



---

# 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**

*Akademia Rolnicza w Lublinie, Lublin*

**Prof. Štefan Liščák**

*Žylinska Universita, Žylina, Słowacja*

**Prof. Vaclav Legat**

*Czech University of Agriculture, Praga, Czechy*

**Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkiś**

*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 bazie danych zawartości polskich czasopism technicznych <http://baztech.icm.edu.pl>  
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: [d.mazurkiewicz@pollub.pl](mailto:d.mazurkiewicz@pollub.pl)

<http://www.darmaz.pollub.pl/ein>

**Nakład:**

550 egzemplarzy

## SPIS TREŚCI - CONTENTS

---

### Nauka i Technika - Science and Technology

Mariusz WAŻNY, Konrad WOJTOWICZ

<b>Analiza systemu eksploatacji wojskowego statku powietrznego w aspekcie jego modernizacji</b> <b>The analysis of the military aircraft maintains system and the modernization proposal</b> .....	<b>4</b>
---	----------

Ireneusz MARKIEWICZ

<b>Analiza połączenia spawanego zaprojektowanego metodami nośności granicznej</b> <b>Analysis of welded joint designed by limit analysis methods</b> .....	<b>12</b>
---	-----------

Jadwiga BĄK, Dorota BĄK-GAJDA

<b>Psychologiczne czynniki bezpieczeństwa ruchu drogowego</b> <b>Psychological factors in road safety</b> .....	<b>22</b>
--	-----------

Barbara SUROWSKA

<b>Materiały funkcjonalne i złożone w transporcie lotniczym</b> <b>Functional and hybrid materials in air transport</b> .....	<b>30</b>
--	-----------

Vladimír JURČA, Tomáš HLADÍK, Zdeněk ALEŠ

<b>Optymalizacja przerw konserwacyjnych</b> <b>Optimization of preventive maintenance intervals</b> .....	<b>41</b>
--	-----------

Krzysztof KUJAN

<b>Badania i analiza powtarzalności rozkładu odchyłek geometrycznych w procesie obróbki skrawaniem</b> <b>Investigations and analysis of repeatability of geometric deviation distribution in the machining process</b> .....	<b>45</b>
--	-----------

Maciej SOBIESZCZAŃSKI, Krzysztof BRZOZOWSKI, Jacek NOWAKOWSKI, Michał TEKIELAK

<b>Wpływ parametrów regulacyjnych silnika ZS na zawartość składników toksycznych i zadymienie spalin</b> <b>The impact of SI engine controlling parameters on the content of toxic components and smokiness of exhaust gases</b> .....	<b>53</b>
---	-----------

Artur DMOWSKI

<b>Praktyczne aspekty zarządzania flotą w przedsiębiorstwie branży spożywczej</b> <b>Practical aspects of fleet management in a food company</b> .....	<b>62</b>
---	-----------

Ryszard MICHALSKI, Michał JANULIN

<b>Dobór parametrów eksploatacyjnych pojazdu z napędem elektrycznym</b> <b>Choice of operational parameters of electric-drive cars</b> .....	<b>69</b>
---	-----------

Tatiana ČOREJOVÁ, Emília IMRIŠKOVÁ

<b>Integracja na rynku usług pocztowych</b> <b>Convergence at the postal market</b> .....	<b>74</b>
--	-----------

Tadeusz CISOWSKI, Józef STOKŁOSA

<b>Transport intermodalny na bliskie i średnie odległości</b> <b>Intermodal transport over short and long distances</b> .....	<b>77</b>
--	-----------

### Aktualności PNTTE - Polish Maintenance Society News

<b>Notki biograficzne członków PNTTE wybranych do Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn przy Polskiej Akademii Nauk</b> .....	<b>83</b>
--	-----------

WAŻNY M., WOJTOWICZ K.: **Analiza systemu eksploatacji wojskowego statku powietrznego w aspekcie jego modernizacji**; EIn nr 3/2008, s. 4-11.

W artykule przedstawiono koncepcję modernizacji procesu obsługiwanego jednego z systemów funkcjonalnych wojskowego statku powietrznego w oparciu o metodę wyznaczania czasookresu przebywania wybranych urządzeń systemu nawigacyjno-celowniczego w systemie użytkowania. Głównym celem prowadzonych rozważań było opracowanie jak najlepszego sposobu wykorzystania potencjału techniczno-bojowego wojskowego statku powietrznego eksploatowanego w Siłach Zbrojnych RP.

MARKIEWICZ I.: **Analiza połączenia spawanego zaprojektowanego metodami nośności granicznej**; EIn nr 3/2008, s. 12-21.

Praca przedstawia wyniki kształtowania metodami nośności granicznej oraz przybliżonych analiz sprężystych MES i numerycznych badań zmęczenia, spawanego połączenia nakładkowego blach, które wykonane w sposób tradycyjny ma wysoki współczynnik koncentracji naprężenia i niską trwałość zmęczeniową. Na podstawie skonstruowanego statycznie dopuszczalnego pola naprężeń i kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia określono kształt połączenia, a przede wszystkim oszacowanie teoretyczne szerokości łączenia blach (szerokości spoiny). Z przeprowadzonych analiz wynika, że optymalna – ze względu na wielkość maksymalnej koncentracji i trwałości zmęczeniowej – szerokość spoiny pokrywa się z otrzymanym wymiarem teoretycznym. Połączenie zaprojektowane metodami nośności granicznej ma ponad dwukrotnie mniejszy współczynnik koncentracji naprężenia w stosunku do tradycyjnego i około 50-krotnie większą trwałość zmęczeniową.

BAK J., BAK-GAJDA D.: **Psychologiczne czynniki bezpieczeństwa ruchu drogowego**; EIn nr 3/2008, s. 22-29.

Artykuł ma na celu zapoznanie czytelnika z zagadnieniami związanymi z określeniem niektórych predyspozycji psychicznych kierowcy istotnych dla bezpiecznego prowadzenia pojazdu. Przedstawiona została także rola psychologicznych badań kierowców w działaniach profilaktycznych na rzecz bezpieczeństwa ruchu drogowego.

SUROWSKA B.: **Materiały funkcjonalne i złożone w transporcie lotniczym**; EIn nr 3/2008, s. 30-40.

Od wielu lat w lotnictwie wykorzystywane są materiały kompozytowe, które przy stosunkowo niewielkim ciężarze cechują się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi. Pozwala to na zbudowanie bardzo wytrzymałej i lekkiej konstrukcji samolotu, a w związku z tym na obniżenie kosztów eksploatacji. Niestety doskonale właściwości mechaniczne kompozytów ulegają znacznemu obniżeniu w momencie pojawienia się uszkodzenia. Dlatego poszukuje się nowych materiałów złożonych o wyższej odporności na pęknięcie oraz sposobów diagnozowania stanu struktury w procesie jej wytwarzania i eksploatacji. Do materiałów nowej generacji należą laminaty metalowo-kompozytowe (FML). Są to laminaty składające się z warstw cienkiej blachy metalowej i kompozytu polimer-włókno ceramiczne lub polimerowe. Laminaty takie charakteryzują się doskonałymi właściwościami równocześnie metalu i włóknistego kompozytu polimerowego. Taka kombinacja daje w rezultacie nową generację materiałów hybrydowych o właściwościach hamowania i blokowania rozwoju pęknięć przy cyklicznym obciążeniu, bardzo dobrej charakteryzacji obciążenia i udarności oraz niskiej gęstości. Inną nową klasą materiałów są materiały inteligentne, o sterowalnych właściwościach, uzyskiwanych przez zastosowanie komponentów ze stopów z pamięcią kształtu lub w budowanie systemów specjalnych, jak układy włókien piezoelektrycznych lub optycznych. Ich coraz większa dostępność i wyjątkowe właściwości fizyczne sprawiają, że mogą one być z powodzeniem integrowane z innymi materiałami w celu uzyskania właściwości nieosiągalnych na żadnej innej drodze. Wbudowane elementy aktywne, tworzące rozproszoną sieć sensorów i/lub aktyuatorów dają możliwość realizacji zadanych zadań monitorowania, adaptacji i sterowania elementem konstrukcyjnym.

JURČA V., HLADÍK T., ALEŠ Z.: **Optymalizacja przerw konserwacyjnych**; EIn nr 3/2008, s. 41-44.

W niniejszej pracy zaproponowano metodologię optymalizacji planowych prac konserwacyjnych opartą na wykorzystaniu danych pozyskanych z systemu informacji eksploatacyjnej - dopasowaniu struktury bazy danych, sposobu jej gromadzenia i przetwarzania. Algorytm przetwarzania danych opiera się na zastosowaniu teorii wymiany i jej modyfikacji dla danego problemu. Centralną zasadą algorytmu jest minimalizacja kosztów utrzymania i użytkowania sprzętu produkcyjnego. Algorytm ten może być używany jako oddzielne narzędzie lub może być integrowany z systemem komputerowego zarządzania eksploatacją i utrzymaniem ruchu jako moduł uzupełniający. Tym samym pozwala on na optymalizację przerw poświęconych różnego zakresu planowym pracom konserwacyjnym większości sprzętu produkcyjnego w przedsiębiorstwie. Przykład praktycznego zastosowania takiego algorytmu przedstawiono w końcowej części pracy.

KUJAN K.: **Badania i analiza powtarzalności rozkładu odchyłek geometrycznych w procesie obróbki skrawaniem**; EIn nr 3/2008, s. 45-52.

W artykule przedstawiono analizę i wyniki badań powtarzalności charakteryz. yk statystycznych procesu obróbki skrawaniem. Omówiono podstawowe modele statystyczne procesów do których można dopasować badany proces. Badania powtarzalności oparto na monitorowaniu parametrów rozkładu odchyłek geometrycznych w cyklach pomiędzy kolejnymi zmianami ostrzy skrawających. Analiza zagadnienia omawia procedurę wyznaczania charakteryz. yk statystycznych badanego procesu oraz powtarzalności podstawowych parametrów rozkładu odchyłek geometrycznych. Jako podstawowe parametry rozkładu odchyłek przyjęto wartość średnią odchyłek wymiaru, odchyłek kształtu oraz odchylenia standardowe odchyłek wymiaru i odchyłek kształtu. Wyniki badań i wyznaczonych statystycznie akceptowalnych granic zmienności badanego procesu przedstawiono na wykresach.

WAŻNY M., WOJTOWICZ K.: **The analysis of the military aircraft maintains system and the modernization proposal**; EIn nr 3/2008, s. 4-11.

The study presents the concept of the maintenance process modernization. The example regards one of the military aircraft functional systems. The concept is based on the method of determining the time concerning the operation of an aiming head in the operation system. The main target in this research was to prepare the most efficient procedure of Polish Air Force military aircrafts maintenance.

MARKIEWICZ I.: **Analysis of welded joint designed by limit analysis methods**; EIn nr 3/2008, s. 12-21.

The paper presents the results of application of the limit analysis methods, approximate elastic analyses FEM and numerical fatigue investigations to overlapping weldments in sheet-metal plates. When made with the use of traditional methods, these weldments exhibit high concentration of stresses and low fatigue life. By constructing statically admissible stress fields and kinematically admissible collapse mechanisms, one can determine the shape of weldment, and estimate theoretically the weld leg length. The analyses performed by the author show that the weld leg length optimal for minimizing stress concentration and maximizing fatigue strength is consistent with that calculated theoretically. The weldment designed with the use of limit analysis methods has, in comparison with a traditional welded joint, a twofold lower stress concentration factor, and over 50 times higher fatigue life.

BAK J., BAK-GAJDA D.: **Psychological factors in road safety**; EIn nr 3/2008, s. 22-29.

The aim of the article is to introduce the reader to the issues defining some of the psychological predispositions of a driver essential to safe driving. The article also presents the role psychological testing of drivers plays in road safety prevention.

SUROWSKA B.: **Functional and hybrid materials in air transport**; EIn nr 3/2008, s. 30-40.

For many years aviation has made use of composite materials, which have very good mechanical properties combined with a relatively low weight. Their use enables construction of very durable and lightweight aircraft structures and reduces maintenance costs. Unfortunately, the excellent mechanical properties of composites decrease significantly when damage occurs. That is why new hybrid materials with higher crack resistance and new methods for structural health diagnosing during manufacture and in service are being looked for. One class of new generation materials are fibre-metal laminates (FML). They are laminates which consist of alternating thin metal layers and layers of polymer/ceramic fiber or polymer/polymer fibre composite. Laminates of this kind share the excellent properties of both metal and fibrous polymer composite. Such a combination yields a new generation of hybrid materials with crack growth retardation and arrest capacities under cyclic loading, very good load-bearing and impact resistance characteristics, and low density. Another new class of materials are smart materials with programmable properties obtained by using shape memory alloys or by embedding special systems such as piezoelectric or optical fibre systems. Their increasing availability and exceptional physical properties enable their successful integration with other materials to give properties unobtainable by any other method. The in-built active elements, which form a distributed network of sensors and/or actuators, enable monitoring, adjustment, and control of structural elements.

JURČA V., HLADÍK T., ALEŠ Z.: **Optimization of preventive maintenance intervals**; EIn nr 3/2008, s. 41-44.

In the paper, the methodology of optimization of planned preventive maintenance is proposed, which is based on the utilization of data obtained from a maintenance information system – adjusting the database structure, collection and processing of data. The data processing algorithm is based on the application of theory of replacement and its modification for the given problem. The core principle of the algorithm is the minimization of costs of maintenance and operation of production equipment. The algorithm can be either used as a separate tool or integrated into the computer maintenance management system as a complementary module. Therefore it enables to optimize the intervals of various levels of planned preventive maintenance of most of the production equipment in a company. A practical example of application of such algorithm is presented in the end of the paper.

KUJAN K.: **Investigations and analysis of repeatability of geometric deviation distribution in the machining process**; EIn nr 3/2008, s. 45-52.

The paper presents an analysis and the results of investigations of the statistical characteristics of repeatability of the machining process. Basic statistical process models, to which the investigated process can be fitted, are discussed. The investigations of repeatability are based on monitoring of the parameters of geometrical deviation distribution in the cycles between the successive changes of cutting tool points. The paper discusses a procedure for determining the statistical characteristics of the process investigated and the repeatability of basic parameters of distribution of geometrical deviations. The mean value of dimension deviations and shape deviations, and standard deviations of dimension and shape deviations were assumed as the basic parameters of deviation distribution. The results of the investigations as well as the statistically determined acceptable variation limits of the process investigated are presented in graphs.

**SOBIESZCZAŃSKI M., BRZOZOWSKI K., NOWAKOWSKI J., TEKIELAK M.: Wpływ parametrów regulacyjnych silnika ZS na zawartość składników toksycznych i zadymienie spalin;** *EiN* nr 3/2008, s. 53-61.

W referacie przedstawiono wyniki badań doświadczalnych doładowanego, cztero-cylindrowego silnika o zaplonie samoczynnym o objętości skokowej 1,7 dm<sup>3</sup> z bezpośrednim wtryskiem paliwa. W badaniach szczególnie nacisk położono na możliwość uwzględnienia sterowania dawką paliwa, kątem wyprzedzenia wtrysku, stopniem recyrkulacji spalin oraz temperaturą i ciśnieniem ładunku w kolektorze dolotowym w celu określenia zawartości składników toksycznych i zadymienia spalin. Wyniki badań przedstawiono w postaci funkcji aproksymacyjnych wielu zmiennych. Zmieniami są wymienione powyżej parametry regulacyjne silnika. Przedstawiono analizę wyników badań i wskazano możliwość zastosowania wyznaczonych funkcji aproksymacyjnych w optymalizacji parametrów regulacyjnych silnika, której celem jest dobranie takich wartości parametrów regulacyjnych, które zapewniają zmniejszenie zawartości tlenków azotu w spalinach przy dopuszczalnej zawartości innych składników toksycznych oraz przy zachowaniu założonych wartości parametrów eksploatacyjnych silnika.

**DMOWSKI A.: Praktyczne aspekty zarządzania flotą w przedsiębiorstwie branży spożywczej;** *EiN* nr 3/2008, s. 62-68.

Prezentowana praca ma na celu charakteryzowanie zarządzania systemem transportu w wybranym przedsiębiorstwie branży spożywczej, jako elementu ogólnej koncepcji – zarządzania logistycznego. Przedstawione aspekty szczegółowe mają za zadanie pokazać w jaki sposób i od czego uzależnione są decyzje transportowe, tak aby stanowiły one pewien element całości w zarządzaniu przedsiębiorstwem. W pierwszej części artykułu opisano aspekty ogólne związane z zarządzaniem transportem w przedsiębiorstwie. Dotyczą one koncepcji obiegu informacji i powiązań strukturalnych w systemie zarządzania. W drugiej części artykułu przedstawiono wybrane aspekty szczegółowe zarządzania transportem osobowym.

**MICHALSKI R., JANULIN M.: Dobór parametrów eksploatacyjnych pojazdu z napędem elektrycznym;** *EiN* nr 3/2008, s. 69-73.

Opracowany w artykule model obliczeniowy doboru parametrów eksploatacyjnych pojazdu samochodowego z napędem elektrycznym pozwala na wyznaczenie jego zasięgu w zależności od: prędkości jazdy, gabarytów pojazdu, jednostkowego zużycia energii [kJ/kg], jednostkowych oporów ruchu, współczynnika obciążenia pojazdu  $f$ , sprawności układu napędowego, realnej energii jednostkowej akumulatorów [kJ/kg]. Na podstawie przeprowadzonych badań eksploatacyjnych wyznaczono współczynnik  $\beta=0,24$ , który dla przyjętych pozostałych parametrów umożliwia wyznaczenie realnego zasięgu.

**ČOREJOVÁ T., IMRIŠKOVÁ E.: Integracja na rynku usług pocztowych;** *EiN* nr 3/2008, s. 74-76.

Artykuł omawia oddziaływanie zmian technologicznych na strategię rynków usług pocztowych. Głównym tematem jest integracja technologii, usług i tworzenia nowych form kooperacji przedsiębiorstw – pionowych i poziomych sojuszy firm. Termin „integracja” (ang. convergence) rozumiany jest w odniesieniu do technologii, zawartości usług, oraz wymiaru ekonomicznego i instytucjonalnego.

**CISOWSKI T., STOKŁOSA J.: Transport intermodalny na bliskie i średnie odległości;** *EiN* nr 3/2008, s. 77-82.

W artykule przedstawiono możliwości realizacji przewozów kolejowo-drogowych na dystansach 150 – 500 km, rozumianych jako transport zunifikowanych jednostek ładunkowych na małe i średnie odległości. Zdefiniowano czynniki determinujące wysokie koszty przewozów kolejowo-drogowych, a tym samym wpływające na efektywność tych przewozów przede wszystkim na duże odległości – powyżej 500 km. Zaproponowano kryteria, które należy uwzględnić przy transportem kombinowanym przewozić ładunki na mniejsze odległości. Zaproponowano do transportu, odpadów komunalnych, złomu, gruzu komunalnego, kruszywa budowlanego system ACTS – poziomego przeładunku standardowych pojemników wymiennych.

**SOBIESZCZAŃSKI M., BRZOZOWSKI K., NOWAKOWSKI J., TEKIELAK M.: The impact of SI engine controlling parameters on the content of toxic components and smokiness of exhaust gases;** *EiN* nr 3/2008, s. 53-61.

In the paper the results of experimental investigations on a turbocharged, four-cylinder direct injection SI engine with the displacement of 1.7 dm<sup>3</sup> are presented. In the investigations, particular attention was paid to the possibility of including the control of fuel dose, injection advance angle, exhaust gas recirculation rate and the temperature and pressure of air charge in the inlet manifold with the intent to determine the content of the toxic components and the smokiness of exhaust gases. The results of the investigations are presented in the form of approximation functions of several variables. The variables are the engine control parameters mentioned above. An analysis of the investigation results is presented and a possible application of the approximation functions in the optimisation of engine control parameters is indicated with the aim of selecting such values of control parameters as would guarantee a reduction of the nitrogen oxides content in the exhaust gases while maintaining the content of other toxic components and the assumed engine exploitation parameters on an acceptable level.

**DMOWSKI A.: Practical aspects of fleet management in a food company;** *EiN* nr 3/2008, s. 62-68.

The aim of this paper is to characterise management of a transportation system in a food company as an element of the general conception of logistics management. The detailed aspects presented here serve the task of demonstrating what and how transportation decisions must be driven by to constitute an element of a whole in company management. The first part of the paper describes general aspects of transport management in a company. These concern the concept of flow of information and structural links in a management system. The second part of the paper presents selected detailed aspects of passenger transport management.

**MICHALSKI R., JANULIN M.: Choice of operational parameters of electric-drive cars;** *EiN* nr 3/2008, s. 69-73.

Thanks to the computational model of the choice of parameters for an electric drive car in this article it is possible to determine its range depending on: driving speed, car size, unit energy consumption [kJ/kg], unit resistance to motion, car load coefficient  $f$ , efficiency of the power transmission system, real unit energy of batteries [kJ/kg]. The operational experiments yielded the coefficient value of  $\beta=0.24$ , which for the other adopted parameters makes it possible to determine the real range.

**ČOREJOVÁ T., IMRIŠKOVÁ E.: Convergence at the postal market;** *EiN* nr 3/2008, s. 74-76.

The paper deals with impacts of technology change on the strategy of postal markets. It concentrates on the convergence of technology, services and creation of new forms of firm cooperation – vertical and horizontal alliances. The term “convergence” is defined in relation with technology, content, economic and institutional dimensions.

**CISOWSKI T., STOKŁOSA J.: Intermodal transport over short and long distances;** *EiN* nr 3/2008, s. 77-82.

The article presents the possibilities for rail and road transport over the distance of 150-500 km, understood as transport of standardized loading units over short and medium distances. It identifies factors determining high costs of rail and road transport, which have an influence on the effectiveness of this transport, in particular over long distances, exceeding 500 km. It puts forward criteria to be taken into consideration when carrying goods by combined transport over shorter distances. It suggests the use of ACTS (Abroll Container Transport System) – horizontal transshipment of standard exchangeable containers – for transport of municipal waste, scrap, municipal rubble, and construction aggregate.

Mariusz WAŻNY  
Konrad WOJTOWICZ

## ANALIZA SYSTEMU EKSPLOATACJI WOJSKOWEGO STATKU POWIETRZNEGO W ASPEKcie JEGO MODERNIZACJI

### THE ANALYSIS OF THE MILITARY AIRCRAFT MAINTAINS SYSTEM AND THE MODERNIZATION PROPOSAL

*W artykule przedstawiono koncepcję modernizacji procesu obsługiwanego jednego z systemów funkcjonalnych wojskowego statku powietrznego w oparciu o metodę wyznaczania czasookresu przebywania wybranych urządzeń systemu nawigacyjno-celowniczego w systemie użytkownika. Głównym celem prowadzonych rozważań było opracowanie jak najlepszego sposobu wykorzystania potencjału techniczno-bojowego wojskowego statku powietrznego eksploatowanego w Siłach Zbrojnych RP.*

**Słowa kluczowe:** parametr diagnostyczny, system eksploatacji, system nawigacyjno-celowniczy.

*The study presents the concept of the maintenance process modernization. The example regards one of the military aircraft functional systems. The concept is based on the method of determining the time concerning the operation of an aiming head in the operation system. The main target in this research was to prepare the most efficient procedure of Polish Air Force military aircrafts maintenance.*

**Keywords:** diagnostic parameter, maintenance system, navigation and aiming system.

#### 1. Wstęp

Eksploatacja obiektów technicznych definiowana jest jako zespół celowych działań organizacyjno-technicznych i ekonomicznych ludzi z obiektami technicznymi oraz wzajemne relacje występujące pomiędzy nimi od chwili przyjęcia obiektu do wykorzystania zgodnie z przeznaczeniem, aż do jego likwidacji [1]. Ustalenie tych relacji oraz identyfikacja działań występujących pomiędzy poszczególnymi podmiotami oparta jest na wiedzy i doświadczeniu projektantów i konstruktorów obiektów technicznych. Ich profesjonalizm w pierwszej kolejności determinuje podatność obsługa i przydatność użytkowa. Niemniej jednak przyjęte przez nich założenia niejednokrotnie ulegają w trakcie istnienia obiektu weryfikacji pociągając za sobą określone zmiany mające na celu zmniejszenie „efektu odpadowego” eksploatacji i zmaksymalizowaniu „efektu użytkowego”.

W technice obok nadrzędnego celu jakim jest niezawodność obiektu bardzo istotną kwestią jest optymalizacja systemu eksploatacji (w różnych aspektach jego funkcjonowania). Jedną z przesłanek uprawniających do podjęcia tematyki związanej z optymalizacją są wnioski wyciągnięte z dotychczasowego przebiegu eksploatacji określonego obiektu (systemu) technicznego. W niniejszym opracowaniu przedstawiona zostanie próba weryfikacji sposobu eksploatacji wybranego urządzenia systemu nawigacyjno-celowniczego wojskowego statku powietrznego.

#### 1. Introduction

The technical objects maintenance is defined as a set of intentional organizational and economical operations of the people on the technical objects and the relationships between them from the beginning of the object lifecycle up to the end of lifecycle and object disposal [1]. Relationships recognition and identification of the operations which appear between subjects based on the knowledge and experience of the technical objects designers, developers and engineers. The maintenance compliance and utility of product mainly depends on the engineers and designers crew professional competence. However the design presumptions can be altered many times during object lifecycle. These operations are performed to decrease maintenance “waste effect” and maximize “utility effect”.

The primary goal in technology process is reliability but very significant matter is also the maintenance system optimization (in various functional aspects). One of the circumstances which allow considering modernization and optimization researches is the conclusions from the historical maintenance process of the specified technical object or system. This study presents the method of verification of the specified military aircraft navigation and aiming system maintenance process.

2. System eksploatacji wojskowych statków powietrznych

Współczesny wojskowy statek powietrzny, będący podstawowym obiektem technicznym w strukturze organizacyjnej powietrznych sił zbrojnych, jest hybrydą rozmaitych rozwiązań konstrukcyjnych, technologicznych i organizacyjnych. Przyjęcie takiej konsolidacji wymuszone zostało wymaganiami taktyczno-technicznymi, których czynnikiem rozwojowym jest współczesne pole walki.

Budowa statku powietrznego oparta jest na strukturze modułowej (rys. 1) pozwalającej na rozdzielenie określonych zadań pomiędzy poszczególne bloki funkcjonalne. Takie rozwiązanie usprawnia m.in. proces eksploatacji ułatwiając obsługiwanie oraz użytkowanie statku powietrznego.

Warunki w jakich następuje wykorzystanie statku powietrznego są na tyle specyficzne, że nakładają na technikę lotniczą w trakcie jej funkcjonowania wymóg uzyskania wysokiego poziomu wskaźników określających jej niezawodność, trwałość, efektywność oraz bezpieczeństwo. Żądane wartości tych wskaźników uzyskiwane są poprzez nadanie urządzeniom odpowiedniej struktury funkcjonalnej oraz przyjęcie odpowiedniej nadmiarowości.

Ze względu na specyfikę funkcjonowania statku powietrznego, jego eksploatacja może odbywać się tylko w ramach określonego systemu, który zapewnia warunki niezbędne do prawidłowego funkcjonowania samolotu. System ten określany jest mianem Systemu Lotniczego (SL) i obejmuje swoim obszarem statek powietrzny, osoby uczestniczące w procesie eksploatacyjnym oraz urządzenia stanowiące elementy systemu zapewniające zabezpieczenie ciągłości procesu (w sensie funkcjonalnym).

Podstawowym celem eksploatacji wojskowych statków powietrznych w warunkach pokoju jest utrzymanie, zarówno

2. The maintenance system of military aircraft

The modern military aircraft, which is the basic technical object in Polish Air Force organization structure, is the complex product including various constructional, technological, engineering and organizational concepts. Design of so sophisticated product based on tactical and technical military requirements which was created after modern battlefield analysis.

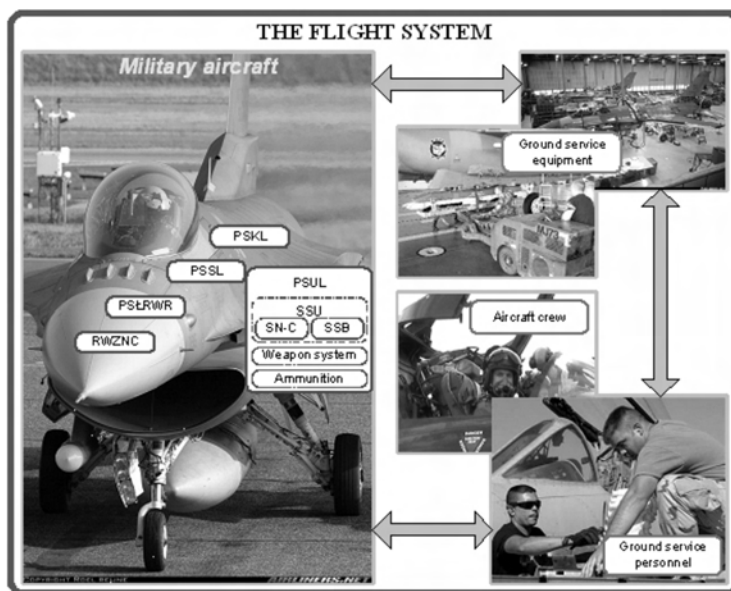
The aircraft construction is based on the module structure (Fig. 1.) which allows dividing the specified tasks between separate functional blocks. This solution improves the maintenance process and facilitates service and operational use of the aircraft.

The conditions in which the aircrafts are operated are so specific that involves the specified requirements regarding high level of reliability, durability, effectiveness and safety parameters as far as airborne technology is concerned. Required levels of parameters are provided by determining specified functional structure of devices and specified level of redundancy.

Due to specific character of aircraft operations the aircraft maintenance can be performed only within specified system which provides the conditions indispensable for correct aircraft operation. This specified system is called Air System (AR) and contains the aircraft frame, the people who participate in the maintenance process and the devices building the system which ensure process permanence (in functional way).

The primary target in military aircraft maintenance process during peace is maintaining both the technical equipment and the personnel on the specified reliability and training level. It is required to provide high level of efficacy and effectiveness during wartime.

Due to many various external factors, which influence negatively on the specified technical elements of the Air System,



Rys. 1. Schemat strukturalny wojskowego statku powietrznego oraz systemu lotniczego: PSSL – pokładowy system sterowania lotem (konstrukcja siłowa wraz z poszyciem); PSKL – pokładowy system kierowania lotem; PSLRRW – pokładowy system łączności, radionawigacji i walki radioelektronicznej; RWZNC – radar wielofunkcyjny i zasobniki nawigacyjno-celownicze; PSUL – pokładowy system uzbrojenia lotniczego; SSU – system sterowania uzbrojeniem; SSB – system sterowania bronią; SN-C – system nawigacyjno-celowniczy (zdjęcia - [9])

Fig. 1. Structural diagram of the military aircraft and the flight system: PSSL – Flight Control System Actuators (frame construction with plating); PSKL – Flight Control System; PSLRRW – Airborne Communication, Radio Navigation and Electronic Warfare Systems.; RWZNC – Multifunctional Radar and Navigation and Aiming Pod; PSUL – Air Armament System; SSU – Armament Control System; SSB – Weapon Control System; SN-C – Navigation and Aiming System; (pictures [9])



sprzętu technicznego jak i personelu, na odpowiednim poziomie niezawodności i wyszkolenia, w celu zapewnienia wysokiej skuteczności i efektywności działania w warunkach konfliktu zbrojnego.

Z uwagi na występowanie różnorodnych czynników zewnętrznych mających negatywny wpływ na wybrane techniczne elementy SL, można stwierdzić, że w okresie eksploatacji następuje ich „zużywanie się”. Dlatego też w celu utrzymania SL w odpowiednim stanie niezawodnościowym wymagane jest wprowadzenie obsługi technicznej, w wyniku której dokonuje się m.in. regulacji, strojenia, wymiany elementów lub całych zespołów w celu spowolnienia procesów zużycia.

W praktyce istnieją obecnie trzy sposoby eksploatacji statków powietrznych (rys. 2):

- 1) system eksploatacji z planowanymi pracami profilaktycznymi,
- 2) system eksploatacji „według stanu”,
- 3) system eksploatacji „według warunku niezawodności” [4].

Logika i organizacja eksploatacji statków powietrznych według planowej profilaktyki przedstawiona jest na rys. 3. W tym sposobie podstawą eksploatacji jest resurs (lub zapas resursu) statku powietrznego. Wyróżnikiem, według którego wykonuje się określony rodzaj obsługi jest ilość pracy (nalot) statku powietrznego [4].

W procesie eksploatacji wg planowej profilaktyki jednym ze stanów eksploatacyjnych jest stan pośredniej zdatności. W stanie tym statek powietrzny jest przeważnie sprawny, ale utracił zdolność do wykonywania lotów z uwagi na okoliczności wymienione na rys. 3. Po wypracowaniu resursu technicznego statek powietrzny powinien być wycofany z eksploatacji lub podany badaniom w celu ustalenia nowego resursu technicznego.

Dla eksploatacji według stanu technicznego obowiązuje zasada, według której statek powietrzny jest tak długo eksploatowany, jak długo wartości konkretnych parametrów określających jego stan techniczny mieszczą się w dopuszczalnym przedziale. Znajomości stanu technicznego urządzenia określa się za pomocą wewnętrznych lub zewnętrznych urządzeń diagnostycznych. Dla tego sposobu podstawą do wykonywania określonego rodzaju obsługi są wartości kontrolowanych parametrów. Prawidłowe sterowanie eksploatacją według stanu technicznego sprowadza się do tego, iż sterowanie stanem dużego parku statków powietrznych wykonuje się poprzez sterowanie stanem każdego statku powietrznego oddzielnie.

W koncepcji eksploatacji według zasady zachowania żądanej niezawodności zakłada się, że niezawodność jest charakterystyką projektowaną. Jej poziom (wartość) zapewnia się w czasie powstawania danego urządzenia i podtrzymuje się

it can be claimed, that during operating process the elements are getting “used up”. Therefore, due to maintain Air System in the appropriate reliability condition there is required to perform technical service. This action contains adjustment, tuning and replacement of particular devices or whole aggregates, in order to slow down the “using up” process.

In practice there are three aircraft maintenance strategies (Fig. 2.):

- 1) maintenance system containing prevention services schedule (recurring maintenance).
- 2) operational maintenance system.
- 3) preventive/predictive maintenance system.

Organization and scheme of military aircrafts recurring maintenance strategy is presented on Fig. 3. The basis of this maintenance strategy is the measurement of the amount of labor executed by the plant. As far as aircraft is concerned the amount of labor is defined as a number of hours in the sky [4].

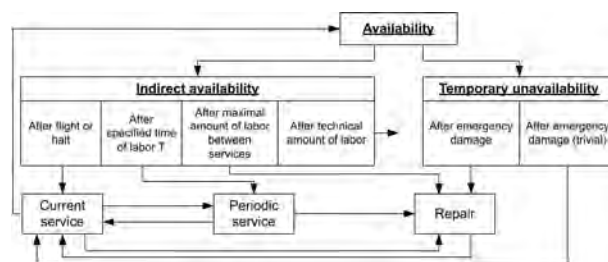
One of the maintenance states in the recurring maintenance process is the indirect airworthiness state. The aircraft in this state is mostly working correctly but it lost the flying ability in order to circumstances determined on figure 3. After execution the specified amount of labor (hours of fly) the aircraft lifecycle should be either terminated or directed to the professional service to determine the new amount of labor possible to execute.

As far as operational maintenance strategy is concerned there is the rule the aircraft is in operation as long as the levels of specified parameters do not exceed the specified limits of error. The knowledge about the maintenance state of the device is determining by the external and internal diagnostic equipment. The service operations during this maintenance strategy are executed according to levels of measured diagnostic parameters. The proper control of operational maintenance strategy even for the considerable fleet of aircrafts requires control of every aircraft separately.

The preventive/predictive maintenance strategy defines the reliability as a designed characteristic. The level (value) of the reliability must be provided in the device design and manufacturing process and is maintaining during the device lifecycle. The maintenance schedule which is based on preventive/predictive maintenance strategy provides the desirable or defined levels of both reliability and flight safety. The all of described aircrafts maintenance strategies are followed during the real conditions fleet maintenance process.



Rys. 2. Sposoby eksploatacji wojskowych statków powietrznych  
Fig. 2. Military aircrafts maintenance strategies



Rys. 3. Schemat obsługi według planowej profilaktyki  
Fig. 3. Recurring maintenance strategy scheme



w całym okresie jego eksploatacji. Opracowany do tego rodzaju eksploatacji program technicznej obsługi zapewnia pożądane lub zadane poziomy zarówno niezawodności, jak i bezpieczeństwa lotów.

W warunkach rzeczywistych statki powietrzne eksploatuje się stosując wszystkie strategie obsług.

### 3. Analiza systemu eksploatacji wojskowego statku powietrznego w aspekcie jego modernizacji

Przystępując do analizy procesu eksploatacyjnego wojskowego statku powietrznego (WSP) w pierwszej kolejności dokonano identyfikacji tegoż procesu dla wybranego typu statku powietrznego. Za obiekt posłużył samolot Su-22 eksploatowany w Siłach Zbrojnych RP. Analizie poddano proces eksploatacji 15 statków powietrznych. W oparciu o podział stanów eksploatacyjnych w jakich może przebywać WSP [1] przeprowadzono ich identyfikację ilościową. W ten sposób otrzymano uśredniony procentowy udział poszczególnych stanów w skali jednego roku eksploatacji WSP, przedstawiony poniżej na rys. 4.

Przyjęte określenia definiują powyższe stany eksploatacyjne jako:

- gotowość użytkowa - jest to stan w którym WSP może zostać użyty zgodnie z przeznaczeniem;
- niegotowość użytkowa - uniemożliwia wykorzystanie WSP zgodnie z przeznaczeniem - występowanie tego stanu spowodowane może być m.in. brakiem personelu latającego (choroby, urlopy, delegacje, itp.);
- gotowość obsługowa - jest stanem w którym wykonywane są prace obsługowe;
- niegotowość obsługowa - związana jest, podobnie jak w przypadku niegotowości użytkowej, z czasową przerwą w realizacji prac obsługowych, wynikająca m.in. z chwilowego braku personelu do realizacji określonych zadań przewidzianych w danym stanie eksploatacyjnym.

Ponadto z przedstawionej na rys. 4 analizy wynika, że istnieją jeszcze dwa stany eksploatacyjne, nie zdefiniowane powyżej, charakteryzujące się dużą wartością procentowego udziału w ramach rocznego cyklu eksploatacyjnego w odniesieniu do pozostałych wymienionych stanów. Są to: stan postoju WSP i stan prze-stoju WSP.

Największy niewykorzystany obszar odnosi się do stanu postoju statku powietrznego. Tak duża wartość procentowego udziału tego stanu w systemie eksploatacji wynika ze specyfiki przeznaczenia i wykorzystania WSP oraz możliwości finansowych istniejących w SL Sił Zbrojnych RP. Głównym przeznaczeniem WSP jest realizacja zadania bojowego z wykorzystaniem środków bojowych. Realizacja takiego zadania wiąże się z ogromnymi kosztami poniesionymi m.in. na zakup środków bojowych, materiałów eksploatacyjnych w jakie zasilany jest WSP (tlen, azot, paliwo), na zabezpieczenie logi-

### 3. The military aircraft maintenance system analysis and the modernization aspect

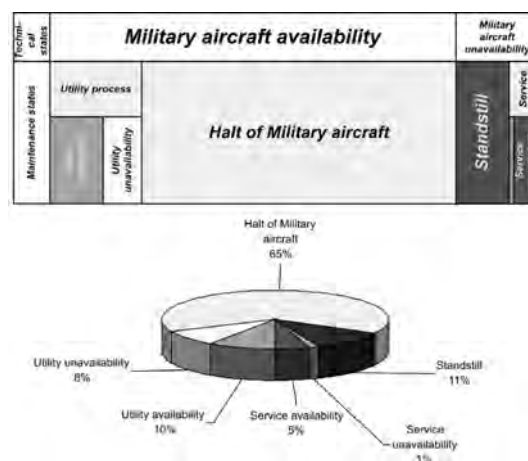
In the beginning of the military aircraft maintenance process analysis the first stage is process identification for the specified kind of aircraft. The plant was Su-22 aircraft which is operated in Polish Air Force. The fleet of 15 aircraft was taken into analysis. The quantitative identification based on the maintenance states division which military aircraft can follow [1]. In this way the average annual percentage usage of particular states is determined. The scheme of the analysis is showed on Fig. 4.

The phrases on the scheme define the maintenance states as follow:

- utility availability – the state when the military aircraft is available to be used in mission.
- utility unavailability – the state when the military aircraft is not available to be used in mission - e.g. this state may be result of personnel absence (illness, leave, business trip)
- service availability – the state when the military aircraft is in service.
- service unavailability – the state when, similar to the utility unavailability, the military aircraft is temporarily not in service due to e.g. personnel absence.

Moreover, the scheme presented on figure 4 involves two other maintenance states which are not defined above. These states are significant as far as comprehensive percentage scheme (fig. 4.) is concerned. These states are halt and standstill of the military aircraft.

The biggest unused area in maintenance process regards the military aircraft halt. So big percentage scale of this state in maintenance process results from the specific destination and exploitation of the military aircraft and from the military budget of the Polish Forces. The main destination of the military aircraft is performing combat mission with armament. The successful combat mission accomplish involves huge costs of the missile weapon, maintenance materials and the fluids (fuel, oxygen, nitrogen). Therefore during the peacetime the level of cost should be reasonable planned. On account of costs the flights schedule during peacetime should be economical. Other aspects of the number of flights constraint are the aircraft flight conditions. The maneuvers during the flight can involve the huge g-load which substantially influence on the frame. As a result of these influences specified parts of the aircraft



Rys. 4. Uśredniony procentowy udział stanów eksploatacyjnych w skali jednego roku eksploatacji samolotu Su-22

Fig. 4. Average annual percentage usage of the particular maintenance states. Su-22 aircraft maintenance process

styczne itp. elementów. Dlatego też wielkość tych kosztów w okresie pokoju powinna być rozsądnie planowana. Z tego też względu loty WSP są „reglamentowane”.

Innym aspektem ograniczającym ilość wykonywanych lotów są warunki w jakich realizowany jest ruch statku powietrznego. Manewry wykonywane w trakcie lotu niejednokrotnie powodują występowanie dużych przeciążeń, co nie pozostaje obojętne na konstrukcję siłową. W wyniku tych oddziaływań następuje „zużywanie się” określonych elementów samolotu. Aby nie doprowadzić do zbyt szybkiego zużywania się tychże elementów, loty WSP są planowane i realizowane w określonych odstępach czasowych, zapewniając w ten sposób pilotom pewną systematyczność latania w celu podtrzymania określonych nawyków oraz racjonalne „zużywanie się” samolotów.

Przytoczone czynniki mają dominujący wpływ na wartość procentowego udziału postoju statku powietrznego w przedstawionym całościowym zestawieniu, jednakże wydaje się, że obecnie ze względów ekonomicznych i politycznych nie istnieje możliwość i konieczność modernizacji tego fragmentu procesu eksploatacji WSP. Nie mniej jednak należy zaznaczyć, że w trakcie postoju wojskowy statek powietrzny znajduje się w stanie zdatności.

Drugim pod względem wielkości procentowego udziału w ogólnym rocznym rozliczeniu stanów eksploatacyjnych WSP jest przestój. Jest to stan występujący w trakcie trwania procesu obsługi samolotu, a związany jest głównie z możliwościami organizacyjno-technicznymi personelu wykonującego prace obsługowe. Z uwagi na bezpieczeństwo i należyty poziom staranności wykonywania prac obsługowych, czas pracy pracowników jest limitowany i wynosi 8 godzin dziennie. Oznacza to, że przez pozostałe 16 godzin WSP oczekuje na wznowienie prac obsługowych i to właśnie ten okres wpływa na wartość procentową charakteryzującą przestój. W celu zmniejszenia tej wartości można by zatrudnić dodatkowe osoby do wykonywania prac obsługowych, jednakże z ekonomicznego punktu widzenia wydaje się to być niezasadne. Zatem należałoby zastanowić się czy nie można dokonać zmian w częstotliwości realizacji prac obsługowych.

Częstotliwość realizacji prac obsługowych determinowana jest liczbą godzin spędzonych przez WSP w powietrzu. Po każdym 100 godzinach nalotu samolot przekazywany jest do eskadry technicznej w której wykonywane są, zgodnie z przyjętą technologią, prace obsługowe. W trakcie tych prac realizowane są m.in. sprawdzenia wartości parametrów diagnostycznych wybranych urządzeń WSP. Przebieg realizacji tychże prac zawarty jest w dokumentacji technicznej, a zakres ich realizacji ustalany jest na podstawie uzyskanego wyniku kontroli parametrów diagnostycznych. Jeżeli następuje przekroczenie przez parametry diagnostyczne wartości dopuszczalnego błędu, przeprowadzana jest regulacja mająca na celu zniwelowanie zaistniałej odchyłki. Przytoczony tok postępowania jest słuszny, jednakże z ekonomicznego punktu widzenia obciążony jest ogólnymi kosztami związanymi z koniecznością rejestracji parametrów diagnostycznych, tj. m.in. niwelacją WSP, zasileniem urządzeń w materiały eksploatacyjne (np. azot) itp. elementy. Ponadto realizacja tychże prac jest niejednokrotnie czasochłonna.

