożyska w warunkach kopalnianych jest prawie nieosiągalne.



Rys. 5. Obciążenia właściwe p_w poszczególnych elementów tocznych w łożysku zwalowarki o masie nadwozia 980Mg przed i po zastosowaniu korekcji, w [MPa]

Fig. 5. Specific load p_w of particular rolling elements in bearing of dumping conveyor with body mass of 980Mg, before and after correction, in [MPa]

stant a describes raceway wear rate $d\delta_{pl}/dn$ since the moment when material wear stabilizes, and it exponentially changes depending on the load. Constant b describes deformation wear since a moment before wear stabilization and it changes linearly depending on the load according to a linear function. Table 2 shows the function of change of deformation rate a for two commonly used steels [13]. The above relations were determined on the basis of material tests and FM numerical simulations [8, 9, 14].

A material with greater hardness can be used but only when the support subassemblies have sufficient and uniformly distributed stiffness. Steel with an elevated yield point takes longer to roll flat [4, 13], but is much more sensitive to overloads because of the influence of the support structure (the load flow and geometric imperfections). This influence in the case of normalized unalloyed steel is insignificant.

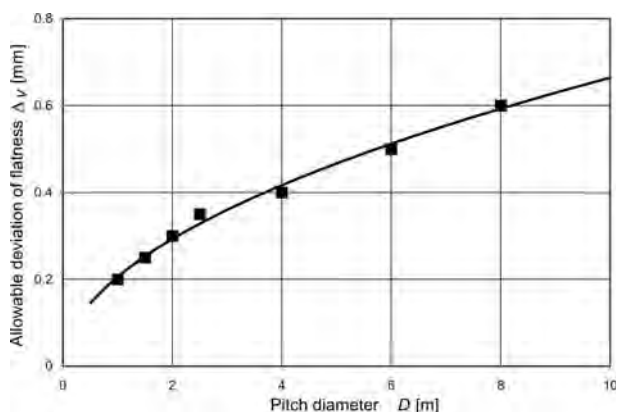
The assembly process, particularly ensuring proper flatness of the support subassemblies, is critical in the case of toughened steels (fig. 6). For this purpose when the support subassemblies have been assembled, epoxy levelling or mechanical working of the surface on which the bearing is to rest is performed. It would be practically impossible to ensure so small deviations when replacing the bearing in the mine.

The last group of factors which affect bearing durability comprises operating factors: load magnitude and lubrication [5].

The load acting on the rolling elements of the bearing is made up of the resultant of the body component weights and the forces produced by the technological processes (excavation, dumping, output transport), the working motions (travel, slewing, excursion) and the operating conditions (gradient, wind)

Tab. 2. Wartości szybkości zużycia odkształceniowego [13].
Tab. 2. Deformation wear rates [13].

Granica plastyczności [MPa] Yield point [MPa]	Prędkość zużycia a [1/cykl] Wear rate a [1/cycle]
433 (C45)	$a = 8,17 \cdot 10^{-7} e^{0,27 \cdot p_w}$
612 (42CrMo4)	$a = 2,35 \cdot 10^{-9} e^{0,30 \cdot p_w}$



Rys. 6. Dopuszczalna odchyłka płaskości podzespołów wsporczych dla łożysk katalogowych

Fig. 6. Allowable deviation of flatness for subassemblies supporting catalogue bearings

Ostatnią grupę czynników wpływających na trwałość łożyska stanowią czynniki eksploatacyjne: wielkość obciążeń oraz smarowanie [5].

Obciążenie elementów tocznych łożyska wynika z wypadkowej ciężaru mas nadwozia oraz sił wynikających z realizowanych procesów technologicznych (kopanie, zwalowanie, transport urobku), ruchów roboczych (jazda, obrót, wypad), warunków pracy (pochylenie, wiatr) oraz postaci struktury przestrzennej węzła obrotu. O wielkości tych obciążeń globalnych w maszynach podstawowych górnictwa odkrywkowego decyduje w zasadzie projektant maszyny. Przykładowy wykres zależności pomiędzy mimośrodem obciążenia łożyska e , a obciążeniem szczytowej kuli zamieszczono na rysunku 7. Przy wartości mimośrodu powyżej 0,6 promienia podziałowego łożyska R , następuje gwałtowny wzrost obciążenia elementów tocznych. Podczas wieloletniej eksploatacji wskutek prac remontowych zmienia ulega położenie środka ciężkości nadwozia maszyny. Jest to bardzo często przyczyną przyspieszonej degradacji łożyska. Dlatego konieczne jest przeprowadzanie okresowego wyważania nadwozia i korygowanie balastu.

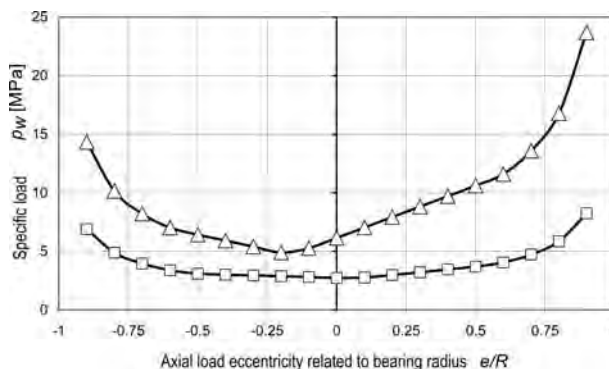
Drugą przyczyną przyspieszonej degradacji łożyska jest dostanie się do układu bieżnia – element toczny – bieżnia twardych zanieczyszczeń pochodzących z otoczenia lub też przy bieżniach ulepszonych cieplnie lub hartowanych degradacja przez odspojony materiał bieżni łożyska. Dlatego konieczne jest zwrócenie szczególnej uwagi na ochronę przestrzeni wewnętrznej łożyska (osłony), a w łożyskach o zdegradowanej bieżni powinno się przeprowadzać okresowe czyszczenie bieżni. Istotny jest tu także przyjęty rodzaj środka smarnego [5]. Przy smarowaniu olejowym drobne zanieczyszczenia i odspojony materiał są usuwane razem z olejem i odfiltrowywane. Smarowanie olejowe niesie jednak za sobą problemy z zapewnieniem szczelności.

4. Podsumowanie

Zasadniczy wpływ na trwałość łożyska wielkogabarytowego mają decyzje podjęte już na etapie projektowania, niezbędne jest jednak zachowanie pewnych wymogów podczas montażu i eksploatacji łożyska. Znaczący koszt tego typu łożysk oraz długi czas od zamówienia do wykonania wymuszają eksploatację łożysk, które w sensie technicznym są uszkodzone, dopóki, dopóty nie utracą całkowicie swojej funkcji. Zanotowano w polskich kopalniach przypadki zakleszczania się koszyków pomiędzy pierścieniami łożyska wskutek zużycia odkształceniowego bieżni. Sposób doraźnej naprawy polegał na zmniejszeniu grubości koszyków i sfrezowaniu zniszczonej powierzchni bieżni. Przez dokładne określenie dystrybucji obciążeń w łożysku [3, 9] oraz znajomość mechanizmów zużycia odkształceniowego,

and the spatial structure of the slewing unit. The above global loads in basic opencast mining machines are mainly determined by their designer. An exemplary diagram of the dependence between bearing load eccentricity e and top ball load is shown in fig. 7. At eccentricity larger than 0.6 of bearing pitch radius R the load acting on the rolling elements sharply increases. The location of the machine body's centre of gravity changes as a result of the repairs carried out in the course of many years of service. This is often the cause of accelerated degradation of the bearing. Therefore it is necessary to periodically balance the body and correct the ballast.

Accelerated bearing degradation is caused also when hard impurities from the environment get inside the *raceway-rolling element-raceway* system or by the raceway material spalls. Therefore it is absolutely necessary to protect the inner space of the bearing (using casings) and in a bearing whose raceway has been degraded the latter should be periodically cleaned. Also the lubricant plays a major role [5]. When oil is used as the lubricant, fine impurities and material spalls are removed with the oil and filtered out. But oil lubrication entails problems with ensuring tightness.



Rys. 7. Obciążenie właściwe elementu tocznego w łożysku zwalowarki o masie nadwozia 980Mg w funkcji mimośrodu obciążenia: łożysko bez korekcji – znaczniki trójkątne i po jej zastosowaniu – znaczniki kwadratowe

Fig. 7. Specific load of rolling element in bearing of dumping conveyor with 980Mg body weight versus load eccentricity: uncorrected bearing (triangles) and corrected bearing (squares)

4. Conclusion

The decisions taken as early as at the design stage have a major impact on the durability of the large-size bearing, but also certain rigours should be applied during the assembly and operation of the bearing. Because of the considerable cost of bearings of this type and the long time from the order to the manufacture, technically damaged bearings remain in operation until they completely lose their function. In the Polish mines there have been cases of bearing cage jamming between the bearing rings as a result of the deformation wear of the raceway. The temporary repair in such cases consisted in making the bearing cages thinner and in milling off the damage surface of the raceway. By precisely determining the load distribution in the bearing [3, 9] and knowing the deformation wear me-

a szczególnie przez określenie szybkości przyrostu tego zużycia [13] można prognozować pozostały czas pracy łożyska. Do tego celu niezbędne jest okresowe weryfikowanie parametrów geometrycznych łożyska przez pomiar charakterystycznych wielkości oraz przy łożyskach silnie zdegradowanych oględziny powierzchni bieżni i kontrola środka smarnego ze względu na produkty pittingu. Oprócz czynników projektowo-konstrukcyjnych istotne są także czynniki technologiczne i eksploatacyjne, a szczególnie prawidłowość montażu, monitorowanie wyważenia maszyny oraz zapewnienie odpowiedniego smarowania.

chanisms, particularly by determining the rate of increase of this wear [13], one can predict the remaining service life of the bearing. For this purpose one must periodically verify the bearing's geometric parameters by measuring the characteristic quantities and in the case of much degraded bearings, by visually inspecting the surface of the raceway and checking the lubricant for any pitting products. Besides the design-structural factors, also the technological and operating factors, in particular assembly correctness, machine balance monitoring and proper lubrication, play an important part.

5. References

1. Durst W, Vogt W. Schaufelradbagger. Clausthal: Trans Tech Publications, 1986.
2. Govindarajana N, Gnanamoorthy R. Rolling/sliding contact fatigue life prediction of sintered and hardened steels. *Wear* 2007; 1-2(262): 70-78.
3. Kania L. Modelling of rollers in calculation of slewing bearing with the use of finite elements. *Mechanism and machine theory* 2006; 11(41): 1359-1376.
4. Kunc R, Prebil I, Torkar M. Determination of low cycle carrying capacity of rolling contact. *Kovine, zlitine, tehnologije* 1999; 1-2: 125-127.
5. Leśniewski T, Krawiec S. The effect of ball hardness on four-ball wear test results. *Wear* 2008; 9-10(264): 763-769.
6. Li Y, Seireg A. Predicting the friction in rolling/sliding contacts. *ASME Journal of Tribology* 1989; 111: 386-390.
7. Przybyłek G. Metoda uzyskiwania równomiernego przeniesienia obciążenia w parach obrotowych o niejednorodnej podatności (Method of uniform transferring load in couples of rotation with heterogeneous flexibility). PhD dissertation. Institute of Machines Design and Operation: Wrocław University of Technology, 2003.
8. Rusiński E. Zasady projektowania konstrukcji nośnych pojazdów samochodowych (Principles of design of load-bearing structures of automotive vehicles). Wrocław: Wrocław University of Technology Publishing House, 2002.
9. Smolnicki T. Fizyczne aspekty koherencji wielkogabarytowych łożysk tocznych i odkształcalnych konstrukcji wsporczych (Physical aspects of coherence of large-size rolling bearings and deformable support structures). Wrocław: Wrocław University of Technology Publishing House, 2002.
10. Smolnicki T, Derlukiewicz D, Stańco M. Evaluation of load distribution in the superstructure rotation joint of single-bucket caterpillar excavators. *Automation in Construction* 2008; 3(17): 218-223.
11. Smolnicki T, Malcher K. Wpływ parametrów układu element-tocznia na jego nośność (Influence of parameters of rolling element-raceway system on its load capacity). *Przegląd Mechaniczny* 2000; 19-20: 19-22.
12. Smolnicki T, Rusiński E. Superelement-Based Modeling of Load Distribution in Large-Size Slewing Bearings. *Journal of Mechanical Design* 2007; 4(129): 459-463.
13. Stańco M. Modele analityczno-numeryczne zużycia odkształceniowego wielkogabarytowych łożysk tocznych. PhD dissertation. Institute of Machines Design and Operation. Wrocław University of Technology, 2008.
14. Zienkiewicz O C, Taylor R L. The Finite Element Method. Vol. 2. Solid Mechanics 5th edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

Dr hab. inż. Tadeusz SMOLNICKI, prof. nadzw. PWr.

Dr inż. Mariusz STAŃCO

Politechnika Wrocławska,

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn,

ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, Polska

e-mail: tadeusz.smolnicki@pwr.wroc.pl

e-mail: mariusz.stanco@pwr.wroc.pl

ANALIZA STRUKTURALNA MATRYC STOSOWANYCH DO KUCIA NA CIEPŁO W ASPEKcie ICH TRWAŁOŚCI

STRUCTURAL ANALYSIS OF HOT FORGING DIES WITH REGARD TO THEIR LIFE

Na trwałość narzędzi stosowanych w procesach kucia wpływa wiele czynników mających niekiedy przeciwstawny charakter. Żywotność matryc zależy od poprawnego ich zaprojektowania i wykonania, z uwzględnieniem odpowiedniej obróbki cieplno-chemicznej oraz mechanicznej adekwatnej do wybranego materiału, kolejności przeprowadzania kolejnych zabiegów obróbki cieplnej, a także od warunków, w jakich przebiega sam proces kucia (temperatura narzędzi i wstępniaka, geometria materiału wsadowego, prędkość procesu, rodzaj i ilość środka smarnego zapewniającego optymalne warunki trybologiczne. Innym istotnym parametrem jest rodzaj zastosowanego materiału na narzędzia. Należy wziąć pod uwagę, że producenci stali stosują swoje procedury, a skład chemiczny dla tego samego materiału może się znacznie różnić. To wszystko ma istotny wpływ na końcową jakość produktu. Przykładem wyrobu, dla którego wymagana jest wysoka trwałość narzędzi, jest odkuwka obudowy przegubu homokinetycznego. Obecnie w produkcji wielkoseryjnej takiej odkuwki stosuje się metodę wielooperacyjnego kucia na ciepło i zimno w matrycach zamkniętych ze złożonym schematem odkształcania – wyciskanie współbieżne z przeciwbieżnym. Ze względu na bardzo wysokie naciski jednostkowe, wytężenie materiału matryc jest często tak wysokie, że prowadzi to do ich przedwczesnego zużycia i niszczenia (trwałość poniżej 2000 sztuk).

Słowa kluczowe: zużycie narzędzi, kucie, trwałość narzędzi.

Many (sometimes antagonistic) factors affect the durability of tools used in forging. The life of dies depends on how well they were designed and made, including the thermochemical treatment and mechanical working, the sequence of steps in the thermal treatment and the forging process conditions (the tool and preform temperature, the charge material geometry, the process rate, the kind and amount of lubricant ensuring optimum tribological conditions). Another critical parameter is the kind of tool material. One should note that steel producers use their own procedures whereby the composition of the same steel may differ considerably between them. All this significantly affects the final quality of the product. An example of a product for which highly durable tools are required is a forging of the constant-velocity universal joint casing. Currently in large-lot production the casing is manufactured through cold and hot multioperation forging in closed dies with a complex deformation configuration (forward and backward extrusion). Because of the very high unit pressures the effort of the die material is often so high that it results in the premature wear out and failure of the dies (life below 2000 units).

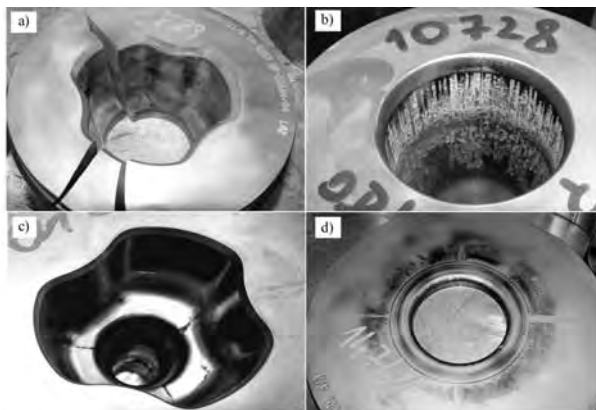
Keywords: forging, tool life, tool wear.

1. Wprowadzenie

Dane statystyczne od różnych producentów narzędzi wskazują, że w obróbce plastycznej na zimno krytyczne jest zazwyczaj pękanie zmęczeniowe narzędzi, a w obróbce plastycznej na gorąco – nadmierne zużycie ściernie, plastyczne płynięcie materiału i zmęczenie cieplne. Najtrudniejsza sytuacja jest w obróbce plastycznej na ciepło, gdzie każde z tych zjawisk może być jednakowo krytyczne. W takich warunkach narzędzia muszą przenosić bardzo duże naciski, tak jak dla kształtowania na zimno oraz jednocześnie muszą być wykonane z materiałów odpornych na temperaturę, tak jak narzędzia do pracy na gorąco. Trwałość narzędzi do pracy na ciepło jest w ogólnym przypadku zdeterminowana możliwością wystąpienia czterech zjawisk niszczących – pęknięcia (rys. 1a), zużycia ściernego (rys. 1b), zmęczenia cieplno-mechanicznego (rys. 1c) oraz odkształceń trwałych (rys. 1d). Każde z tych zjawisk może występować z różną intensywnością [22].

1. Introduction

Statistics available from different tool manufacturers indicate that in cold working usually tool fatigue cracking is critical while abrasive wear, the plastic flow of the material and thermal fatigue are critical in hot working. The most difficult situation is in hot working where each of the above phenomena may be equally critical. In such conditions the tools must bear very high pressures (as in cold forming) and they must be made of heat resistant materials (as hot working tools). The life of hot working tools is generally determined by four destructive phenomena: cracking (fig. 1a), abrasive wear (fig. 1b), thermomechanical fatigue (fig. 1c) and permanent deformations (fig. 1d). Each of the phenomena may occur with different intensity [22].



Rys. 1. Widok ogólny zużytych matryc: a) pęknięta matryca po wykonaniu 2889 odkuwek, b) intensywne zużycie ściernie matrycy, w której wykuto 10728 odkuwek, c) uszkodzenie matrycy w wyniku zmęczenia ciepłno-mechanicznego po 6045 sztukach oraz d) odkształcenie plastyczne w środkowej matrycy po wykonaniu 14741 odkuwek

Fig. 1. Shows worn out dies: a) a cracked die after 2889 forgings, b) heavy abrasive wear of a die after 10728 forgings, c) thermomechanical fatigue damage of a die after 6045 forgings and d) permanent deformation in the middle die after 14741 forgings

2. Zwiększanie trwałości matryc

W celu podniesienia żywotności narzędzi do kucia stosuje się rozmaite metody związane zarówno z doбором optymalnego materiału na narzędzia, jego obróbką ciepłno-chemiczną oraz specjalne rozwiązania konstrukcyjne. Z reguły stale narzędziowe są dostarczane z hut w wersji wyzarzonej; dalsza obróbka odbywa się u użytkownika bądź w narzędziowniach. Najczęściej stosowanym materiałem na matryce do kucia na ciepło są stale narzędziowe do pracy na gorąco typu: X38CrMoV51, X30WCrV93, 55NiCrMoV6, które charakteryzują się bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi (duża wytrzymałość na rozciąganie, twardość, duża odporność na ścieranie, wysoka granica plastyczności 2200 MPa). Dodatkowo poprzez specjalne zabiegi: ciepłno-chemiczne, poprzez stosowanie specjalnych warstw powierzchniowych (azotowanie, powłoki PVD), czy też np. laserowe stopowanie węglikiem wolframu powierzchni można znacząco poprawić ich zużycie ściernie i zwiększyć twardość, zwłaszcza w warstwie wierzchniej. Producenci stali prześcigają się w opracowywaniu zarówno wyspecjalizowanych gatunków stali, jak i ich obróbki. Przykładem może być firma Uddeholm, która wytwarza stale specjalne, nazywając je zgodnie z ich przeznaczeniem: Alvar, Dievar, Hotvar, OrvarSupreme, VidarSupreme [12,21].

Niekiedy w celu podniesienia odporności na pęknięcie narzędzi do kucia stosuje się matryce wstępnie sprężone, czyli wzmocnione przez pojedynczy pierścień, lub większą liczbę pierścieni wśrodkowych, pomiędzy którymi istnieją połączenia skurczowe lub wtlaczone. Wytworzenie odpowiednio dużego sprężenia (dużych obwodowych naprężeń ściskających) podczas montażu powinno zrekompensować bardzo duże obwodowe naprężenia rozciągające w trakcie kucia. Taki korzystny stan naprężeń w rzeczywistości może się znacznie różnić ze względu na błędy wykonania, niewłaściwie dobrane tolerancje oraz wielokrotne stosowanie nieużytych elementów narzędzi, wobec czego może dochodzić do ich przedwczesnego zużycia [1-8,18].

Ponadto należy wziąć pod uwagę również cały proces technologiczny, bowiem dobór optymalnych parametrów procesu może znacząco podnieść żywotność narzędzi oraz jakość uzyskiwanych wyrobów. Do najważniejszych czynników wpływających na poprawny przebieg procesu kucia zaliczyć można: temperaturę narzę-

2. Extending die life

Various measures, including the selection of an optimum tool material, its thermochemical treatment and special design, are used in order to extend the life of forging tools. As a rule, tool steels supplied by steel mills are in the annealed form and further working is done by the user or in tool-rooms. Hot working tool steels: X38CrMoV51, X30WCrV93, 55NiCrMoV6, characterized by very good mechanical properties (high tensile strength, hardness, high abrasion resistance, high yield stress – 2200 MPa) are the most commonly used materials for forging dies. Moreover, their abrasive wear resistance and hardness (especially in the surface layer) can be significantly improved through thermochemical treatments, the use of surface coatings (nitriding, PVD coatings) and the laser alloying of the surface with tungsten carbide. Steel producers try to outdo one another in developing specialized grades of steel and treatments for them. For example, Uddeholm produces special-purpose steels, naming them according to their intended use: Alvar, Dievar, Hotvar, OrvarSupreme, VidarSupreme [12, 21].

Sometimes prestressed dies, i.e. reinforced with a single ring or larger number of concentric rings with thermocompression bonds or forced-in joints between them, are used in order to increase the crack resistance of forging tools. The generation of suitably high prestresses (large hoop compressive stresses) during assembly should compensate for the very large hoop tensile stresses during forging. This beneficial state of stress can be much different in practice because of workmanship errors, improper tolerances and the repeated use of unworn tool parts, which may result in their premature wear [1-8, 18].

Moreover, the whole technological process should be taken into account since the choice of optimum process parameters may significantly extend the life of the tools and improve the quality of the products. The main factors having a bearing on the forging process are: the temperature of the tools and that of the preform, the geometry of the charge material, the rate of the process, lubrication and cooling and the quality of the tools.

Thus the requirements which tool materials, their heat treatment, mechanical treatment and chemical treatment, the design and workmanship of the tools and the process conditions must meet are very high. It seems that in the selection of a suitable die material and in its optimum heat treatment there is still enormous potential for extending

dzi i wstępniaka, geometrię materiału wsadowego, prędkość procesu, smarowanie i chłodzenie oraz jakość narzędzi.

Jak to przedstawiono powyżej wymagania stawiane materiałom narzędziowym, ich obróbce cieplnej, mechanicznej i chemicznej, a także konstrukcji i dokładności wykonania narzędzi oraz warunków w jakich prowadzony jest proces są więc bardzo wysokie. Wydaje się, że ogromne możliwości podniesienia trwałości matryc stosowanych w procesie kucia tkwią jeszcze w doborze odpowiedniego materiału na matryce oraz w optymalnej jego obróbce cieplnej. Badania mikroskopowe dotychczas stosowanych materiałów wspomagane poprzez MES powinny pomóc w analizie zużycia narzędzi oraz w doborze optymalnych rozwiązań materiałowych.

Celem pracy jest analiza trwałości matryc (dla 4 operacji) wykonanych przez trzech różnych producentów stosowanych w wielooperacyjnym procesie kucia na ciepło obudowy przegubu homokinetycznego.

Aby osiągnąć założony cel pracy zdecydowano się na przeprowadzenie następujących badań:

- analizy statystycznej zużycia matryc,
- badań makro i mikroskopowych na mikroskopie metalograficznym Olympus,
- pomiarów twardości,
- badań na skaningowym mikroskopie elektronowym SEM/HITACHI S-3400 N/2007 obejmującym EDX (Energy Dispersive X-ray analysis system) oraz BSE (Backscattered Electrons), pozwalających na określenie składu chemicznego oraz rozkładu pierwiastków,
- pomiarów mikroskopowych XRD (X-ray Diffraction-proszkowej dyfraktometrii rentgenowskiej) na polikrystalicznym dyfraktometrze ULTIMA IV/Rigaku/2008 wyposażonym w lampę miedziową, pozwalających na analizę fazową materiału.

3. Analiza statystyczna zużycia matryc

Narzędzia do wielooperacyjnego kucia przegubów produkowane i dostarczane są przez różnych producentów. Z doświadczenia wiadomo, że proces wytwarzania narzędzi jest różnie przez nich realizowany. Niska żywotność narzędzi może wynikać między innymi z nieprawidłowo przeprowadzonej obróbki cieplnej jak również źle wykonanej obróbki wykańczającej oraz wielu innych przyczyn, dlatego też analiza statystyczna żywotności narzędzi dostarczanych przez poszczególnych producentów umożliwi dokładniejsze rozpoznanie problemu.

Na rys.2. przedstawiono badania statystyczne w postaci wykresu trwałości matryc stosowanych w procesie kucia na ciepło (dla 4 operacji wybranej referencji, w której występują największe obciążenia) obudowy przegubu homokinetycznego w 2008 roku. Narzędzia te zostały wykonane z tego samego materiału (stal X38CrMoV5-3) przez 3 różnych producentów. Na podstawie przeprowadzonej analizy da-

the life of forging dies. Microscopic examinations of the existing materials, aided by FEM should help in the analysis of tool wear and in the choice of optimum materials.

This paper analyzes (for four operations) the durability of dies (made by three different manufacturers) used in the multioperation hot forging of the CV joint casing.

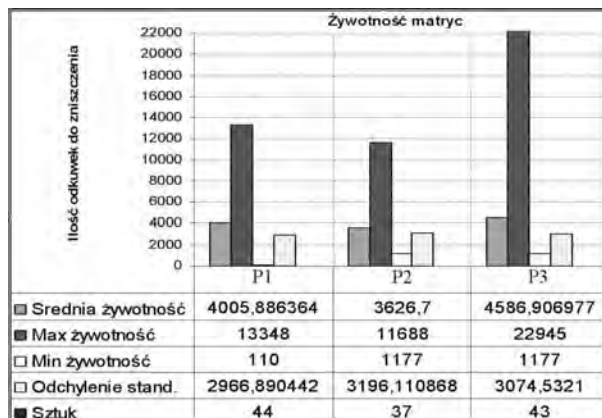
For this purpose the following investigations were carried out:

- a statistical analysis of the wear of the dies;
- macro- and microscopic examination by means of an Olympus metallographic microscope;
- hardness measurements;
- examinations by means of a SEM/HITACHI S-3400 N/2007 scanning electron microscope with AN EDX (Energy Dispersive X-ray) microanalyzer and a BSE (Backscattered Electrons) detector, making it possible to determine the chemical composition and distribution of elements;
- XRD (X-ray Diffraction) measurements by means of a ULTIMA IV/Rigaku/2008 diffractometer equipped with a copper lamp, allowing material phase analyses.

3. Statistical analysis of die wear

Tools for the multioperation forging of CV joints are manufactured and delivered by different manufacturers. It is known from experience that the tool manufacture process is differently carried out by them. Short tool life may be due to improperly performed heat treatment and finishing and to many other causes. Therefore a statistical analysis of the life of tools supplied by different manufacturers should identify the problem more closely.

Figure 2 shows the results of a statistical analysis, in the form of hot forging die life diagrams for the CV joint casing (for four operations involving highest loading), for the year 2008. The tools were made of the same material (steel X38CrMoV5-3) by three different manufacturers. The mean, maximum and minimum tool life and the standard deviation were determined on the basis of the tool life data analysis. It is apparent that the tools supplied by manufacturer P3 have the longest life.



Rys. 2. Trwałość matryc stosowanych w procesie kucia obudowy przegubu dla 4 operacji kucia na ciepło dla trzech producentów P1, P2, P3

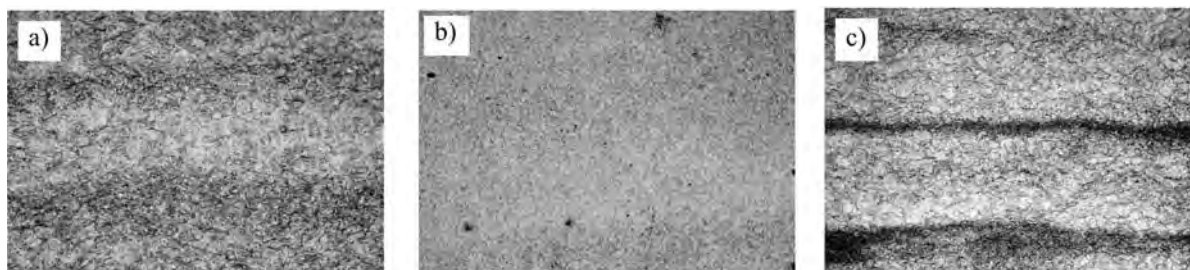
Fig. 2. Life of dies used for forging CV joint casing for four hot forging operations and three manufacturers: P1, P2 and P3

nych dotyczących trwałości narzędzi, wyznaczona została: średnia, maksymalna i minimalna żywotność oraz odchylenie standardowe. Można zauważyć, że największą trwałość posiadają narzędzia dostarczane przez producenta P3.

Na podstawie badań makro i mikroskopowych stwierdzono, że dominującymi zjawiskami niszczącymi były: zużycie ściernie, zmęczenie cieplno mechaniczne oraz wyraźnie widoczne odkształcenia trwałe, nie zaobserwowano natomiast pęknięcia. Przeprowadzone w tym kierunku dalsze badania metalograficzne zniszczonych matryc wykazały, że każdy z trzech materiałów posiada znacznie różniącą się strukturę.

4. Badania makro i mikroskopowe na mikroskopie metalograficznym Olympus

W badaniach porównano mikrostruktury zużytych narzędzi wykonanych przez trzech różnych producentów matryc. Na rys. 3 przedstawiono zdjęcia mikrostruktur (próbki pobrano ze zniszczonych matryc dla 4 operacji kucia na ciepło dla zbliżonej liczby wykonanych odkuwek do momentu zniszczenia w kierunku wzdłużnym do osi matrycy).



Rys.3. Mikrostruktura materiału X38CrMoV5-3 dla matryc stosowanych w 4 operacji kucia: a) P1, b) P2, c) P3. Przekroje wzdłużne. Pow. 200x. Trawiono Nitalem

Fig.3. Microstructure of material X38CrMoV5-3 for dies used in four forging operations: a) P1, b) P2, c) P3. Longitudinal sections. Magnification 200x. Etched with nital

Porównując powyższe mikrostruktury można zaobserwować, że w strukturze materiału P3 widać charakterystyczne pasma, na przemian ciemne i jasne, które wg dostępnej literatury są skupiskami pasmowych wydzieleni węglików. Natomiast struktury materiałów matryc wykonanych przez P2 i P3 nie wykazują wydzieleni, jedynie w strukturze P1 (rys. 3b) można zaobserwować słabo widoczne ciemniejsze pasma; struktura P2 jest całkowicie pozbawiona ciemnych wydzieleni i przedstawia martenzyt z widocznymi drobnymi wydzieleniami skoagulowanych węglików oraz innych wydzieleni. Przeprowadzono dodatkowo pomiary twardości badanych materiałów od trzech producentów narzędzi. Dla materiału od P1 twardość wyniosła 465-515HV, dla P2 odpowiednio 520-530HV oraz dla P3 odpowiednio 470-540HV. Mimo, że producenci wykonują narzędzia z tego samego materiału przedstawione struktury są różne, co może świadczyć o innym procesie obróbki cieplnej. Przeprowadzono również badania twardości w obszarach przy powierzchniach roboczych matryc, jak i w obszarach oddalonych od powierzchni roboczych matrycy. Twardości odpowiednio wynosiły: przy powierzchni roboczej ok. 480HV, w miejscu oddalonym od powierzchni roboczej 540HV.

Macro- and microscopic examinations showed that the dominant destructive phenomena were: abrasive wear, thermo-mechanical fatigue and pronounced permanent deformations. No cracking was observed. Metallographic examinations of the damaged dies showed that three materials significantly differed in their structure.

4. Macro- and microscopic examinations by means of Olympus metallographic microscope

The microstructures of the worn out tools made by the three different die manufacturers, determined by the examinations are compared in fig. 3. The samples were taken from the worn out dies for four hot forging operations and a similar number of forgings until failure, longitudinally to the die's axis.

In the above photographs, in the structure of material P3 one can see characteristic (alternately dark and light) bands, which, according to the literature, are concentrations of bandlike carbide segregations. Whereas the structures of the materials of the dies manufactured by P2 and P3 do not show any segregations. Only in the structure of P1 (fig. 3b) there are faintly visible darker bands. The structure of P2 is totally devoid of dark segregations and shows martensite with visible fine segregations of coagulated carbides and other segregations. In addition, the hardness of the materials supplied by the three tool manufacturers was measured. The P1 material was found to have a hardness of 565-515HV, P2 – 520-530HV and P3 – 470-540HV. Even though the manufacturers make tools from the same material, the presented structures differ from each other, which may indicate differences in the heat treatment process. Hardness was also tested in regions close to the active faces of the dies and at a larger distance

5. Badania na elektronowym mikroskopie elektronowym skaningowym

W tabeli 1 podano skład chemiczny stali X38CrMoV5-3 w stanie dostawy. Analiza składu chemicznego materiału (badania na spektrometrze) w stanie dostawy wykazała niemalże identyczny skład chemiczny dla wszystkich producentów. Można zatem wykluczyć wpływ zróżnicowania składu chemicznego na mikrostrukturę omawianych materiałów. Przeprowadzone wstępne badania na elektronowym mikroskopie skaningowym wyposażonym w mikroanalizator rentgenowski EDX mogą wskazywać na mikrosegregację pierwiastków stopowych domieszek takich jak molibden i wanad. Rys. 4 przedstawia mikrostrukturę materiału (P3) oraz pola oznaczone jako 1 oraz 2 w których przeprowadzono analizę EDX. Ciemne wydzielania widoczne na rys.3c widoczne są na rys.4 jako jasne pola, odwrotnie niż na mikroskopie optycznym. Pole oznaczone jako 2 i 3 wskazują miejsca analizy chemicznej pasmowych wydzieleni.

Wyniki przeprowadzonej mikroanalizy przedstawiono w tabeli 2. Można zauważyć, że w obydwu obszarach procentowy udział krzemu oraz manganu jest bardzo zbliżony. Istotne różnice występują w ilości wanadu i molibdenu. Mniejsze różnice występują w ilości chromu oraz żelaza.

Przeprowadzono również badania przy znacznie większych powiększeniach celem dokładniejszej identyfikacji rozkładu pierwiastków w poszczególnych mikroobszarach próbek. Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono na rys. 5 oraz w tabeli 3.

Można zauważyć, że w obydwu miejscach pomiarowych procentowy udział manganu jest zbliżony. Istotne różnice występują w przypadku krzemu, wanadu, chromu oraz molibdenu. W przypadku pierwszego obszaru ilość krzemu jest ok. 3 krotnie większa niż w obszarze drugim. Procentowy udział chromu jest około 5 krotnie mniejszy a molibdenu ponad 12 razy większy.

Na rys. 6 przedstawiono struktury materiału od producenta P3. Zdjęcia wykonano z użyciem detektora BSE (Backscattered Electrons).

from them. The hardness amounted to about 480HV close to the active face and to 540HV away from it.

5. SEM examinations

The chemical composition of steel X38CrMoV5-3 in delivery condition is given in table 1. A chemical composition analysis (spectrometer examinations) of the material in delivery condition showed that the materials supplied by the three manufacturers had almost the same chemical composition. Thus the effect of differences in chemical composition on the microstructure of the materials can be excluded. Preliminary examinations by means of the scanning electron microscope equipped with an EDX microanalyzer seem to indicate microsegregation of alloying elements such as molybdenum and vanadium. Figure 4 shows the microstructure of the material (P3) and areas 1 and 2 for which the EDX analysis was carried out. The dark segregations visible in fig. 3c appear as light areas in fig. 4, contrariwise than under an optical microscope. Areas 2 and 3 indicate the places for which the analysis of the chemical composition of the bandlike segregations was carried out.

The results of the microanalysis are shown in table 2. One can notice that the percentages of silicon and manganese are very similar in the two areas. There are significant differences in the amounts of vanadium and molybdenum. There are slight differences in the amounts of chromium and iron.

Examinations under much larger magnifications were also made in order to identify more closely the distribution of elements in the particular microareas of the samples. The results are shown in fig. 5 and in table 3.

One can observe that in both measuring places the percentage of manganese is similar. There are significant differences in the case of silicon, vanadium, chromium and molybdenum. In the first area the amount of silicon is about three times larger than in the second area. The percentage of chromium is about five times lower and that of molybdenum is over twelve times higher.

Tab. 1. Skład chemiczny stali X38CrMoV5-3.

Tab. 1. Chemical composition of steel X38CrMoV5-3.

Zawartość pierwiastków [%]							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,35-0,4	0,3-0,5	0,3-0,5	<0,03	<0,02	4,8-5,2	2,7-3,2	0,4-0,6

Tab. 2. Skład chemiczny stali X38CrMoV5-3 z wskazanych obszarów (punktów).

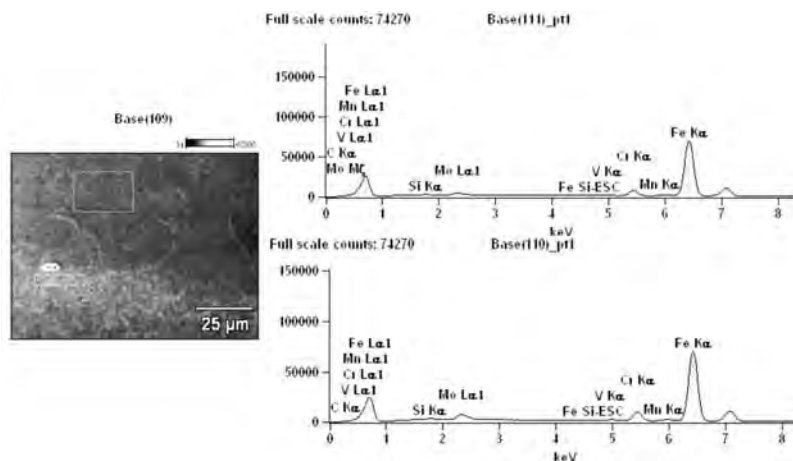
Tab. 2. Chemical composition of X38CrMoV5-3 taken from indicated areas (points).

Pole pomiarowe	Zawartość pierwiastków [%] wagowo					
	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	0,31	0,29	12,06	0,24	78,54	1,82
2	0,33	0,58	15,13	0,28	77,16	3,55

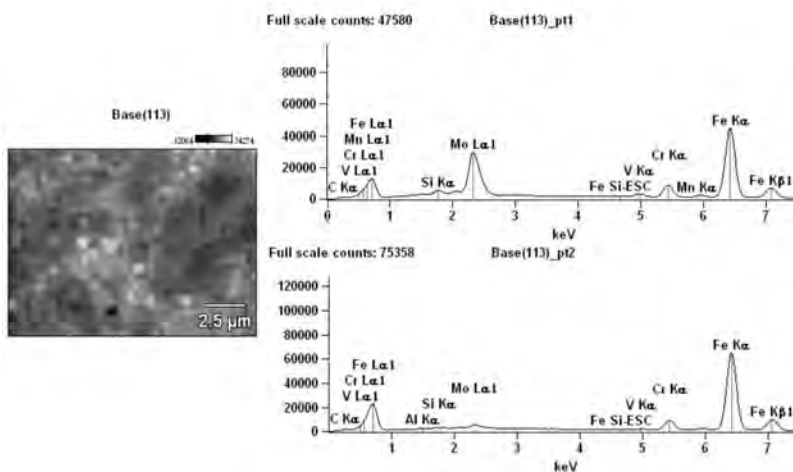
Tab. 3. Skład chemiczny stali X38CrMoV5-3 z wskazanych obszarów (punktów).

Tab. 3. Chemical composition of steel X38CrMoV5-3 taken from indicated areas (points).

Pole pomiarowe	Zawartość pierwiastków [%] wagowo					
	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	0,99	1,57	3,62	0,33	62,87	24,45
2	0,30	0,36	15,41	0,28	75,61	2,00



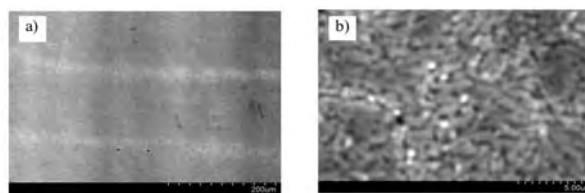
Rys. 4. Mikrostruktura stali X38CrMoV5-3. Zaznaczono pola, w których przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską. Materiał od producenta P3
 Fig. 4. Microstructure of steel X38CrMoV5-3 with marked areas for which EDX microanalysis was performed. Material supplied by manufacturer P3



Rys.5 Mikrostruktura stali X38CrMoV5-3. Zaznaczono pola, w których przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską. Materiał od producenta P3
 Fig.5. Microstructure of steel X38CrMoV5-3 with marked areas for which EDX analysis was performed. Material supplied by manufacturer P3

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie powierzchniowej analizy składu chemicznego dla tego materiału, z którego wykonano matrycę przez producenta P3 (mapping powierzchniowy). Wyniki przeprowadzonej analizy przedstawiono na rys. 7.

Z przeprowadzonych mikroanaliz EDX wynika, że w mikrostrukturze stali X38CrMoV5-3 od producenta P3 występują obszary wzbogacone w wanad oraz molibden co może wskazywać na obecność wysokotopliwych węglików tych pierwiastków. Natomiast równomierny rozkład chromu wskazywać może na prawidłowe rozmieszczenie i wielkość węglików chromu o niższej temperaturze topnienia niż węgliki wanadu i molibdenu. Mikroanalizę przeprowadzono w polach widocznych na rys. 4, jako obszary o jasniejszym zabarwieniu. W pozostałych obszarach (ciemne pola) nie stwierdzono takiego



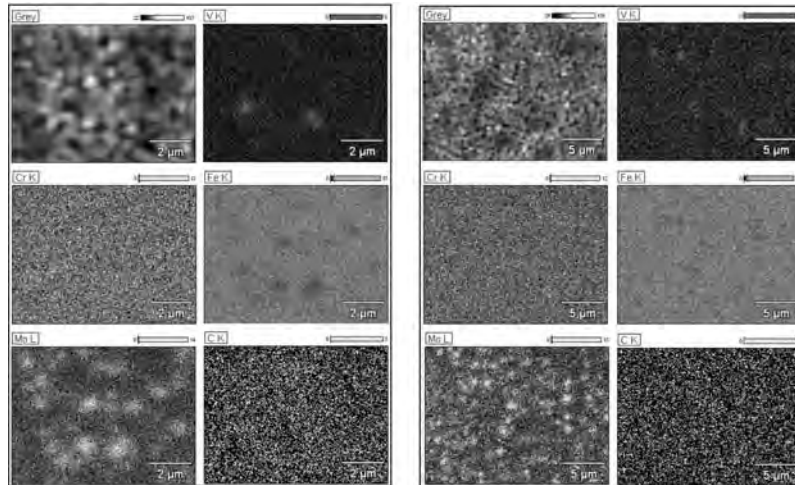
Rys.6. Mikrostruktura stali X38CrMoV5-3 a) Widoczne poziome pasma sferoidalnych wydzieliń na przekroju wzdłużnym próbki. Trawiono Nitaliem b) Fea stopowy z widocznymi drobnymi wydzieleniami skoagulowanych węglików oraz innych wydzieliń

Fig.6. Microstructure of steel X38CrMoV5-3: a) Visible horizontal bands of spheroidal segregations in longitudinal section of sample; etched with nital. b) Alloying Fea with visible fine segregations of coagulated carbides and other segregations

Figure 6 shows the structures of the material supplied by manufacturer P3. The photographs were taken by means of a BSE detector.

Then a surface chemical composition analysis (surface mapping) was carried out for the material from which the die was made by manufacturer P3. The results are shown in fig. 7.

The EDX microanalyses show that areas enriched with vanadium and molybdenum occur in the microstructure of steel X38CrMoV5-3 supplied by manufacturer P3, which may indicate the presence of high-melting carbides of these elements. Whereas the uniform distribution of chromium may indicate the correct distribution and size of chromium carbides whose melting point is lower than that of vanadium and molybdenum carbides. The microanalysis was performed in the lighter areas visible in fig. 4. In the other (dark) areas no such



Rys. 7 Wyniki przeprowadzonej analizy powierzchniowej rozkładu pierwiastków
 Fig. 7. Results of surface analysis of elemental distribution

zróznicowania w składzie chemicznym. W obszarach o wyższym stężeniu wanadu i molibdenu wykryto obszary, w których jest znacznie mniejsza ilość żelaza.

W dalszej kolejności przeprowadzono badania dotyczące określenia składu chemicznego dla materiałów matryc dla pozostałych dwóch producentów. Na rys. 8 przedstawiono mikrostrukturę materiału od producenta P1 oraz pola oznaczone jako 1 oraz 2, w których przeprowadzono analizę EDX.

Wyniki przeprowadzonej mikroanalizy przedstawiono w tabeli 4. Można zauważyć, że w obydwu obszarach procentowy udział krzemu, chromu oraz manganu i molibdenu jest bardzo zbliżony. Istotne różnice występują jedynie w ilości węgla. Poza tym, podczas analizy wykryto śladowe ilości boru (0,71%) i niklu (0,16%).

differences in chemical composition were found. In the areas with elevated vanadium and molybdenum concentrations, subareas with a much smaller amount of iron were discovered.

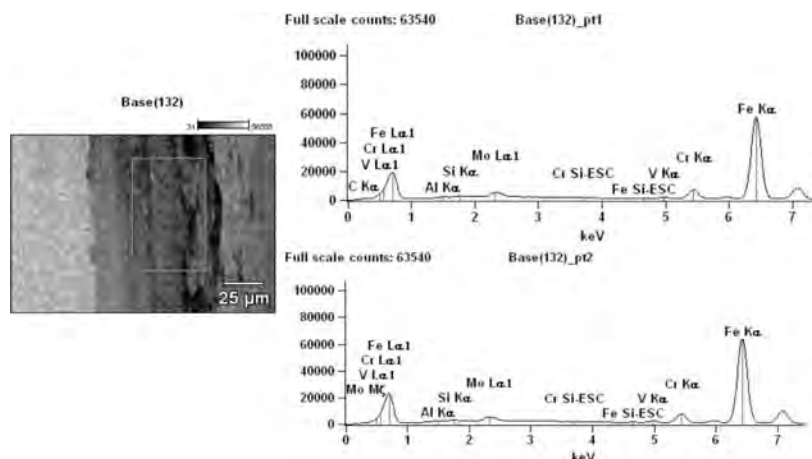
Subsequently, the chemical composition of the die materials from the other two manufacturers was determined. Fig. 8 shows the microstructure of the material from manufacturer P1 and areas 1 and 2 in which the EDX analysis was performed.

The results of the microanalysis are shown in table 4. One can observe that in the two areas the percentages of silicon, chromium, manganese and molybdenum are very similar. There are significant differences in only the amount of carbon. Apart from

Tab. 4. Skład chemiczny stali X38CrMoV5-3 z wskazanych obszarów (punktów) dla P1.

Tab. 4. Chemical composition of steel X38CrMoV5-3 taken from indicated areas (points) for P1.

Pole pomiarowe	Zawartość pierwiastków [%] wagowo					
	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	0,35	0,34	17,94	0,33	74,93	1,83
2	0,37	0,41	16,85	0,29	72,61	1,93



Rys. 8. Mikrostruktura stali X38CrMoV5-3 oraz pola, w których przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską. Materiał od producenta P1
 Fig. 8. Microstructure of steel X38CrMoV5-3 and areas in which EDX analysis was performed. Material from manufacturer P1

Na rys. 9 przedstawiono mikrostrukturę materiału od producenta P2 oraz pola oznaczone jako 1 oraz 2, w których przeprowadzono analizę EDX. Natomiast w tabeli 5 pokazano wyniki przeprowadzonej mikroanalizy. Można zauważyć, że w obydwu obszarach procentowy udział krzemu oraz manganu i molibdenu jest bardzo zbliżony. Istotne różnice występują jedynie w ilości węgla, ale nie tak duże jak w przypadku materiału od producenta P1 i P3. Poza tym, podczas analizy wykryto śladowe ilości boru (0,14%) i niklu (0,41%).

Przeprowadzona analiza na elektronowym mikroskopie skaningowym wyposażonym w mikroanalizator rentgenowski EDX dla materiału matryc od trzech różnych producentów wykazała pewne różnice w punktowym składzie chemicznym, w szczególności dla chromu, wanadu i molibdenu. Może to wskazywać na mikrosegregację pierwiastków stopowych domieszek takich jak molibden, wanad i chrom, które wykazują tendencje do łączenia się z węglem i powstawania trudno rozpuszczalnych węglików.

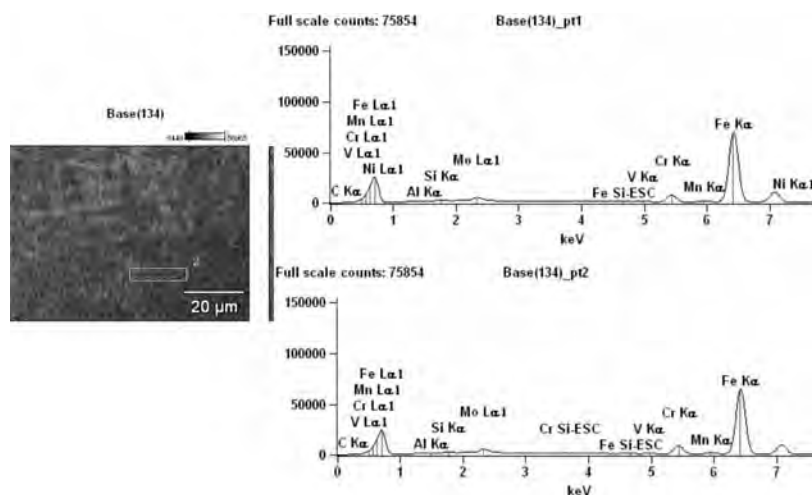
Na podstawie analizy rentgenowskiej EDX można stwierdzić, że najmniej niejednorodną strukturę pod względem składu chemicznego wykazuje materiał od P2.

that, minute quantities of boron (0.71%) and nickel (0.16%) were detected.

Figure 9 shows the microstructure of the material supplied by manufacturer P2 and areas 1 and 2 in which the EDX analysis was performed. The results of the microanalysis are shown in table 5. One can observe that the percentages of silicon, manganese and molybdenum in the two areas are very similar. There are significant differences in only the amount of carbon, but no so large as in the case of materials P1 and P2. Apart from that, minute quantities of boron (0.14%) and nickel (0.41%) were detected.

The analysis of the die material supplied by the three different manufacturers, performed by means of the scanning electron microscope equipped with an EDX microanalyzer showed certain differences in the point chemical composition, particularly for chromium, vanadium and molybdenum. This may indicate the microsegregation of alloying additions such as molybdenum, vanadium and chromium, which tend to combine with carbon, forming hardly soluble carbides.

The EDX analysis showed that as regards the chemical composition the material from P2 has the least heterogeneous structure.



Rys. 9. Mikrostruktura stali X38CrMoV5-3 oraz pola, w których przeprowadzono mikroanalizę rentgenowską (producent P2)

Fig. 9. Microstructure of steel X38CrMoV5-3 (manufacturer P2) and areas in which EDX analysis was performed

Tab. 5. Skład chemiczny stali X38CrMoV5-3 z wskazanych obszarów (punktów) dla P2
Tab. 5. Chemical composition of steel X38CrMoV5-3 taken from indicated areas (points) for P2

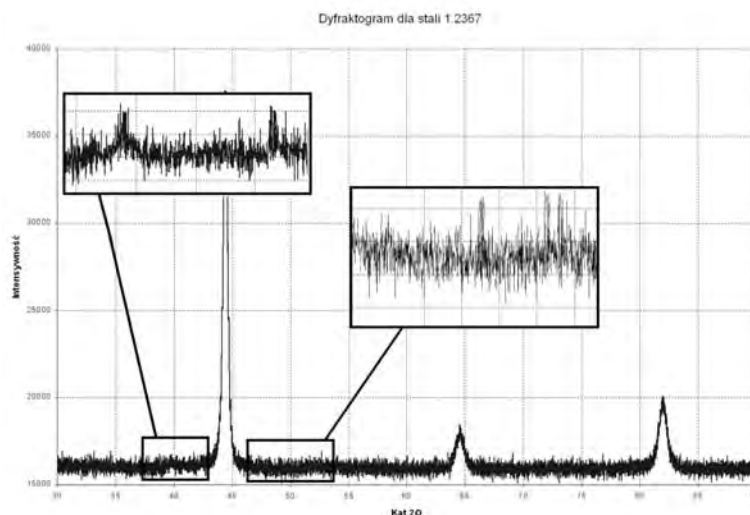
Pole pomiarowe	Zawartość pierwiastków [%] wagowo					
	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo
1	0,44	0,34	10,64	0,33	74,93	2,48
2	0,42	0,41	9,85	0,29	72,61	3,15

6. Pomiary dyfraktometryczne XRD

W celu określenia faz (występowania związków chemicznych) przeprowadzono rentgenowskie badania dyfraktometryczne, a w szczególności podjęto próbę zidentyfikowania sferoidalnych wydzielen w pasmowych obszarach widocznych na zglądach dla materiału od producenta P3, gdyż mimo niejednorodnego składu chemicznego matryce wykazywały największą trwałość (rys.2). Na rys. 10 przedstawiono dyfraktogram w obszarach kątowych 2θ.

6. XRD measurements

XRD examinations were performed in order to determine the phases (the occurrence of chemical compounds). In particular, an attempt was made to identify the spheroidal segregations in the bandlike areas visible in the microsections for the material from manufacturer P3 since despite the heterogeneous chemical composition, the dies showed the highest durability (fig.



Rys. 10. Dyfraktogram stali X38CrMoV5-3. Material do badań pobrano z uszkodzonej matrycy wykonanej przez producenta P1

Fig. 10. X-ray diffraction pattern of steel X38CrMoV5-3. Material for examinations was taken from damaged die manufactured by P1

Jak wskazują wyniki badań na dyfraktometrze rentgenowskim w obszarach 2θ występowania wydzieleni węglkowych od omawianych pierwiastków wchodzących w skład materiału, wykryto impulsy pochodzące najprawdopodobniej od tych wydzieleni (węgliki wanadu i molibdenu). Jak wskazują przeprowadzone dodatkowe badania składu chemicznego wykryto obecność boru w mikrostrukturze omawianych materiałów. Obecność tego pierwiastka może powodować pojawianie się w strukturze borków oraz węglkoborków. W celu potwierdzenia przypuszczeń konieczna jest wnikliwa analiza oraz szczegółowe badania dyfraktometryczne w wąskich zakresach kąta 2θ z bardzo małym posuwem kątowym. Obecność wanadu w strukturze stali wskazuje na dużą skłonność do tworzenia węglika VC, który rozpuszcza się znacznie trudniej niż Fe_3C . Nie rozpuszczony całkowicie w temperaturze austenitacji węgiel wanadu nie przejmuje węgla z austenitu koniecznego do zahartowania materiału. Podczas odpuszczania początkowy spadek twardości wywołany pojawieniem się Fe_3C , zostaje zrównoważony przez wzrost twardości wywołany drobnymi wydzieleniami węglika V_4C_3 (efekt utwardzania dyspersyjnego). Dopiero powyżej temperatury $600^\circ C$ twardość znacznie maleje z powodu koagulacji wydzielonych węglików. Obecność chromu powoduje obniżenie rozpuszczalności węgla w austenicie, co z kolei powoduje wzrost ilości węglików w stali [10,11,14,23,25].

7. Podsumowanie

Przeprowadzony proces obróbki cieplnej w etapie przygotowywania oraz produkcji matrycy ma istotny wpływ na rozdrobnienie i równomierne rozmieszczenie drobnych węglików w strukturze materiału, co potwierdziły przeprowadzone badania. Drugim czynnikiem mającym wpływ na rozdrobnienie i rozmieszczenie wydzieleni węglkowych w materiale jest stopień gniotu oraz czas wygrzewania materiału podczas obróbki plastycznej półfabrykatu. Nie stwierdzono istotnych różnic podczas analizy składu chemicznego materiałów pochodzących od trzech różnych producentów. Skład chemiczny stali był niemal identyczny z podawanym w normach DIN EN ISO 4957 (tabela 1). Istotne różnice występują jedynie w przypadku badania poszczególnych wydzieleni (tabela 3), w których stwierdzono zróżnicowaną ilość wanadu, chromu oraz molibdenu. Wstępnie przeprowadzone badania dyfraktometryczne

2). An X-ray diffraction pattern in angular areas 2θ is shown in fig. 10.

In areas 2θ (where carbide segregations from the considered elements present in the composition of the material occur), impulses originating most probably from the segregations (vanadium and molybdenum carbides) were detected by the XRD investigations. Additional chemical composition analyses showed the presence of boron in the microstructure of the investigated materials. The presence of this element may result in the appearance of borides and carbide borides. In order to confirm this supposition a thorough analysis and detailed XRD investigations in narrow ranges of angle 2θ at a very small angular advance were carried out. The presence of vanadium in the structure of the steel indicates a high propensity for forming vanadium carbide (VC), which dissolves much more sparingly than Fe_3C . The vanadium carbide incompletely dissolved at the austenitization temperature does not take over carbon from the austenite necessary to harden the material. During tempering the initial decrease in hardness due to the appearance of Fe_3C is counterbalanced by an increase in hardness caused by the fine segregation of V_4C_3 (the dispersion hardening effect). Only above $600^\circ C$ hardness begins to decrease because of the coagulation of the segregated carbides. The presence of chromium results in lower solubility of carbon in the austenite, which in turn causes an increase in the amount of carbides in the steel [10, 11, 14, 23, 25].

7. Conclusion

The investigations have confirmed that heat treatment at the stages of preparing and manufacturing the die has a significant effect on the refinement and uniform distribution of fine carbides in the structure of the material. Another factor having a bearing on the refinement and distribution of carbide segregations in the material is the degree of draft and the length of soaking during the plastic forming of the semifinished product. No significant differences in the chemical composition of the materials supplied by the three different manufacturers were found. The chemical composition of the steel was almost identical to the one given in standards DIN EN ISO 4957 (table 1). Significant differences (in the vanadium, chromium and molybdenum content) occur only between individual segregations

jak również analiza EDX, mapping powierzchniowy oraz badania przy użyciu detektora BSE mogą wskazywać na obecność drobnych wydzieleni węglkowych w pasmowych obszarach badanej stali X38CrMoV5-3. Pasmowe wydzielenia najbardziej widoczne są w strukturze materiału pochodzącego od producenta P3. Materiał ten wykazuje największą żywotność wśród badanej grupy materiałów od trzech różnych producentów (P1, P2, P3). Materiały pochodzące od producentów P1 oraz P2 charakteryzują się zbliżoną trwałością i zdecydowanie niższą maksymalną żywotnością w stosunku do materiału pochodzącego od P3.

Przeprowadzone pomiary twardości w różnych obszarach badanych próbek wskazują na zmniejszoną twardość w obszarach roboczych matrycy (480HV) w stosunku do obszarów oddalonych od powierzchni roboczych matrycy (550HV). Spadek twardości materiału przy powierzchniach roboczych najprawdopodobniej spowodowany jest miejscowym odpuszczeniem materiału i koagulacją węglków [3,9,15-17,20]. Temperatura w tych obszarach mogła przekroczyć 600°, ponieważ temperatura odkuwek podczas procesu kucia wynosiła ok. 900°C. Jednak obróbka stali narzędziowych do pracy na gorąco, zwłaszcza zawierających wolfram i molibden powinna być przeprowadzana w taki sposób, aby w czasie pracy narzędzia wykorzystywany był efekt twardości wtórnej [17].

Jak wskazują przeprowadzone analizy, struktura badanych materiałów ma wpływ na trwałość narzędzi do obróbki plastycznej na gorąco. Według danych literaturowych, poza właściwościami materiału w stanie dostawy, równie istotnym jest proces technologiczny wytwarzania matryc, jak i ich obróbka cieplna. Przeprowadzone badania wskazują, że badane materiały posiadały przedstawianą strukturę w całej swej objętości. Próbkę do badań pobierane były z różnych części matryc i ich struktura była niemal identyczna w każdym przypadku dla materiału pochodzącego od jednego producenta (P1, P2 oraz P3).

Należałoby przeprowadzić wnikliwe badania wpływu pasmowych wydzieleni widocznych w strukturze, ponieważ wydzielenie trudnotopliwe węglki mogą tworzyć niekorzystną strukturę o zróżnicowanych parametrach wytrzymałościowych, skłonności do pękania, jak również obniżyć wytrzymałość zmęczeniową w warunkach cyklicznie zmiennych naprężeń. W literaturze można spotkać niekiedy sprzeczne opinie dotyczące struktury badanej stali stosowanej do wytwarzania matryc [13,19,24]. Pomimo wydawałoby się niekorzystnej struktury materiał pochodzący od producenta P3 wykazuje bardzo dobre parametry podczas pracy i stosunkowo wysoką żywotność. Jak można wnioskować, spowodowane jest to stosunkowo dużymi wydzieleniami pasmowymi które ułożone są wzdłużnie w strukturze materiału. Przeprowadzone pomiary mikrotwardości potwierdzają, że materiał z najbardziej widocznymi wydzieleniami pasmowymi (P3) posiada największe zróżnicowanie w twardości poszczególnych składników strukturalnych. Jak potwierdzają badania eksploatacyjne struktura taka doskonale sprawdza się w warunkach przemysłowych procesu kucia na ciepło obudowy przegubu homokinetycznego i charakteryzuje się najwyższą trwałością wśród badanej grupy materiałowej od trzech różnych producentów.

(table 3). The preliminary diffractometric investigations, the EDX analysis, the surface mapping and the examinations by means of the BSE detector seem to indicate the presence of fine carbide segregations in the bandlike areas of investigated steel X38CrMoV5-3. Bandlike segregations are most visible in the structure of the material supplied by manufacturer P3. This material shows the longest life among the investigated group of materials supplied by the three manufacturers (P1, P2, P3). The materials supplied by manufacturers P1 and P2 are characterized by similar durability and a much shorter maximum life than the material obtained from manufacturer P3.

The hardness measurements taken in different areas of the samples indicate a lower hardness (480HV) in the active faces of the die in comparison with the one (550HV) in the areas away from the die's active faces. The decrease in material hardness in the active faces is most likely due to the local tempering of the material and the coagulation of carbides [3, 9, 15-17, 20]. The temperature in these areas could have exceeded 600° since the temperature of the blanks during forging was about 900°C. The treatment of tool steels for hot working, particularly the ones containing tungsten and molybdenum, should be performed in such a way that the secondary hardness effect is exploited during the work of the tool [17].

The analyses have shown that the structure of the investigated materials has an effect on the durability of the hot working tools. According to the literature, besides the properties of the material in delivery condition, the process of manufacturing dies and their heat treatment are equally critical. The investigations show that the supplied materials had the given structure in their whole volume. The samples for the analysis were taken from different parts of the dies and their structure was nearly identical in each case for the material supplied by a single manufacturer (P1, P2 or P3).

In-depth studies of the effect of the bandlike segregations visible in the structure should be made since the segregated infusible carbides may form an unfavourable structure with varying strength parameters and susceptibility to cracking and lower the fatigue strength in cyclically variable stress conditions. In the literature one can find sometimes contradictory opinions about the structure of the investigated steel used for manufacturing dies [13, 19, 24]. Despite its seemingly unfavourable structure the material supplied by manufacturer P3 shows very good parameters during work and a relatively long life. As one can infer, this is owing to the quite large bandlike segregations situated longitudinally in the material's structure. The microhardness measurements confirm that the material with the most prominent bandlike segregations (P3) is characterized by the highest variation in the hardness of its particular structural components. Service tests have shown that such a structure performs very well in the industrial hot forging of the CV joint casing and has the longest life among the materials supplied by the three different manufacturers.

Prace wykonano w ramach realizacji projektu badawczego 3 T08A 018 30 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

8. References

1. Bartnicki Z, Pater A, Gontarz A. Theoretical analysis of rolling-extrusion process of axi-symmetrical parts. Archives of civil and mechanical engineering. 2008; 02: 5-12.
2. Bobyr M, Yakhno B, Rusiński E, Harnatkiewicz P. Damage in the complex lowcycle fatigue. Archives of civil and mechanical engineering. 2008; 03: 23-32
3. Burakowski T, Wierzchom T. Inżynieria Powierzchni Metali. Warszawa: WNT, 1995.
4. Czyżewski P, Kocańda A. Computer modeling of valve lever forging with various performs. Archives of civil and mechanical engineering. 2008; 03: 33-40
5. Gronostajski Z, Hawryluk M, Jaśkiewicz K, Niechajowicz A, Polak S, Walczak S, Woźniak A. Wpływ tolerancji wykonawczych matryc sprężanych do wyciskania na ich wytrzymałość. *Plasticita materialov* 2007; 14: 87-92
6. Gronostajski Z, Hawryluk M, Jaśkiewicz K, Niechajowicz A, Polak S, Walczak S, Woźniak A. Application of physical and mathematical modelling to analysis of different forging processes of constant velocity joint body, *Computer Methods in Materials Sciences* 2007; 07: 231-236
7. Gronostajski Z, Hawryluk M, Kaszuba M, Zwierzchowski M. Analysis of forging process of constant velocity joint body. *Steel Research International* 2008; 01: 547-554.
8. Gronostajski Z, Hawryluk M. The main aspects of precision forging. Archives of civil and mechanical engineering. 2008; 02: 39-56
9. Hebda M, Wachal A. Trybologia. Warszawa: WNT, 1980.
10. Hejwowski T, Weroński A. Wytwarzanie powłok odpornych na zużycie. Lublin: WUPL, 2000.
11. Hejwowski T. Studium procesów zużycia erozyjnego, ściernego i zmęczenia cieplnego elementów maszyn oraz kształtowanie struktur o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych. Lublin: WUPL, 2003.
12. Karwata T, Bonek M. Wpływ laserowej obróbki powierzchniowej na własności trybologiczne stali narzędziowej stopowej do pracy na gorąco. *PSKN* 2006; 08: 11-19
13. Lawrowski Z. Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie. Warszawa: PWN, 1993r.
14. Niewczas A, Czerniec M, Ignaciuk P. Badania trwałości elementów maszyn współpracujących tarcioowo. Lublin: IZT, 2000.
15. Niewczas A. Modelowanie zużycia i ocena niezawodności silników spalinowych. Lublin: WUPL, 1998.
16. Okrajni J. Laboratorium mechaniki materiałów. Gliwice WPS 2003.
17. Przybyłowicz K. Metaloznawstwo. Warszawa; WNT, 1999.
18. Skubisz P, Łukaszek-Solek A, Sińczak J, Bednarek S. Drop forging of HSLA steel with application of thermomechanical treatment. Archives of civil and mechanical engineering. 2008; 04: 93-99.
19. Suh N.P. The delamination theory of wear. *Wear* 1977; 44: 1-14
20. Szczerek M, Wisniewski M. Tribologia Tribotechnika. Radom: ITER, 2000.
21. Web page : <http://www.uddeholm.com>
22. Web page: www.gkn.automotive.com
23. Weroński A, Hejwowski T. Thermal fatigue of metals. New York: Marcel Dekker Inc, 1992.
24. Zum Gahr K.-H. Microstructure and wear of materials. New York: Elsevier, 1978.
25. Zwierzchowski M. Analiza metod badania odporności na zmęczenie cieplne. Współczesne technologie w budowie maszyn. Lublin: 2002. 147-152.

Dr inż. Marek HAWRYLUK

Dr inż. Maciej ZWIERZCHOWSKI

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji

Politechnika Wrocławska

ul. Ignacego Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Polska

E-mail: marek.hawryluk@pwr.wroc.pl

E-mail: maciej.zwierzchowski@pwr.wroc.pl

CHARAKTERYSTYKI EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ WYZNACZANE METODĄ MONTE CARLO

POLLUTANT EMISSION CHARACTERISTICS DETERMINED USING THE MONTE CARLO METHOD

W pracy przedstawiono pionierski sposób badań ekologicznych właściwości silników spalinowych z zastosowaniem metody Monte Carlo do wyznaczenia charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych. Formalnie wprowadzono pojęcia oraz usystematyzowano zagadnienia związane z emisją zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych. Przedstawiono wyniki badań empirycznych wykonanych dla rzeczywistego obiektu oraz wyznaczono charakterystyki emisji zanieczyszczeń w symulowanych warunkach pseudoprzypadkowych.

Słowa kluczowe: samochody, silniki spalinowe, emisja zanieczyszczeń, metoda Monte Carlo.

This paper presents a pioneering method for investigating the environmental properties of internal combustion engines using the Monte Carlo method to determine the characteristics of vehicle pollutant emissions. Concepts and questions relating to the pollutant emissions of vehicles are formally introduced and systematized. The results of empirical research on a real object are presented, as are the pollutant emission characteristics under simulated pseudo-random conditions.

Keywords: vehicle, internal combustion engines, pollutant emissions, Monte Carlo method.

1. Wprowadzenie

Ekologiczne właściwości silników spalinowych są od kilkudziesięciu lat podstawowym wyróżnikiem w ocenie jakości silników. Spośród wielu zagrożeń naturalnego i cywilizacyjnego środowiska ludzi przez eksploatację silników spalinowych szczególną wagę przypisuje się do emisji zanieczyszczeń, od której praktycznie rozpoczęła się ochrona środowiska przed skutkami motoryzacji [5]. Międzynarodowe przepisy wyróżniają substancje szkodliwe dla środowiska i – choć w prawie Unii Europejskiej i Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej oraz innych państw rozwiniętych gospodarczo – występują pewne różnice – są to przede wszystkim [4, 5]:

- tlenek węgla – CO,
- związki organiczne (węglowodory i ich pochodne) – HC (lub THC),
- tlenki azotu NO i NO₂, oznaczane – NO_x, sprowadzone do dwutlenku azotu NO₂,
- cząstki stałe – PM.

Emisja innych substancji szkodliwych dla środowiska, pochodzących z pojazdów samochodowych, jest limitowana głównie przez skład i właściwości paliw, jak ma to miejsce np. w wypadku związków siarki, węglowodorów pierścieniowych czy metali ciężkich [1, 4, 5, 8].

Dodatkowo – ze względu na zagrożenie środowiska przed skutkami globalnego ocieplenia – rozpatruje się emisję dwutlenku węgla [4, 5], będącego najistotniejszym ze względu na skalę emisji gazem cieplarnianym, pochodzącym ze spalania paliw do silników spalinowych.

Dodatkowym czynnikiem, związanym z oddziaływaniem motoryzacji na środowisko – oprócz związku z emisją zanieczyszczeń – jest zużycie paliwa ze względu na ochronę zasobów naturalnych [5].

Całkowita emisja zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych w obszarze bilansowania jest modelowana jako suma emisji [4, 5]:

1. Introduction

The environmental properties of internal combustion engines have served as a primary determinant in assessing engine quality for several dozen years. Among the many threats to the natural and civilizational environment of people caused by the operation of internal combustion engines, particular weight is assigned to pollutant emissions. In practice, it is from them that environmental protection against motorization was launched [5]. International regulations identify substances that are harmful to the environment. Although the laws of the European Union, the United States of America, and other economically developed countries do vary to a certain degree, these substances are primarily [4, 5]:

- Carbon monoxide CO.
- Organic compounds (hydrocarbons and their derivatives) HC (or THC).
- Nitrogen oxides NO and NO₂, designated NO_x, as well as reduced to nitrogen dioxide NO₂.
- Particulate matter PM.

The emission of other substances that are harmful to the environment generated by vehicles are mainly limited by the composition and properties of fuel, as is the case with sulfur compounds, ring hydrocarbons, and heavy metals [1, 4, 5, 8].

Moreover, due to the environmental threat of the effects of global warming, the emissions of carbon dioxide [4, 5] are being examined as most significant due to the scale of emission of this greenhouse gas, derived from the burning of fuel in internal combustion engines.

An additional factor linked with the impact of motoring on the environment – apart from pollutant emission – is the use of fuel in terms of natural resource protection [5].

The total pollutant emissions from vehicles in the balance area is modeled as the sum of the following emissions [4, 5]:

- z silników nagranych do temperatury normalnej eksploatacji,
- związanej z nagrzewaniem się silników do temperatury normalnej eksploatacji,
- parowania par paliwa z układu paliwowego pojazdu.

Ze względu na skutki dla środowiska istotny jest w rozpatrywanym miejscu przebieg stężenia zanieczyszczenia rozproszonego w powietrzu atmosferycznym – wielkość ta jest zwana, na wzór stosowany w specjalistycznej literaturze niemieckiej, imisją [4]. Między natężeniem emisji zanieczyszczenia a imisją jest związek operatorowy, który ma charakter inercyjny. Zjawisko opisywane tym związkiem nosi nazwę rozprzestrzeniania zanieczyszczeń i zawiera w sobie zjawiska transportu i dyspersji zanieczyszczeń. Między imisją zanieczyszczeń i wielkościami, określającymi skutki zanieczyszczeń dla środowiska, zachodzi również związek operatorowy o charakterze inercyjnym [4]. W związku z tym zazwyczaj operatorową zależność skutków zanieczyszczeń od natężenia ich emisji zastępuje się: średnią imisją zanieczyszczeń i czasem ich oddziaływania [4].

Wielkością charakteryzującą szkodliwość motoryzacji dla środowiska jest natężenie emisji całkowitej zanieczyszczenia w rozpatrywanym obszarze.

Czynnikami determinującymi natężenie emisji całkowitej zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych – E oraz natężenie przepływu paliwa zużywanego przez silnik – G w rozpatrywanym obszarze i czasie są [4] – rysunek 1:

- struktura – S i liczność pojazdów – N,
- intensywność użytkowania pojazdów – P,
- warunki użytkowania pojazdów – R,
- warunki otoczenia – U,
- właściwości paliw – F.

Sam model emisji całkowitej zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych jest bardzo prosty, natomiast istotnym problemem są duża liczba nieznanych zazwyczaj parametrów oraz charakterystyki, zależne od wielu czynników w sposób złożony i trudny do uogólnienia [4]. Z tych powodów istotną rolę odgrywa modelowanie poszczególnych elementów modelu emisji całkowitej zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych.

Struktura pojazdów samochodowych jest modelowana zazwyczaj w postaci zbioru zawierającego [1, 4, 8]:

- samochody osobowe,
- lekkie samochody ciężarowe,
- autobusy miejskie,
- autobusy dalekobieżne,
- samochody ciężarowe,
- motocykle,
- motorowery.

Oprócz tego strukturę pojazdów samochodowych charakteryzują [1, 4, 8]:

- umowna wielkość pojazdów, zależna albo od objętości skokowej silnika (samochody osobowe, lekkie samochody ciężarowe oraz motocykle i motorowery) albo od

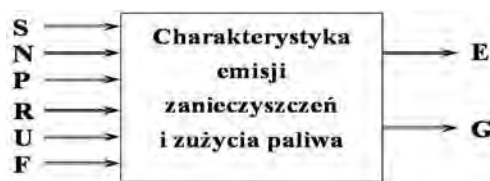
- From engines warmed up to normal operating temperature.
- Related to the warming up of engines to normal operating temperature.
- Evaporation of fuel vapors from the vehicle fuel system.

Due to the effects on the environment, what is important is the process of pollutant concentration as dispersed in the atmosphere at the examined location, where this value is known as imission, as used in a formula applied in specialized German literature [4]. There is an operational connection between the concentration of pollutant emission and imission. It is inertial in nature. The phenomenon described by this dependence is known as pollutant propagation and embodies the phenomena of pollutant transportation and dispersion. There is also an operational dependence of inertial character between pollutant imission and values defining the effects of pollution on the environment [4]. Thus, the usually operational dependence of the effects of pollution and the concentration of their emission is replaced by the average pollutant imission and its period of influence [4].

The value characterizing the harmfulness of motoring on the environment is the concentration of total pollutant emissions in the examined area.

Factors determining the concentration of total pollutant emissions caused by vehicles E as well as the concentration of the flow of fuel used by the engine G in the examined area and time are [4] – Figure No. 1:

- Structure S and quantity of vehicles – N.
- Intensity of vehicle use – P.
- Vehicle use conditions – R.
- Environmental conditions – U.
- Fuel properties – F.



Rys. 1. Model emisji całkowitej zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych

Fig. 1. The model of the total pollutant emission from vehicles

The model itself for vehicle total pollutant emissions is very simple. However, the essence of the problem lies with the large number of usually unknown parameters and characteristics that are dependent on many factors in a complex manner that is difficult to generalize [4]. It is for this reason that the modeling of individual elements of the vehicle total pollutant emission model plays an important role.

The structure of vehicles is usually modeled in the form of a set containing the following [1, 4, 8]:

- Passenger cars.
- Light duty vehicle.
- Urban busses.
- Coaches.
- Heavy duty vehicle.
- Motorcycles.
- Motorbikes.

In addition to this, the vehicles structure is characterized by [1, 4, 8]:

- The conventional size of the vehicles, which is dependent on their engine capacity (passenger cars, light duty vehicle, motorcycles, and motorbikes) or their allowable total mass (heavy duty vehicle and busses).

dopuszczalnej masy całkowitej (samochody ciężarowe i autobusy),

- rodzaje systemu spalania (o zapłonie iskrowym lub o zapłonie samoczynnym) i obiegu silnika spalinowego (dwu-suwowy lub czterosuwowy),
- właściwości ekologiczne silnika spalinowego ze względu na poziom techniczny, zgodne z kolejnymi wersjami przepisów lub datami produkcji pojazdów.

Liczność pojazdów samochodowych dotyczy ww. kategorii, a intensywność użytkowania pojazdów samochodowych jest modelowana w postaci przebiegów (zazwyczaj rocznych).

Warunki użytkowania pojazdów to przede wszystkim modele [1, 4, 8]:

- ruchu – przebiegi prędkości,
- długości dróg przebywanych przed zatrzymaniem samochodu na długi czas,
- czasu postoju,
- długości dróg przebywanych po rozruchu nienagrzanego silnika.

Warunki otoczenia są zdeterminowane przez właściwości dróg oraz warunki atmosferyczne, a także przez natężenie ruchu pojazdów. W związku z tym warunki otoczenia mają oczywiście wpływ – oprócz woli kierującego – na modele ruchu pojazdu.

2. Charakterystyki emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych

Podstawową wielkością charakteryzującą ekologiczne właściwości pojazdów jest emisja drogowa zanieczyszczeń, będąca pochodną emisji (masy zanieczyszczeń) względem drogi przebywanej przez pojazd [4, 5].

Emisja drogowa zanieczyszczenia z pojazdu, traktowana jako wielkość dynamiczna, jest zależna od przebiegów stanu pracy silnika, które zazwyczaj są scharakteryzowane [1 – 4]:

- obciążeniem silnika – $M_e(t)$,
- prędkością obrotową – $n(t)$,
- stanem cieplnym silnika – $T_s(t)$, opisywanym zbiorem temperatur części silnika i czynników w jego układach (np. cieczy chłodzącej i oleju smarowego),
- warunkami otoczenia – $G(t)$.

Przebieg emisji drogowej zanieczyszczenia może być przedstawiony w postaci operatorowej [2 – 4]

$$b_i(t) = B_M [M_e(t), n(t), T_s(t), G(t)] \quad (1)$$

Stan pracy silnika spalinowego w eksploatacji trakcyjnej jest uzależniony m.in. od: prędkości jazdy samochodu, oporów ruchu oraz parametrów pojazdu, uwzględniających m.in. przełożenia w układzie przeniesienia napędu. W związku z tym emisję drogową można przedstawić jako zależność operatorową [2 – 4]

$$b_i(t) = B_v [v(t), A(t), T_s(t), G(t)] \quad (2)$$

gdzie wektor $A(t)$ zawiera informacje o oporach ruchu pojazdu, związanych z ukształtowaniem nawierzchni.

Dla stałego stanu cieplnego silnika oraz porównywalnych warunków ruchu, uwzględniając daleko posuniętą unifikację konstrukcyjną pojazdów samochodowych, procesem determinującym emisję zanieczyszczeń jest zatem proces prędkości samochodu [2 – 4].

- The combustion system (spark and semi ignition engine) and internal combustion engine cycle (two- and four-stroke).

- Internal combustion engine environmental properties in terms of technological level pursuant to successive versions of regulations or vehicle manufacturing dates.

The quantity of vehicles relates to the above categories, while vehicle use intensity is modeled in the form of mileage (usually annual).

Vehicle use conditions primarily involve the following models [1, 4, 8]:

- Traffic – mileage velocities.
- Lengths of routes traveled before stopping the vehicle for an extended period.
- Parking time.
- Lengths of routes traveled following the start-up of a cold engine.

Environmental conditions are determined by road quality as well as atmospheric conditions, and vehicle traffic intensity. Thus, in addition to the wishes of the driver, environmental conditions have an obvious impact on the vehicle traffic model.

2. Vehicles pollutant emission characteristics

The basic value characterizing the environmental properties of vehicles is specific distance pollutant emissions that are a derivative of emissions (the mass of pollution) with respect to the road traveled by the vehicle [4, 5].

The vehicle specific distance pollutant emissions, considered a dynamic value, are dependent on the engine operating state processes, which are usually characterized by [1–4]:

- Engine load – $M_e(t)$.
- Engine speed – $n(t)$.
- Engine thermal state – $T_s(t)$, described by a set of engine part temperatures and factors operating on its systems (e.g. coolant and lubricating oil).
- Environmental conditions – $G(t)$.

The specific distance pollutant emission process may be presented in operational form [2–4]:

$$b_i(t) = B_M [M_e(t), n(t), T_s(t), G(t)] \quad (1)$$

The state of internal combustion engine traction operation is dependent on such factors as vehicle velocity, resistance to motion, and vehicle parameters, including transmission ratios in the drive train. Thus, specific distance emissions may be presented as an operational dependence [2–4]:

$$b_i(t) = B_v [v(t), A(t), T_s(t), G(t)] \quad (2)$$

Where vector $A(t)$ contains information about vehicle motion resistance connected with the shaping of the surface.

For a fixed engine thermal state as well as comparable traffic conditions, assuming far-reaching unification in vehicle design, the process determining pollutant emissions is the velocity process of the engines [2–4].

W związku z tym emisja drogowa zanieczyszczenia jest w ścisłym tego słowa znaczeniu zdeterminowana konkretnym przebiegiem prędkości pojazdu. Z tego powodu tak istotną rolę odgrywają modele ruchu pojazdów, będące przebiegami prędkości pojazdu. W celu stworzenia bardziej uogólnionej wiedzy na temat emisji zanieczyszczeń w zależności od przebiegów prędkości, dla których jest wyznaczona emisja, jest konieczne określenie zerowymiarowych (punktowych) charakterystyk tych przebiegów. W takim wypadku jest możliwe wyznaczanie zależności wielkości, charakteryzującej emisję zanieczyszczeń, np. emisji drogowej, od zerowymiarowych charakterystyk. Najczęściej jako reprezentatywną charakterystykę zerowymiarową przebiegów prędkości przyjmuje się wartość oczekiwaną, której estymatorem jest wartość średnia arytmetyczna [1–4]. Niekiedy rozpatruje się również jako reprezentatywne charakterystyki zerowymiarowe wartość średnią modułu przyspieszenia oraz wartość średnią modułu iloczynu prędkości i przyspieszenia [1–4].

Do celów wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń zazwyczaj wykorzystuje się przebiegi prędkości pojazdów w homologacyjnych testach jezdnych: europejskich, amerykańskich i japońskich.

Europejskie testy homologacyjne to test zgodny z regulaminem nr 83 EKG ONZ [1, 4, 5, 7] oraz jego składowe: test jazdy miejskiej UDC (Urban Driving Test) i pozamiejskiej (EUDC – Extra Urban Driving Test) – rysunek 2.

Amerykańskim testem homologacyjnym do pomiarów emisji zanieczyszczeń jest test FTP 75 (Federal Transient Procedure) – rysunek 3, natomiast do badań zużycia paliwa wykorzystuje się test HWFET (Highway Fuel Economy Test) – rysunek 4. Oprócz tego istnieją m.in. testy [7]:

- SFTP US06 – Supplement Federal Transient Procedure US06 (dodatek US06 do testu FTP-75),
- SFTP SC03 – Supplement Federal Transient Procedure SC03 (dodatek SC03 do testu FTP-75),
- EPA NYCC – EPA (Environment Protection Agency) New York City Cycle (nowojorski test Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska),
- California Unified Cycle LA92 (jednolity test kalifornijski LA92),
- Inspection & Maintenance Driving Cycle IM240 (test jezdny IM240 do celów kontrolno-obsługowych).