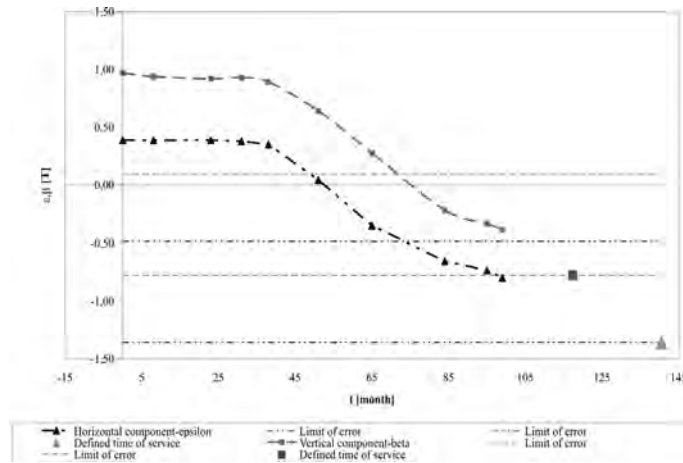
Rodzi się zatem pytanie czy zachodzi konieczność realizacji wszystkich prac zgodnie z wytycznymi przyjętymi w technologii. Udzielenie odpowiedzi wiąże się z analizą wartości parametrów diagnostycznych zarejestrowanych w trakcie trwania procesu eksploatacyjnego.

are “using up”. The counteraction to the unexpected and irrational “using up” of the aircraft parts can be reasonable scheduling and performing the military aircraft flights. This strategy allows provide appropriate flights regularity and maintain pilots’ qualifications and habits.

Above parameters are prevailing in the percentage amount of the military aircraft halt in the presented total scheme. There is no political and economical need and even possibility to change this stage of military aircraft maintenance strategy now. Withal should be noticed that the military aircraft in “halt” stage is still available. The standstill is the second in amount period of time as far as the total annual military aircraft maintenance scheme is concerned. This is a maintenance state when the military aircraft is in service. This state is mostly connected to the service personnel availability. Due to the safety and the high level of service, the work time of the service personnel is limited to the eight hours a day. It means that during the next sixteen hours the military aircraft is awaiting for service. This period of time involves the considerable scale of the standstill state. There could be more service personnel engaged in order to decrease standstill state scale but in the economical point of view it is not remunerative. It should be considered if the frequency of service could be altered.

The service frequency stemmed from the number of hours in the sky. After every 100 hours of flight the military aircraft is allocated to the technical squadron where the full service is performed. In service the levels of diagnostic parameters of specified aircraft devices are checked. The specification of this kind of service is described in the technical documentation. The range of service really need to perform is determine according to the diagnostic parameters check. If the levels of specified parameters exceed the specified limits of error the adjustment is performed. This procedure is correct but additional costs are generated. These costs come from the extra service actions necessary to check diagnostic parameters i.e. leveling of aircraft, maintenance fluids supply etc. Furthermore these actions performance is mostly time-consuming.

W tym celu analizie poddano parametry diagnostyczne głowicy celowniczej, będącej jednym z podstawowych urządzeń systemu nawigacyjno-celowniczego. Rejestrowane w procesie obsługi parametry diagnostyczne odnoszą się do znacznika celowniczego i określają jego położenie na reflektorze głowicy celowniczej poprzez parametry  $\varepsilon$  i  $\beta$ . Przedstawione na rys. 5 przebiegi, będące odzwierciedleniem wartości zarejestrowanych parametrów dla wybranego urządzenia, pokazują, że wraz z upływem czasu eksploatacji WSP następuje pogorszenie jakości parametrów diagnostycznych.



Rys. 5. Przebieg zmian położenia kontrolnego składowej pionowej i poziomej punktu centralnego ruchomego znacznika celowniczego w trakcie trwania procesu eksploatacyjnego

Fig. 5. Traces of the horizontal and vertical deviation of the aiming indicator during maintenance period

Jak widać na powyższym rys. nku nie istniała konieczność przeprowadzania prac obsługowych za każdym razem. A zatem czy można oszacować czas w którym należałoby dokonać sprawdzenia wartości parametrów diagnostycznych w celu określenia momentu przeprowadzenia regulacji badanych urządzeń WSP.

Naprzeciw tym oczekiwaniom wychodzi metoda wyznaczenia czasookresu przebywania wybranego urządzenia systemu nawigacyjno-celowniczego w systemie użytkowania [8]. Zakładając, że parametry diagnostyczne mogą przyjmować dowolne wartości ze zdefiniowanej przestrzeni stanu, można dokonać ich opisu przy pomocy funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu normalnego  $u(z, y, t)$ . Dokonując zamiany zmiennych i określonych przekształceń wyznaczono funkcję:

$$u(z_*, y_*, t) = \frac{1}{2p\sqrt{a_1 t a_2 t}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{z_*^2}{a_1 t} + \frac{y_*^2}{a_2 t} \right)} \quad (1)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} z_* &= z - b_1 t, \\ y_* &= y - b_2 t, \end{aligned} \quad (2)$$

$z, y$  - zmienne losowe parametrów diagnostycznych,  $b_1 t, b_2 t$  - wartość średnia przyrostu odchyłek parametrów diagnostycznych w przedziale czasu  $(0, t)$ ,  $a_1 t, a_2 t$  - wariancja przyrostu odchyłek parametrów diagnostycznych zależna od czasu.

Powyzsza funkcja  $u(z_*, y_*, t)$  przyjmuje stała wartość, gdy:

$$\frac{z_*^2}{a_1 t} + \frac{y_*^2}{a_2 t} = k^2 \quad (3)$$

The question is if the all service actions have to be performing according to service book. To answer this question the analysis of diagnostic parameters was realized during the aircraft maintenance process.

In this survey the parameters of the aiming head was tested. The aiming head is one of main devices in the navigation-aiming system. Registered diagnostic parameters during maintenance process are the parameters of the aiming indicator and specify position of indicator on the aiming head reflector by  $\varepsilon$  and  $\beta$  parameters. Fig. 5 presents the traces of the diagnostic pa-

rameters in aircraft maintenance period. It shows the diagnostic parameters levels decrease in time.

As the figure above shows, there was not necessary to perform service actions every time. It means that it is possible to estimate time when service action should be performed and diagnostic parameters should be checked to determine a time when adjustment of the specified aircraft devices is required. This estimation can be executed with the aid of the method of determining the time concerning the operation of an aiming head in the operation system [8]. Assuming that diagnostic parameters value can be various in defined state space. Parameters can be described by the density of probability of Gaussian distribution  $u(z, y, t)$ . After the variables replacement and specified transformations the function was defined:

$$u(z_*, y_*, t) = \frac{1}{2p\sqrt{a_1 t a_2 t}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{z_*^2}{a_1 t} + \frac{y_*^2}{a_2 t} \right)} \quad (1)$$

where:

$$\begin{aligned} z_* &= z - b_1 t, \\ y_* &= y - b_2 t, \end{aligned} \quad (2)$$

$z, y$  - random variables of diagnostic parameters,  $b_1 t, b_2 t$  - an average value of the growth in deviation of diagnostic parameters over the range of time  $(0, t)$ ,  $a_1 t, a_2 t$  - the variation of the growth in deviation of diagnostic parameters (depending on time).

The above function  $u(z_*, y_*, t)$  is constant if:

$$\frac{z_*^2}{a_1 t} + \frac{y_*^2}{a_2 t} = k^2 \quad (3)$$

Równanie (3) opisuje elipsę rozrzutu, której pole oznaczone zostało przez  $S_k$ . Zatem, prawdopodobieństwo tego, że  $(z_*, y_*) \in S_k$  można określić rozwiązując równanie:

$$P((z_*, y_*) \in S_k) = \iint_{S_k} \frac{1}{2p\sqrt{a_1t}\sqrt{a_2t}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z_*^2}{a_1t} + \frac{y_*^2}{a_2t}\right)} dz_* dy_* \quad (4)$$

Dokonując:

- zamiany zmiennych:  $z_*$  na  $m = \frac{z_*}{\sqrt{a_1t}}$  i  $y_*$  na  $n = \frac{y_*}{\sqrt{a_2t}}$  (wówczas  $\mu^2 + \nu^2 = \kappa^2 = r^2$ );
- przejścia na współrzędne biegunowe:  $\mu = r \cos \varphi$ ,  $\nu = r \sin \varphi$  oraz

- obliczenia całek:  $\frac{1}{2p} \int_0^{2p} dj$  i  $\int_0^k e^{-\frac{1}{2}r^2} r dr$

otrzymano zależność:

$$P((z_*, y_*) \in S_k) = 1 - e^{-\frac{k^2}{2}} \quad (5)$$

Przyjmując, że  $\sqrt{a_1t} = \sqrt{a_2t} = \sqrt{at}$ , wówczas elipsa rozrzutu przekształca się w okrąg, którego promień wynosi:

$$r = k\sqrt{at} \quad k = \frac{r}{\sqrt{at}} \quad (6)$$

Dokonując podstawienia powyższej zależności do równania (5) otrzymano:

$$P((z_*, y_*) \in C_k) = 1 - e^{-\frac{r^2}{2at}} \quad (7)$$

gdzie:  $r$  - dopuszczalna wartość promienia okręgu, którego przekroczenie przez zmienną losową powoduje utratę parametrów nominalnych pracy urządzenia;  $\sqrt{at}$  - jest odchyleniem standardowym;  $P^*((z_*, y_*) \in C_k)$  - założone prawdopodobieństwo z jakim chcemy aby parametr użytkowy nie przekroczył wartości  $r$ .

W oparciu o powyższą zależność można wyznaczyć wzór na wartość czasu po którym nastąpi przekroczenie przez urządzenie dopuszczalnych wartości błęd granicznych:

$$t^* = \frac{r^2}{2a \ln P^*} \quad (8)$$

Przedstawioną metodę zweryfikowano na przykładzie przedstawionym na rys. 5. Dla powyższych danych dla parametru  $\varepsilon$  czas użytkowania wyniósł  $t_\varepsilon=42$  miesiące, natomiast dla parametru  $\beta - t_\beta=18$  miesięcy. Tak więc w oparciu o przedstawioną metodę, proces kontroli parametrów diagnostycznych i ewentualne wprowadzenie poprawek niwelujących występujący błąd powinien być przeprowadzony przed upływem 18 miesięcy od daty ostatniego sprawdzenia.

#### 4. Wnioski

Podstawowymi kryteriami stawianymi urządzeniom przeznaczonym do eksploatacji w lotnictwie jest niezawodność i bezpieczeństwo. Wynika to przede wszystkim ze specyfiki ich zastosowania. W odniesieniu do techniki wojskowej powyższe wskaźniki zostają rozbudowane jeszcze o trzeci element związany ze skutecznością. Utrzymanie tychże wskaźników na właściwym poziomie pozwala na bezpieczną i efektywną eksploatację WSP. Obecnie należy uwzględnić jeszcze jeden aspekt analizy eksploatacyjnej obiektów technicznych – aspekt

The equation (3) describes the ellipse of dispersion.  $S_k$  - the field of the ellipse. So, the probability that  $(z_*, y_*) \in S_k$  can be determined by solving the following equation:

$$P((z_*, y_*) \in S_k) = \iint_{S_k} \frac{1}{2p\sqrt{a_1t}\sqrt{a_2t}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z_*^2}{a_1t} + \frac{y_*^2}{a_2t}\right)} dz_* dy_* \quad (4)$$

After:

- changing variables  $z_*$  into  $m = \frac{z_*}{\sqrt{a_1t}}$  and  $y_*$  into  $n = \frac{y_*}{\sqrt{a_2t}}$  (Then  $\mu^2 + \nu^2 = \kappa^2 = r^2$ );
- polar coordinates introducing;
- calculating integrals:  $\frac{1}{2p} \int_0^{2p} dj$  and  $\int_0^k e^{-\frac{1}{2}r^2} r dr$

thus:

$$P((z_*, y_*) \in S_k) = 1 - e^{-\frac{k^2}{2}} \quad (5)$$

Providing that  $\sqrt{a_1t} = \sqrt{a_2t} = \sqrt{at}$ , then the ellipse of dispersion changes into the circle whose radius is:

$$r = k\sqrt{at} \quad k = \frac{r}{\sqrt{at}} \quad (6)$$

Inserting the above dependence into the equation the following result was obtained:

$$P((z_*, y_*) \in C_k) = 1 - e^{-\frac{r^2}{2at}} \quad (7)$$

where:  $\sqrt{at}$  - a standard deviation,  $r$  - a permissible value of the circle radius; if a random variable exceeds it, nominal parameters are lost;  $P^*((z_*, y_*) \in C_k)$  - an assumed probability in the case of which an operational parameter shall not exceed the value  $r$ .

Using the above equation, dependences concerning the time were determined (the time after which a device will exceed permissible values of the error limit):

$$t^* = \frac{r^2}{2a \ln P^*} \quad (8)$$

Presented method was verified with data introduced on figure 5. For the above data and considering parameter  $\varepsilon$  the mean time between failure was defined  $t_\varepsilon=42$  months and considering parameter  $\beta - t_\beta=18$  months. Then, basing on the presented method, the diagnostic parameters analysis and actually device adjustments have to be performed earlier then 18 month after last check.

#### 5. Conclusions

The main coefficients for devices in airspace industry are reliability and safety. It stem from specific environment the devices are being use. As far as military technology is concerned the above coefficients are enriched with another one – the effectiveness. Maintaining coefficients on the proper level allows use the military aircraft in save and efficient way. At the present time one more coefficient should be taken under consideration – economic coefficient. After political transformation in Poland this is substantial aspect also in Polish Forces. There are perceptible milita-

ekonomiczny. Po dokonanych zmianach ustrojowych w Polsce, również w Siłach Zbrojnych zaczęto brać pod uwagę jego znaczenie dając temu wyraz w trakcie prac nad budżetem. Z tego też względu wszelkie działania pozwalające na właściwe i racjonalne planowanie obciążeń finansowych są zasadne i wydają się być potrzebne.

Przedstawiona w niniejszym artykule analiza ukazuje w głównej mierze dwa aspekty, tj.:

- 1) obszary stanowiące podłoże do prac mających na celu zminimalizowanie niewłaściwe wykorzystanie sprzętu technicznego (w przedstawionym przykładzie wojskowego statku powietrznego);
- 2) praktyczną implementację metody określania czasu przebywania wybranego urządzenia, którego stan techniczny określany jest za pomocą parametrów diagnostycznych, w systemie użytkowania.

Jako przykład zastosowania przedstawionej metody wykorzystano głowicę celowniczą wchodzącą w skład systemu nawigacyjno-celowniczego. W identyczny sposób można analizować proces eksploatacyjnych innych elementów systemu nawigacyjno-celowniczego, których parametry diagnostyczne sprawdzane są w ramach prac obsługowych, tj. np. dla dalmierza laserowego czy też nadajnika kątów natarcia i ślizgu. Próba włączenia przedstawionej metody do systemu obsługiwania mogłaby w znaczący sposób skrócić czas przestoju WSP, co pozwala na uzyskanie wymiernych efektów w postaci:

- wzrostu wartości czasu przebywania WSP w stanie zdalnym do użycia, zapewniając w ten sposób wysoką gotowość bojową jednostek;
- obniżenie kosztów związanych z realizacją prac obsługowych.

Z uwagi na powyższe wydają się za zasadne prowadzenie prac mających na celu usprawnienie procesu eksploatacyjnego obiektów technicznych – w tym również WSP.

### 5. References

- [1] Downarowicz O.: *System eksploatacji. Zarządzanie zasobami techniki*. WITE, Gdańsk-Radom 1997.
- [2] Fisz M.: *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1958.
- [3] Lewitowicz J., Kustron K.: *Podstawy eksploatacji statków powietrznych cz.1*. Wydawnictwo ITWL, Warszawa 2001.
- [4] Olearczuk E., Sikorski M., Tomaszek H.: *Eksploatacja samolotów (elementy teorii)*. Wydawnictwo MON, Warszawa 1978.
- [5] *Samolot Su-22M4. Książka 7. Uzbrojenie cz. VII. Technologia obsługi okresowych*. Dowództwo Wojsk Lotniczych i Obrony Powietrznej, Poznań 1986.
- [6] Skomra A., Tomaszek H., Wróblewski M.: *Charakterystyki taktyczno-techniczne i skuteczność lotniczych środków bojowych*. Skrypt WAT, Warszawa 1999.
- [7] Ważny M.: *Badanie eksploatacyjnych przyczyn rozrzutu wybranych środków bojowych i ich wpływu na skuteczność systemów uzbrojenia lotniczego*. WAT, Warszawa 2003.
- [8] Ważny M.: *Metoda wyznaczania czasookresu przebywania wybranego urządzenia systemu nawigacyjno-celowniczego w systemie użytkowania*. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, Nr 2/2008, Lublin 2008.
- [9] [www.airliners.net](http://www.airliners.net)

ry budget constraints. Therefore, every modernization which facilitates the costs reduction seems to be sensible and necessary.

The above analysis shows two main aspects:

- 1) The areas where the improperly designed schedule not allows to take full advantage from equipment (e.g. military aircraft)
- 2) Practical implementation of the method of determining the time concerning the operation of a device in the operation system.

An example for this method was the aiming head which is part of the complex navigation-aiming system. In the same way another parts of navigation-aiming system can be checked. The diagnostic parameters from the device must be checked during maintenance services i.e. laser range finder, angle of attack sensor etc. Integrating described method in the maintenance strategy allows obtaining significant effects:

- increase of the military aircraft utility availability period and the mission readiness period;
- decrease the costs level – less service actions in maintenance process.

To sum up, it is reasonable performing integration and development of the maintenance process for the technical objects, especially for the military aircraft.

---

**Dr inż. Mariusz WAŻNY**  
**Mgr inż. Konrad WOJTCWICZ**

Wojskowa Akademia Techniczna  
Wydział Mechatroniki  
ul. Kaliskiego 2  
00-908 Warszawa 49  
tel. (0-22) 6837947, (0-22) 6839851  
faks (0-22) 6857581, (0-22) 6857581  
e-mail: [mwazny@wp.pl](mailto:mwazny@wp.pl)

---

## ANALIZA POŁĄCZENIA SPAWANEGO ZAPROJEKTOWANEGO METODAMI NOŚNOŚCI GRANICZNEJ

### ANALYSIS OF WELDED JOINT DESIGNED BY LIMIT ANALYSIS METHODS

Praca przedstawia wyniki kształtowania metodami nośności granicznej oraz przybliżonych analiz sprężystych MES i numerycznych badań zmęczeniowych, spawanego połączenia nakładkowego blach, które wykonane w sposób tradycyjny ma wysoki współczynnik koncentracji naprężenia i niską trwałość zmęczeniową. Na podstawie skonstruowanego statycznie dopuszczalnego pola naprężeń i kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia określono kształt połączenia, a przede wszystkim oszacowanie teoretyczne szerokość łączenia blach (szerokości spoiny). Z przeprowadzonych analiz wynika, że optymalna – ze względu na wielkość maksymalnej koncentracji i trwałości zmęczeniowej – szerokość spoiny pokrywa się z otrzymanym wymiarem teoretycznym. Połączenie zaprojektowane metodami nośności granicznej ma ponad dwukrotnie mniejszy współczynnik koncentracji naprężenia w stosunku do tradycyjnego i około 50 krotne większą trwałość zmęczeniową.

**Słowa kluczowe:** kształtowanie, nośność graniczna, MES, analizy zmęczeniowe.

The paper presents the results of application of the limit analysis methods, approximate elastic analyses FEM and numerical fatigue investigations to overlapping weldments in sheet-metal plates. When made with the use of traditional methods, these weldments exhibit high concentration of stresses and low fatigue life. By constructing statically admissible stress fields and kinematically admissible collapse mechanisms, one can determine the shape of weldment, and estimate theoretically the weld leg length. The analyses performed by the author show that the weld leg length optimal for minimizing stress concentration and maximizing fatigue strength is consistent with that calculated theoretically. The weldment designed with the use of limit analysis methods has, in comparison with a traditional welded joint, a twofold lower stress concentration factor, and over 50 times higher fatigue life.

**Keywords:** shape design, limit analysis, FEM, fatigue analysis.

#### 1. Wprowadzenie

Procesy zmęczeniowe następują najczęściej w miejscach największych koncentracji naprężenia. Takimi miejscami są zwykle węzły i połączenia konstrukcyjne. W procedurach przewidywania trwałości przyjmuje się, że decyduje o niej stan naprężenia w punkcie najbardziej obciążonym. Zwykle punkt taki leży na powierzchni swobodnej, gdzie mamy do czynienia z płaskim stanem naprężenia, a w szczególnych przypadkach ze stanem jednoosiowym. W takich przypadkach, wartość naprężenia w takim punkcie oblicza się wykorzystując pojęcie współczynnika koncentracji  $K_t$ :

$$\sigma_{max} = \sigma_{nom} \cdot K_t \quad (1)$$

gdzie:  $\sigma_{max}$  - max. naprężenie w miejscu koncentracji;  $\sigma_{nom}$  - naprężenie nominalne (umowne).

Projektowanie elementów i węzłów konstrukcji o maksymalnej trwałości zmęczeniowej jest więc równoważne poszukiwaniu takich kształtów i wymiarów, które dają najmniejszy współczynnik koncentracji.

W pracy podjęto zadanie poszukiwania optymalnych kształtów spawanego złącza nakładkowego blach, które jak wykazuje praktyka inżynierska, przy jego tradycyjnym wykonaniu – na przykład takim jak przedstawiono na rys. 1 - ma niską trwałość zmęczeniową i wysoki współczynnik koncentracji naprężenia  $K_t$ . Na przykład, dla proporcji wymiarów i promieni zaokrągleń jak na rys. 1, maksymalna koncentracja występuje na linii wtopu spoiny, a współczynnik koncentracji obliczony z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) wynosi aż  $K_t=8$ . Na rys. 1 naniesiono rozkład współrzędnej naprężenia

#### 1. Introduction

Fatigue processes usually take place at the regions of high concentration of stresses, such as constructional joints. In the procedures of fatigue life prediction, one assumes that fatigue life is determined by the state of stress at the point where stresses take maximum values. Usually, such a point lies on a free surface, where we deal with a state of plane stress, and in particular cases – with an uniaxial state. In such cases, the stress value at a point can be calculated based on the concept of stress concentration factor  $K_t$ :

$$\sigma_{max} = \sigma_{nom} \cdot K_t \quad (1)$$

where:  $\sigma_{max}$  – maximal stress at concentration point,  $\sigma_{nom}$  – nominal (reference) stress.

The design of structure elements and joints of maximal fatigue life is then equivalent to searching for such shapes and dimensions of the elements and the joints that would ensure minimal stress concentration.

In this study, the author undertakes the quest for optimal shapes of overlapping weldment in sheet-metal plates. As it is known from engineer's practice, when such weldments are made by traditional methods – i.e. such as shown in Fig. 1 – their fatigue life is low, and stress concentration factor  $K_t$  is high.

For example, with dimension proportions and weld toe radii as in Fig. 1, maximal stress concentration appears on the line of weld fusion, and stress concentration factor calculated with the use of finite element method (FEM) is as high as  $K_t=8$ . The distribution of stress coordinate  $\sigma_{xx}$ , drawn in Fig. 1, shows

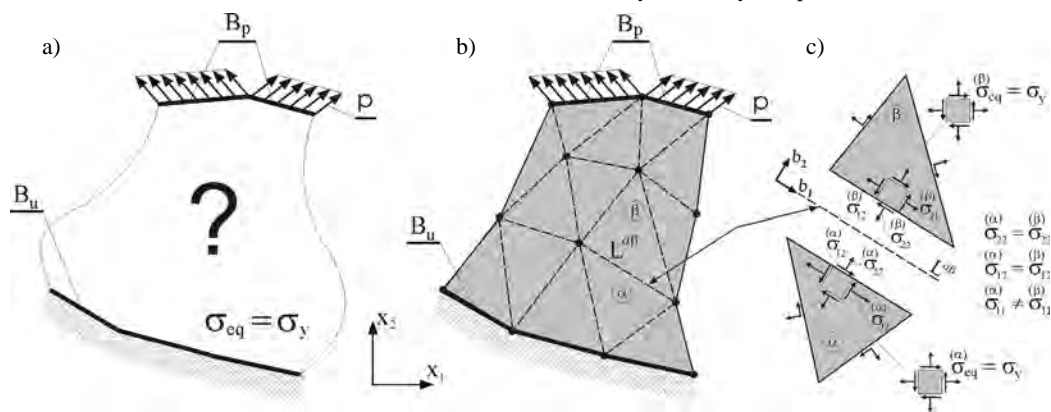




ny naprężenia  $s_{ij}^{(a)}$  i  $s_{ij}^{(b)}$  w obszarach 'α' i 'β', przedstawiono na rys. 2c. Spełnienie równań równowagi na tej linii wymaga aby współrzędne  $s_{22}^{(a)}$ ,  $s_{22}^{(b)}$  oraz  $s_{12}^{(a)}$  i  $s_{12}^{(b)}$  były równe. Mogą się różnić tylko współrzędne  $s_{11}^{(a)}$  i  $s_{11}^{(b)}$  (gdyby były równe to stany naprężenia w obu obszarach byłyby jednakowe).

W praktyce rozwiązanie zadania z rys. 1a jest konstruowane poprzez łączenie gotowych rozwiązań szczególnych, które w istniejącym oprogramowaniu metody jest zestawiane w formie bibliotek [1,2,5]. Projektant nie musi rozwiązywać żadnego układu linii nieciągłości naprężeń. Wystarczy, że dobierze i połączy (jak klocki) - z zachowaniem warunków równości wzajemnych oddziaływań na krawędziach łączenia - gotowe rozwiązania biblioteczne. Obecnie można w ten sposób konstruować nawet ustroje bardzo złożone [1,2].

Pole kinematycznie dopuszczalne to pole, które zachowu-



Rys.2. Poglądowa ilustracja sformułowania oraz rozwiązania zadania metodą SADSF  
 Fig. 2. Formulation and solution of the SADSF problem

je ciągłość odkształcającego się plastycznie ośrodka, spełnia kinematyczne warunki brzegowe i warunek dodatniości mocy dyssypowanej.

W pracy rozważono proste kinematycznie dopuszczalne mechanizmy zniszczenia analizowanego złącza i na tej podstawie znaleziono jego kształt i wymiary. Kształt ten okazał się bardzo zbliżony do otrzymanego z SADSF. Warto tu zwrócić uwagę, że inżynierskie obliczenia spoin są uzasadnione z twierdzenia o górnym oszacowaniu nośności granicznej - zakłada się zniszczenie spoin poprzez ich ścinanie.

Pewnym ograniczeniem stosowanych w pracy metod jest między innymi to, że operują one dalekim od rzeczywistości, uproszczonym sztywno-idealnie plastycznym modelem materiału i analizują jedynie stan graniczny konstrukcji odpowiadający początkowi rozwijania się dużych odkształceń plastycznych. Dlatego przydatność otrzymanych z ich wykorzystaniem rozwiązań powinna być potwierdzona na drodze numerycznej lub doświadczalnej.

Wyniki dotychczas przeprowadzonych badań rzeczywistych własności zaprojektowanych w ten sposób elementów wykazują ich dobre, a niekiedy bardzo dobre własności nośne [1,3,6,7,9-12]. W szczególności w ukształtowanych SADSF elementach stwierdzano m.in. zachowywanie małych deformacji w zakresie obciążeń eksploatacyjnych i prawie totalne niszczenie się przy obciążeniach granicznych, a także dobre wyrównane pola wyężenia w zakresie sprężystym i niskie kon-

ent states of stress  $s_{ij}^{(a)}$  and  $s_{ij}^{(b)}$  in regions 'α' and 'β' is shown in Fig. 2c. The condition necessary for satisfying equilibrium equations on this line requires the coordinates  $s_{22}^{(a)}$ ,  $s_{22}^{(b)}$  and  $s_{12}^{(a)}$ ,  $s_{12}^{(b)}$  be equal. Only the coordinates  $s_{11}^{(a)}$  and  $s_{11}^{(b)}$  can differ (if these were equal, the states of stress in both regions would be identical, as well).

In practice, the solution to the problem of Fig. 1a is constructed by assembling ready-made solutions, which are collected in the form of libraries in the existing software of the method [1,2,5]. The designer does not need to solve any system of stress discontinuity lines. It is enough to select and assembly (like the Lego blocks) the available library solutions, while preserving the conditions of equality of mutual reactions on the connection boundaries. Nowadays, it is possible to construct in that way even very complicated structures [1,2].

The kinematically admissible field is the one which preserves continuity of the plastically deformed medium, satisfies kinematic boundary conditions, and which is characterized by non-negative dissipated power.

In this work, we consider simple, kinematically admissible collapse mechanisms of the analysed joint, and on that basis we will find its shape and dimensions. It turns out that this shape is very similar to that obtained when using the SADSF method. It is worth mentioning that engineer's calculations of weldments are validated by the upper-bond limit theorems – where one assumes destruction of the weld due to shearing.

A certain limitation of the methods used in this work is, among other things, that they operate on a simplified, rigid ideally-plastic model of the material, which is far from reality. The methods analyse only the limit state of the structure associated with the beginning of development of large plastic deformations. For this reason, the usefulness of solutions obtained by using the methods should be verified by numerical or experimental investigations.

The results of examinations of actual properties of elements designed with the use of the described methods show that they have good, and sometimes even very good load capacity [1,3,6,7,9-12]. In particular, it was found that the elements shaped by using the SADSF method are characterised by, among other things, small strains in the range of working loads, well-equalised effort field in elastic range, low concentration of strains, and that

centracje deformacji.

Takich też własności oczekiwano dla projektowanego złącza, a ponadto dużej wytrzymałości przy obciążeniach zmiennych w czasie.

## 2. Kształtowanie połączenia nakładkowego metodą SADSF

Poglądowe sformułowanie oraz rozwiązanie zadania kształtowania analizowanego złącza otrzymane w ramach metody SADSF przedstawiono na rys. 3.

Danymi są tutaj (por. rys. 3a): obciążenie graniczne  $p$  przyłożone na brzegu  $B_p$ , geometria tej części brzegu  $B_p$  (wymiary:  $L, g$ ) oraz materiał poszukiwanego złącza.

Jak widać założono szczególną sytuację, tj. że grubość blachy środkowej jest równa dwóm grubościom blach zewnętrznych. Pozwoliło to przyjąć jednakowe obciążenie graniczne  $p = \sigma_y$  na brzegach  $B_p$  ( $\sigma_y$  - granica plastyczności materiału połączenia). Przyjęto także jednakowe własności plastyczne materiałów blach oraz spoin.

Tak postawione zadanie ma wiele rozwiązań. Nie jest to jednak wadą metody, pozwala bowiem na konstrukcję kilku rozwiązań i wybrania spośród nich tego, które spełnia dodatkowe kryteria wynikające np. z kosztów wykonania, trwałości zmęczeniowej itd.

Szkic jednego z otrzymanych pól, które daje kształty najbliższe do połączenia tradycyjnego przedstawiono na rys. 3b. Otrzymano je z wykorzystaniem programu RHM [5] poprzez połączenie gotowych rozwiązań bibliotecznych spełniających w każdym obszarze jednorodnym warunek Hubera-Misesa. Jak widać na rys. 3c w konstrukcji rozwiązania wykorzystano zaledwie dwa pola mające oznaczenia biblioteczne 's26x' i 'Ns'. Pola te w powiększeniu pokazano na rys. 3d. Pole 'Ns' realizuje jednoosiowe rozciąganie naprężeniami równymi granicy plastyczności  $\sigma_y$ . Stan naprężenia w polu 's26x' jest bardziej złożony i nie będzie tutaj omawiany.

Rozwiązanie przedstawione na rys. 3b w pełni określa kształt i wymiary projektowanego złącza. Otrzymano tu między innymi kąt nachylenia spoiny  $55^\circ$  oraz szerokość łączenia blach (szerokość spoiny)  $b = 2.12g$ .

Wymiary te uzyskane przy założeniu dolnej oceny nośności granicznej złącza, stanowią górną ocenę rzeczywistych wymiarów połączenia. Ich ocena dolna zostanie wyznaczona z analizy kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia.

## 3. Analizy kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia

Analizowano proste kinematycznie dopuszczalne mechanizmy zniszczenia, które przedstawiono na rys. 4a. Mechanizmy te polegają na ruchu sztywnych bloków przedzielonych krawędziami nieciągłości prędkości, które zaznaczono liniami grubymi

an almost total destruction takes place at limit loads.

One expects that the designed weldment would have similar properties, and, additionally, high fatigue life under time-variable loads.

## 2. Shaping overlapping weldment by SADSF method

Fig. 3 illustrates formulation of the problem of how to shape the analysed joint, and presents solution to this problem obtained by applying the SADSF method.

Here, the data are (see Fig. 3a): limit load  $p$  applied to the boundary  $B_p$ , geometry of this part of boundary  $B_p$  (dimensions  $L, g$ ), and material of the designed joint.

As it can be seen in Fig. 3a, one assumes a particular case, when the thickness of the central plate is twice greater than thicknesses of outer plates. It allows for assuming equal limit loads,  $p = \sigma_y$  on the boundaries  $B_p$  ( $\sigma_y$  - yield point of the joint material). One also assumes identical plastic properties of materials of the plates and welds.

There are many solutions to the problem formulated in this way. Nevertheless, this is not a disadvantage of the method, because it makes it possible to construct several solutions, and to choose the one which satisfies additional criteria - concerning, for example, production costs, fatigue life, etc.

Fig. 3b presents a sketch of some of the obtained fields, the

ones which provide shapes closest to a traditional weldment. The fields were calculated with the use of the RHM software [5] by assembling the available library solutions which satisfy the Huber-Mises criterion in any of their homogeneous regions. As it can be seen in Fig. 3c, only two fields were used to construct the solution, the ones having library denotations 's26x' and 'Ns', respectively. Magnified view of these fields is shown in Fig. 3d. The field 'Ns' realises uniaxial tension with stresses equal to the plasticity limit  $\sigma_y$ . The state of stress in the field 's26x' is more complex, and will not be discussed here.

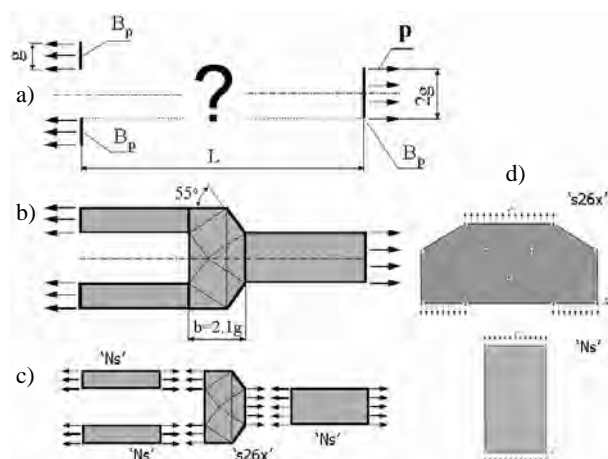
The solution presented in Fig. 3b fully determines shape

and dimensions of the designed weldment. One obtains, among other things, weld inclination angle equal to  $55^\circ$  and the length of the weld leg (the weld width),  $b = 2.12g$ .

The dimensions were obtained under the assumption of lower-bond evaluation of load capacity of the joint. They are estimates of upper limits of actual dimensions of the joint. The lower limits evaluation will be done through the analysis of kinematically-admissible collapse mechanisms.

## 3. Analyses of kinematically-admissible collapse mechanisms

One analyses simple, kinematically-admissible collapse mechanisms, which are presented in Fig. 4a. The mechanisms consist in motion of rigid blocks separated by the edges of velocity discontinuity, drawn as thick lines in the figure. In the cases



Rys. 3. Sformułowanie i rozwiązanie zadania kształtowania połączenia nakładkowego z wykorzystaniem metody SADSF

Fig. 3. Formulation and solution of the overlap welded joint by using the SADSF method

mi. W przypadku mechanizmów 1 i 2 krawędzie te są nachylone do kierunku rozciągania pod kątem  $45^\circ$ . Mechanizm 3 polega na ścięciu wzdłuż krawędzi o długościach  $R$  nachylonych pod kątem  $\phi$  do osi złącza. Na każdej krawędzi nieciągłości musi działać naprężenie styczne  $\tau = \sigma_y/2$  (przyjęto warunek Treski). W każdym przypadku zakładano, że część blachy środkowej do której przyłożono obciążenie  $p$  porusza się z prędkością poziomą  $V$ . Prędkości pozostałych elementów muszą się tak dobrać żeby zachowana była ciągłość materiału - dla każdego mechanizmu będą one inne i na rys. 4a ich nie naniesiono. Układając bilanse mocy dla mechanizmów 1 i 2 otrzymano graniczną wartość obciążenia:

$$p_{gr} = \sigma_y \quad (2)$$

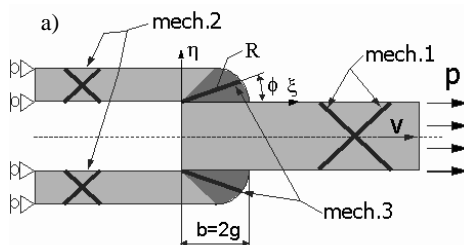
Obciążenie to jest równe obciążeniu zakładanemu podczas projektowania SADSf. Widać więc, że o rzeczywistej nośności złącza decyduje jego kształt w obszarze połączenia blach (spoiny) i realizujące się tam mechanizmy zniszczenia. Najbardziej prawdopodobnym wydaje się mechanizm 3. Układając dla niego bilans mocy i przyjmując wartość obciążenia granicznego jak dla mechanizmów 1 i 2 otrzymano zależność:

$$R = 2g \cos(\phi) \quad (3)$$

Zmieniając  $\phi$  w granicach od 0 do  $45^\circ$  i wyznaczając  $R$  z powyższego równania wyznaczono kształt, który przedstawiono na rys. 4b. Jak widać jest to ćwiartka okręgu, którego równanie we współrzędnych  $\{\zeta, \eta\}$  można zapisać następująco:

$$(\zeta - g)^2 + \eta^2 = g^2 \quad (4)$$

Wynikowy kształt połączenia przedstawia rys. 4b. Kształt ten jest bardzo bliski otrzymanemu z pól statycznie dopuszczalnych (por. rys. 3b). Otrzymane przewymiarowanie (wniosek 1) jest w tym przypadku niewielkie.



Rys.4. Kinematyczne mechanizmy zniszczenia i otrzymany kształt spoiny

Fig. 4. Kinematic mechanisms of plastic collapse and obtained weld shape

W obydwu przypadkach otrzymane kształty istotnie różnią się od typowo wykonywanych złącz nakładkowych przede wszystkim szerokością łączenia blach (wymiar  $b$ ). Jak wykazują przeprowadzone analizy szerokość spoiny tego połączenia powinna zawierać się w wąskim przedziale:

$$2.12g \geq b \geq 2g \quad (5)$$

podczas gdy w połączeniach tradycyjnych jest ona przyjmowana jako  $b=1g$ . Zaskakujące jest to, że praktyka inżynierska tego nie zauważa, a powinien to być wynik znany z teorii nośności granicznej, bo przecież – jak już powiedziano we wstępie - metody obliczeń Podstaw Konstrukcji Maszyn – m.in. obliczanie ‘na ścięcie’ nitów, wpustów, a także spoin - w twierdzeniu o górnej ocenie mają swoje uzasadnienie.

of mechanisms 1 and 2, the edges are inclined by an angle of  $45^\circ$  relative to tension direction. Mechanism 3 consists in shearing along the edges of lengths  $R$  inclined by an angle  $\phi$  relative to the joint axis. On each discontinuity edge, there must exist a shear stress  $\tau = \sigma_y/2$  (one assumes Treska condition). In each case, it was assumed that the part of the central plate to which the load  $p$  is applied moves with horizontal velocity  $V$ . The velocities of the remaining parts of the material have to adjust to it in order to preserve continuity of the material. These velocities are different for each kind of the mechanisms, so that they are not indicated in Fig. 4a. By making up the balance of powers for mechanisms 1 and 2, one obtains the limit value of load:

$$p_{gr} = \sigma_y \quad (2)$$

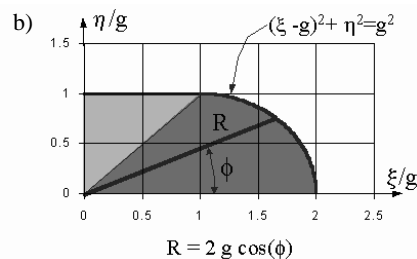
The load is equal to that assumed in the design by the SADSf method. Then, one can see that the shape of the weldment (the shape of the weld area), and the collapse mechanisms that exist there, determine actual load capacity of the joint. Mechanism 3 seems to be the most probable one. Making up the balance of powers for it, and assuming the value of limit load as for mechanisms 1 and 2, one obtains the relationship:

$$R = 2g \cos(\phi) \quad (3)$$

Varying the value of  $\phi$  within the range from 0 to  $45^\circ$ , and using the  $R$  value calculated with the above equation, one obtains the shape of weld presented in Fig. 4b. As it can be seen, it is a quarter of a circle, whose equation in the coordinates  $\{\zeta, \eta\}$  is:

$$(\zeta - g)^2 + \eta^2 = g^2 \quad (4)$$

The resulting shape of the weldment is shown in Fig. 4.b. This shape is very close to that derived from the statically-admissible stress fields (see Fig. 3b). The change in dimensioning (Conclusion 1) is insignificant in this case.



In both cases, the shapes of joints significantly differ from those of typically-made overlapping weldments, first of all by the weld leg length (dimension  $b$ ). According to the performed analyses, the weld leg length should be kept within a narrow interval:

$$2.12g \geq b \geq 2g \quad (5)$$

while in traditional joints it is assumed that  $b=1g$ . It is quite surprising that this discrepancy has not been noticed in engineer's practice. This result should have been known from the theory of limit load capacity, because – as it was mentioned in the Introduction – the calculation methods of the Machine Design Fundamentals, including those concerning the resistance of rivets, keys, as well as welds to shear, are based upon the theorem of upper-bound evaluation.

W dalszej części pracy badany jest wpływ wymiaru  $b$ , przy ustalonych pozostałych wymiarach złącza na współczynnik koncentracji naprężenia i trwałość zmęczeniową.

#### 4. Wyniki analiz MES

Wpływ szerokości łączenia na wartość współczynnika koncentracji analizowano wykorzystując MES. Analizy prowadzono przy założeniu (por. rys. 5a):  $g=10$ ;  $g/r=0.1$  i kąta pochylenia spoiny równego  $45^\circ$ . Zmieniało się jedynie szerokość łączenia  $b$  w zakresie od  $g$  do  $2.5g$ .

W obliczeniach zakładano dodatkowo m.in.: liniowo-sprężysty model fizyczny materiału, małe przemieszczenia, płaski stan naprężenia i elementy typu SHELL3 (nie uwzględniano wpływu szerokości blach - wymiar w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rys. 5a), obciążenie równe połowie wyznaczonej wartości granicznej. Rozpatrywano jedynie symetryczną połowę połączenia, a obliczenia wykonywano przy pomocy pakietu CosmosM.

Jak zmienia się współczynnik koncentracji  $K_t$  przy zmianach stosunku wymiarów  $b/g$ , pokazują wyniki przedstawione na rys. 5b. Przy stosunku wymiarów  $b/g=1$  otrzymuje się współczynnik koncentracji  $K_t=8$ , natomiast dla  $b/g=2.12$  - dobrego według SADSF - wartość tego współczynnika spada aż do  $K_t=3.83$ . Warto zauważyć, że już niewielkie zwiększenie szerokości łączenia skutkuje dużym zmniejszeniem współczynnika koncentracji - dla  $b/g=1.25$  otrzymano  $K_t=6.18$  (spadek o ponad 22%), a dla  $b/g=1.5$  współczynnik ten wynosi  $K_t=5.1$  (spadek o 36%).

Zazwyczaj w przypadku tego typu połączeń stosuje się wystawienie grubszej blachy poza spoinę tak jak to przedstawiono na rys. 6a. Dlatego wykonano również serie obliczeń dla takiego przypadku, przy założeniu, że stosunek wymiarów  $b/g$  zmienia się jak w wariancie wcześniejszym, natomiast wysunięcie (wymiar  $a$ ) jest stałe i równe  $a=g$ . Otrzymane wyniki ilustruje rys. 6b. W tym przypadku otrzymujemy duże naprężenia również na konturze, po drugiej stronie spoiny. Dlatego wprowadzono tutaj dwa współczynniki koncentracji  $K_{t1}$  i  $K_{t2}$  (por. rys. 6a). Naprężenia na brzegu z lewej strony spoiny są tutaj nawet większe ( $K_{t2}$ ). W przypadku jednak, gdy do złącza jest przyłożona siła rozciągająca, otrzymujemy tam ściskanie i nie ma ono wpływu na trwałość zmęczeniową połączenia.

Współczynnik koncentracji liczony na linii wtopu ( $K_{t1}$ ) jest w tym przypadku mniejszy, niż w wariancie bez wysunięcia (por. rys. 6b), szczególnie w zakresie stosunku wymiarów:  $1 \geq b/g \geq 1.75$ .

#### 5. Prognozowanie trwałości zmęczeniowej

Analizy zmęczeniowe wykonano z wykorzystaniem metody odkształceń lokalnych (metoda  $\epsilon$ -N) i skoncentrowano się na wyznaczaniu okresu inicjacji pęknięć. Wszystkie obli-

W In the next part of the paper, we will examine the influence of the dimension  $b$ , with fixed values of the remaining dimensions, on stress concentration factor and fatigue life of the joint.

#### 4. Results of FEM analyses

The influence of the weld leg length on the value of stress concentration factor was analysed using the FEM. The analyses were carried out under the assumptions (see Fig. 5a):  $g=10$ ;  $g/r=0.1$ , weld inclination angle equal to  $45^\circ$ . Only the leg length  $b$  was changed in the range from  $g$  to  $2.5g$ .

In the calculations, one additionally assumed, among other things, linearly-elastic model of the material, small strains, plane state of stress and elements of type SHELL3 (the influence of the width of sheet-metal plates - the dimension in the direction perpendicular to the plane of Fig. 5a - was not taken into account), and the load equal to a half of the determined limit value. One considered only one of the symmetrical parts of the joint. The calculations were performed by means of the software package CosmosM.

The results presented in Fig. 5b show the changes of the stress concentration factor  $K_t$  in the function of dimension ratio  $b/g$ . When the ratio is equal to  $b/g=1$ , one obtains  $K_t=8$ . However, for  $b/g=2.1$  - the value selected according to the SADSF method - this factor decreases to the value as low as

$K_t=3.83$ . It is worth noticing that even small increase of the leg length results in significant decrease of stress concentration factor - i.e. for  $b/g=1.25$  one obtains  $K_t=6.18$  (a drop by over 22%), and for  $b/g=1.5$ , stress concentration factor is equal to  $K_t=5.1$  (a 36% drop).

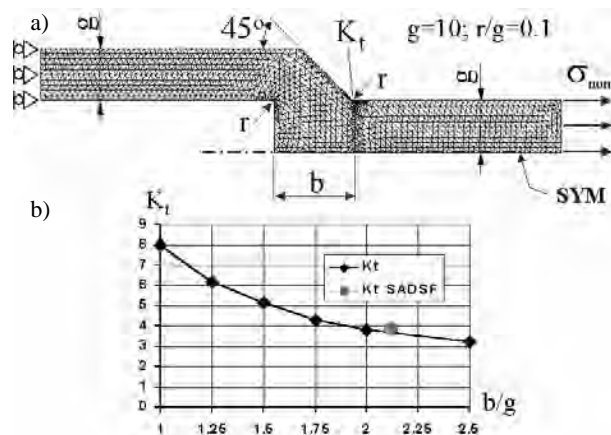
Usually, in this kind of joints, the edge of the thicker (central) plate is shifted beyond the edge of the weld, as it is shown in Fig. 6a. For this reason, we performed a series of calculations also for such an arrangement of plates, assuming that the dimension ratio  $b/g$  changes in the same range as in the previous variant, while the plate shift (dimension  $a$ ) is constant and equal to  $a=g$ .

The obtained results are illustrated by Fig. 6b. In this case, we obtain high stresses also on the contour at the other side of the weld. Therefore, two stress concentration factors,  $K_{t1}$  and  $K_{t2}$ , should be introduced here (see Fig. 6a). The stresses on the left-side edge of the weld ( $K_{t2}$ ) are even greater here. However, when a tensional force is applied to the joint, a compression stresses appears there, which has no effect on fatigue life of the joint.

The stress concentration factor on the weld fusion line ( $K_{t1}$ ) calculated in this case is smaller than that in the variant without the inner plate shift (see Fig. 6b), especially for dimension ratio in the range of  $1 \geq b/g \geq 1.75$ .

#### 5. Prediction of fatigue life

The fatigue analyses were performed with the use of local strain method (the  $\epsilon$ -N method), and concentrated on determining the fatigue crack initiation lives. All the calculations were



Rys.5. Model MES i otrzymany przebieg współczynnika koncentracji naprężenia w funkcji szerokości spoiny  $b$

Fig. 5. The finite element model and evolution of stress concentration factor  $K_t$  as a function of the weld leg length  $b$

czenia były wykonywane z wykorzystaniem programu FALIN [4]. Szacowanie okresu inicjacji przeprowadzono w punktach na linii wtopu gdzie podczas obliczeń MES stwierdzono maksymalne koncentracje. W tych miejscach spodziewamy się, że pęknięcia będą się inicjowały w pierwszej kolejności.

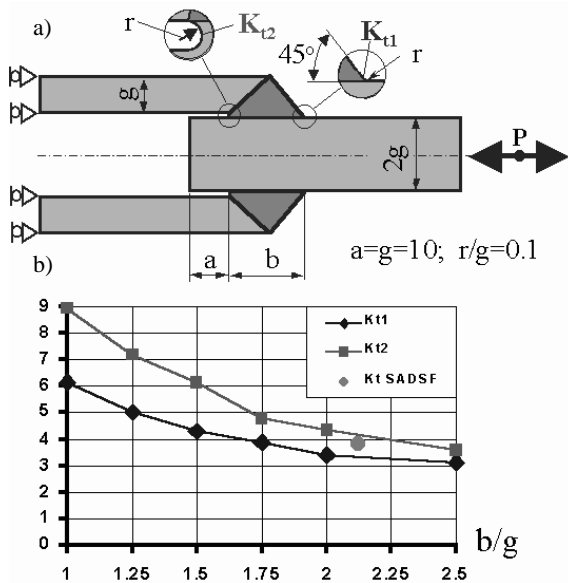
Otrzymane z MES wyniki posłużyły do dalszych analiz szacowania okresu inicjacji pęknięć zmęczeniowych, które przeprowadzono zakładając m.in.:

- materiał połączenia stal A-356, której własności zmęczeniowe pokazano na rys. 7a i 7b;
- obciążenie naprężeniami nominalnymi  $\sigma_{nom}$  w postaci powtarzającego się bloku, którego przebieg przedstawiono na rys. 7c; zawiera on 1132 punkty, a maksymalne i minimalne naprężenia wynoszą odpowiednio: 50.4 [MPa] i -43.088 [MPa];
- wykorzystanie hipotezy Neubera [4,8,13] do wyznaczenia odkształceń w analizowanych punktach.

Otrzymane wyniki w postaci liczby bloków obciążeń do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego otrzymanych dla różnych stosunków wymiarów  $b/g$  przedstawiono na rys. 8b. Jak widać różnica w trwałości pomiędzy połączeniem wykonanym tradycyjnie a zaprojektowanym SADSf wynosi 50 razy.

Z pewnością wykonywanie połączeń nakładkowych przy  $b/g \approx 2$  jest trudniejsze do wykonania i droższe. Może być to jednak opłacalne do zastosowania w przypadku konstrukcji odpowiedzialnych lub już istniejących, które pękają. Poszerzenie szerokości łączenia, a tym samym radykalne zwiększenie trwałości zmęczeniowej, jest bowiem możliwe do uzyskania, bez konieczności zmiany podstawowych parametrów geometrycznych połączenia, takich jak grubości blach czy jego ogólne wymiary.

Warto zwrócić uwagę, że zwiększenie stosunku wymiarów



Rys.6. Połączenie nakładkowe z wystawieniem blachy poza spoinę oraz przebiegi współczynników koncentracji  $K_{t1}$  i  $K_{t2}$  w funkcji szerokości spoiny  $b$

Fig. 6. The overlap weldment with the excess of material in the weld root region, the evolution of the weld toe ( $K_{t1}$ ) and the weld root ( $K_{t2}$ ) stress concentration factors with the increase of the weld leg length  $b$

performed with the use of the FALIN software [4]. Estimation of the crack initiation life was made at the points on the weld fusion line, where peak stress concentrations were detected by FEM calculations. We expected that the cracks would be initiated firstly at these points.

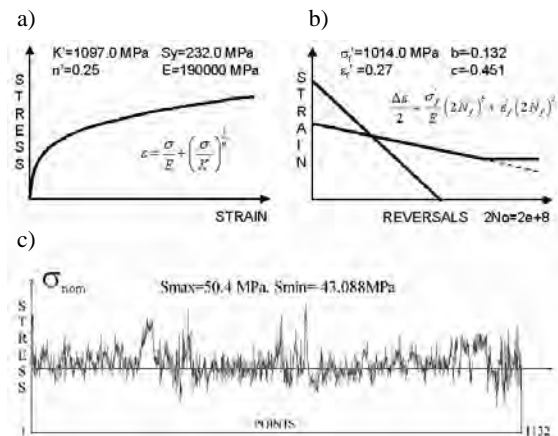
The results obtained by the FEM were consequently used for further analyses in order to evaluate the fatigue crack initiation life. In these analyses, one assumed:

- material of the joint – steel A-356, whose fatigue properties are shown in Figs. 7a and 7b;
- loading with reference stress  $\sigma_{nom}$  history in the a block form, whose course is shown in Fig. 7c; in each stress block there are 1132 reversal points; maximal and minimal stress values are 50.4 [MPa] and -43.088 [MPa], respectively;
- the Neuber rule [4,8,13] applied for determining strains at the analysed points.

The results are presented in Fig. 8a. The graph shows the number of blocks applied before the initiation of fatigue crack plotted against the dimension ratio  $b/g$ . As it can be seen, fatigue life of the joint designed with the SADSf method is 50 times greater than life of a traditionally-made joint.

Undoubtedly, it is more difficult and more expensive to make overlapping weldments with  $b/g \approx 2$ . However, it might be profitable in the case of high-performance structures, or in some existing structures where cracks have already appeared. Extending the weld leg length, and at the same time radically improving fatigue life, is possible to achieve without the necessity of changing fundamental geometrical parameters of the joint, such as thickness of the plates, or their overall dimensions.

It is worth noticing that, by changing the dimension ratio  $b/g$  only from 1 to 1.25, one can increase crack initiation life



Rys.7. Własności zmęczeniowe materiału połączenia oraz założony przebieg  $\sigma_{nom}$  jednego bloku obciążenia

Fig. 7. The cyclic and fatigue material properties used in the fatigue analyses and the nominal stress history

$b/g$  tylko z 1 do 1.25 daje prawie czterokrotne zwiększenie okresu inicjacji pęknięć, a dla  $b/g=1.5$  okres ten zwiększa się dziesięciokrotnie.

6. Siły wewnętrzne w złączach zakładkowym i nakładkowym

Uzyskany w złączu nakładkowym współczynnik koncentracji jest bardzo duży, jeśli wziąć na przykład pod uwagę podobne - przynajmniej geometrycznie - złącze zakładkowe, które przedstawiono na rys. 9a. Dla tego złącza - wyznaczony z wykorzystaniem MES - współczynnik koncentracji jest ponad sześciokrotnie mniejszy ( $8/1.3 \approx 6.15$ ). Gdzie tkwi przyczyna tego stanu rzeczy?

Żeby to stwierdzić, należy przeanalizować siły wewnętrzne w obu złączach, a przede wszystkim w przekrojach poprzecznych poprowadzonych przez punkty na linii wtopu spoiny gdzie stwierdzono maksymalne koncentracje (rys. 9,10).

Na początek należy zauważyć, że w odróżnieniu od złącza zakładkowego na symetryczną połówkę złącza nakładkowego oprócz obciążenia zewnętrznego naprężeniami  $\sigma_{nom}$ , działają jeszcze naprężenia  $\sigma_{yy}$  na osi symetrii, których otrzymano z MES rozkład przedstawiono na rys. 10a. To właśnie te naprężenia powodują 'powstawanie' tak dużej koncentracji na linii wtopu. Ich istnienia nie da się wyeliminować, zapewniają one bowiem spełnienie równania równowagi globalnej momentów symetrycznej połówki złącza (rys. 10a).

Naprężenia te powodują, że w symetrycznej połowce przekroju złącza nakładkowego działają - oprócz siły rozciągającej  $P$ , która występuje również w złączu zakładkowym (rys. 9b) - siła poprzeczna  $Q$  i moment  $B$  (rys. 10a). W całym przekroju poprzecznym złącza otrzymujemy układ sił, który przedstawiono na rys. 10b.

Szczególnie interesujące jest tutaj występowanie wzajemnie się równoważących dwóch momentów  $B$  czyli faktycznie bimomentu, który byłby nie do wykrycia bez analiz rozkładów sił wewnątrz złącza, a który ma zasadniczy wpływ na wielkość maksymalnej koncentracji. Bimoment można również zidentyfikować analizując w rozważanym przekroju rozkład naprężeń  $\sigma_{xx}$ , który pokazano na rys. 10c.

Zwiększenie szerokości spoiny powoduje zmniejszenie naprężeń  $\sigma_{yy}$  działających z prawej strony poprowadzonego przez linię wtopu przekroju, a tym samym zmniejszenie momentów  $B$  i koncentracji na brzegu. Otrzymane dla różnych stosunków

almost four times, and for  $b/g = 1.5$  this parameter increases almost tenfold.

6. Internal forces in lap and overlapping weldments

The stress concentration factor obtained in overlapping weldment is very high, even if one compares it to a similar – at least in a geometrical sense – lap weldment, such as presented in Fig. 9a. Stress concentration factor in this weldment, determined with the use of the FEM method, is over six times lower ( $8/1.3 \approx 6.15$ , see Figs. 8a and 9a). What is the reason for that?

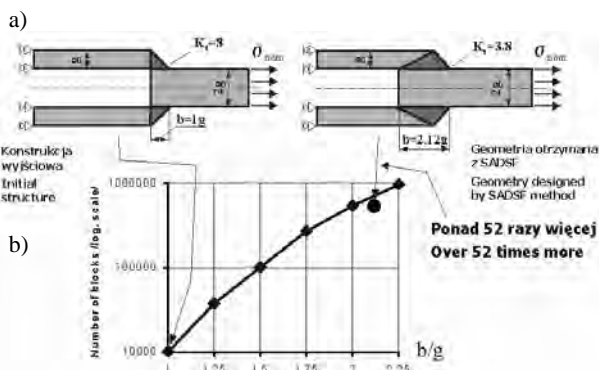
In order to answer this question, one must analyse internal forces in both joints, first of all the forces in cross-sections passing through the points on the weld fusion line, where maximal stress concentrations appear (Figs. 9,10).

Besides, we must notice that, contrary to what happens in a lap joint, symmetrical halves of an overlapping joint are loaded not only by external stresses  $\sigma_{nom}$ , but also by stresses on the symmetry axis  $\sigma_{yy}$ , whose distribution, calculated by FEM, is plotted in Fig. 10a. These are the stresses which 'should be blamed' for such a high concentration on the fusion line. They can not be eliminated, because their existence is necessary for the fulfilment of equation of global equilibrium of moments in a symmetrical half of the joint (Fig. 10a).

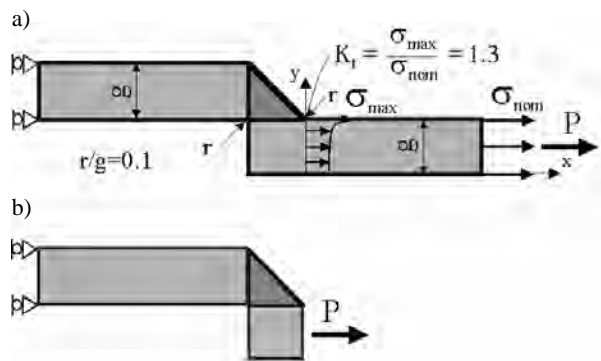
Due to the existence of the mentioned stresses, in each symmetrical half of an overlapping joint there appear the transverse force  $Q$  and the moment  $B$  (Fig. 10a), which act together with the tensional force  $P$  – the one that exists also in a lap joint (Fig. 10a). Then, in the whole cross-section of the joint, we obtain the system of forces shown in Fig. 10b.

The most interesting thing is the existence of two moments  $B$  which counterbalance one another. In fact, it is a bi-moment, whose presence would not be possible to detect without the analyses of force distributions within the joint, and which has a decisive impact on stress concentration. The bi-moment can also be identified by analysing stress distribution  $\sigma_{xx}$  in the considered section, as shown in Fig. 10c.

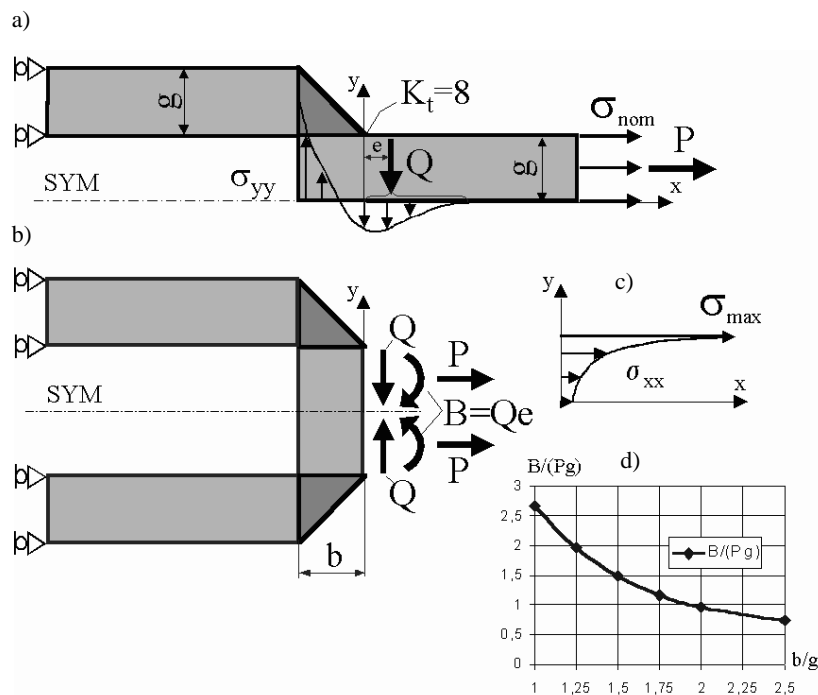
The increase of weld leg length will result in a decrease of stresses  $\sigma_{yy}$  acting at the right side of the cross-section passing through the fusion line. At the same time, the moment  $B$  and stress concentration on the edge will also decrease. The values of moment  $B$  calculated for different dimension ratios  $b/g$  are



Rys.8. Efekt zwiększenia okresu inicjacji pęknięć w punktach najbardziej zagrożonych  
 Fig. 8. Effect of the fatigue crack initiation life at the critical location



Rys.9. Siły wewnętrzne w połączeniu zakładkowym  
 Fig. 9. Internal forces in the lap welded joint



Rys.10. Siły wewnętrzne w połączeniu nakładkowym  
 Fig. 10. Internal forces in the overlap welded joint

wymiarów  $b/g$  wartości momentu  $B$  przedstawiono na rys. 10d. Podobny efekt uzyskuje się poprzez wprowadzenie wysunięcia blachy poza spoinę.

plotted in Fig.10d. A similar effect can be obtained by shifting the plate beyond the weld.

### 7. Wnioski

Bardzo często wstępny kształt i wymiary elementów konstrukcyjnych i połączeń są dobierane w sposób intuicyjny, w którym bazuje się na rozwiązaniach już istniejących itp. Takie podejście prowadzi w bardzo wielu przypadkach do rozwiązań o niskim poziomie jakościowym, które są następnie poddawane kosztownym analizom, a otrzymane rezultaty tą niską jakością jedynie potwierdzają, bez wskazania kierunków ewentualnej poprawy.

Jak pokazują wyniki tej pracy do wyznaczania wstępnych kształtów możemy stosować metody nośności granicznej. Konstrukcje zaprojektowane prawidłowo z punktu widzenia nośności granicznej mają dobre własności nośne, a w szczególności dobre wyrównanie sprężystego wyężenia, niskie koncentracje deformacji w tym zakresie i w konsekwencji dużą trwałość zmęczeniową.

Tak samo dobre własności stwierdzono w przypadku kilkudziesięciu przebadanych dotychczas numerycznie i eksperymentalnie konstrukcji [3,6,7,9-12], które zostały zaprojektowane metodą SADSf. Własności takie można już uważać za oczekiwane.

### 7. Conclusions

Very often, initial shape and dimensions of constructional elements and joints are chosen in an intuitive way, when one follows the concepts of already-existing solutions, etc. Such an approach may lead, in many cases, to solutions of inferior quality, which must consequently be subjected to costly analyses, and the results of these analyses only confirm low quality of the structures, without giving any hints about directions of possible improvements.

The results of this study indicate that the limit analysis methods may well be used to determining initial shapes of the elements and joints. Correctly designed structures – according to the criteria of limit load – have good load-carrying properties. In particular, they exhibit good equalization of elastic effort, low strain concentrations in elastic range, and high fatigue life.

Equally good properties have been confirmed so far in several dozens of structures designed with the use of the SADSf method, examined numerically and experimentally by the author [3,6,7,9-12]. We can then assume that similar properties can be generally expected.



### 8. References

- [1] Bodaszewski W., Szczepiński W.: *Kształtowanie elementów konstrukcji metodą nieciągłych pól naprężeń*, BEL Studio 2005, PWN 2006.
- [2] Bodaszewski W.: *The software package KNPN for approximated shaping of complex plastic structures*, VII Sympozjum Stateczności Konstrukcji, 1997, str. 25-30.
- [3] Bodaszewski W., Markiewicz I.: *Badania powłok ukształtowanych metodą SDNPN w zakresie pełnych ścieżek równowagi*, XIX Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka, 2000, str. 145-150.
- [4] Glinka G.: *Fatigue Software Package FALIN*, Stress and Fatigue-Fracture Design Inc. (SaFFD, Inc.), RR#2 Petersburg, Ontario N0B 2H0, Canada, 2002.
- [5] Markiewicz I.: *Nmeryczne wyznaczanie statycznie dopuszczalnych układów linii nieciągłości naprężeń w polach granicznych, spełniających warunek plastyczności Hubera-Misesa*, Politechnika Warszawska 1996.
- [6] Markiewicz I.: *Nmeryczne badania sprężystych pól wyężenia w segmencie skręcanego wysięgnika kratowego ukształtowanego metodą SDNPN*, XIII konf. nt. Problemy rozwoju maszyn roboczych, Zakopane 2000, t. 2, str.17-22.
- [7] Markiewicz I., Bodaszewski W., Glinka G.: *Global and Local Design Method for Fatigue Resistant Structures*, SAE 2003 Transactions, Journal of Materials and Manufacturing, Section 5 - Volume 112, p. 467-477.
- [8] Sobczykiewicz W., Glinka G., Jakubczak H.: *Fatigue Design of Earthmoving Machines*, International Symposium on Fatigue Design, Helsinki, Finland, 1992, Proceedings, pp. 283-298.
- [9] Szczepiński W.: *Projektowanie elementów maszyn metodą nośności granicznej*, PWN, 1968.
- [10] Szczepiński W., Dietrich L.: *Plastic Design of Complex Shape Structural Elements - A Theoretical and Experimental Study*, Paryż 1981, 1 - 8.
- [11] Szczepiński W., Szlagowski J.: *Plastic Design of Complex Shape Structures*, Ellis Horwood & PWN, Warszawa - Chichester 1990.
- [12] Szlagowski J.: *Metodyka kształtowania wytrzymałościowego elementów konstrukcji wg kryterium nośności granicznej*, Prace IPPT PAN, 25/1990.
- [13] Wetzel R. M.: (ed.), *Fatigue under Complex Loading: Analysis and Experiments*, vol. 6, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1977.
- [14] Chan S.W.K.: *The Strength of Fillet Welded Joints in Steels Subjected to Static Loading - a Review*, The Welding Institute, Cambridge, UK, Paper No. 379, 1988.

---

**Dr inż. Ireneusz MARKIEWICZ**

Politechnika Świętokrzyska  
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn  
Katedra Mechaniki  
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7  
25-314 Kielce  
e-mail: zwmim@tu.kielce.pl

---

## PSYCHOLOGICZNE CZYNNIKI BEZPIECZEŃSTWA RUCHU DROGOWEGO

### PSYCHOLOGICAL FACTORS IN ROAD SAFETY

Artykuł ma na celu zapoznanie czytelnika z zagadnieniami związanymi z określeniem niektórych predyspozycji psychicznych kierowcy istotnych dla bezpiecznego prowadzenia pojazdu. Przedstawiona została także rola psychologicznych badań kierowców w działaniach profilaktycznych na rzecz bezpieczeństwa ruchu drogowego.

**Słowa kluczowe:** kierowca, badania psychologiczne, sprawność psychiczna

*The aim of the article is to introduce the reader to the issues defining some of the psychological predispositions of a driver essential to safe driving. The article also presents the role psychological testing of drivers plays in road safety prevention.*

**Keywords:** driver, psychological tests, psychology of transport.

#### 1. Wprowadzenie

W systemie bezpieczeństwa ruchu drogowego decydującym czynnikiem sprawczym jest człowiek, z jednej strony występuje jako współtwórca ruchu drogowego, a z drugiej strony jako użytkownik drogi. Bezpieczne funkcjonowanie kierowcy w ruchu drogowym w dużym stopniu zależy od jego własności psychofizycznych, przystosowania społecznego, kultury jazdy, dyscypliny społecznej, kontroli emocjonalnej, umiejętności radzenia sobie w złożonej sytuacji zadaniowej jaką jest prowadzenie pojazdu samochodowego. Wypadki drogowe powstają zarówno na skutek psychofizycznych niedoskonałości uczestników ruchu drogowego, jak też łamania przez nich przepisów i braku umiejętności prowadzenia pojazdów przez kierujących.

Prowadzenie pojazdu to układ wzajemnie ze sobą powiązanych możliwości, wiedzy, umiejętności, postaw i emocji człowieka. System ruchu drogowego obejmuje trzy nierozdzielne elementy, są nimi: człowiek - pojazd - droga. Uczestnictwo w ruchu drogowym jest złożonym systemem czynności i zachowań w specyficznej sytuacji w przestrzeni poprzez kształtowanie relacji z innymi.

Sprawność w kierowaniu pojazdem zawiera trzy aspekty:

- sprawność fizyczna (określana w badaniach lekarskich);
- sprawność psychiczna (badana w ramach psychologicznych kierowców);
- wiedza, umiejętności i postawy prowadzącego pojazd.

#### 2. Predyspozycje psychiczne kierowcy istotne dla bezpieczeństwa ruchu drogowego

Do oceny sprawności psychicznej kierowcy opracowano w Zakładzie Psychologii Transportu Drogowego Instytutu Transportu Samochodowego specjalną baterię testów - „Metodykę psychologicznych badań kierowców”. Badania obejmują następujące cechy psychiczne, intelektualne i osobowościowe:

1. szybkość i dokładność spostrzegania;
2. widzenie stereoskopowe (przestrzenne), niezbędne przy wykonywaniu takich manewrów, jak wymijanie, wyprzedzanie, omijanie;
3. umiejętność oceny prędkości pojazdów w ruchu, niezbędna do ustalenia właściwej prędkości i odległości przy wyprzedzaniu;

#### 1. Introduction

In the system of road safety, the human being is the decisive element. He or she is, on the one hand, a co-creator of road traffic, and, on the other, a user of roads. A driver's safe action in road traffic is to a large extent dependent on his or her psychophysical characteristics, social conformability, good manners in driving, social discipline, emotional self-control, and the ability to cope with a complex task-oriented situation which driving a vehicle is. Car accidents are caused as a result of psychophysical disabilities of the participants of road traffic, their breaking of traffic regulations, and lack of skills on the part of drivers.

Driving a vehicle is a system of co-related aspects such as capabilities, knowledge, skills, attitudes, and emotions of a person. Road traffic consists of three inseparable elements: a human, a vehicle, and the road. The participation in traffic is a complex system of activities and behaviour in a specific situation in space through shaping the relations with others.

Competence in driving a vehicle comprises three aspects:

- physical ability (defined by medical tests)
- psychological ability (tested within psychological frames)
- knowledge, skills, and attitudes of a driver

#### 2. A driver's psychological characteristics essential for road safety

In order to evaluate the psychological ability of a driver, a special set of tests was designed by the Department of Psychology of Road Transport at the Institute of Car Transport. The tests are called “Methodology of psychological testing of drivers”, and they consist of the following psychological, intellectual and personality features:

1. speed and accuracy of perception;
2. stereoscopic vision (spatial), which is essential while performing such maneuvers as passing and overtaking;
3. the ability to evaluate the speed of vehicles in motion, which is essential to establish an appropriate speed and distance while overtaking;

4. widzenie w mroku i wrażliwość na olśnienie – funkcja, bez której prowadzenie pojazdu nocą jest nie tylko uciążliwe, ale przede wszystkim niebezpieczne; kKoordynacja wzrokowo–ruchowa, umożliwiająca płynne, poprawne działanie, adekwatne do spostrzeganej sytuacji;
5. czas reakcji, jej stałość i równomierność;
6. wybrane cechy pamięci (na przykład pamięć wzrokowa, kinestetyczna, itp.);
7. sprawność myślenia;
8. funkcje uwagi, koncentracja;
9. szybkość i dokładność podejmowania decyzji;
10. odporność na presję czasu;
11. niektóre cechy osobowości i temperamentu.

Wyjaśniając system psychologicznych uwarunkowań zachowania kierowcy na drodze, można posłużyć się modelem „przystosowania zawodowego” kierowcy (rys. 1).

Kierowca powinien nauczyć się samooceny swojej aktualnej sprawności i dostosowywania zachowania do wyników tej samooceny. Zatem tym, co w decydujący sposób wpływa na zachowanie kierowcy jest jego sprawność psychiczna, na którą składają się:

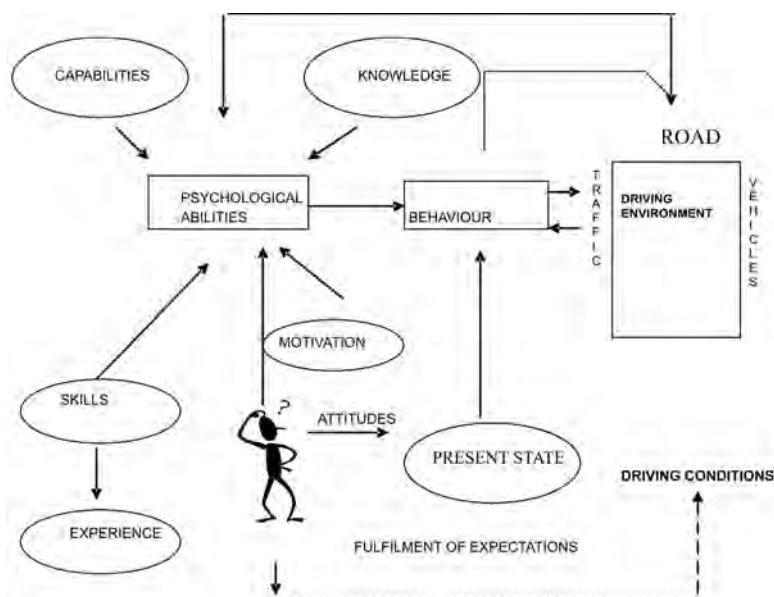
1. Możliwości wynikające z konfiguracji i wzajemnych relacji predyspozycji psychicznych prowadzącego pojazd. Predyspozycje te tworzą podsystem, w którym chwilowe zaburzenie jednej właściwości (na przykład percepcji wzrokowej) może być kompensowane lub nie przez inne właściwości (na przykład przez cechy osobowości takie jak ostrożność, odpowiedzialność itp.). Zarówno właściwości psychomotoryczne jak i cechy osobowości i temperamentu oraz krótkotrwałe stany emocjonalne tworzą sprawność psychiczną kierowcy.
2. Wiedza – to te wiadomości, które powinien mieć kierowca o funkcjonowaniu całego systemu, a więc o zasadach prowadzenia pojazdu w ruchu drogowym, o zachowaniu wszystkich użytkowników dróg, o pojeździe, o wpływie sytuacji drogowej (fizycznej i społecznej) na sposób jaz-

4. night vision and reaction to dazzlement, without which driving at night is not only difficult, but most of all dangerous;
5. visual and kinesthetic coordination enabling fluent and proper activity adequate to the perceived situation;
6. the time of reaction, its stability and steadiness;
7. selected aspects of memory (e.g. visual and kinesthetic memory);
8. the ability to think;
9. aspects of attention, and focus;
10. the speed and accuracy of decision-making;
11. resistance to the pressure of time;
12. selected features of personality and temper.

In order to explain the system of psychological conditioning of the driver’s behaviour on the road we can use the following scheme of driver’s “career adaptation” (Fig. 1).

The driver should learn to evaluate his present competence and to adapt his behaviour to the results of this evaluation. What has, thus, the main impact on the driver’s behaviour on the road is his psychological efficiency, which comprises of:

1. The possibilities coming from the configuration and the co-relation between the psychological predispositions of a driver. The predispositions create a sub-system in which a temporary disturbance of one element (e.g. visual perception) can be compensated or not by other elements (e.g. by features of personality such as caution, responsibility, etc.) Thus such elements as psychomotive characteristics, features of personality and temper, and short-term emotional states all comprise the psychological efficiency of a driver.
2. Knowledge, i.e. information which the driver should have about how the whole system functions. This includes the knowledge of rules of driving in traffic, of the behaviour of all users of the roads, of a vehicle, of the impact the situation on the road (or physical or social situation) can have on the manner of driving, and finally



Rys. 1. Model „przystosowania zawodowego” kierowcy  
 Fig. 1. The scheme of driver’s “career adaptation”

dy oraz o sobie samym, swoim zachowaniu i poziomie mechanizmów wyznaczających to zachowanie.

3. Umiejętności i wprawa dotyczące odpowiedzialnego uczestnictwa w ruchu drogowym.

Warunkiem bezpiecznej jazdy są :

- umiejętność właściwej obsługi urządzeń sterowniczych (pod wpływem wprawy zamieniająca się w nawyki);
- umiejętność właściwej, percepcji środowiska drogowego i wszystkich zmian sytuacyjnych;
- umiejętność całościowej oceny sytuacji;
- umiejętność oceny własnych możliwości działania w sytuacji (normalnej lub trudnej);
- umiejętność wykonania właściwych manewrów z uwzględnieniem cech aktualnej sytuacji drogowej oraz antycypowanych zachowań innych uczestników ruchu i przepisów prawa drogowego.

4. Motywacja i postawy – czynniki wpływające i zmieniające zachowania kierowcy, samoocena.

Sprawne funkcjonowanie kierowcy w ruchu drogowym uwarunkowane jest odpowiednią sprawnością fizyczną i psychiczną i obejmuje wszystkie wymienione wyżej elementy.

Przyjmując definicję bezpiecznego kierowcy określającą go jako osobę, która bezkolizyjnie przeprowadzi pojazd samochodowy drogą z jednego miejsca do drugiego, można uznać, że taki kierowca opanował i umie wykorzystywać wszystkie potrzebne umiejętności związane z prowadzeniem pojazdu (technika jazdy), posiada odpowiednią sprawnością psychiczną.

Pojęcie sprawność psychiczna jest bardzo ogólne, znaczy tyle co wykonywanie czynności psychicznych, charakteryzujących się prawidłowym funkcjonowaniem procesów umysłowych, pamięci, uwagi podlegających zarazem prawidłowym wpływom emocji i motywacji. Funkcje psychiczne istotne dla sprawnego funkcjonowania kierowcy to m.in. percepcja, uwaga, męczliwość i ogólna sprawność motoryczna, które najpełniej sprawdzane są podczas psychologicznych badań kierowców.

W dalszej części pracy omówione zostaną funkcje percepcja, uwaga, czas reakcji, funkcje intelektualne jako najważniejsze psychologiczne czynniki bezpieczeństwa ruchu drogowego.

### 2.1. Percepcja

Bezpieczne prowadzenie pojazdu m. in. polega na dostatecznie szybkim i dokładnym spostrzeganiu i wyodrębnianiu zdarzeń komunikacyjnie ważnych (istotnych w ruchu drogowym). Wrażenia wzrokowe dostarczają kierowcy informacji o sytuacji na drodze w tym: o pozycji własnego pojazdu, o innych uczestnikach ruchu drogowego, o infrastrukturze.

Najważniejszą rolę w prowadzeniu pojazdu odgrywają takie właściwości związane z percepcją jak:

- ostrość widzenia;
- pole widzenia;
- widzenie stereometryczne i związana z nim zdolność oceny odległości;
- zdolność rozróżniania kształtów w mroku;
- wrażliwość na oślnienie;
- rozróżnianie barw.

Niezwykle ważne dla percepcji i związanej z nią uwagi wzrokowej są mechanizmy widzenia centralnego i peryferycznego. W widzeniu dziennym i nocnym kluczową rolę odgrywają fotoreceptory, odpowiednio czopiki i pręciki, dzięki którym

of himself, his behaviour and the level of mechanisms effecting this behaviour.

3. Skills and experience translating into a responsible participation in traffic.

The conditions of safe driving are the following:

- the ability to properly work the steering equipment (which with experience changes into habits);
- the ability to properly perceive the environment on the road as well as all changes of situation;
- the ability to evaluate the situation comprehensively;
- the ability to evaluate one's own possibilities of action in a given situation (regular or difficult);
- the ability to perform adequate maneuvers taking into account the attributes of the situation on the road, the anticipated behaviour of other participants of road traffic, and traffic regulations.

4. Motivation and attitudes – the elements effecting and changing the behaviour of the driver as well as his self-esteem.

For the driver to function efficiently in traffic, he must demonstrate an appropriate physical and psychological ability as well as all of the above.

Defining a safe driver as a person who will take a car from one place to another on the road without collisions, one might say that such a driver is proficient in driving, can use all the skills connected with it, and is efficient psychologically.

The term psychological efficiency is quite general, and it means as much as performing psychological activities characterized by proper functioning of intellectual processes, memory, and attention, which on the other hand, are dependent on proper influence of emotions and motivation. Psychological functions, vital for the driver to function efficiently in road traffic, are perception, attention, resistance to tiredness, and general motive ability; all of which are best evaluated during psychological tests for drivers.

Further in this essay I will discuss the functions of perception, attention, reaction time as well as intellectual functions as the most important psychological elements of road safety.

### 2.1. Perception

Safe driving is, among other things, based on a fast enough and accurate perception, and on recognition of events significant for road traffic. Visual impressions give the driver information about the situation on the road, which includes the position of his own vehicle, other participants of road traffic, and the infrastructure.

These are the elements of perception which play the most significant role in driving a vehicle:

- sharp vision;
- range of vision;
- stereo metric vision and the ability to evaluate distance;
- the ability to distinguish shape in darkness;
- reaction to dazzlement;
- colour differentiation.

What is extremely important for perception and visual attention connected with it are the mechanisms of central and peripheral vision. Day and night vision are dependent to a large extent on photo receptors, suppositories and rods respectively, thanks to which human eye receives visual impressions. Rods

ludzkie oko odbiera wrażenia wzrokowe. Pręciki odpowiadają za widzenie czarno-białe, zaś czopki za kolorowe. System uwagi wzrokowej opiera się m.in. na ruchach oka: sakadycznych (skokowych), związanych ze śledzeniem, związanych ze zbieżnością oczu, związanych z układem wertykalnym. Śledzące ruchy oka umożliwiają obserwację poruszających się przedmiotów (np. pojazdów).

Kierowca prowadząc pojazd musi spostrzegać wiele, szybko pojawiających się obiektów, ocenić relacje przestrzenne między nimi, spostrzec barwy (w warunkach osłabionego oświetlenia, np. o zmierzchu).

Także prawidłowa ocena kierunku, z jakiego nadbiegają sygnały słuchowe jest również sprawą zasadniczą dla sprawnego funkcjonowania kierowcy.

### 2.2. Uwaga

Prowadzone w Instytucie Transportu Samochodowego badania mierzące do szczegółowej analizy pracy kierowcy, wykazały, iż w pracy kierowcy w podstawowych manewrach wykonywanych w trakcie prowadzenia pojazdu większość procesów psychicznych operatora przypada na uwagę.

Uwaga jest zatem jedną z najważniejszych właściwości kierowcy w czasie jazdy i jej brak, nawet chwilowy, jest jedną z najczęstszych przyczyn wypadków drogowych. Uwaga rozumiana jest w psychologii transportu jako system selekcji informacji na różnych etapach jej przetwarzania. Uwaga oparta jest na procesach dowolnych (świadomych) i mimowolnych (poza kontrolą).

Kierowca może zapobiegać utracie uwagi jeśli zna różne jej cechy i swoje właściwości. W psychologii rozróżniamy cztery cechy uwagi:

- podzielność

Podczas prowadzenia pojazdu samochodowego, kierowca musi spostrzec wiele bodźców i wykonać wiele czynności na raz. Decyduje o tym najważniejsza cecha uwagi jaką jest podzielność.

- zakres (pojemność)

Zakres (pojemność) uwagi to inaczej ilość bodźców, które kierowca może spostrzec w jednostce czasu i właściwie na nie zareagować.

- trwałość (koncentracja)

Trwałość (koncentracja) uwagi jest szczególnie ważną cechą dla kierowców, którzy pokonują długie trasy. Jest to cecha uwagi, która pozwala kierowcy być skupionym na zadaniu podczas długiego czasu trwania tej samej czynności.

- przerzutność (ruchliwość).

W zmieniającym się systemie ruchu drogowego konieczna jest symultaniczna obserwacja i odbiór wielu bodźców, szybkie przechodzenie od jednego zdarzenia na kolejne.

Podczas prowadzenia pojazdu następuje ciągła zmiana otoczenia. Kierowca odbiera informacje z różnych źródeł jednocześnie. Niezbędna jest zdolność szybkiego przechodzenia od krótkotrwałego stanu koncentracji uwagi na określonym zjawisku, do stanu podzielności poprzez zakres, trwałość, przerzutność uwagi do koncentracji i odwrotnie.

Każdy kierowca przechodząc psychologiczne badania uzyskuje informacje o swoich właściwościach uwagi.

are responsible for black and white vision, while suppositories perceive colours. The system of visual attention is based, among other things, on the following eye movements: saccadic eye movements, those associated with pursuing, with eye convergence, and with vestibular system. The pursuing eye movements enable observation of objects in motion (e.g. vehicles).

A person driving a road vehicle has to notice many rapidly appearing objects, evaluate the spatial relation between them, and discern colours (in dim light, e.g. in twilight).

Another aspect that is crucial in driver's efficient functioning is an appropriate evaluation of direction from which auditory signals come.

### 2.2. Attention

Research done at the Institute of Car Transport aiming at a detailed analysis of the work of a driver showed that in his work the majority of psychological processes of the operator in basic maneuvers performed while driving a car center around attention.

Attention is thus one of the most important attributes of a driver at work, and its lack, even momentary, is one of the most frequent causes of road accidents. Attention in psychology of transport is understood as a system of the selection of information at different stages of its processing. Attention is based on voluntary (conscious) and involuntary processes (beyond control).

The driver can prevent the loss of attention if he knows its qualities as well as his own characteristics. Psychology distinguishes 4 features of attention:

- divisibility

While driving a car, the driver has to notice a number of stimuli and to perform a number of activities at the same time. Divisibility which is the most important feature of attention is decisive in this matter.

- span

Attention span is in other words a number of stimuli which the driver is able to notice in a unit of time and react to them in an appropriate way.

- constancy (concentration)

Constancy is an especially important element for drivers who drive long distances. This feature of attention allows the driver to be focused on the task while performing the same activity for a long time.

- shifting.

In a constantly changing system that road traffic is, simultaneous observation and perception of many impulses as well as the ability to shift quickly from one event to another are indispensable.

The environment in the process of driving changes constantly. The driver receives information from many sources at the same time. It is necessary for him to be able to transfer quickly from a transitory state of concentration of attention on a given phenomenon to the state of divisibility of attention going through span, constancy, shifting to concentration and the other way round. Each driver assessed by psychological tests receives information about the characteristics of his attention.

### 2.3. Czas reakcji

Sytuacja drogowa jest sytuacją zadaniową, którą kierowca rozwiązuje programując i wykonując odpowiednie czynności w określonym czasie. Jednym z najważniejszych czynników i przyczyn powstawania wypadków drogowych jest nieodpowiednia gotowość do działania i szybkość reagowania. Uczestnictwo w ruchu drogowym nie jest działaniem indywidualnym lecz współdziałaniem, przy którym większe znaczenie ze względu na bezpieczeństwo jazdy, ma umiejętność odpowiedniego wczesnego przystosowania swego zachowania do zachowania innych uczestników ruchu drogowego.

Na czas reakcji składają się:

- odbiór bodźca;
- percepcja (przyjęcie do świadomości);
- identyfikacja (określenie);
- reakcja.

Istotne znaczenie w trakcie prowadzenia samochodu ma proces przewidywania rozwoju wydarzeń i przygotowania do reakcji. Klasyczną wartością, jaką w przeciętnych warunkach drogowych przyjęto dla czasu reakcji kierowców jest jedna sekunda. Czas reagowania jest silnie uzależniony od konkretnej sytuacji drogowej, ilości wariantów działania, które rozważa kierowca oraz faktycznie podejmowanych manewrów.

Należy również zwrócić uwagę, iż nie tylko sam czas reakcji na bodźce jest warunkiem niezbędnym dla bezpiecznej jazdy. Refleks kierowcy rozpatrywany musi być zarówno pod względem przeciętnego czasu reakcji (średnia arytmetyczna czasów mierzona w warunkach laboratoryjnych z określonej serii reakcji na określony bodziec) jak i tzw. stałość reakcji. Stałość reakcji jest najważniejszym czynnikiem oceny gotowości kierowcy do działania w zaskakujących, nietypowych sytuacjach. Na stałość reakcji składa się różnica pomiędzy najdłuższym a najkrótszym czasem reakcji na dany bodziec. Im ta różnica jest większa, tym kierowca jest bardziej niebezpiecznym kierowcą na drodze, jego reakcje są nierówne, raz błyskawiczne i często wtedy być może niewłaściwe, a raz spowolnione, a więc w obu przypadkach potencjalnie niebezpieczne w skutkach.

Mierzenie czasów reakcji przeprowadzane w pracowniach psychologicznych jest bardzo dobrym sposobem określenia tej funkcji. Badania tego nie można zastąpić np. neurologicznym badaniem odruchów.