W Japonii stosuje się test 10–15 Mode Cycle [1, 4, 5, 7].

Testy homologacyjne stanowią bardzo szczególne przypadki ruchu pojazdów. Rzeczywiste warunki mogą znacznie odbiegać od warunków homologacyjnych. W związku z tym w modelach emisji zanieczyszczeń z samochodów, np. w modelu INFRAS AG [4, 8], stosuje się testy specjalne, przykładowo test ruchu pojazdów w warunkach znacznego utrudnienia, wynikającego z kongestii – model Stop and Go – rysunek 5 [1, 4]. Innym przykładem modelu ruchu jest model Autobahn, charakteryzujący ruch pojazdów na autostradach – rysunek 6 [1, 4].

Thus, specific distance pollutant emissions are strictly determined by the concrete vehicle velocity processes. It is for this reason that vehicle traffic models play such an important role—they define the vehicle's velocity processes. It is necessary to define zero-dimensional (point) characteristics of the processes in order to create more generalized knowledge on pollutant emissions as dependent on the velocity processes for which the emissions are calculated. In such a case it is possible to define the dependence between the value characterizing pollutant emissions – e.g. specific distance emissions and the zero-dimensional characteristic. The most frequent zero-dimensional representative characteristic of velocity processes is assumed as the expected value, whose estimator is the arithmetic average value [1–4]. Also considered at times as the zero-dimensional representative characteristic is the value of the acceleration module as well as the average value of the module of the product of velocity and acceleration [1–4].

What is usually applied in order to determine the characteristics of pollutant emissions is the vehicle velocity processes in homologation test drives – European, American, and Japanese.

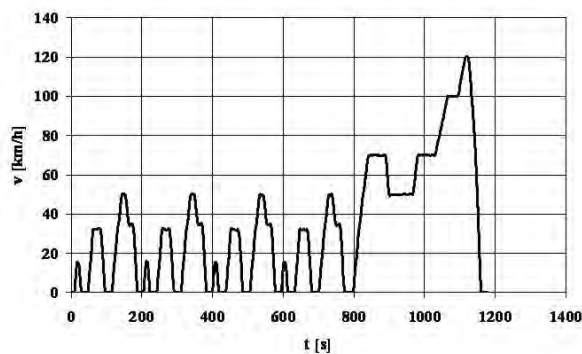
European homologation tests are test in agreement with Rule No. 83 ECE UE [1, 4, 5, 7] and its component parts – the urban driving test (UDT) and the extra-urban driving test (EUDT) – Figure No. 2.

American homologation tests for measuring pollutant emissions include the FTP 75 (Federal Test Procedure) – Figure No. 3. For fuel consumption, it is the Highway Fuel Economy test (HWFET) that is conducted – Figure No. 4. Other tests include [7]:

- SFTP US06 – Supplemental Federal Test Procedure US06 (a supplement to FTP 75).
- SFTP SC03 – Supplemental Federal Test Procedure SC03 (a supplement to FTP 75).
- EPA NYCC – EPA (Environment Protection Agency) New York City Cycle.
- California Unified Cycle LA92.
- IM240 – Inspection & Maintenance Driving Cycle.

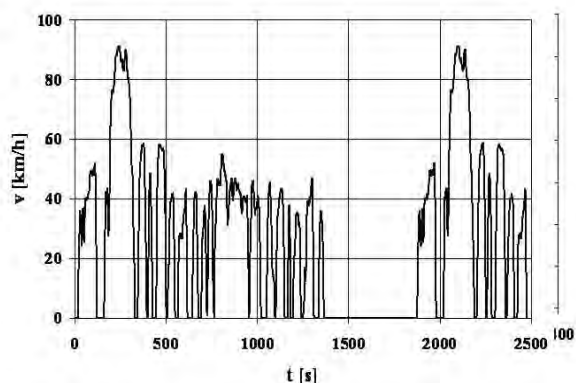
The 10–15 Mode Cycle test is applied in Japan [1, 4, 5, 7].

Homologation tests are a very specific case in vehicle traffic. Real world conditions may differ significantly from the homologation testing conditions. For this reason special tests are used in motor vehicle pollutant emission models – e.g. the INFRAS AG model [4, 8]. These include the vehicle traffic test where difficulties resulting from traffic congestion are introduced – the Stop and Go model – Figure No. 5 [1, 4]. Another example of a traffic model is the Autobahn model, which characterizes vehicle traffic on highways – Figure No. 6 [1, 4].

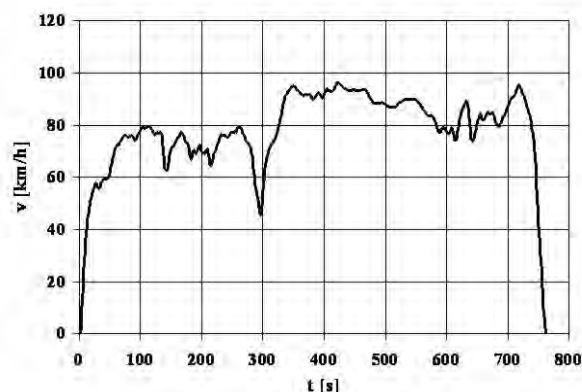


Rys. 2. Przebieg prędkości pojazdu v w teście zgodnym z regulaminem nr 83 EKG ONZ

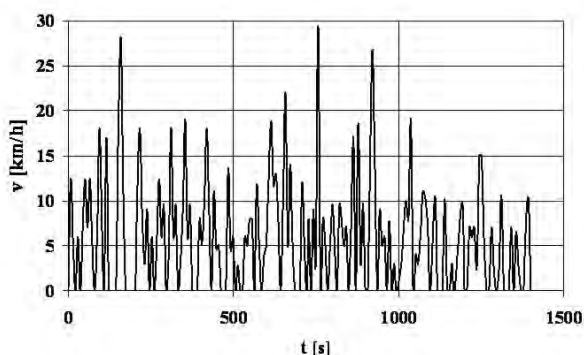
Fig. 2. The process of the vehicle velocity v in the ECE R 83 test



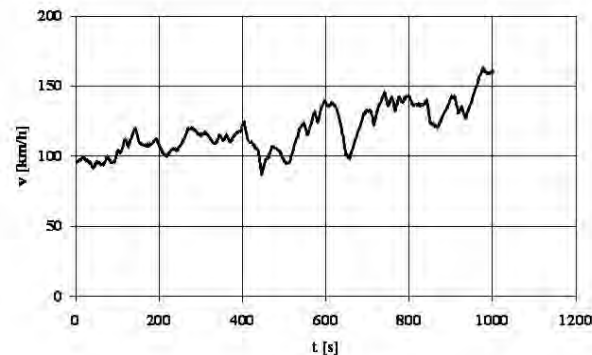
Rys. 3. Przebieg prędkości pojazdu v w teście FTP 75
Fig. 3. The process of the vehicle velocity v in the FTP 75 test



Rys. 4. Przebieg prędkości pojazdu v w teście HWFET
Fig. 4. The process of the vehicle velocity v in the HWFET test



Rys. 5. Przebieg prędkości pojazdu v w teście Stop and Go
Fig. 5. The process of the vehicle velocity v in the Stop and Go test

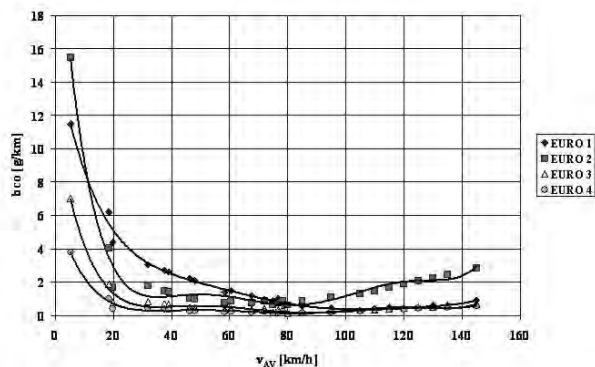


Rys. 6. Przebieg prędkości pojazdu v w teście Autobahn
Fig. 6. The process of the vehicle velocity v in the Autobahn test

Przykładem charakterystyk emisji zanieczyszczeń z wykorzystaniem wyników badań w testach, stosowanych w oprogramowaniu INFRAS, jest zależność emisji drogowej tlenku węgla dla samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym o objętości skokowej większej niż $2,0 \text{ dm}^3$ od prędkości średniej dla kategorii ekologicznych EURO 1, EURO 2, EURO 3 i EURO 4 – rysunek 7.

Przedstawione charakterystyki emisji zanieczyszczeń są wyznaczone dla modeli ruchu, obejmujących prędkość średnią w granicach (5,3÷145) km/h. Emisje drogowe zanieczyszczeń, wyznaczone dla poszczególnych modeli ruchu, zostały na wykresie aproksymowane funkcjami wielomianowymi o stopniu nie większym niż szósty. Kryterium doboru stopnia wielomianu była niesprzeczność wyniku aproksymacji z prawami fizyki (np. dodatniość emisji), doświadczeniem i wiedzą autorów na temat charakteru badanych zależności, wyznaczanych na

An example of pollutant emission characteristics using test results as applied in INFRAS software, is the dependence between the specific distance emissions of carbon monoxide for passenger cars with spark ignition engines with a capacity of more than $2,0 \text{ dm}^3$ and average velocity in the EURO 1, EURO 2, EURO 3, and EURO 4 categories – Figure No. 7.



Rys. 7. Zależność emisji drogowej tlenku węgla b_{CO} dla samochodów osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym o objętości skokowej większej niż $2,0 \text{ dm}^3$ od prędkości średniej v_{AV}
Fig. 7. The dependence of the specific distance emission of carbon oxide b_{CO} for personal cars with spark ignition engines with the engine capacity more than 2 dm^3 on the average velocity v_{AV}

The presented pollutant emission characteristics are determined for traffic models encompassing average velocities in the 5.3 km/h – 145 km/h range. Specific distance pollutant emissions as identified for individual traffic models have been approximated in the graph using polynomial functions of a degree not greater than six. The criterion for selection of the polynomial degree was non-contradiction of the approximated results with the laws of physics (e.g. emission positivity), experience, and the knowledge of the authors on the character of the examined relations,

podstawie badań empirycznych, w wyniku których jest postulowana zależność funkcyjna emisji drogowej zanieczyszczeń od prędkości średniej pojazdu [1 – 4, 6].

Zastosowanie metody Monte Carlo do wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych

Zastosowanie metody Monte Carlo do wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych polega na generowaniu doświadczeń pseudoprzypadkowych [2 – 4, 10] na podstawie zarejestrowanych realizacji procesów stochastycznych modelujących prędkość pojazdu oraz natężenia emisji zanieczyszczeń.

Pseudoprzypadkowe warunki ruchu pojazdu są modelowane w postaci procesu stochastycznego $v(t)$.

Wielowymiarowy proces stochastyczny zjawisk towarzyszących pracy samochodu $Y(t)$ dotyczy przede wszystkim emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa:

$$Y(t) = [E_{CO}, E_{HC}, E_{NOx}, E_{PM}, E_{CO2}, G_f]^T \quad (3)$$

gdzie: E – natężenie emisji zanieczyszczeń, G_f – natężenie zużycia paliwa.

Przy założeniu stacjonarności i ergodyczności procesów $v(t)$ i $Y(t)$ można wyznaczyć dla ich realizacji wartości oczekiwane w przedziale czasu (t_α, t_ω) :

$$v_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{1}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} v(t) dt \quad (4)$$

$$Y_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{1}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} Y(t) dt \quad (5)$$

Emisja drogowa zanieczyszczenia jest stosunkiem natężenia emisji zanieczyszczenia i prędkości. Zatem średnia emisja drogowa zanieczyszczenia wynosi

$$b_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{E_{AV}(t_\alpha, t_\omega)}{v_{AV}(t_\alpha, t_\omega)} \quad (6)$$

Średnia emisja drogowa zanieczyszczenia jest zatem funkcją prędkości średniej (która jest funkcją czasów początku i końca uśredniania) oraz czasów początku i końca uśredniania:

$$b_{AV} = f_b(v_{AV}(t_\alpha, t_\omega), t_\alpha, t_\omega) \quad (7)$$

Jeśli przyjąć, że czasy początku i końca uśredniania są zmiennymi przypadkowymi, to wyznaczona emisja drogowa jako funkcja zmiennych przypadkowych może być traktowana jako funkcja przypadkowa.

Dzięki zastosowaniu metody Monte Carlo istnieje możliwość wyznaczania stochastycznych charakterystyk emisji zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych, np. w postaci zależności emisji drogowej zanieczyszczeń od prędkości średniej samochodu. Istnieje również możliwość wyznaczania charakterystyk jednowymiarowych w zależności od innych wielkości, np. wartości średniej modułu przyspieszenia lub wartości średniej modułu iloczynu prędkości i przyspieszenia. Istnieje również możliwość wyznaczenie wielowymiarowych charakterystyk emisji zanieczyszczeń.

Przykładem realizacji stochastycznego procesu prędkości pojazdu, zbudowanego na bazie testu wg regulaminu nr 83 EKG ONZ, jest zbiór realizacji przedstawionych na rysunku 8.

determined on the basis of empirical tests whose result is the postulated dependence between the specific distance pollutant emission function and average velocity [1–4, 6].

Application of the Monte Carlo Method in determining vehicle pollutant emission characteristics

Application of the Monte Carlo method to determine the characteristics of vehicle pollutant emissions involves the generation of pseudo-random experiments [2–4, 10] on the basis of the registered results of stochastic processes modeling the velocity of vehicles and the concentrations of pollutant emissions.

The pseudo-random road traffic conditions are modeled in the form of a stochastic process $v(t)$.

The multidimensional stochastic process of phenomena accompanying the operation of a vehicle $Y(t)$ primarily applies to the emission of pollutants and fuel consumption:

$$Y(t) = [E_{CO}, E_{HC}, E_{NOx}, E_{PM}, E_{CO2}, G_f]^T \quad (3)$$

where: E – intensity of pollutant emissions, G_f – intensity of fuel consumption.

Assuming stationary and ergodynamic processes $v(t)$ and $Y(t)$, it is possible to determine values in the expected time frame (t_α, t_ω) for their implementation:

$$v_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{1}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} v(t) dt \quad (4)$$

$$Y_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{1}{t_\omega - t_\alpha} \int_{t_\alpha}^{t_\omega} Y(t) dt \quad (5)$$

The specific distance pollutant emissions are the ratio of concentration of pollutant emissions and velocity. Thus, the average specific distance pollutant emissions amount to:

$$b_{AV}(t_\alpha, t_\omega) = \frac{E_{AV}(t_\alpha, t_\omega)}{v_{AV}(t_\alpha, t_\omega)} \quad (6)$$

The average specific distance pollutant emissions are thus a function of average velocity (that is a function of the time of the start and finish of the averaging process) as well as the time of the start and finish of the averaging process:

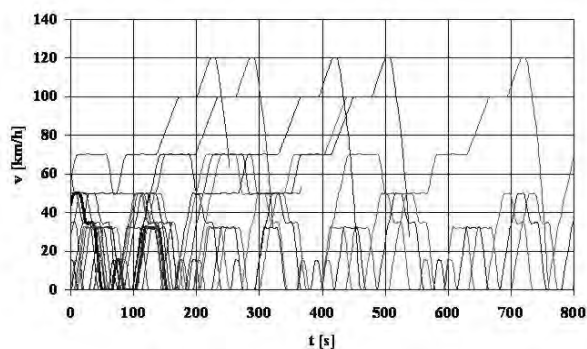
$$b_{AV} = f_b(v_{AV}(t_\alpha, t_\omega), t_\alpha, t_\omega) \quad (7)$$

If assumed that the time of the start and finish of the averaging process is randomly variable, then the determined specific distance emissions as a function of random variables may be considered a random function.

Thanks to the application of the Monte Carlo method there is a possibility of determining the stochastic characteristics of vehicle pollutant emissions – e.g. in the form of a dependence of specific distance pollutant emissions on the average vehicle velocity. There is also a possibility of determining one-dimensional characteristics dependent on other values – e.g. the average value of the module of acceleration or the average value of the module of the product of velocity and acceleration. There is also a possibility of determining multi-dimensional characteristics of pollutant emissions.

An example of implementation of the stochastic process of vehicle velocity built on the basis of Rule No. 83 ECE UE tests is the set of performances as depicted in Figure No. 8.

Fundamentalną właściwością zaproponowanej metody wyznaczania charakterystyk z zastosowaniem metody Monte Carlo jest możliwość uzyskania informacji o badanym obiekcie na podstawie pojedynczej realizacji procesu stochastycznego! Metoda Monte Carlo została zatem zastosowana – zgodnie z pierwotną, historyczną już, intencją jej twórców: Stanisława Ulama i Nickolasa Metropolisa [10] – do generowania rzeczywistości pseudoprzyrodkowej.



Rys. 8. Przykładowe realizacje stochastycznego procesu prędkości pojazdu v

Fig. 8. Exemplary realizations of a stochastic process of the vehicle velocity v

A fundamental quality of the proposed method for determining characteristics using the Monte Carlo method is the ability to procure information on the examined object on the basis of a single implementation of the stochastic process! Thus, the Monte Carlo method has been applied in line with the initial, historical intention of its creators – Stanisław Ulam and Nickolas Metropolis [10] – to generate pseudo-random reality.

4. Wyniki badań empirycznych

Badania empiryczne przeprowadzono na lekkim samochodzie ciężarowym Citroën Berlingo z silnikiem o zapłonie samoczynnym na hamowni podwoziowej w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji w Warszawie. Aparatura wykorzystywana do badań była zgodna z wymaganiami dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady w zakresie badań homologacyjnych samochodów. Spośród wielu rodzajów testów, m.in. FTP-75, HWFET, Stop and Go i Autobahn do analiz wybrano wyniki badań w teście wg regulaminu 83 EKG przeprowadzonym z rozruchem silnika nagrzanego do warunków normalnej eksploatacji.

Zarejestrowane przebiegi natężeń emisji zanieczyszczeń przetworzono cyfrowo, eliminując grube błędy i przeprowadzając filtrację dolnoprzepustową. Do filtracji wykorzystano filtr Golaya-Savitzky'ego [11] z następującymi parametrami uśredniania: wykorzystano obustronnie po dwa punkty oraz drugi stopień wielomianu aproksymującego.

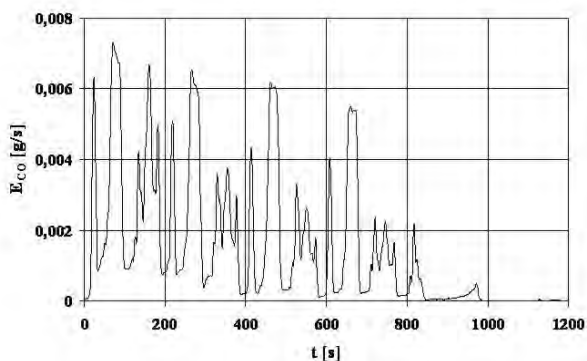
Na rysunkach 9 – 13 przedstawiono przetworzone przebiegi natężeń emisji zanieczyszczeń: tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu, cząstek stałych i dwutlenku węgla. Natężenie emisji cząstek stałych wyznaczono na podstawie pomiarów współczynnika zadymienia spalin, korelacyjnych metod wyznaczania stężenia cząstek stałych [6] oraz zarejestrowanego objętościowego natężenia przepływu powietrza zużywanego przez silnik. Przebiegi współczynnika zadymienia spalin oraz natężenia przepływu powietrza zostały poddane takim samym

4. The results of empirical tests

Empirical tests were conducted on a Citroën Berlingo light duty vehicle, equipped in a semi ignition engine, on a chassis dynamo meter at the Automotive Industry Institute in Warsaw. Equipment used in the tests was in line with the requirements of the Directive of the European Parliament and Council on vehicles homologation testing. Among the many types of tests—including FTP 75, HWFET, Stop and Go, and Autobahn—the test results selected were those from the Rule No. 83 ECE test conducted with the start-up of an engine warmed up to normal operating temperature.

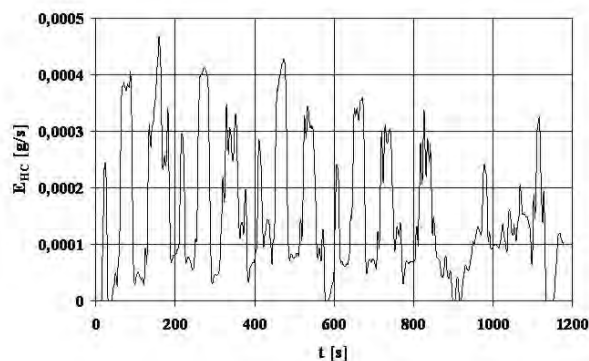
Registration of the processes of pollutant emission concentrations was processed digitally, eliminating significant errors and conducting low-pass filtration. The Golay-Savitzky filter [11] was used in filtration, with the following averaging parameters: two-sided use of two points and a second degree approximating polynomial.

Figure Nos. 9–13 depict the processed pollutant emission concentration processes: carbon monoxide, hydrocarbons, nitrogen oxides, particulate matter, and carbon dioxide. The concentration of particulate matter emissions was determined on the basis of measurements of the fume smoke coefficient, correlated methods for determining particulate matter concentrations [6], and the registered volume of air flow as used by the engine. The processes of the fume smoke coefficient as well as the volumes of air flow were subject to the same digital processing procedures as the pollutant emission concentration processes.



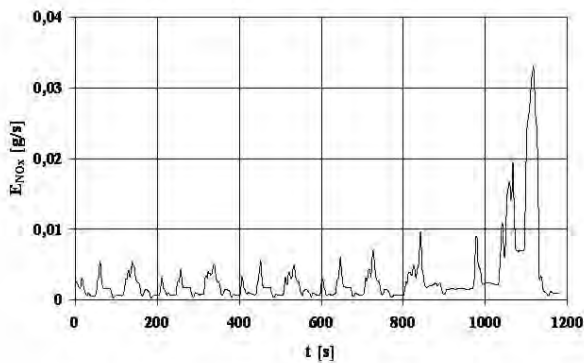
Rys. 9. Przebieg natężenia emisji tlenku węgla E_{CO}

Fig. 9. The process of the emission intensity of carbon monoxide E_{CO}

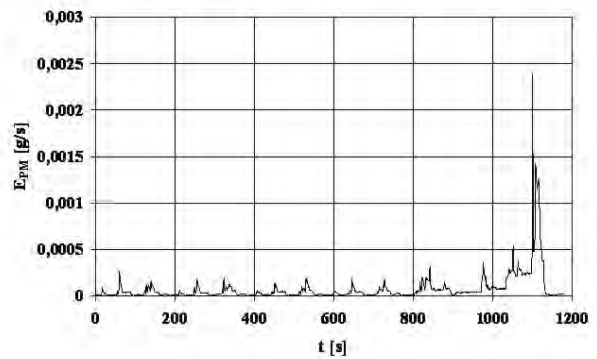


Rys. 10. Przebieg natężenia emisji węglowodorów E_{HC}

Fig. 10. The process of the emission intensity of hydrocarbons E_{HC}



Rys. 11. Przebieg natężenia emisji tlenków azotu E_{NOx}
 Fig. 11. The process of the emission intensity of nitrogen oxides E_{NOx}



Rys. 12. Przebieg natężenia emisji cząstek stałych E_{PM}
 Fig. 12. The process of the emission intensity of particulate matter E_{PM}

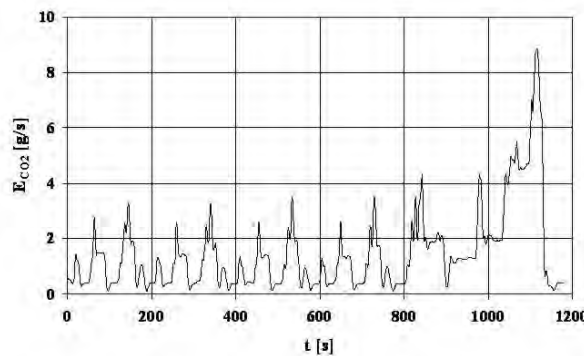
procedurom przetwarzania cyfrowego jak przebiegi natężenia emisji zanieczyszczeń.

Zarejestrowane przebiegi prędkości pojazdu oraz natężeń emisji zanieczyszczeń zostały wykorzystane do wyznaczenia charakterystyk emisji zanieczyszczeń.

Charakterystyki emisji zanieczyszczeń z samochodu wyznaczone metodą Monte Carlo.

Charakterystyki emisji zanieczyszczeń z samochodu zostały wyznaczone według metody przedstawionej w niniejszej pracy.

Na wykresach 14 – 18 przedstawiono charakterystyki emisji zanieczyszczeń w postaci zależności emisji drogowej od prędkości średniej. Zbiory punktów aproksymowano funkcją wielomianową o stopniu mniejszym niż 7 oprócz wykresu dla tlenku węgla, gdzie zastosowano do aproksymacji funkcję wykładniczą z powodu bardzo małych wartości emisji drogowej dla większych prędkości średnich, co groziło w wypadku funkcji wielomianowej wystąpieniem obszarów o ujemnej war-



Rys. 13. Przebieg natężenia emisji dwutlenku węgla E_{CO2}
 Fig. 13. The process of the emission intensity of carbon dioxide E_{CO2}

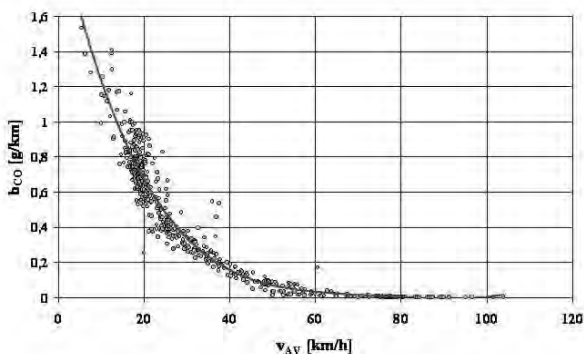
The registered vehicle velocity processes as well as those of pollutant emission concentrations were used to determine pollutant emission characteristics.

Vehicle pollutant emission characteristics determined using the Monte Carlo Method.

The vehicle pollutant emission characteristics were determined in line with the method presented in this paper.

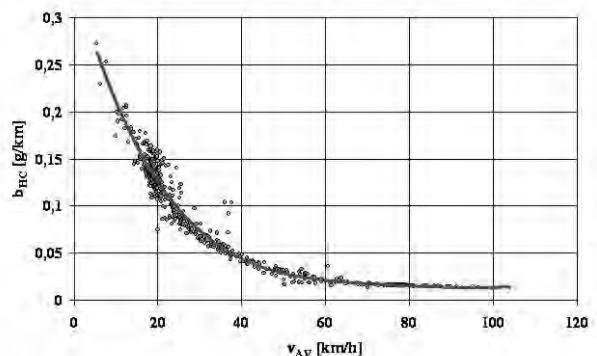
Figures Nos. 14–18 present the pollutant emissions in the form of the dependence of specific distance emissions on

average velocity. The sets of points were approximated by polynomial functions of a degree less than seven, except for the graph for carbon monoxide, where an exponential function was used in the approximation due to the very small value of specific distance emissions for greater average velocities, which threatened cases in which the polynomial function would have negative values for specific distance emissions. Selection of the degree of the polynomial for approximating the sets of points



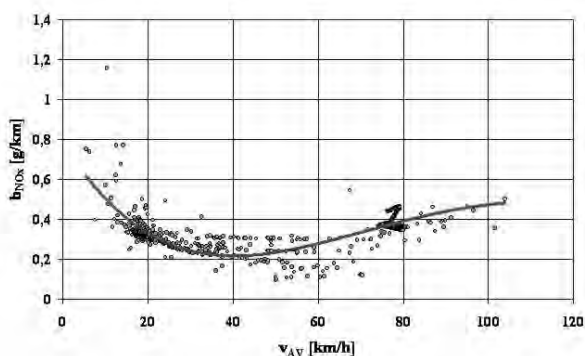
Rys. 14. Zależność średniej emisji drogowej tlenku węgla b_{CO} od prędkości średniej v_{AV} lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym

Fig. 14. The dependence of the specific distance emission of carbon oxide b_{CO} for light duty vehicle with semi ignition engines on the average velocity v_{AV}



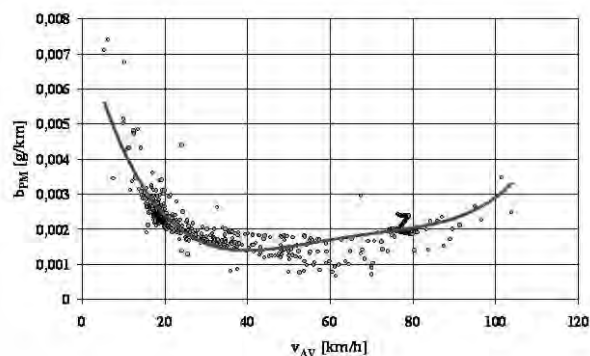
Rys. 15. Zależność średniej emisji drogowej węglowodorów b_{HC} od prędkości średniej v_{AV} lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym

Fig. 15. The dependence of the specific distance emission of hydrocarbons b_{HC} for light duty vehicle with semi ignition engines on the average velocity v_{AV}



Rys. 16. Zależność średniej emisji drogowej tlenków azotu b_{NO_x} od prędkości średniej v_{AV} lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym

Fig. 16. The dependence of the specific distance emission of nitrogen oxides b_{NO_x} for light duty vehicle with semi ignition engines on the average velocity v_{AV}



Rys. 17. Zależność średniej emisji drogowej cząstek stałych b_{PM} od prędkości średniej v_{AV} lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym

Fig. 17. The dependence of the specific distance emission of particulate matter b_{PM} for light duty vehicle with semi ignition engines on the average velocity v_{AV}

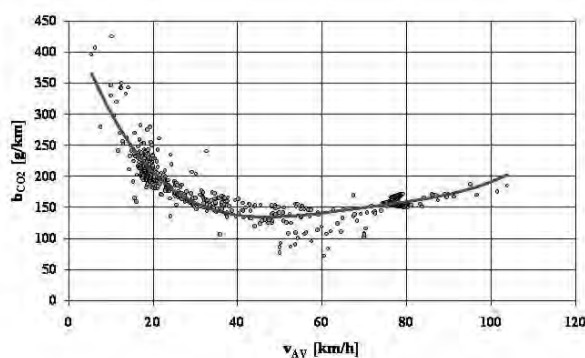
tości emisji drogowej. O doborze stopnia wielomianu proksymującego zbiory punktów decydowały kryteria niesprzeczności wyników aproksymacji z rzeczywistością (np. postulat dodatniości emisji) oraz z dotychczasowymi wiedzą i doświadczeniem.

Dla wyznaczonych charakterystyk jest znamienna ich regularność i zgodność z doświadczeniem [1, 4, 8]. W wypadku tlenku węgla i węglowodorów z silników o zapłonie samoczynnym do lekkich samochodów ciężarowych znamienne jest znaczne zmniejszenie się emisji drogowej w miarę wzrostu prędkości średniej pojazdu. Dla tlenków azotu, cząstek stałych i dwutlenku węgla również dla małych prędkości średnich pojazdu stwierdza się zmniejszanie się emisji drogowej, jednocześnie jednak następuje jej zwiększanie w obszarze dużych prędkości średnich, odpowiadających dużemu obciążeniu silnika.

Charakterystyki emisji zanieczyszczeń w postaci zależności emisji drogowej od prędkości średniej stanowią wartościowe źródło informacji o ekologicznych właściwościach pojazdów w dynamicznych warunkach użytkowania. Bez znajomości takich charakterystyk nie ma możliwości bilansowania emisji zanieczyszczeń z ruchu drogowego, a więc także oceny szkodliwości motoryzacji dla naturalnego i cywilizacyjnego środowiska ludzi, zatem zaproponowana metoda ma oprócz charakteru poznawczego również wymierne walory użyteczne.

6. Podsumowanie

Przedstawiona metoda wyznaczania charakterystyk emisji zanieczyszczeń z zastosowaniem metody Monte Carlo jest pionierską unikatową metodą badania ekologicznych właściwości silników spalinowych w symulowanych warunkach pseudoprzypadkowych. Znamienną cechą tej metody jest



Rys. 18. Zależność średniej emisji drogowej dwutlenku węgla b_{CO_2} od prędkości średniej v_{AV} lekkiego samochodu ciężarowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym

Fig. 18. The dependence of the specific distance emission of carbon dioxide b_{CO_2} for light duty vehicle with semi ignition engines on the average velocity v_{AV}

was determined by the criterion of non-contradiction of the approximation results with reality (e.g. the postulate of positivity of the emissions) as well as current knowledge and experience.

Regularity and agreement with experience [1, 4, 8] is characteristic of the determined attributes. In the case of carbon monoxide and hydrocarbons from semi ignition engines for light duty vehicle, what is characteristic is the significant decrease in specific distance emissions with an increase in average vehicle velocities. As to nitrogen oxides, particulate

matter, and carbon dioxide, there is also a fall in specific distance emissions in the case of low average vehicle velocities. However, at the same time they increase in the area of high average velocities, signifying major engine load.

Characteristics of pollutant emissions in the form of dependence between specific distance emissions and average velocity are a valuable source of information about the environmental properties of vehicles subject to dynamic operating conditions. Without an awareness of these characteristics it is not possible to balance pollutant emissions for road traffic, and thus also assess the harmfulness of motoring on the natural and civilizational environment of people. Thus, the proposed method, in addition to a learning character, also has tangible utilitarian values.

6. Summary

The presented method for determining the characteristics of pollutant emissions using the Monte Carlo method is a pioneering and unique method for studying the environmental properties of internal combustion engines under pseudo-random simulated conditions. A characteristic feature of this method is

fakt, iż jest możliwe wnioskowanie o właściwościach ocenianego obiektu w warunkach modelowanych procesami stochastycznymi o różnych właściwościach na podstawie znajomości tylko jednej realizacji procesu, która jest zarejestrowana w wyniku przeprowadzenia badania empirycznego. W zaproponowanej metodzie wykorzystywaną zmienną właściwością procesów stochastycznych jest wartość oczekiwana prędkości pojazdu, możliwe jest jednak znaczne rozszerzenie programu badań na inne właściwości procesów stochastycznych.

Możliwości zastosowania opracowanej metody są dużo szersze od opisanych, może być ona wykorzystana do badania wielu obiektów i to nie tylko technicznych, dla których to obiektów jest znamienna współzależność procesów opisujących obiekt: postulowana determinacja lub stwierdzona korelacja.

the fact that it is possible for draw conclusions as to the qualities of the evaluated object subject to conditions of modeled stochastic processes of various properties on the basis of familiarity with only a single implementation of a process that is registered as a result of a conducted empirical experiment. In the proposed method, the variable property of stochastic processes used is the value of the expected vehicle velocity. However, it is possible to significantly expand the test program to encompass other stochastic process properties.

The potential application for the developed method is much broader than described. It can be used to study many objects, not only technical ones, for which the co-dependence of processes describing the object is a characteristic—the postulated determination or confirmed correlation.

7. References

1. BUWAL, INFRAS AG: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950 – 2010. BUWAL–Bericht Nr. 255. Bern, Zürich, 1995.
2. Chłopek Z.: Metody badań ekologicznych właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej 1999; 3(34): 27–34.
3. Chłopek Z.: Metody badań właściwości silników spalinowych w warunkach przypadkowych modelujących użytkowanie. Archiwum Motoryzacji 2001; 4: 187–210.
4. Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. Prace Naukowe. Seria „Mechanika” z. 173. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 1999.
5. Chłopek Z.: Pojazdy samochodowe. Ochrona środowiska naturalnego. Warszawa: WKŁ, 2002.
6. Chłopek Z., Darkowski A., Piaseczny L.: Influence of metalloorganic additive to the fuel on the pollution emission from the SI engine. Polish Journal of Environmental Studies, 2005; 5(14): 559–567.
7. <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/>.
8. INFRAS AG: Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs; Version 2.1. Bern, 2004.
9. Lohmeyer A., Düring I., Lorentz H.: Validierung von PM10–Immissions–berechnungen im Nahbereich von Straßen und Quantifizierung der Staubbildung von Straßen, Schildhornstraße in Berlin. Senatverwaltung für Stadtentwicklung. Berlin, 2001.
10. Metropolis N., Ulam S.: The Monte Carlo Method. Journal of the American Statistical Association, 1949; 44(247): 335–341.
11. Savitzky A., Golay M.J.E.: Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical Chemistry 1964; 36: 1627–1639.

Prof. nzw. dr hab. inż. Zdzisław CHŁOPEK

Przemysłowy Instytut Motoryzacji w Warszawie
ul. Jagiellońska 55, 03–301 Warszawa
e-mail: moriarty@o2.pl

Mgr inż. Piotr LASKOWSKI

Politechnika Warszawska
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych
ul. Narbutta 84, 02–524 Warszawa
e-mail: peterkasprus@interia.pl

ANALIZA PORÓWNAWCZA CECH EKSPLOATACYJNYCH UKŁADÓW RUCHOWYCH STATKÓW TYPU ROPAX

COMPARATIVE ANALYSIS OF OPERATIONAL PROPERTIES OF PROPULSION SYSTEMS OF ROPAX TYPE SHIPS

W artykule przedstawiono genezę powstania statków typu RoPax. Opisano i poddano analizie główne układy napędowe najczęściej stosowane na tego typu statkach: układ spalinowo-mechaniczny, spalinowo-elektryczny oraz układ hybrydowy. Określono moce holowania przyjętych do analizy jednostek: referencyjnej i hipotetycznej z układem napędowym hybrydowym. Przeprowadzono analizę energetyczną porównywanych układów napędowych i dobrano ich główne elementy. Porównano cechy eksploatacyjne analizowanych układów ruchowych statków.

Słowa kluczowe: statek, układ napędowy, silnik spalinowy, pędnik, napęd hybrydowy.

The article presents the origins of RoPax type ships. Main propulsion systems most often used on ships of this type have been analysed i.e the diesel-mechanical system, the diesel-electric system as well as the hybrid system. The towrope horsepowers of the analysed units have been determined: the reference one and the hypothetical one with the hybrid propulsion system. Energy analysis of the compared systems has been carried out and their main elements have been chosen. Operational properties of the analysed ship propulsion systems have been compared.

Keywords: ships, propulsion system, diesel engine, propeller, hybrid propulsion.

1. Wprowadzenie

Współczesna historia statków typu RoPax jest ściśle związana z żeglugą promową. Rozwój technologii poziomego ładowania wymusiła potrzeba przedłużenia lądowych szlaków komunikacyjnych poprzez przewóz wodą środków transportu lądowego [3, 12, 13].

W czasie II wojny światowej technologia poziomego ładowania została na wielką skalę zastosowana w armii USA do transportu kołowego i gąsienicowego sprzętu wojskowego. Po wojnie wiele z tych statków trafiło do żeglugi cywilnej.

Dynamiczny rozwój technologii poziomego ładowania spowodował powstanie wielu odmian statków typu „RoRo”, które nie przewoziły już tylko samochodów czy pociągów, ale również kontenery oraz inne ładunki ładowane za pomocą np. wózków widłowych. Powstały także statki, których załadunek częściowo odbywał się w płaszczyźnie poziomej, a częściowo pionowej za pomocą dźwigów [3, 12]. W następstwie rozwoju wymiany towarowej, motoryzacji oraz turystyki, statki te przewoziły coraz więcej samochodów osobowych i pasażerów, co zwiększyło zapotrzebowanie na statki typu „Cruise Ferry”, na których bardzo ważną rolę odgrywała część pasażerska. Statki te stawały się bardziej ekskluzywne, znajdowało się na nich coraz więcej atrakcji: tj. barów, dyskotek, basenów, salonów gier itp. [12, 13, 14].

Z upływem czasu tendencja ta zaczęła się zmieniać. W rejonie Morza Bałtyckiego i Morza Północnego koncentruje się około 35% światowych połączeń promowych. Szybki wzrost gospodarczy krajów leżących w basenach tych mórz spowodował wzrost zapotrzebowania na przewozy ładunków tocznych i spadek zapotrzebowania na przewóz pasażerów. Przewoźnicy europejscy zaczęli wprowadzać do eksploatacji promy, w których część ładunkowa była coraz większa w stosunku do części pasażerskiej. W ten sposób,

1. Introduction

Contemporary history of the RoPax type ships is closely connected with ferry trade. Development of horizontal loading induced the need for lengthening overland communication routes by employing water transportation to carry overland means of transport. [3, 12, 13].

During the second world war technology of horizontal loading was used by the US army for transporting military wheel and caterpillar equipment. After the war a lot of such ships were used for civilian navigation.

Dynamic development of horizontal loading technology lead to the creation of many varieties of the RoRo type ships, which were not only carrying cars or trains but also containers and other cargos loaded by for example fork-lift trucks. There were also built such ships which were loaded partly in the horizontal way and partly in the vertical way with the use of cranes [3, 12]. As a result of the development of goods exchange, motorization and tourism, these ships were carrying more and more cars and passengers which increased the requirement for the “Cruise Ferry” type of ships where the passenger part played a very important role. These ships were becoming more and more exclusive, they were equipped in a growing number of different attractions i.e. bars, discos, swimming pools, game lounges etc.[12, 13, 14].

With time this tendency started to change. In the region of the Baltic and the North Sea 35% of the world ferry trade is concentrated. Rapid economic development of the countries lying by these seas lead to the increased demand on rolling cargo transportation and the decrease in demand on passenger transportation. European carriers started to introduce ships whose cargo part was becoming bigger in respect to the passenger part. Thus in a short period of time ferry connections were dominated by the RoPax type ships. Their increased participation in

w krótkim czasie, połączenia promowe zostały zdominowane przez statki typu RoPax. Wzrost udziału we flocie światowej tego typu statków spowodował rozwój ich głównych układów napędowych [3, 15].

RoPax-y są w tej chwili najpopularniejszymi statkami w połączeniach promowych [12, 15]. W konsekwencji zaowocowało to rozwojem technologicznym tych statków i ich głównych układów napędowych poprzez:

- zastosowanie nowatorskich rozwiązań ramp ładunkowych, pozwalających na załadunek i rozładunek statków w bardzo krótkim czasie;
- modernizację konstrukcji kadłubów;
- kombinacyjne rozwiązania konstrukcji pokładów ładunkowych oraz wind zainstalowanych między nimi;
- stosowanie nowych, coraz bardziej niezawodnych i ekonomicznych rozwiązań napędu głównego statku.

Na rysunku 1 przedstawiono rozwój różnych typów statków żeglugi promowej w drugiej połowie XX wieku pod względem ich pojemności [7].

Układ napędowy statku typu RoPax powinien zapewnić prędkość kontraktową statku przy najkorzystniejszej sprawności napędu, odpowiednią manewrowość i niezawodność, maksymalną elastyczność podczas zmian obciążenia i wysoką sprawność przy częściowych obciążeniach napędu głównego, podatność obsługową i remontową oraz

- odpowiednią dostępność energii elektrycznej,
- niskie koszty eksploatacji, obsługi i napraw,
- jak najmniejsze zanieczyszczenie środowiska morskiego przy możliwie niskich kosztach budowy instalacji.

the world navigation brought about development in their main propulsion systems [3, 15].