### 2.4. Funkcje intelektualne

Prawidłowe funkcjonowanie człowieka w ruchu drogowym opiera się na podejmowaniu właściwych decyzji we właściwym czasie. Wszystkie informacje zmysłowe, które napływają do kierowcy muszą być prawidłowo zanalizowane i zinterpretowane w oparciu o posiadane doświadczenie zakodowane w formie śladów pamięciowych. Na tej podstawie człowiek podejmuje decyzje co do wykonania właściwego manewru. Nie wystarczy więc dostrzec czy usłyszeć dany bodziec oraz umieć szybko reagować, trzeba jeszcze wiedzieć, jak reagować, czyli zareagować adekwatnie do sytuacji. W czasie jazdy na kierowcę oddziałują różnego rodzaju bodźce, które z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego można podzielić na znaczące i nieznaczące. Bodźcami komunikacyjne ważnymi są te sygnały, które narzucają kierowcy konieczność ich spostrzeżenia, podjęcia decyzji oraz wykonania lub zaniechania jakiejś czynności. Istotne znaczenie odgrywają tu procesy antycypacji zdarzeń, porównywania sytuacji, tworzenia skutecznych sche-

### 2.3. Reaction time

The situation on the road is a task-oriented situation which the driver solves by planning and performing appropriate activities in a given time. One of the most important elements and causes of road accidents is an inappropriate readiness for action as well as an inappropriate reaction time. The participation in road traffic is not an individual action. It's rather cooperation in which the ability to adapt one's behaviour, early enough, to the behaviour of other participants of road traffic is of great importance because of road safety.

Reaction time comprises:

- reception of an impulse;
- perception (becoming aware);
- identification (defining);
- reaction.

What is significant in driving a car is the process of predicting the course of action and of preparing for the reaction. A classic value which was assigned to the reaction time of a driver in average road conditions is one second. The reaction time is to a great extent dependent on a specific situation on the road, the number of possibilities of action which the driver takes into account, and finally the maneuvers undertaken.

It should be also stressed that reaction time to impulses is not the only condition indispensable to safe driving. A driver's ability to react has to be discussed both in terms of the average reaction time (arithmetic mean of the times measured in laboratory conditions on a given series of reactions to a given impulse) and the so called constancy of reaction. The constancy of reaction is the most important criterion while evaluating the driver's readiness to act in surprising and non-typical situations. It consists of a result between the longest and the shortest time of reaction to a given impulse. The bigger the result, the more dangerous the driver is on the road. His reactions are uneven – sometimes rapid, which means they could be inappropriate, and at other times, slowed down; both cases being potentially dangerous in their results.

Measuring reaction times in psychological laboratories is a very good way of evaluating this function. This test cannot be replaced by a neurological test of reflexes.

### 2.4. Intellectual functions

The proper functioning of a person in road traffic is based on making appropriate decisions in appropriate time. All sensual information which the driver receives has to be adequately analyzed and interpreted on the basis of acquired experience encoded in the form of memory traces. On this basis an appropriate maneuver is selected. It is not enough then to perceive or hear a given impulse and be able to react fast; it is also crucial to know how to react, i.e. react adequately to the situation. While driving the driver is exposed to different impulses which can be, from the point of view of road safety, divided into meaningful or meaningless. Signals which are important from the point of view of communication are those which impose on the driver the necessity of perception, of making a decision, and of performing or renouncing an action. What is also significant here are the processes of anticipating events, comparing situations, creating effective plans of action, or making use of skills and abstract thinking in an unconventional way.

matów działania czy też niestandardowego wykorzystywania umiejętności i myślenia abstrakcyjnego.

Kierowca dostosowany do bezpiecznej jazdy to taki, który umie właściwie i w odpowiednim czasie przewidzieć zmiany w sytuacji na drodze i właściwie ocenić własne możliwości przystosowania się do nich. Liczba bodźców oddziałujących na kierowcę związana jest z rodzajem drogi, natężeniem ruchu, porą dnia.

Ocena możliwości intelektualnych człowieka oraz jego zdolności do uczenia się i zapamiętywania leżą w zakresie kompetencji psychologa transportu.

### 2.5. Zmiany sprawności psychicznej

Każdy kierowca chce bezpiecznie dojechać do celu, lecz w konkretnych sytuacjach drogowych jak gdyby o tym zapomina, jego zachowanie ulega zmianom pod wpływem nagłych impulsów, często nieuświadomianych lub lekceważonych na przykład zwiększanie prędkości na terenie zabudowanym, lub w złych warunkach widoczności, ryzykowne podejmowanie manewru wyprzedzania, brak właściwego odstępu między pojazdami itp. Poszukiwanie najczęstszych przyczyn tego zachowania jest ważnym zadaniem psychologii transportu.

Należy podkreślić, że w ruchu drogowym mogą wystąpić zjawiska zakłócające, wpływające na zachowania. Zjawiska te dezorganizować mogą przyjęty przez kierowcę plan działania. Kierowca, pragnący szybko osiągnąć cel podróży może trafić na utrudnienia w ruchu drogowym (remonty, korki). Osoba prowadząca pojazd, utrzymująca bezpieczny dystans względem innych pojazdów, może być narażona na kolizję przez innego kierowcę, wykorzystującego tę lukę dla wykonania ryzykownego wyprzedzania. Mokra jezdnia może wymagać od poruszających się po niej użytkowników dostosowania sposobu prowadzenia pojazdu. Każde tego typu zakłócenie może wywołać u kierowcy określony stan emocjonalny, którego natężenie i treść mogą być indywidualnie zróżnicowane. Silne emocje mogą stanowić sytuacyjne uwarunkowania spadku sprawności psychicznej kierującego pojazdem. W niektórych przypadkach liczba oraz rodzaj tego typu zakłóceń i przeszkód może spowodować u kierowcy poważne trudności w organizacji i wyborze właściwego sposobu zachowania, a w skrajnych przypadkach może je całkowicie albo częściowo zdeorganizować. Istnieje nieprzerwana zależność między rodzajem zachowania a sytuacją drogową i programem jej rozwiązania, przyjętym przez kierowcę.

### 3. Rola psychologicznych badań kierowców w bezpieczeństwie ruchu drogowego

Psychologowie badając predyspozycje do bezpiecznych lub niebezpiecznych zachowań kierowców nie mogą przewidzieć splotu wszystkich czynników, które wystąpią w konkretnej sytuacji zagrożenia wypadkiem. Dokonują jedynie diagnozy tych elementów, które mają wartość diagnostyczną i prognostyczną w ocenie sprawności psychicznej, niezbędnej do prowadzenia pojazdów samochodowych; różnicują zachowanie poszczególnych osób; trzecie – są możliwe do zbadania za pomocą dostępnych narzędzi psychologicznych, zweryfikowanych psychometrycznie.

Psychologiczne badania kierowców mają za cel zmniejszyć ryzyko takiego zachowania kierowcy w ruchu drogowym, które może doprowadzić do zaistnienia zagrożenia i w konsekwencji być przyczyną wypadku.

A driver adapted to safe driving can properly and in adequate time perceive changes in the situation on the road as well as appropriately evaluate one's own capabilities of conforming to them. The number of stimuli affecting the driver is dependent on the type of a road, traffic intensity, and the time of day. The evaluation of a person's intellectual potential and his ability to learn and memorize are within the competence of a psychologist of transport.

### 2.5. Changes of psychological efficiency

Each driver wants to reach his destination safely but in certain situations on the road he as if forgets about it. His behaviour changes under the influence of sudden impulses which are often unconscious or depreciated, such as speeding in built area or in bad visibility conditions, risky overtaking, or inappropriate distance between vehicles, etc. It is an important task of psychology of transport to look for the reasons of such behaviour.

It has to be stressed that different disturbing events can occur in road traffic which will influence the behaviour of the driver. These events can disorganize the driver's plan of action. The driver who wants to reach his destination fast can suddenly encounter obstacles in traffic (such as road works, traffic jams, etc.). A person driving a vehicle and maintaining a safe distance with other vehicles can be exposed to a collision by another driver who uses the distance for risky overtaking. Wet road also requires the drivers to adjust their way of driving. Each disturbance of that kind can evoke in a driver a certain emotional state whose intensity and content will depend on an individual. Intense emotions can in a given situation induce the decrease of psychological efficiency of a driver. In some cases the number and the type of disturbances and obstacles can generate in a driver serious difficulties in organization and in the choice of a proper way of behaviour; while in extreme cases it can cause partial or total disorganization. There exists a close dependence between the type of behaviour, the situation on the road and the solution the driver chooses.

### 3. The role of psychological testing of drivers in road safety

Testing the drivers' predispositions to safe or unsafe behaviour, psychologists cannot predict the convergence of all elements which might occur in a specific accident-prone situation. They can only diagnose those elements which are of diagnostic and prognostic value in the evaluation of psychological efficiency necessary for driving road vehicles, those which differentiate the behaviour of particular persons, and finally, those which can be tested by means of available psychological tools which are psychometrically verified.

Psychological tests for drivers aim at diminishing the risk of such behaviour in road traffic which can lead to causing danger or, consequently, causing an accident.

Figure 2 shows the complexity and interdependence of different elements which directly or indirectly influence driver's safe functioning in road traffic.



Rysunek 2 przedstawia złożoność i zależność różnych czynników, które bezpośrednio i pośrednio mają wpływ na bezpieczne funkcjonowanie kierowcy w ruchu drogowym.

Wiele badań wskazuje, że wraz z wiekiem człowieka następują zmiany natury anatomicznej, fizjologicznej oraz biochemicznej, które mogą w sposób niekorzystny wpływać na sprawność funkcjonowania człowieka. Wraz z wiekiem człowieka zmniejsza się wrażliwość układu nerwowego i zwiększa się jego bezwładność. Ponadto obniża się sprawność zmysłów zwłaszcza wzroku i słuchu. Z wiekiem człowieka dochodzi do pogarszania funkcji wielu psychofizjologicznych organizmu. Wzrasta zaś doświadczenie nabywane w praktyce prowadzenia pojazdu (złożone i różnorodne formy zachowania), utrwalają się prawidłowe oraz nieprawidłowe nawyki.

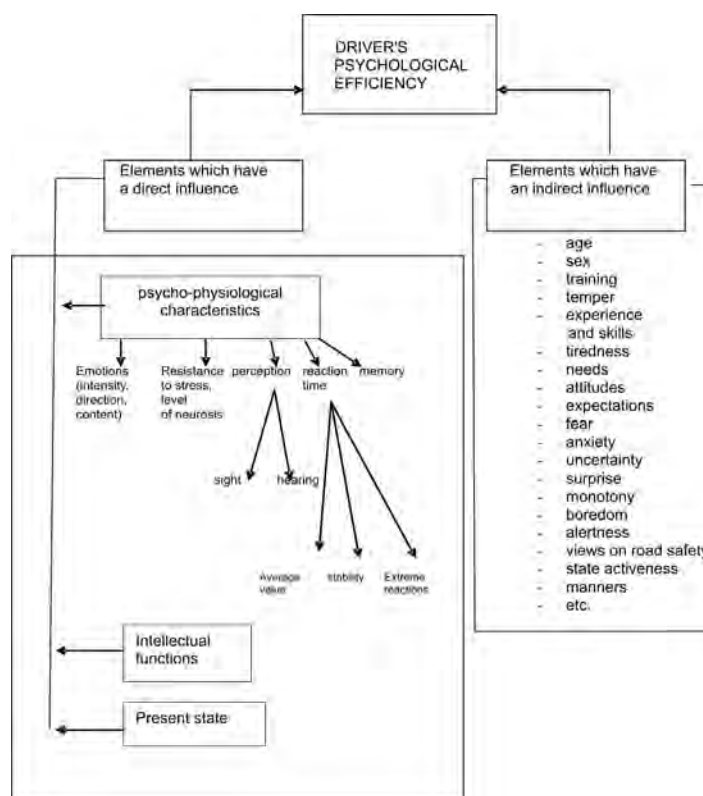
O znaczeniu badań psychologicznych w działaniach profilaktycznych na rzecz bezpieczeństwa ruchu drogowego można pośrednio wnosić analizując wypadkowość w okresie gdy badania psychologiczne nie było oraz w okresie, gdy badania (w tym okresowe) obowiązywały. Analizy takiej dokonano w Instytucie Transportu Samochodowego.

Kierowca po przeprowadzeniu psychologicznych badań otrzymuje wiedzę o mechanizmach funkcjonowania całego systemu: droga - pojazd - ruch drogowy - kierowca. Uzyskuje także wiedzę na temat zmieniającej się sytuacji ruchu drogo-

A lot of research indicates that with age a person changes anatomically, physiologically, and biochemically, and these changes can negatively influence a person's efficiency. With age human nervous system is less sensitive but more inert. The senses of hearing and sight become less efficient. Many psychophysiological functions of human organism deteriorate with age. What increases is experience acquired in the practice of driving (complex and varied forms of behaviour). Proper and improper habits get fixed.

The importance of psychological tests in road safety prevention can be evaluated on the basis of the analysis of accidents in the period when there were no tests, and in the period when they were introduced (including periodic tests). The analysis was carried out in the Institute of Road Transport.

Psychological assessment provides a driver with information about the mechanisms of functioning of the entire road-vehicle-traffic-driver system. He or she also gains knowledge of the changing traffic situation, of the need for constant tracking and perception of those changes, their immediate estimation, and the need for fast and adequate action. The driver also acquires knowledge of his or her current efficiency and its significance for safe driving, as well as his or her own capabilities resulting from the configuration and mutual relation of his or her psychological predispositions. A psychologist makes the ex-



Rys.2. Czynniki wpływające na sprawność psychiczną kierowcy<sup>1</sup>

Fig. 2. Elements influencing the driver's psychological efficiency<sup>1</sup>

<sup>1</sup> J. Bąk, Opracowanie składowych systemu działań antywypadkowych z dostosowaniem do dominujących w Polsce czynników wypadkogennych: subczynnik: sprawność psychiczna kierowcy [w:] Kryteria oceny poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego w Polsce oraz projekt efektywnego systemu działań antywypadkowych, Projekt badawczy Nr 9 S 60407604 p 01, ITS, Warszawa 1995, s. 17 – materiał niepublikowany.

<sup>1</sup> J. Bąk, Analysis of the elements of accident prevention system with adaptation to accident causing elements dominating in Poland: sub element: psychological efficiency of a driver [in:] Criteria of evaluation of road safety in Poland and the project of efficient accident prevention system, Research project No 9 S 60407604 p 01, ITS, Warszawa 1995, p. 17 – unpublished material.

wego, o konieczności bezustannego śledzenia i percepcji tych zmian, ich natychmiastowej oceny i konieczności szybkiego i adekwatnego działania. Kierowca wynosi wiedzę na temat swojej aktualnej sprawności oraz jej znaczenia w bezpiecznym prowadzeniu pojazdu, własnych możliwości wynikających z konfiguracji i wzajemnej relacji predyspozycji psychicznych. Psycholog uświadamia badanemu pewien system, w którym zaburzenie jednej właściwości (np. percepcji wzrokowej) może by rekompensowane przez inne cechy (ostrożność, odpowiedzialność, rozważa). W przeprowadzonych analizach skuteczności badań psychologicznych wśród kierowców na pytanie: „czego nowego dowiedział(a) się Pan(i) o sobie w wyniku badania” 77,8% badanych kierowców odpowiedziało, że wiedza zdobyta w toku badania psychologicznego:

- wpływa ogólnie na wzrost bezpieczeństwa na drogach,
- wpływa na zwiększenie ostrożności w zachowaniu kierowcy poddanemu badaniu,
- wywołuje konkretne zmiany w zachowaniu kierowcy,
- pozwala uniknąć kolizji czy wypadków drogowych.

Przeprowadzenie okresowych badań psychologicznych, na podstawie których określa się sprawność funkcji psychicznych u kierowców jest istotna dla profilaktyki bezpieczeństwa ruchu drogowego gdyż stanowi jedyny kompletny obraz indywidualnych predyspozycji kierowcy.

#### 4. References

- [1] Bąk J.: *Wypadki drogowe a kształcenie młodych kierowców*, ITS, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2003.
- [2] Bąk J.: *Opracowanie składowych systemu działań antywypadkowych z dostosowaniem do dominujących w Polsce czynników wypadkogennych: subczynniki: sprawność psychiczna kierowcy* [w:] Kryteria oceny poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego w Polsce oraz projekt efektywnego systemu działań antywypadkowych. Projekt badawczy Nr 9 S 60 407604 p.01, ITS, Warszawa 1995 – materiał niepublikowany.
- [3] Bąk J., Bąk D.: *Psychologiczne badania kierowców - diagnoza sprawności psychofizycznej*. Transport Samochodowy 2/2007 ITS Warszawa, s. 21-33.
- [4] Falkowski A.: *Spostrzeganie jako mechanizm tworzenia doświadczenia za pomocą zmysłów* [w:] Strelau J. (red.) Psychologia. Podręcznik akademicki t.2, Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne, Gdańsk 2000.
- [5] Karney J.E.: *Człowiek i praca. Wybrane zagadnienia z psychologii i pedagogiki pracy*, Międzynarodowa Szkoła Menadżerów, Warszawa 1998.
- [6] Kolańczyk A.: *Uwaga w procesie przetwarzania informacji* [w:] Materska M. , Tyszka T. (red.) Psychologia i poznanie, PWN, Warszawa 1997.
- [7] Mather G.: *Foundations of Perception Psychology*, Psychology Press 2006.
- [8] Naatanen R., Summala H.: *Zachowanie użytkowników dróg a wypadki drogowe*, PWN, Warszawa 1985.
- [9] Rotter T.: (red.) *Metodyka psychologicznych badań kierowców*, ITS 2003.
- [10] Styles E. A.: *The Psychology of Attention*, Psychology Press 2006.
- [11] Tokarczyk, E.: *Funkcja psychoedukacyjna badań kierowców*. Praca statutowa Nr 6062/99/ZPK (materiał niepublikowany).
- [12] Tomaszewski T.: *Człowiek w sytuacji* [w:] Tomaszewski T. (red.) Psychologia, PWN, Warszawa 1975.

mined person aware of a certain system in which a disturbance of one function (e.g. visual perception) can be compensated by other traits (cautiousness, responsibility, thoughtfulness). In the analyses of the effectiveness of psychological testing carried out among drivers, 77.8% of the examined drivers responded to the question „What new things did you learn about yourself as a result of the test” that the knowledge acquired in the course of the psychological examination:

- generally influenced an increase in road safety,
- increased cautiousness in the behaviour of the tested driver,
- caused specific changes in the driver’s behaviour,
- prevented traffic collisions or accidents.

Carrying out periodic psychological tests on the basis of which drivers’ psychological efficiency can be defined is crucial for road safety prevention because it provides the only complete picture of a driver’s individual predispositions.

---

**Dr Jadwiga Bąk**

**Mgr Dorota Bąk-Gajda**

Zakład Psychologii Transportu Drogowego  
Instytut Transportu Samochodowego  
Ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, Polska  
E-mail: [jadwiga.bak@its.waw.pl](mailto:jadwiga.bak@its.waw.pl)  
E-mail: [dorota.bak@its.waw.pl](mailto:dorota.bak@its.waw.pl)

---

## MATERIAŁY FUNKcjONALNE I ZŁOŻONE W TRANSPORCIE LOTNICZYM

### FUNCTIONAL AND HYBRID MATERIALS IN AIR TRANSPORT

*Od wielu lat w lotnictwie wykorzystywane są materiały kompozytowe, które przy stosunkowo niewielkim ciężarze cechują się bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi. Pozwala to na zbudowanie bardzo wytrzymałej i lekkiej konstrukcji samolotu, a w związku z tym na obniżenie kosztów eksploatacji. Niestety doskonałe właściwości mechaniczne kompozytów ulegają znacznemu obniżeniu w momencie pojawienia się uszkodzenia. Dlatego poszukuje się nowych materiałów złożonych o wyższej odporności na pękanie oraz sposobów diagnozowania stanu struktury w procesie jej wytwarzania i eksploatacji. Do materiałów nowej generacji należą laminaty metalowo-kompozytowe (FML). Są to laminaty składające się z warstw cienkiej blachy metalowej i kompozytu polimer-włókno ceramiczne lub polimerowe. Laminaty takie charakteryzują się doskonałymi właściwościami równocześnie metalu i włóknistego kompozytu polimerowego. Taka kombinacja daje w rezultacie nową generację materiałów hybrydowych o właściwościach hamowania i blokowania rozwoju pęknięć przy cyklicznym obciążeniu, bardzo dobrej charakterystyce obciążenia i udarowości oraz niskiej gęstości. Inną nową klasą materiałów są materiały inteligentne, o sterowalnych właściwościach, uzyskiwanych przez zastosowanie komponentów ze stopów z pamięcią kształtu lub wbudowanie systemów specjalnych, jak układy włókien piezoelektrycznych lub optycznych. Ich coraz większa dostępność i wyjątkowe właściwości fizyczne sprawiają, że mogą one być z powodzeniem integrowane z innymi materiałami w celu uzyskania właściwości nieosiągalnych na żadnej innej drodze. Wbudowane elementy aktywne, tworzące rozproszoną sieć sensorów i/lub aktyuatorów dają możliwość realizacji zadanych zadań monitorowania, adaptacji i sterowania elementem konstrukcyjnym.*

**Słowa kluczowe:** kompozyty, laminaty, materiały inteligentne, sensory piezoelektryczne, diagnostyka.

*For many years aviation has made use of composite materials, which have very good mechanical properties combined with a relatively low weight. Their use enables construction of very durable and lightweight aircraft structures and reduces maintenance costs. Unfortunately, the excellent mechanical properties of composites decrease significantly when damage occurs. That is why new hybrid materials with higher crack resistance and new methods for structural health diagnosing during manufacture and in service are being looked for. One class of new generation materials are fibre-metal laminates (FML). They are laminates which consist of alternating thin metal layers and layers of polymer/ceramic fiber or polymer/polymer fibre composite. Laminates of this kind share the excellent properties of both metal and fibrous polymer composite. Such a combination yields a new generation of hybrid materials with crack growth retardation and arrest capacities under cyclic loading, very good load-bearing and impact resistance characteristics, and low density. Another new class of materials are smart materials with programmable properties obtained by using shape memory alloys or by embedding special systems such as piezoelectric or optical fibre systems. Their increasing availability and exceptional physical properties enable their successful integration with other materials to give properties unobtainable by any other method. The in-built active elements, which form a distributed network of sensors and/or actuators, enable monitoring, adjustment, and control of structural elements.*

**Keywords:** composites, laminates, smart materials, piezoelectric sensors, diagnostics.

#### 1. Wprowadzenie

Sprawność i ciągłe monitorowanie stanu konstrukcji powietrznych, lądowych i morskich jest niesłychanie ważne z uwagi na bezpieczeństwo użytkownika. W transporcie lotniczym bezpieczeństwo i sprawność działania są podstawowym założeniem, gdyż nawet niepozorne uszkodzenie konstrukcji może prowadzić do poważnego w skutkach wypadku. Przemysł lotniczy intensywnie wykorzystuje innowacyjne rozwiązania technologiczne i materiałowe przy wytwarzaniu struktur lotniczych oraz monitorowaniu ich stanu. Bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji zależy bowiem zarówno od rodzaju i jakości materiałów jak i od sprawności monitorowania stanu konstrukcji.

W dziedzinie materiałów na struktury lotnicze nastąpił znaczny postęp wraz z rozwojem materiałów polimerowych. Metalowe półskorupowe struktury cienkościennie, które w warunkach obciążeń dopuszczalnych mogą wykazywać lokalną utratę stateczności, bardzo niekorzystną z punktu widzenia

#### 1. Introduction

The efficiency and continuous health monitoring of airborne, land, and marine structures are extremely important safety factors. In air transport, safety and efficiency of operation are basic assumptions since even minute damage of structure may lead to a serious accident. The aerospace industry makes intensive use of innovative technological and material solutions in the manufacture and health monitoring of aircraft structures as the safety and reliability of those structures depends both on the kind and quality of materials used and the efficiency of health monitoring.

Development of polymer materials has spurred significant progress in the field of aircraft structure materials. Semi-monocoque thin-walled metal structures, which under admissible load conditions may show an aerodynamically disadvantageous local loss of stability have been replaced with sandwich structures. Metal sandwich structures were at the peak of their use in the second half of the previous century. The most commonly

aerodynamicznego, zostały zastąpione strukturami przekładkowymi. Struktury przekładkowe z materiałów metalowych przeżywały swój rozkwit w drugiej połowie ubiegłego wieku. Najbardziej rozpowszechnionymi wśród rdzeni metalowych był rdzeń komórkowy, zwany potocznie ulownicą (rys. 1a). Konstrukcje oparte na takiej strukturze, chociaż masą niekiedy nie różnią się od konstrukcji cienkościennych, umożliwiając wysoki stopień integracji. Rdzeń, któremu może być nadawany dowolny obrys, jest łączony z okładzinami jedną operacją klejenia. Ustroje nośne płatowców wykonane na bazie struktur przekładkowych charakteryzuje wysoka sztywność, pozwalająca na zachowanie żądanej geometrii w całym zakresie obciążeń dopuszczalnych statku powietrznego. Powszechnie stosuje się takie rozwiązanie również w łopatach wirników śmigłowców (rys. 1b).

Rozwój materiałów polimerowych i kompozytów włóknistych o osnowie polimerowej pozwolił na dalsze modyfikacje struktur. Zaczęto stosować izotropowe rdzenie ze spienionych tworzyw sztucznych w takich konstrukcjach, w których nie ma ograniczeń ze względu na temperaturę pracy. Struktury o takiej konfiguracji w budowie szybowców, samolotów lekkich i śmigłowców tworzą integralne podzespoły ustrojów nośnych skorupowych o programowanych właściwościach mechanicznych, jak skrzydła, kadłuby, belki ogonowe. Wiek XXI to piany metaliczne i laminaty włóknisto-metalowe na poszycia i struktury nośne oraz włókna piezoelektryczne jako elementy czujników monitorujących stan konstrukcji [1-8].

Współczesne monitorowanie to metody NDT (Nondestructive Damage Testing) oparte na pomiarach w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem czujników zamocowanych na strukturze oraz coraz częściej wbudowanych w konstrukcję. Użycie wbudowanych systemów monitorowania powinno umożliwić funkcjonowanie elementów konstrukcji bez planowych przeglądów aż do momentu, gdy system monitorowania stanu konstrukcji zaalarmuje użytkownika o pojawieniu się uszkodzenia i potrzebie przeprowadzenia naprawy.

W artykule omówione zostaną dwa typy materiałów wprowadzanych obecnie do budowy konstrukcji lotniczych, mianowicie laminaty metalowo-kompozytowe na struktury poszycia zastępujące klasyczne kompozyty i konstrukcje przekładkowe oraz materiały oparte na włóknach piezoelektrycznych jako elementy inteligentne w strukturach lotniczych.

## 2. Laminaty włóknisto-metalowe

Materiały FML (fiber-metal laminat) to laminaty włóknisto-metalowe, składające się z warstw cienkiej blachy metalowej i kompozytu polimer-włókno szklane lub ceramiczne. Laminaty takie charakteryzują się doskonałymi właściwościami równocześnie metalu i kompozytu polimerowego. Taka kombinacja daje w rezultacie nową generację materiałów hybrydowych

used among metal cores was the cellular honeycomb core (Fig. 1a). Structures designed in this way, though often not different in weight from thin-walled structures, enable a high degree of integration. A core which can be freely shaped to any contour is joined with facings in one bonding operation. Load-carrying sandwich airframe structures are characterised by high stiffness, which makes it possible to preserve the desired geometry over the entire permissible load range of an aircraft. This type of solution is also commonly used in helicopter rotor blades (Fig. 1b).

Development of polymer materials and polymer matrix fibrous composites enabled further modifications of structures. Foam-plastic based isotropic cores started to be used in structures which had no operating temperature limitations. In the construction of gliders, lightweight aircraft, and helicopters, such

structures form integral assemblies of monocoque load-bearing structures with programmed mechanical properties, such as wings, fuselages, or tail booms. The 21st century is the age of metal foams and fibre-metal laminates for skin and load-carrying structures, and piezoelectric fibres as elements of structural health monitoring sensors [1-8].

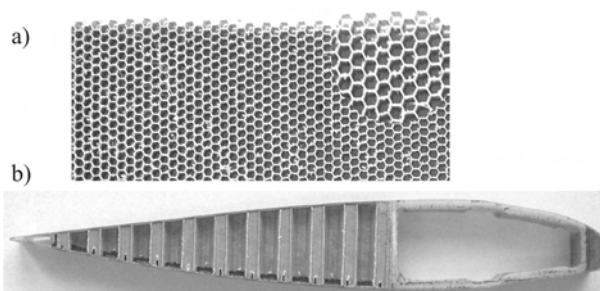
Modern monitoring involves NDT (Nondestructive Damage Testing) methods based on real time measurements using sensors mounted on, or more and more frequently, embedded in the structure. Use

of embedded monitoring systems should make it possible for structure elements to operate without scheduled inspections until the structural health monitoring system alerts the user about an occurrence of damage and the need for repair.

The article discusses two types of materials recently implemented in construction of aircraft structures, namely, metal-composite laminates for fuselage skin structures replacing classical composites and sandwich structures, as well as piezoelectric fibre-based materials used as smart elements in aircraft structures.

## 2. Fibre-metal laminates

FMLs are fiber-metal laminates consisting of alternating layers of thin metal sheets and polymer/ceramic fiber or polymer/polymer fibre composite. Laminates of this kind possess the excellent properties of both metals and fibrous polymer composites. This combination yields a new generation of hybrid materials with the ability to impede and arrest crack



Rys.1. Wypełniacz ulowy wykonany z Nomex-u, stosowany do wyrobu detali kadłubów śmigłowca Agusta (a) oraz przekrój łopaty śmigłowca W-3 (Sokół) (b)

Fig.1. (a) A Nomex honeycomb filler used in the manufacture of fuselage parts for the Agusta helicopter and (b) a section of a rotor blade of the W-3 (Sokol) helicopter

o właściwościach hamowania i blokowania rozwoju pęknięć przy cyklicznym obciążeniu, bardzo dobrej charakterystyki przy obciążeniu i udarowości oraz niskiej gęstości. Umożliwiają łatwe wytwarzanie struktur i ich naprawę. Mogą być dostosowywane do różnych potrzeb poprzez: łączenie różnych układów włókno/żywica, stosowania różnych gatunków stopów metali, różnych grubości blach, różnych sekwencji układania warstw laminatu, orientacji włókien, obróbki wstępnej powierzchni itp.

Laminaty tego typu do stosowania w lotnictwie zostały opracowane i opatentowane pod nazwami ARALL® oraz GLARE® w latach 80-tych XX wieku przez naukowców z Delft University of Technology [1,2], obszerniejsze informacje na temat technologii i właściwości tych materiałów zaczęto publikować od 2001 roku po wprowadzeniu GLARE do produkcji w Airbus A-380 [9-29].

Pierwszą grupą laminatów FML, wytworzoną na potrzeby lotnictwa były laminaty ARALL (ARamid ALuminium Laminate), w których komponent włóknisty wykonany jest z włókien aramidowych (Kevlaru). Zastosowano je w latach 80-tych XX wieku na drzwi ładunkowe w samolocie wojskowym C17. Niestety, pomimo bardzo dobrych wyników eksploatacyjnych zostały zastąpione ponownie konstrukcją metalową ze względu na zbyt wysoki koszt wytwarzania w tamtym okresie.

Od 1986 r. podjęto badania nad laminatem, w którym zastąpiono włókno aramidowe włóknem szklanym, tańszym w wytwarzaniu a dającym podobną charakterystykę wytrzymałościową. Materiały z tej grupy nazwano GLARE (Glass Laminates REinforced). Kompozyty GLARE są nową grupą laminatów kompozytowo-metalowych do wytwarzania struktur lotniczych (głównie elementów poszycia). Składają się z cienkich blach aluminiowych połączonych z kompozytem polimer-włókno szklane wytwarzanym technologią preimpregnatu (prepregową). Włókno szklane w prepregu jest skręcane a duże struktury panelowe wytwarzane są przez „splatanie” co eliminuje klasyczną metodę łączenia nitowaniem [19].

Laminat wytwarza się przez łączenie nieplaterowanych blach metalowych z prepregiem prasowaniem lub częściowej autoklawowo. Powierzchnie metalowe przygotowuje się wstępnie celem uzyskania lepszej adhezji do prepregu. Wstępna obróbka blach aluminiowych to: odtłuszczenie alkaliczne, trawienie kwasem chromowo-siarkowym, anodowanie w kwasie chromowym i gruntowanie farbą epoksydową zawierającą inhibitor korozji. Warstwy kompozytowe zawierają włókno szklane w ilości 40-60% w osnowie epoksydowej. Laminat umieszcza się w opakowaniu próżniowym i przenosi do autoklawu. Suszenie odbywa się z prędkością 2,5°C/min do 120°C i przetrzymanie 1 h w tej temperaturze przy ciśnieniu rzędu 0.08-0.69 MPa.

Gęstość laminatów GLARE zależy od względnej grubości blachy aluminiowej i warstw kompozytu, liczby warstw, udziału objętościowego włókien. W każdym przypadku gęstość laminatu jest co najmniej 8% niższa niż stopu aluminium. Stosowana grubość blach to 0,3-0,5 mm. Grubość warstwy prepregu to 0,2-0,5 mm. Typowy układ laminatu to 2/1 (2 warstwy blachy i 1 prepregu), w grubszych 3/2 lub 4/3 (rys.2).

Najczęściej stosowane i opatentowane laminaty składają się z blachy aluminiowej gat. 2024-T3 – GLARE 2-4 lub blachy gat. 7075-T6 - GLARE 1 (Tab.1) i prepregu: żywica FM94 z włóknem S2.

Szwy w blachach aluminiowych są różnie rozmieszczone tak, by były mostkowane przez warstwy włókien i warstwy nie-

growth under cyclic loading, with very good load-bearing and impact resistance characteristics, and low density. FMLs enable easy manufacture and repair of structures. They can be tailored to various needs by combining various fibre/resin systems, by using different alloy types, different thicknesses of metal sheets, different laminate stacking sequences, fibre orientations, surface pretreatment techniques, etc.

Laminates of this type were developed and patented for aerospace applications under the trade names of ARALL® and GLARE® in the 1980s by scientists from the Delft University of Technology [1,2]. More comprehensive reports on the technology and properties of these materials were first published in 2001, after GLARE was applied for manufacture of Airbus A-380 [9-29].

The first group of FMLs developed for aerospace applications were ARALL (ARamid ALuminium) laminates, in which the fibrous component was made of aramid (Kevlar) fibres. They were used on the cargo door of the C 17 military transport aircraft. Unfortunately, despite a very good maintenance record, they were replaced anew with metal structures because of too high manufacture costs in that period.

Since 1986, research has been conducted on a laminate in which aramid fibre was replaced with glass fibre, a material cheaper to manufacture and having similar strength characteristics. Materials from this group were called GLARE (GLASS REinforced laminates). GLARE composites are a new group of composite-metal laminates for manufacture of aerospace structures (mainly skin elements). They consist of thin aluminium sheets bonded with a polymer/glass fibre prepreg. In prepreg, glass fibre is twisted, and large panel structures are manufactured by „weaving”, which eliminates the need to use the classical method of rivet assembly [19].

The laminate is produced by bonding together unclad metal sheets with prepreg using a press or, more often, an autoclave. The metal surfaces are pretreated to achieve better adhesion to prepreg. Pretreatment of aluminium sheets involves alkaline degreasing, chromic- sulphuric acid etching, chromic acid anodizing, and priming with a corrosion-inhibiting epoxy primer. The composite layers consist of 40-60% of glass fibre in an epoxy matrix. The laminate is placed in a vacuum bag and transferred into an autoclave. It is dried at a drying speed of 2.5°C/min to 120°C and kept for 1 h at this temperature at a pressure range of 0.08-0.69 MPa.

The density of GLARE laminates depends on the relative thickness of aluminium sheets and composite layers, the number of layers, and the volume share of fibres. In each case, the density of the laminate is at least 8% lower than the density of the aluminium alloy. The sheet thickness used is 0.3-0.5 mm. The thickness of the prepreg layer is 0.2-0.5 mm. A typical laminate lay-up is 2/1 (2 layers of metal sheets and 1 layer of prepreg), and in thicker laminates, 3/2 or 4/3 (Fig.2).

The most frequently used and patented laminates consist of 2024-T3 - GLARE 2-4 aluminium sheets or 7075-T6 - GLARE 1 sheets (Table1) and S2 fibre prepreg based on FM94 resin.

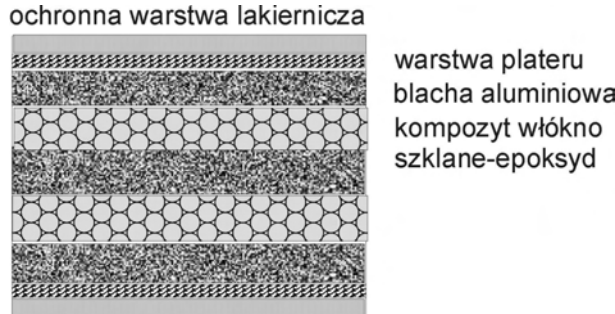
The seams in the aluminium sheets are variously distributed so that they can be bridged by layers of fibre and unbonded sheets. The fibrous layers between the metal surfaces bridge across the gaps, transferring the load. To ensure proper load transfer, an extra layer of aluminium or prepreg is used.

Studies are also conducted on other material combinations, but not all combinations of materials are possible. For instance,

klejonych blach. Warstwy włókniste pomiędzy powierzchniami metalu wypełniają luki przenosząc obciążenie. Celem zapewnienia zdolności przenoszenia żądanego obciążenia stosuje się dodatkową warstwę aluminium lub prepregu.

Prowadzone są również badania nad innymi połączeniami materiałowymi ale nie wszystkie kombinacje materiałów są możliwe. Połączenie stopów aluminium z włóknami węglowymi wydawało się bardzo atrakcyjne ale nie może być stosowane ze względu na korozję galwaniczną. Inny, przyszłościowy laminat z grupy FML to kombinacja tytanu oraz kompozytu włókno grafitowe/polimer (TiGr). Problemem do rozwiązania w zastosowaniach lotniczych jest przewodnictwo elektryczne włókien węglowych.

the combination of aluminium alloys with carbon fibres which once seemed very attractive, cannot be used because of galvanic corrosion. Another promising FML laminate is a combination of titanium with a graphite fibre/polymer composite (TiGr). A problem to be solved in its aerospace applications is electric conductivity of carbon fibres.



Rys.2. Schemat budowy laminatu typu FML (układ 3/2)

Fig.2. A construction diagram of an FML laminate (3/2 lay-up)

Tab. 1. Skład chemiczny stopów aluminium w laminatach GLARE wg PN-EN 573-3:2005

Tab. 1. Chemical composition of aluminium alloys in GLARE laminates in accordance with PN-EN 573-3:2005

Stop Alloy	Pierwiastek % wag. Element Wt. %											Al
	Cr	Zn	Si max.	Mg	Mn	Cu	Pb	Ti max.	Fe max.	Bi max.	Inne razem max. Total other elem. max.	
EN-AW-2024	max. 0,1	max. 0,5	0,8	0,5-1,3	0,2-1	3,3-4,5	0,8-1,5	0,2	0,7	0,2	0,3	r.
EN-AW-7075	0,18-0,28	5,1-6,1	0,4	2,1-2,9	max. 0,3	1,2-2	-	0,2	0,5	-	0,15	r.

### 3. Zalety i wady materiałów FML

Zalety częściowo zależne są od celu wytwarzania – w przypadku materiałów na struktury lotnicze chodzi przede wszystkim o korelację właściwości trwałość – tolerancja uszkodzenia.

Porównując FML do metalu uzyskuje się bardzo dużą tolerancję uszkodzenia z uwzględnieniem zmęczenia, korozji, udarowości, naprężeń szczątkowych. Porównując do materiału kompozytowego uzyskuje się wyższą wytrzymałość, udarowość, odporność na kruche pękanie.

Zaletą w procesie wytwarzania jest możliwość stosowania konwencjonalnych procesów wytwarzania (technik przygotowania wstępnego, niektórych procesów formowania, cięcia) przy wytwarzaniu paneli poszycia, krawędzi natarcia i małych elementów struktur. W rezultacie koszt inwestycji przy zmianie technologii z metalu na FML jest relatywnie niski.

Inne zalety to: ognioodporność, odporność na wyładowania atmosferyczne, odporność na korozję. Materiały te cechują się bardzo dobrą odpornością na korozję, ponieważ warstwy prepregu stanowią barierę dla wilgoci, która mogłaby atakować wewnętrzne warstwy metalowe, natomiast warstwy metalowe chronią prepregi przed „wstawianiem” pod wpływem wilgoci.

Wady odnoszą się głównie do procesu wytwarzania. Istnieje problem z podatnością na odkształcanie dużych elementów panelowych, gdyż obecność warstw metalu zwiększa sztywność. W kombinacji z aluminium sztywność rośnie, co może być wadą ale równocześnie rośnie przenoszenie obciążenia co

### 3. Advantages and drawbacks of FML materials

The benefits of FMLs partly depend on the purpose of manufacture; in the case of materials for aerospace structures, what is important is chiefly the correlation between durability and damage tolerance.

Compared with metal, FMLs have a very high damage tolerance with respect to fatigue, corrosion, impact resistance, and residual stress. Compared to composite materials, they have higher durability, impact resistance, and resistance to brittle fracture.

One manufacturing advantage is the possibility of using conventional production processes (pretreatment techniques, some moulding and cutting processes) in manufacture of skin panels, leading edges, and small structural elements. As a result, the cost of investment in changing the technology from metal to FML is relatively low.

Other advantages include fire resistance, atmospheric discharge resistance, and corrosion resistance. These materials have very good corrosion resistance due to prepreg layers, which form a barrier against moisture, which could attack the inner metal layers; the metal layers, on the other hand, protect prepregs against „lifting” under the influence of moisture.

The disadvantages chiefly concern the manufacture process. One problem is that large panel elements are deformation prone since the metal layers increase stiffness. In combination with aluminium, the stiffness increases, which may be disadvantageous, though, at the same time, there is an increase in load

jest zaletą.

Zestawienie podobieństw i różnic w wytwarzaniu części i struktur z GLARE, z blach metalowych i kompozytów [16] pozwala przypuszczać, że materiały laminatowe będą coraz szerzej stosowane. Najważniejsze przesłanki to:

- Możliwość wykorzystania procesów stosowanych do kształtowania blach metalowych do wytwarzania części i struktur z GLARE. Największe różnice występują przy kształtowaniu części złożonych. Z powodu różnicy w granicy odkształcalności laminatu, która jest znacznie mniejsza oraz elastyczności, występuje sprężynowanie. Przy wytwarzaniu pojedynczo zakrzywionych poszyc i podłużnic (wsporników) można stosować klasyczne metody.
- Procesy kształtowania są uzupełniane procesami wstępnymi identycznymi ze stosowanymi dla materiałów kompozytowych. Główne uzasadnienie stosowania tej metody produkcji to możliwość wytwarzania dużych paneli poszycia wraz ze wzmocnieniem, co ma duży wpływ na efektywność produkcji i koszty.
- Kluczowym elementem w procesach przygotowawczych jest zastosowanie klejenia na zakładkę (splices). Klejenie pozwala wytwarzać duże panele, ograniczeniem jest tylko wielkość komory autoklawu i urządzeń do obróbki wstępnej.
- W procesie obróbki skrawaniem główne różnice polegają na możliwości delaminacji i nadmiernym zużyciu narzędzi podczas skrawania laminatów ze względu na abrazyjne działanie włókien. Dlatego materiały te wymagają specjalnych materiałów narzędziowych.
- Połączenia nitowane i śrubowe muszą być wykonywane ostrożnie ze względu na możliwość delaminacji.
- Niezbędne są specjalistyczne metody kontroli uszkodzeń (NDT) opracowane specjalnie do laminatów.

Twórcy tych materiałów i producenci struktur lotniczych uważają, że pomimo pewnej niezbędnej ostrożności przy wytwarzaniu części i struktur z GLARE nie ma żadnych ograniczeń w możliwości stosowania tego materiału i innych z grupy FML [1,2,12,14,19].

#### 4. Materiały inteligentne. Stopy z pamięcią kształtu

Jedną z nowych klas materiałów, które zwróciły powszechną uwagę badaczy na świecie, są materiały inteligentne w postaci stopów z pamięcią kształtu. Ich coraz większa dostępność i wyjątkowe własności fizyczne sprawiają, że mogą one być z powodzeniem integrowane z innymi materiałami w celu uzyskania właściwości nieosiągalnych na żadnej innej drodze. Powstałe w ten sposób nowe materiały kompozytowe stanowią odrębną klasę materiałów kompozytowych – materiałów o sterowalnych własnościach [30-33]. Stopy z pamięcią kształtu posiadają niespotykane wśród innych materiałów właściwości związane ze zmianą ich modułu sprężystości czy też tłumienia. Przede wszystkim jednak posiadają możliwości generowania znaczących sił w procesie aktywacji, które są związane z efektem pamięci kształtu (odzysk naprężenia). Z uwagi na te właściwości stopy z pamięcią kształtu pozwalają na aktywne i w pełni kontrolowane sterowanie takimi cechami jak np. kształt, ugięcie statyczne, postacie i częstotliwości drgań własnych, amplitudy drgań rezonansowych, tłumienie.

Inteligentne elementy wykonawcze w postaci drutów, taśm, prętów lub belek wykonanych ze stopów z pamięcią kształtu

transfer, which is beneficial.

A comparison of manufacturing parts and structures made from GLARE, metal sheets, and composites [16] suggests that laminate materials will be more and more commonly used. The most important reasons include:

The possibility of using metal sheet moulding processes for manufacture of GLARE parts and structures. The largest differences occur in moulding of complex parts. Because of a difference in the limit of deformability, which is significantly lower for laminates, and a difference in elasticity, laminates are prone to spring-back. In manufacturing single-curved fuselage skins and stringers (trusses), classical methods can be used.

Moulding processes are supplemented with pretreatment processes identical to those applied for composite materials. The main reason for using this manufacturing method is the possibility of manufacturing large skin panels together with reinforcement, which has a large impact on the effectiveness and costs of production.

A key element in pretreatment processes is splice. Bonding allows manufacture of large panels, where the only limitation is the size of the autoclave chamber and pretreatment equipment.

In the process of machining, the main differences are the risk of delamination and excessive tool wear occurring in the machining of laminates caused by the abrasive action of fibres. That is why these materials require special tool materials.

Riveted and bolt joints have to be carefully manufactured because of the risk of delamination.

Application of specialist damage inspection techniques (non-destructive testing, NDT) especially designed for laminates is vital.

The designers of these materials and aircraft structure manufacturers alike believe that, despite a certain degree of caution required in manufacturing GLARE parts and structures, there are no limitations to the possibilities of use of this material or other FMLs [1,2,12,14,19].

#### 4. Smart materials. Shape memory alloys

One of the new classes of materials that have attracted general attention of researchers all over the world are smart materials known as shape memory alloys. Their growing availability and outstanding physical properties make it possible for them to be successfully integrated with other materials to yield properties unobtainable by other methods. The resulting new composite materials constitute a separate class of composite materials with programmable properties [30-33]. Memory shape alloys have properties connected with variations in their elastic modulus or damping capacity unparalleled by other materials. Above all, however, they have the ability to generate significant forces in the process of activation which are connected with the memory shape effect (stress recovery). Owing to these properties, shape memory alloys enable active and fully controlled programming of such features as shape, static deflection, modes and frequencies of free vibration, amplitudes of resonant vibration, or damping properties.

Smart actuators in the form of wires, strips, rods or beams made from shape memory alloys have to be appropriately integrated and joined with a construction element, thus ensuring its

muszą być we właściwy sposób zintegrowane i połączone z elementem konstrukcyjnym, zapewniając w ten sposób właściwą jego pracę i trwałość. Wyróżnić można dwa zasadniczo odmienne sposoby łączenia inteligentnych elementów wykonawczych ze stopów z pamięcią kształtu z elementami. Elementy aktywne (druty, taśmy, itp.) będące integralną częścią materiału elementu konstrukcyjnego lub konstrukcji, mogą być całkowicie lub częściowo zatopione w tym materiale albo umieszczone w specjalnych elastycznych koszulkach, które zapewniają brak naprężeń ścinających, pojawiających się w procesie aktywacji. W obu przypadkach inteligentne elementy aktywne mogą być przymocowane do elementu konstrukcyjnego w wybranej liczbie punktów lub na całej długości, zapewniając w ten sposób zasadniczo różny rozkład generowanych sił. W literaturze znane są również dwie całkowicie różne metody aktywacji inteligentnych elementów aktywnych: metoda APT (z ang. Active Property Tuning) i metoda ASET (z ang. Active Strain Energy Tuning) [34,35]. Metodę APT charakteryzuje brak generowanych naprężeń w trakcie aktywacji z uwagi na fakt, że wykorzystuje ona jedynie zmiany modułu sprężystości elementów aktywnych wykonanych ze stopów z pamięcią kształtu. Metoda ASET jest zasadniczo oparta na generacji naprężeń związanych z efektem pamięci kształtu w procesie aktywacji inteligentnych elementów aktywnych, które w tym celu muszą być poddane wstępnym odkształceniom lub procesowi trenowania.

Elementy konstrukcyjne w części lub całości wykonane z takich materiałów, bądź wyposażone w komponenty wykonane z materiałów o sterowalnych własnościach, charakteryzują się nietypowymi cechami, umożliwiającymi zmiany ich charakterystyk statycznych lub dynamicznych. Dzięki temu możliwe jest sterowanie kształtem elementów konstrukcyjnych, zarówno w przypadku elementów konstrukcyjnych pracujących pod obciążeniem statycznym jak i nieobciążonych. W dynamice możliwości wykorzystania tych materiałów są znacznie szersze i obejmują nie tylko możliwości sterowania wybranymi częstotliwościami i postaciami drgań własnych elementów konstrukcyjnych lecz również selektywne sterowanie amplitudami i częstotliwościami rezonansowymi lub tłumieniem.

## 5. Włókna piezoelektryczne

Pęknięcia w metalach oraz uszkodzenia od uderzenia, np. w materiałach kompozytowych, są główną przyczyną uszkodzeń konstrukcji lotniczych. Dlatego istotna jest wczesna diagnoza symptomów uszkodzenia, zwłaszcza w miejscach oddalonych, jak na przykład końcówki skrzydeł. Zastosowanie zintegrowanego systemu ciągłego monitorowania stanu technicznego obiektu może pozwolić na znaczną redukcję kosztów eksploatacji z powodu wyeliminowania długotrwałych planowych przeglądów. Uważa się, że lotnictwo może wiele skorzystać dzięki zintegrowanemu systemowi oceny stanu technicznego obiektu, który przy pomocy odpowiedniego instrumentarium uruchomi system wczesnego ostrzegania, a tym samym umożliwi wykonanie niezbędnych czynności zapobiegających zbyt długim przerwom w pracy czy wydatkom związanym z przeciągającymi się naprawami (Smart Health Monitoring - Inteligentne Monitorowanie Stanu). Wbudowane elementy aktywne tworzące rozproszoną sieć sensorów i/lub aktywatorów dają możliwość realizacji zadanych zadań monitorowania, adaptacji i sterowania [3,36-57].

Najnowsze osiągnięcia w dziedzinie nieinwazyjnych me-

proper functioning and durability. There exist two fundamentally different methods of joining smart shape memory alloy actuators with elements. Active elements (wires, strips, etc.) that are integral parts of the material of a construction element or a structure may be completely or partly embedded in this material or may be fitted in special elastic sleeves which ensure lack of shear stresses arising in the process of their activation. In both cases, smart active elements can be attached to a construction element at any given number of points or along its entire length, giving a fundamentally different distribution of the generated forces. The literature also knows two different methods of activation of smart active elements: the Active Property Tuning method (APT) and the Active Strain Energy Tuning method (ASET) [34,35]. The APT method does not generate strain during activation as it only uses variations in the elastic modulus of active elements made from shape memory alloys. The ASET method is generally based on generation of strain connected with the shape memory effect in the process of activation of smart active elements, which, for that purpose, have to be subjected to pre-deformation and training treatment.

Structural elements made in part or in whole from such materials, or fitted with components made from programmable materials possess untypical features which enable changes of their static and dynamic characteristics. This makes it possible to control the shape of structural elements, both in the case of structural elements operating under static loading conditions and unloaded conditions. In dynamics, the possibilities of application of these materials are much broader and include not only the possibility of controlling selected free vibration frequencies and modes of structural elements but also selective control of resonant amplitudes and frequencies or damping.

## 5. Piezoelectric fibres

Metal fractures and impact damage in composite materials are the main causes of aircraft structure damage. Hence the significance of early diagnosis of damage symptoms, especially in remote locations such as wing tips. Application of an integrated system of continuous health monitoring of an object, may lead to a significant reduction in maintenance costs by eliminating long-lasting scheduled inspections. It is believed that the aerospace industry can benefit a great deal from using integrated health assessment systems, which by means of a special apparatus activate an early warning system, and by doing so allow necessary actions to be taken to prevent excessively long breaks in operation or expenditure connected with protracted repairs (Smart Health Monitoring). Embedded active elements forming a distributed network of sensors and/or actuators enable realisation of the tasks of monitoring, adjusting, and control [3,36-57].

The latest achievements in non-destructive structural testing are oriented towards the analysis of elastic wave propagation. Methods are being worked out, which, based on recorded changes in the propagation of elastic waves, enable detection



tod oceny stanu technicznego konstrukcji kierują się w stronę analizy propagacji fal sprężystych. Opracowywane są metody, które na podstawie zarejestrowanych zmian w propagacji fal sprężystych, umożliwiają detekcję szczególnie niebezpiecznych uszkodzeń w początkowej fazie rozwoju, takich jak pęknięcia zmęczeniowe i delaminacje w materiałach kompozytowych. Przebiegi fal sprężystych generowane i rejestrowane są za pomocą sieci przetworników piezoelektrycznych. Fala sprężysta posiada zdolność propagowania na duże odległości, stąd zastosowanie technik na niej bazujących daje możliwość inspekcji szerokiego obszaru konstrukcji. Ponadto pozwalają one na uzyskanie informacji o stanie konstrukcji na podstawie jednego tylko badania, co z kolei tłumaczy zainteresowanie wielu gałęzi przemysłu możliwością pozyskania i wykorzystania tej metody [38-43].

W metodach tych stosowane są ceramiczne przetworniki piezoelektryczne o różnym sposobie rozmieszczenia i różnym kształcie. Najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie płaskich piezoelektrycznych przetworników ceramicznych o średnicy rzędu kilku milimetrów, spolaryzowanych radialnie, połączonych lutowanymi przewodami i zalaminowanych w kompozycie [3]. Wymiary przetworników muszą być dobrane tak, aby uzyskać ich maksymalną czułość dla modów fal rozchodzących się w elementach. Wykorzystanie kilku przetworników pozwala na wykrywanie powstających wad oraz na ich lokalizację.

Innym rozwiązaniem jest umieszczenie przetworników na folii, na przykład w układzie Smart Layer [36]. Taka technologia pozwala na dowolne umieszczenie czujników i dowolne prowadzenie przewodów w zależności od geometrii badanego elementu. Folia może być z jednej strony pokryta warstwą klejącą i przyklejona do metalowego elementu o powierzchni rozwijalnej (walec, stożek) lub ułożona między warstwami laminatu w trakcie produkcji elementu kompozytowego. Układ taki można wykorzystać do monitorowania zmian naprężeń lub do kształceń struktury w funkcji czasu (na podstawie zmian czasu przejścia impulsów), do wykrywania wad (na podstawie analizy zmian impulsów) lub do monitorowania procesu produkcji laminatu (monitorowanie amplitudy i zmiany czasu impulsów w procesie utwardzania laminatu).

Kolejnym ulepszeniem metody monitorowania jest zastosowanie przetworników z folii piezoelektrycznej. Matryca składa się z folii piezoelektrycznej, na którą nałożone są elektrody pokrywające powierzchnie przetworników i ścieżki elektryczne. Gotową matrycę nakleja się na element stosując taśmę obustronnie klejącą [3,44].

Najnowsze rozwiązania to czujniki z włókien piezoelektrycznych PZT. Są to włókna ceramiczne  $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ , w których najlepsze właściwości piezoelektryczne uzyskuje się dla składu  $Pb:Zr:Ti = 1:0,52:0,48$  a więc związku  $Pb(Zr_{0,52}Ti_{0,48})O_3$ . Włókna PZT wytwarza się różnymi technologiami, zastrzeżonymi patentami [44-52].

Technologia bezpośredniego spiekania opracowana została w Instytucie Fraunhofera w Niemczech. Drobny proszek z ceramiki piezoelektrycznej (ziarna o wymiarach 2 - 4  $\mu m$ ) razem z elastycznym spoiwem tworzy żel, z którego wyciskane są długie włókna o średnicy od 15 do 50  $\mu m$  [37]. Włókna te są następnie spiekane w piecu o kontrolowanej atmosferze i po ostygnięciu tworzą cienkie i elastyczne nitki ze zwartych ziarenek ceramiki piezoelektrycznej. Te nitki układane są następnie w jednej płaszczyźnie, równoległe do siebie, w odległościach

of particularly dangerous damage at an early stage of development, such as fatigue cracks and delamination in composite materials. Oscillations of elastic waves are generated and recorded by a network of piezoelectric transducers. Elastic waves have the ability to propagate over large distances, and so the use of techniques based on them allows inspection of large structural areas. Moreover, they allow one to obtain information on structural health on the basis of just one examination, which, in turn, explains the interest that many branches of industry take in the possibility of acquiring and using this method [38-43].

Those methods use ceramic piezoelectric transducers of various shapes and various distribution patterns. The simplest solution is to use radially polarised flat ceramic piezoelectric transducers with a diameter in the range of several millimetres, joined with conductive solder and laminated in a composite [3]. The size of the transducer has to be selected so as to achieve maximum sensitivity to the modes of the waves propagating in elements. Use of several transducers allows detection and localization of developing faults.

Another solution is to place transducers on a film, as in the case of the Smart Layer system [36]. This technology allows free placement of sensors and free wire laying dependent on the geometry of a given element. The film can either be coated on one side with an adhesive layer and bonded to a metal element with a developable surface (cylinder, cone) or placed between layers of laminate during the manufacture of a composite element. A system of this kind can be used to monitor strain variation and structural deformation as a function of time (on the basis of variations in pulse transit time), to detect faults (on the basis of an analysis of pulse variation), or to monitor the process of laminate manufacture (monitoring the amplitude and variations of pulse time in the process of laminate cure).

Another improvement on the monitoring methods is use of piezoelectric film transducers. The matrix here consists of piezoelectric film with electrodes deposited on it which cover the surfaces of transducers and the electrical paths. Prepared in this way, the matrix is bonded to an element using two-sided adhesive tape [3,44].

The latest solutions include PZT piezoelectric fibre sensors. These are ceramic  $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$  fibres, in which the best piezoelectric properties are achieved for the composition of  $Pb:Zr:Ti = 1:0.52:0.48$ , that is  $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ . PZT fibres are manufactured using different patent-protected technologies [44-52].

The technology of direct sintering has been developed in Fraunhofer Institute in Germany. Fine piezoelectric ceramic powder (grain size 2 - 4  $\mu m$ ) together with elastic binder form a gel, from which long fibres, 15 to 50  $\mu m$  in diameter, are squeezed [37]. The fibres are subsequently sintered in a controlled atmosphere furnace and, after cooling, form thin elastic threads of compact piezoelectric ceramic grains. The threads are then arranged in parallel in one plane at a spaced distance of about 0.2 mm from one another. On both sides, interdigitated electrodes are deposited on the fibre layer, which enable polarisation of the fibres (giving them piezoelectric properties) and, later, allow the operating sensors to collect from fibres electric charges arising on them under deformation.

A different technology involves manufacture of ceramic fibres on a metal core wire made of titanium, platinum or stainless steel wire using hydrothermal synthesis or extrusion moulding [47,51,52].

The hydrothermal method consists in growing PZT crys. als

około 0,2 mm. Z obu stron, na warstwę włókien nanoszone są elektrody grzebieniowe, które pozwalają na polaryzację włókien (nadanie im własności piezoelektrycznych) oraz później, w czasie pracy gotowych już czujników, na zbieranie z włókien ładunków elektrycznych powstających w czasie ich odkształcania.

Inna technologia to wytwarzanie włókien ceramicznych na rdzeniu metalowym z drutu tytanowego, platynowego, niklowego lub stali nierdzewnej metodą syntezy hydrotermalnej lub metodą wytłaczania [47,51,52].

Metoda hydrotermalna polega na wzroście kryształów PZT z roztworu zawierającego tlenki i wodorotlenki przy temperaturze 120-180°C w czasie 24-48 h w autoklawie. Pożądana grubość warstwy uzyskiwana jest w kolejnych cyklach.

W metodzie wytłaczania stosuje się najczęściej rdzeń z drutu platynowego ale można stosować i inne metale (nikiel, tytan, stal nierdzewną) pod warunkiem, że nie będą reagowały z ceramiką PZT i nie będą traciły swoich właściwości podczas spiekania przeprowadzanego w temperaturze 1100-1200°C.

W wytworzonych elementach, w których inteligentne włókna mają pracować jako elektrody możliwe jest stosowanie przewodzącego materiału kompozytowego, na przykład zawierającego włókna węglowe (CFRP). Średnica włókien PZT nie może przekraczać grubości maksymalnie dwóch warstw prepregu CFRP, najczęściej stosuje się włókna o średnicy 150-300 µm.

Grubość włókien PZT zależy od technologii ich wytwarzania. Stosując metodę syntezy hydrotermalnej otrzymuje się warstwy o grubości 5-30 µm, pokrywające powierzchnię drutu tytanowego o średnicy od 50 do 150 µm czyli włókna o średnicy od 60 µm do około 200 µm. Włókna takie pełnią rolę sensorów (czujników) wbudowanych w strukturę bez pogorszenia właściwości mechanicznych bazowego materiału kompozytowego.

Włókna wytwarzane metodą wytłaczania osiągają większe średnice, często dochodzące do 1-2 mm i służą głównie jako aktywatory [53,54].

Czujniki z włókien są czułe na odkształcenia w kierunku równoległym do kierunku ułożenia włókien (posiadają kierunkowe charakterystyki). Można je sklejać ze sobą warstwami tworząc laminat „nasycony” włóknami piezoelektrycznymi. Czujniki z włókien w takim kompozycie służą do monitorowaniem stanu struktury. Inną cechą struktury z wbudowanymi w nią włóknami piezoelektrycznymi jest możliwość aktywnego tłumienia drgań. Sygnały z czujników odkształcenia informują układ kontrolny o wystąpieniu drgań a układ reaguje wysłaniem sygnałów elektrycznych docierających do znajdujących się w laminacie włókien piezoelektrycznych, które odpowiednio kurczą się lub wydłużają, przeciwstawiając się drganiom struktury. W ten sposób struktura wyposażona w działające pasywnie i aktywnie czujniki może samodzielnie przeciwdziałać powstającym w niej drganiom. Działające na tej zasadzie układy stosowane są już dzisiaj w samolotach do tłumienia drgań niektórych elementów [55-57].

Obecnie elementy PZT produkowane są przez firmy komercyjne i są powszechnie dostępne na rynku w Europie Zachodniej, USA, Japonii. O ile technologia wytwarzania prostych elementów jest opanowana, to ich wkomponowanie w większą strukturę kompozytową jest ciągle tematem badań wielu firm lotniczych realizowanych we własnych zakładach badawczych lub też wspólnych ramowych programach europejskich. Ba-

in a solution containing oxides and hydroxides at 120-180°C for 24-48 h in an autoclave. The target thickness of the PZT film is obtained in successive cycles.

In the extrusion moulding method, platinum is the metal of choice for wire cores but other metals can also be used (nickel, titanium, stainless steel) as long as they do not react with PZT ceramics and do not lose their properties during sintering at a temperature of 1100-1200°C.

In the manufactured elements in which smart fibres are designed to operate as electrodes, conductive composite materials can be used such as carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP). The diameter of PZT fibres cannot exceed the thickness of the maximum of two CFRP prepreg layers. Most frequently, fibres with a diameter of 150-300 µm are used.

The thickness of PZT fibres depends on the manufacturing technology. Using hydrothermal synthesis, one obtains 5-30 µm thick layers coating the surface of a titanium wire with a diameter of 50 to 150 µm, i.e., fibres 60 to about 200 µm in diameter. Fibres of this type can function as embedded sensors without lowering the mechanical properties of the base composite.

Fibres manufactured by extrusion moulding reach larger diameters of 1-2 mm and they chiefly serve as actuators [53,54].

Fibre sensors are sensitive to strain parallel to fibre orientation (they possess directional characteristics). They can be bonded together in layers to form a laminate “saturated” with piezoelectric fibres. The fibre sensors in a composite of this kind serve the purpose of structural health monitoring. Another feature of a structure with embedded piezoelectric fibres is its active-vibration-damping capacity. Signals from strain sensors inform the control system of the occurrence of vibrations, and the system reacts by sending electrical signals to piezoelectric fibres in the laminate, which contract or expand as needed to counter the vibrations of the structure. That is how a structure fitted with passive and active sensors can on its own counteract vibrations that occur in it. Systems operating on this principle are already used in aircraft for damping the vibration of some elements [55-57].

At present, PZT elements are produced by commercial companies and are commonly available on the market in Western Europe, USA, and Japan. Inasmuch as the technology of manufacture of simple elements has been mastered, their embedding in a larger composite structure still remains a subject of research conducted by numerous aviation companies in their own research institutes or as part of joint European framework programmes. Studies of structures with embedded active elements are intensively conducted in major research centres in USA (NASA, Air Force, Army Research Office), Great Britain (Rolls-Royce, British Aerospace), Germany (European Aerospace & Defence System), Japan (Japan Steel), and France (Airbus).

dania konstrukcji z występującymi w niej elementami aktywnymi są przedmiotem intensywnych badań czołowych ośrodków badawczych w USA (NASA, Air Force, Army Research Office), Wielkiej Brytanii (Rollce–Royce, British Aerospace), Niemczech (European Aerospace & Defence System) i Japonii (Japan Steel), Francji (Airbus).

## 6. Podsumowanie

Z szerokiej grupy materiałów funkcjonalnych największe znaczenie w zastosowaniach lotniczych mają laminaty zawierające kompozyty o osnowie polimerowej oraz kompozyty z wbudowanymi elementami inteligentnymi do monitorowania stanu struktury oraz do sterowania jej właściwościami.

Polski przemysł lotniczy jako partner kooperacyjny dla światowych koncernów musi być przygotowany na wdrażanie innowacyjnych materiałów i technologii. Wykorzystanie inteligentnych materiałów opartych na kompozytach i laminatach w budowie struktur lotniczych jest jednym z zadań wymagających ścisłej współpracy ośrodków naukowo-badawczych z zakładami lotniczymi aby zakłady te stały się konkurencyjne na rynku. Działania takie już zostały podjęte w ramach CZT Aeronet – Dolina Lotnicza.

## 6. Conclusion

Within the large group of functional materials, the most important for aerospace applications are laminates with polymer-matrix composites and composites with embedded smart elements used for structural health monitoring and structural property control.

The Polish aerospace industry as a cooperation partner for international concerns must be prepared to implement innovative materials and technologies. Application of smart materials based on composites and laminates in the construction of aerospace structures is a task that requires close cooperation between research centres and aerospace companies for those companies to become competitive on the market. Such action has already been taken as part of the activity of the Centre of Advanced Technology CZT Aeronet – Aviation Valley.

## 7. References

- [1] Asundi A., Choi A.Y.N.: *Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft*, J. Mater. Processing Technology, 63, 1997, pp. 384-394.
- [2] Voegesang L.B., Vlot A.: *Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures*, Journal of Materials Processing Technology, 103, 2000, pp. 1-5.
- [3] Szelażek J.: *Czujniki piezoelektryczne stosowane w monitorowaniu stanu technicznego konstrukcji i w „inteligentnych strukturach”*, VIII Seminarium NBM Zakopane 2002, www.ndt-imb.com.
- [4] Sobczak J.: *Metalowe materiały kompozytowe*. Wyd. Instytutu Odlewnictwa i Instytutu Transportu Samochodowego, Kraków-Warszawa 2002.
- [5] Górny Z., Sobczak J.: *Nowoczesne tworzywa odlewnicze na bazie metali nieżelaznych*. Wyd. IO, Kraków 2005.
- [6] Williams J.C., Starke E.A Jr.: *Progress in structural materials for aerospace systems*, Acta Materialia 51 (2003) 5775–5799.
- [7] *Metal foams near commercialization*. Metal Powder Report Vol. 52, (1997), pp. 38-41.
- [8] Culshaw B.: *ASSET Collaboration in Europe on Smart Structures*, Smart Materials Bulletin, March 2002, pp. 7-10.
- [9] Kawai M., Morishita M., Tomura S., Takamida K.: *Inelastic behavior and strength of fiber-metal hybrid composite: GLARE*, Int. J. Mech. Sci., 40, no. 2-3, 1998, pp. 183-198.
- [10] Wu G., Yang J.-M.: *The Mechanical Behavior of GLARE Laminates for Aircraft Structures*, JOM, 2005 January, pp.72-79.
- [11] Alderliesten R.C., Homan J.J.: *Fatigue and damage tolerance issues of Glare in aircraft structures*, International Journal of Fatigue, 28, 2006, pp. 1116–1123.
- [12] Woerden H. J. M., Sinke J., Hooijmeijer P. A.: *Maintenance of Glare Structures and Glare as Riveted or Bonded Repair Material*, Applied Composite Materials, 10, 2003, pp. 307–329.
- [13] Borgonje B., Ypma M. S.: *Long Term Behaviour of Glare*, Applied Composite Materials 10, 2003, pp. 243–255.
- [14] Sinke J.: *Manufacturing of GLARE*, Parts and Structures Applied Composite Materials 10, 2003, pp. 293–305.
- [15] Castrodeza E. M., Schneider Abdala M. R.W., Bastian F. L.: *Crack resistance curves of GLARE laminates by elastic compliance*, Engineering Fracture Mechanics, 73, 2006, pp. 2292–2303.
- [16] Sinke J.: *Some Inspection Methods for Quality Control and In-service Inspection of GLARE*, Applied Composite Materials 10, 2003, pp. 277–291.
- [17] Homan J.J.: *Fatigue initiation in fibre metal laminates*, International Journal of Fatigue, 28, 2006, pp. 366–374.
- [18] Kim S. Y., Choi W. J., Park S. Y.: *Spring-back characteristics of fiber metal laminate (GLARE) in brake forming process*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 32, 2007, pp. 445–451.
- [19] Sinke J.: *Development of Fibre Metal Laminates: concurrent multi-scale modeling and testing*, J Mater Sci., 41, 2006, pp. 6777–6788.
- [20] Alderlieste R. C., Hagenbeek N.M., Homan J. J., Hooijmeijer P. A., De Vries T. J., Vermeeren C. A. J. R.: *Fatigue and Damage Tolerance of Glare*, Applied Composite Materials, 10, 2003, pp. 223–242.
- [21] Guo Y.J., Wu X.R.: *A phenomenological model for predicting crack growth in fiber-reinforced metal laminates under constant-amplitude loading*, Composites Science and Technology, 59, 1999, pp. 1825-1831.
- [22] Kawai M., Hachinohe A.: *Two-stress level fatigue of unidirectional fiber–metal hybrid composite: GLARE 2*, International Journal of Fatigue, 24, 2002, pp. 567–580.

- [23] Kawai M., Hachinohe A., Takumida K., Kawase Y.: *Off-axis fatigue behaviour and its damage mechanics modelling for unidirectional fibre-metal hybrid composite: GLARE 2*, Composites, Part A 32, 2001, pp. 13–23.
- [24] Alderliesten R.C.: *On the available relevant approaches for fatigue crack propagation prediction in Glare*, International Journal of Fatigue, 29, 2007, pp. 289–304.
- [25] Botelho E.C., Almeida R.S., Pardini L.C., Rezende M.C.: *Elastic properties of hygrothermally conditioned glare laminate*, International Journal of Engineering Science, 45, 2007, pp.163–172.
- [26] Shim D.J., Alderliesten R.C., Spearing S.M., Burianek D.A.: *Fatigue crack growth prediction in GLARE hybrid laminates*, Composites Science and Technology, 63, 2003, pp. 1759–1767.
- [27] De Vries T. J., Vlot A.: *The Influence of the Constituent Properties on the Residual Strength of Glare*, Applied Composite Materials, 8, 2001, pp. 263–277.
- [28] Botelho E.C., Pardini L.C., Rezende M.C.: *Hygrothermal effects on damping behavior of metal/glass fiber/epoxy hybrid composites*, Materials Science and Engineering, A 399, 2005, pp. 190–198.
- [29] Hoo Fatt M. S., Lin C., Revilock Jr. D. M., Hopkins D. A.: *Ballistic impact of GLARE fiber-metal laminates*, Composite Structures, 61, 2003, pp. 73–88.
- [30] Tsoi K.A., Stalmans R., Schrooten J., Wevers M., Mai Y.-W.: *Impact damage behaviour of shape memory alloy composites*, Materials Science and Engineering, A342, 2003, pp. 207-215.
- [31] Lombardi A.V.: *Technological optimisation of a smart thermosetting aeronautical composite subject to fatigue bending loads*, Progress in Aerospace Sciences, 39, 2003, pp.385–404.
- [32] Ye L., Lu Y., Su Z., Meng G.: *Functionalized composite structures for new generation airframes: a review*, Composites Science and Technology, 65, 2005, pp. 1436–1446.
- [33] Chung D. D.L.: *Composites get smart*, Materials today, January 2002, pp. 30-35.
- [34] Ghomshei M. M., Tabandeh N., Ghazavi A., Gordaninejad F.: *Nonlinear transient response of a thick composite beam with shape memory alloy layers*, Composites Part B: Engineering, Vol. 36, Is. 1, 2005, pp. 9-24.
- [35] Žak A. J., Cartmell M. P., Ostachowicz W.M.: *Static and Dynamic Behaviour of Composite Structures with Shape Memory Alloy Components*, Materials Science Forum. Vols. 440-441, 2003, pp. 345-354.
- [36] Lin M.: *Development of SMART Layer for Built-In Structural Diagnostics*, Proc. of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA, September 8-10,1999, Conf. Structural Health Monitoring 2000, Technomic Publishing Co., Inc, Lancaster-Basel, pp. 603-611.
- [37] Sporn D., Schonecker A.: *Composites with piezoelectric thin fibres - first evidence of piezoelectric behavior*, Mat. Res. Innovat., Vol.2, 1999, pp.303-308.
- [38] Bernhard A.P.F., Chopra I.: *Analysis of a bending-torsion coupled actuator for a smart rotor with active blade tips*, Smart Mater. Struct. 10, 2001, pp. 35–52.
- [39] Agneni A., Mastroddi F., Polli G.M.: *Shunted piezoelectric patches in elastic and aeroelastic vibrations*, Computers and Structures 81, 2003, pp. 91–105.
- [40] Beldica E., Hilton H. H.: *Nonlinear viscoelastic beam bending with piezoelectric control ± analytical and computational simulations*, Composite Structures 51, 2001, pp. 195-203.
- [41] Sester P. M.: *Effective properties of composites with embedded piezoelectric fibres*, Computational Materials Science, 16, 1999, pp. 89-97.
- [42] Nam Ch., Kim Y., Weisshaar T. A.: *Optimal sizing and placement of piezo-actuators for active flutter suppression*, Smart Mater. Struct., 5, 1996, pp. 216–224.
- [43] Qu G.M., Li Y.Y., Cheng L., Wang B.: *Vibration analysis of a piezoelectric composite plate with cracks*, Composite Structures, 72, 2006, pp. 111–118.
- [44] Allahverdi J.M., Mohammadi F., Safari A.: *Processing of Piezoelectric Fiber/Polymer Composites with 3-3 Connectivity*, Journal of Electroceramics, 8, 2002, pp. 209–214.
- [45] Matt H.M., Lanza di Scalea F.: *Macro-fiber composite piezoelectric rosettes for acoustic source location in complex structures*, Smart Mater. Struct., 16, 2007, pp. 1489–1499.
- [46] Chen H., Dong X., Zeng T., Zhou Z., Yang H.: *The mechanical and electric properties of infiltrated PZT/polymer composites*, Ceramics International, 33, 2007, pp. 1369-1374.
- [47] United States Patent 6963157.
- [48] Choy S.H. , Chan H.L.W., Ng M.W., Liu P.C.K.: *Study of 1-3 PZT fibre/epoxy composite force sensor*, Applied Physics A: Materials Science & Processing, Vol. 81, 4, 2005, pp. 817-821.
- [49] Hammami H., Arous M., Lagache M., Kalle A.: *Experimental study of relaxations in unidirectional piezoelectric composites*, Composites: Part A, 37, 2006, pp. 1–8.
- [50] Lehmann M., Büter A., Frankenstein B., Schubert F., Brunner B.: *Monitoring System for Delamination Detection – Qualification of Structural Health Monitoring (SHM) Systems*, Conference on Damage in Composite Material CDCM 2006, Stuttgart, September 2006.
- [51] Ohba Y et. al: *Preparation of Lead Zirconate Titanate Thin Film by Hydrothermal method*, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 31, No. 9B, 1991, pp. 2174–2177.
- [52] Ohba Y., Arita K., Tsurumi T., Daimon M.: *Analysis of Interfacial Phase between Substrates and Lead Zirconate Titanate Thin Films Synthesized by Hydrothermal Method*, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 33, No. 9B, 1994, pp. 5305-5308.
- [53] Edery-Azulay L., Abramovich H.: *Active damping of piezo-composite beams*, Composite Structures, 74, 2006, pp. 458–466.

- [54] Williams R.B., Inman D.J.: *An Overview of Composite Actuators with piezoceramic fibers*, Center for Intelligent Material Systems and Structures, Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 310 Durham Hall, Blacksburg, VA 24061-0261.
- [55] Raja S., Sinha P.K., Prathap G., Bhattacharya P.: *Influence of one and two dimensional piezoelectric actuation on active vibration control of smart panels*, Aerospace Science and Technology, 6, 2002, pp. 209–216.
- [56] Oueini S. S., Nayfeh A.H., Pratt J. R.: *A Nonlinear Vibration Absorber for Flexible Structures*, Nonlinear Dynamics, 15, 1998, pp. 259–282.
- [57] Yung H. Yu: *Rotor blade-vortex interaction noise*, Progress in Aerospace Sciences, 36 2000, pp. 97-115.

---

**Prof. dr hab. Barbara SUROWSKA**

Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Inżynierii Materiałowej  
ul. Nadbystrzycka 36  
20-618 Lublin  
e-mail: b.surowska@pollub.pl

---

## OPTIMALIZACJA PRZERW KONSERWACYJNYCH

### OPTIMIZATION OF PREVENTIVE MAINTENANCE INTERVALS

*W niniejszej pracy zaproponowano metodologię optymalizacji planowych prac konserwacyjnych opartą na wykorzystaniu danych pozyskanych z systemu informacji eksploatacyjnej - dopasowaniu struktury bazy danych, sposobu jej gromadzenia i przetwarzania. Algorytm przetwarzania danych opiera się na zastosowaniu teorii wymiany i jej modyfikacji dla danego problemu. Centralną zasadą algorytmu jest minimalizacja kosztów utrzymania i użytkowania sprzętu produkcyjnego. Algorytm ten może być używany jako oddzielne narzędzie lub może być integrowany z systemem komputerowego zarządzania eksploatacją i utrzymaniem ruchu jako moduł uzupełniający. Tym samym pozwala on na optymalizację przerw poświęconych różnego zakresu planowym pracom konserwacyjnym większości sprzętu produkcyjnego w przedsiębiorstwie. Przykład praktycznego zastosowania takiego algorytmu przedstawiono w końcowej części pracy.*

**Słowa kluczowe:** eksploatacja, optymalizacja, przerwa konserwacyjna.

*In the paper, the methodology of optimization of planned preventive maintenance is proposed, which is based on the utilization of data obtained from a maintenance information system – adjusting the database structure, collection and processing of data. The data processing algorithm is based on the application of theory of replacement and its modification for the given problem. The core principle of the algorithm is the minimization of costs of maintenance and operation of production equipment. The algorithm can be either used as a separate tool or integrated into the computer maintenance management system as a complementary module. Therefore it enables to optimize the intervals of various levels of planned preventive maintenance of most of the production equipment in a company. A practical example of application of such algorithm is presented in the end of the paper.*

**Keywords:** maintenance, optimisation, preventive maintenance interval.

#### 1. Introduction

In every firm a number of production equipment items can be found, for which a standard maintenance system based on a machines' operating time is applied. However, the used maintenance intervals (periods) are often determined just basing on a qualified estimate of the manufacturer or maintenance manager. This leads to an increase of machinery operating costs – too short maintenance period results in an increase of maintenance costs, too long maintenance intervals lead to increase of costs due to poor technical condition of the production equipment [1]. The efforts to apply sophisticated methods of preventive maintenance optimization are hindered by a number of problems. Some maintenance management information systems use for instance Markov processes, though these can be applied only for large populations of very similar machines. Known stochastic models are based on the knowledge of failure probability in various stages of the object's life – however, this implies the use of statistical methods and monitoring of a set of other metrics of machine's performance (reliability characteristics). The needed stochastic model of object renewal (replacement) then could be described and developed afterwards when the analysis of machine's operation history is done. Furthermore, the known models of optimization of preventive maintenance mostly consider only two-state elements. Some of these models could be successfully applied, but only in specific cases (electronic components, pipeline systems etc.). Generalizations or utilization of these methods for other applications, in this case for a population of heterogeneous machines of a manufacturing

plant, would be very difficult or impossible [6].

One of the other ways of determination of optimal standard maintenance period is the application of renewal (replacement) theory in the field of maintenance using maintenance data recorded in a maintenance information system. The practical output of such application for a maintenance manager is the possibility of justified correction of preventive maintenance periods, basing on the results of algorithmic testing of data recorded in the maintenance information system [5].

#### 2. Fundamentals of algorithm for optimization of preventive maintenance period

General criterial function of replacement seeks the minimum of average unit costs of replacement and operation – the minimum of the function marks the optimum time for replacement (see Equation 1) [2].

$$u(t) = \frac{N_o + N_p(t_s)}{t_s} \rightarrow \min \quad (1)$$

Where:  $N_o$  - costs of renewal (CZK),  $N_p(t_s)$  - cost of operation (CZK),  $t_s$  - mean time of operation (w),  $u(t)$  - average unit costs of replacement and operation (CZK.w<sup>-1</sup>).

For calculation of optimum period of standard maintenance, the function can be modified as follows:

$$u(t) = \frac{N_{\dot{u}} + N_p(t)}{t} \rightarrow \min \quad (2)$$

Where:  $N_{\dot{u}}$  - costs of preventive maintenance (CZK),  $N_p(t)$  -

costs of operation (CZK),  $t$  - time of operation since the last standard preventive maintenance ( $w$ ),  $u(t)$  - average unit costs of preventive maintenance and operation (CZK. $w^{-1}$ ).

It is obvious, that the costs of maintenance itself act in the way of prolonging the standard preventive maintenance period. Conversely, the costs of operation, which rise due to worsening technical condition when extending the maintenance period, make the preventive maintenance period as short as possible. The sum curve  $u(t)$  must have a local minimum, which needs to be found in order to determine the optimum period of preventive maintenance.

The costs of preventive maintenance  $N_p$  for specific types of maintenance are known. The cost items usually include costs of materials, wages including overheads and costs of downtimes, if caused by maintenance. These costs are recorded for each maintenance action in the maintenance information system [7].

The monitored items of costs need to include all the costs, caused by the deteriorated technical condition of the machine. In most cases these include the following cost items:

- a) costs of repairs (after failure maintenance),
- b) losses due to downtimes of production equipment,
- c) costs of nonconforming products (scraps) produced due to bad technical condition,
- d) costs of overconsumption of energies due to inefficiency caused by bad technical condition,
- e) losses due to worse performance of a machine caused by its bad technical condition.

Though not every maintenance information system allows monitoring of all of the above described items of costs, those most important for the optimization of maintenance period (a, b, often also c) can be recorded in every maintenance information system and therefore can be utilized in the optimization algorithm [3].

### 3. Algorithm of optimization of preventive maintenance period

The recorded maintenance data of a selected object (production equipment) is processed by the algorithm in the following way:

1. The following information is entered: ID code of the selected maintained object, type of maintenance and the number of historical periods to be processed (statistically, basing on hundreds of processed types of maintenance, the sufficient number of periods is  $k=6$  to 8).
2. For the chosen maintained object (production equipment) all the after-failure maintenance actions performed during the chosen history (ie. after-failure maintenance actions done between the standard preventive maintenance, for  $k$  periods).
3. In each period between preventive maintenance, the costs of operation and cumulative costs of operation are calculated. The costs of operation are calculated as follows:

$$N_p(t) = t_p \cdot a_1 + t_{pi} \cdot a_2 + N_{af} (+ p_{nv} \cdot a_3 + DE) \quad (3)$$

Where:  $N_p(t)$  - costs of operation for gradually deteriorating technical condition of a machine (CZK),  $t_p$  - labour consumption of maintenance after failure (hrs),  $a_1$  - hourly wage costs of maintenance personnel including overheads (CZK.hr<sup>-1</sup>),  $t_{pi}$  - duration of downtime due to after-failure maintenance (hrs),  $a_2$  - hourly downtime costs of the machine (CZK),  $N_{af}$  - costs for after-failure maintenance (repair) (CZK),  $p_{nv}$  - number of non-

conforming products (scrap) manufactured between maintenance actions (pcs),  $a_3$  - loss (costs) of producing a nonconforming product, scrap costs (CZK),  $\Delta E$  - costs of overconsumption of energy in the  $k$ -th period (CZK).

The last two terms of the equation are intentionally left in parentheses, because these are only rarely recorded in a suitable form and therefore it is not feasible to use them in most of manufacturing plants. Nevertheless, the dominant item of calculated costs is the costs of downtimes, which are typically by far higher than all the remaining items (for instance one hour of manufacturing line downtime in automotive industry equals to several millions CZK). Therefore the determination of optimal preventive maintenance period is not significantly affected by the two last terms in the equation and these can be ignored.

4. The average unit costs of maintenance and operations are calculated as the cumulative costs over the time of operation.
5. Finally, both the partial components of the total average unit costs are summed and the resulting values are fitted with a 2<sup>nd</sup> degree polynomial function. The coefficient of determination  $R^2$  is calculated. The sum curve is then analysed to find the minimum and appropriate optimal time of operation between preventive maintenance actions (optimal preventive maintenance period). In case the  $R^2$  values for more than a half of samples do not amount to at least 0.5, a warning message is shown indicating that the optimal period can not be determined with sufficient reliability and the algorithm is terminated.
6. The results of optimal periods of preventive maintenance for all the analysed historical periods between preventive maintenance actions are then processed as a weighted average of the obtained optimal maintenance periods and coefficients of determination, while only periods for which  $R^2 \geq 0.5$  are considered:

$$I_{U_{opt}} = \frac{\sum_{i=1}^k t_{opti} \cdot R^2_i}{\sum_{i=1}^k R^2_i} \quad (4)$$

The resulting optimal periods for selected types of preventive maintenance and production equipment are then visualized to the maintenance manager in a table. The table summarizes for each type of maintenance and production equipment the present maintenance period and the calculated optimal maintenance period. The three cases (Fig. 1) can then occur: the present main-

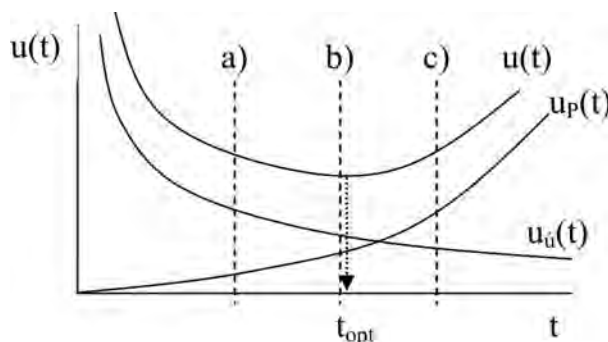


Fig.1. Example of graphical processing of data for optimal period of one type of preventive maintenance

tenance period is too short and it is possible to make it longer (case a); the present period is close to the calculated optimum and therefore confirmed as correct (case b); the present period is too long and needs to be shortened (case c). For each type of maintenance and machine the codes of three most frequent failures are shown – maintenance manager then can adjust both the duration of preventive maintenance periods and also the scope of preventive maintenance [4].

**4. Example of application of the algorithm for optimization of preventive maintenance period**

The described algorithm was tested for real data from a maintenance information system in a manufacturer of small machinery. In the phase of testing, MS Excel spreadsheet was used for processing of the data. The data were imported from the database of performed maintenance actions and then processed according to the previously described procedure. As an example, the optimization of quarterly period of standard preventive maintenance of Suhner drilling machine was selected. The original period of maintenance was 90 days. The costs of this preventive maintenance amounted to 15 450 CZK, wage costs of maintenance technician including overheads were 330 CZK /hour, one hour of downtime was appreciated to 4 500 CZK. The maintenance data for the selected machine have been recorded since 2002, data from the 8 previous consecutive 90-day periods of preventive maintenance for the calculation of optimal maintenance period. For each analysed period the minimum of total costs was found and the optimal period of preventive maintenance with the coefficient of determination of the obtained sum function  $u(t)$  were determined. The example of graphical processing of one of the analysed periods is presented in Fig. 2.

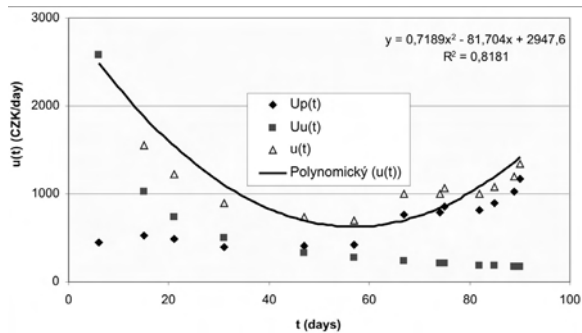


Fig. 2 Example of graphical processing of data from one of the analysed maintenance periods

After the data from all eight analysed maintenance periods have been processed, the optimal period of the given type of preventive standard maintenance was calculated as weighted average of all the  $t_{opt}$ , for which the value of  $R^2 \geq 0.5$  (see Tab. 1).

This means that the original period of preventive standard maintenance 90 days was too long and should be shortened to just 53 days. The maintenance manager can also look at the table of failure codes for the selected maintained object, either complete, or only the three most frequent (see Tab. 2), and for the possible correction of the scope of preventive maintenance also at the notes of maintenance technicians regarding the performed repairs (example of these notes is shown at Fig. 3).