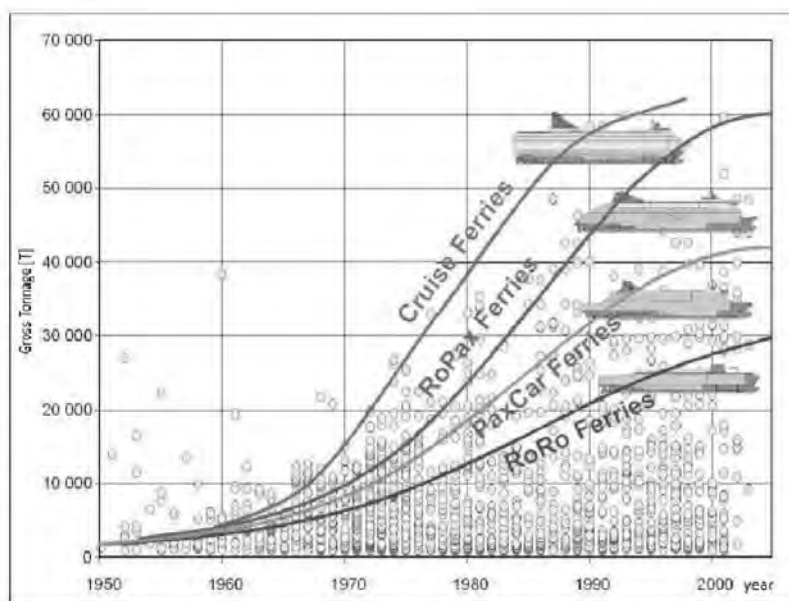
At the moment the RoPaxs are the most popular ships in the ferry trade [12, 15]. As a consequence their technological development took place and also that of their main propulsion systems throughout:

- implementing innovative solutions to loading ramps enabling loading and unloading
- in a short period of time,
- modernization of hull construction,
- combinative solutions in the cargo boards and the lifts installed between them,
- applying new more reliable and economical solutions to main propulsion systems.

Figure 1 presents the development of different types of ferries in respect to their tonnage in the second half of the twentieth century [17].

The main propulsion system of a ship of a RoPax type should ensure the contracted speed of the ship at the most advantageous efficiency of the propulsion system, appropriate manoeuvrability and reliability, maximal flexibility at load change and high efficiency at partial loads on the main propulsion system, serviceability both for the needs of normal operation as well as for overhauls and also:

- appropriate accessibility of electrical energy,
- low costs of operation, maintenance and overhauls,
- the lowest pollution of the maritime environment at the possibly lowest costs of construction installation.



Rys. 1. Rozwój wielkości statków żeglugi promowej w drugiej połowie XX wieku
 Fig. 1. Ferry development trends in the second half of the 20th century

2. Układy napędowe współczesnych statków typu RoPax

Na statkach typu RoPax dominują trzy rodzaje układów napędowych: spalinowo- mechaniczny, spalinowo-elektryczny oraz od niedawna, połączenie tych dwóch, czyli napęd kombinowany – hybrydowy. W każdym z tych układów w charakterze

2. Propulsion systems of contemporary RoPax ships

The following three types of propulsion dominate on RoPax ships: diesel-mechanical, diesel-electrical and since recently a combination of the two, i.e. a combined hybrid propulsion. Each of these systems uses as the main engine diesel engines

silników głównych stosowane są wysokoprężne silniki średnioobrotowe, które w porównaniu z silnikami wolnoobrotowymi mają korzystniejsze charakterystyki geometryczne, a przede wszystkim mniejszą wysokość.

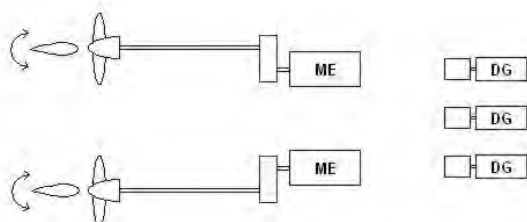
Napęd **spalinowo-mechaniczny** oparty jest na kilku koncepcjach konfiguracji. Najczęściej spotykanym na RoPaxach jest wariant przedstawiony na rysunku 2, tzn. dwa silniki główne, średnioobrotowe, z których każdy poprzez przekładnię redukcyjną napędza wał śrubowy ze śrubą o skoku ustalonym lub nastawnym. Za każdą ze śrub umieszczony jest ster. Na jednym lub obu silnikach mogą być zastosowane (zawieszane) prądnice wałowe. Zapotrzebowanie na energię elektryczną zapewniają trzy niezależne zespoły prądotwórcze, a podczas podróży morskiej prądnice wałowe (jeśli są zastosowane) [7, 8].

Innymi, sporadycznie stosowanymi na statkach RoPax rozwiązaniami tego typu siłowni są cztery silniki główne, po dwa na każdą przekładnię lub zastosowanie jednego silnika głównego, napędzającego poprzez przekładnię jeden wał śrubowy. Układy z silnikami średnioobrotowymi charakteryzuje:

- prostota konstrukcji w stosunku do silników wolnoobrotowych,
- stosunkowo mała masa siłowni (w przypadku dwóch silników średnioobrotowych masa zbliżona do siłowni z jednym silnikiem wolnoobrotowym o podobnej mocy),
- umiarkowana wysokość siłowni,
- możliwość zasilania różnymi paliwami (destylacyjnym jak i pozostałościowym),
- dwa wały śrubowe wymuszają zastosowanie dwóch płetw sterowych,
- wyższy poziom hałasu w porównaniu do siłowni z silnikami wolnoobrotowymi,
- trudność utrzymania silników głównych na zakresach bliskich obciążeniom optymalnym – na częściowych obciążeniach wzrasta jednostkowe zużycie paliwa.

W **spalinowo-elektrycznym** układzie napędowym, w charakterze silników głównych stosowane są średnioobrotowe silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym napędzające prądnice synchroniczne. Najczęściej jest ich kilka. Poprzez transformatory i przetwornice częstotliwości zasilają one silniki elektryczne, których moment elektromagnetyczny przekazywany jest pędnikom okrętowym.

W rozwiązaniu przedstawionym na rysunku 3 zastosowano „azipody”, które dzięki swej konstrukcji eliminują konieczność stosowania płetw sterowych. Istnieją również rozwiązania, gdzie prądnice zasilają silniki elektryczne, połączone tradycyjnie wałem ze śrubą napędową o ustalonym skoku lub „pody”,



Rys. 2. Konfiguracja spalinowo-mechanicznego modelowego układu napędowego [7]: ME - główny silnik napędowy; DG - niezależny zespół prądotwórczy

Fig. 2. Diesel-mechanical machinery model [7]: ME – main engine, DG – diesel generator

with medium rotations which in comparison to those with slow rotations have more advantageous geometric characteristics and first of all smaller heights.

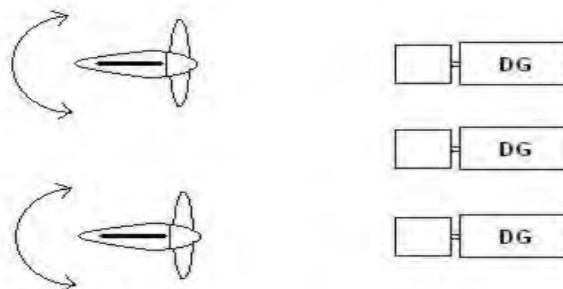
Diesel-mechanical propulsion is based on a few configuration concepts. The option most often found on RoPax ships is the one shown in Fig. 2. It consists of two medium speed main engines, each of which through a reduction gear drives a fixed or controllable propeller pitch. Behind each of the propellers there is a rudder. On one or both engines, shaft generators can be mounted. The demand for electricity is satisfied by three independent diesel generator units and during a voyage by shaft generators (if they are applied) [7, 8].

Other solutions of this type, however sporadically, installed on RoPax ships contain four main engines, two per each gear, or just one main engine driving throughout a gear one propeller. Systems of medium speed engines are characterized by the following:

- simple construction in comparison to that of slow speed engines,
- relatively small mass of the system (in the case of two medium speed engines its mass is similar to that of the system which contains one slow speed engine of similar power),
- relatively low height,
- possibility of running on different fuels (distillate or the residual),
- two propellers induce the application of two rudder blades,
- higher noise levels than for those with slow speed engines,
- difficulty in maintaining the main engines in the ranges close to optimal loads – at partial loads specific fuel consumption increases.

In **diesel-electric** propulsion systems the main engines are medium speed diesel engines driving synchronous current generators. Most often there are several of them. Throughout transformers and frequency converters they feed the electric engines whose electromagnetic momentum is passed on to ship propellers.

In the solution shown in Fig. 3 the so called “azipods” were used which thanks to their construction eliminate the need for rudder blades. There are also such solutions where generators feed electric engines which are in a traditional way connected with a fixed propeller or “pods” whose construction reminds that of “azipods”, however they cannot rotate around their vertical axis. This solution requires the application of rudders [5, 8,



Rys. 3. Konfiguracja modelowego spalinowo-elektrycznego układu napędowego [7]

Fig. 3. Diesel-electric machinery model [7]

które swą budową przypominają „azipody”, jednak nie mają możliwości obrotu wokół osi pionowej. Takie rozwiązanie wymaga zastosowania sterów [5, 8, 9]. Zapotrzebowanie na energię elektryczną pozostałych odbiorników na statku zapewniają te same prądnice, poprzez transformator.

Napęd spalinowo-elektryczny stosuje się przede wszystkim na statkach, na których pomieszczenie siłowni musi być przeniesione do „dogodnej” części kadłuba oraz na takich, które nie zawsze pływają przy obciążeniu projektowym, co pozwala wykorzystać ich elastyczność do przyjmowania obciążeń poprzez włączanie lub wyłączanie poszczególnych zespołów prądowców. Układ taki cechuje:

- łatwość utrzymania optymalnego obciążenia silników spalinowych napędzających prądnice, poprzez ich włączanie lub wyłączanie z pracy,
- znaczące straty przekazywania energii z prądnic do pędnika, bo ok. 8% [7, 8],
- możliwość uzyskania siłowni o małej wysokości,
- usytuowanie siłowni w dogodnym miejscu w kadłubie statku, dzięki braku połączeń mechanicznych między prądnicami i napędzanymi przez nie pędnikami typu „pod” lub „azipod”,
- możliwość zasilania silników zarówno paliwem destylacyjnym jak i pozostałościowym,
- konieczność zainstalowania dwóch płetw sterowych, jeśli nie zastosowano azipodów,
- bardzo dobre właściwości manewrowe statku, jeśli zastosowano azipody.

Napęd hybrydowy jest kombinacją napędu spalinowo-mechanicznego z napędem spalinowo-elektrycznym. W układzie tym średnioobrotowy silnik główny napędza przez przekładnię mechaniczną śrubę o skoku nastawnym. W osi śruby, bezpośrednio za nią, umieszczony jest azipod ze śrubą przeciwbieżną o skoku ustalonym. Schemat hybrydowego układu napędowego przedstawiono na rysunku 4 [7, 8, 9].

Azipod napędzany jest przez prądnice dostarczające część energii elektrycznej na potrzeby statku. Stosowane są również rozwiązania z dwoma pędnikami napędzanymi elektrycznie (podami lub azipodami), umieszczonymi po obu burtach, a za śrubą napędu mechanicznego umieszczana jest płetwa sterowa. Jednak za-

stosowanie śrub przeciwbieżnych, zdecydowanie przewyższa właściwości tego rozwiązania, ze względu na wyższą sprawność energetyczną. Łącząc zalety poprzednich dwóch układów napędowy wyróżniają:

- znaczne straty transmisji energii elektrycznej z prądnic do pędnika, ok. 8%,
- wzrost sprawności rotacyjnej dzięki wykorzystaniu ruchu wirowego wody, w przypadku zastosowania azipodu za śrubą napędu mechanicznego,
- bardzo dobra manewrowość statku,
- zwiększone opory statku, jeśli zastosowano pody po obu burtach,
- zmniejszone opory statku, jeśli zastosowano system CRP (Contra Rotating Propeller) w przypadku azipodu umieszczonego w linii za śrubą napędu mechanicznego.

9]. Electricity needs of other ship receivers are satisfied by the same generators throughout transformers.

Diesel-electric propulsion is mainly used on ships where the engine room has to be moved to a “convenient” part of the hull and such that do not always sail with designed load, which allows to utilize their flexibility for accepting loads by switching on and off particular diesel generator units. Such systems are characterized by:

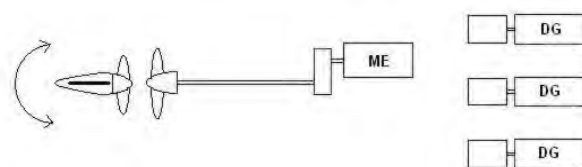
- easy maintenance of optimal load of diesel engines driving current generators throughout their switching on and off,
- significant losses in the electrical energy transferred from generators to the propeller, by about 8% [7, 8],
- possibility to obtain a propulsion system of low height,
- convenient location of the engine room in the hull, thanks to the lack of mechanical connections between generators and “pod” and “azipod” type propellers driven by them,
- possibility of running on different fuels (distillate or the residual),
- the necessity to install two rudder blades if azipods are not used,
- very good ship manoeuvrability of the ship when azipods are installed.

Hybrid propulsion is a combination of diesel-mechanical propulsion with a diesel-electric one. In this system the main medium speed engine drives throughout a mechanical gear with a controllable pitch propeller. In the axis of the propeller, directly behind it, there is an azipod with a contra-rotation fixed pitch propeller. A diagram presenting a hybrid system is presented in Fig. 4 [7, 8, 9].

An azipod is driven by generators supplying part of the electrical energy to meet the ship's needs. There are also solutions with two propellers electrically driven (pods and azipods) placed on both sides of the ship and behind the mechanical propeller there is a rudder blade. However, using the contra-rotation propellers

pronouncedly improves the characteristics of this solution, due to higher energy efficiency. Combining the benefits of the two previous systems, the hybrid system is characterized by:

- significant losses, of about 8%, in the electrical energy transferred from generators to the propeller,
- the increase in rotational efficiency thanks to utilizing the circular movement of water in the case when an azipod is mounted behind the mechanical propulsion,
- very good manoeuvrability of the ship,
- increased resistance of the ship if pods on both sides of the ship are installed,
- a decrease in ship resistance if a CRP system was used (Contra Rotating Propeller) with an azipod installed in line behind the propeller of the mechanical propulsion.



Rys. 4. Konfiguracja napędu hybrydowego [7]

Fig. 4. Hybrid machinery model [7]

W tabeli 1 przedstawiono przykładowe cechy wybranych statków RoPax, typów przedstawionych na rysunku 1 [7, 13, 14].

Table 1 shows examples of chosen properties of RoPax ships, of the types shown in Fig. 1 [7, 13, 14].

Tab. 1. Przykładowe cechy wybranych statków typu RoPax
Tab. 1. Examples of chosen characteristics of RoPax type ships

Typ statku Ship type	Nazwa statku Name of the ship	Pojemność brutto [tony] Gross Tonnage [tons]	Prędkość odróżna [węzły] Travel speed [knots]	Rodzaj układu napędowego Type of propulsion system	Moc napędu głównego [kW] Main power [kW]	Rodzaj pędnika Type of propeller
RoPax	Ropax 1	33163	17	spalinowo-mechaniczny diesel- mechanical	15880	2 śruby o skoku nastawnym 2 CPP
	Hamanasu	16800	30,5	kombinowany (hybrydowy) hybrid	42800	CRP
Rofo	Norsky	19992	21	spalinowo-mechaniczny diesel- mechanical	18900	2 śruby o skoku nastawnym 2 CPP
	UND Ege	22900	21,6	spalinowo-mechaniczny diesel- mechanical	16200	2 śruby o skoku nastawnym 2 CPP
PaxCar	Seafrance Rodin	33796	25	spalinowo-mechaniczny diesel- mechanical	39000	2 śruby o skoku nastawnym 2 CPP
	Krossos Palace	37000	29,5	spalinowo-mechaniczny diesel-mechanical	67200	2 śruby o skoku nastawnym 2 CPP
Cruise	Carnival Pride	85900	22	spalinowo- elektryczny diesel-electrical	62370	2 azipody 2 azipods
	Princess Cruises	108806	22,5	spalinowo- elektryczny diesel-electrical	69097	2 azipody 2 azipods

Za podstawowy rodzaj układu napędowego statku typu RoPax należy uznać układ spalinowo-mechaniczny. Poszukiwanie wszelkich innych, alternatywnych rozwiązań jest odnoszone do jego cech i właściwości. Dlatego też, spalinowo-mechaniczny układ napędowy przyjęto w artykule jako referencyjny.

A diesel-mechanical propulsion system should be considered the basic one for a RoPax type ship. A search for alternative solutions is referred to its properties and characteristics. That is why a diesel-mechanical propulsion system has been chosen in this paper as a reference one.

3. Określenie mocy holowania wybranych jednostek

Do egzemplifikacji zagadnienia, posłużono się obliczeniami opartymi na danych jednostki z tradycyjnym, spalinowo-mechanicznym układem napędowym, istniejącego statku typu Ropax 1 ([14, 15], patrz tabela 1) oraz hipotetycznej jednostki z hybrydowym układem napędowym, zainstalowanym w identycznym kadłubie o przyjętych następujących parametrach:

Długość całkowita	192,59 m
Odległość między pionami	182,59 m
Długość kadłuba na linii wodnej	186,36 m
Szerokość maksymalna	27,03 m
Zanurzenie	6,77 m
Wysokość do pokładu głównego	9,46 m
Wysokość do pokładu górnego	16,95 m
Pojemność brutto	33 163 t
Pojemność netto	17 996 t
Nośność	10 687 t
Wyporność statku pustego	13 893 t

3. Determination of towrope horsepower of a chosen unit

To exemplify the problem, calculations were based on data for an existing RoPax 1 type unit with a traditional, diesel-mechanical propulsion system ([14,15], see table 1) and hypothetical unit with a hybrid propelling system installed on an identical hull with the assumed following parameters:

Length overall	192.59 m
Length between perpendiculars	182.59 m
Length on the water mark	186.36 m
Breadth moulded	27.03 m
Draft	6.77 m
Depth to main deck	9.46 m
Depth to the upper deck	16.95 m
Gross tonnage	33 163 t
Net tonnage	17 996 t
Deadweight	10 687 t
Lightship displacement	13 893 t

Pierwotnie statek został zbudowany jako typowy RoRo. Po kilku latach eksploatacji został przebudowany do typu RoPax, poprzez dobudowę części hotelowej. Zwiększono również długość linii ładunkowej oraz zmieniono konstrukcję ramp. Statek liczący 45 osób załogi przeznaczono do przewozu samochodów ciężarowych, osobowych i 200 pasażerów pomiędzy portami Szwecji i Niemiec z prędkością podróżną 17 węzłów. Do obliczeń przyjęto prędkość kontraktową 21 węzłów, ponieważ dla mniejszych prędkości, a tym samym mniejszych mocy silników głównych stosowanie siłowni hybrydowych z wykorzystaniem CRP jest ekonomicznie nieuzasadnione [14]. Wówczas koszt inwestycji nie zostanie zakumulowany zyskiem, wynikającym z wyższej sprawności tego typu układów napędowych.

Moc holowania obliczono dla dwóch rozwiązań układów napędowych.

Pierwszy z nich, to napęd tradycyjny w układzie dwuśrubowym z dwoma skegami i dwoma silnikami głównymi, z których każdy napędza jedną śrubę napędową. W tym przypadku występują również dwie płetwy sterowe.

Drugie rozwiązanie, to napęd hybrydowy, połączenie napędu spalinowo-mechanicznego z napędem spalinowo-elektrycznym, z zastosowaniem układu śrub przeciwbieżnych CRP. W tym przypadku wykorzystany został kadłub jednoskegowy. Nie występują również płetwy sterowe dzięki zastosowaniu azipodu.

Moc holowania obliczono metodą Holtrop'a [5, 6], ze względu na łatwość uwzględnienia różnic w oporach powodowanych elementami wystającymi kadłuba, tzw. skegami, płetwami sterowymi itp. Numeryczny opis składowych oporów stawianego przez kadłub statku w wodzie morskiej posłużył do opracowania prognozy oporowo-napędowej ze stopniem szczegółowości projektu wstępnego statku [4, 11, 17]. Metodą tą określono:

- opór stawiany przez kadłub statku w wodzie morskiej,
- właściwości napędowe,
- efekt skali pomiędzy modelem i rzeczywistym kadłubem.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń ważniejszych wielkości charakteryzujących porównywane układy napędzane statków.

4. Analiza energetyczna układów napędowych porównywanych jednostek

Analizę oparto na porównaniu wyników obliczeń wykonanych dla dwóch rozwiązań napędu: dla tradycyjnego, spalinowo-mechanicznego oraz dla hybrydowego (w tym przypadku połączenia napędu spalinowo-mechanicznego ze spalinowo-elektrycznym z wykorzystaniem śrub przeciwbieżnych). Moc głównego silnika napędowego P_B , zapotrzebowaną do napędu statku, określono dla obliczonej mocy holowania P_E z zależności

$$P_B = \frac{P_E}{\eta_T} \quad (1)$$

gdzie sprawność całkowita η_T , uwzględniająca, straty energii zachodzące w układzie napędzonym statku jest iloczynem sprawności kadłuba η_H , sprawności rotacyjnej η_R , sprawności śruby swobodnej η_O , sprawności linii wałów η_S oraz sprawności przekładni redukcyjnej η_G [2, 4, 10, 17]

$$\eta_T = \eta_H \eta_R \eta_O \eta_S \eta_G \quad (2)$$

Originally the ship was constructed as a typical RoRo. After several years of operation it was rebuilt to the RoPax type throughout adding a hotel part. The load line was extended and the construction of the ramp was changed. The ship with a crew of 45 was to transport lorries, cars and 200 passengers among the harbours of Sweden and Germany travelling with the speed of 17 knots. For calculation the contracted speed of 21 knots was taken, as for lower speeds and thus smaller power of the main engines using a hybrid propulsion system with CRP is not economically justified [14]. In such a case the costs of investments wouldn't bring profits due to higher efficiency of this type of propulsion system. The tugging power was calculated for two varieties of propulsion systems.

The first of them is the traditional propulsion in a two-propeller system with two skegs and two main engines, both of which drive one propeller. In this case there also two rudder blades.

The second solution is the hybrid propulsion - a combination of diesel-mechanical propulsion system with a diesel-electric one with a system of contra rotation propellers CRP. In this case a one-skeg hull was used. There are no rudder blades thanks to using an azipod.

The towrope horsepower was calculated by Holtrop method [5, 6] due to the fact that here, it was easy to take into account differences in resistance caused by elements protruding from the hull. i.e. skeg rudder blades etc. A numerical description of the components of resistance caused by the ship hull in sea water was used to prepare a resistance-propulsion prognostics with the accuracy of initial ship design [11, 17]. This method lead to the determination of the following:

- resistance of the ship hull in sea water,
- propulsion qualities,
- scale effect between the model and the actual hull.

Table 2 shows the results of calculations of the more important qualities characterizing the compared ship propulsion systems.

4. Energy analysis of propulsion systems of the compared units

The analysis was based on the comparison of results of calculations performed for two propulsion solutions: the traditional one, diesel-mechanical and for the hybrid one (in this case it is a combination of the diesel-mechanical with the diesel-electric one with contra rotation propellers). The power of the main driving engine P_B needed for ship propulsion was determined for the calculated towrope power P_E from the following relation

$$P_B = \frac{P_E}{\eta_T} \quad (1)$$

where the total efficiency η_T taking into account energy losses in the ship propulsion system is the product of hull efficiency η_H , rotational efficiency η_R , efficiency of the free propeller η_O , efficiency of the shaft line η_S and the efficiency of the reduction gear η_G [2, 4, 10, 17].

$$\eta_T = \eta_H \eta_R \eta_O \eta_S \eta_G \quad (2)$$

Tabela 2. Wybrane wielkości charakteryzujące porównywane układy napędzane statków
Table 2. Chosen values characterizing the compared ship propulsion systems

Wielkość obliczona Calculated value	Kadłub statku z tradycyjnym układem napędowym Ship hull with a traditional propulsion system	Kadłub statku z hybrydowym układem napędowym Ship hull with a hybrid propulsion system
Opór tarcia płyty równoważnej Friction resistance of the equilibrium board	498,46 kN	498,46 kN
Współczynnik kształtu gołego kadłuba Coefficient of the bare hull	1,15	1,15
Współczynnik oporu elementów wystających Resistance coefficient of protruding elements	1,944	1,727
Powierzchnia zwilżona elementów wystających Moistened surface of protruding elements	638,8 m ²	319,4 m ²
Łączny opór elementów wystających Total resistance of protruding elements	118,7 kN	61,8 kN
Opór falowy Wave resistance	712,5 kN	712,5 kN
Całkowity opór kadłuba Total hull resistance	1448,6 kN	1391,3 kN
Moc holowania Towrope horsepower	15649,2 kW	15030,4 kW

W elektrycznych układach napędowych zamiast sprawności linii wałów i przekładni mechanicznych uwzględniono straty konwersji oraz przekazu energii elektrycznej. Straty te ujęto w sprawności prądnicy η_{GEN} , silnika elektrycznego η_{EM} oraz transmisji energii elektrycznej $\eta_{TRANSMIT}$

$$\eta_T = \eta_H \eta_R \eta_O \eta_{GEN} \eta_{EM} \eta_{TRANSMIT} \quad (3)$$

Na rysunku 5 przedstawiono graficznie sprawności elementów spalinowo – mechanicznego układu napędowego, a na rysunku 6 układu napędu spalinowo – elektrycznego, gdzie:

$$\eta_B = \eta_R \eta_O \quad (4)$$

Dla obydwu układów napędowych oszacowano wartości sprawności. Do dalszych obliczeń przyjęto następujące ich wartości:

dla napędu tradycyjnego: **dla napędu hybrydowego:**

$$\begin{aligned} \eta_H &= 1,03 & \eta_H &= 1,124 \\ \eta_R &= 0,98 & \eta_R &= 1,0 \text{ i } \eta_R = 1,07 \\ \eta_O &= 0,62 & \eta_O &= 0,62 \\ \eta_S &= 0,98 & \eta_S &= 0,98 \\ \eta_G &= 0,97 & \eta_G &= 0,97 \\ & & \eta_{GEN} &= 0,973 \\ & & \eta_{TRANSMIT} &= 0,98 \\ & & \eta_{EM} &= 0,973 \end{aligned}$$

In an electrical propulsion system instead of shaft line and mechanical gear efficiencies electrical energy conversion and transmission losses were taken into account. These losses were included in the generator efficiency η_{GEN} , efficiency of electric motor η_{EM} and energy transmission $\eta_{TRANSMIT}$.

$$\eta_T = \eta_H \eta_R \eta_O \eta_{GEN} \eta_{EM} \eta_{TRANSMIT} \quad (3)$$

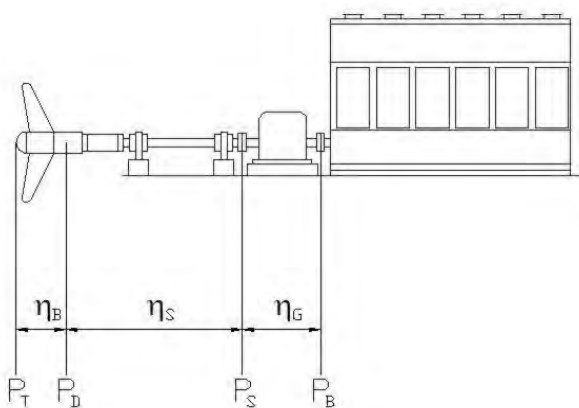
Figure 5 graphically presents the efficiencies of elements of a diesel-mechanical propulsion system, whereas Fig. 6 shows those for the diesel-electric one, where:

$$\eta_B = \eta_R \eta_O \quad (4)$$

For both propulsion systems efficiency values have been estimated. For further calculations the following values have been taken

for the traditional propulsion: **for the hybrid propulsion:**

$$\begin{aligned} \eta_H &= 1,03 & \eta_H &= 1,124 \\ \eta_R &= 0,98 & \eta_R &= 1,0 \text{ i } \eta_R = 1,07 \\ \eta_O &= 0,62 & \eta_O &= 0,62 \\ \eta_S &= 0,98 & \eta_S &= 0,98 \\ \eta_G &= 0,97 & \eta_G &= 0,97 \\ & & \eta_{GEN} &= 0,973 \\ & & \eta_{TRANSMIT} &= 0,98 \\ & & \eta_{EM} &= 0,973 \end{aligned}$$



Rys. 5. Sprawności elementów spalinowo-mechanicznego układu napędowego

Fig 5. Diesel-mechanical machinery efficiency

Uwzględniając związki (2) i (3) w zależności (1), otrzymano wartości zapotrzebowanych mocy: dla napędu tradycyjnego równą $P_B = 26301,111$ kW, i dla napędu hybrydowego $P_B = 22416,468$ kW. Po uwzględnieniu dodatku żeglugowego o wielkości 15% dobrano odpowiednio dla każdego rozpatrywanego układu ruchowego łowne jednostki napędowe. Zapotrzebowaną moc mogą zapewnić dwa silniki średnioobrotowe typu Wartsila 16V46, z których każdy, przy mocy 975 kW z cylindra, osiąga maksymalną moc ciągłą $P_{MCR} = 15600$ kW przy prędkości obrotowej 500 obr/min. i jednostkowym zużyciu paliwa przy obciążeniu silnika 100% wynoszącym 176 g/kWh, a przy 85% 170 g/kWh.

Łączną moc zapotrzebowaną elektrowni okrętowej (bez mocy awaryjnego zespołu prądowórczego) oszacowano na $P_{EL} = 5710,728$ kW [11, 16, 18]. Mogą ją zapewnić trzy zespoły prądowórcze Wartsila typu 6L26 o mocy silnika 2040 kW i prądnic 1960 kW przy prędkości obrotowej 1000 obr/min. Łączna moc zainstalowana elektrowni wynosi 5880 kW, a jednostkowe zużycie paliwa dobranych zespołów prądowórczych w zależności od obciążenia kształtuje się w przedziale 183 – 185 g/kWh [16].

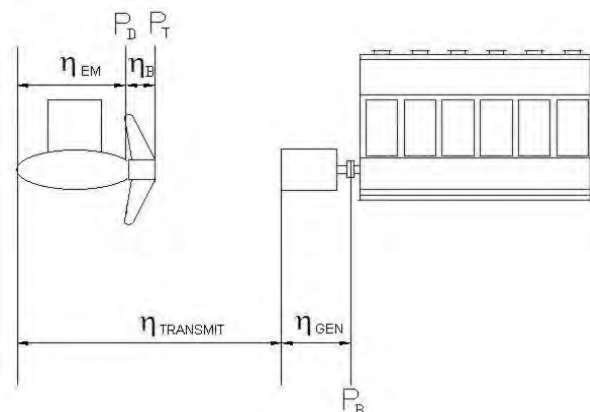
Na rysunku 7 przedstawiono schemat układu spalinowo – mechanicznego, w którego skład wchodzi:

- dwa silniki średnioobrotowe napędu głównego, każdy z nich o mocy 15600 kW, napędzające przez przekładnię mechaniczną i linie wałów dwie śruby napędowe o skoku nastawnym,
- trzy zespoły prądowórcze o mocy 2040 kW oraz mocy prądnic 1960 kW.

Ze względów manewrowych w układzie ruchowym statku powinny funkcjonować dwa stery strumieniowe zapotrzebowujące po 900 kW.

Podczas podróży morskiej przy prędkości kontraktowej obciążenie silników głównych kształtuje się około 85%. Przy poborze mocy elektrycznej około 30% łącznej obliczonej mocy elektrycznej dla rozpatrywanego statku wystarczającą będzie praca jednego zespołu prądowórczego z obciążeniem również zbliżonym do 85%. Biorąc pod uwagę jednostkowe zużycie paliwa silników głównych i pomocniczych, dla tego zakresu obciążenia łączne dobowe zużycie paliwa wyniesie 115,8 t/d.

W hybrydowym układzie napędowym część spalinowo-mechaniczną stanowi silnik typu Wartsila 16V46 o mocy



Rys. 6. Sprawności elementów spalinowo-elektrycznego układu napędowego

Fig 6. Diesel-electric machinery efficiency

Taking into account relations (2) and (3) in equation (1), the following values of required power were obtained: for the traditional propulsion $P_B = 26301.111$ kW and for the hybrid one $P_B = 22416.468$ kW. After considering the 15% sea margin, main propulsion units were chosen for each of the studied propulsion systems. The required power can be delivered by two medium speed engines of the Wartsila 16V46 type, each of which at the power of 975 kW from one cylinder reaches the maximum continuous power $P_{MCR} = 15600$ kW at the speed of 500 rev/min and specific fuel consumption for 100% load on the engine at 176 g/kWh, whereas for 85% load at 170 g/kWh.

The total required power of a ship's electric power plant (without the power from the emergency diesel generator) was estimated to be $P_{EL} = 5710.728$ kW [11,16,18]. It can be delivered by three diesel generator units of the Wartsila 6L26 type with an engine of 2040 kW and a current generator of 1960 kW at the speed of 1000 rev/min. The total power installed in the electric power plant is equal to 5880 kW, and the specific fuel consumption of chosen diesel generator units, depending on the load, is within the range 183 – 185 g/kWh [16].

Figure 7 shows a diagram of a diesel-mechanical system which contains the following:

- two medium speed engines of the main propulsion, each of the 15600 kW power, driving throughout mechanical gears and shaft lines two propellers with a controllable pitch,
- three diesel generator units with the power of 2040 kW and current generator power of 1960 kW.

For manoeuvring reasons a ship propulsion system should comprise two bowthrusters requiring 900kW each.

At sea voyage at the contracted speed, the load on main engines is about 85%. At the electricity consumption of about 30% of the total calculated electric power for the studied ship, operation of one diesel generator unit, with the load of about 85% will be sufficient. Considering unitary fuel consumption of the main and auxiliary engines for this range of load, its daily consumption will be 115.8 t/d.

In a hybrid propulsion system the diesel-mechanical part contains a Wartsila 16V46 engine type of 15600 kW, the same as in the case of a traditional mechanical-diesel plant [16]. It supplies approximately 59.5% of the total power required by

15600 kW, taki sam, jak w przypadku tradycyjnej siłowni mechaniczno-spalinowej [16]. Zapewnia on w przybliżeniu 59,5% łącznej mocy zapotrzebowanej przez układ napędowy statku. W tej sytuacji moc silników spalinowych części spalinowo-elektrycznej napędu powinna wynosić 10772, 315 kW. Moc tą mogą zagwarantować dwa zespoły prądowców, które podczas podróży morskiej zapewniają również zapotrzebowanie energii elektrycznej na cele ogólnokrętowe, inne niż napęd, około 1785 kW. Tym samym łączna moc maksymalna ciągła obu silników nie może być mniejsza niż 12557,315 kW. Zastosowanie dwóch silników typu Wartsila 9L38 o mocy każdego z nich $P_{MCR} = 6525$ kW zapewnia łączną moc 13050 kW. Moc ta jest wystarczająca do zapewnienia zapotrzebowania części elektrycznej napędu oraz pozostałego zapotrzebowania na energię elektryczną statku podczas podróży morskiej.

Dla zapewnienia energii elektrycznej podczas postoju w porcie przewidziano dodatkowy zespół prądowców z silnikiem spalinowym typu Wartsila 9L26 o mocy 3060 kW i mocy prądnic 2940 kW. Jednostkowe zużycie paliwa silników typu L38 przy 100% obciążenia maksymalnego wynosi 183 g/kWh, natomiast przy 85% obciążenia 180 g/kWh [16]. Na rysunku 8 przedstawiono konfigurację podstawowych elementów napędowych rozpatrywanego układu hybrydowego. W jego skład wchodzi:

- silnik napędu głównego, mocy 15600 kW z przekładnią mechaniczną, linią wału i śruba o skoku nastawnym są częścią napędu spalinowo - mechanicznego,
- dwa silniki o mocy każdego z nich 6525 kW, które stanowią część napędu spalinowo-elektrycznego, zasilającego energią elektryczną, poprzez transformatory i przetworniki częstotliwości, azipod o mocy 13000 kW,
- zespół prądowców o mocy silnika spalinowego 3060 kW.

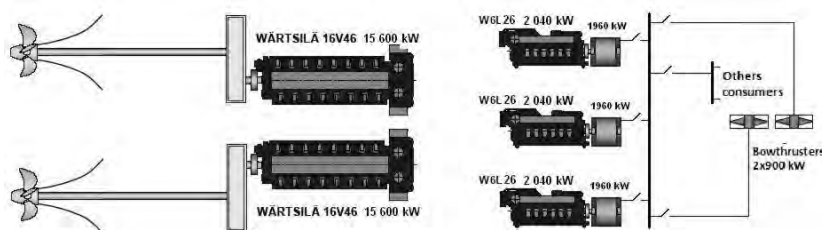
W przypadku siłowni hybrydowej, podczas podróży morskiej statku, przy prędkości kontraktowej i poborze mocy elektrycznej na cele inne niż napędowe, czyli około 30% obliczonej mocy elektrowni, obciążenie silników spalinowych będzie rzędu 85%. Uwzględniając ich jednostkowe zużycia paliwa przy takich obciążeniach, łączne dobowe zużycie paliwa niezbędne do napędu statku wyniesie 102 t/d. Jego prędkość kontraktową przy dysponowanych strumieniach energii mechanicznej

the ship propulsion system. In such a case the power of diesel engines in the diesel-electrical part of the propulsion should be 10772.315 kW. This power can be guaranteed by two diesel generator units, which at sea voyage also supply electricity for the ship general needs other than propulsion of about 1785 kW. Thus the total maximum continuous power of both engines cannot be lower than 12557.315 kW. Application of two engines of the Wartsila 9L38 type with the power of $P_{MCR} = 6525$ kW each ensures the total power of 13050 kW. This power is sufficient to satisfy the demand on electrical energy on the part of the propulsion as well as all the other requirements for electricity on the ship at sea voyage.

To supply electricity to the ship staying in the harbour an additional diesel generator unit with a diesel engine Wartsila 9L26 of 3060 kW and a generator of 2940 kW have been proposed. Specific fuel consumption of the L38 type engines at a 100% maximal load is 183 g/kWh, whereas at 85% load 180g/kWh [16]. Figure 8 shows a configuration of basic propulsion elements of the studied hybrid system. It comprises the following:

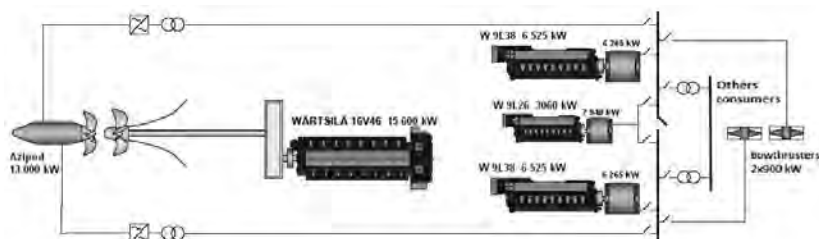
- engine of the main propulsion of 15600 kW with a mechanical gear, shaft line and a controllable pitch propeller are a part of the diesel-mechanical propulsion,
- two engines of 6525 kW each, which are a part of the diesel-electrical propulsion which is driving with its electricity, throughout transformers and frequency converters, an azipod of 13000 kW,
- a diesel generator unit of a 3060 kW diesel engine power.

In the case of a hybrid power plant at sea voyage with the contracted speed and electricity consumption for other purposes than propulsion, i.e. about 30 % of the calculated power of the plant, the load on engines will be in the range of 85%. Taking into account specific fuel consumption at such loads, the total daily fuel consumption for driving the ship will be 102 t/d. Its contracted speed at the possessed fluxes of mechanical and electrical energy will be ensured by a system of contra-rotating propellers – the CRP system (Contra Rotating Propeller) with an azipod of the 18 type placed in the line behind the mechanical propulsion. Graphic interpretation of “Type 18” azipod of maximal electric engine power 13000 kW and speed of the pro-



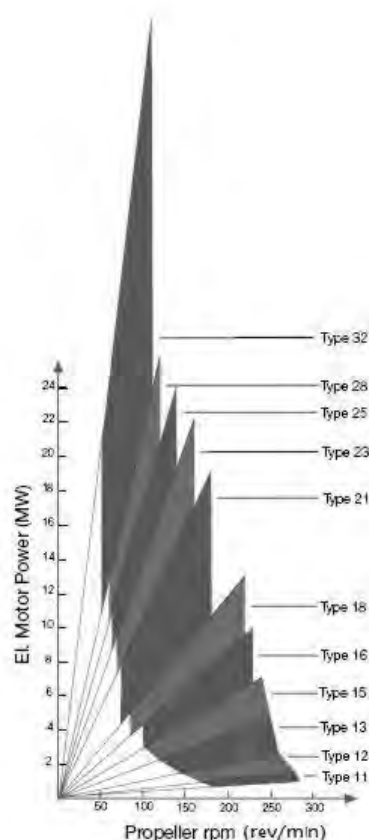
Rys. 7. Konfiguracja elementów mechaniczno-spalinowego układu napędowego [7, 8]

Fig 7. Diesel-mechanical machinery configuration [7, 8]



Rys. 8. Konfiguracja elementów hybrydowego układu napędowego [7, 8]

Fig. 8. Hybrid machinery configuration [7, 8]



Rys. 9. Charakterystyki śrubników typu „azipod” firmy ABB [1]

Fig. 9. ABB azipod characteristics [1]

i elektrycznej zapewni układ śrub przeciwbieżnych – system CRP (Contra Rotating Propeller) z azipodem typu 18 umieszczonym w linii za śrubą napędu mechanicznego. Graficzną interpretację wyboru azipodu „Type 18” o maksymalnej mocy silnika elektrycznego 13000kW i prędkości obrotowej śruby napędowej 230obr/min. firmy ABB [1] przedstawiono na rysunku 9.

5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza pozwoliła oszacować podstawowe parametry i własności hybrydowego układu napędowego z azipodem ze śrubami przeciwbieżnymi (CRP). Ujawniła ona różnice jego własności w porównaniu z referencyjnym, spalinowo-mechanicznym układem napędowym. Wyniki obliczeń ważniejszych parametrów porównywanych układów zamieszczono w tabeli 3.

Wyniki obliczeń zamieszczone w tabeli pokazują, iż zapotrzebowana moc hipotetycznej jednostki z hybrydowym układem napędowym będzie mniejsza niż z tradycyjnym mechaniczno-spalinowym układem napędowym. Jest to konsekwencją niższej, o około 4%, zapotrzebowanej mocy holowania oraz wyższej, o 7,6%, sprawności całkowitej układu napędzanego. Tym samym może być mniejsza moc, o około 14,8%, zainstalowanych silników napędu głównego, a to z kolei skutkuje mniejszym, o 11,9 t/d, dobowym zużyciem paliwa.