Tab.1. Final processing of the partial values

Period	$t_{opt}$	$R^2$	$t_{opt} \cdot R^2$
1	57	0,82	46,74
2	53	0,89	47,17
3	62	0,85	52,7
4	46	0,5	23
5	45	0,83	37,35
6	54	0,68	36,72
7	46	0,77	35,42
8	56	0,71	39,76
Sum:		6,05	
Optimal maintenance period:			52,70 days

Tab. 2. List of most frequent failures for the selected maintained object

code of failure	number of failures
E00	47
E50	64
M00	56
M30	32

Replacement of position sensor M8 Mi PNP  
 Defective position sensor of loading  
 Failure of sensor NK2  
 Replacement of piston FESTO  
 Broken sensor cable  
 Replacement of position sensors M8 Mi PNP  
 Leaking air hose  
 Defective sensor SICK  
 ...

Fig. 3. Example of notes of maintenance technicians (translated)

For this real-data example, the following corrections were accepted:

- the period of preventive maintenance was shortened from 90 days down to 53 days,
- the maintenance scope was extended with other operations according to the occurrence of most frequent failures and information from the notes of maintenance technicians (regular checks of sensor cables and preventive replacements of inexpensive sensors of position).

In the manufacturing plant this algorithm was applied for 98 types of preventive maintenance for various machines. For 34 of them the original maintenance period was significantly out of the calculated optimum and was therefore corrected. The monitoring (though still only short-term) of changes of costs for machines with corrected maintenance periods (and mostly also scope of preventive maintenance) shown that 6 months after the corrections were imposed the costs of operation (influenced especially by the reduction of downtimes) of these machines dropped in average by 16 %. A more profound analysis and evaluation will be carried out one year after the corrections of standard preventive maintenance.

**5. Conclusion**

In the paper the methodology for optimization of planned preventive maintenance is proposed. The methodology is based on the data from the maintenance information system – adjust-



ment of the databases structure, data collection, selection/filtering of the data, testing and final processing. The algorithm of data processing is based on renewal (replacement) theory and its modification for the solution of the given problem. The core of the algorithm is the minimization of costs of maintenance and operation of production equipment. The algorithm can be used as a supporting tool for a maintenance information system

or developed and integrated into the maintenance information system as a supporting module. Therefore the algorithm enables easy optimization of planned preventive maintenance periods for most of the production equipment in a production plant. The first results of its application for real data from a manufacturing plant show that the proposed method is suitable and improves efficiency of maintenance system.

### 6. References

- [1] Drożyner, P., Mikołajczak, P.: *Maintenance of vehicles, machines and equipment in view of the ISO9001 requirements*. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability. No.4/2007, Polish Maintenance Society, Warsaw. ISSN 1507-2711.
- [2] Hladík, T.: *Počítačová podpora optimální obnovy strojů (Computer support of Optimal Machinery Replacement)*. Disertační práce, TF ČZU v Praze, 2004.
- [3] Jurča, V., Hladík, T.: *Maintenance Data Evaluation*. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability. No. 3/2006, Polish Maintenance Society, Warsaw. ISSN 1507-2711.
- [4] Legát, V., Žaludová, A., Červenka, V., Jurča, V.: *Contribution to optimization of preventive replacement*. Reliability Engineering and System Safety 51, Elsevier Science Limited, 1996, ISSN 0951-8320.
- [5] Müller, M.: *Maintenance success control (key figures and controlling in maintenance)*. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability. No. 4/2007, Polish Maintenance Society, Warsaw. ISSN 1507-2711.
- [6] Okulewicz, J., Salamonowicz, T.: *Modelling preventive maintenance for a vehicle fleet*. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability. No. 1/2008, Polish Maintenance Society, Warsaw. ISSN 1507-2711.
- [7] Stoneham, D.: *Maintenance Management and Technology*. Elsevier Science, Oxford, 1998, ISBN 1-85617-3151.

---

**Doc. Ing. Vladimír JURČA, CSc.**  
**Ing. Tomáš HLADÍK, MSc., Ph.D.**  
**Ing. Zdeněk ALEŠ**

Czech University of Life Sciences Prague  
Faculty of Engineering  
Department for Quality and Dependability of Machines  
165 21 Prague - Suchbátka, Czech Republic  
tel.: +420 224 383 322  
e-mail: jurca@tf.czu.cz

---

## BADANIA I ANALIZA POWTARZALNOŚCI ROZKŁADU ODCHYLEK GEOMETRYCZNYCH W PROCESIE OBRÓBKI SKRAWANIEM

### INVESTIGATIONS AND ANALYSIS OF REPEATABILITY OF GEOMETRIC DEVIATION DISTRIBUTION IN THE MACHINING PROCESS

*W artykule przedstawiono analizę i wyniki badań powtarzalności charakterystyk. yk statystycznych procesu obróbki skrawaniem. Omówiono podstawowe modele statystyczne procesów do których można dopasować badany proces. Badania powtarzalności oparto na monitorowaniu parametrów rozkładu odchyłek geometrycznych w cyklach pomiędzy kolejnymi zmianami ostrzy skrawających. Analiza zagadnienia omawia procedurę wyznaczania charakterystyk. yk statystycznych badanego procesu oraz powtarzalności podstawowych parametrów rozkładu odchyłek geometrycznych. Jako podstawowe parametry rozkładu odchyłek przyjęto wartość średnią odchyłek wymiaru, odchyłek kształtu oraz odchylenia standardowe odchyłek wymiaru i odchyłek kształtu. Wyniki badań i wyznaczonych statystycznie akceptowalnych granic zmienności badanego procesu przedstawiono na wykresach.*

**Słowa kluczowe:** model procesu, odchyłka geometryczna, rozkład odchyłek, powtarzalność rozkładu.

*The paper presents an analysis and the results of investigations of the statistical characteristics of repeatability of the machining process. Basic statistical process models, to which the investigated process can be fitted, are discussed. The investigations of repeatability are based on monitoring of the parameters of geometrical deviation distribution in the cycles between the successive changes of cutting tool points. The paper discusses a procedure for determining the statistical characteristics of the process investigated and the repeatability of basic parameters of distribution of geometrical deviations. The mean value of dimension deviations and shape deviations, and standard deviations of dimension and shape deviations were assumed as the basic parameters of deviation distribution. The results of the investigations as well as the statistically determined acceptable variation limits of the process investigated are presented in graphs.*

**Keywords:** process model, geometric deviation, deviation distribution, repeatability of distribution.

#### 1. Wprowadzenie

Każdy proces technologiczny charakteryzują parametry technologiczne oraz parametry statystyczne. Parametry procesów podlegają wpływom szeregu czynników związanych lub towarzyszących danemu procesowi, przez co zmieniają w czasie ustalone wartości liczbowe.

Zmienność (niestabilność) wartości liczbowych parametrów procesu w czasie jest powodem występowania odchyłek geometrycznych obrobionych powierzchni o charakterze przypadkowym lub systematycznie zmiennym. W rezultacie, statystycznie, proces technologiczny można traktować jako proces stochastyczny a więc jako funkcję odchyłek geometrycznych których wartościom można przypisać określone prawdopodobieństwo ich wystąpienia [2]. Mamy wtedy do czynienia z rozkładem gęstości prawdopodobieństwa odchyłek geometrycznych.

Do podstawowych parametrów charakteryzujących rozkład gęstości prawdopodobieństwa odchyłek geometrycznych procesu należy zaliczyć [5]:

- statystyczną wartość średnią,
- oszacowania odchyłek standardowych zmiennej i średniej,
- zgodność statystycznej średniej ze średnią arytmetyczną granic tolerancji.

W zależności od wartości w/w parametrów rozkładu odchyłek geometrycznych w czasie względem ustalonej tolerancji można mówić o modelach statystycznych procesów [1].

#### 1. Introduction

Every manufacturing process is characterised by technological parameters and statistical parameters. Process parameters are affected by a number of factors intrinsic to or accompanying a process, thus changing their fixed numerical values in time.

Variation (instability) of the numerical values of process parameters is a cause of the occurrence of randomly or systematically varying geometric deviations in machined surfaces. As a result, statistically, the technological process can be treated as a stochastic process, i.e., as a function of geometric deviations, to the values of which a certain probability of occurrence can be ascribed [2]. In that case we are dealing with a distribution of the probability density of geometric deviations.

Among the basic parameters, by which the distribution of the probability density of geometric process deviations is characterized, the following ones should be numbered [5]:

- statistical mean value,
- estimations of standard deviations of variable and mean,
- consistency of the statistical mean with the arithmetic mean of tolerance limits.

Depending on the values of the above mentioned parameters of the geometric deviations distribution in time relative to fixed tolerance, we can talk of statistical models of processes [1].

2. Podstawowe modele statystyczne procesu

Proces technologiczny zapewniający rozkład prawdopodobieństwa odchyłek geometrycznych dla którego średnia wartość statystyczna  $\bar{u}_S$  odchyłki byłaby równa średniej arytmetycznej  $\bar{u}_A$  wartości granicznych  $USL$  i  $LSL$  wyznaczających przedział tolerancji  $T$ , a oszacowanie odchylenia standardowego  $S_{(w)}$  miałyby stałą wartość rys. 1 można uważać za proces ustabilizowany.

Taki proces odpowiadałby ściśle *modelowi A* procesu [1], który charakteryzują następujące założenia:

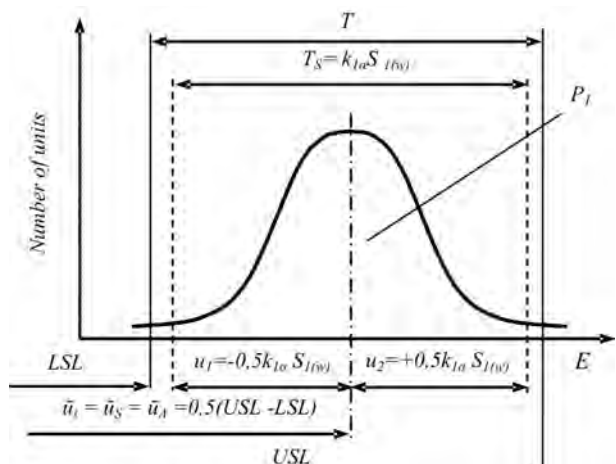
- chwilowy rozrzut wartości kontrolowanej cechy w czasie  $t$  jest zgodny z rozkładem normalnym o parametrach  $S_{(w)}$  i  $\bar{u}_S$ ,
- oszacowanie odchylenia standardowego  $S_{(w)}$  jest stałe w czasie,
- wartość średnia  $\mu_i = \bar{u}_S$  będąca oszacowaniem niewiadomej wartości poprawnej jest stała w czasie.

W praktyce utrzymanie wartości parametrów technologicznych procesu na ściśle określonym poziomie nie jest możliwe z uwagi na oddziaływanie szeregu czynników zakłócających. W rezultacie w procesie technologicznym zmieniają się nie tylko wartości odchyłek geometrycznych, ale również parametry statystyczne procesu t. j. odchylenie standardowe i związana z tym statystyczna tolerancja procesu  $T_S$  (szerokości przedziału rozrzutu odchyłek), oraz statystyczna wartość średnia. Proces taki określa się jako proces niestabilizowany.

Należy zaznaczyć, że statystyczna ocena procesu technologicznego na podstawie kontroli partii jednostek wyrobów może w istotny sposób różnić się od statystycznej oceny dokonywanej na podstawie kontroli frakcji o określonej liczebności wykonanych jednostek w czasie  $t_i$ . Charakterystykę rozkładu odchyłek uzyskiwaną na podstawie kontroli frakcji można porównać do przedstawionych na rys. 2.

Taki proces odpowiadałby *modelowi C* procesu [1] który charakteryzują następujące założenia:

- chwilowy rozkład wartości kontrolowanej cechy w czasie  $t_i$  jest zgodny z rozkładem normalnym o parametrach  $S_{(w)}$  i  $\bar{u}_i$ ,



Rys. 1. Proces technologiczny ustabilizowany, stała statystyczna wartość średnia równa średniej arytmetycznej granic specyfikacji oraz stała wartość odchylenia standardowego

Fig. 1. Stable technological process, constant statistical mean value equal to arithmetic mean of specification limits and constant value of standard deviation

2. Basic statistical models of process

A technological process which assures a probability distribution of geometric deviations for which the mean statistical value  $\bar{u}_S$  would be equal to the arithmetic mean  $\bar{u}_A$  of the boundary values  $USL$  and  $LSL$  that determine the tolerance interval  $T$ , and the standard deviation estimator  $S_{(w)}$  would have a constant value, Fig.1, can be considered a stabilized process.

Such a process would correspond strictly to *model A* of process [1], which is characterized by the following assumptions:

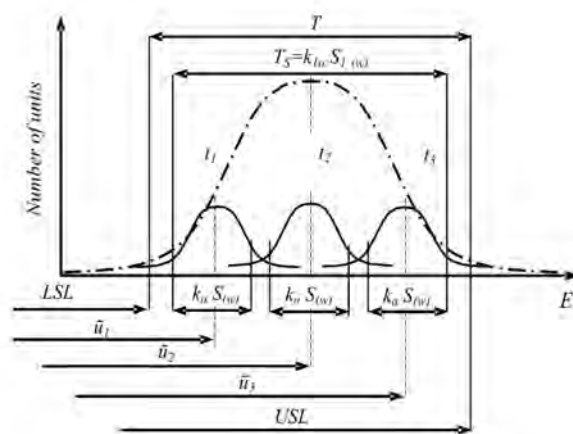
- instantaneous scatter of values of the controlled characteristic in time  $t$  is consistent with normal distribution with parameters  $S_{(w)}$  and  $\bar{u}_S$ ,
- estimation of standard deviation  $S_{(w)}$  is constant in time,
- mean value  $\mu_i = \bar{u}_S$ , being an estimation of an unknown correct value, is constant in time.

In practice, conservation of the values of the technological parameters of a process on a precise level is not feasible because of the action of a series of disturbance factors. As a result, in a technological process not only the values of geometric deviations change, but the statistical process parameters, i.e. standard deviation and the corresponding statistical process tolerance  $T_S$  (of the interval width of the scatter of deviations), and the statistical mean value do as well. Such a process is defined as an unstable process.

It should be pointed out that a statistical evaluation of a technological process on the basis of product sample inspection may differ significantly from a statistical process control conducted on the basis of a control of fractions of determined size in time  $t_i$ . A characteristic of deviation distribution obtained on the basis of fractions control can be compared to the results presented in Fig. 2.

Such a process would correspond to *model C* of process [1], characterized by the following assumptions:

- instantaneous distribution of values of the controlled characteristic in time  $t$  is consistent with normal distribution with parameters  $S_{(w)}$  and  $\bar{u}_i$ ,
- estimation of standard deviation  $S_{(w)}$  is constant in time for



Rys.2. Proces technologiczny o stałej wartości odchylenia standardowego i systematycznie zmiennej wartości średniej

Fig.2. Technological process with constant value of standard deviation and systematically varying mean value

- oszacowanie odchylenia standardowego  $S_{(w)}$  jest stałe w czasie dla kolejno pobieranych serii,
- wartość średnia  $\bar{u}_i$  dla serii będąca oszacowaniem niewiadomej wartości poprawnej zmienia się w czasie według ściśle określonej i znanej prawidłowości.

Jeżeli proces oparty na modelu C będzie powtarzalny w czasie  $t$  pomiędzy dwoma kolejnymi wymianami ostrza skrawającego lub po przeprowadzeniu korekcji ustawienia narzędzia to może odpowiadać modelowi A dla partii wykonanych jednostek wyrobów w czasie  $t$ .

W praktyce statystyczna ocena procesu w toku, teoretycznie zgodnego z modelem C, może zależeć od sposobu pobierania jednostek do badań. Jeżeli proces odpowiadający modelowi C będzie monitorowany w sposób ciągły, a wartość średnia i oszacowanie odchylenia standardowego będą wyznaczone dla kumulowanej liczby wykonywanych jednostek w takt ich przybywania, to w rezultacie charakterystyka procesu będzie odpowiadać przedstawionej na rys. 3.

Taki proces można określić, że odpowiada modelowi C-A procesu [5] który będą charakteryzować następujące założenia:

- chwilowy rozkład wartości kontrolowanej cechy w czasie  $t_i$  jest zgodny z rozkładem normalnym o parametrach  $S_{(w)}$  i  $\bar{u}_i$ ,
- oszacowanie odchylenia standardowego  $S_{(w)}$  jest zmienne w czasie,
- wartość średnia  $\bar{u}_i$  będąca oszacowaniem niewiadomej wartości poprawnej zmienia się w czasie według ściśle określonej i znanej prawidłowości.

### 3. Badania statystycznej powtarzalności rozkładu odchyłek geometrycznych

W praktyce procesy technologiczne mogą być dopasowywane do szeregu statystycznych modeli procesów. W odniesieniu do procesów obróbki skrawaniem można mówić o modelach A, C i C-A. Prowadzone w tym zakresie badania wskazują, że proces obróbki skrawaniem może odpowiadać:

- modelowi A, jeżeli jego parametry statystyczne zostaną wyznaczone na podstawie kontroli serii jednostek wyrobów po ich wykonaniu,
- modelowi C, jeżeli jego parametry statystyczne będą wyznaczone w toku produkcji dla frakcji o ustalonej liczbie wykonanych jednostek wyrobów,
- modelowi C-A, jeżeli jego parametry statystyczne będą wyznaczone w toku produkcji dla kumulowanej liczby wykonanych jednostek wyrobów.

Teoretycznie tylko proces odpowiadający modelowi A można uznać za proces stabilny. Modele C i C-A nie wykazują cech stabilności statystycznej, ponieważ charakteryzują się trendem powodowanym naturalnym zużyciem ostrza skrawającego. W

the series picked sequentially,

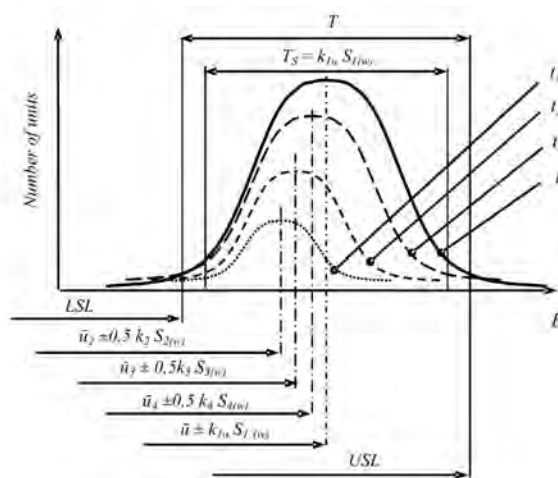
- mean value  $\bar{u}_i$  for the series, being an estimation of an unknown correct value, changes in time according to a precisely determined and known rule.

If a process based on the model C is repeatable in time  $t$  between two successive changes of cutting tool points or after conducting a correction of tool setting, then it may correspond to the model A for the batch of product units made in time  $t$ .

In practice, statistical evaluation of a process in progress, theoretically consistent with model C, may depend on the sampling method. If a process corresponding to model C is monitored continuously, and the mean value and the estimation of standard deviation is determined for a cumulative number of units manufactured as their number increases, then the characteristics of the process will correspond to the one presented in Fig. 3.

Such a process can be defined as corresponding to model C-A of process [5], characterized by the following assumptions:

- instantaneous distribution of values of the controlled characteristic in time  $t_i$  is consistent with normal distribution with parameters  $S_{(w)}$  and  $\bar{u}_i$ ,
- estimation of standard deviation  $S_{(w)}$  varies in time,
- mean value  $\bar{u}_i$ , being an estimation of an unknown correct value, changes in time according to a precisely determined and known rule.



Rys. 3. Proces technologiczny o zmiennej wartości odchylenia standardowego i systematycznie zmiennej wartości średniej

Fig. 3. Technological process with varying value of standard deviation and systematically varying mean value

### 3. Investigations of statistical repeatability of the distribution of geometric deviations

In practice, technological processes can be fitted to a series of statistical process models. In relation to machining processes, we can talk of A, C and C-A models. The investigations conducted along that line indicate that the machining process can correspond to:

- model A, if its statistical parameters are determined on the basis of control of a series of product units after their manufacture,
- model C, if its statistical parameters are determined in the process of manufacturing, for a fraction with a specified number of manufactured product units,
- model C-A, if its statistical parameters are determined in the process of manufacturing for a cumulative number of units manufactured.

Theoretically, only the process corresponding to model A can be regarded as a stable process. Models C and C-A do not have the properties of statistical stability, because they are characterized by a trend caused by the natural wear of cutting

praktyce, w odniesieniu do modeli statystycznych procesów charakteryzujących się trendem [4], istotną cechą jest powtarzalność charakterystyk statystycznych. W procesach charakteryzujących się powtarzalnością statystyczną, pomimo trendu, można z powodzeniem stosować statystyczną kontrolę jakości i powtarzalności opartą na kartach kontrolnych.

Modele statystyczne procesów opierają się na charakterystykach statystycznych wartości średniej oraz odchylenia standardowego kontrolowanej właściwości. Z tego względu, powtarzalność procesów obróbki skrawaniem może być oceniana na podstawie porównywania zmienności wartości średniej i odchylenia standardowego odchyłek geometrycznych w określonym przedziale czasowym, lub na podstawie porównywania wartości współczynnika  $C_{pk}$  [3]. Porównywanie na podstawie wartości współczynnika  $C_{pk}$ , w praktyce, nie zawsze może zapewnić wymaganą czułość badań.

Ocena powtarzalności procesu obróbki skrawaniem powinna uwzględniać zmienność charakterystyk wartości średniej i odchylenia standardowego odchyłek wymiaru oraz odchylenia standardowego odchyłek kształtu w cyklu pracy ostrza skrawającego względem teoretycznie wyznaczonych dopuszczalnych granic zmienności tych parametrów.

Ocenie powtarzalności odchyłek geometrycznych poddano proces obróbki tokarskiej pierścienia łożyskowego o średnicy nominalnej  $d_N = 89,54\text{mm}$  i tolerancji konstrukcyjnej  $T = 0,15\text{mm}$ . Proces obróbki był prowadzony na wielowrzecionowym automacie tokarskim *AAH-180* wyposażonym w uchwyty mocujące 3-szczękowe. Materiał wyjściowy stanowiła odkuwka matrycowa pierścienia ze stali *LH 15*. Parametry skrawania dobrano do obróbki wykańczającej; posuw  $p = 0,25\text{ mm/obr.}$ , prędkość skrawania  $V \approx 112\text{ m/min}$ . Ostrze narzędzia skrawającego stanowiły płytki wymienne typu *SNMG 120412* firmy *Sandvik coromant* o promieniu wierzchołka  $r_e = 1,2\text{ mm}$ .

Badania oparto na monitorowaniu odchyłek wymiaru i kształtu oraz odchylenia standardowego odchyłek wymiaru i kształtu procesu w czasie trzech cykli pracy ostrza skrawającego. Poszczególne cykle oznaczono symbolami *PW1*, *PW2*, *PW3*. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 4. Cykl pracy ostrza odpowiadał zalecanemu okresowi jego trwałości.

W celu porównania zmienności charakterystyk dla poszczególnych cykli, uzyskane wyniki przedstawiono na pojedynczych wykresach w postaci zgrupowanych charakterystyk wartości średnich odchyłek wymiarowych  $E_w$ , odchyłek kształtu  $E_k$  oraz zgrupowane charakterystyki odchylenia standardowego odchyłek wymiaru  $S_{(E_w)}$  i kształtu  $S_{(E_k)}$ .

#### 4. Analiza statystyczna powtarzalności rozkładu odchyłek geometrycznych

Wyznaczenie wartości liczbowej akceptowalnej zmienności procesu oparto na analizie wartości średniej odchyłek wymiaru i kształtu i porównaniu charakterystyk wartości średnich dla trzech cykli pracy ostrza. W tym celu wyznaczono w grupie charakterystyk punkt leżący na dowolnej charakterystyce, ale wyraźnie odbiegający od pozostałych. Dla badanego procesu przyjęto że punkt ten odpowiada numerowi 135 jednostki obrabianych powierzchni. Korzystając z wartości oszacowania odchylenia standardowego odpowiadającego temu numerowi jednostki, wyznaczono akceptowalną zmienność wartości średniej odchyłki wymiaru  $\Delta \bar{E}_w$  i wartości średniej odchyłki kształtu  $\Delta \bar{E}_k$  w oparciu o zależności:

tool point. In practice, in relation to statistical processes characterized by trend [4], a significant property is repeatability of statistical characteristics. In the processes characterized by statistical repeatability, notwithstanding the trend, statistical quality and repeatability control based on control charts can be used with success.

Statistical models of process are based on statistical characteristics of the mean value and the standard deviation of the property controlled. Because of that, the repeatability of machining processes can be evaluated on the basis of comparison of the variation of the mean value and the standard deviation of geometrical deviations in a certain time interval, or on the basis of comparison of the values of the  $C_{pk}$  coefficient [3]. Comparisons on the basis of the  $C_{pk}$  coefficient, in practice, cannot always assure the desired sensitivity of experiments.

The evaluation of the repeatability of the machining process should take into account variation of the characteristics of the mean value and standard deviation of dimension deviations and standard deviation of shape deviations in the working cycle of cutting tool point relative to the theoretically determined variation limits of these parameters.

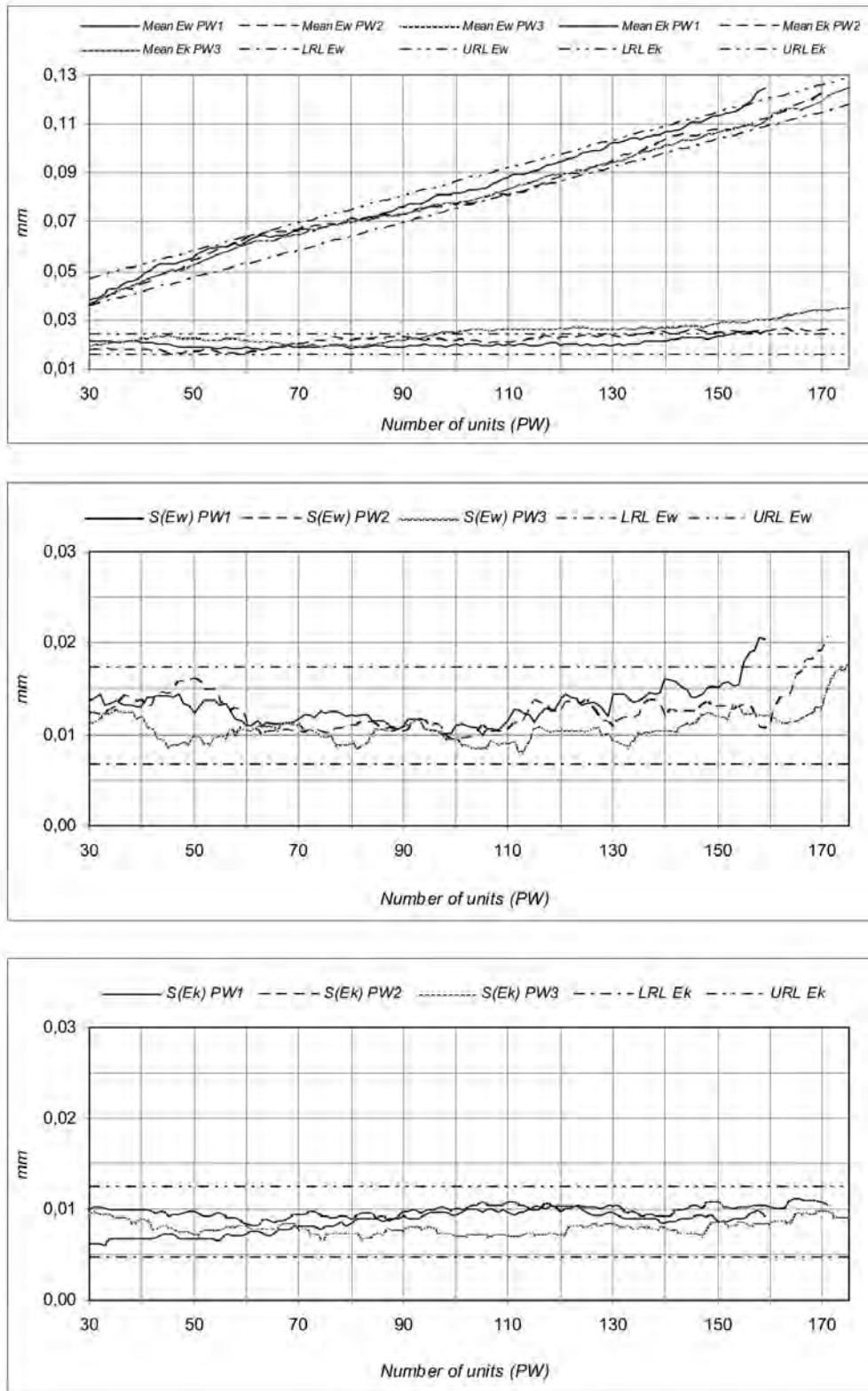
The evaluation of the repeatability of geometrical deviations was conducted on the process of turning of a bearing ring of nominal diameter  $d_N = 89,54\text{mm}$  and structural tolerance  $T = 0,15\text{mm}$ . The machining process was conducted on an automatic multiple-spindle lathe *AAH-180* equipped with 3-jaw chucks. The stock was a die forging of a ring made of *LH 15* steel. The machining parameters were selected for finishing: feed  $p = 0,25\text{ mm/rev}$ , moving speed  $V \approx 112\text{ m/min}$ . Cutting tool points were *SNMG 120412 Sandvik coromant* inserts with the cutting nose radius  $r_e = 1,2\text{ mm}$ .

The investigations comprised monitoring the dimension and shape deviations as well as the standard deviation of the dimension and shape deviations of the process during three working cycles of the cutting tool point. The individual cycles were labelled as *PW1*, *PW2*, *PW3*. The results obtained are presented in Fig. 4. The working cycle of the cutting tool point corresponded to its recommended life-period.

To compare the variability of characteristics for individual cycles, the results obtained are presented in single graphs in the form of grouped characteristics of the values of mean dimension deviations  $E_w$ , shape deviations  $E_k$  and grouped characteristics of the standard deviation of dimension  $S_{(E_w)}$  and shape  $S_{(E_k)}$  deviations.

#### 4. Statistical analysis of repeatability of geometric deviation distribution

The determination of the numerical value of the acceptable variation of the process was based on the analysis of the mean value of dimension and shape deviations and the comparison of characteristics of mean values for three working cycles of the cutting tool point. For that purpose, in a group of characteristics a point lying on an arbitrary characteristic, but distinctly diverging from others, was found. For the process investigated, it was assumed that that point was the point corresponding to unit number 135 of the machined areas. Using the estimation of the standard deviation value corresponding to that unit number, acceptable variation of mean value of dimension deviation  $\Delta \bar{E}_w$  and mean value of shape deviation  $\Delta \bar{E}_k$  was determined based on the formulas



Rys.4. Zestawienie wyników badań powtarzalności wartości średniej; a) odchyłek wymiaru  $E_w$  i kształtu  $E_k$ , b) odchylenia standardowego odchyłek wymiaru  $S_{(E_w)}$  c) odchylenia standardowego odchyłek kształtu  $S_{(E_k)}$  dla trzech cykli wymiany ostrza skrawającego w funkcji liczby obrabianych jednostek

Fig.4. Results of investigations of the repeatability of the mean value of a) the dimension  $E_w$  and shape  $E_k$  deviations, b) the standard deviation of dimension deviations  $S_{(E_w)}$  c) the standard deviation of shape deviations  $S_{(E_k)}$  for three working cycles of cutting tool point as a function of number of units machined

$$D\bar{E}_w = k_{0,02;29} \frac{S(E_w)}{\sqrt{30}}; \quad D\bar{E}_k = k_{0,02;29} \frac{S(E_k)}{\sqrt{30}} \quad (1)$$

$$D\bar{E}_w = k_{0,02;29} \frac{S(E_w)}{\sqrt{30}}; \quad D\bar{E}_k = k_{0,02;29} \frac{S(E_k)}{\sqrt{30}} \quad (1)$$

Wyniki obliczeń przedziałów zmienności wartości średnich odchyłek wymiaru i kształtu zestawiono w tabl. 1.

The results of the calculations of variation intervals of the mean values of dimension and shape deviations are presented in Table 1.

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń przedziałów zmienności średnich wartości odchyłek wymiaru i kształtu  
Table 1. Results of calculations of variation intervals of the mean values of dimension and shape deviations

Proces	n	$E_w$	$S(E_w)$	$E_k$	$S(E_k)$	$\bar{S}(E_w)$	$\bar{S}(E_k)$	$\Delta E_w$	$\Delta \bar{E}_k$
PW1	135	0,099	0,014	0,015	0,009				
PW2	135	0,093	0,012	0,019	0,009				
PW3	135	0,093	0,010	0,022	0,008				
Średnia		0,095	0,012	0,019	0,009	0,0022	0,0016	0,0108	0,0078

W celu sprawdzenia czy charakterystyki odchyłek wymiaru pozyskane z trzech cykli pracy ostrza będą mieścić się w paśmie o szerokości równej dopuszczalnej zmienności wartości średniej odchyłek wymiaru  $\Delta \bar{E}_w$ , wybrano z grupy charakterystyk wartości średnich (rys. 4.) dwa punkty, możliwie odległe od siebie, leżące na dowolnej charakterystyce, ale o wyraźnym odchyleniu od pozostałych. Dla badanego procesu przyjęto, że punkty te będą odpowiadać numerom 46 i 102 jednostek obrabianych powierzchni. Odczytując odpowiadające tym punktom wartości odchyłek wymiarowych wyznaczono dopuszczalne pasmo zmienności wartości średniej odchyłek wymiaru. Jako dolną  $LRL(E_w)$  i górną  $URL(E_w)$  granicę zmienności przyjęto proste o równaniach:

To verify whether the characteristics of dimension deviations obtained from three working cycles of cutting tool point would lie within the range of the width equal to the acceptable variation of the mean value of dimension deviation  $\Delta \bar{E}_w$ , from the group of characteristics of mean values (Fig. 4.) two points were selected, as far apart from each other as possible, lying on an arbitrary characteristic but distinctly diverging from others. For the process investigated, it was assumed that the points would correspond to unit numbers 46 and 102 of the machined areas. By reading the values of dimension deviations corresponding to those points, the acceptable variation range of the mean value of dimension deviations was determined. As the lower  $LRL(E_w)$  and the upper  $URL(E_w)$  range limits, the lines described by the following equations were adopted:

$$LRL(E_w) = \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} n - \left( \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} \right) 46 + E_{W(46)} \quad (2)$$

$$LRL(E_w) = \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} n - \left( \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} \right) 46 + E_{W(46)} \quad (2)$$

$$URL(E_w) = \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} n - \left( \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} \right) 46 + E_{W(46)} + D\bar{E}_w \quad (3)$$

$$URL(E_w) = \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} n - \left( \frac{E_{W(102)} - E_{W(46)}}{102 - 46} \right) 46 + E_{W(46)} + D\bar{E}_w \quad (3)$$

Wyznaczone granice pasma zmienności odchyłek wymiaru  $LRL(E_w)$  i  $URL(E_w)$  naniesiono na wykresy wartości średnich odchyłek wymiaru rys. 4a.

The determined limits of the dimension deviation variation range,  $LRL(E_w)$  and  $URL(E_w)$ , were plotted in the graphs of values of mean dimension deviations Fig. 4a.

W celu wyznaczenia pasma zmienności odchyłek kształtu przyjęto, że dolna granica zmienności  $LRL(E_k)$  będzie wyznaczona przez prostą styczną do najniższego punktu w grupie charakterystyk odchyłek kształtu. Dla uzyskanych wyników, jako dolną granicę zmienności rys. 4a przyjęto punkt przez który przechodzi prosta o równaniu:

In order to determine the variation range of shape deviations, it was assumed that the lower range limit  $LRL(E_k)$  would be determined by the tangent at the lowest point in the group of shape deviation characteristics. For the results obtained, the point through which the line given by the equation (4) passes was assumed as the lower range limit (Fig. 4a):

$$LRL(E_k) = 0,011 \quad (4)$$

$$LRL(E_k) = 0,011 \quad (4)$$

Jako górną granicę zmienności  $URL(E_k)$  rys. 4a przyjęto punkt przez który przechodzi prosta o równaniu:

As the upper range limit  $URL(E_k)$  (Fig.4a), the point through which the line given by the equation (5) passes was assumed:

$$URL(E_k) = 0,011 + DE_k = 0,019 \quad (5)$$

$$URL(E_k) = 0,011 + DE_k = 0,019 \quad (5)$$

Wyznaczone granice  $LRL(E_k)$  i  $URL(E_k)$  pasma zmienności wartości średniej odchyłek kształtu  $\Delta \bar{E}_k$  naniesiono na wykres wartości średnich odchyłek kształtu rys. 4a.

The determined limits  $LRL(E_k)$  and  $URL(E_k)$  of the variation range of the mean value of shape deviations  $\Delta \bar{E}_k$  were plotted in the graph of values of mean shape deviations Fig. 4a.

Tab. 2. Rozstęp odchylenia standardowego odchyłek geometrycznych

Tab. 2. Range of standard deviation of geometrical deviations

	PW1	PW2	PW3
S(Ew)max	0,0162	0,0161	0,0127
S(Ew)min	0,0099	0,0093	0,0080
S(Ek)max	0,0104	0,0107	0,0097
S(Ek)min	0,0061	0,0081	0,0067

Powtarzalność charakterystyk odchylenia standardowego odchyłek wymiaru i kształtu dla procesu obróbki skrawaniem będzie reprezentować przedział dopuszczalnej zmienności wartości średnich odchylenia standardowego. Szerokość tego przedziału wyznaczono w oparciu o występujący w procesie obróbki rozstęp wartości odchyłek wymiaru i kształtu.

Granice przedziału zmienności odchylenia standardowego odchyłek geometrycznych  $E_{(w,k)}$  wyznaczono według poniższej procedury oddzielnie dla odchyłek wymiaru i kształtu:

$$\bar{S}_{(Ew,k)} = \frac{\sum_{PW1}^{PW3} S_{(Ew,k)max} - \sum_{PW1}^{PW3} S_{(Ew,k)min}}{3} \quad (6)$$

$$DE_{w,k} = \frac{\bar{S}_{(Ew,k)}}{\sqrt{29}} \quad (7)$$

$$LRLS_{(Ew,k)} = \bar{S}_{(Ew,k)} - DE_{w,k} \quad (8)$$

$$URLS_{(Ew,k)} = \bar{S}_{(Ew,k)} + DE_{w,k} \quad (9)$$

Niezbędne dane i podstawowe wyniki obliczeń dotyczące granic przedziału zmienności odchyłek standardowych odchyłek wymiaru i kształtu zestawiono w tabl. 2. i tabl. 3. Wyznaczone granice naniesiono na wykresy odchyłek standardowych odchyłek wymiaru i odchyłek kształtu rys. 4b i rys. 4c.

### 5. Ocena powtarzalności rozkładu odchyłek geometrycznych

Badania i analiza procesu obróbki skrawaniem wykazała, że powtarzalność wartości średniej odchyłek wymiaru mieści się w przedziale o szerokości  $11\mu\text{m}$  a powtarzalność wartości średniej odchyłek kształtu w przedziale  $8\mu\text{m}$  w odniesieniu do tolerancji  $T=150\mu\text{m}$  rys. 4a. Zmienność wartości odchylenia standardowego odchyłek wymiarów i kształtów mieściła się w przedziale ok.  $\pm 6\mu\text{m}$  względem wartości średniej.

Należy zwrócić uwagę, że charakterystyki odchyłek wymiaru w funkcji liczby obrobionych powierzchni dla procesu obróbki skrawaniem cechuje praktycznie stała zmienność (trend), która pod koniec okresu trwałości ostrza wchodzi w obszar nieliniowego intensywnego zużycia. Charakterystyki odchyłek kształtu w funkcji liczby odrobionych powierzchni dla procesu obróbki skrawaniem w odróżnieniu od odchyłek wymiarowych praktycznie nie wykazują trendu.

Zmienność wartości średniej odchyłek wymiaru jest charakterystyczną cechą procesu obróbki skrawaniem i wynika z naturalnego zużycia ostrza skrawającego. Zmienność wartości średniej odchyłek kształtu zależy od sztywności technologicznej obrabianego przedmiotu, rodzaju mocowania, wartości sił mocujących i skrawania.

Tab. 3. Wyznaczenie granic odchylenia standardowego

Tab. 3. Determination of standard deviation limits

	Śred. PW		$\Delta E_{w,k}$
S(Ew)max	0,0150		
S(Ew)min	0,0091		
S(Ew)śred.	0,0120	0,0054	$\pm 0,0054$
S(Ek)max	0,0103		
S(Ek)min	0,0069		
S(Ek)śred.	0,0086	0,0039	$\pm 0,0039$

The repeatability of the characteristics of the standard deviation of dimension and shape deviations for the machining process will be represented by the acceptable variation interval of standard deviation mean values. The width of that interval was determined on the basis of the range of values of dimension and shape deviations that occur in the machining process.

The variation interval limits of standard deviation of geometrical deviations  $E_{(w,k)}$  were determined according to the procedure given below, separately for dimension and shape deviations:

$$\bar{S}_{(Ew,k)} = \frac{\sum_{PW1}^{PW3} S_{(Ew,k)max} - \sum_{PW1}^{PW3} S_{(Ew,k)min}}{3} \quad (6)$$

$$DE_{w,k} = \frac{\bar{S}_{(Ew,k)}}{\sqrt{29}} \quad (7)$$

$$LRLS_{(Ew,k)} = \bar{S}_{(Ew,k)} - DE_{w,k} \quad (8)$$

$$URLS_{(Ew,k)} = \bar{S}_{(Ew,k)} + DE_{w,k} \quad (9)$$

The necessary data and basic calculation results of variation interval limits of standard deviation of dimension and shape deviations are presented in Tables 2 and 3. The limits determined were plotted in the graphs of mean deviations of dimension deviations and shape deviations Fig. 4b and Fig. 4c.

### 5. Evaluation of the repeatability of geometric deviation distribution

The investigations and analysis of the machining process showed that the repeatability of the mean value of dimension deviations is contained in the interval of the width of  $11\mu\text{m}$  and the repeatability of the mean value of shape deviations in the interval of  $8\mu\text{m}$  relative to tolerance  $T=150\mu\text{m}$  Fig. 4a. The variation of the standard deviation values of dimension and shape deviations was contained in the interval ca.  $\pm 6\mu\text{m}$  relative to the mean value.

It should be indicated that the dimension deviation characteristics for the machining process, given as the function of the number of the areas machined, are characterized by a practically constant variation (trend), which, at the end of the life-period of the cutting tool point slightly increases. The characteristics of shape deviation for the machining process, given as the function of the number of surfaces machined, practically do not show a trend, in contradistinction to dimension deviations.

Variation of the mean value of dimension deviation is a characteristic property of machining and follows from the natural wear of the cutting tool point. Variation of the shape deviation mean value depends on the technological rigidity of the work-



Wartości oszacowania odchylenia standardowego odchyłek wymiaru wyraźnie wzrastają przekraczając wyznaczone granice zmienności pod koniec okresu trwałości ostrza skrawającego rys. 4b. Wartości oszacowania odchylenia standardowego odchyłek kształtu wykazują bardzo dobrą powtarzalność rys. 4c.

Uzyskane wyniki badań procesu obróbki skrawaniem pozwalają stwierdzić, że przy prawidłowo dobranych parametrach technologicznych, w procesie obróbki tokarskiej można uzyskać dobrą powtarzalność rozkładu odchyłek wymiarów i kształtów.

piece, the type of clamping mechanism, and the value of clamping and machining forces.

The estimation values of standard deviation of dimension deviations grow noticeably to cross the determined variation limits at the end of the cutting tool point life-period Fig. 4b. The estimation values of standard deviation of shape deviations show a very good repeatability Fig. 4c.

The results obtained from the investigations of the machining process make it possible to state that in the process of turning, at correctly selected technological parameters, it is possible to achieve a good repeatability of the distribution of dimension and shape deviations.

### 6. Literatura

- [1] Dietrich E.; Schulze A.. *Statistische Verfahren zur Qualifikation von Messmitteln, Maschinen und Prozessen. 3 Auflage*, Carl Hanser Verlag, 1998.
- [2] Montgomery D.C. *Introduction to Statistical Quality Control* 3ed, John Wiley & Sons, 1997.
- [3] Parchami A.; Mashinchi M.: *Fuzzy estimation for process capability indices*. Information Sciences 177, 2007.
- [4] Taheri S.M.: *Trends in fuzzy statistics*. Austrian Journal of Statistics 32 (3), 2003.
- [5] Kujan K.: *Badanie rozkładu odchyłek geometrycznych w procesach obróbki skrawaniem*. Przegląd Mechaniczny 5, 2007.

---

**Dr inż. Krzysztof KUJAN**

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 36  
20-618 Lublin  
Tel. 081 5384234  
e-mail: k.kujan@pollub.pl

---

## WPŁYW PARAMETRÓW REGULACYJNYCH SILNIKA ZS NA ZAWARTOŚĆ SKŁADNIKÓW TOKSYCZNYCH I ZADYMIENIE SPALIN

### THE IMPACT OF SI ENGINE CONTROLLING PARAMETERS ON THE CONTENT OF TOXIC COMPONENTS AND SMOKINESS OF EXHAUST GASES

*W referacie przedstawiono wyniki badań doświadczalnych doładowanego, cztero- cylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym o objętości skokowej 1,7 dm<sup>3</sup> z bezpośrednim wtrys. iem paliwa. W badaniach szczególny nacisk położono na możliwość uwzględnienia sterowania dawką paliwa, kątem wyprzedzenia wtrys. u, stopniem recyrkulacji spalin oraz temperaturą i ciśnieniem ładunku w kolektorze dolotowym w celu określenia zawartości składników toksycznych i zadymienie spalin.*

*Wyniki badań przedstawiono w postaci funkcji aproksymacyjnych wielu zmiennych. Zmiennymi są wymienione powyżej parametry regulacyjne silnika. Przedstawiono analizę wyników badań i wskazano możliwość zastosowania wyznaczonych funkcji aproksymacyjnych w optymalizacji parametrów regulacyjnych silnika, której celem jest dobranie takich wartości parametrów regulacyjnych, które zapewniają zmniejszenie zawartości tlenków azotu w spalinach przy dopuszczalnej zawartości innych składników toksycznych oraz przy zachowaniu założonych wartości parametrów eksploatacyjnych silnika.*

**Słowa kluczowe:** silnik ZS, składniki toksyczne spalin, zadymienie spalin.

*In the paper the results of experimental investigations on a turbocharged, four-cylinder direct injection SI engine with the displacement of 1.7 dm<sup>3</sup> are presented. In the investigations, particular attention was paid to the possibility of including the control of fuel dose, injection advance angle, exhaust gas recirculation rate and the temperature and pressure of air charge in the inlet manifold with the intent to determine the content of the toxic components and the smokiness of exhaust gases.*

*The results of the investigations are presented in the form of approximation functions of several variables. The variables are the engine control parameters mentioned above. An analysis of the investigation results is presented and a possible application of the approximation functions in the optimisation of engine control parameters is indicated with the aim of selecting such values of control parameters as would guarantee a reduction of the nitrogen oxides content in the exhaust gases while maintaining the content of other toxic components and the assumed engine exploitation parameters on an acceptable level.*

**Keywords:** SI engine, toxic components of exhaust gases, smoking of exhaust gases.

#### 1. Wstęp

Jednym z podstawowych czynników decydujących wspólnie o rozwoju tłokowych silników spalinowych jest dążenie do ograniczenia ich negatywnego wpływu na środowisko naturalne [1,2,3,19]. Coraz ostrzejsze limity emisji toksycznych składników spalin i zużycia paliwa, a także duże wymagania ekologiczne dotyczące eksploatacji pojazdów z silnikami spalinowymi, zmuszają konstruktorów do stałego doskonalenia konstrukcji silników [8,18].

W celu obniżenia toksyczności spalin silnika o zapłonie samoczynnym podejmowano działania, które zmierzały w czterech głównych kierunkach [12]:

- wprowadzenie regulacji i sterowania zespołów silnika, mających wpływ na jego cykl roboczy,
- zastosowanie określonych rozwiązań konstrukcyjnych silnika,
- zastosowanie odpowiednich rodzajów paliw i specjalnych dodatków do paliw,
- wyposażenie silnika w katalizatory i filtry spalin.

#### 1. Introduction

One of the fundamental factors that contemporarily govern the development of internal combustion piston engines is a trend towards limiting their negative impact on the environment [1,2,3,19]. More and more rigorous limits on the emission of exhaust gas toxic components and fuel consumption as well as high ecological demands compel designers to continuously improve engine design [8,18].

The efforts undertaken to reduce the toxicity of exhaust gases from the SI engine went in the four main directions [12]:

- introduction of a system of regulation and control of engine assemblies which affect the engine work cycle,
- implementation of certain engine design improvements,
- use of proper fuel types and special fuel additives,
- equipping the engine with catalysts and fuel filters.

Regulation and control of the engine assemblies affecting the engine work cycle means introduction of fuel supply system control. The contemporary engine fuel supply system comprises a fuel injection system, a scavenge air system—usually with

Regulacja i sterowanie zespołami silnika mającymi wpływ na cykl roboczy silnika oznacza wprowadzenie sterowania układem zasilania silnika. W skład układu zasilania współczesnego silnika wchodzi: układ wtrys.owy, układ wymiany ładunku przeważnie z turbosprężarką i chłodnicą powietrza dolotowego oraz układ recyrkulacji spalin.

Współczesnym konstrukcjom silników o zapłonie samoczynnym stawia się jako równorzędne użytkowym, wymagania dotyczące spełnienia obecnych i przyszłościowych wymagań legislacyjnych dotyczących emisji składników spalin, w tym głównie emisji tlenków azotu oraz cząstek stałych [3,7,9,10,11,15,17].

W najbliższych latach przewiduje się dalszy rozwój doładowanych silników o zapłonie samoczynnym z wtrys. iem bezpośrednim, wyposażonych w złożone algorytmy regulacji układów zasilania.

W algorytmach sterujących uwzględnia się głównie następujące podstawowe parametry regulacyjne silnika:

- prędkość obrotową,
- dawkę paliwa i przebieg jej wtrys. u,
- kąt wyprzedzenia wtrys. u,
- stopień recyrkulacji spalin,
- ciśnienie ładunku w kolektorze dolotowym,
- temperaturę ładunku w kolektorze dolotowym.

O wadze i aktualności zagadnienia regulacji parametrów zasilania silnika o zapłonie samoczynnym świadczy wzrastająca z każdym rokiem liczba publikacji w literaturze światowej z tego zakresu. Publikacje te dotyczą problematyki teoretycznej i praktycznej w zakresie regulacji zasilania silników o zapłonie samoczynnym, jak i eksploatacji silników wyposażonych w złożone, niekonwencjonalne układy regulacji.

## 2. Badania

Podstawowym etapem prac, związanym z doбором parametrów regulacyjnych, które umożliwiają realizację założonych celów sterowania, jest pomiarowa identyfikacja obiektu badań [5]. W rozważanym przypadku, badania eksperymentalne (identyfikacyjne) miały na celu określenie wpływu parametrów regulacyjnych silnika  $x_1, \dots, x_r$  na parametry pracy i osiągi silnika określone przez wielkości sumaryczne  $W_1, \dots, W_s$  (określające emisję składników toksycznych i zadymienie spalin), pomocnicze wielkości sumaryczne  $v_0, \dots, v_d$  (określające parametry cyklu roboczego) oraz przebiegi ciśnienia w cylindrze silnika  $p(\varphi)$ .

Badania przeprowadzono na czterocyndrowym silniku o zapłonie samoczynnym, z bezpośrednim wtrys. iem paliwa i czterech zaworach na cylinder napędzanych dwoma wałkami rozrządu w głowicy, doładowanym zespołem turbosprężarkowym i wyposażonym w elektronicznie sterowany układ wtrys.owy z rozdzielaczową pompą wtrys. ową (tabela 1).

Badania przeprowadzono na hamowni silnikowej Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Dla realizacji celów badań eksperymentalnych niezbędne było sterowanie parametrami pracy silnika, w szczególności zmianą dawki paliwa, zmianą otwarcia zaworu recyrkulacji spalin, zmianą kąta wyprzedzenia wtrys. u, zmianą ciśnienia i temperatury w układzie doładowania. W tym celu wykorzystano program monitorujący pracę mikrokontrolera sterującego silnika i nadzorujący niektóre z parametrów, opracowany w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów. Przy pomocy tego progra-

a turbocharger, an intake air cooler and an exhaust gas re-circulation system.

Contemporary SI engine designs have to comply not only with the functional quality requirements but, which is equally important, they have to meet the demands of the present and future legislative emission limits on exhaust gas components, mainly nitrogen oxides and particulate matter [3,7,9,10,11,15,17].

In the nearest future, a further development of spontaneous ignition turbocharged engines with direct injection equipped with complex control algorithms of the fuel supply system may be expected. In the control algorithms, the following basic engine parameters are generally taken into account:

- rotation speed,
- fuel dose and the course of fuel injection,
- injection advance angle,
- exhaust gas recirculation rate,
- pressure of air charge in the inlet manifold,
- temperature of air charge in the inlet manifold.

The present interest in parameter control of spontaneous ignition engine feed and its importance are evident from the growing number of world publications on this subject. The publications are related to the theory and practice of parameter control of spontaneous ignition engine feed and exploitation of engines equipped with complex, unconventional control systems.

## 2. Experiments

The essential phase of the investigations, related to the selection of control parameters such as to make it possible to fulfil the assumed control objectives, is the measuring identification of the object under investigation [5]. In our case, the experimental (identification) investigations had as an objective the determination of the impact of engine control parameters  $x_1, \dots, x_r$  on the engine operation parameters and engine performance expressed by the total values  $W_1, \dots, W_s$  (describing the emission of toxic components and smokiness of exhaust gases), auxiliary summary values  $v_0, \dots, v_d$  (describing the work cycle parameters), and courses of pressure in the engine cylinder  $p(\varphi)$ .

The investigations were conducted on a four-cylinder direct-injection spontaneous ignition DOHC engine with four valves per cylinder, with a turbocharger and an electronically controlled injection system with a distributor type injection pump (Table 1).

The experiments were conducted in the engine test house of the Department of Internal Combustion Engines and Vehicles of the University of Bielsko-Biala. In order to fulfil the objectives of the experimental investigations, it was necessary to regulate the engine operation parameters, namely the change of fuel dose, the change of recirculation exhaust gas valve opening, the change of injection advance angle, and the change of pressure and temperature in the turbocharger. A computer program, developed in the Department of Internal Combustion Engines and Vehicles, was used for the purpose of monitoring the engine control unit and supervising some of the parameters.

Tab. 1. Dane techniczne silnika  
Tab. 1. Engine technical data

Typ silnika Engine type	silnik o zapłonie samoczynnym, doładowany zespołem turbosprężarkowym, z chłodzeniem powietrza doładującego, z recyrkulacją spalin a spontaneous ignition engine, charged by turbocharger, with inlet air cooling, with exhaust gas re-circulation
Budowa / Liczba cylindrów Piston layout / Number of cylinders	rzędowy / cztery straight / four
Rozrząd / Zawory na cylinder Valve train/ Valves per cylinder	dwa wałki rozrządu w głowicy / cztery Double over head camshaft / four
Średnica cylindra // Cylinder bore	79 mm
Skok tłoka // Piston stroke	86 mm
Objętość skokowa // Displacement	1668 cm <sup>3</sup>
Stopień sprężania // Compression ratio	18,4
Moc maksymalna Maximum power	55 kW przy 4400 obr/min 55 kW at 4400 rpm
Moment obrotowy maksymalny Maximum torque	165 N·m przy 1800 ÷ 3000 obr/min 165 N·m at 1800 ÷ 3000 rpm

mu możliwe jest pobieranie bieżących parametrów pracy silnika, odczytywanych z oryginalnych czujników oraz modyfikacja następujących czterech parametrów:

- dawki paliwa,
- kąta wyprzedzenia wtrys. u,
- stopnia otwarcia zaworu podciśnieniowego regulującego recyrkulację spalin,
- stopnia otwarcia zaworu podciśnieniowego regulującego upust spalin turbosprężarki.

Opracowując program badań eksperymentalnych (identyfikacyjnych) wyznaczono punkty pomiarowe w taki sposób, aby przeprowadzić badania w możliwie szerokim obszarze pracy silnika. Wybrano do badań wartości prędkości obrotowej 1880, 2610, 3340 i 4070 obr/min, wyznaczone dla badanego silnika według zasad przeprowadzania testu hamownianego ESC [6,16], (tab. 2).

Badania objęły pomiary parametrów pracy silnika, składników spalin oraz rejestrację przebiegów ciśnienia w cylindrze i przewodzie wtrys. owym. Szczegółowe dane dotyczące mierzonych wielkości podano w [14].

Wyniki pomiarów eksperymentalnych (identyfikacyjnych) przeprowadzonych na stanowisku badawczym można przedstawić w postaci tab. 3.

Tab. 2. Wartości prędkości obrotowej i obciążenia, przy których przeprowadzono badania identyfikacyjne  
Tab. 2. Values of rotation speed and load, at which identification investigations were conducted

Prędkość obrotowa Rotation speed	1880 obr/min	2610 obr/min	3340 obr/min	4070 obr/min
Obciążenie Load				
$M_{max}$	143 N·m	163 N·m	137 N·m	129 N·m
0,75 $M_{max}$	107 N·m	122 N·m	104 N·m	96 N·m
0,5 $M_{max}$	72 N·m	82 N·m	69 N·m	64 N·m
0,25 $M_{max}$	36 N·m	41 N·m	35 N·m	32 N·m

$M_{max}$  - maksymalny moment obrotowy przy danej prędkości obrotowej

$M_{max}$  - maximum torque at a given rotation speed

The program makes it possible to read current engine operation parameters, as detected by the original sensors, and to modify the following four parameters:

- fuel dose,
- injection advance angle,
- position of the vacuum valve, regulating exhaust gas re-circulation,
- position of the wastegate, regulating the diversion of exhaust gases in the turbocharger.

During the development of the programme of the experimental (identification) investigations, the measuring points were determined such that the investigations would cover a wide range of engine operating conditions. For the investigations, rotation speed values of 1880, 2610, 3340 and 4070 rpm were selected, determined for the engine tested according to the ESC dynamometer engine test technique, [6,16], (Table 2).

The investigations covered measurements of engine operation parameters, exhaust gas components and registration of courses of pressure in the cylinder and the injection pipe. The detailed data concerning the measurement values are reported in [14].

The results of the experimental (identification) measurements performed on the test stand are presented in Table 3.

Tab. 3. Wyniki pomiarów identyfikacyjnych  
Tab. 3. Identification measurement results

Nr pomiaru Measurement no.	Parametry regulacyjne Control parameters	Emisji składników toksycznych i zadymienie spalin Emission of toxic components and smokiness of exhaust gases
0	$x_{1,0}, \dots, x_{r,0}$	$W_{1,0}, \dots, W_{s,0}$
⋮		
k	$x_{1,k}, \dots, x_{r,k}$	$W_{1,k}, \dots, W_{s,k}$
⋮		
P	$x_{1,P}, \dots, x_{r,P}$	$W_{1,P}, \dots, W_{s,P}$

(P + 1 - liczba punktów pomiarowych)

(P + 1 - number of measuring points)

W sumie przeprowadzono 231 pomiarów, dla omówionych wyżej zestawów parametrów regulacyjnych silnika  $x_1 \div x_6$ .

**3. Aproksymacja emisji składników toksycznych i zadymienia spalin**

Wyniki pomiarów dotyczące emisji składników toksycznych i zadymienia spalin ( $W_1, \dots, W_s$ ), w celu uzyskania wzorów matematycznych umożliwiających obliczanie wartości  $W_1, \dots, W_s$  dla dowolnych wartości parametrów regulacyjnych  $x_1, \dots, x_r$ , poddano aproksymacji w postaci funkcji wielu zmiennych.

Aproksymację funkcji  $W_i$  dokonano metodą najmniejszych kwadratów [4] minimalizując funkcjonalny:

$$W_i = \sum_{k=0}^P [\bar{W}_i(x_1^{(k)}, \dots, x_r^{(k)}) - W_{i,k}]^2 \quad \text{dla } i=1,2,3,4; \quad r=6 \quad (1)$$

gdzie:  $P+1$  jest liczbą punktów pomiarowych ( $P=231$ ),  $W_{i,k}$  jest wartością wielkości  $W_i$  w punkcie pomiarowym  $k$ ,  $\bar{W}_i(x_1^{(k)}, \dots, x_r^{(k)})$  jest wartością funkcji aproksymującej  $\bar{W}_i$  w punkcie pomiarowym  $k$ .

Przyjęto postać funkcji  $\bar{W}_i$ :

$$\bar{W}_i = a_0^{(i)} x_1^{a_1^{(i)}} \cdot \dots \cdot x_j^{a_j^{(i)}} \cdot \dots \cdot x_r^{a_r^{(i)}} \quad (2)$$

a więc funkcję potęgową wielu zmiennych.

W tabeli 4 zestawiono współczynniki funkcji aproksymacyjnych (2), opisujących stężenie tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu i zadymienia spalin w zależności od parametrów regulacyjnych.

Aby zastosować wzory (2) przy wartościach współczynników z tabeli 4 parametry regulacyjne należy podawać w następujących jednostkach:

- $x_1$  - prędkość obrotowa  $n$  [obr/min],
- $x_2$  - dawka paliwa  $B_0$  [kg],
- $x_3$  - kąt wyprzedzenia wtrys. u  $\varphi_w$  [ $^{\circ}$ OWK],
- $x_4$  - stopień recykulacji spalin  $X_{EGR}$  [-],
- $x_5$  - ciśnienie ładunku w kolektorze dolotowym  $p_d$  [Pa],
- $x_6$  - temperatura ładunku w kolektorze dolotowym  $T_d$  [K].

Wyznaczone funkcje aproksymacyjne (2) o współczynnikach z tabeli 4 umożliwiają prowadzenie analiz dotyczących wpływu parametrów regulacyjnych silnika  $x_1, \dots, x_r$  na emisję składników toksycznych oraz zadymienia w całym polu pracy silnika.

Na rys. nkach 1 ÷ 4 zestawiono powierzchnie, uzyskane po wykorzystaniu funkcji aproksymacyjnych określające stężenie tlenku węgla  $CO$ , węglowodorów  $HC$ , tlenków azotu  $NO_x$  i za-

Tab. 4. Współczynniki funkcji aproksymacyjnych  
Tab. 4. Coefficients of approximation functions

$$\bar{W}_i = a_0^{(i)} x_1^{a_1^{(i)}} \cdot \dots \cdot x_j^{a_j^{(i)}} \cdot \dots \cdot x_r^{a_r^{(i)}}$$

Współczynnik funkcji Function coefficient	$i=1$ CO	$i=2$ HC	$i=3$ NO <sub>x</sub>	$i=4$ D
$\alpha_0$	3,20E+01	4,86E+08	7,93E+02	8,49E-20
$\alpha_1$	6,48E-01	-3,50E-01	-9,64E-01	1,41E+00
$\alpha_2$	1,05E+00	-3,18E-01	6,31E-01	1,62E+00
$\alpha_3$	1,51E+00	1,93E-01	-1,19E+00	1,19E+00
$\alpha_4$	-1,38E+00	5,07E-01	-1,69E+00	-1,77E+00
$\alpha_5$	-4,84E+00	1,62E-01	6,47E-01	-2,24E+00
$\alpha_6$	6,46E+00	-2,60E+00	1,70E-01	8,83E+00

A total of 231 measurements were conducted for the above-discussed sets of engine control parameters  $x_1 \div x_6$ .

**3. Approximation of the emission of toxic components and the smokiness of exhaust gases**

The results of the measurements of the emission of toxic components and the smokiness of exhaust gases ( $W_1, \dots, W_s$ ) were approximated, in order to obtain mathematical formulas for calculating  $W_1, \dots, W_s$  values for arbitrary  $x_1, \dots, x_r$  control parameter values, using a function of several variables.

The approximation of the function  $W_i$  was performed with the least squares method [4] by the minimization of functionals:

$$W_i = \sum_{k=0}^P [\bar{W}_i(x_1^{(k)}, \dots, x_r^{(k)}) - W_{i,k}]^2 \quad \text{dla } i=1,2,3,4; \quad r=6 \quad (1)$$

where:  $P+1$  is the number of measuring points ( $P=231$ ),  $W_{i,k}$  is the value of  $W_i$  in measuring point  $k$ ,  $\bar{W}_i(x_1^{(k)}, \dots, x_r^{(k)})$  is the value of the approximation function  $\bar{W}_i$  in measuring point  $k$ .

The form of the function  $\bar{W}_i$  was assumed to be:

$$\bar{W}_i = a_0^{(i)} x_1^{a_1^{(i)}} \cdot \dots \cdot x_j^{a_j^{(i)}} \cdot \dots \cdot x_r^{a_r^{(i)}} \quad (2)$$

which is a power function of several variables.

In Table 4 the coefficients of the approximation functions (2) that describe the concentration of carbon monoxide, hydrocarbons, nitrogen oxides and the smokiness of exhaust gases in relation to control parameters are tabulated.

In order to use equations (2) with the coefficient values from Table 4, the control parameters should be given in the following units:

- $x_1$  - rotation speed  $n$  [rpm],
- $x_2$  - fuel dose  $B_0$  [kg],
- $x_3$  - injection advance angle  $\varphi_w$  [ $^{\circ}$ CA],
- $x_4$  - degree of exhaust gas recirculation  $X_{EGR}$  [-],
- $x_5$  - charge pressure in inlet manifold  $p_d$  [Pa],
- $x_6$  - charge temperature in inlet manifold  $T_d$  [K].

The developed approximation functions (2) along with the coefficients from Table 4 make it possible to conduct analyses of the impact of engine control parameters  $x_1, \dots, x_r$  on the emission of toxic components and the smokiness of exhaust gases in the full operation field of the engine.

In Figures 1 ÷ 4, the areas obtained with the aid of the approximation functions are presented. They describe the concentration of carbon monoxide  $CO$ , hydrocarbons  $HC$ , nitrogen oxides

Tab. 5. Wartości parametrów regulacyjnych przyjęte w obliczeniach  
Tab. 5. Values of control parameters assumed in the calculations

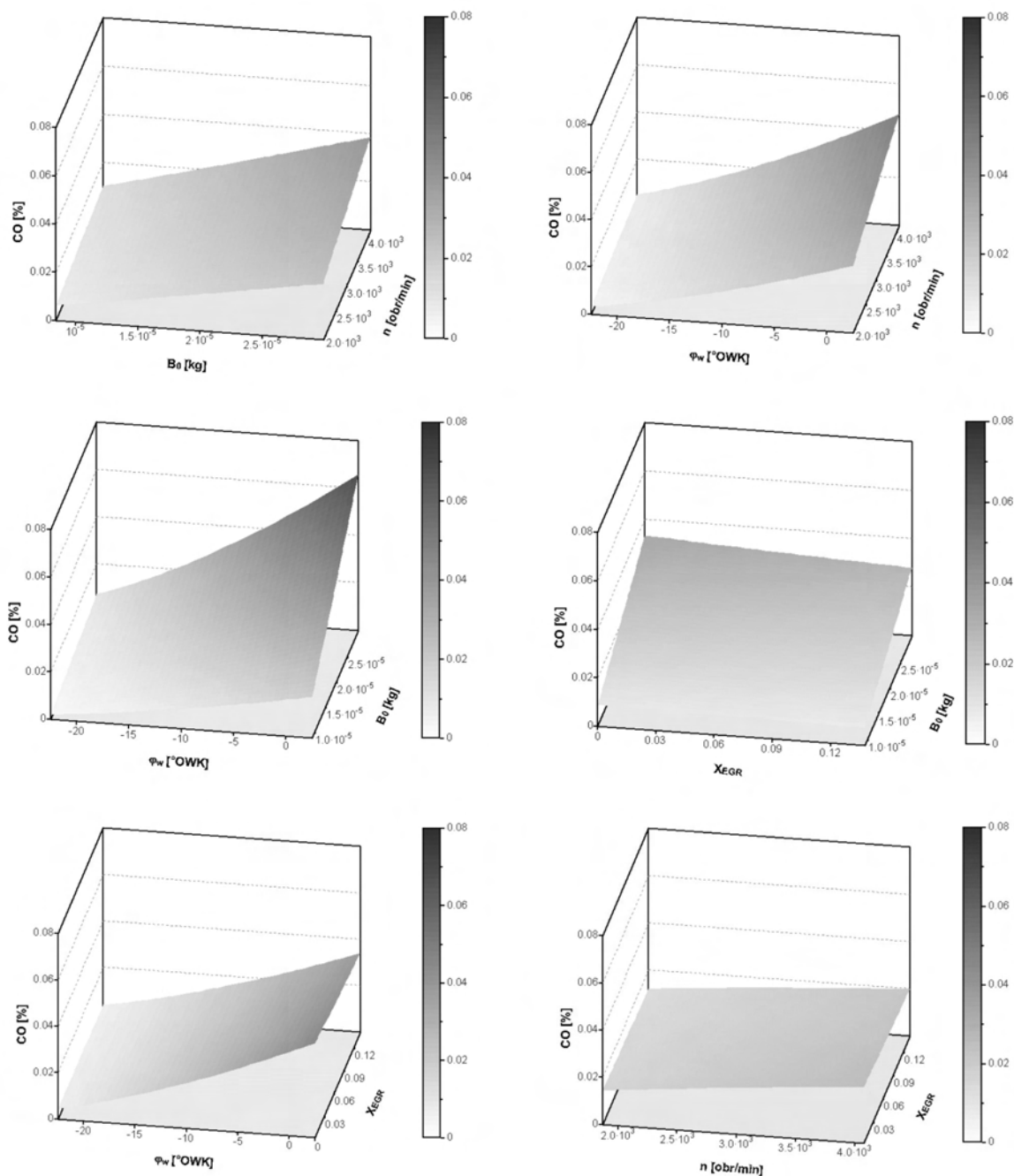
Parametr Parameter	Przyjęta wartość parametru Assumed value of parameter
$n$	3000 obr/min
$B_0$	$1,8 \cdot 10^{-5}$ kg
$\varphi_w$	-11,5 $^{\circ}$ OWK
$X_{EGR}$	4 %
$p_d$	1500 hPa
$T_d$	60 $^{\circ}$ C

dymienie  $D$  w zależności od wybranych parametrów regulacyjnych przy ustalonych pozostałych parametrach o wartościach podanych w tabeli 5.

Na rys. nku 1 przedstawiono aproksymowaną zależność stężenia tlenku węgla  $CO$  od parametrów regulacyjnych. Stężenie tlenku węgla w spalinach wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia i prędkości obrotowej silnika. Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrys. u powoduje wzrost stężenia tlenku węgla, natomiast zmiana stopnia recyrkulacji spalin nie wpływa w istotny sposób na stężenie tlenku węgla w spalinach.

$NO_x$ , and smokiness  $D$  in relation to the selected control parameters at the constant value of other parameters (given in Table 5).

In Figure 1, the approximated relationship between the concentration of carbon monoxide  $CO$  and the control parameters is presented. The concentration of carbon monoxide in exhaust gases grows alongside with the load and the rotation speed of the engine. A decrease in the injection angle results in an increase of the carbon monoxide concentration, whereas a change in the degree of exhaust gas recirculation produces no significant effect in the carbon monoxide concentration in the exhaust gases.

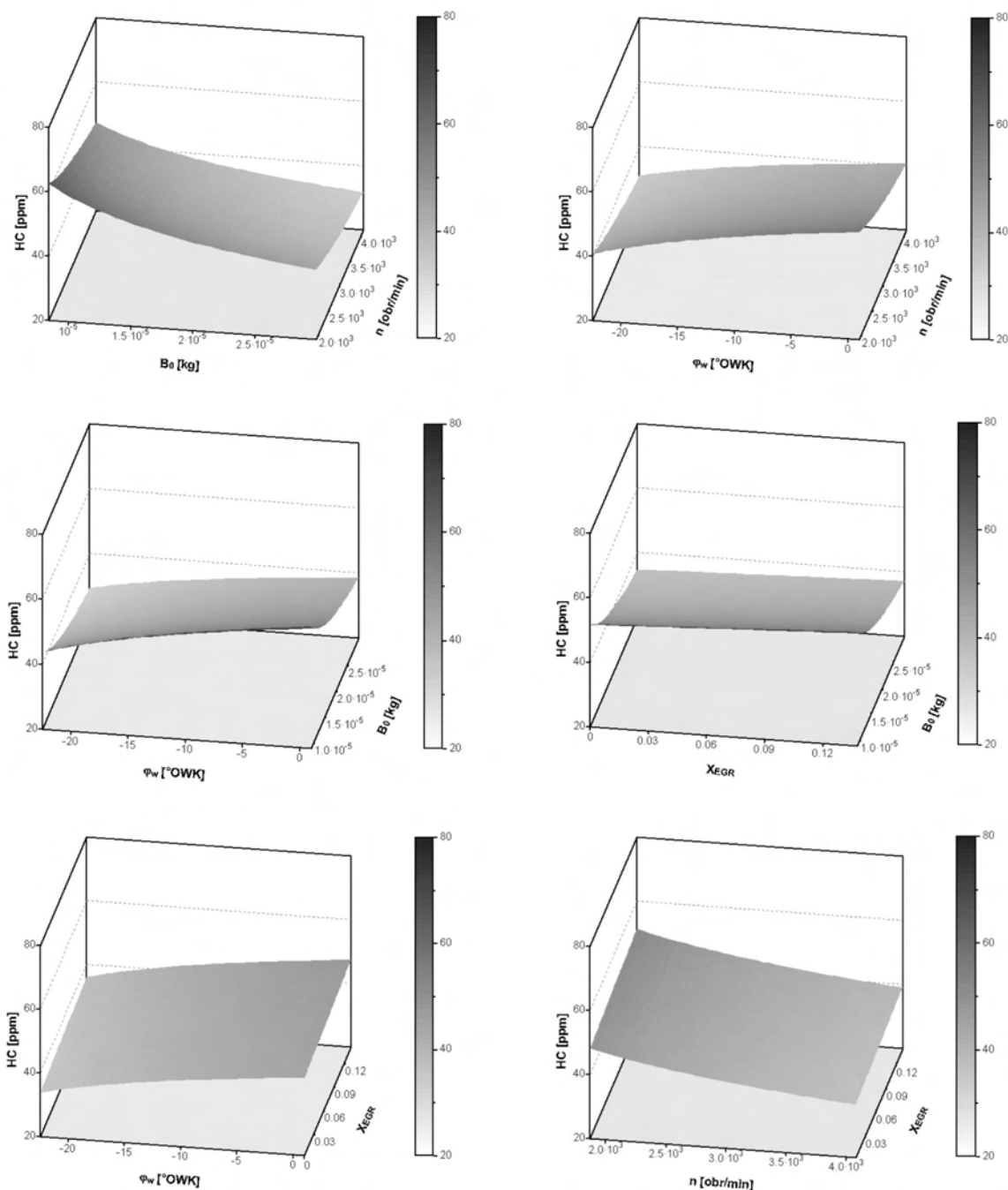


Rys. 1. Aproksymowana zależność stężenia tlenku węgla od parametrów regulacyjnych funkcją potęgową

Fig. 1. The relationship between the concentration of carbon monoxide and the control parameters approximated using power function

Na rys. nku 2 przedstawiono aproksymowaną zależność stężenia węglowodorów  $HC$  od parametrów regulacyjnych. Stężenie węglowodorów w spalinach nieznacznie maleje wraz ze wzrostem obciążenia i prędkości obrotowej silnika. Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrys. u powoduje nieznaczny wzrost stężenia węglowodorów, natomiast zwiększenie recyrkulacji spalin powoduje również nieznaczny wzrost stężenia węglowodorów w spalinach.

In Figure 2, the approximated relationship between the concentration of hydrocarbons  $HC$  and the control parameters is presented. The concentration of hydrocarbons in exhaust gases decreases slightly with the growth of the load and the rotation speed of the engine. A decrease in the injection angle results in a small increase of the hydrocarbons concentration, and an increase in the degree of exhaust gas recirculation also produces a small increase in the hydrocarbons concentration in the exhaust gases.

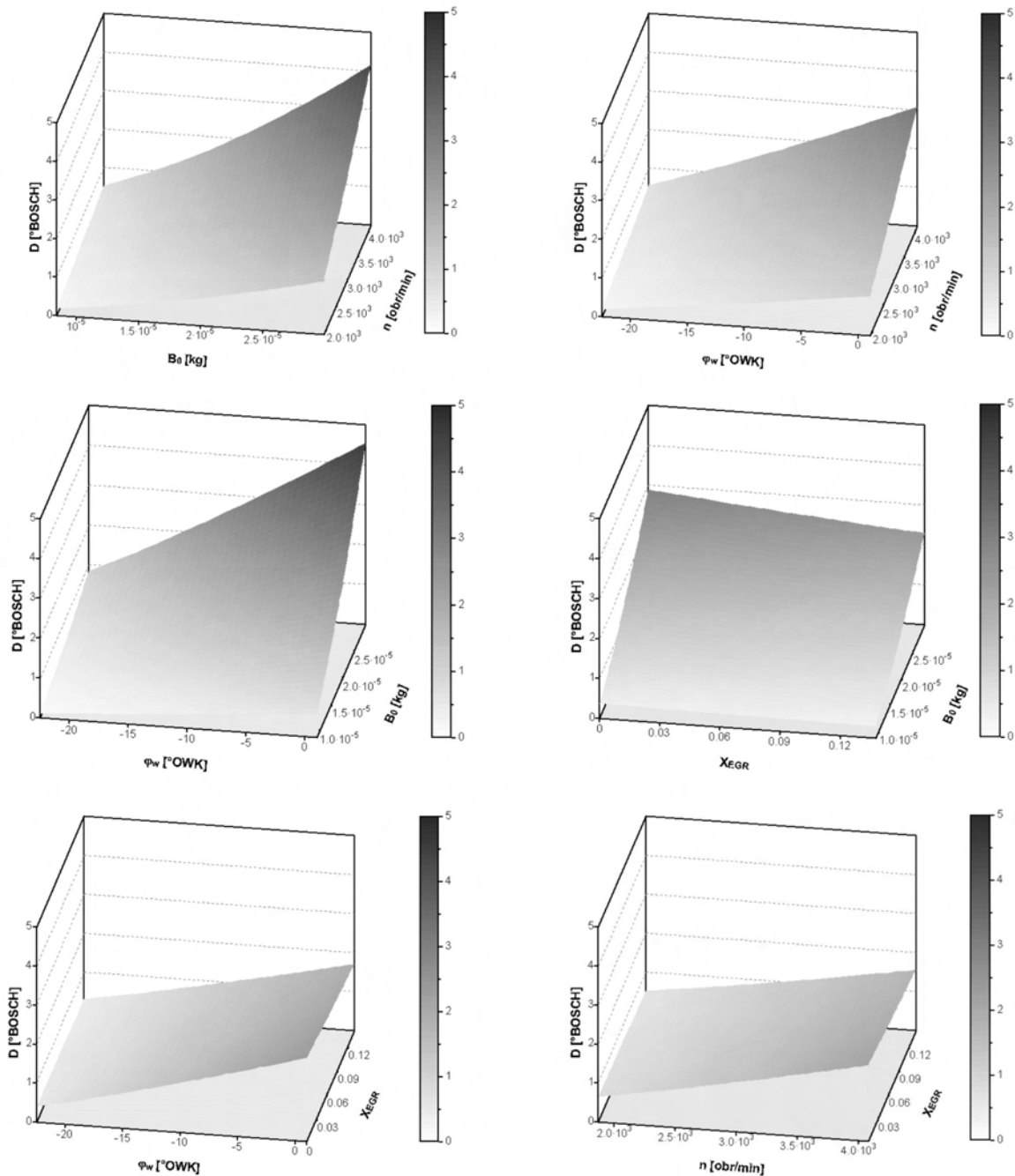


Rys. 2. Aproksymowana zależność stężenia węglowodorów od parametrów regulacyjnych funkcją potęgową

Fig. 2. The relationship between the concentration of hydrocarbons and the control parameters approximated using power function

Na rys. nku 3 przedstawiono aproksymowaną zależność zadymienia spalin  $D$  od parametrów regulacyjnych. Stopień zadymienia spalin wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia i prędkości obrotowej silnika. Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrys. u powoduje wzrost stopnia zadymienia spalin, natomiast zwiększenie stopnia recyrkulacji spalin nie powoduje istotnej zmiany stopnia zadymienia spalin.

In Figure 3, the approximated relationship between the smokiness of the exhaust gases  $D$  and the control parameters is shown. The degree of smokiness rises along with the growth of the load and the rotation speed of the engine. A decrease in the injection angle results in an increase of the degree of exhaust gas smokiness, whereas an increase in the degree of exhaust gas recirculation does not generate a significant change in the degree of smokiness in the exhaust gases.



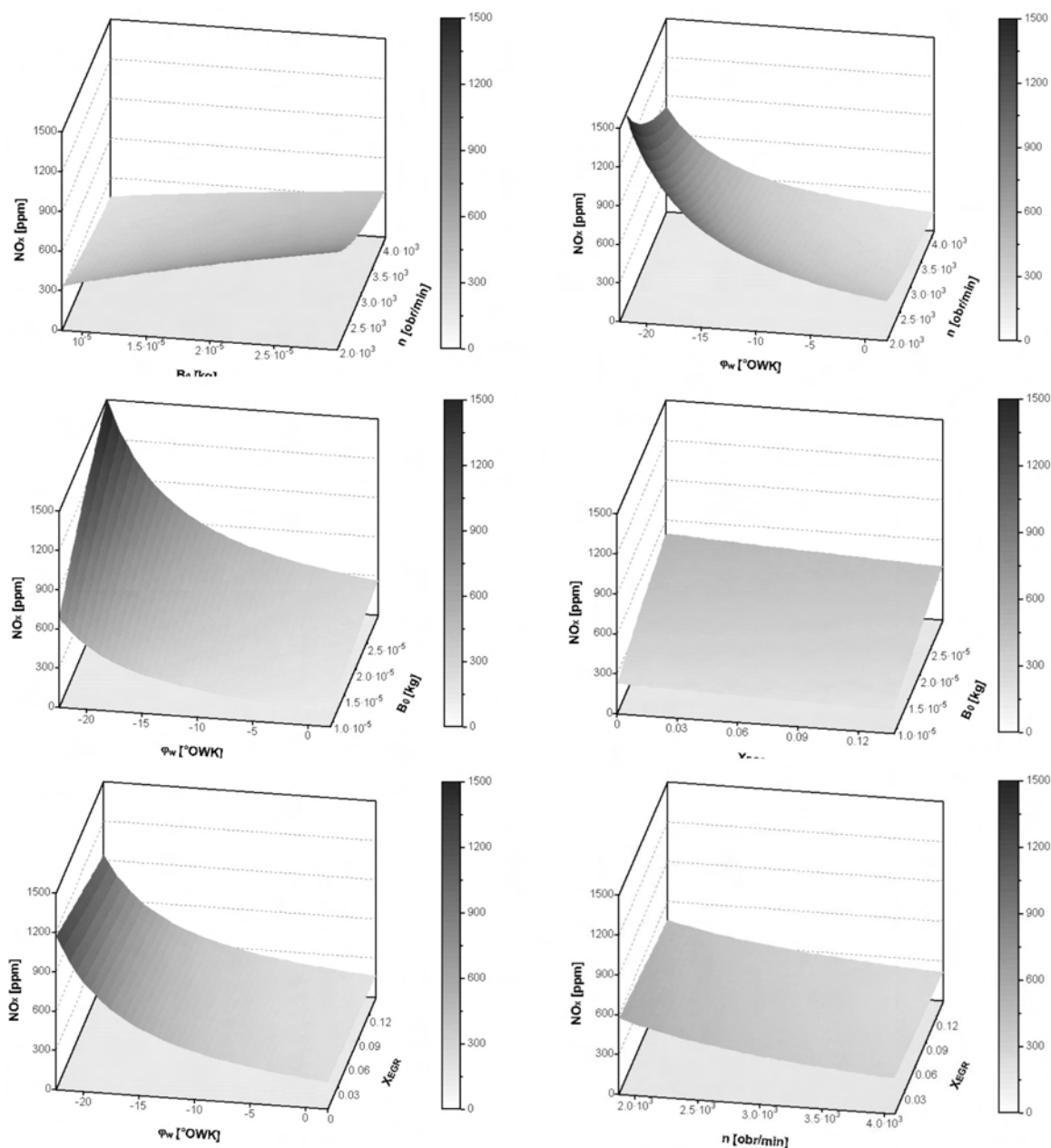
Rys. 3. Aproksymowana zależność zadymienia spalin od parametrów regulacyjnych funkcją potęgową

Fig. 3. The relationship between the smokiness of the exhaust gases and the control parameters approximated using power function



Na rys. 4 przedstawiono aproksymowaną zależność stężenia tlenków azotu  $NO_x$  od parametrów regulacyjnych. Stężenie tlenków azotu w spalinach wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia silnika. Zmniejszenie kąta wyprzedzenia wtrys. u powoduje znaczny spadek stężenia tlenków azotu, natomiast zwiększenie recyrkulacji spalin powoduje równoczesny spadek stężenia tlenków azotu w spalinach.

In Figure 4, the approximated relationship between the concentration of nitrogen oxides  $NO_x$  and the control parameters is shown. The concentration of nitrogen oxides goes up along with the load of the engine. Decreasing of the injection angle reduces the concentration of nitrogen oxides significantly, while increasing the exhaust gas recirculation leads to a simultaneous reduction of the degree of smokiness in the exhaust gases.



Rys. 4. Aproksymowana zależność stężenia tlenków azotu od parametrów regulacyjnych funkcją potęgową

Fig. 4. The relationship between the concentration of nitrogen oxides and the control parameters approximated using power function

#### 4. Podsumowanie

Należy zaznaczyć, że graficzne postacie powierzchni aproksymacyjnych oraz sformułowane na tej podstawie uogólnienia w zakresie wpływu parametrów regulacyjnych silnika na emi-

#### 4. Summary

It should be indicated that the graphical forms of the approximation areas and the generalisations, formulated on that basis, concerning the impact of engine control parameters on

się składników toksycznych oraz zadymienie spalin dotyczą obszaru wokół analizowanego punktu pracy silnika określonego parametrami regulacyjnymi przedstawionymi w tabeli 5.

Wyznaczone funkcje aproksymacyjne można zastosować w optymalizacji parametrów regulacyjnych silnika, której celem jest dobranie takich wartości parametrów regulacyjnych, które zapewniają zmniejszenie zawartości tlenków azotu w spalinach przy dopuszczalnej zawartości innych składników toksycznych oraz przy zachowaniu założonych wartości parametrów eksploatacyjnych silnika [14].

the emission of toxic components and exhaust gas smokiness, are related to the region around the analysed point of engine operation, determined by the control parameters presented in Table 5.

The developed approximation functions can be used in the optimisation of the engine control parameters aiming at the selection of such control parameter values, which assure the reduction of the content of nitrogen oxides in the exhaust gases while maintaining the permissible content of other toxic components and the desired values of engine exploitation parameters [14].

### 5. References

- [1] AVL, Regulations and Standards, Current and Future Exhaust Legislation, AVL, Graz 02.2004.
- [2] Brzozowska L., Brzozowski K., Wojciech S.: *Computational Modelling of Car Pollutant Dispersion*. Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice 2001.
- [3] Brzozowski K., Nowakowski J.: *Obliczeniowa wielkość emisji z pojazdów z silnikami ZI i ZS w warunkach cyklu NEDC*, Pojazd a środowisko. III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna, Jedlnia-Letnisko, 5-6 czerwca 2001, Politechnika Radomska, Urząd Miejski Radom, Radom, Politechnika Radomska, 2001.
- [4] Chapra S.C., Canale R.P.: *Numerical methods for engineers*. Mc Graw Hill 1988.
- [5] Chłopek Z., Piaseczny L.: *Zastosowanie teorii planowania doświadczeń w badaniach ekologicznych właściwości silników spalinowych*. Archiwum Motoryzacji (2002)2-3.
- [6] Directive 1999/96/EC of the European Parliament and of the Council of 13 December 1999, Official Journal of the European Communities, 1999.
- [7] Ebener S., Flörchinger P.: *Systeme zur Abgasnachbehandlung in Nutzfahrzeugen*. MTZ 9/2004.
- [8] Johnson V. T.: *Diesel emission control in review*. SAE Paper 2001-01-0184, 2001.
- [9] Klingmann R., Fick W., Brüggemann H.: *Die neuen Common – Rail – Dieselmotoren mit Direkteinspritzung in der modellgepflegten E – Klasse*. MTZ 7/8 /1999, MTZ 9/1999.
- [10] Lösing K.H., Lutz R.: *Einhaltung zukünftiger Emissions – vorschriften durch gekühlte Abgasrückführung*. MTZ 7/8 /1999.
- [11] Lutz R.: *Kfz – Abgaskühler für höste Belastungen*. MTZ 5/2002
- [12] Menne R.J., Brohmer A.M., Rechs M.: *Zukünftige Pkw – Antriebskonzepte*. MTZ 3/1995.
- [13] Merkisz J.: *Kierunki rozwoju spalinowych zespołów napędowych*. KONMOT-AUTOPROGRES 2004.
- [14] Nowakowski J.: *Model cyklu roboczego silnika o zapłonie samoczynnym i jego zastosowanie do doboru parametrów regulacyjnych*. Rozprawy Naukowe, Akademia Techniczno-Humanistyczna, nr 15, 2005.
- [15] Pischinger S., Becker M., Rohs H., Grünefeld G., Greis A., Wieske P.: *Reduktionspotenzial für RuB und Kohlenmonoxid bei modernen Pkw-Di-Dieselmotoren*. MTZ 11/2004.
- [16] Praskiewicz T., Sobieszkański M.: *Realizacje testów badawczych na zautomatyzowanej hamowni silników spalinowych*. Journal of KONES, Internal Combustion Engines, 9(2002)3-4.
- [17] Sobieszkański M., Nowakowski J., Praskiewicz T.: *Badanie wpływu katalizatora A-2/4M na zadymienie i toksyczność spalin silnika 4CT90*. KONES'99, 25th International Scientific Conference on Combustion Engines, Zakopane, Poland, September 8-12, 1999, materiały konferencyjne, Institute of Aeronautics, Warsaw, 1999.
- [18] Walsh M. P.: *Global trends in diesel emission regulation - a 2001 update*. SAE Paper 2001-01-0183, 2001.
- [19] Walzer P.: *Progress in Car Powerplant Technologies*. F2004F020, Fisita, Barcelona 2004.