Tab. 3. Zestawienie ważniejszych obliczonych wielkości analizowanych układów
Tab. 3. A list of the more important calculated values of the analysed systems

Cecha układu napędzanego Property of a propulsion system	Układ tradycyjny Traditional system	Układ hybrydowy Hybrid system
Moc holowania Towrope horsepower	15649,2 kW	15030,4 kW
Sprawność całkowita układu napędzanego Total efficiency of the driven system	0,595	0,671
Moc zapotrzebowana dla utrzymania prędkości kontraktowej statku Power required for maintaining the contracted speed of the ship	26301,1 kW	22416,5 kW
Moc zainstalowanego napędu głównego Power of the installed main propulsion	31200 kW	28650 kW
Łączna moc zainstalowanych silników głównych i pomocniczych The total power of the installed main and auxiliary engines	37320 kW	31710 kW
Dobowe zużycie paliwa podczas podróży morskiej przy prędkości kontraktowej Daily fuel consumption at sea voyage at the contracted speed	116 t/d	102 t/d

pellor equal to 230 rev/min manufactured by ABB [1] is shown in Fig. 9.

5. Summary

The carried out analysis allowed the estimation of basic parameters and the properties of a hybrid propulsion system with an azipod with contra-rotating propellers (CRP). It showed the differences between its properties and those of a reference one i.e. diesel-mechanical propulsion system. The calculation results of the more important parameters of the compared systems are listed in Table 3.

Calculation results presented in the table show that the required power of a hypothetical unit with a hybrid propulsion system will be lower than of that with a traditional diesel-mechanical propulsion system. It is the consequence of a required towrope horsepower lower by about 4 %, and higher, by about 7.6%, total efficiency of the propelled system. Thus, the power of the installed engines in the main power system can be lower, by about 14.8%, and this in turn leads to a lower daily fuel consumption, by about 11.9 t/d.

A hypothetical unit of the RoPax type with a hybrid propulsion system is characterized by a better manoeuvrability,

Hipotetyczna jednostka typu RoPax z hybrydowym układem napędowym wyróżnia się korzystniejszymi własnościami manewrowymi i zdolnością utrzymywania wysokich sprawności układu ruchowego przy częściowych obciążeniach [4, 8, 9, 13]. Należy jednak zaznaczyć, iż koszty budowy jednostki wyposażonej w napęd hybrydowy są znacznie wyższe, niż jednostki z napędem spalinowo-mechanicznym. Dlatego też dla statków mniejszych, pływających z mniejszymi prędkościami, stosowanie napędu hybrydowego nie zawsze jest ekonomiczne i technicznie uzasadnione. Jednak połączenie napędu spalinowo-mechanicznego z napędem spalinowo-elektrycznym jest konstrukcją rozwojową. Można oczekiwać, że w przyszłości koszty instalacji napędu hybrydowego będą się zmniejszać.

and better ability to maintain high efficiencies of a propulsion system to partial loads [4, 8, 9, 13]. However, it has to be stated that the construction costs of a unit equipped in a hybrid propulsion are much higher than those for a unit with a diesel-mechanical propulsion system. Thus, for smaller ships, travelling at lower speeds, the use of a hybrid propulsion system is not always technically and economically justified. However, the combination of a diesel-mechanical system with a diesel-electrical system is a developing construction. It can be expected that in the future, costs of a hybrid propulsion installation will be decreasing.

6. References

1. ABB: Azipod propulsion. www.abb.com
2. Chachulski K. Podstawy napędu okrętowego. Wydawnictwo Morskie. Gdańsk 1988; 9-24.
3. Deloitte Touche Tohmatsu: Opracowanie ekspertyz, analiz i badań w zakresie ochrony konkurencji i konsumentów w ramach projektu 2004/016-829.02.03 Ochrona konkurencji. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską. Etap 1, Rezultat 5. Porty morskie jako ogniwa międzynarodowych multimodalnych ciągów transportowych w obrocie lądowym i lądowo-morskim ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień konkurencji międzygałęziowej oraz substytucyjności poszczególnych rodzajów transportu. Wersja 2.0. 27 kwietnia 2007; 12-16.
4. Dudziak J. Teoria okrętu. Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej. Wydanie II – poprawione i uzupełnione. Gdańsk 2008; 244 – 276.
5. Holtrop J., Mennen G.G.J. An approximate power prediction method. International Shipbuilding Progress. July 1982; Vol 29.
6. Holtrop J. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. International Shipbuilding Progress. September 1984; Vol 31.
7. Levander K. Improving the RoRo concept with high tech solutions. RoRo Ship and Cargo Handling Technology. Lubeck 2002.
8. Levander O. Advanced machinery solutions for RoPax vessels. Wartsila Corporation 2004.
9. Levander O. Advanced machinery with CRP propulsion for fast RoPax vessels. The Motorship Marine Propulsion Conference 2002.
10. MAN B&W: Basic Principles of ship propulsion. www.manbw.com
11. Michalski R. Siłownie okrętowe. Obliczenia wstępne oraz ogólne zasady doboru mechanizmów i urządzeń pomocniczych instalacji siłowni motorowych. Politechnika Szczecińska. Instytut Oceanotechniki i Okrętownictwa. Szczecin 1997; 24-33.
12. Pałucha K., Puchalski J., Śliwiński A. Statki poziomego ładowania. Trademar: Gdynia 2004; 9-34.
13. RoPax: Ropax 1 and Ropax 2. www.ropaxvessels.com
14. Ship technology: www.shiptechnology.com
15. Stareńczak P. Żegluga promowa i RoRo na Bałtyku. Czasopismo „Namiary Na Morze i Handel”, nr 2/669 Styczeń 2006. www.promare.com.pl
16. Wartsila: Wartsila project guide. www.wartsila.com
17. Wojnowski W. Okrętowe siłownie spalinowe. Część I. Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 1991; 28-34.
18. Wojnowski W. Okrętowe siłownie spalinowe. Część II. Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 1992; 140-143.

Dr hab. inż. Andrzej ADAMKIEWICZ

Mgr inż. Łukasz JARZECKI

Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych

Akademia Morska w Szczecinie

Ul. Wały Chrobrego nr 1-2, 70-500 Szczecin, Polska

E-mail: andrzej.adamkiewicz@am.szczecin.pl, jarzecki@interia.pl

ANALIZA PROCESU ZAOPATRZENIA W CZĘŚCI ZAMIENNE DO CIĄGNIKÓW I MASZYN ROLNICZYCH W OPARCIU O OUTSOURCING USŁUG LOGISTYCZNYCH

AN ANALYSIS OF A SUPPLY PROCESS OF SPARE PARTS FOR AGRICULTURAL TRACTORS AND MACHINES BASED ON LOGISTIC SERVICES OUTSOURCING

W artykule zaprezentowano zadania logistyki przy sprzedaży części zamiennych do ciągników i maszyn rolniczych. Omówiono wykorzystanie outsourcingu w realizacji usług transportowych. Przeprowadzono badania wpływu zjawiska sezonowości na poziom outsourcingu w usługach przewozowych części zamiennych do ciągników i maszyn rolniczych, wykonywanych przez firmy kurierskie. Wyznaczono wartość indeksów sezonowych dla badanego okresu i poddano ocenie rozkład ich zmian w aspekcie zespołu upraw polowych wykonywanych zgodnie z kalendarzem zabiegów agrotechnicznych.

Słowa kluczowe: logistyka, outsourcing w logistyce, dystrybucja części zamiennych do ciągników i maszyn rolniczych.

In this article the aims of logistics in sale of the spare parts for tractors and agricultural machines are presented. The outsourcing in providing of transport services is discussed. The research on the influence of phenomenon of seasonality on the level of outsourcing in the transport of spare parts for tractors and agricultural machines by courier companies is conducted. The value of seasonal indices for the examined period is outlined. Also the layout of their changes form the perspective of agricultural complex and in accordance with agriculture calendar is judged.

Keywords: logistics, outsourcing in logistics, distribution of spare parts for tractors and agricultural machines.

1. Wprowadzenie

Nowoczesne koncepcje logistyczne są podstawą do tworzenia nowej jakości w zarządzaniu przedsiębiorstwem. Rozpatrują one przebieg rzeczywistych procesów jako zintegrowany system działań cząstkowych, które należy podporządkować naczelnej strategii przedsiębiorstwa, jaką jest umocnienie pozycji rynkowej oraz trwały rozwój w długim horyzoncie czasowym. Działania takie są integrowane z funkcjami logistycznymi, które łączą strumienie przepływu produktów i informacji w oparciu o rozwiniętą infrastrukturę techniczną i informatyczną, konsekwentnie orientując działalność firmy na zaspokojenie potrzeb rynku i zapewnienie właściwego poziomu obsługi klienta.

Współczesny rynek usług funkcjonuje w oparciu o bardzo szeroką ofertę przedsiębiorstw. Przewaga konkurencyjna każdego podmiotu gospodarczego budowana jest w oparciu o sprawną realizację procesów logistycznych, wykorzystanie nowoczesnych instrumentów sterowania tymi procesami oraz redukcję kosztów działalności. Należy zaznaczyć, że przekłada się to w sposób bezpośredni na kształtowanie wyniku finansowego firmy [5,14].

Kluczowym zagadnieniem logistyki przy planowanej wielkości sprzedaży wyrobów przemysłowych jest dobór kanałów dystrybucji o odpowiedniej strukturze i przepustowości. Właściwa organizacja dystrybucji fizycznej powinna zapewniać oczekiwany poziom obsługi klienta przy jednoczesnej minimalizacji kosztów.

1. Introduction

New logistic conceptions are the basis for creating the new quality in managing the company. They treat the course of actual processes as an integrated system of partial actions that should be submitted to principal strategy of the company, that is strengthening its position in the market and the constant development in a long time span. Such actions are brought together with logistic functions that combine product and information flows on the basis of developed technical and information technology infrastructure. In this way they give direction to company's activity in order to satisfy market demands and to provide appropriate level of customer service.

Functioning of the contemporary services market is based on the broad offer of the companies. The advantage of each economic entity is built on efficient realisation of logistic processes, using modern tools to control those processes, and the reduction of the costs of the company. The fact that such a functioning influences directly its shape of financial income should be mentioned [5,14].

The selection of distribution channels that have appropriate structure and capacity is the key logistic issue in planning the amount of the sale of industrial products. The right organization of physical distribution should provide the expected level of the customer service together with cost minimization.

2. Cel i zakres badań

Celem pracy była analiza systemu logistycznego w zarządzaniu dystrybucją ciągników i maszyn rolniczych. Nadrzędnym zadaniem takich systemów jest zapewnienie profesjonalnej obsługi serwisowej i dostaw oryginalnych części zamiennych. Stąd w zarządzaniu powyższymi procesami niezbędne są systemy logistyczne, których stosowanie w istotny sposób przyczynia się do wzrostu efektywności działania. Następuje podniesienie poziomu obsługi klienta oraz konkurencyjności firm handlowo-usługowych.

Intensywny rozwój krajowego rynku usług logistycznych w ostatniej dekadzie, sprzyja wprowadzaniu outsourcingu, jako instrumentu zapewnienia jakości usług i ich dostosowania do potrzeb klientów. Przedsiębiorstwa stosujące takie rozwiązania, część procesów, zadań oraz funkcji dotychczas realizowanych w ramach własnych struktur organizacyjnych zlecają zewnętrznym, wyspecjalizowanym w danej dziedzinie operatorom. Wzrost koniunktury gospodarczej stymuluje podaż usług w sektorze *Transport-Spedycja-Logistyka* oraz działalność firm kurierskich [3,8,9].

3. Outsourcing w logistyce dystrybucji części zamiennych

Organizacja użytkowanych systemów transportowych decyduje w bezpośredni sposób o czasowej, przestrzennej, ilościowej i jakościowej niezawodności dostaw części zamiennych. Firmy handlowo – usługowe posiadając własne środki transportowe, wykorzystują tabor do zabezpieczenia pracy działu handlowego i serwisu. Specyfika wymagań, które należy spełnić w prawidłowym funkcjonowaniu takiej firmy przy realizacji zaopatrzenia w części zamienne, wynika z rachunku ekonomicznego przemawiającego za wykorzystaniem zewnętrznych usług transportowych [11,13].

Niejednorodność ilościowa i czasowa oraz struktura drobnicowa ładunków przewożonych części zamiennych powoduje, że realizacja zamówień z Centrum Logistycznego nie stanowi ekonomicznych zleceń całopojazdowych. Ponadto ilość przewożonych części podlega wahaniom sezonowym i jednocześnie determinuje wysokie wymagania pod względem terminowości dostaw. Obecnie standardowa dostawa części zamiennych z Krajowego Centrum Logistycznego realizowana jest w czasie 24 godzin po złożeniu zamówienia.

Outsourcing usług przewozowych, umożliwi znaczne i szybkie efekty finansowe dla firmy w wyniku uwolnienia środków kapitałowych, które są zamrożone w aktywach trwałych związanych z infrastrukturą transportową [6,15].

Ousourcing dzięki wykorzystaniu know – how operatora logistycznego zapewnia:

- wyższą jakość realizowanej usługi,
- szybsze i terminowe dostawy,
- elastyczne reagowanie na zmienne potrzeby rynku,
- zastosowanie najnowszych rozwiązań i narzędzi logistycznych.

Zabezpieczenie niezawodności usługi transportowej, odgrywa pierwszoplanową rolę w obsłudze klienta. Ponadto buduje przewagę konkurencyjną i kreuje wizerunek firmy jako solidnego, godnego zaufania partnera. Wybór strategii outsourcingowej przez przedsiębiorstwo handlowo – usługowe jest elementem ogólnej polityki rynkowej, w której firmy koncentrują się na podstawowych obszarach działania.

2. The aim and the scope of the research

The aim of this research was the analysis of the logistic system in managing the distribution of tractors and agricultural machines. The superior aim of such a system is to provide professional servicing and delivery of the supplies of original spare parts. That is why logistic systems are indispensable in managing of the above processes. Their application contributes significantly to the increase in the effectiveness of the company. The level of customer service and the competitiveness of service commercial companies increase.

The intense development of the country's logistic services market in the last decade supports introduction of outsourcing as an instrument of providing quality services and their adjustment to the customer's needs. The companies implementing such solutions order some processes, tasks and functions which up till now they were realising on their own, to the external operators specialised in a given field. The boom in the economy stimulates supply in the area of Transport and Logistics and the activity of the courier companies [3,8,9].

3. Outsourcing in the logistics of distribution of spare parts

Organisation of the utilized transport systems influences directly temporal, quantitative and qualitative reliability of the supplies. Service commercial companies that have their own transport resources use them to protect the work of the sales department and service centre. The specificity of the requirements that have to be accomplished to make the company provide the ordered supplies is the result of economic calculation which favours the usage of the external transport services [11,13].

The lack of homogeneity in the quantity and time together with a packaged structure of the cargo results in a fact that the realisation of orders from the Logistics Centre does not constitute the whole-vehicle orders. What is more, the quantity of the transported spare parts undergoes seasonal fluctuations and, at the same time, determines high demands as far as the deadlines of the realisations are concerned. Currently, a standard spare parts supply from the National Logistics Centre is realised within 24 hours from ordering them.

Outsourcing in transport services enables the company to gain substantial and quick financial benefits as a result of freeing up capital resources, which are frozen in stable assets connected with transport infrastructure [6,15].

Outsourcing, thanks to exploitation of the know-how logistic operator, ensures:

- higher quality of the completed service,
- quicker and prompt supplies,
- flexible reaction to fluctuations in the market,
- implementing the latest logistic tools and solutions.

The reliability of transport service plays the most important role in customer service. What is more, it builds up the advantage over the competition and creates the image of a company as a reliable, trustworthy partner. The choice of a given outsourcing strategy by a service commercial company is an element of a common market policy in which companies focus on most fundamental fields of action.

Najczęściej jako kryteria decydujące o wyborze firmy przewozowej przyjmuje się:

- cenę usługi jednostkowej,
- jakość usług potwierdzoną certyfikacją uprawnień,
- elastyczność w reakcji na występującą zmianę obciążeń i tras przewozu,
- częstotliwość i punktualność dostaw,
- bezpieczeństwo przewozów,
- stosowanie technik informacyjnych,
- możliwość monitorowania przewożonych ładunków z wykorzystaniem technologii globalnego systemu pozycjonowania (GPS).

Zabezpieczenie potrzeb transportowych, związanych z dystrybucją części zamiennych przy wykorzystaniu outsourcingu, przebiega drogą realizacji zleceń przewozowych w firmach kurierskich. Przedsiębiorstwo handlowo – usługowe po analizie i ocenie ofert, podpisuje z wybranymi firmami kurierskimi porozumienie o długofalowej współpracy w zakresie przewozów części z Centrum Logistycznego, a także z firmy do nabywców finalnych. Uruchomienie realizacji zlecenia przewozowego, związane jest w każdym przypadku z potwierdzeniem usługi transportowej w wybranej firmie kurierskiej. Sprawność procesu dystrybucji części, zapewnia stosowanie kodów kreskowych, systemów automatycznego gromadzenia danych (ADC) oraz elektronicznej wymiany danych (EDI) [4,12].

4. Analiza ilościowa outsourcingu usług przewozowych części zamiennych w latach 2003-2005

Skuteczne stosowanie metod i technik logistycznych w sprzedaży części zamiennych do ciągników i maszyn uzależnione jest od znajomości specyfiki rynku rolniczego, który wykazuje istotne różnice na przestrzeni roku. Zasadniczym zagadnieniem, które poddano badaniu i analizie jest sezonowość popytu na części w aspekcie kalendarza zabiegów agrotechnicznych.

Przeprowadzona analiza obejmowała zbiorcze zlecenia zakupu części zamiennych, zrealizowane przez autoryzowanego dystrybutora pojazdów i maszyn rolniczych. Firma handlowo – usługowa będąca obiektem badań działa w sektorze obsługi rolnictwa od 1989 roku. Oferta handlowa i usługowa skierowana jest do nabywców na terenie województwa lubelskiego i obejmuje wyroby dwudziestu ośmiu producentów.

Badania outsourcingu obejmowały transport części zamiennych w latach 2003-2005 w postaci przesyłek drobnicowych z Centrum Logistycznego do autoryzowanego dealera. Wykonanie usług przewozowych powierzono na przestrzeni badanego okresu trzem firmom kurierskim. Realizacja dostaw części zamiennych zaspokajała bieżący popyt klientów. Generowane w czasie rzeczywistym zlecenia zakupu w połączeniu z outsourcingiem w usługach transportowych, pozwalały na sprawne zabezpieczenie potrzeb rynkowych. Satisfakcję klienta zdobywano poprzez zastosowanie rozwiązań logistycznych przy obniżonych stanach magazynowych.

4.1. Rozkład ilości usług przewozowych części zamiennych w 2003 roku

Outsourcing części zamiennych obejmował w badanym okresie ogółem 462 usługi przewozowe, wykonane przez dwie firmy kurierskie. Rozkład realizacji zleceń transportowych w poszczególnych miesiącach roku, przedstawia histogram (rys. 1).

Most often, the criteria that influence the choice of the transport company are as follows:

- individual service price,
- quality confirmed by a certification of entitlement,
- flexible reaction to the change in loads and the route of transport,
- frequency and punctuality of supplies,
- security of supply,
- application of information techniques,
- possibility of monitoring of the transported cargo with the use of Global Positioning System (GPS).

Fulfilling transport needs, which are connected with distribution of spare parts, with the use of outsourcing is made through realization of transport orders by courier companies. Service commercial company, after analysis and assessment of the offer prices, signs an agreement with a courier company on long-lasting co-operation in the area of spare parts transportation from the National Logistic Centre, but also from the company to the buyers. Realisation of an order in each case is connected with confirmation of a transport service in a given courier company. Application of bar codes, Automated Data Collection (ADC) and Electronic Data Interchange (EDI) provide the efficiency of the distribution process [4,12].

4. Quantitative analysis of outsourcing in the transport of the spare parts in the years 2003-2005

Effective application of logistic methods and techniques to the sale of spare parts for tractors and agricultural machines is dependent on the knowledge of agricultural market specificity, which indicates substantial differences over the period of a year. A fundamental issue that underwent examination and analysis is the seasonality of the demand for spare parts in accordance with agricultural calendar.

The analysis included overall order of the purchase of spare parts realised by the authorised distributor of agricultural vehicles and machines. The examined service commercial company has been present in Agricultural Services Sector since 1989. Its commercial and service offer is directed to the purchasers in the Lubelskie Province. It covers the industrial goods of 28 producers.

The research on outsourcing covered transportation of spare parts in the years 2003-2005. The transportation took form of packaged parcels from the Logistic Centre to the authorised dealer. Carrying out of transport services was entrusted with three courier companies. The realisation of spare parts supply covered current demands of customers. The purchase orders generated in actual time, together with outsourcing in transportation services, allowed satisfying quickly market needs. Through implementation of logistic solutions when the quantity of the goods in warehouses was reduced, customer's satisfaction was fulfilled.

4.1. The layout of quantity of the transportation services of spare parts in 2003

Outsourcing of spare parts in the examined period covered 462 transportation services carried out by two courier companies. The schedule of the realisation of orders in individual months is presented in a histogram (Fig. 1).

Analiza usług przewozowych w ujęciu okresowym wykazała, że miały one tendencję wzrostową na przestrzeni kolejnych trzech kwartałów. W pierwszych trzech miesiącach, wystąpił najniższy poziom dostaw rzędu 14,5% obrotu rocznego. Dynamiczny wzrost popytu w kwietniu i maju, dający miejscowe maksima spowodował, że obroty drugiego kwartału osiągnęły 27,4%. Zapotrzebowanie na przewozy części, generował w tym okresie wysoki poziom realizacji wiosennych prac polowych.

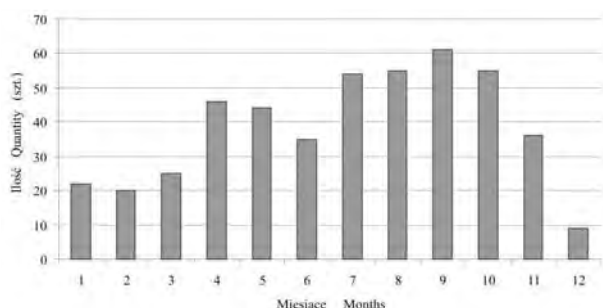
Trzeci kwartał to kolejny wzrost ilości usług transportowych i ich wysoki poziom na przestrzeni całego okresu. Ilość zleceń na poziomie 36,8% obrotu rocznego, to następstwo zabiegów agrotechnicznych przy zbiorze zbóż i uprawach poźniowych. Intensywne wykorzystanie sprzętu, wiązało się z podwyższonym zapotrzebowaniem na przeglądy i naprawy. Usługi serwisowe tworzyły popyt na dostawy szerokiego asortymentu części zamiennych. Zjawisko takie występowało również w październiku, a następnie obroty uległy wysokiej redukcji. Najniższy poziom przewozów kurierskich w badanym roku zrealizowano w grudniu. W czwartym kwartale wykonanych zostało ogółem 21,7% zleceń przewozowych.

Dynamika wzrostu oraz zrealizowany poziom usług kurierskich w poszczególnych miesiącach 2003 roku, pokrywał się dokładnie z czasem wykonywania zabiegów agrotechnicznych. Znaczący wzrost obrotów w zleconych usługach przewozowych generowały wiosenne prace polowe, a maksymalna ilość usług kurierskich wystąpiła w czasie zbioru zbóż, wykonywania upraw poźniowych oraz zbioru roślin okopowych [2,7].

4.2. Rozkład ilości usług przewozowych części zamiennych w 2004 roku

Transport części zamiennych obejmował w badanym okresie ogółem 698 usług przewozowych, wykonanych przez dwie firmy kurierskie. Poziom zleceń przewozowych na przestrzeni badanego okresu, pokazuje histogram (rys. 2).

Najniższy poziom usług wykonanych przez firmy kurierskie, z wartością równą 13,5% obrotu rocznego, odnotowano w pierwszych trzech miesiącach. W styczniu i lutym zlecono minimalną ilość przewozów w skali badanego okresu. Miejsce maksimum po skokowym przyroście zleceń miało miejsce w kwietniu. W drugim kwartale wystąpił dwukrotny wzrost poziomu przewozów w porównaniu z początkiem roku i osiągnął wartość 27,2%. Najwyższą ilość usług transportowych części zamiennych, zarejestrowano w trzecim kwartale i miały one poziom 33,1% obrotu rocznego. Wysoki popyt utrzymał się w miesiącach od sierpnia do października. W listopadzie



Rys. 1. Rozkład ilości usług przewozowych części zamiennych wykonanych przez firmy kurierskie w 2003 roku

Fig.1. The layout of the quantity of the transportation services of the spare parts carried out by courier companies in 2003

A periodic analysis of the transportation services proves that those services showed a growth tendency over the subsequent three-quarters of a year. In the first three months the level of the supplies was the lowest – 14,5% of the annual turnover. The dynamic growth of the demand in April and May, which caused reaching local maximum, resulted in a turnover of up to 27,4% in the second quarter. The need for the transportation of parts was generated in this period by the high level of the spring field labour.

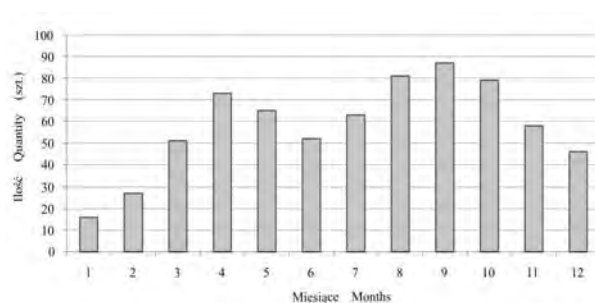
In the third quarter there was another increase in transportation services. Their amount stayed on high level through out this whole period. The quantity of orders, as high as 36,8% of the annual turnover, is a result of agricultural actions during the harvest period and after-harvest cultivation. Intensive utilization of equipment was connected with the higher need for servicing and repairs. Servicing services created the need for the wide range of spare parts. Such a phenomenon was also present in October. Later, the turnover got highly reduced. The lowest degree of courier services was realised in February. In the fourth quarter of the year 21,7% of the transportation services were carried out.

The growth dynamics and the realised level of courier services coincide with the time of performing agricultural labours. The substantial increase in the turnover rate of the transportation services was generated by the field labour and the maximum number of the courier services took place during the time of harvest, after-harvest cultivation and crop of bulb and root plants [2,7].

4.2. The layout of transportation of spare parts in 2004

The transportation of spare parts covered in the examined period 698 services altogether, which were carried out by two courier companies. The amount of transportation orders during this period is shown in the histogram (Fig. 2).

The lowest amount of the services by the courier companies, that is 13,5% of the annual turnover, was present in the first three months. In January and February there was the minimal quantity of transportation orders. The highest number of orders was taken in April. In the second quarter the number of the transportation services was twice as much as at the beginning of the year – it reached up to 27,2%. The highest quantity of transportation of spare parts was registered in the third quarter of the year, and it was 33,1% of the annual turnover. The high demand continued from August to October. In November and December the substantial decrease in the number of the orders



Rys. 2. Rozkład ilości usług przewozowych części zamiennych wykonanych przez firmy kurierskie w 2004 roku

Fig. 2. The layout of the quantity of the transportation of spare parts carried out by courier companies in 2004

i grudniu wystąpił wyraźny spadek ilości wykonanych zleceń przewozowych. Na przestrzeni czwartego kwartału zrealizowano 26,2% ogółu rocznych zleceń outsourcingowych.

Charakter zmian ilościowych usług kurierskich w 2004 roku, odpowiadał dokładnie poziomowi natężenia prac polowych. Ekstremalne wielkości przewozów części zamiennych, odwzorowywały czas realizacji zespołu upraw wiosennych, prac przy zbiorze zbóż i roślin oleistych oraz upraw późniejszych [2,7].

4.3. Rozkład ilości usług przewozowych części zamiennych w 2005 roku

Przewozy części zamiennych obejmowały w badanym okresie ogółem 886 usług transportowych, wykonanych przez trzy firmy kurierskie. Rozkład zleceń przewozowych na przestrzeni analizowanego okresu, przedstawia histogram (rys. 3).

Ocena poziomu usług przewozowych części zamiennych wykazała, że najniższa wartość równa 19,6% obrotu rocznego, wystąpiła w pierwszym kwartale z jednoczesną tendencją rosnącą na przestrzeni kolejnych miesięcy. Skokowy wzrost popytu w kwietniu był odpowiedzią na zapotrzebowanie tradycyjnie generowane przez rynek w okresie wiosennych prac polowych. Drugi kwartał zamknął się obrotem na poziomie 25,2%. Najwyższe zapotrzebowanie na usługi przewozowe miało miejsce w miesiącach od sierpnia do października. Trzeci kwartał to realizacja zleceń na maksymalnym poziomie równym 34,1% obrotu rocznego, a ostatni kwartał to 21,1%. Znacząca redukcja popytu na koniec roku spowodowała, że w grudniu zamówiono najmniej przewozów w skali badanego okresu.

W 2005 roku przebieg zmian ilościowych w outsourcingu usług transportowych części zamiennych, tak jak w dwóch wcześniej omawianych okresach, był zależny od rozkładu czasowego i liczności upraw polowych zalecanych w kalendarzu zabiegów agrotechnicznych dla obszaru Polski [2,7].

4.4. Charakterystyka porównawcza ilości usług przewozowych części zamiennych w latach 2003-2005

W analizowanym okresie badania rozkładu objęły ogółem 2046 zleceń przewozowych części zamiennych. Na przestrzeni trzech lat wystąpił przyrost ilości wykonanych usług transportowych. Outsourcing w przewozach dla lat 2003-2004 wykazał wzrost o 51%, a dla okresu 2004-2005 nastąpił kolejny przyrost o 26,9%. Charakterystykę ilościową przewozów kurierskich, prezentuje histogram (rys. 4).

Porównanie struktury usług przewozowych, wykazało podobieństwo w rozkładzie ilościowym na przestrzeni badanych okresów. Przy tendencji wzrostowej poziomu świadczonych zleceń dla pełnych lat, udziału procentowy poszczególnych kwartałów w obrocie rocznym wykazał zbliżone proporcje.

Pierwszy kwartał w każdym z badanych okresów, miał najniższy popyt na zlecenia transportowe. W 2003 i 2004 roku

could be seen. During the fourth quarter of the year only 26,2% of all of the outsourcing orders were taken.

The character of the quantitative changes in the courier services in 2004 coincides with the level of the intensity of agricultural efforts. The biggest numbers of transportation of spare parts correspond to the time of spring cultivation, crop and oleaginous plants harvesting and after-harvest cultivation [2,7].

4.3. The layout of transportation of spare parts in 2005

Transportation of spare parts in the examined period covered 886 transport services altogether, which were carried out by three courier companies. The layout of transportation orders during this analysed period is presented in histogram (Fig. 3).

The analysis of the transportation of spare parts has shown that the lowest annual turnover, that is 19,6%, took place during the first quarter of the year, and that it had a growing tendency during a few subsequent months. The sudden rise in the demand in April was an answer to a need that was traditionally generated by the market during the spring field labour. The second quarter was closed with a turnover as high as 25,2%. From August to October the need for the transportation services was on the highest level. In the third quarter, the realisation of the orders reached the highest level of 34,1% of the annual turnover. It decreased to 21,1% in the last quarter of the year. A substantial reduction of the need at the end of the year caused the lowest number of transportation in December, when related to the rest of the year.

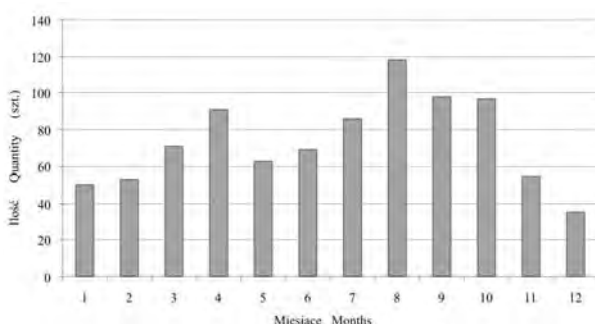
In 2005 the course of the quantitative changes in outsourcing of transportation of spare parts, like it was in the case of the two previous examples, depended on the time of the year and the amount of cultivation recommended in Polish agricultural calendar [2,7].

4.4. Descriptive characterisation of the quantity of transportation services in the years 2003-2005

In the analysed period the research on the layout of transportation services covered 2046 transportation orders altogether. During those three years there appeared an increase in the services. During 2003-2004, the outsourcing in transportation increased by 51% and during 2004-2005 it again increased by 26,9%. The quantitative characterisation of transportation services is presented in a histogram (Fig. 4).

The comparison of structure of transportation services has proven the similarity in the quantitative layout over the examined periods of time. With the growth tendency of the level of the services during those full years, the share of the given quarters was proportional in an annual turnover.

The first quarter in each of the examined periods had the lowest demand for transportation services. In 2003 and 2004 its level was similar, and in 2005 it was 5% higher than in the

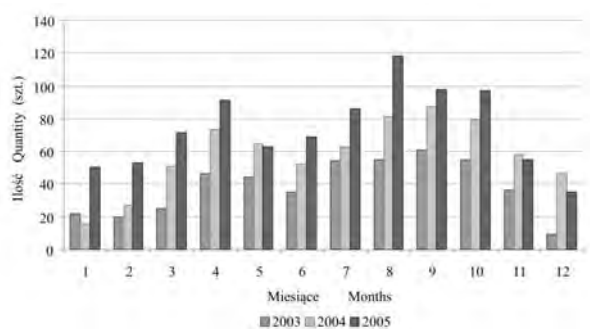


Rys. 3. Rozkład ilości usług przewozowych części zamiennych wykonanych przez firmy kurierskie w 2005 roku

Fig.3. The layout of the quantity of the transportation of spare parts carried out by courier companies in 2005

był na zbliżonym poziomie, a w 2005 roku o 5% przewyższał poprzednie lata. Charakterystycznym zjawiskiem, potwierdzonym w drugim kwartale każdego roku, był skokowy wzrost zapotrzebowania na usługi w miesiącu kwietniu. Początek sezonu wiosennych zabiegów agrotechnicznych, w postaci upraw przedsiewnych i siewu zbóż oraz sadzenia roślin okopowych, generował dwukrotny wzrost obrotów w porównaniu do miesięcy zimowych zarówno w 2003 i 2004 roku. Kolejna prawidłowość widoczna na strukturze ilościowej, to wyrównany i jednocześnie wysoki poziom trzeciego kwartału, który uzyskał odpowiednio: 34,1%, 33,1% oraz 36,8%. Okres zbioru zbóż, roślin oleistych i roślin okopowych oraz wykonanie upraw poźniowych, znalazło odbicie w maksymalnym poziomie usług przewozowych części zamiennych w miesiącach od sierpnia do października. Tradycyjnie koniec roku stanowił okres dużej redukcji obrotów w wszystkich badanych latach, jako wynik malejącego popytu na części zamienne do ciągników i maszyn rolniczych.

Sumaryczny rozkład ilości usług przewozowych, prezentuje wykres (rys. 5).



Rys. 4. Rozkład ilości usług przewozowych części zamiennych wykonanych przez firmy kurierskie w latach 2003-2005

Fig. 4. The layout of the quantity of the transportation of the spare parts carried out by courier companies during 2003-2005

5. Analiza statystyczna usług przewozowych części zamiennych w latach 2003-2005

Transport części zamiennych do ciągników i maszyn rolniczych zrealizowany przez firmy kurierskie na zlecenie autoryzowanego dealera, miał charakter cykliczny. Analizując uzyskane wyniki badań rozpatrywano ich podobieństwa i zależność w aspekcie kalendarza zabiegów agrotechnicznych. Prace polowe i transportowe w sektorze produkcji roślinnej mają przebieg cykliczny i są ściśle związane z określonymi sezonami w przetrzeni roku.

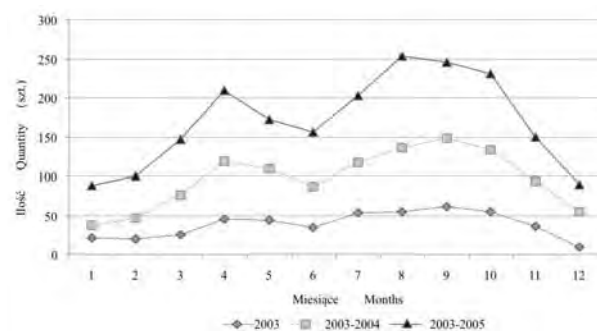
Rozkład usług przewozowych analizowano przy wykorzystaniu modelu multiplikatywnego składowych szeregu czasowego. Model taki można zobrazować, jako iloczyn czterech składowych. Zjawisko sezonowości określane jest wówczas za pomocą metody nazywanej „metodą współczynnika do średniej ruchomej” [1,10]:

$$Y_t = T_t \cdot S_t \cdot C_t \cdot I_t \quad (1)$$

gdzie: Y_t – wartość szeregu, T_t – trend szeregu, S_t – wahania sezonowe, C_t – wahania cykliczne, I_t – wahania przypadkowe.

previous years. A sudden increase in the need for the services in April was a characteristic, confirmed in the second quarter of each year. The beginning of the spring agricultural efforts season, that is pre-sowing cultivation, sowing crops and planting bulb and root plants generated a doubled turnover in comparison to the winter months, both in 2003 and 2004. The next regularity that can be observed in the quantitative structure is the balanced, and at the same time, high level of the third quarter, which were, respectively 34,1%, 33,1% and 36,8%. The time of harvesting and gathering bulb and root and oleaginous plants together with after-harvest cultivation was reflected in the maximal amount of transportation services in the months from August to October. Traditionally, the end of the year was the time of huge reduction of the turnover in all examined years, which was the result of the small demand for spare parts for tractors and agricultural machines.

The graph (Fig. 5) shows a summary layout of courier dispatches.



Rys. 5. Sumaryczny rozkład ilości usług przewozowych części zamiennych wykonanych przez firmy kurierskie w latach 2003-2005

Fig. 5. A summary layout of the quantity of the transportation of the spare parts carried out by courier companies during 2003-2005

5. Statistic analysis of transportation of spare parts in the years 2003-2005

Transportation of spare parts for tractors and agricultural machines which was realised by courier companies as an order form the authorised dealer, had a cyclical character. During the analysis of the data, the similarities between them and relations to the agricultural calendar were taken into consideration. Field labour and transportation in the sector of plant production are cyclical and closely connected to a given season of the year.

The layout of transportation services was analysed with multiplication model of time series parts. This model may be pictured as the product of the four parts. The seasonality is then called ‘Moving Average Method’ [1,10]:

$$Y_t = T_t \cdot S_t \cdot C_t \cdot I_t \quad (1)$$

where: Y_t – value of time series, T_t – time series trend, S_t – seasonal fluctuations, C_t – cyclical fluctuations, I_t – incidental fluctuation.

Wyznaczając indeksy sezonowe dla badanego okresu, przyjęto średnią ruchomą opartą na 12 obserwacjach miesięcznych. Interpretację graficzną wpływu wahań sezonowych na rozkład zbioru zmiennych przeprowadzono przy wykorzystaniu pojęcia poziomu odniesienia, nazywanego również poziomem przeciętnym. Poziom odniesienia dla indeksów sezonowych we wszystkich miesiącach ma wartość równą 100%.

Wartość indeksów sezonowych wyrażoną w procentach dla ilości usług transportowych części zamiennych, przedstawia wykres (rys. 6).

W pierwszym kwartale wystąpił obniżony poziom zleceń na przewozy części zamiennych. W miesiącach styczeń i luty indeksy sezonowe były niższe od poziomu przeciętnego o 46,5% i 34,8%. Wysoki wiosenny wzrost popytu na części zamienne spowodował, że indeks w kwietniu przekroczył poziom odniesienia o 30,7%, tak aby następnie powrócić do poziomu przeciętnego. Na skutek wahań sezonowych kolejne cztery miesiące od lipca do października, posiadały indeksy sezonowe wyższe od poziomu odniesienia odpowiednio o: 23%, 36,5%, 44,3% i 25,4%. Długotrwały wzrost zapotrzebowania na realizację usług transportowych był konsekwencją prowadzenia prac żniwnych, zespołu upraw późnych i prac przy zbiorze roślin okopowych. Zakończenie sezonu agrotechnicznego wywołało spadek indeksów na koniec roku aż o 55,9% poniżej poziomu przeciętnego.

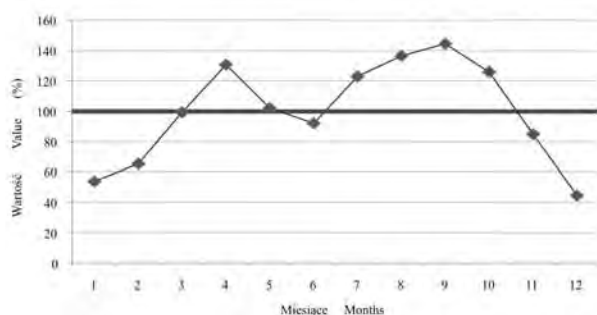
6. Podsumwanie

Proces realizacji dostaw części zamiennych w oparciu o outsourcing jest obecnie powszechnie stosowanym rozwiązaniem w branży motoryzacyjnej i sektorze technicznej obsługi rolnictwa. Sprawdzone systemowe rozwiązania oparte na działaniach firm kurierskich dają również wymierne efekty finansowe i organizacyjne w serwisie pojazdów rolniczych.

- Na podstawie rozkładu ilości zleceń w latach 2003-2005 można mówić o istnieniu specyficznych cech rynku sprzedaży części zamiennych do ciągników i maszyn rolniczych:
- Poziom usług przewozowych wykonanych przez firmy kurierskie w badanym okresie, potwierdził niski popyt na taki rodzaj zleceń zarówno na początku, jak i na końcu każdego badanego roku. Znaczący wzrost ilości usług występował w drugim kwartale oraz w miesiącach od sierpnia do października. Rozkład czasowy wykonanych usług pokrywał się z okresami intensywnych prac polowych, zalecanych w kalendarzu zabiegów agrotechnicznych dla upraw na terenie Polski.
- Analiza różnic w wartości indeksów sezonowych dla kolejnych miesięcy w badanych latach, dostarczyła dowodów na istnienie zależności pomiędzy wzrostem ilości wykonanych przez firmy kurierskie usług przewozowych części zamiennych, a czasem, kiedy następowała realizacja upraw przy

While computing the seasonal indices for the examined period, the movable average based on 12 monthly observations was assumed. The graphic interpretation of the influence of seasonal fluctuations on the layout of the set of data was made with the use of the notion of reference level, called also the average level. The reference level for seasonal indices in all months equals 100%.

The value of the seasonal indices, expressed in per cents for the quality of transportation of spare parts, is presented in the graph (Fig. 6).



Rys. 6. Indeksy sezonowe dla poziomu usług przewozowych części zamiennych wykonanych przez firmy kurierskie w latach 2003-2005

Fig. 6. Seasonal indices for the level of transportation of the spare parts carried out by courier companies during 2003-2005

In the first quarter the lowered level of spare parts transportation orders appeared. In January and February the seasonal indices were lower than the average level by 46,5% and 34,8%. The high increase in the demand for spare parts was the reason why in April the index exceeded the reference level by 30,7%, and then returned to average level. As a result of seasonal fluctuations, the four months from July to October had their seasonal indices higher than the reference level by, respectively: 23%, 36,5%, 44,3% and 25,4%. The long-

term increase in the need for realisation of transportation services was a consequence of harvesting, after-harvesting cultivation and works connected with gathering bulb and root plants. The end of agricultural season influenced decrease in indices by 55,9% below the average level by the end of the year.

6. Conclusions

- The realisation of supplies of spare parts that is based on outsourcing is now popularly applied in mechanization trade and technical servicing sector in agriculture. Reliable solutions, based on courier companies' activities, produce notable financial and organizational effects in agricultural vehicles servicing.
- On the basis of the number of orders in the years 2003-2005 we may claim the existence of specific characteristics of the sell of spare parts for tractors and agricultural machines:
- The number of the services carried out by the courier companies in the examined period confirmed low demand for this kind of orders, both, at the beginning, and at the end of each examined year. A significant increase in services could be observed in the second quarter of the year and from August to October. Time layout of the carried out services coincided with intensive field labour periods, recommended in the agricultural calendar for the cultivation in Poland.
- The analysis of the differences in the seasonal indices for the subsequent months in the examined years proved the existence of the relation between the spare parts transportation carried out by courier companies and the time of this realisation - during the time of sowing, growing bulb and roots plants, gathering those plants and after-harvest cultivation.

siewie zbóż, sadzeniu roślin okopowych oraz zbiorze tych roślin i wykonywaniu zespołu upraw poźniwnych.

- W oparciu o przedstawione badania outsourcing stosowany w przewozach części zamiennych do ciągników i maszyn rolniczych jest procesem mającym uzasadnienie ekonomiczne i organizacyjne. Części zamienne to grupa towarów, która na przestrzeni roku kalendarzowego powinna posiadać bieżącą i elastyczną reakcję na potrzeby rynkowe. Dział transportu utrzymywany w strukturach organizacyjnych przedsiębiorstwa nie zabezpiecza pozytywnej realizacji zadań logistycznych. Rozpiętość i dynamika zmian ilościowych w przewozach stawia tak wysokie wymagania, że spełnienie ich jest możliwe wyłącznie przy wykorzystaniu zasobów sprzętowych i organizacyjnych specjalistycznych firm przewozowych.

- On the basis of the presented study, the outsourcing applied in transportation of spare parts for tractors and agricultural machines is economically and organizationally justified. The spare parts are the group of products, which, during the year, should be easily available, according to the needs of the market. The span and dynamics of the quantitative changes in transportation are so challenging that fulfilling all the requirements is possible only with the use of equipment and organizational resources of the specialistic shipping companies.

7. References

1. Aczel A.D. Complete Business Statistics. 4th ed., Boston: Richard D. Irwin/McGraw-Hill, 2002.
2. Banasiak J. (red.) Agrotechnologia, Warszawa: Wyd. Naukowe PWN, 1999.
3. Carbone V., Stone M. A. Growth and relational strategies used by the European logistics service providers: Rationale and outcomes, TRANSPORTATION RESEARCH Part E: Logistics and Transportation Review 2005, 6(41): 495-510.
4. Ciesielski M. (red.) Rynek usług logistycznych, Warszawa: Wyd. Difin, 2005.
5. Coyle J.J., Bardi E.J., Langley C.J. The Management of Business Logistics, New York: West Publishing Company, 1996.
6. Gay C.L., Essinger J. Outsourcing strategiczny. Koncepcje, modele i wdrażanie, Kraków: Wyd. Oficyna Ekonomiczna, 2002.
7. Karczmarczyk St. (red.) Agrotechnika roślin uprawnych, Szczecin: Wyd. Akademii Rolniczej w Szczecinie, 2005.
8. Kempny D. Logistyczna obsługa klienta, Warszawa: Polskie Wyd. Ekonomiczne, 2001.
9. Piekarski W., Juściński S. Outsourcing jako funkcja logistyki w dystrybucji części zamiennych do ciągników i maszyn rolniczych, Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2009; 1(41): 54-62.
10. Pułaska-Turyna B. Statystyka dla ekonomistów, Warszawa: Wyd. Difin, 2005.
11. Rutkowski K. (red.) Logistyka dystrybucji-Specyfika, Tendencje rozwojowe, dobre praktyki, Warszawa: Wyd. Szkoła Główna Handlowa, 2005.
12. Rydzkowski W. (red.) Usługi logistyczne, Poznań: Wyd. Instytut Logistyki i Magazynowania, 2004.
13. Rydzkowski W., Wojewódzka-Król K. (red.) Transport, Warszawa: Wyd. Naukowe PWN, 2006.
14. Stock J.R., Lambert D.M. Strategic Logistic Management, New York: Mc Graw – Hill/Irwin, 2001.
15. Trocki M. (2001), Outsourcing, Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2001.

Dr inż. Sławomir JUŚCIŃSKI
Prof. dr hab. inż. Wiesław PIEKARSKI
Katedra Energetyki i Pojazdów
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin, Polska
e-mail: slawomir.juscinski@up.lublin.pl
e-mail: wieslaw.piekarski@up.lublin.pl

ROZWÓJ INTELIGENTNEGO SYSTEMU MONITOROWANIA ROZDZIELCZEJ SIECI WODOCIĄGOWEJ

THE DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT MONITORING SYSTEM OF A LOCAL WATER SUPPLY NETWORK

W artykule przedstawiono rozwój inteligentnego systemu monitorowania sieci wodociągowej. Głównym zadaniem systemu jest wykrywanie i lokalizowanie awarii sieci wodociągowej. Wejściami do modelu są dane z czujników przepływu zainstalowanych na sieci, zaś wyjściami informacja o wykryciu wycieku i jego lokalizacji. Podstawową zaletą tej koncepcji systemu diagnozowania sieci wodociągowej jest możliwość przybliżonej lokalizacji uszkodzeń sieci w oparciu o ograniczoną liczbę czujników na niej zainstalowanych. System oparty jest o sztuczne sieci neuronowe, które klasyfikują stany sieci (sprawna, wyciek w zdefiniowanym obszarze sieci). Artykuł przedstawia prace prowadzone w celu ulepszenia metody budowy klasyfikatora, będącego zasadniczym elementem systemu i zwiększenia dokładności jego wskazań.

Słowa kluczowe: diagnostyka, algorytm genetyczny, sztuczne sieci neuronowe, sieci wodociągowe, wycieki.

The paper presents the development of monitoring system of intelligent water supply network. The main task of this system is water leakage detection and localization. For inputs, this system uses information from flow sensors, mounted on the pipeline network, while the output is a piece of information about leakage detection and localization. The main advantage of this system is a possibility of approximate leakage localization using only a limited number of installed sensors. The system is based on an artificial neural network which classified the states of network (leakage in defined part of network, no leakage). In the paper, some developments and attempts to improve the sensitivity and accuracy of this system, and develop the method of classifier building were described.

Keywords: diagnostic, genetics algorithm, neural network, water pipeline, leakage.

1. Introduction

Water supply systems are one of the most essential parts of the urban and rural technical infrastructure. It is necessary for them to be reliable, especially because of counteraction of water loss. Finding leaks is one of the typical problems connected with water pipelines maintenance. This task is not simple, because leaking water can quite often run deep into ground and therefore pipe failure does not manifest itself on the ground surface.

Nowadays, to find this leakages, some predominant systems are used: acoustic listening devices, leak noise correlators and tethered hydrophone systems. Usage of these systems requires well trained staff, which actively work on the spot to find leakages.

Bearing this in mind one can expect that a diagnostic system, supporting leakage finding and working automatically, would be very useful, especially on an industrial area with coal mining, where leakages are often encountered.

Different works dealt with methods possible to be used in such systems have been conducted, but they are still at the theoretical stage.

Generally, all proposed methods based on numerical models of a considered water network and different techniques supporting leakage detecting and finding. For instance, one assumed, that there are leakages, each described by emission coefficient, in network nodes, and GA was used to find the best set of this coefficients, which minimized the difference between real measurements and values obtained from model. In this way the real leakage was detected and localized [5]. Some works

was connected with a segmentation of the water network for efficient sensor localization and leakage detection by balancing segment inflow and outflow water [4]. Suggestion of using MultiRegional Principal Component Analysis (MR-PCA), and some trials to practical usage of this method for leakage detection and localization were described in [1,3].

All these methods needs some on-line measuring systems, installed on the water network. Depending on a method, the number of sensors are changing from a several up to teens sensors. In this paper the development of a system, which needs a very low number of sensors to work was described

2. The short description of existing system

To avoid necessity of using measuring system which is big, complex and spread out at significant area of the country, with big number of on line measuring points, the concept of diagnostic system, which uses artificial neural network (ANN) for modeling the pipeline network and recognizes a leak of water was suggested [6]. A noncommercial prototype of the monitoring system, which can detect and localize leakages was proposed and built in 2007 under the Sectoral Operational Programme "Improvement of the Competitiveness of Enterprises" – SO-P-ICE 1.4.1 under grant "System monitorowania i zarządzania eksploatacją sieci wodociągów i kanalizacji miasta Rybnik" and the Ministry of Education and Scientific Research/Information under grants No. 4 T07B 018 27. The monitored object is a local water pipeline system with about 25km of pipes which supply about 1000 water consumers.

The idea of this system is based on methods known from model-based process diagnostics where a model of the object being monitored is used for fault detection. Based on measuring flow in chosen points on pipeline networks, diagnostic system supported on a specially trained artificial neural network (ANN), will suggest if and where the leakage is.

To pointing potential leakage location, it was decided to divide the network into some separated areas (zones) and point only some area where the leakage is located.

To find the best localization of sensors which should be installed on water pipeline, the genetic algorithm (GA) described in [7,8] was used. The chosen sensor location was shown in Fig. 1.

The described system indicated only an area of the leakage - different leakages located in one area would be undistinguishable. To partition water network into areas, at the first stage the network was "divided" into small pieces and next, it was tested if these areas can be recognized. Undistinguished areas were joined together. The final division of the pipeline network was shown in Fig.2.

Obtained results showed, that leakages located in most zones were pointed out good enough, but in the case of few zones the results appeared poor. To improve this situation instead of one ANN (multi classes classifier) a cascade of ANNs was applied. For seven zones which were not "recognized" good enough, a separate ANN (binary classifiers, which recognize leakage in distinguished zone) was prepared and trained. When the main classifier was not able to recognize the state of the network satisfactorily, binary classifiers completed the diagnosis. The comparison of results obtained for one ANN and the cascade of ANNs was shown in Fig. 3.

nes the results appeared poor. To improve this situation instead of one ANN (multi classes classifier) a cascade of ANNs was applied. For seven zones which were not "recognized" good enough, a separate ANN (binary classifiers, which recognize leakage in distinguished zone) was prepared and trained. When the main classifier was not able to recognize the state of the network satisfactorily, binary classifiers completed the diagnosis. The comparison of results obtained for one ANN and the cascade of ANNs was shown in Fig. 3.

3. The proposed developments of the system description

3.1. Pipeline network partitioning

During the first months of operating time, some problems with the system were encountered.

Planning the development of the system and its expansion for next parts of the town, the problem of pipeline network partitioning into areas should be reconsidered. Manual partitioning is difficult and time-consuming. To improve this process and

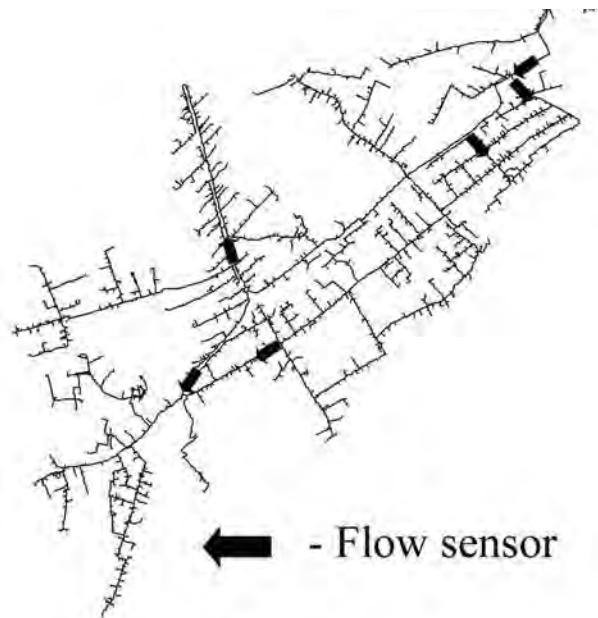


Fig. 1. The flow sensors locations chosen [6]

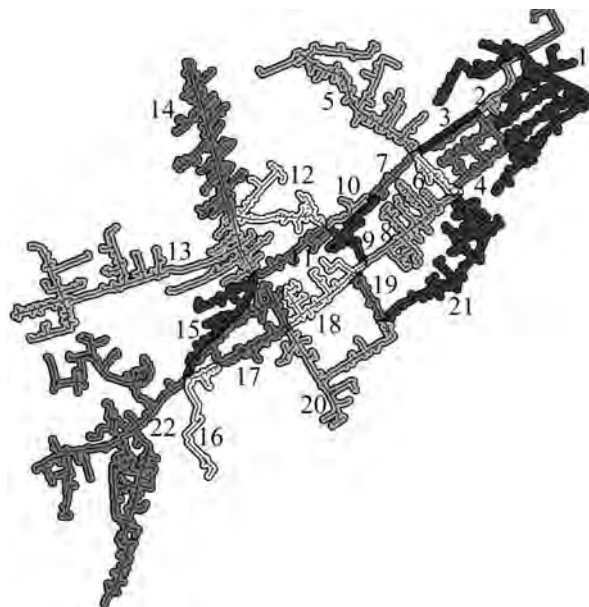


Fig. 2. The final division of pipeline network [6]

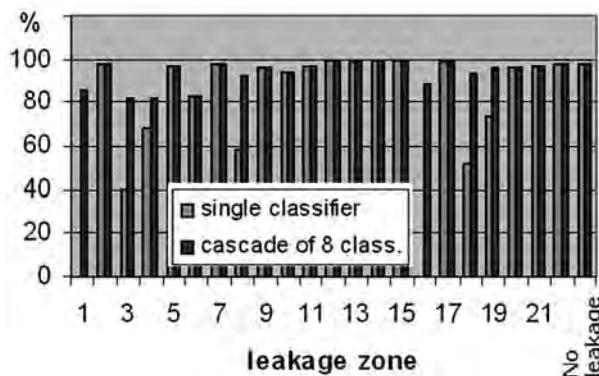


Fig. 3. Classification efficiency [6]

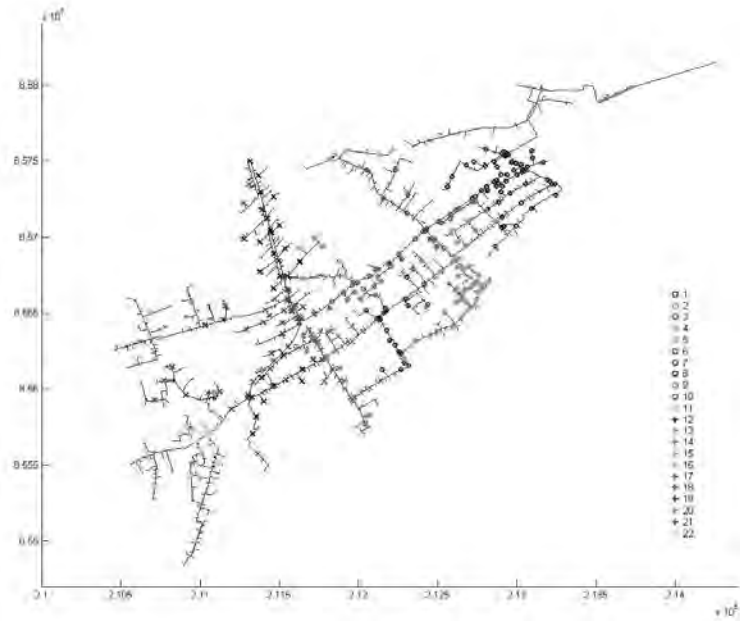


Fig. 4. The division of pipeline network obtained during hierarchical clustering

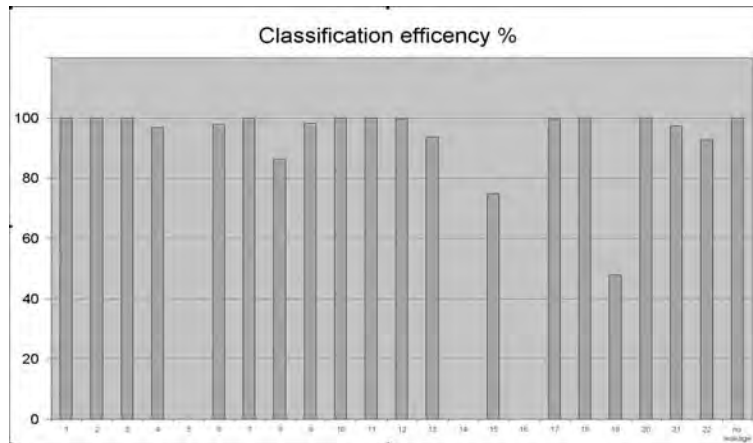


Fig. 5. Classification efficiency for division of pipeline network obtained during hierarchical clustering

made it more automatic, some methods of clustering were taken into consideration.

To test these methods the group of few hundred point of potential leakage were chosen randomly. The points were spread on all the network. Dividing this set of leakage points into similar classes, we automatically divide the pipeline network into partitions.

A first step, using simulation application [2], for each leakage flows in all sensor location was calculated. Simulations were repeated for every hour for 30 days. For every simulation, individual water consumption for each consumer was randomly modified, but changes never exceeded 20% of the expected value.

Using this data the classification process was made. During research the two classification methods were used:

- hierarchical clustering,
- k-means method.

The first method was chosen, because there is no need to make preliminary clustering in his method. To avoid problems with class dividing, the bottom-up approach was used,

The results of hierarchical clustering were used as a first initial step for k-means method.

The essential problem was to decide how to describe the similarity of leakages points.

At first the distance between points was taken as a measure of similarity, but the results were not good. Next the difference between an average flow into two tested points was considered.

At the end, both the measures were taken. To have an equal participation of both components in the final results, the weighted sum of both the quantities was used.

To test the obtained pipeline network partitioning, the neural network classifier was prepared and it was tested how many emitters were properly associated to the appropriate area. The division of the pipeline network obtained by the hierarchical clustering, and classification efficiency of ANN classifier based on this network division was shown in Fig.4 and Fig.5. The received partitioning was quite similar to this from Fig. 1, but three areas (5, 14, 16) could not be separated at all.

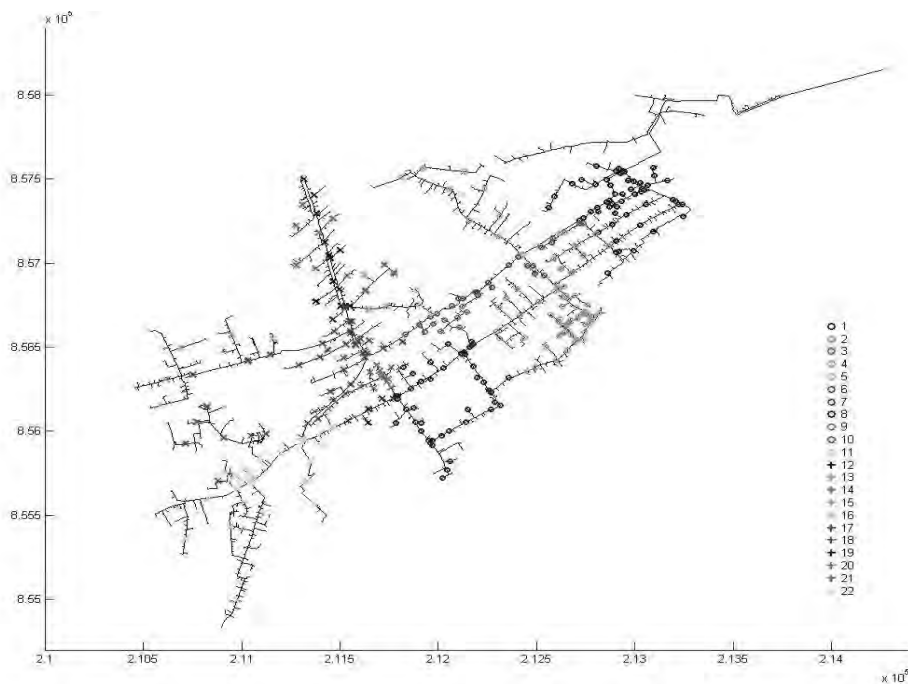


Fig. 6. The division of pipeline network obtained during k-mean clustering

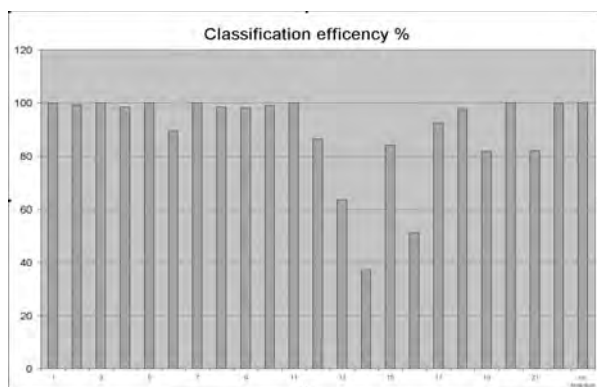


Fig. 7. Classification efficiency for division of pipeline network obtained during k-mean clustering

By using k-means method the obtained results were improved. All expected areas were separated and classification efficiency increased (Fig.6 and Fig.7). But in both the cases the classification efficiency for areas 13, 14 and 16 was significantly worse than the one obtained for the previous network division.

3.2. System sensitivity increasing

To increase the sensitivity of the monitoring system, new inputs were added to the classifier. Up to now, only a value of water flow measured in the chosen points was taken as an input for the classifier. In the next step, the time of the day was added as an input.

After testing the real (measured on the real water network) flows, the daily, average profile of flowing changes was precised (Fig. 8).

According to this profile, there is no need to think over all hours of day separately – the all days were divided into three intervals: 10am to 11pm, 3am to 6am, and the rest of the day.

3.3. Increasing classifier fault resistance

During the first tests of the installed data measuring system the problem of data transmission from sensors was identified. The flow sensors used in the system are battery supplied and the data is transferred by GPRS. Because of different problems (battery weakness, insufficient signal strength) the situations when measured data from one sensor was unavailable were often met. Because the used neural classifier needs all inputs to work properly, in these cases the monitoring system do not work at all.

To avoid this situation the other kind of network was tested as a classifier. Because of a possibility of working with incomplete or noisy data the recurrent network was considered as a classifier.

At first Hopfield network was tested. Hopfield network needs 0 or 1 value as an input. To fulfill this requirement and change set of flow values into an vector of zeroes and ones, input values (the measured flows for all the sensors) were nor-

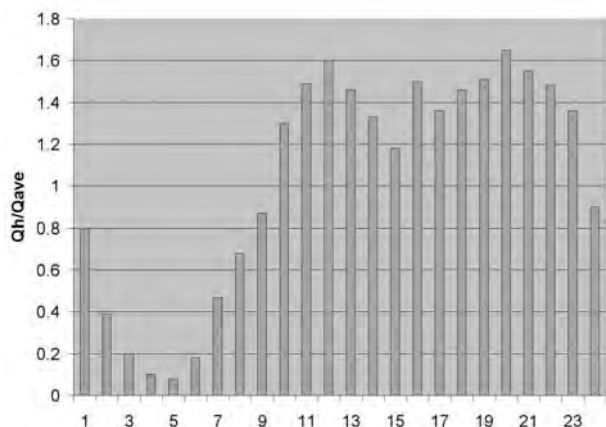


Fig. 8. The average profile of sensor daily flow in considered water network

malized and divided into ranges. If considered value belongs to the selected range, the input vector has value "one" on the adequate position and value zero otherwise.

Hopfield networks were designed to have stable points for the chosen water-network state (an hour of day and emitter location), and were tested, if proper stable point was reach for the similar state.

Obtained results were unsatisfactory, but the authors still work for this problem.

5. References

- Borowa, A, Mazur, K, Grochowski, M, Brdyś, M. A, Jezior K. MultiRegional PCA for leakage detection and localisation in DWDS - approach (Eds.) Korbicz J, Patan K. and Kowal M, Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control, Academic Publishing House EXIT Warsaw, 2007: 203-210.
- <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html>
- Jezior K, Mazur K, Borowa A, Grochowski M, Brdyś M. MultiRegional PCA for leakage detection and localisation in DWDS - Chojnice case study. (Eds.) Korbicz J, Patan K. and Kowal M, Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control, Academic Publishing House EXIT Warsaw, 2007: 303-310.
- Nesamony S, Vairamuthu M. K, Orłowska M. E, Sadiq S. W. On Sensor Network Segmentation for Urban Water Distribution Monitoring. X. Zhou et al. (Eds.): APWeb 2006, LNCS 3841, Springer Berlin / Heidelberg 2006: 974 – 985.
- Wu Z. Y, Sage P. Water Loss Detection via Genetic Algorithm Optimization-based Model Calibration. ASCE 8th Annual International Symposium on Water Distribution Systems Analysis, Cincinnati, Ohio, August 27-30, 2006.
- Wyczółkowski R. System monitorowania i wykrywania awarii sieci wodociągowych. Diagnostyka procesów i systemów, Korbicz J, Patan K, Kowal M. (ed.). Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2007, 307-314.
- Wyczółkowski R, Wysogład B. An optimization of heuristic model of water supply network. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences 2007; 14: 767-776.
- Wysogład B, Wyczółkowski R. An optimization of heuristic model of water supply system with genetic algorithm. Diagnostyka 2006; 2: 49-52.

4. Conclusions

The described system was built and tested as a noncommercial prototype, working for one part of town. After a few months of system operating, a first experience was assumed and initial conclusion was made.

At first the problem of building classifier should be resolved. Sensors locations were chosen using GA, and this method can be used for other networks too, but the division of pipeline network was prepared manually, and better, more automatic methods are needed. To automatize this process authors decided to use methods of classification. The obtained results were good enough, but still worse than this, obtained by manual division. It suggests that further studies are needed.

During operation, the problems with measuring system were disclosed. Because of widespread of monitored object, using battery sensors and GPRS data transmission seems to be a good idea, but it causes the system to behave less reliable. So that an idea of using neural networks which can work with incomplete data seems to be interesting.

The sensitivity and accuracy of this system still can be improved. The few ways of improving the system can be developed. Identifying and adding a new, significant inputs for classifier is one of them.

Dr inż. Ryszard WYCZÓLKOWSKI

Mgr inż. Grzegorz MATYSIAK

Department of Fundamentals of Machinery Design
Silesian University of Technology

Konarskiego Street 18a,
44-100 Gliwice, Poland

e-mail: ryszard.wyczolkowski@polsl.pl

ANALIZA WARUNKÓW PRACY POLSKICH STATKÓW RYBACKICH

ANALYSIS OF OPERATING CONDITIONS OF POLISH FISHING VESSELS

W artykule przedstawiono warunki pracy polskich statków rybackich połowiających na M. Bałtyckim, podano najczęściej spotykane awarie. Zaproponowano kryteria oceny ryzyka takich awarii i ich oddziaływania na środowisko.

Słowa kluczowe: statki rybackie, awarie statków rybackich, zanieczyszczenia ropopochodnymi środowiska morskiego.

This article presents the conditions of Polish fishing vessels operating in the Baltic Sea. Most common failures and proposed methods of assessing the risk of such failures are given, as well as the effects on the marine environment.

Keywords: fishing vessels, failures in fishing vessels, oil pollution of the marine environment.

1. Wprowadzenie

Polskie statki rybackie, połowiające w oparciu o porty zlokalizowane na polskich wodach morskich stanowią liczną grupę 881 jednostek zarejestrowanych jako czynne statki rybackie [8, 9]. Są to jednostki zróżnicowane wiekowo, o różnych wielkościach i różnym zaawansowaniu technicznym konstrukcji i wyposażenia.

Zebrane dane wskazują, iż ponad 50% polskich jednostek rybackich osiągnęło wiek ponad 25 lat, a wiek blisko 38% jednostek przekracza 30 lat (rys.1). Bezpieczeństwo jednostek w dużej mierze zależy od następujących czynników:

- stanu technicznego statków rybackich,
- warunków eksploatacji,
- kwalifikacji załóg.

Stan techniczny polskich statków rybackich podlega ocenie towarzystwa klasyfikacyjnego, ale prawidłowością jest lepszy stan techniczny nowszych jednostek. Rejony połowowe oraz trasy, po których poruszają się jednostki rybackie, a pokazane na rys.2 wyznaczono na podstawie danych z Centrum Monitorowania Rybołówstwa.

Obszar badań ograniczony został do polskiej strefy wyłączności ekonomicznej. Połowy najczęściej dokonywane są w zachodniej (okolica wyspy Bornholm) i wschodniej części (około 18°E) polskiej strefy wyłączności ekonomicznej. Ruch jednostek podzielony jest na dwa etapy: 1-przejsięcie na łowisko i powrót z łowiska oraz 2-ruch związany z połowem. Natężenie ruchu polskich statków rybackich w polskiej strefie ekonomicznej na Bałtyku pokazano na rys. 2. Trasy i natężenie ruchu statków w obszarze Morza Bałtyckiego zobrazowane na rys. 3 i 4, pokazują, jak wiele statków rybackich operuje na akwenach o dużym natężeniu ruchu statków handlowych.

1. Introduction

There are 881 Polish fishing vessels operating from Polish ports located along Polish sea coast, registered as actively engaged in fishing [8, 9]. The craft vary in age, size and technical condition of the structure, machinery and equipment.

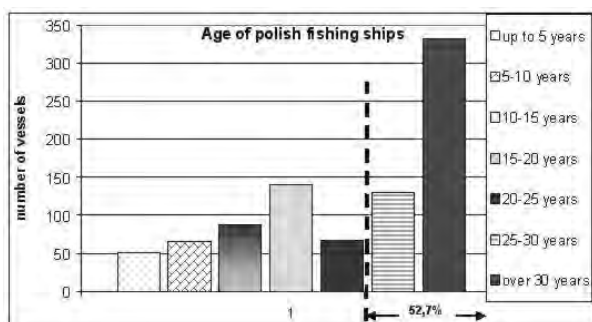
The collected data show (fig. 1) that more than 50% of Polish fishing vessels exceed 25 years of age, and nearly 38% of them are more than 30 years old. The safety of the craft to a large extent depends on the following factors:

- technical condition,
- operating conditions,
- crew qualifications.

The technical condition of Polish fishing vessels is subject to the evaluation by a classification society. Obviously, newer craft generally is found to be in a better technical state. The fishing areas and routes followed by fishing vessels have been determined on the basis of data from the Fishing Monitoring Centre (fig. 2). The area of research has been limited to the Polish economic zone.

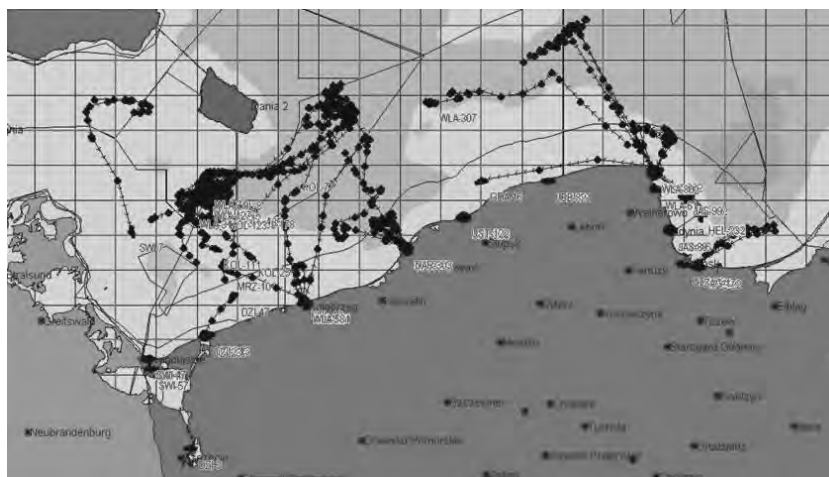
Fishing is mostly done in the western part (vicinity of Bornholm) and eastern part (about 18°E) of the Polish economic zone. The fishing vessel traffic is divided into two stages: 1 – passage to and from a fishing ground and 2 – movements connected with the fishing itself.

The intensity of Polish fishing vessel traffic in the Polish economic zone in the Baltic is shown in fig. 2. The routes and vessel traffic intensity in the Baltic Sea in fig. 3 and 4 present the number of fishing vessels operating in areas where the traffic intensity of merchant ships is high. The accident rate of fishing vessels in Baltic is significantly affected by weather conditions during fishing operations. Notably, fishing intensity is the highest in autumn



Rys.1. Struktura wiekowa polskich statków rybackich operujących z polskich portów [8,9]

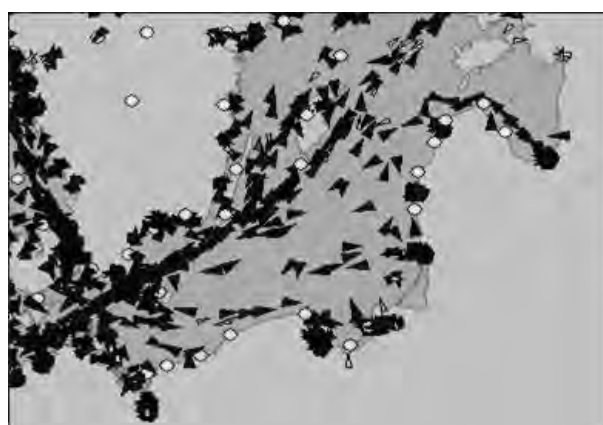
Fig. 1. Age structure of Polish fishing vessels operating from Polish ports



Rys. 2. Natężenie ruchu polskich statków rybackich w polskiej strefie ekonomicznej na Bałtyku
 Fig. 2. Intensity of Polish fishing vessels traffic in Polish economic zone in the Baltic



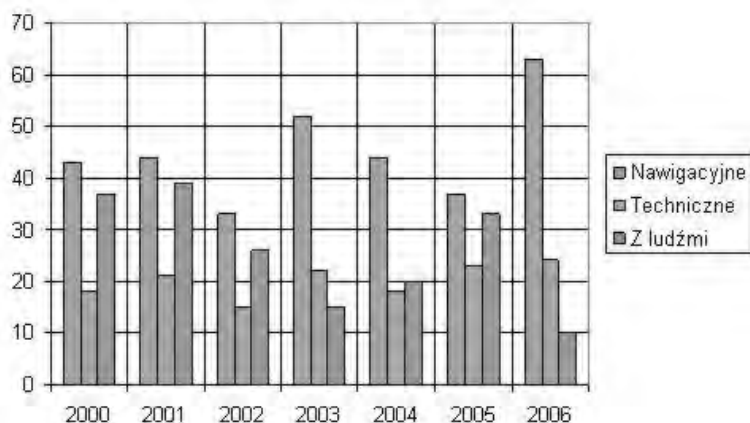
Rys.3. Główne trasy ruchu statków w akwenie Morza Bałtyckiego
 Fig. 3. Main routes of vessels in the Baltic Sea



Rys.4. Natężenie ruch statków w rejonach połowów
 Fig. 4. Intensity of the vessel traffic in fishing areas



Rys.5. Zobrazowanie miejsc połowów polskich kutrów o długości ponad 15 m. (bez uwidocznienia jednostek o długości mniejszej od 15m) [1]
 Fig. 5. Places of operation of Polish fishing vessels over 15 m in length (smaller craft are not marked)



Rys.6. Liczba wypadków z udziałem polskich statków rybackich w latach 2000 -2006 [7]

Fig. 6. Number of accidents Polish fishing vessels in the years 2000 -2006

Tab. 1. Przykład miesięcznych rozkładów siły i kierunku wiatru [6]

Tab. 1. Example of monthly distribution of wind force and direction on Baltic Sea area

Miesiąc obserwacji Month of observation	Średnia prędkość [m/s] Speed [m/s]	Ilość dni z prędkością mniejszą od 10 m/s Days with speed less than 10 m/s	Ilość dni z prędkością pomiędzy 10 a 15 m/s Days with speed 10 to 15 m/s	Ilość dni z prędkością pomiędzy 15 a 20 m/s Days with speed 15 to 20 m/s	Ilość dni z prędkością pomiędzy 20 a 25 m/s Days with speed 20 to 25 m/s	Ilość dni z prędkością powyżej 25 m/s Days with speed over 25 m/s
1	4	25	2	2	0	1
2	4	26	2	1	1	0
3	4	24	4	1	0	1
4	4	27	2	1	0	0
5	3	27	2	1	0	0
6	3	27	3	0	0	0
7	3	28	1	1	0	0
8	3	27	2	1	0	0
9	3	27	1	1	1	0
10	4	26	2	1	1	0
11	4	25	3	0	1	1
12	4	26	1	1	1	1

Na wypadkowość w rybołówstwie bałtyckim znaczący wpływ mają warunki pogodowe w czasie połowów. Największe natężenie połowów ma miejsce w miesiącach jesienno – zimowych, gdy warunki pogodowe są najtrudniejsze.

2. Metody połowów, konstrukcja narzędzi połowowych i rodzaje materiałów użytych do ich budowy

Z uwagi na duże skupiska jednostek, połowiących na małych i płytkich akwenach, czynnikiem powodującym zagrożenia dla statków rybackich (rys. 6) i środowiska morskiego jest konieczność manewrowania tych jednostek w trudnych warunkach atmosferycznych (tab.1), obciążonych dodatkowo narzędziami połowowymi. Dodatkowym zagrożeniem dla układów napędowych jednostek, bezpośrednio związanym z prowadzeniem połowów, są zerwane na zaczepach dennych lub zagubione, bądź też porzucone w morzu przez statki, rybaczkie narzędzia połowu.

W polskim rybołówstwie na Bałtyku, od zakończenia wojny do chwili obecnej stosowane są dwie zasadnicze metody połowów sieciowych. Są to połowy narzędziami aktywnymi,

and winter months when the weather conditions are the most difficult.

2. Methods of fishing, design of fishing gear and types of fishing gear material

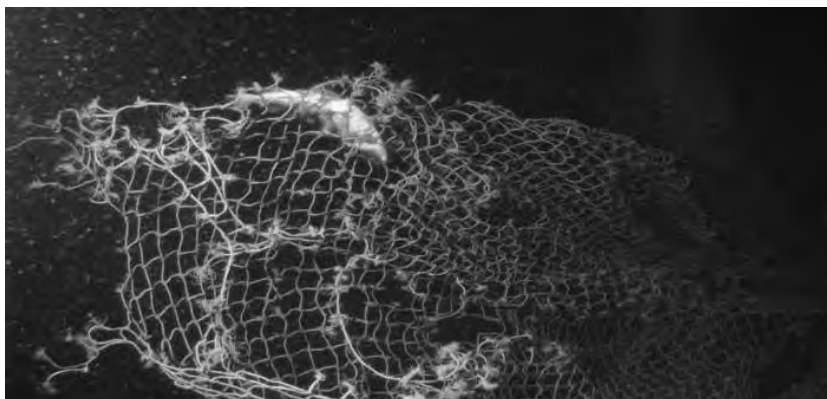
Due to large groups of fishing craft operating in small and shallow areas, the factor that creates a risk to fishing vessels (fig. 6) and the marine environment is that these vessels have to manoeuvre in bad weather conditions (tab.1), additionally burdened with fishing gear. Another threat for the propulsion systems of fishing craft, directly connected with fishing operations, is fishing gear torn by bottom hooks, sometimes lost in the sea or abandoned by fishing.

There have been two principal methods of net fishing in Polish Baltic areas used since the last world war till now. These include active fishing gear, i.e. trawl and pair nets (bottom and pelagic), which in the process of fishing are towed astern of one or two ships. The other, passive gear, including drift nets,

czyli włokami i tukami (zarówno dennymi, jak i pelagicznymi), które w czasie połowu są holowane za jednym lub dwoma statkami, oraz połowy narzędziami pasywnymi, z których najważniejsze to nety, mance i pławnice, które w czasie połowu są zakotwiczone do dna lub też dryfują swobodnie pod wpływem prądów i wiatrów. Narzędzia aktywne, czyli włoki i tuki są konstrukcją są bardzo zbliżone, stanowiąc wykonane z tkaniny sieciowej osadzonej na linach obramowujących stożkowane leje. Zasada działania tych narzędzi polega na przefiltrowaniu przez oczka sieci w trakcie trałowania zagarniętych przez ich przednią, wlotową część, masy wody ze znajdującymi się w niej rybami i zatrzymanie w końcowej części narzędzi ryb o dopuszczalnych rozmiarach. Specyfika Morza Bałtyckiego wyraża się m.in. tym, że niektóre obszary jego dna pokryte są pozostawionymi przez lodowce głazami, a ponadto na całym jego obszarze zalegają tysiące wraków statków, okrętów wojennych i samolotów, jako przede wszystkim rezultat dwóch wojen światowych, a także częstych zatonięć statków wskutek sztormów czy błędów nawigacyjnych. Jako przykład można powołać się na historyków niemieckich, według których w latach 1845 – 1945 tylko w wodach kilkudziesięciomilowego pasa Bałtyku pomiędzy Łebą a Kołobrzegiem zatoniło blisko 600 statków. Naturalne, bądź też wynikające z działalności ludzkiej obiekty zalegające na dnie morskim, które na mapach morskich nazywane są często „nieczystościami”, a w nomenklaturze rybackiej „zaczepami”, są główną przyczyną różnego rodzaju awarii narzędzi połowów i w efekcie źródłem groźnych dla środowiska morskiego zanieczyszczeń. Dominującą metodą połowów w polskim rybołówstwie była i nadal pozostaje technika włokowa, przy czym do początków lat 70-tych ub. wieku stosowano prawie wyłącznie włoki denne. Narzędzia te, holowane w trakcie połowów po dnie morskim z prędkością kilku węzłów, przy natrafieniu na w/w „zaczepy” ulegają częściowemu lub nawet całkowitemu zniszczeniu. Statki rybackie aż do początków obecnego wieku nie dysponowały urządzeniami nawigacyjnymi pozwalającymi na precyzyjne określenie swego położenia na morzu, co powodowało, że pomimo nanoszenia na mapy pozycji tych zaczepów wykrytych w trakcie połowów, wymianą informacji i tworzeniem własnych „rybackich map”, przeszkody były groźne. Bardzo często szyprowie trałujących kutrów wielokrotnie tracili sprzęt na tych samych zaczepach dennych. Szybki postęp w rozwoju wyposażenia nurków profesjonalnych, a przede wszystkim postęp i upowszechnienie nurkowania swobodnego i fotografii podwodnej, umożliwił dokumentowanie wielkości zagrożenia i strat, jakie w środowisku morskim powodują utracone i porzucone w morzu narzędzia połowowe. Przyjęty w literaturze fachowej angielski termin „ghost nets” – „sieci widma” dość trafnie określa pozostawione w morzu sieci [3]. Dodatkowym czynnikiem potęgującym zagrożenia porzuconymi w morzu narzędziami połowu jest fakt, że do końca lat 60 – tych XX wieku sieci rybackie wytwarzane były z włókien surowców naturalnych, które w środowisku wodnym ulegały dość szybko procesom rozkładu bakteryjnego (butwienie, gnicie), tracąc swoje właściwości eksploatacyjne (przede wszystkim „łowność”, czyli zdolność zatrzymania ryb w oczkach sieci). W latach 70 – tych XX wieku zaczęto w rybołówstwie stosować na szeroką skalę włókna syntetyczne, które nie ulegają zupełnie procesom rozkładu naturalnego. Zerwane na wrakach i innych zaczepach, bądź zagubione podczas sztormów syntetyczne sieci rybackie (rys.7) przez wiele lat zachowują trwałość i stanowią zagrożenie

for catching fish are moored to the bottom or drift freely pushed by currents and wind. Active gear i.e. trawls and pair nets are similar in construction, have a conical shape and are made of net fabric mounted on external lines. The principle of their operation consists in filtering through net eyes masses of water that go in through the front open part of the net; the end part of the net captures fish of allowed size. The Baltic Sea is specific as some areas of its bottom are abounding with huge stones left by a glacier; besides, in many parts of the Baltic Sea bottom there are as many as thousands of wrecks of vessels, warships and airplanes, the consequences of the two world wars. Some craft have sunk due to storms or navigational errors. To illustrate this issue, let us quote German historians, who estimate that “in the years 1845 – 1945 in the waters along the stretch of the Baltic between Łeba and Kołobrzeg nearly 600 ships went to the bottom”.

Natural objects or those created by man remaining on the bottom, on charts marked as ‘fouling’, by fishermen called ‘hooks’, are main causes of various kinds of damage to fishing gear, and consequently, bring about dangerous pollution to the marine environment. The trawling method for years has been the main technology in Polish fishing, with bottom trawls only used since the early 1970s. This gear, hauled during fishing along the bottom at a speed of a few knots, when catches a ‘hook’ gets partly damaged or completely destroyed. Until the beginning of this century fishing vessels did not carry navigational equipment allowing to determine an accurate position at sea. Although ‘hooks’ were marked on charts. Information about these obstacles have been exchanged between themselves and it was base for creation their own “fishermen’s charts”, but obstacles were whole the time dangerous. Skippers of trawling vessels very often lost their gear because of the same bottom ‘hooks’. Advancements in the equipment of professional divers, and increasing development of free diving and underwater photography have led to much better documentation of threats caused by lost, or just abandoned fishing gear. The term ghost nets used in literature on the subject well reflects the character of nets left in the sea [3]. Another technological factor contributing to the increased threat caused by nets is the material. Till late 1960s fishing nets were made of natural fibers which in the marine environment quickly decayed due to bacteria and lost their ability to catch fish. Then, in 1970 synthetic materials came into use in the fishing industry. These synthetic nets do not undergo such decay as natural fibers. Torn by wrecks or other hooks, or lost in a storm, synthetic fishing nets remain (shown in fig.7) untouched for years and pose a threat not only to fishing vessels. The threat is hard to avoid as they are often made of thin yarns or synthetic filaments additionally dyed to make them hardly visible in water. Therefore, they are practically invisible for an observer from a vessel’s deck. The most dangerous are drift nets, most often used for catching fish right under the water surface. When nets foul a propeller or its shaft, the result may be damage to the propulsion system, sometimes causing the vessel to stop.



Rys.7. Pozostałości po zerwanym włoku [5]

Fig. 7. Remains of a torn trawl [5]

nie tylko dla statków rybackich. Jest ono tym większe, iż wykonane z cienkich przędz rybackich lub żyłek stytonowych dodatkowo barwionych dla zmniejszenia ich widoczności w wodzie, są praktycznie niewidoczne dla obserwatora na pokładzie statku. Szczególnie niebezpieczne pod tym względem są sieci dryfujące, czyli pławnice, które najczęściej służą do poławiania w przypowierzchniowych warstwach wody. Nawinięcie na śrubę napędową lub wał śrubowy żyłki lub dryfującej sieci, często powoduje uszkodzenie układu napędowego, skutkujące nawet nieruchomieniem statku.

3. Awarie spowodowane nawinięciem sieci na wał napędowy

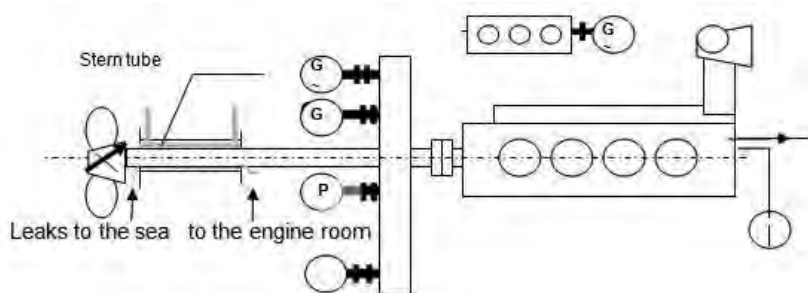
Wśród awarii dotyczących układu napędowego, spowodowanymi czynnikami innymi niż nawinięcie na śrubę, aż 87.2% zdarzyło się na jednostkach starszych niż 25 lat [4].

Bardzo istotnym elementem wpływającym na bezpieczeństwo jednostek może być ukształtowanie rufowej części kadłuba i osłona wału śrubowego, gdyż na 220 awarii odnotowanych w przytoczonym okresie, 72 przypadków (32,7% wszystkich odnotowanych awarii) [7] związanych było z nawinięciem liny lub sieci na śrubę lub wał śrubowy. W wielu przypadkach skutkowało to uszkodzeniem uszczelnienia pochwy wału i wyciekami oleju do morza, jak pokazano na rys.8. Specyficzny charakter pracy statków rybackich, wymagający manewrów umożliwiających poprawne wydanie i wybranie narzędzi połowowych powodują duże zagrożenie nawinięcia w trakcie takiej fazy pracy lin lub żyłki sieciowej na wał śrubowy.

3. Failures caused by net fouling of the propeller shaft

Of the failures of the propulsion system caused by factors other than propeller fouling by a fish net, as much as 87.2% occurred in vessels older than 25 years [4].

In this respect, an essential element that significantly affects the vessel safety is the shape of the aft part of the hull and shaft guard, as out of 220 failures noted in the examined period, 72 cases (32.7% of all noted failures) were due to propeller or propeller shaft fouling by a line or fish net [7]. In many cases the consequences were serious: damage to the stern tube and leaks of oil to the sea (fig. 8). The specific character of fishing vessel operations, where manoeuvres are performed to allow correct casting or hauling in of the nets, brings about such risks as propeller shaft fouling by the lines or net filaments.



Rys.8. Miejsce możliwych wycieków przy uszkodzeniach spowodowanych nawinięciem na wał śrubowy lin lub sieci

Fig. 8. Places of possible leaks due to damage caused by lines or nets fouling the propeller shaft



Rys.9. Lina nawinięta na wał śrubowy łodzi rybackiej
Fig 9. Line that fouled a propeller shaft of a fishing boat



Rys.10. Żyłka (pozostałość sieci rybackiej) wkręcona w uszczelnienie pochwy wału śrubowego kutra rybackiego
Fig 10. Filaments (remains of a fish net) fouled in the stern tube sealing of a fishing vessel

Statki rybackie nowszej generacji, poławiające za pomocą narzędzi połowowych wydawanych z rufy są mniej narażone na tego rodzaju awarie. Czynnikiem zmniejszającym ryzyko takich awarii jest także doświadczenie załogi i stan morza. Najczęstszym uszkodzeniem, będącym efektem takich zdarzeń są uszkodzenia śruby napędowej oraz łożyskowania wału, w tym uszkodzenia uszczelnienia pochwy wału [7, 9]. Aby ograniczyć tego rodzaju zagrożenia i zanieczyszczenia poczyniono stosowne zapisy w Międzynarodowej Konwencji o Zapobieganiu Zanieczyszczeniu Morza przez Statki [3]. Znacznie dokładniej zagadnienia związane z pozostawionymi w morzu narzędziami połowu przedstawione są w „Wytycznych do wdrożenia Załącznika V MARPOL, 73/78”, przy czym usunięty do morza lub pozostawiony w nim sprzęt połowowy określony jest jako „substancja szkodliwa” [2, 3].

4. Ocena ryzyka powstania uszkodzeń układu napędowego

Ryzyko utraty napędu statku rybackiego i jego skutki można prognozować. Ocena ryzyka bazuje na metodologii pozwalającej łączyć każdy zidentyfikowany rodzaj z wartością na skali liczbowej celem porównania „wartości ryzyka” wynikającego z konkretnego zdarzenia, awarii, uszkodzenia, a tym samym określić priorytet działań niwelujących zagrożenia. W przypadku, gdy celem jest bezpieczeństwo między ryzykiem a zagrożeniem można postawić znak równości. Rozważane w przypadku awarii układu energetycznego statku rybackiego zagrożenia można podzielić na następujące grupy:

1. zagrożenia dla życia i zdrowia załogi,
2. zagrożenia bezpieczeństwa statku,
3. zagrożenia dla środowiska morskiego.

Dla wybranych grup zagrożeń należy:

1. określić parametry i kryteria oceny parametrycznej,
2. przyjąć skalę oceny parametrycznej kryteriów,
3. ustalić formułę obliczania wielkości ryzyka.

Proponuje się przyjęcie następującej metodologii dla oceny zagrożenia występującego w następstwie awarii układu energetycznego statku rybackiego:

Fishing vessels of a newer generation, putting fishing gear put to sea on the stern are less vulnerable to that kind of failure. The risk is also lower depending on crew experience and the state of the sea. The elements most often damaged due to such occurrences are propeller shafts and shaft bearings, including stern tube (shown on fig.8) [7, 9]. In order to reduce this kind of risk and consequent pollution appropriate provisions were added to the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships [3]. More accurately the problems of fishing gear left in the sea are presented in “Guidelines to the Implementation of Annex V of MARPOL, 73/78”, where fishing gear disposed of at sea or left there is referred to as ‘noxious substance’ [2, 3].

4. Risk assessment of propulsion system damage occurrence

One can forecast the risk of fishing vessel propulsion stoppage and its consequences. Risk assessment is based on the methodology that allows combining each identified event with a value on the numerical scale to compare ‘risk value’ resulting from a specific event, failure or damage. Thus priority of actions aimed at reducing threats can be determined. When safety is the objective of activities, risk and threat can be said to be equal. Threats under consideration, i.e. those that may lead to a fishing vessel power system failure, can be divided into three groups:

1. threats to life and health of the personnel,
2. threats to vessel safety,
3. threats to the marine environment.

For these groups the following steps should be done:

1. determine the parameters and criteria of parametric assessment,
2. adopt a scale for parametric assessment of the criteria,
3. set the formula for calculating the magnitude of risk.

We propose adopting the following methodology for the assessment of threats that occurs as a consequence of the fi-

Tab. 2. Proponowane wagi parametrów określające ich udział w ocenie ryzyka
 Tab. 2. Factors of the determined parameters

<i>P</i> – prawdopodobieństwo = częstotliwości wystąpienia zdarzeń: <i>P</i> – probability = frequency of occurrence:	Waga Weight	<i>W</i> – warunki pogodowe <i>W</i> – weather conditions	Waga Weight
<i>bardzo rzadkie / very seldom</i>	1	<i>b. dobre / very good</i>	1
<i>rzadkie / seldom</i>	2	<i>dobre / good</i>	2
<i>prawdopodobne / probable</i>	3	<i>umiarkowane / moderate</i>	3
<i>częste / frequent</i>	4	<i>złe / bad</i>	4
<i>bardzo częste</i>	5	<i>sztormowe / stormy</i>	5
<i>K</i> – konsekwencje = wrażliwość / <i>K</i> – consequences = sensitivity		<i>M</i> – miejsce zdarzenia / <i>M</i> – place of event	
<i>drugorzędne / secondary</i>	1	<i>w porcie / in port</i>	1
<i>umiarkowane / moderate</i>	2	<i>w zasięgu widoczności z brzegu</i> <i>visible from the shore</i>	3
<i>znaczące / significant</i>	3	<i>na pełnym morzu / in open sea</i>	4
<i>poważne / serious</i>	4	Wskaźnik ryzyka można określić wzorem: Risk magnitude can be defined by this formula: $R = P * K * V * W * M$	
<i>katastrofalne / catastrophic</i>	5		
<i>V</i> – podatność na uszkodzenia / <i>V</i> – susceptibility to damage			
<i>mała / low</i>	1		
<i>średnia / medium</i>	2		
<i>duża / high</i>	3		
<i>bardzo duża / very high</i>	4		
<i>na pełnym morzu / in open sea</i>	4		

Określane parametry: *R* – wielkość ryzyka, *P* – prawdopodobieństwo, *K* – konsekwencje, *V* – podatność na uszkodzenia (od ang. Vulnerability).

Przykładowo: ocena ryzyka pod kątem bezpieczeństwa załogi dla uszkodzenia układu napędowego spowodowanego nawinięciem liny na śrubę napędową o zmiennym skoku, w basenie portowym, w złych warunkach pogodowych:

$$P = 2, K = 1, V = 4, W = 4, M = 1, \\ R = 2 * 1 * 4 * 4 * 1 = 32 \quad (1)$$

Ocena ryzyka pod kątem środowiska naturalnego dla uszkodzenia układu napędowego spowodowanego nawinięciem liny na śrubę napędową o zmiennym skoku, w basenie portowym, w złych warunkach pogodowych:

$$P = 2, K = 5, V = 4, W = 4, M = 1 \\ R = 2 * 5 * 4 * 4 * 1 = 160 \quad (2)$$

Zależnie od wskaźnika ryzyka można przyjąć priorytety działań.

shing vessels power systems. The parameters to be determined: *R* – risk magnitude, *P* – probability, *K* – consequences, *V* – vulnerability.

Example: assessment of risk caused by propulsion system failure due to the controllable pitch propeller fouling by a line for personnel safety, in a port basin, in bad weather conditions:

$$P = 2, K = 1, V = 4, W = 4, M = 1, \\ R = 2 * 1 * 4 * 4 * 1 = 32 \quad (1)$$

Assessed risk caused by a propulsion system failure due to the controllable pitch propeller fouling by a line for the marine environment, in the port basin, in bad weather conditions:

$$P = 2, K = 5, V = 4, W = 4, M = 1 \\ R = 2 * 5 * 4 * 4 * 1 = 160 \quad (2)$$

Depending on the risk assessment indicator, certain priorities of actions can be adopted.

Tab. 3. Zalecane działania w zależności od wskaźnika ryzyka
 Tab. 3. Risk magnitude calculated by this formula

Wskaźnik ryzyka Risk indicator	< 30	31 - 50	51 - 80	81 - 100	101 - 160	> 161
Zalecane działania Recomm-end- ed actions	-	<i>Sprawdzenie algorytmu postępowania załogi</i> <i>Check the algorithm of crew procedures</i>	<i>Sprawdzenie algorytmu postępowania załogi i stanu urządzeń statku</i> <i>Check the algorithm of crew procedures and the condition of machinery</i>	<i>Przygotowanie modernizacji urządzeń</i> <i>Prepare for the modernization of machinery</i>	<i>Przygotowanie modernizacji urządzeń i zmiana sposobu eksploatacji urządzeń</i> <i>Modernize machinery and change the operation of machinery</i>	<i>Wycofanie z eksploatacji lub modernizacja</i> <i>Withdraw from operation or modernize</i>

5. Podsumowanie

W wyniku prowadzonych w ramach projektu badawczego OR16-61535-OR160000/06 badań określono średnią intensywność zderzeń jednostek rybackich wynosi 5,73 zderzenia na rok.

Okolo 11,5% zderzeń spowodowało rozlew paliwa. Średnia intensywność rozlewów wynosi 0,65 rozlewu na rok. 50% rozlewów to rozlewy poniżej 5 ton, drugą pod względem liczebności grupą są rozlewy pomiędzy 10 a 20 ton paliwa. Maksymalne rozlewy, nieprzekraczające 100 ton, stanowią mniej niż 10% ogólnej liczby rozlewów. Do zderzeń dochodzi w miejscach, gdzie trasy statków handlowych przecinają obszary połowowe.

Średnia intensywność strat sprzętu połowowego wynosi około 2 utrat rocznie dla jednej jednostki rybackiej. Pozycje strat sprzętu pokrywają się z obszarami, na których dokonywane są połowy.

6. References

1. Gućma L. Wypadkowość floty rybackiej w aspekcie możliwości wystąpienia kolizji, projekt badawczy OR16-61535-OR160000/06. Szczecin: Akademia Morska w Szczecinie, 2008.
2. Kodeks Odpowiedzialnego Rybołówstwa FAO, Rzym 1995. Gdynia: Wyd. Polskie Stowarzyszenie Rozwoju Rybołówstwa, 1996.
3. Międzynarodowa Konwencja o Zapobieganiu Zanieczyszczeniu Morza przez Statki (MARPOL 73/78). Gdańsk: PRS, 1997.
4. Sektorowy Program Operacyjny „Rybołówstwo i przetwórstwo ryb 2004 – 2006” Dz. Ust. Nr 213, poz. 2163
5. Szulc M. Wraki w środowisku morskim. Poradnik ekologiczny „Eko i my” nr 2(70) 2001.
6. Zakrzewski B. Wpływ parametrów powietrza w klimatyzacji na koszty energetyczne wytwarzania zimna w klimatyzacji. Gdańsk: IV Konferencja Techn. Klimatyzacja i Wentylacja XXI wieku, 2002.
7. Dane z towarzystw ubezpieczeniowych (nie publikowane).
8. Dane z Urzędów Morskich Szczecina, Słupska i Gdyni.
9. Dane z Polskiego Rejestru Statków.

5. Summary

This study is based on public information released by government institutions from July to November 2007, within the research project OR16-61535-OR160000/06. The final result of the mean intensity of fishing vessels events is 5.73 events per year.

About 11.5% events led to fuel spills. The mean intensity of spills is 0.65 spill a year. 50% of those oil spills amounted to less than 5 tons, while spills of oil ranging from 10 to 20 tons ranked as second in number. The largest spills, below 100 tons, accounted for less than 10% of all spills. Incidents occur in places where routes of merchant vessels cross fishing areas.

The mean intensity of losses of fishing gear is about two losses per year per one fishing vessel. Positions of these losses overlap the areas of fishing.

Dr inż. Przemysław RAJEWSKI

Dr hab. inż. Cezary BEHRENDT

Mgr inż. Paweł KRAUSE

Institut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych
Akademia Morska w Szczecinie
Wały Chrobrego nr 1/2, 70-500 Szczecin, Polska
E-mail: rajp@am.szczecin.pl

OCENA RYZYKA W SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH O RÓWNOLEGŁEJ STRUKTURZE NIEZAWODNOŚCIOWEJ

EVALUATION OF THE RISK IN PRODUCTION SYSTEMS WITH A PARALLEL RELIABILITY STRUCTURE

System produkcyjny zdefiniowano zgodnie z teorią systemów, natomiast ryzyko jako synonim zawodności. Takie podejście umożliwiło dekompozycję systemu produkcyjnego na obszary oraz na wyznaczenie struktury niezawodnościowej systemu produkcyjnego. Artykuł prezentuje metodę wyznaczania ryzyka dla systemu produkcyjnego o strukturze równoległej. Metoda wyznaczania ryzyka dla produkcyjnej struktury równoległej została zweryfikowana w przedsiębiorstwie produkującym ramy wózków wagonów, tramwajów i lokomotyw.

Słowa kluczowe: ryzyko, system produkcyjny, niezawodność, struktura niezawodnościowa.

The production system was defined in accordance with systems theory, while the risk was treated as a synonym of unreliability. This approach allowed decomposing the production system into several areas and determining the reliability structure of the production system. This paper presents a method of determining the risk for a production system with a parallel structure. The method of determining the risk for a parallel structure of production was verified in a production company, which manufactures bogie frames for railway cars, trams and railway engines.

Keywords: risk, production system, reliability, reliability structure.

1. Wprowadzenie

Najważniejszym zadaniem zarządzania produkcją jest kształtowanie zjawisk zachodzących w procesie produkcyjnym zgodnie z zakładanymi celami przedsiębiorstwa i przy uwzględnieniu wszelkich warunków i okoliczności realnych procesów produkcyjnych. Podjęcie decyzji odnośnie systemu produkcyjnego, z uwagi na jego złożoność, wymaga analizy dużej liczby danych. Złożoność ta, integracja systemu z otoczeniem oraz zakłócenia występujące stale w systemie produkcyjnym utrudniają, a często wręcz uniemożliwiają decydentowi, bezpośrednią identyfikację związków przyczynowo-skutkowych zachodzących w systemie. Podejmowanie decyzji na podstawie jedynie intuicji jest często zawodne i obciążone dużym ryzykiem, dlatego powinno zostać poprzedzone analizą systemu produkcyjnego oraz oceną ryzyka związanego z jej podjęciem.

Wieloznaczność pojęcia oraz brak sprecyzowanej jasno definicji spowodowały, iż w literaturze spotkać można różne podejścia do tematu ryzyka. Najbardziej rozpowszechnionymi podejściami są: podejście niemieckie i amerykańskie. Pierwsze traktuje ryzyko jako „niebezpieczeństwo nie zrealizowania założonego celu przy podejmowaniu decyzji” [17]. Jego rozszerzeniem jest podejście amerykańskie, traktujące ryzyko nie tylko w kategorii możliwości poniesienia straty, ale również osiągnięcia zysku [8, 12, 18]. Oba podejścia zaprezentowano na rysunku 1.

Mimo iż obecnie ryzyko działalności gospodarczej jest równie wysokie na rynku produkcyjnym, usługowym i finansowym, to widoczne są znaczne

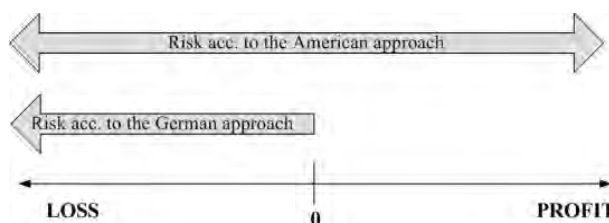
1. Introduction

The most important task of production management is to shape the phenomena occurring in a production process in accordance with the assumed goals of the company, taking into account all conditions and circumstances of real production processes. Decisions regarding a production system require analysing a large number of data, due to its complexity. Complexity, integration with the environment, and disturbances occurring constantly in a production system hinder, and often even prevent a decision-maker from identifying directly the cause-and-effect relationships occurring in the system. Decisions based only on intuition are often unreliable and burdened with a high risk, and therefore they should be preceded by an analysis of the production system and evaluation of the risk related to making a decision.

Ambiguity of the concept and the lack of clearly specified definition resulted in different approaches to the subject of risk in the literature. The most widespread approaches include the German approach and the American approach. The German approach treats risk as “the danger of failing to achieve the assumed goals when making a decision” [17]. The American approach is an extension of the German approach and treats risk not only in terms of a possibility of suffering a loss but

also in terms of making a profit [8, 12, 18]. Both approaches are presented in Fig. 1.

Despite the fact that the risk of business activity is currently equally high in the production, services and financial markets, considerable differences in the number of literature items, training courses and scientific



Rys. 1. Koncepcja ryzyka według podejścia amerykańskiego i niemieckiego

Fig. 1. The concept of risk according to American and German approaches

różnice w liczbie pozycji literaturowych, szkoleń i konferencji naukowych z tego zakresu. Sytuacja ta przekłada się w prosty sposób na liczbę metod planowania, analizy i oceny ryzyka na niekorzyść sfery produkcyjnej, w której planowanie i ocena ryzyka jest niedoceniana i bardzo słabo rozwinięta. Dostępnych jest wiele pozycji w literaturze z zakresu zarządzania, analizy i oceny ryzyka kredytowego, ubezpieczeniowego, handlowego, informatycznego i innych, natomiast zauważalny jest brak opracowań literaturowych dla przedsiębiorstw i procesów produkcyjnych.

Rozwiązaniem tych problemów może być przedstawienie systemu produkcyjnego w ujęciu teorii systemów i zastosowanie w ocenie ryzyka ogólnej teorii niezawodności. Aby analiza systemu i ocena ryzyka mogła być przeprowadzona szybko oraz bez ingerencji w realizację i przebieg procesu produkcyjnego, niezbędnym wydaje się budowa modeli symulacyjnych.

2. Definicja, dekompozycja i parametry systemów produkcyjnych

Mianem procesu produkcyjnego określa się „*uporządkowany zbiór działań (operacji, czynności) mających na celu wykonanie produktu (wyrobu lub usługi)*” [7]. Proces produkcyjny przebiega w środowisku systemu produkcyjnego, czyli przedsiębiorstwa. System produkcyjny to „*układ wzajemnie powiązanych ze sobą zasobów materialnych, energetycznych, kadrowych, kapitałowych i informacyjnych. Jest on celowo zaprojektowany i zorganizowany tak, by zaspokajać potrzeby klientów*” [7]. System produkcyjny nie może istnieć bez otoczenia, z którego pochodzą zasoby i w którym generowane są zyski niezbędne do dalszego funkcjonowania. Otoczenie to zmienia się i oddziałuje na system produkcyjny, i odwrotnie.

Proponowane w literaturze modele systemów są różnie definiowane przez poszczególnych autorów jednak najczęściej w modelu systemu występują następujące składowe:

- wejścia [WE] które w systemie produkcyjnym stanowią wszystkie czynniki produkcji,
- wyjścia [WY] które stanowią wszystkie elementy wychodzące z systemu,
- przebiegający w nim proces transformacji [T], w wyniku którego następuje przekształcenie, elementów wejścia w elementy wyjścia, czyli w wyroby.
- funkcja (cel) albo zadanie stanowiące podstawę jego istnienia,
- otoczenie mające istotny wpływ na system,
- zasilanie, czyli sprzężenia materialne, energetyczne i informacyjne,
- zakłócenia które działają na każdy element systemu. Są one najczęściej nieznanymi wejściami do systemu o nieznanych wartościach [10]. Z uwagi na ich nieprzewidywalny charakter mają charakter losowy. Wielkość wpływu zakłóceń na stopień „spełnienia wymagań” postawionych systemowi będzie oznaczało stopień zawodności systemu.
- proces zarządzania systemem.

Jednym z podstawowych problemów w analizie systemów produkcyjnych jest ich odpowiednia dekompozycja na elementy składowe. Sposób dekompozycji powinien zależeć od celu stawianego analizie systemu produkcyjnego. W tym celu można się posłużyć strukturą produkcyjną z uwagi na jej uniwersalny charakter, możliwość adaptacji jej do różnorodnych dekompozycji procesu oraz całościowe ujęcie procesu produkcyjnego.

Na specyfikę procesu produkcyjnego, oprócz wymienionych elementów, wpływ mają poszczególne parametry. W lite-

conferences in this scope are noticeable. This situation directly translates into the number of available methods of planning, analysing, and evaluating the risk to disadvantage of the production sphere, where risk planning and evaluation methods are underestimated and very poorly developed. There are many available items in the literature concerning management, analyses and evaluation of the credit, insurance, trade, and IT risk, while the lack of literature items for production companies and processes is noticeable.

Presenting the production system in terms of the systems theory and applying the general reliability theory in risk evaluation may provide a solution to these problems. In order to perform a system analysis and risk evaluation in a quick manner and without interfering in the execution and course of a production process, it seems necessary to build simulation models.

2. Definition, decomposition and parameters of production systems

Production process is defined as “*an ordered set of actions (operations, activities) that aim at making products (goods or a service)*” [7]. A production process runs in the environment of a production system, i.e. an enterprise. A production system can be defined as “*a system of interconnected material, power, personnel, capital and information resources, which is intentionally designed and organized to satisfy customer needs*” [7]. A production system cannot exist without its environment, from which it draws resources and in which profits necessary for further operation are generated. This environment is changing and affects the production system, and *vice versa*.

The system models proposed in the literature are defined differently by individual authors, however, a system model consists generally of the following components:

- inputs [IN], which include all production factors in a production system,
- outputs [OUT], which include all elements leaving the system,
- the process of transformation [T] occurring in the system, in a result of which input elements are transformed into output elements, i.e. products.
- function (purpose) or the task providing a basis for its existence,
- the environment, which substantially affect the system,
- supply, i.e. material, power and information couplings,
- disturbances affecting each element of the system. Generally they are unknown inputs to the system with unknown values [10]. Considering their unforeseeable nature, they have a random character. The extent to which disturbances affect the degree of fulfilment of the requirements for the system will mean the system unreliability level.
- system management process.

One of the basic problems in the analysis of production systems is their adequate decomposition into components. A manner of decomposition should depend on the goal of an analysis of a production system. For that purpose, a production structure can be used, because of its universal nature, the possibility of adapting it to various process decompositions, and comprehensive depiction of the production process.

Production process specificity is affected, apart from the aforementioned elements, also by individual parameters. There are many different measures available in the literature, which

raturze istnieje szereg różnych miar służących do oceny funkcjonowania systemów produkcyjnych. Jednak obecnie, niemal powszechnie, w krajach wysoko rozwiniętych przemysłowo za jedno z podstawowych kryteriów oceny funkcjonowania systemów produkcyjnych uważa się produktywność [7]. Produktywność systemu produkcyjnego określa stosunek wektorów wyjścia do wektorów wejścia, tzn. stosunek wyników działań produkcyjnych do zużytych na ten cel nakładów.

3. Niezawodność i ryzyko jako cecha systemu produkcyjnego

Zagadnienia niezawodności to tradycyjnie problemy związane z funkcjonowaniem obiektów technicznych i termin ten bardzo rzadko odnosi się do systemów gospodarczych lub ekonomicznych. Natomiast w literaturze ekonomicznej występuje szerokie zainteresowanie ryzykiem. Ponieważ w myśl teorii systemów system może odnosić się zarówno do obiektów technicznych jak i ekonomicznych lub gospodarczych, to wydaje się zasadnym przeniesienie na grunt ekonomii ogólnej teorii niezawodności oraz zastosowanie jej w planowaniu i ocenie ryzyka.

Jedną z definicji niezawodności obiektów [1, 11 13, 14, 15] definiuje niezawodność jako „*zdolność obiektu do utrzymania się w stanie umożliwiający wypełnienie wymaganych funkcji w danych warunkach i w danym przedziale czasu, przy założeniu, że są dostarczone wymagane środki zewnętrzne*”. Jednak teoria niezawodności rozpatruje stany 0/1, to jest działania czy też braku działania. Takie podejście odnosi się do obiektów technicznych, jednak nie nadaje się do opisu obiektów biotechnicznych czy też systemów eksploatacyjnych, a więc i systemów produkcyjnych. Fakty te doprowadziły do powstania tzw. „ogólnej teorii niezawodności”.

Ogólna teoria niezawodności inaczej jak teoria klasyczna definiuje niezawodność obiektu. „Obiektem niezawodnym jest taki obiekt, który działa zgodnie z intencjami użytkownika, natomiast obiektem zawodnym dla użytkownika jest każdy obiekt, który funkcjonuje (działa) niezgodnie z intencjami użytkownika” [11]. Specyfika dzisiejszych systemów produkcyjnych, a w szczególności ich złożoność, pozwala je traktować jako systemy eksploatacyjne i wówczas niezawodność jest jedną z ich cech mierzonych poprzez stopień realizacji wyznaczonych wskaźników, parametrów i charakterystyk. Wobec powyższego niezawodność systemów produkcyjnych można wyznaczać w bardzo elastyczny sposób, przyjmując, w zależności od potrzeb analizy, za „działanie zgodne z intencjami użytkownika” wielkość dowolnego wskaźnika, którym proces według „użytkownika” powinien się charakteryzować. Do najczęściej analizowanych wskaźników procesu produkcyjnego należą [7]: czas trwania procesu (t), wydajność (W), produktywność (P).

Przeniesienie ogólnej teorii niezawodności na grunt systemów produkcyjnych może się odbyć poprzez potraktowanie zawodności (Z) - przeciwieństwa niezawodności - jako synonimu ryzyka (R) [1]:

$$R = Z \quad (1)$$

Tak zinterpretowane ryzyko (zawodność) systemu (np. produkcyjnego) będzie prawdopodobieństwem tego, że system nie będzie spełniał funkcji, dla których został zaprojektowany lub będzie oznaczać prawdopodobieństwo wystąpienia strat w tym systemie. Dla takiej interpretacji powinno być prawdziwe równanie:

$$N + Z = 1 \quad (2)$$

can be used for evaluating the functioning of production systems. However, at present, in highly developed countries, productivity is almost generally considered to be one of the basic criteria for evaluating the functioning of production systems [7]. Productivity of a production system is determined as the ratio of output vectors to input vectors, i.e. the ratio of the results of production activities to the outlays incurred for that purpose.

3. Reliability and risk as features of a production system

The questions of reliability traditionally concern problems connected with functioning of technical objects, and this term is very rarely used in relation to economic systems. On the other hand, in the economics literature, there is a considerable interest in the subject of risk. Since, according to the systems theory, the term “system” can refer both to technical and economic objects, it seems to be justified to transpose the general reliability theory to the sphere of economics and its use in risk planning and evaluation.

One of the definitions of object reliability [1, 11 13, 14, 15] defines the reliability as “*the ability of an object to remain in a state, which enables performing required functions under given conditions and within a specified time interval, under the assumption that the required external resources are supplied*”. However, the reliability theory considers 0/1 states, i.e. operation or non-operation. This approach relates to technical objects, but is not suitable for describing bio-technical objects or operation systems, and thus also production systems. These facts gave rise to so called “general reliability theory”.

The general reliability theory defines reliability of an object differently from the classical theory. “A reliable object is an object, which functions in accordance with user’s intentions, while an unreliable object is each object, which functions inconsistently with user’s intentions” [11]. Specificity of today’s production systems and, in particular, their complexity, allows treating them as operation systems, and then the reliability is one of their features measured by the extent of realization of determined indicators, parameters and characteristics. In the face of the above, reliability of production systems can be determined in a very flexible way, assuming that a value of any indicator characterizing the process according to the user constitutes “functioning consistent with user’s intentions”, depending on the needs of an analysis. The most frequently analysed indicators of a production process include [7]: duration (t), efficiency (W) and productivity (P).

Transposition of the general reliability theory to the sphere of production systems can take place by treating unreliability (Z) – the opposite of reliability – as a synonym of risk (R) [1]:

$$R = Z \quad (1)$$

So interpreted risk (unreliability) of a system (e.g. production system) will constitute the probability that the system will not perform the functions, for which it has been designed, or the probability of losses occurring in the system. For this interpretation, the following equation should be true:

$$N + Z = 1 \quad (2)$$

Równanie to oznacza, że prawdopodobieństwo tego, że system jest w stanie niezawodności lub zawodności wynosi 1. Wobec powyższego prawdziwe jest również:

$$N + R = 1 \text{ a stąd} \quad (3)$$

$$R = 1 - N \quad (4)$$

Analiza i ocena ryzyka pozwoli więc na określenie niezawodności funkcjonowania systemu i odwrotnie. Podejście niezawodnościowe w planowaniu i ocenie ryzyka, pomimo że daje więcej możliwości, to nie lokalizuje czynników ryzyka w systemie. Rozwiązaniem tego może być analiza struktury systemu produkcyjnego w kontekście jego struktury niezawodnościowej.

4. Struktura niezawodnościowa systemów

Na zawodność (ryzyko) lub na niezawodność systemu wpływa również jego struktura, określająca związek stanu niezawodności systemu ze stanem niezawodności jego obiektów [1]. Analiza struktury niezawodnościowej systemu powinna być poprzedzona podziałem systemu na poszczególne części składowe – dekompozycją systemu, odzwierciedlającą powiązania logiczne w systemie tak, aby poszczególne jego części były niezależne statystycznie i możliwie jak największe. W niniejszym artykule zostanie zaprezentowana jedynie częściowo struktura równoległa z nadmiarami i tzw. produkcyjna struktura równoległa. Struktury szeregowe zostały opisane m.in. w pracach [3, 4].

4.1. Struktura równoległa z nadmiarami

Według teorii klasycznej, niezawodność systemu o strukturze równoległej charakteryzuje się tym, że system jest w stanie zdadności, jeżeli co najmniej jeden z jego obiektów jest w stanie zdadności [1], co oznacza, że do funkcjonowania systemu o strukturze równoległej wystarcza poprawne funkcjonowanie jednego jego elementu. Niezawodność takiego układu wzrasta przy zwiększaniu liczby obiektów równoległe sprzężonych.

W praktyce produkcyjnej występują struktury równoległe, jednak charakter procesu produkcyjnego nie pozwala na taką interpretację struktury niezawodnościowej. Klasyczna teoria niezawodności rozpatruje stany 0/1 urządzeń technicznych. Oznacza to, że system produkcyjny byłby uznany za niezawodny, jeśli choćby jeden element funkcjonowałby poprawnie. W systemach produkcyjnych taka sytuacja występuje jedynie w tzw. systemach z rezerwą, czyli z nadmiarem elementów funkcjonujących w systemie. W rzeczywistości systemy z rezerwą występuje bardzo rzadko, gdyż nadmiar elementów (np. maszyn, pracowników, środków transportu, itd.) oznacza niewykorzystane zasoby, co pociąga za sobą wzrost kosztów. Przykład produkcyjnej struktury równoległej z nadmiarami na poziomie komórki produkcyjnej przedstawia rysunek 2b.

Niezawodność systemu (N_s) przedstawionego na rysunku 2a będzie określana wzorem [14]:

$$N_s = 1 - [(1 - N_1)(1 - N_2)...(1 - N_n)] \quad (5)$$

gdzie N_1, N_2, N_n - niezawodność poszczególnych obiektów/podsystemów systemu.

Ryzyko całkowite systemu o strukturze równoległej z nadmiarami (R_c^{SRN}) można wyznaczyć na podstawie wzorów (4) oraz (5):

$$R_c^{SRN} = R_1 R_2 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (6)$$

This equation means that the probability that the system is in the state of reliability or unreliability is 1. In the face of the above, the following equations are also true:

$$N + R = 1 \text{ a stąd} \quad (3)$$

$$R = 1 - N \quad (4)$$

Analysis and evaluation of risk will allow determining reliability of system functioning and vice versa. Despite the fact that the reliability approach in risk planning and evaluation offers more possibilities, it does not locate the risk factors in the system. Analysing the structure of a production system in the context of its reliability structure may provide a solution to this problem.

4. Reliability structure of systems

The structure of the system, which determines the relation between the state of reliability of the system and the state of reliability of its objects [1], also affects the unreliability or reliability of the system. The analysis of the reliability structure of a system should be preceded by dividing the system into individual components – the system decomposition, which should reflect the logical connections in the system in such a way that its individual parts are statistically independent and possibly the biggest. In this paper, a parallel structure with surpluses and so-called parallel structure of production will be presented only partially. Serial structures have been described, inter alia, in [3, 4].

4.1. Parallel structure with redundancies

According to the classical theory, the definition of the reliability of a system with a parallel structure says that the system is fit for operation, if at least one of its objects is fit for operation [1], which means that correct functioning of one element of the system is sufficient for functioning of the system with parallel structure. Reliability of such an arrangement grows along with an increase in the number of the objects coupled in parallel.

In the production practice, there occur parallel structures, however the nature of a production process does not allow for such interpretation of the reliable structure. The classical theory of reliability considers 0/1 states of technical equipment. This means that a production system would be recognized as reliable, if at least one element functioned correctly. In production systems, such a situation occurs only in so-called redundant systems, i.e. with a surplus of elements functioning in the system. In reality, redundant systems occur very rarely, because surplus of elements (e.g. machines, workers, means of transport, etc.) means unused resources, which results in increased costs. Fig. 2b shows an example of a parallel structure with redundancies at the level of a production cell.

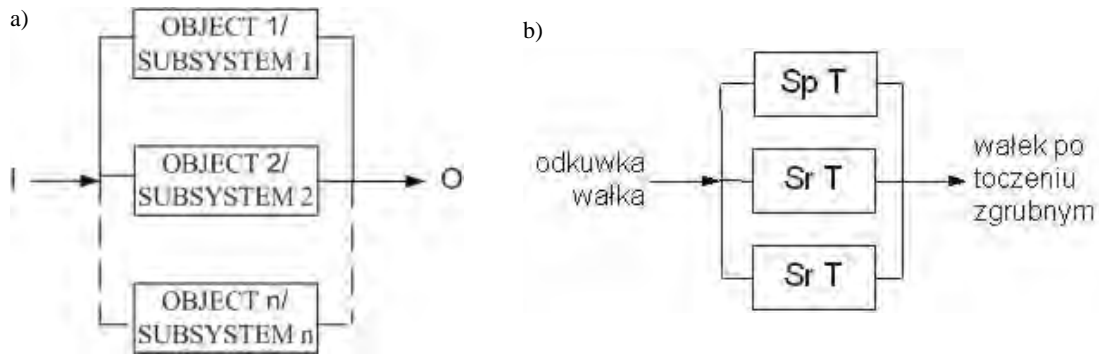
Reliability of the system (N_s) presented in Fig. 2a will be determined by the formula [14]:

$$N_s = 1 - [(1 - N_1)(1 - N_2)...(1 - N_n)] \quad (5)$$

where N_1, N_2, N_n - reliability of individual objects/subsystems of the system.

The total risk of a system with a parallel structure with redundancies (R_c^{SRN}) can be determined with the formulas (4) and (5):

$$R_c^{SRN} = R_1 R_2 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (6)$$



Rys. 2. a) Schemat systemu z n obiektami/ podsystemami połączonymi równolegle; b) Przykład szeregowej struktury niezawodnościowej z nadmiarami systemu produkcyjnego: Sp T – stanowisko pracujące tokarka, Sr T – stanowisko rezerwowe tokarka

Fig. 2. a) Flow chart presenting a system with n objects/subsystems connected in parallel; b) An example of serial reliability structure with redundancies: Sp T – operating workstation - lathe, Sr T – redundant workstation - lathe

gdzie R_1, R_2, R_n - ryzyko występujące w poszczególnych obiektach/ podsystemach systemu.

Poszczególne ryzyka R_i dla systemu o strukturze równoległej z nadmiarami i n obszarach będą wynosić:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret}} \quad (8)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret}} \quad (9)$$

gdzie S_i – oznacza stratę w i -tym obszarze spowodowaną wystąpieniem czynnika ryzyka r_i . W_{teoret} – maksymalna wartość wybranego wskaźnika teoretycznie możliwa do osiągnięcia (np. teoretyczna wydajność maszyny).

Straty S_i w poszczególnych obszarach zależą od strat czasów (Δt_i) spowodowanych wydłużeniem czasu trwania procesu produkcyjnego z uwagi na występujące w tych obszarach czynniki ryzyka. Inaczej mówiąc system produkcyjny zrealizuje postawiony cel, lecz będzie potrzebował na jego realizację więcej czasu. Wówczas straty na celu mierzalnym systemu produkcyjnego będą przedstawiać się następująco:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (10)$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (11)$$

$$S_n = W_{teoret} \frac{\Delta t_n}{T} \quad (12)$$

gdzie T – założony okres reprezentatywny.

Zatem **ryzyko całkowite** R_c^{SRN} dla systemu o n obszarach i strukturze równoległej z nadmiarami będzie wynosić:

$$R_c^{SRN} = \frac{\Delta t_1}{T} \frac{\Delta t_2}{T} \dots \frac{\Delta t_n}{T} \quad (13)$$

Ponieważ, jak wspomniano wcześniej, systemy produkcyjne z rezerwą w praktyce produkcyjnej występują niezmiernie rzadko, to w niniejszej pracy proponuje się inny sposób inter-

where R_1, R_2, R_n - the risk occurring in individual objects/subsystems of the system.

Individual risks R_i for a system with a parallel structure with redundancies and n areas will be:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret}} \quad (8)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret}} \quad (9)$$

where S_i – means a loss at the area i caused by occurrence of the risk factor r_i , W_{teoret} – maximum value a selected indicator, which can be attained in theory (for example, theoretical capacity of a machine).

Losses S_i in individual areas depend on time losses (Δt_i) caused by extension of the duration of the production process resulting from the risk factors occurring in these areas. In other words, a production system will realize the defined goal, but it will need more time to realize it. Then, the losses on a measurable goal of a production system will be as follows:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (10)$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (11)$$

$$S_n = W_{teoret} \frac{\Delta t_n}{T} \quad (12)$$

where T – assumed representative period,

So, the **total risk** R_c^{SRN} for a system with n areas and a parallel structure with redundancies will be:

$$R_c^{SRN} = \frac{\Delta t_1}{T} \frac{\Delta t_2}{T} \dots \frac{\Delta t_n}{T} \quad (13)$$

Because, as it was mentioned earlier, production systems with redundancy occur in the production practice very rarely, a different way of interpreting and determining the risk for so-

pretacji i określania ryzyka dla tzw. **produkcyjnych struktur równoległych**.

4.2. Produkcyjna struktura równoległa

Dla struktury n -elementowej systemu produkcyjnego przedstawionego na rysunku 2a, ryzyko zawodności jednego elementu R_i powinno zwiększyć ryzyko całkowite R_C^{PSR} układu o wartość R_i . Zatem ryzyko całkowite powinno być sumą ryzyk poszczególnych elementów układu:

$$R_C^{PSR} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{j=1}^n R_j \quad (14)$$

gdzie R_1, R_2, R_n - ryzyko występujące w poszczególnych obiektach/ podsystemach systemu. Jeżeli $\sum R_i > 1$ to wówczas $R_1 = R_1 / R_C^{PSR}, R_2 = R_2 / R_C^{PSR}, R_n = R_n / R_C^{PSR}$.

Przyjmując te same oznaczenia, co wcześniej, poszczególne ryzyka R_i dla n obszarów, w zależności od wielkości strat S_i poniesionych w tych obszarach, będą wynosić:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret}} \quad (16)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret}} \quad (17)$$

W przypadku, gdy wyróżnione obszary różnią się między sobą, istnieje konieczność, przy tego typu strukturze, wyznaczenia maksymalnej wartości wskaźnika możliwego do uzyskania w analizowanym systemie technicznym - W_{teoret} dla każdego z obszarów. Wyznaczając wartości W_{teoret} dla każdego z wyróżnionych n obszarów, poszczególne straty S_i w tych obszarach, zależnie od strat czasów powodowanych występowaniem czynnikami ryzyka w poszczególnych obszarach, będą wynosić:

$$S_1 = W_{teoret}^1 \frac{\Delta t_1}{T} \quad (18)$$

$$S_2 = W_{teoret}^2 \frac{\Delta t_2}{T} \quad (19)$$

$$S_n = W_{teoret}^n \frac{\Delta t_n}{T} \quad (20)$$

gdzie: W_{teoret} - oznacza wartość teoretyczną wskaźnika w poszczególnych obszarach zdekomponowanego systemu.

Zatem **ryzyko całkowite** R_C^{PSR} dla systemu o n obszarach i produkcyjnej strukturze równoległej będzie wynosić:

$$R_C^{PSR} = \frac{W_{teoret}^1 \Delta t_1 + W_{teoret}^2 \Delta t_2 + \dots + W_{teoret}^n \Delta t_n}{W_{teoret} T} \quad (21)$$

W przypadku, gdy wyróżnione obszary systemu są takie same i charakteryzują się tą samą wartością W_{teoret} , czyli:

$$W_{teoret}^1 = W_{teoret}^2 = \dots = W_{teoret}^n = \frac{W_{teoret}}{n} \quad (22)$$

wówczas wzór na ryzyko całkowite takiego układu przyjmie postać:

called **parallel structures of production** was proposed in this study.

4.2. Parallel structure of production

For the n -element structure of the production system shown in Fig. 2a, the risk of unreliability of one element R_i should increase the total risk R_C^{PSR} of the system by the value R_i . So, the total risk should be the sum of risks of individual system elements:

$$R_C^{PSR} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{j=1}^n R_j \quad (14)$$

where R_1, R_2, R_n - the risk occurring in individual objects/subsystems of the system. If $\sum R_i > 1$, then $R_1 = R_1 / R_C^{PSR}, R_2 = R_2 / R_C^{PSR}, R_n = R_n / R_C^{PSR}$.

Using the same designations as before, individual risks R_i for n areas, depending on the amount of losses S_i incurred in these areas, will be as follows:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret}} \quad (16)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret}} \quad (17)$$

If the areas differ from each other, it is necessary, in case of such a type of structure, to determine the maximum value of the indicator attainable in the analysed technical system - W_{teoret} for each area. When determining the values of W_{teoret} for each of the n examined areas, individual losses S_i in these areas, depending on the time losses caused by occurrence of risk factors in individual areas, will be as follows:

$$S_1 = W_{teoret}^1 \frac{\Delta t_1}{T} \quad (18)$$

$$S_2 = W_{teoret}^2 \frac{\Delta t_2}{T} \quad (19)$$

$$S_n = W_{teoret}^n \frac{\Delta t_n}{T} \quad (20)$$

where: W_{teoret} - means theoretical value of an indicator in individual areas of the decomposed system.

So, the total risk R_C^{PSR} for a system with n areas and parallel structure of production will be as follows:

$$R_C^{PSR} = \frac{W_{teoret}^1 \Delta t_1 + W_{teoret}^2 \Delta t_2 + \dots + W_{teoret}^n \Delta t_n}{W_{teoret} T} \quad (21)$$

If examined areas of the system are identical and are characterized by the same value of W_{teoret} , that is:

$$W_{teoret}^1 = W_{teoret}^2 = \dots = W_{teoret}^n = \frac{W_{teoret}}{n} \quad (22)$$

then the formula for the total risk of such a system will take the following form:

$$R_C^{PSR} = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (23)$$

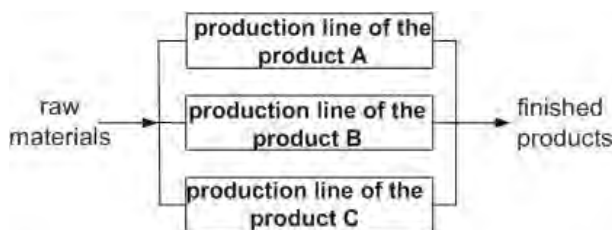
Przykładem produkcyjnej struktury równoległej może być struktura systemu produkcyjnego przedstawiona na rysunku 3.

Wzór na ryzyko dla systemu z rysunku 3, zgodnie ze wzorem (14) będzie następujący:

$$R_C^{PSR} = R_{lpwA} + R_{lpwB} + R_{lpwC} = \sum_1^3 R_{lpwi} \quad (24)$$

gdzie $lpwA$, $lpwB$, $lpwC$ - poszczególne linie produkcyjne wyrobu.

W niniejszym artykule zostanie zaprezentowany przykład wyznaczenia wielkości ryzyka dla produkcyjnej struktury równoległej. Przykłady wyznaczania ryzyka dla struktur szeregowych można spotkać m.in. w pracach [3, 4].



Rys. 3. Przykład produkcyjnej struktury równoległej

Fig. 3. An example of the parallel structure of production

$$R_C^{PSR} = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (23)$$

An example of the parallel structure of production can be the structure of the production system presented in Fig. 3.

In accordance with the formula (14), the formula for the risk of the system from Fig. 3, will be as follows:

$$R_C^{PSR} = R_{lpwA} + R_{lpwB} + R_{lpwC} = \sum_1^3 R_{lpwi} \quad (24)$$

where $lpwA$, $lpwB$, $lpwC$ - individual production lines of a product.

An example of determining the value of risk for a parallel structure of production will be presented in this paper. Examples of determining the risk for a serial structure can be found, inter alia, in [3, 4].

5. Przykład wyznaczenia wielkości ryzyka dla systemu produkcyjnego o produkcyjnej strukturze równoległej

Za przykład do wyznaczenia wielkości ryzyka dla produkcyjnej struktury równoległej, posłużył trzeci etap projektu zrealizowanego we wrocławskim oddziale międzynarodowego koncernu. Oddział ten jest trzecim co do wielkości w koncernie i zajmuje się produkcją lokomotyw elektrycznych, wagonów towarowych, wagonów pasażerskich, pociągów regionalnych, tramwajów i wagonów metra.

5.1. Warunki realizacji projektu

Z uwagi na dużą ilość zadań wyznaczonych do realizacji całość projektu, podzielono na trzy części. Wyniki części wcześniejszych stanowiły dane wejściowe do części następnych.

Głównym celem projektu była weryfikacja założonych zdolności produkcyjnych. Potrzeba przeprowadzenia weryfikacji spowodowana była zmianą programu i profilu produkcji w związku z programem restrukturyzacji i dostosowania zakładu do wymogów koncernu. Program restrukturyzacji zakładał zwiększenie zdolności produkcyjnych z 400 do 1700 sztuk ram rocznie. Dodatkowo zaplanowano uruchomienie produkcji 7-miu nowych produktów. W sumie produkowanych miało być 11 wyrobów na 10-ciu liniach produkcyjnych. Specyfika produkcji, związana z czasochłonnością przebrojeń, wymagała określenia możliwości zamienności oprzyrządowania dla dodatkowego wyrobu.

Rysunek 4 przedstawia sposób realizacji poszczególnych części projektu, oraz zadania wyznaczone do realizacji w poszczególnych jego częściach.

Z uwagi na potrzebę kompleksowej analizy problemu oraz jego złożoność, w realizacji projektu niezbędne było zastosowanie informatycznych narzędzi do symulacji systemów produkcyjnych. Różna specyfika części projektu oraz mnogość analizowanych w nich zagadnień spowodowały, że do realizacji części 1 i 2 wykorzystano pakiet symulacyjny ProModel 2002, a w części 3 pakiet iGrafx 2003 for Six Sigma.

5. Example of determining the value of risk for a production system with a parallel structure of production

The third stage of the project carried out in the Wrocław division of an international corporation served as an example of determining the value of risk for a parallel structure of production. This Division is the third largest division within the corporation and it deals with production of electric locomotives, freight cars and subway cars.

5.1. Conditions of project implementation

Considering a large number of tasks assigned for realization, the whole project has been divided into three parts. The results of the previous parts were used as input data for next parts.

The main goal of the project was verification of the assumed production capacities. The need for performing the verification was caused by a change in the production program and profile in connection with a program restructuring and adapting the factory to the requirements of the corporation. The restructuring program assumed an increase in the production capacities from 400 to 1700 pcs of frames a year. Additionally, it was planned to launch production of 7 new products. In total, 11 products were to be manufactured on 10 production lines. Specificity of the production, connected with time-consuming changeovers, required determining the replaceability of tooling for an additional product.

Considering the need of a comprehensive analysis of the problem and its complexity, it was necessary during implementation of the project to use IT tools for simulating the production systems. Different character of project parts and a multitude of problems analysed within these parts caused that ProModel 2002 simulation package was used for implementation of Parts 1 and 2, while for Part 3 - the iGrafx 2003 for Six Sigma package.

Produkcja poszczególnych typów ram odbywa się na wydzielonych liniach produkcyjnych (nawach). W trakcie procesu wyroby lub ich elementy składowe kilkakrotnie wywożone są na zewnątrz hali na operacje zewnętrzne lub do kooperacji. Transport elementów wewnątrz naw odbywa się za pomocą suwnic, a poza nimi za pomocą wózków.

W wejścia do systemu produkcyjnego stanowią m.in. zamówienia klienta, blachy i komponenty dostarczane od dostawców blach i kooperantów, wyjściami są natomiast wyroby gotowe, poddawane kontroli jakości.

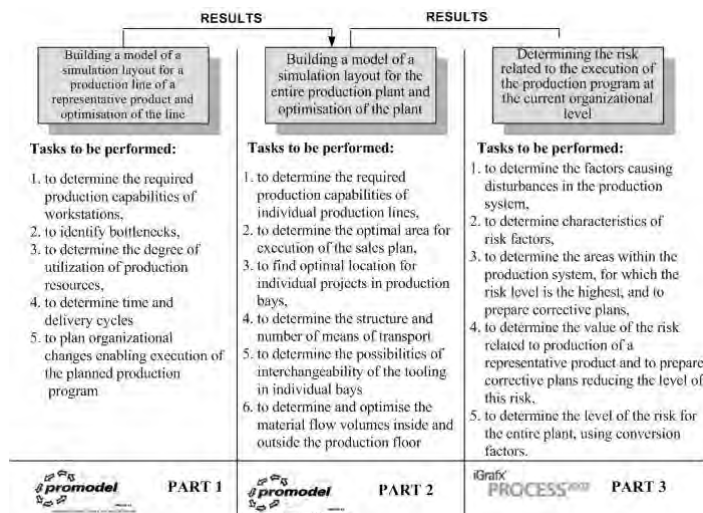
Dużym utrudnieniem była konieczność analizy procesów produkcyjnych 11 różnych wyrobów. W przypadku 7 wyrobów planowanych do uruchomienia, w momencie rozpoczęcia realizacji projektu nie była ich znana technologia. Ponieważ jednak, zarówno technologia, jak i organizacja wszystkich procesów produkcyjnych w zakładzie jest podobna, postanowiono przeprowadzić analizę dla wyrobu reprezentatywnego, a w przypadku pozostałych wyrobów zastosować tzw. współczynniki przeliczeniowe. Współczynniki te określają podobieństwo konstrukcyjno-technologiczne w stosunku do projektu znanego i uważanego za reprezentatywny. Tabela 1 przedstawia założenia planu sprzedaży na 2005 rok, potrzebne wydajności do jego realizacji oraz przyjęte współczynniki przeliczeniowe [5].

Ponieważ wszystkie procesy produkcyjne przedsiębiorstwa przebiegają w sposób analogiczny w stosunku do wyrobu reprezentatywnego, przyjęto, że w pozostałych procesach występują te same czynniki ryzyka.

5.2. Sposób wyznaczenia wielkości ryzyka dla systemu produkcyjnego o produkcyjnej strukturze równoległej

Na podstawie wyników symulacji części 2 projektu oraz przyjętych kryteriów optymalizacyjnych, ustalono najkorzystniejsze przypisanie projektów do naw produkcyjnych, pokazane na rysunku 5a). W związku z przyjętym poziomem analizy oraz w celu wyznaczenia wyrobu o największym ryzyku, dekompozycja systemu produkcyjnego całego zakładu powinna zostać przeprowadzona na poszczególne linie produkcyjne. Do funkcjonowania systemu produkcyjnego całego zakładu nie jest konieczne funkcjonowanie wszystkich jego obszarów. Nie można jednak poprawnego funkcjonowania jednego obszaru uznać za poprawne funkcjonowanie całego systemu. Ryzyko zawodności jednego z obszarów powinno przekładać się na wzrost ryzyka zawodności całego systemu, dokładnie o wartość ryzyka w tym obszarze. Dlatego ustalono, że struktura niezawodnościowa całego zakładu będzie **produkcyjną strukturą równoległą** i przedstawiono ją na rysunku 5b).

W związku z tym, że ustalając cel dla systemu produkcyjnego, należy brać pod uwagę nie ilości wynikające z planu



Rys. 4. Części projektu oraz zadania wyznaczone do realizacji

Fig. 4. Parts of the project and tasks assigned for execution

Production of individual types of frames takes place in separated production lines (bays). In the course of the process, products or their components are several times taken away from the production building for external operations or to cooperating partners. Transport of elements inside the bays takes place with the use of overhead cranes and industrial trucks.

Inputs to the production system include, among other things, customer's orders, metal sheets, and components delivered by suppliers of metal sheets and cooperating partners,

whereas inputs include finished products submitted to quality control.

The necessity of analysing production processes of 11 different products was a considerable difficulty. In case of 7 new products planned for production, the technology of their production was not known at the beginning of project implementation. However, as both the production technology and organization of all production processes in the plant are similar, it was decided to perform the analysis for a representative product and to apply so called conversion factors in relation to other products. These factors determine the constructional and technological similarity in relation to the design, which is known and is deemed to be representative. Table 1 presents assumptions for the sales plan for 2005, production capacities necessary for its execution, and accepted conversion factors [5].

As all production processes in the company are similar to the process of the representative product, it has been assumed that the same risk factors occur also in other processes.

5.2. A method of determining the value of risk for a production system with a parallel structure of production

Basing on the results obtained from the simulation of Part 2 of the project and the accepted optimisation criteria, the most favourable assignment of projects to production bays was determined (shown in Fig. 5a). In connection with the accepted level of the analysis, and for the purpose of determining the product with the highest risk, the production system of the entire plant should be decomposed into individual production lines. For functioning of the production system in the whole plant, functioning of all its areas is not a necessary condition. However, correct functioning of one area cannot be regarded as correct functioning of the whole system. The risk of unreliability of one area should translate into an increase in the risk of unreliability of the whole system, exactly by the value of the risk in this area. Therefore, it has been established that the reliability structure of the whole plant will be a **parallel structure of production** (presented in Fig. 5b).

So, when setting a goal for a production system, there should be considered the theoretically attainable production capa-

Tab. 1. Założony plan sprzedaży oraz przyjęta technologia [5]
 Tab. 1. The established sales plan and accepted production technology [5]

Lp. Item	Nazwy projektów Project name	Ilości Quantity	Wydajność [szt./tydz.] Production capacity [pcs/week]	Współczynniki przeliczeniowe Conversion factors
Ramy lokomotywowe / Locomotive frames		300		
1	Projekt BR 185	100	2,6	1,7 x wyrób reprezentatywny 1.7 x representative product
2	Projekt Blue Tiger	50	1,3	1,9 x wyrób reprezentatywny 1.9 x representative product
3	Projekt ICE	150	3,8	1,6 x wyrób reprezentatywny 1.6 x representative product
Ramy regionalne / Frames - regional		900		
1	Projekt MD 523	400	10	wyrób reprezentatywny the representative product
2	Projekt Goerlitz	300	7,6	1,4 x wyrób reprezentatywny 1.4 x representative product
3	Projekt BR 481	200	5,1	1,2 x wyrób reprezentatywny 1.2 x representative product
Ramy tramwajowe / Tram frames		300		
1	Projekt Cityrunner	100	2,6	1,1 x wyrób reprezentatywny 1.1 x representative product
2	Tramwaj 1	100	2,6	1,1 x wyrób reprezentatywny 1.1 x representative product
3	Tramwaj 2	100	2,6	1,1 x wyrób reprezentatywny 1.1 x representative product
Mml komponenty belki + czopy Mml components: beams + pivots		200		
1	Planowany 1	100	10	0,4 x wyrób reprezentatywny 0.4 x representative product
2	Planowany 2	100	10	0,4 x wyrób reprezentatywny 0.4 x representative product
		Σ 1700		

sprzedaży lecz wartości wydajności teoretycznie możliwe do osiągnięcia. Dla systemów produkcyjnych wartość teoretyczna ograniczona jest jedynie możliwościami technologicznymi [6,16]. Dlatego, biorąc pod uwagę jedynie czasy technologiczne i transportu, przy założeniu pełnej niezawodności systemu, dostępności zasobów i 100% obciążenia linii produkcyjnych, za cel (W_{teoret}) przyjęto teoretycznie możliwą do osiągnięcia wydajność dla poszczególnych linii i przedstawiono ją w tabeli 2.

W celu wyznaczenia wielkości, częstotliwości pojawiania się oraz podstawowych charakterystyk poszczególnych czynników ryzyka w okresie trzech miesięcy (styczeń – marzec) przeprowadzono bezpośrednią obserwację i pomiar czasów technologicznych procesu produkcyjnego. Ponieważ czynniki ryzyka mają charakter losowy, a okres przeprowadzanych obserwacji dostarczył reprezentatywnego zbioru danych, przyjęto ten okres za reprezentatywny dla wyznaczenia charakterystyk czynników ryzyka [10]. Roczny fundusz czasu pracy dla zakładu wynosi 46 tygodni, dla $T=3$ miesiące = 12 tygodni.

Tabela 3 przedstawia dane potrzebne do wyznaczenia ryzyka całkowitego R_C^{PSR} całego zakładu.

Korzystając ze wzorów (18) do (20) wyznaczono wielkości strat w poszczególnych obszarach, będących odpowiednikami wyrobów. Znając wielkości strat na podstawie wzorów (15) do (17) można wyznaczyć ryzyka dla wyróżnionych obszarów. Otrzymane w ten sposób wielkości strat i ryzyka zbiorczo przedstawia tabela 4.

Poziomy ryzyka dla poszczególnych wyrobów przedstawiono na rysunku 6.

city, and not the quantities resulting from the sales plan. For production systems, the theoretical value is limited only by technological capabilities [6,16].

Therefore, taking into account only the times of production and transport, under the assumption that the system is fully reliable, resources are fully available, and the load of production lines is 100%, the theoretically attainable production capacity (W_{teoret}) for individual lines was set as the goal and was presented in table 2.

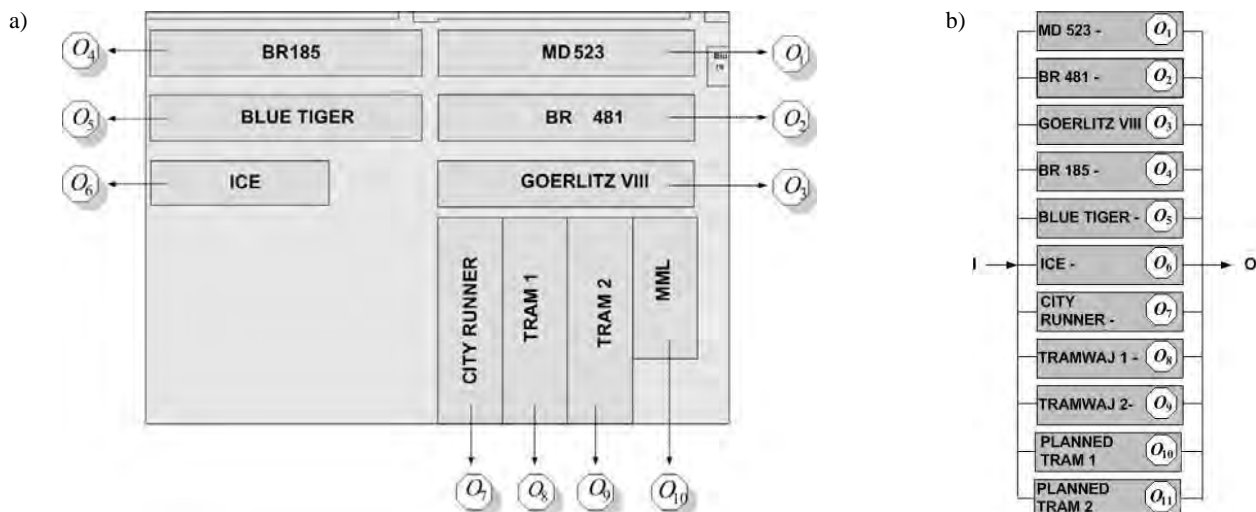
In order to determine the values and basic characteristics of individual risk factors and frequencies of their appearance in the period of three months (January-March), a direct observations and measurements of production times were performed.

Since risk factors are of random nature and the period of observations provided a representative set of data, this period was accepted as representative for determining characteristics of risk factors [10]. The annual pool of working time for the plant is 46 weeks, for $T=3$ months = 12 weeks.

Table 3 presents the data needed for determining the total risk R_C^{PSR} of the whole plant.

Using the formulas (18) to (20), values of losses in individual areas, which are equivalent to products, were determined. Knowing the value of losses from the formulas (15) to (17), the risks for the examined areas can be determined. The values of losses and risks obtained in this way are shown collectively in Table 4.

The levels of risk for individual products are presented in Fig. 6.



Rys. 5a) Oznaczenia przyjęte dla obszarów systemu produkcyjnego całego zakładu, b) przyjęta produkcyjna struktura równoległa dla analizowanego zakładu

Fig. 5a) Designations accepted for areas of the production system of the whole plant, b) parallel structure of production assumed for the analysed plant

Tab. 2. Wydajność teoretyczna dla poszczególnych linii produkcyjnych – wartości celów
Tab. 2. Theoretical capacity for individual production lines – values of goals

NAZWY PROJEKTÓW / PROJECT NAME	W_{teoret} / rok	$W_{teoret} / year$	W_{teoret} / T
Projekt BR 185		133	35
Projekt Blue Tiger		66	17
Projekt ICE		199	52
Projekt MD 523		530	138
Projekt Goerlitz VIII		398	104
Projekt BR 481		265	69
Projekt Cityrunner		133	35
Tramwaj 1		133	35
Tramwaj 2		133	35
Planowany 1		133	35
Planowany 2		133	35
Σ		2253	588

Tab. 3. Dane potrzebne w metodzie
Tab. 3. Data required in the method

NAZWY PROJEKTÓW PROJECT NAME	R_i	Współcz. przelicz. Conversion factor	$W_{teoret} / 12tygodni$ $W_{teoret}^f / 12weeks$	Δt_i , uwzględniająca współczynnik przeliczeniowy i planowane do produkcji liczby sztuk Δt_i , taking into account the conversion factor and the quantity planned for production
Projekt BR 185	R_4	1,7	35	5,17
Projekt Blue Tiger	R_5	1,9	17	2,81
Projekt ICE	R_6	1,6	52	7,23
Projekt MD 523	R_1	1	138	12
Projekt Goerlitz VIII	R_3	1,4	104	12,66
Projekt BR 481	R_2	1,2	69	7,20
Projekt Cityrunner	R_7	1,1	35	3,35
Tramwaj 1	R_8	1,1	35	3,35
Tramwaj 2	R_9	1,1	35	3,35
Planowany 1	R_0	0,4	35	1,22
Planowany 2	R_1	0,4	35	1,22
Σ			588	

Tab. 4. Wielkości strat oraz ryzyka dla poszczególnych wyrobów
 Tab. 4. Values of losses and risks for individual products

Nazwy projektów Project name	Oznaczenia obszarów Area designation	Straty [szt./12 tyg.] Losses [pcs/12 weeks]	Ryzyka Risks
Projekt BR 185	O ₄	10,61	0,018
Projekt Blue Tiger	O ₅	2,92	0,005
Projekt ICE	O ₆	22,35	0,038
Projekt MD 523	O ₁	99,1	0,168
Projekt Goerlitz	O ₃	78,23	0,133
Projekt BR 481	O ₂	29,73	0,051
Projekt Cityrunner	O ₇	6,86	0,012
Tramwaj 1	O ₈	6,86	0,012
Tramwaj 2	O ₉	6,86	0,012
Planowany 1	O ₁₀	2,5	0,004
Planowany 2	O ₁₁	2,5	0,004

Jak wynika z tabeli 4 oraz rysunku 6, największe ryzyko występuje w procesie produkcji wyrobu MD 523 oraz Goerlitz VIII. Spowodowane jest to założoną ilością produkcji tych wyrobów – ich produkcja stanowi 41% zaplanowanej wielkości produkcji. W kontekście całego zakładu ryzyko wyrobu reprezentatywnego zmienia się z 0,73 do 0,14. Spowodowane jest to zmianą wartości celu. Obecnie cel wyrobu reprezentatywnego rozpatrywany jest w kontekście części celu całego zakładu.

Przy obliczaniu ryzyka całkowitego dla całego zakładu R_C^{PSR} należy posłużyć się wzorem (21) lub (23). Wówczas ryzyko całkowite wynosi:

$$R_C^{PSR} = R_1 + R_2 + \dots + R_{11} = \sum_{i=1}^n R_i = 0,46 \quad (25)$$

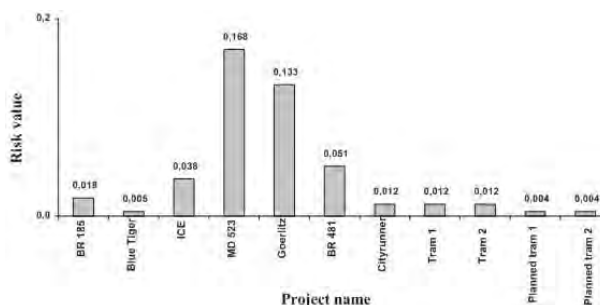
lub

$$R_C^{PSR} = \frac{W_{teorel}^1 \Delta_1 + W_{teorel}^2 \Delta_2 + \dots + W_{teorel}^{11} \Delta_{11}}{W_{teorel} T} = 0,46 \quad (26)$$

Poziom ryzyka zakładu w stosunku do ryzyka wyrobu reprezentatywnego obniżył się. Spowodowane jest to specyfiką struktury niezawodnościowej opisywanej oraz wolnymi mocami produkcyjnymi na niektórych projektach, które powodują niwelację poziomu ryzyka.

Ponieważ procesy produkcyjne poszczególnych wyrobów są analogiczne w stosunku do wyrobu reprezentatywnego, to również poziomy ryzyka poszczególnych obszarów (etapów) systemu produkcyjnego powinny być analogiczne. Rysunek 7 przedstawia ryzyka poszczególnych projektów oraz poziomy ryzyka dla obszarów systemu produkcyjnego.

Wyniki przedstawione na rysunku pokazują, iż tak jak w przypadku wyrobu reprezentatywnego, największe ryzyko występuje w obszarze kontroli jakości, produkcji oraz kooperacji.



Rys. 6. Wielkości ryzyk poszczególnych wyrobów

Fig. 6. Value of risk for individual products

As it appears from Table 4 and Fig. 6, the highest risk occurs in the production process of MD 523 and Goerlitz VIII products. This is caused by the production volume assumed for these products – their production constitutes 41% of the planned production volume. In the context of the whole plant, the risk of the representative product varies from 0.73 to 0.14. This is caused by a change in the value of the goal. At present, the goal for the representative product is considered as a part of the goal for the whole plant.

When calculating the total risk for the whole plant R_C^{PSR} , the formula (21) or (23) should be used. Then the total risk will be:

$$R_C^{PSR} = R_1 + R_2 + \dots + R_{11} = \sum_{i=1}^n R_i = 0,46 \quad (25)$$

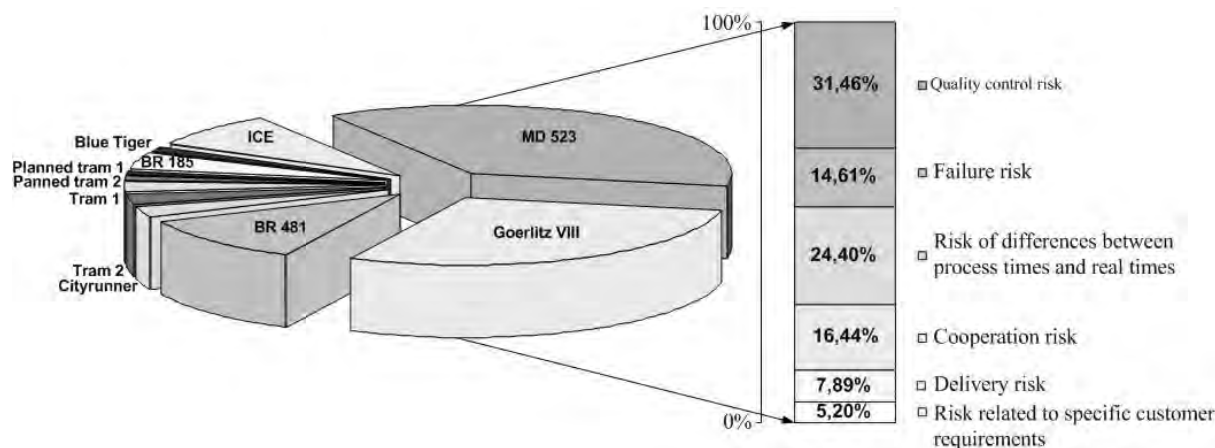
or

$$R_C^{PSR} = \frac{W_{teorel}^1 \Delta_1 + W_{teorel}^2 \Delta_2 + \dots + W_{teorel}^{11} \Delta_{11}}{W_{teorel} T} = 0,46 \quad (26)$$

The level of the risk of the entire plant in relation to the risk of the representative product decreased. This is caused by specificity of the reliability structure and by free production capacities at certain projects, which result in lowering the risk level.

Because production processes of individual products are similar to the process of the representative product, also the risk levels of individual areas (stages) of the production system should be similar. Fig. 7 presents the risks of individual projects and the risk levels for areas of the production system.

The results presented in the diagram show that, as in the case of the representative product, the highest risk occurs in the quality control, production and cooperation areas.



Rys. 7. Procentowy udział ryzyka w rozbiściu na obszary systemu produkcyjnego

Fig. 7. Percentage share of the risk in a breakdown into areas of the production system

6. References

1. Bizon – Górecka J. Inżynieria niezawodności i ryzyka w zarządzaniu przedsiębiorstwem. Bydgoszcz: Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego, 2001.
2. Bubnicki Z. Podstawy informatycznych systemów zarządzania. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1993.
3. Chlebus E, Burduk A. Modelling and variant simulation in risk evaluation of starting-up production programme. Germany: 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, 2005.
4. Chlebus E, Burduk A. Application of modelling and variant simulation in analysis, design and risk estimation of manufacturing system. Advances in manufacturing technology. UK: Second International Conference on Manufacturing Research ICMR2004 incorporating the Twentieth National Conference on Manufacturing Research, 2004.
5. Chlebus E, Burduk A, Kowalski A, Chlebus T. Analiza i optymalizacja parku maszynowego ramy wózka wagonu towarowego typu MD 523 w przedsiębiorstwie Bombardier Transportation (Zakład Wózków Wrocław). Wrocław: Raporty Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, 2004.
6. Cichosz Piotr. Economic aspects of cutting with diamond-coated wire. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2008; 4: 5-14.
7. Durlik I. Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych. Część I. Warszawa: Agencja Wydawnicza Placet, 1995.
8. Erich A. Ryzyko gospodarcze - Encyklopedia organizacji i zarządzania. Warszawa: PWE, 1981.
9. Kiliński A. Ogólna teoria niezawodności. Warszawa: WNT, 1971.
10. Kobylinski L. System and risk approach to ship safety, with special emphasis of stability. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2007; 4: 97-106.
11. Mięgdalski J. i Zespół. Inżynieria Niezawodności. Warszawa: Wydawnictwo ZETOM, 1992.
12. Nahotko S. Ryzyko ekonomiczne w działalności gospodarczej. Bydgoszcz: Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego, 1997.
13. Nowakowski T. Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Monografie nr 28, 1999.
14. PN-1078. Techniki analizy niezawodności. Metoda schematów blokowych niezawodności.
15. PN-80/N-0400. Niezawodność w technice. Terminologia.
16. Rusiński E, Harnatkiewicz P, Bobyr M, Yakhno B. Caterpillar Drive Shaft Damage Causes Analysis, Archives of Civil and Mechanical Engineering 2008; 3: 117-130.
17. Stachowicz F. Estimation of hole-flange ability for deep drawing steel sheets. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2008; 2: 167-172.
18. Wilimowska Z, Wilimowski M. Sztuka zarządzania finansami. Bydgoszcz: Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego Sp. z o.o., 2001.

Dr inż. Anna BURDUK

Prof. dr hab. inż. Edward CHLEBUS

Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji

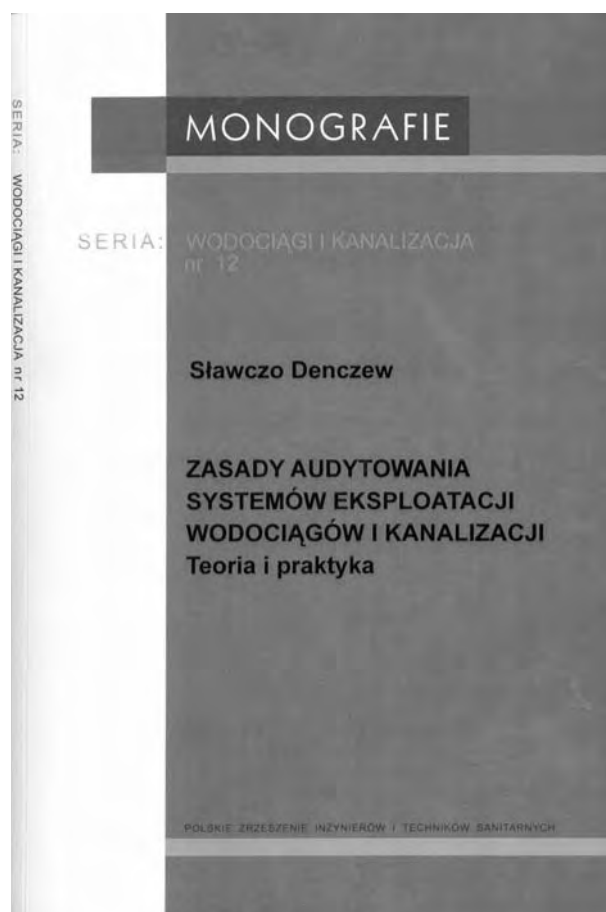
Politechnika Wrocławska

Ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Polska

e-mail: Anna.Burduk@pwr.wroc.pl; Edward.Chlebus@pwr.wroc.pl

AKTUALNOŚCI PNTTE

NOWE WYDAWNICTWA REKOMENDOWANE PRZEZ PNTTE



Praca jest rezultatem wieloletnich doświadczeń i przemyśleń jej Autora i wychodzi naprzeciw oczekiwaniom środowiska technicznego, specjalistów z zakresu wodociągów i kanalizacji, zajmujących się problematyką eksploatacyjną tych systemów. Podsumowuje również dotychczasowe, fragmentaryczne publikacje Autora dotyczące tej problematyki.

Jej treść została zawarta w 10 rozdziałach oraz słowniku wybranych pojęć eksploatacyjnych o łącznej liczbie 82 stron. Całość pracy podzielono na dwie części, z których I omawia podstawy teoretyczne i prawne z zakresu eksploatacji i audytowania systemów eksploatacji wodociągów i kanalizacji, a część II zawiera przykłady możliwości zastosowania koncepcji audytowania systemów wodociągów i kanalizacji w praktyce.

Monografia jest pierwszym w języku polskim, oryginalnym dziełem poświęconym ważnemu zagadnieniu w praktyce eksploatacyjnej, nowoczesnej problematyce audytowania eksploatacji systemów wodociągów i kanalizacji. Powinna stać się ważną pomocą w sprawnej i efektywnej działalności przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych. Praca reprezentuje wysoki poziom merytoryczny, jej treść jest zrozumiała i przystępna, a liczne schematy stanowią dobrą ilustrację tekstu. Skorzystają z niej również studenci kierunku kształcenia inżynieria środowiska, specjalizujących się w problematyce wodociągów i kanalizacji.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Królikowski

INFORMACJE DLA AUTORÓW

Do publikacji w kwartalniku "Eksploatacja i Niezawodność" przyjmowane są oryginalne prace w języku polskim z tłumaczeniem na język angielski. Dwujęzyczny charakter kwartalnika dotyczy głównie recenzowanych artykułów naukowych. Kwalifikowanie prac do druku odbywa się na podstawie zleconych przez Redakcję niezależnych recenzji. Opłata za druk jednego tekstu wynosi 600 złotych + VAT. Elementy graficzne w kolorze wymagają uzgodnienia z Redakcją i płatne są dodatkowo.

Artykuł powinien zawierać:

- nazwiska autorów, tytuł, streszczenie oraz słowa kluczowe stanowiące uzupełnienie tytułu i streszczenia (w języku polskim i angielskim),
- tekst w języku polskim i angielskim z czytelnym podziałem na rozdziały (bez dzielenia wyrazów w tekście); tablice, rysunki, wykresy i fotografie zawarte w tekście powinny posiadać czytelne dwujęzyczne podpisy, w tekście akapitowym należy unikać (o ile jest to możliwe) wstawiania wzorów i symboli za pomocą edytora wzorów (Microsoft Equation),
- spis literatury,
- dane autorów - imiona, nazwiska wraz z tytułami naukowymi, miejsce pracy z dokładnym adresem, numer telefonu, fax i adres e-mail.

UWAGA !

Rysunki oraz fotografie należy dodatkowo dostarczyć w postaci plików graficznych o następujących formatach: *.tif, *.jpg lub *.gif.

Redakcja zastrzega sobie prawo do skracania i adjustacji tekstów.

Materiały do druku należy wysyłać na adres:

Redakcja kwartalnika "Eksploatacja i Niezawodność"
Ul. Nadbystrzycka 36
20-618 Lublin
telefon / fax: (0-prefix-81) 53-84-229
e-mail: office@ein.org.pl

INFORMACJE DLA PRENUMERATORÓW

Opłata za prenumeratę roczną (cztery numery) wynosi 100 złotych i obejmuje również koszty wysyłki. Prenumeratory otrzymują bezpłatnie ewentualne dodatkowe numery specjalne wydawane w okresie trwania prenumeraty.

Zamówienia prenumeraty wraz z upoważnieniem do wystawienia faktury VAT bez podpisu odbiorcy należy kierować do Redakcji na w/w adres.

Żaden tekst ani zdjęcie publikowane na łamach „EiN” nie mogą być reprodukowane bez pisemnej zgody Redakcji.

Wydawca:

**Polskie Naukowo-Techniczne
Towarzystwo Eksploatacyjne
(Warszawa)**



Publisher:

**Polish Maintenance Society
(Warsaw)**

członek:

**Europejskiej Federacji
Narodowych Towarzystw
Eksploatacyjnych**



member of:

**European Federation of National
Maintenance Societies**

patronat naukowy:

**Polska Akademia Nauk
Oddział Lublin**



scientific supervision:

**Polish Academy of Sciences
Branch in Lublin**