---

**Prof. dr hab. inż. Maciej SOBIESZCZAŃSKI**

**Dr hab. inż. Krzysztof BRZOZOWSKI**

**Dr hab. inż. Jacek NOWAKOWSKI**

**Mgr inż. Michał TEKIELAK**

Akademia Techniczno – Humanistyczna w Bielsku - Białej

Wydział Budowy Maszyn i Informatyki

Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów

Ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała

tel. 033 8279244

msob@ath.bielsko.pl

---

## PRAKTYCZNE ASPEKTY ZARZĄDZANIA FLOTĄ W PRZEDSIĘBIORSTWIE BRANŻY SPOŻYWCZEJ

### PRACTICAL ASPECTS OF FLEET MANAGEMENT IN A FOOD COMPANY

Prezentowana praca ma na celu scharakteryzowanie zarządzania systemem transportu w wybranym przedsiębiorstwie branży spożywczej, jako elementu ogólnej koncepcji – zarządzania logistycznego. Przedstawione aspekty szczegółowe mają za zadanie pokazać w jaki sposób i od czego uzależnione są decyzje transportowe, tak aby stanowiły one pewien element całości w zarządzaniu przedsiębiorstwem.

W pierwszej części artykułu opisano aspekty ogólne związane z zarządzaniem transportem w przedsiębiorstwie. Dotyczą one koncepcji obiegu informacji i powiązań strukturalnych w systemie zarządzania. W drugiej części artykułu przedstawiono wybrane aspekty szczegółowe zarządzania transportem osobowym.

**Słowa kluczowe:** zarządzanie flotą, branża spożywcza.

*The aim of this paper is to characterise management of a transportation system in a food company as an element of the general conception of logistics management. The detailed aspects presented here serve the task of demonstrating what and how transportation decisions must be driven by to constitute an element of a whole in company management.*

*The first part of the paper describes general aspects of transport management in a company. These concern the concept of flow of information and structural links in a management system. The second part of the paper presents selected detailed aspects of passenger transport management.*

**Keywords:** fleet management, food industry.

#### 1. Wstęp

Zarządzanie flotą w branży produktów spożywczych wymaga od menedżera dużego doświadczenia jak również znajomości odpowiednich zagadnień logistyczno-handlowych.

Flota w przedsiębiorstwie produkcyjno-handlowym może składać się nawet z kilkuset pojazdów różnego przeznaczenia i o różnej specyfice jazdy. W chwili obecnej większość przedsiębiorstw odchodzi jednak od koncepcji własnej floty samochodów dostawczych na korzyść wyspecjalizowanych firm logistycznych świadczących szeroki wachlarz usług dodatkowych poza usługami transportowymi. Zdarzają się jednak przypadki, że firmy oprócz korzystania z usług transportowych obcych pozostawiają sobie część transportu własnego, aby w większym stopniu poprawić swoją skuteczność transportową na rynku (rys. 1).

Ponadto ważnym zagadnieniem związanym z zarządzaniem flotą jest wybór odpowiedniego środka transportu. Innymi kryteriami kierujemy się w przypadku doboru samochodów osobowych dla działu sprzedaży a innymi w przypadku samochodów ciężarowych dla dystrybucji towarowej [13].

Rozpatrując charakter potrzeb przewozowych należy podkreślić, iż każda potrzeba generuje decyzję wyboru. Wymagania ochrony zdrowia związane z bezpieczną żywnością wymuszają podjęcie decyzji związanych z jakością przewożonego ładunku w tym z temperaturą ładunku w trakcie przewozu. Wraz ze wzrostem wymagań rosną koszty

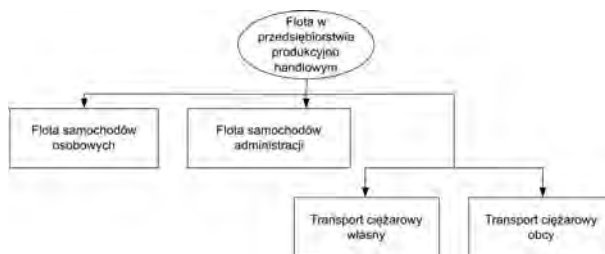
#### 1. Introduction

Fleet management in the food industry requires a manager to have large experience and knowledge of relevant logistics and business issues.

A fleet in a manufacturing and retail company may consist of as many as several hundred vehicles for various uses and with different driving characteristics. At present, a majority of companies, however, abandon the conception of running their own fleet of delivery cars in favour of contracting out their transport requirements to specialist logistics businesses, which apart from transport services, offer a large array of additional services. There are cases, though, in which companies, besides outsourcing transport services, keep part of their own transport to improve their transport effectiveness on the market (Fig. 1).

Another important issue related to fleet management is the choice of a suitable means of transport. Different criteria are taken into account when choosing passenger cars for the sales department and different criteria guide the choice of trucks for goods distribution [13].

When considering the character of transportation needs, it should be remembered that each need generates a selection decision. Health and safety requirements connected with food safety compel managers to take decisions connected with the quality of the transported freight including the temperature of the freight during transport. Together with growing requirements comes an increase in the costs of transport. A fleet ma-



Rys. 1. Schemat podziału floty w przedsiębiorstwie produkcyjno-handlowym

Fig. 1. A diagram showing types of fleet in a manufacturing and retail company

przewozu. Osoba zarządzająca flotą aby optymalnie dopasować transport do przewożonego ładunku musi wykazać się dobrą znajomością branży, zagadnień logistycznych oraz uwzględnić wymagania klienta [3,8]. Wymagania klienta są tu najważniejszym czynnikiem. W celu ograniczenia kosztów, a jednocześnie poprawy poziomu obsługi klientów, producenci decydują się na zlecenie wysyłek swoich wyrobów firmom specjalizującym się w tego typu usługach. W takim przypadku rola menagera ds. transportu ogranicza się do kontroli uzgodnień i warunków współpracy między przedsiębiorstwem produkcyjnym a firmą logistyczną

## 2. Transport a zarządzanie logistyczne

Z punktu widzenia zarządzania logistycznego w przedsiębiorstwie transport traktowany jest jako element pewnej całości. Takie podejście gwarantuje odpowiedni stopień porozumienia poszczególnych uczestników wewnętrznego łańcucha logistycznego, jak również pozwala na pełną koordynację i optymalizację działań.

Rysunek 2 przedstawia funkcjonowanie transportu z punktu widzenia uczestnika łańcucha logistycznego i jego powiązania z innymi komórkami w przedsiębiorstwie.

Na rys. nku 3 przedstawiono system transportu z punktu widzenia obiegu informacji w przedsiębiorstwie. Potwierdza on ważność każdego uczestnika systemu logistycznego, w tym również transportu.

Powyższe aspekty potwierdzają wagę podmiotu zarządzającego transportem, który niejednokrotnie pełni rolę menagera całego łańcucha logistycznego. Tak rozbudowany obszar działań ma na celu lepsze zrozumienie zjawisk zachodzących w poszczególnych ogniwach a następnie ich optymalizację. Oprócz tego należy dodać, że bardzo ważnym aspektem jest usytuowanie menagera logistyki w strukturach przedsiębiorstwa.

Logistyka wymaga centralnego kierowania w skali firmy [8]. Prace logistyczne wymagają koordynacji, a także synchronizacji z pozostałymi działaniami przedsiębiorstwa. Dlatego konieczna jest hierarchiczna organizacja służb logistycznych i scentralizowane kierowanie ich pracą. Im niższe ulokowanie logistyki w hierarchicznej strukturze przedsiębiorstwa, tym większe jest niebezpieczeństwo, że zadania logistyczne będą traktowane tylko jako funkcje dodatkowe [7,9].

## 3. Strategia doboru floty osobowej

Analizując flotę samochodów osobowych wykorzystywanych głównie przez przedstawicieli handlowych menager ds. floty napotyka na jeszcze inne aspekty związane ze specyfiką tej grupy.

W przedsiębiorstwie produkcyjno-handlowym branży spożywczej bardzo ważne jest, aby końcowy klient otrzymał towar dokładnie w momencie kiedy go potrzebuje. Ważną rolę mają tu przedstawiciele handlowi wyposażeni w odpowiednią bazę samochodów umożliwiających dotarcie do klienta w sposób niezawodny w jak najkrótszym czasie.

Menager ds. floty ma za zadanie dokonać wyboru odpowiedniego pojazdu, a następnie sprawować nad nim nadzór i kontrolę. Wcześniej należy dokonać wyboru formy pozyskania floty samochodów. Stosowane formy finansowania floty to:

- kredyt,
- leasing,
- wynajem długoterminowy.

menager wanting to optimally adjust transportation to the freight carried has to have a good knowledge of the line of business and logistic issues, and has to take into account the customer's requirements [3,8]. The latter are the most important factor here. To limit the costs and, simultaneously, improve the level of customer service, manufacturers opt for outsourcing the delivery of their products to businesses specializing in this type of services. In a case like this, the role of the transport manager is limited to controlling the terms and conditions of cooperation between the manufacturing company and the logistics firm.

## 2. Transportation and logistics management

From the point of view of corporate logistics management, transportation is treated as an element of a certain whole. An approach like this guarantees appropriate communication among the individual participants of the internal logistic chain, as well as enables full coordination and optimisation of activities.

Figure 2 presents the functioning of transportation from the point of view of a participant of the logistic chain and its relations with other company sections.

Figure 3 shows the system of transportation from the point of view of flow of information in a company. It bears out the importance of every participant of a logistic system, including transportation.

The above aspects confirm the importance of the transport managing entity, which oftentimes plays the role of the manager of the entire logistic chain. An area of activity expanded in this way enables better understanding of the phenomena occurring in the individual links of the chain and their subsequent optimisation. Besides, it should be added that the positioning of the logistics manager in the company structure is a very important factor.

Logistics requires central management at the company level [8]. Logistics work requires coordination as well as synchronization with the remaining company activities. That is why there is a need for hierarchical organization of logistics services and centralized management of their work. The lower position logistics occupies in the hierarchical structure of a company, the higher the risk that the logistic tasks will be treated as merely supplementary functions [7,9].

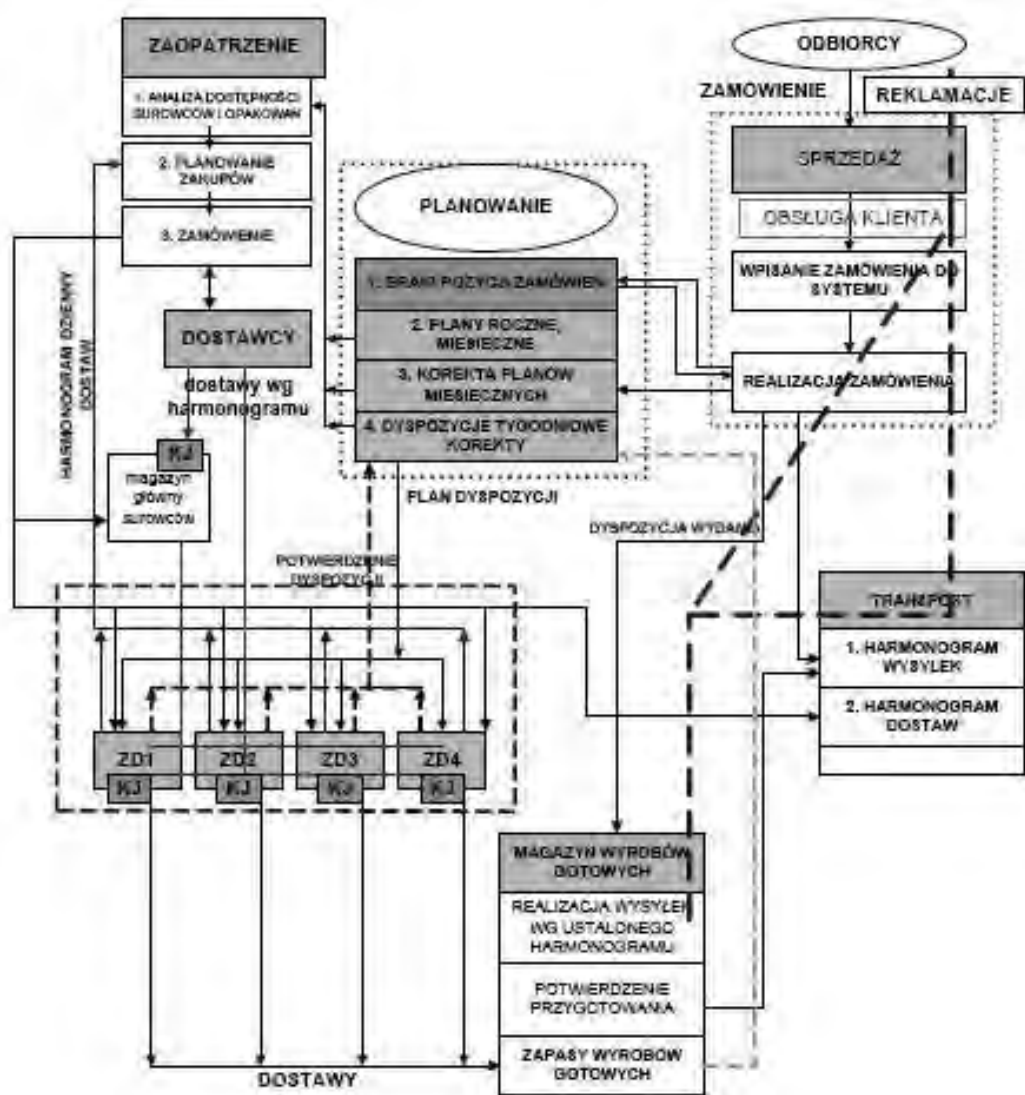
## 3. Strategy for selection of passenger car fleet

Analysing a fleet of passenger cars used chiefly by sales representatives, a fleet manager encounters still other aspects connected with the characteristics of this group.

In a manufacturing and retail food company, it is essential that the end customer should receive the goods at the exact moment when they need them. An important role is played here by sales representatives having at their disposal an appropriate pool of cars enabling them to get to the client unfailingly at the shortest possible time.

A fleet manager's task is to choose an appropriate vehicle and then to supervise and control it. Prior to that, a decision has to be taken regarding the forms of fleet financing. The commonly used forms of financing include:

- loan,
- lease,
- long-term rental.



Rys. 2. Schemat systemu logistyczno-transportowego w przedsiębiorstwie produkcyjno handlowym  
 Fig. 2. A block diagram of a logistics and transportation system in a manufacturing and retail company

W chwili obecnej w skali kraju niemal 64% samochodów flotowych z 90 265 szt. finansowanych jest przez leasing lub wynajmowanych w firmach CFM (Car Fleet Management) [16]. Te sposoby finansowania cieszą się wśród przedsiębiorstw coraz większym zainteresowaniem. Tylko w ciągu ostatniego roku udział leasingu i wynajmu zwiększył się o prawie 45%. (rys. 4)

Na rysunku 5 przedstawiono dynamikę wzrostu liczby klientów, którzy korzystają z usług firm CFM (Car Fleet Management) [16]. Rysunek 6 przedstawia udział poszczególnych segmentów rynku leasingu.

Dla klientów, którzy zdecydowali się na wybór usługi „full service leasing” – usługa ta obejmuje leasing operacyjny związany z pozyskaniem pojazdu oraz pakiet usługi serwisowej – istnieje oferta dodatkowych korzyści:

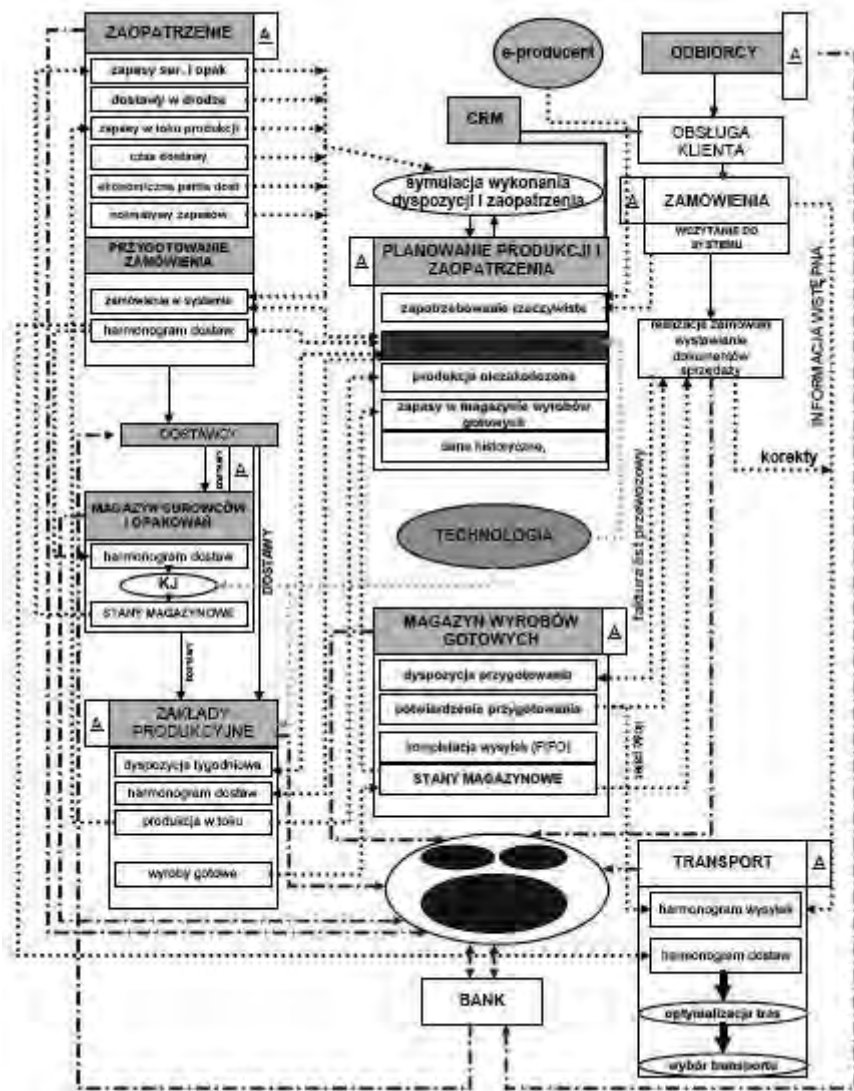
- serwis techniczny,
- assistance,
- ubezpieczenie,
- raporty menadżerskie,

At present, almost 64% out of 90,265 fleet cars in Poland are lease-financed or rented from CFM businesses [16]. These forms of financing are earning the growing interest of companies. Only during the previous year, the share of leasing and rental increased by almost 45%. (Figure 4)

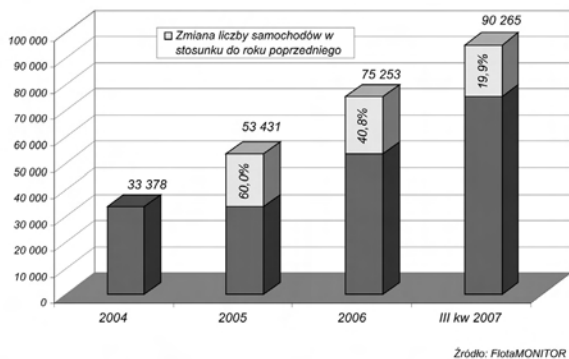
Figure 5 shows a growth trend in the number of customers using CFM services [16]. Figure 6 shows the share of the individual segments of the leasing market.

For customers who have chosen “full service leasing” this type of service includes operating leasing, connected with acquisition of a vehicle, and a service package; there also exist additional benefits:

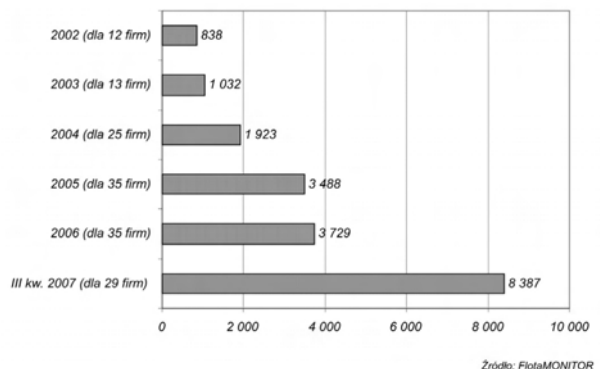
- servicing,
- assistance,
- insurance,
- managerial reports,
- tyre replacement and storage,
- replacement car,
- fuelling card,



Rys. 3. Schemat obiegu informacji w systemie logistyczno-transportowym  
 Fig. 3. A block diagram of the flow of information in a logistics and transportation system



Rys. 4. Polski Rynek Car Fleet Management  
 Fig. 4. Polish car fleet management market



Rys. 5. Klienci firm Car Fleet Management  
 Fig. 5. Customers of Car Fleet Management businesses

- wymiana i przechowywanie opon,
- samochód zastępczy,
- karta paliwowa,
- opieka doradcy.

W takim przypadku rola menagera ds. floty skupia się na rzeczach najważniejszych a mianowicie:

- kontroli,
- analizie zjawisk,
- wprowadzaniu działań korygujących w samej organizacji floty samochodowej.

Dodatkowo każdy manager powinien pamiętać, że samochód flotowy można wykorzystać jako narzędzie wynagrodzenia oraz motywowania pracowników. Jest to bardzo ważne w dobie kiedy brakuje specjalistów z dziedziny handlu. Poza tym należy pamiętać, że odpowiedni dobór floty świadczy o renomie przedsiębiorstwa na rynku.

#### 4. Eksploatacyjne kryteria doboru floty osobowej

Wybór odpowiedniego auta do floty ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia późniejszej eksploatacji. Dlatego manager ds. floty powinien w celu pełnej analizy uwzględnić wszystkie czynniki i parametry a następnie przeprowadzić proces optymalizacji.

Na rys. nku 7 przedstawiono kryteria jakimi mogliby kierować się kierowcy gdyby decydowali o wyborze samochodu

W rzeczywistości kryteriów wyboru jest znacznie więcej. Jednym z takich czynników, który w ostatnich latach zyskuje na popularności jest ekologiczność floty [16].

Aby można było mówić że flota firmowa spełnia warunek ekologiczności należy uwzględnić następujące kryteria:

- emisja gazów i substancji szkodliwych,
- parametry spalania paliwa – spełnianie norm Euro,
- udział części podlegających recyklingowi,
- przyjazność dla środowiska procesu produkcyjnego i transportu do klienta,
- całkowity koszt użytkowania dla środowiska,
- wartość parametru CV (opór powietrza),
- optymalny czas użytkowania pojazdu,
- zakładany przebieg roczny.

Świadomość ekologiczna użytkowników flot samocho-

- advisory service.

In a case like this, the role of the fleet manager is to concentrate on the most important things, namely:

- control,
- phenomena analysis,
- implementation of corrective actions in car fleet organization.

Additionally, every manager should bear in mind that a fleet car can be used as a tool for rewarding and motivating the employees. This is very important at the time when there is a shortage of sales specialists. Besides, it should be remembered that a proper choice of fleet does credit to the company's reputation on the market.

#### 4. Maintenance criteria for selection of passenger car fleet

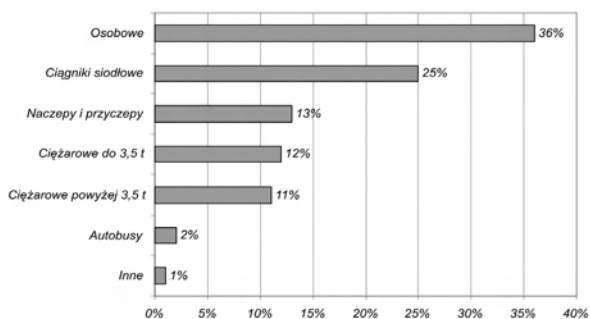
Selection of an appropriate car for a fleet is of key significance from the point of view of later maintenance. That is why, a fleet manager should, for the purpose of comprehensive analysis, take into account all the factors and parameters and then conduct an optimization process.

Figure 7 shows criteria that drivers could be guided by if they decided about the choice of a car

In reality, the selection criteria are much more numerous. One of the factors that has in recent years grown in popularity is the ecological status of fleet [16].

To be able to speak of a fleet as meeting ecological conditions, one has to take into account the following criteria:

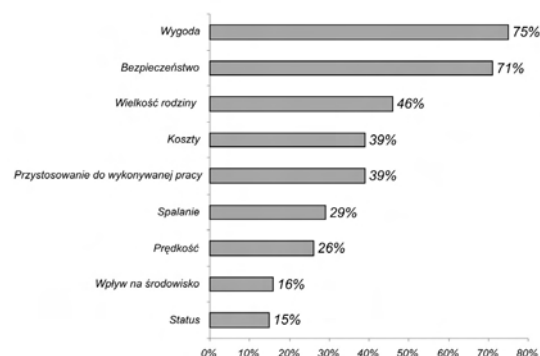
- emissions of gases and harmful substances,
- fuel consumption parameters—compliance with Euro standards,
- share of recyclable parts,
- environmental friendliness of the manufacturing process and the transportation of goods to the customer,
- total environmental costs of utilization,
- value of the CV parameter (air resistance),
- optimum vehicle utilization time,
- expected yearly mileage.



Zródło: ZPL

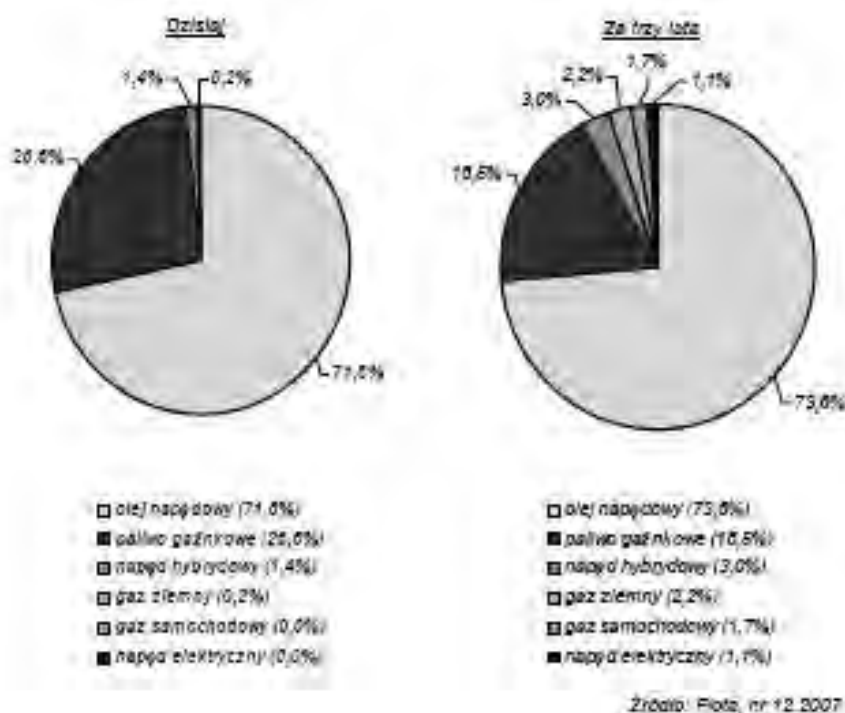
Rys. 6. Udział poszczególnych segmentów rynku leasingu pojazdów po III kwartale 2007 roku

Fig. 6. Share of individual segments of the vehicle leasing market after the third quarter of 2007



Rys. 7. Kryteria wyboru samochodu dla firmy przez przyszłych użytkowników

Fig. 7. Future users' criteria for choosing a company car



Rys. 8. Rodzaje napędów w samochodach flotowych

Fig. 8. Types of propulsion drive in fleet cars

wych z roku na rok jest coraz większa. Zilustrowano to na rysunku 8, na którym przedstawiono rodzaje napędu stosowanego obecnie oraz przewidywane za trzy lata.

Obecnie decydenci zarządzający flotami samochodowymi na równi stawiają wskaźnik ekonomiczności i ekologiczności. Świadczy to o wzroście zrozumienia potrzeb środowiska naturalnego. Podyktowane jest to również wymogami prawnymi oraz korzyściami jakie przedsiębiorstwo może uzyskać z tytułu spełnienia wymogów floty proekologicznej.

## 5. Wnioski

Przedstawione zagadnienia dotyczące zarządzania flotą samochodową w przedsiębiorstwie produkcyjno-handlowym potwierdzają konieczność uwzględniania wszystkich czynników, które mogą przyczynić się do podjęcia prawidłowych decyzji. Dodatkowo należy pamiętać, że transport jest jednym z wielu elementów łańcucha logistycznego jak również elementem pewnej całości w zarządzaniu przedsiębiorstwem. Wobec powyższego decyzje transportowe muszą uwzględniać istnienie innych aspektów niekoniecznie związanych z flotą.

Aby optymalnie podejść do zagadnień transportowych należy je traktować z punktu widzenia kompleksowego zarządzania logistycznego. Takie podejście gwarantuje, że decyzje transportowe będą skoordynowane z innymi decyzjami w przedsiębiorstwie.

Na podstawie przedstawionych zagadnień można określić kierunki zmian jakie istnieją obecnie i jakie będą kształtować się w przyszłości. Przedsiębiorstwa produkcyjne skupiają się na swojej działalności podstawowej tzn. na realizacji programu produkcji. Natomiast inna działalność jest przekazywana na zewnątrz (transport, magazynowanie, itp.). Oznacza to, że będą

Ecological awareness of car fleet users increases by the year. This is illustrated in Figure 8, which shows the kinds of propulsion drive used at present and predicted to be used in three years' time.

Nowadays, decision-makers managing car fleets put the index of cost-effectiveness on a par with the index of ecological impact. This testifies to a growing understanding of the needs of the natural environment. Also other factors such as legal requirements and benefits a company may receive when fulfilling green fleet requirements dictate pro-environmental decisions.

## 5. Conclusions

The presented issues regarding car fleet management in a manufacturing and retail company clearly show the necessity of taking into consideration all the factors that might contribute to making accurate decisions. Additionally, it should be remembered that transport is one of the many elements of the logistics chain as well as an element of a whole in company management. In view of that, transportation decisions have to take into account the existence of other aspects, not necessarily connected with fleet.

To approach transportation issues in an optimal manner, one should treat them from the point of view of comprehensive logistics management. An approach like this guarantees that transportation decisions will be coordinated with other decisions made in the company.

Based on the presented issues, one can specify the present and future trends. Manufacturing companies concentrate on their basic activity, i.e., carrying out the production program. Other activities (transport, warehousing, etc), on the other



zmieniać się uwarunkowania zarządzania transportem.

Zmienia się również rola managera ds. transportu. Jego głównym zadaniem jest koordynowanie i kontrolowanie działań, które wcześniej zostały zaplanowane wspólnie z firmą zewnętrzną. Dodatkowo zmieniają się również kryteria doboru takich firm. Większą wagę przywiązuje się do jakości usług, bezpieczeństwa temperaturowego ładunku, jak również do ekologiczności floty samochodowej.

Dzięki rozwojowi techniki i informatyzacji można obecnie wykorzystywać coraz lepsze narzędzia związane z bezpieczeństwem ruchu samochodu oraz bezpieczeństwem ładunku: m. in. nawigację satelitarną, rozbudowane samochodowe systemy chłodnicze, systemy diagnostyki pokładowej.

hand, are being outsourced. This means that the determinants of transport management will be changing in the future.

What is also changing is the role of the transport manager. His major task is to coordinate and control the activities planned earlier together with a third-party business. Additionally, criteria for selection of such businesses are also subject to change. Greater attention is being paid to the quality of services, thermal safety of freight, as well as ecological characteristics of vehicle fleet.

Owing to the development of technology and computerisation, better and better tools can be used connected with car movement and freight safety, among others, satellite navigation, complex car cooler systems, and on-board diagnostic systems.

### 6. References

- [1] Drucker P.F.: *Praktyka Zarządzania*, Akademia Ekonomiczna, Kraków 1998.
- [2] Christopher M.: *Strategia zarządzania dystrybucją*, Agencja Wydawnicza „Placet”, Warszawa 1996.
- [3] Gołbska E.: *Logistyka jako zarządzanie łańcuchem dostaw*, Akademia Ekonomiczna w Poznaniu 1994.
- [4] Griffin R.W.: *Podstawy zarządzania organizacjami*, PWN, Warszawa 1996.
- [5] Red. Koźmiński A., Piotrowski W.: *Zarządzanie, teoria i praktyka*, PWN, Warszawa 1995.
- [6] Stoner J., Wankel Ch.: *Kierowanie*, PWE, Warszawa 1994.
- [7] Pfohl H-CH.: *Systemy Logistyczne*, Podstawy organizacji i zarządzania, Poznań 1998
- [8] Coyle J., Bardi E., Langley J.: *Zarządzanie Logistyczne*, PWE Warszawa 2002.
- [9] Strategor, Zarządzanie firmą. *Strategie, struktury, decyzje, tożsamość*, PWE Warszawa 1997.
- [10] Rutkowski K., Beier F.: *Logistyka*, SGH, Warszawa 1997.
- [11] Praca zbiorowa pod redakcją Włodzimierza Rydzkowskiego i Krystyny Wojewódzkiej-Król: *Transport*, PWN 1997.
- [12] Skowronek Cz., Saryusz-Wolski Z.: *Logistyka w przedsiębiorstwie*, PWE Warszawa 2003.
- [13] Stajniak M., Foltyński M., Hajdul M., Krupa A.: *Transport i spedycja*, ILiM Poznań 2007.
- [14] Praca zbiorowa pod redakcją Włodzimierza Rydzkowskiego: *Usługi logistyczne*, ILiM, Poznań 2007.
- [15] Matulewski M., Konecka S., Fajfer P., Wojciechowski A.: *Systemy logistyczne*, ILiM Poznań 2007.
- [16] Miesięcznik „Flota” nr 12/2007, 01/2008.

---

**Mgr inż. Artur DMOWSKI**

Dyrektor ds. Logistyki i Zakupów  
Firma Cukiernicza Solidarność  
ul. Gospodarcza 25  
20-211 Lublin  
e-mail: info@solidarnosc.pl

---

## DOBÓR PARAMETRÓW EKSPLOATACYJNYCH POJAZDU Z NAPĘDEM ELEKTRYCZNYM

### CHOICE OF OPERATIONAL PARAMETERS OF ELECTRIC-DRIVE CARS

Opracowany w artykule model obliczeniowy doboru parametrów eksploatacyjnych pojazdu samochodowego z napędem elektrycznym pozwala na wyznaczenie jego zasięgu w zależności od: prędkości jazdy, gabarytów pojazdu, jednostkowego zużycia energii [kJ/kg], jednostkowych oporów ruchu, współczynnika obciążenia pojazdu  $f$ , sprawności układu napędowego, realnej energii jednostkowej akumulatorów [kJ/kg]. Na podstawie przeprowadzonych badań eksploatacyjnych wyznaczono współczynnik  $\beta=0,24$ , który dla przyjętych pozostałych parametrów umożliwia wyznaczenie realnego zasięgu.

**Słowa kluczowe:** elektryczny pojazd miejski, zasięg eksploatacyjny, silnik elektryczny.

Thanks to the computational model of the choice of parameters for an electric drive car in this article it is possible to determine its range depending on: driving speed, car size, unit energy consumption [kJ/kg], unit resistance to motion, car load coefficient  $f$ , efficiency of the power transmission system, real unit energy of batteries [kJ/kg]. The operational experiments yielded the coefficient value of  $\beta=0.24$ , which for the other adopted parameters makes it possible to determine the real range.

**Keywords:** electric urban vehicle, operational range, electric engine.

#### 1. Wprowadzenie

W związku z potrzebą ograniczenia zużycia nieodnawialnej energii i zagrożeń ekologicznych spowodowanych masowym transportem samochodowym intensyfikowane są prace w zakresie projektowania nowych układów napędowych pojazdów samochodowych w tym układów elektrycznych i hybrydowych.

W pracy przedstawiono projekt funkcjonalny i obliczeniowy pojazdu z napędem elektrycznym o przeznaczeniu do transportu na obszarze średniej wielkości miasta do 200 tysięcy mieszkańców o zasięgu 50 km przebiegu dziennego.

Podstawowy układ napędowy miejskiego pojazdu elektrycznego (MPEV) składa się ze źródła energii elektrycznej, silnika elektrycznego, przekładni mechanicznej i pneumatycznych kół jezdnych.

Samochody o napędzie elektrycznym projektowano pod koniec XIX wieku i konkurowały one z ówczesnymi pojazdami o napędzie parowym i spalinowym [4].

Występujący regres w rozwoju tych pojazdów był spowodowany m.in.:

- niższymi kosztami produkcji energii pozyskiwanej z paliw płynnych w stosunku do energii elektrycznej;
- mniejszą masą pojazdu z napędem spalinowym w porównaniu z elektrycznym (masą akumulatorów);
- ograniczonym zasięgiem przebiegu i maksymalnej prędkości jazdy pojazdu elektrycznego.

Obecnie ceny paliw płynnych rosną szybciej od energii elektrycznej i dostępność tej energii jest znacznie większa od energii nieodnawialnej ze względu na wykorzystanie różnych źródeł.

Obecny stan mechatroniki zastosowany w budowie i eksploatacji pojazdów o napędzie elektrycznym pozwala na porównanie takich parametrów jak zasięg, przyspieszenie, zdolność pokonywania wzniesień, prędkość maksymalna, zużycie energii, koszty eksploatacji, niezawodność i trwałość w odniesieniu do pojazdów z napędem spalinowym.

#### 1. Introduction

As the need to cut down on the consumption of renewable energy becomes more and more urgent and it is becoming increasingly necessary to prevent environmental damage caused by common use of vehicles for transport, work is being stepped up aimed at designing new drive systems for cars, including electric-drives and hybrid-drive cars.

This paper presents the functional and computational design of an electric-drive car intended for use in transport in a medium-sized town of up to 200 thousand inhabitants, with a mileage of 50 km a day.

The basic drive system of an urban electric drive vehicle consists of a source of electric power, an electric engine, mechanical gear and pneumatic wheels.

Electric drive cars were designed at the end of the 19<sup>th</sup> century and at that time they competed with steam engine and combustion engine vehicles [4].

The factors which slowed down the development progress of such cars included:

- lower cost of production of energy from liquid fuels as compared to electric power;
- lower weight of a combustion engine car as compared to an electric drive (batteries);
- limited range and maximum speed of electric drive cars.

Currently, the prices of liquid fuels are increasing faster than those of electric power and their availability is much greater due to the use of various sources.

The current condition of mechatronics applied in the construction of electric drives allows for comparing such parameters as range, acceleration, ability to drive up hills, maximum speed, operational costs, reliability and durability as compared to combustion engines.

## 2. Określenie parametrów eksploatacyjnych

Podstawowymi parametrami eksploatacyjnymi pojazdu z napędem elektrycznym są: zasięg przebiegu w cyklu jazdy miejskiej, prędkość maksymalna, przyspieszenie, zdolność pokonywania wzniesień, zużycie energii na jednostkę przebiegu, odzyskiwanie energii podczas hamowania (rekuperacja), koszty eksploatacji, niezawodność i trwałość układu napędu elektrycznego.

Jak podano w pkt.1 podstawowym parametrem eksploatacyjnym pojazdu elektrycznego jest **zasięg** przebiegu (w km) definiowany drogą przebytą przez pojazd wykorzystując energię jednorazowo zmagazynowaną w akumulatorach bez doładowania. Wyróżnia się tu zasięg (Z) osiągnięty przez pojazd w przypadku jazdy:

- ze stałą prędkością  $V=\text{const}$ , jazda ustalona na poziomej drodze bez przyspieszeń;
- ze zmienną prędkością  $V(t)$  poruszający się według powtarzalnego cyklu jazdy obejmującego następujące fazy: przyspieszanie, jazda ustalona, wybieg, hamowanie, postój.

Zasięg w przypadku  $V=\text{const}$  można opisać zależnością:

$$Z=3,6 \cdot V \cdot t \quad [\text{km}] \quad (1)$$

gdzie:  $V$  - prędkość pojazdu [m/s];  $t$  - realny czas pokonania opisanego zasięgu i jednocześnie czas wyładowania ( $t_b$ ) baterii akumulatorów wyrażony w godzinach [h].

Realny czas  $t_b$  odróżnia się od znamionowego czasu wyładowania akumulatorów  $t_n=1$  h. Czas  $t_b$  zależy od stanu energetycznego akumulatorów  $E$ . Jednostkowe zużycie energii przez pojazd elektryczny  $E$  może być wyrażone w kJ na km [kJ/km] lub kJ na km i kg masy pojazdu [kJ/km·kg]. Wówczas  $t_b$  zależy od stanu energetycznego ( $E$ ) akumulatorów i pobieranej mocy ( $N$ ) do napędu kół jezdnych [2]:

$$t_b = \frac{E}{3,6 \cdot N} \quad [\text{h}] \quad (2)$$

gdzie:  $N$  - moc jednostkowa wyładowania akumulatora w odniesieniu do masy pojazdu [W/kg];  $E$  - jednostkowe zużycie energii [kJ/kg].

Na podstawie zależności Peuckerta można określić parametry zasobnika energii (akumulatora) [2]:

$$\frac{Q}{Q_n} = \left( \frac{I}{I_n} \right)^{-\beta} \quad (2a)$$

gdzie:  $Q, Q_n$  - realna i znamionowa (1-godzinna) pojemność akumulatorów [Ah];  $I, I_n$  - realny i znamionowy (1-godzinny) prąd wyładowania akumulatora [A];  $\beta$  - współczynnik Peuckerta.

Zatem:

$$E = E_n \cdot \left( \frac{N}{N_n} \right)^{-\beta} \quad (3)$$

Po uwzględnieniu zależności (1) i (2) zasięg pojazdu można wyznaczyć z zależności:

$$Z = 3,6 \cdot \left( \frac{E_n}{3,6 \cdot N} \right)^{1+\beta} \quad (4)$$

## 2. Determination of operational parameters

The basic operational parameters of an electric drive car include: the driving range of an urban drive cycle, maximum speed, acceleration, ability to drive up hills, consumption of energy per distance unit, energy recuperation when braking, operational costs, reliability and durability of an electric drive system.

As shown in item 1, **range** (in km) is the basic operational parameter of an electric drive car, defined as the distance covered by a car which uses the energy stored in batteries, without recharging. This can be divided into the range (Z) achieved by a car in driving:

- with a constant speed  $V=\text{const}$ , in steady driving on a horizontal road, without acceleration;
- with variable speed  $V(t)$ , when a car drives in a repeatable cycle, including the following phases: acceleration, constant driving, inert movement, braking, stopping.

If  $V=\text{const}$ , the range can be described by a relationship:

$$Z=3,6 \cdot V \cdot t \quad [\text{km}] \quad (1)$$

where:  $V$  - vehicle speed [m/s];  $t$  - real time of covering the distance and the time ( $t_b$ ) of discharging batteries, expressed in hours [h].

The actual time  $t_b$  is different than the rating time of battery discharge  $t_n=1$  h. The time  $t_b$  depends on the energy state of the batteries  $E$ . The unit consumption of energy  $E$  by an electric drive car may be expressed in [kJ/km] or [kJ/km·kg]. Then  $t_b$  depends on the energy state ( $E$ ) of batteries and the power ( $N$ ) consumed to drive the road wheels [2]:

$$t_b = \frac{E}{3,6 \cdot N} \quad [\text{h}] \quad (2)$$

where:  $N$  - unit power of a battery discharge as related to the vehicle weight [W/kg];  $E$  - unit consumption of energy [kJ/kg].

Based on Peuckert's relationship, the parameters of the energy storage reservoir (battery) can be determined [2]:

$$\frac{Q}{Q_n} = \left( \frac{I}{I_n} \right)^{-\beta} \quad (2a)$$

where:  $Q, Q_n$  - actual and rated (1-hour) capacity of batteries [Ah];  $I, I_n$  - actual and rated (1-hour) battery discharge current [A];  $\beta$  - Peuckert's coefficient.

Therefore:

$$E = E_n \cdot \left( \frac{N}{N_n} \right)^{-\beta} \quad (3)$$

After taking into account the relationships (1) and (2), one can calculate the range of a vehicle from the following relationship:

$$Z = 3,6 \cdot \left( \frac{E_n}{3,6 \cdot N} \right)^{1+\beta} \quad (4)$$

Zakładając, że  $E_n$  i  $N$  są parametrami określonymi na kołach napędowych, wartość tej energii i mocy obliczyć z zależności :

$$E_n = E_{n1} \cdot f \cdot h_p \quad (5)$$

gdzie:  $E_{n1}$  – realna energia jednostkowa akumulatora, która dla akumulatorów trakcyjnych wynosi 100-200 kJ/kg przy trwałości ok. 1500-3000 cykli ładowania i sprawności  $\eta_a=0,8-0,9$ ;  $f=m_a/m_p$  – współczynnik obciążenia pojazdu masą akumulatorów;  $h_p$  – sprawność układu napędowego.

Oraz:

$$N = V \cdot F_n \quad (6)$$

gdzie:  $F_n$  – siła napędowa na kołach  $F_n \geq \sum_{i=1}^n O_i$ ;  $O_i$  – opory ruchu pojazdu.

W tym przypadku po podstawieniu do wzoru (4) zależności (5) i (6) można wyrazić zasięg  $Z$  jako:

$$Z = 3,6 \cdot V \cdot \left( \frac{E_{n1} \cdot f \cdot h_p}{3,6 \cdot V \cdot F_n} \right)^{(1+b)} \quad (7)$$

Na podstawie określonego zależnościami (7) zasięgiem pojazdu o przyjętych parametrach technicznych i eksploatacyjnych ( $V, F_n, O_i, m_{poj}$ , itp.) można dobrać moc napędu, energię jednostkową akumulatorów oraz rodzaj napędu pojazdu. Wpływ zmiennych parametrów eksploatacyjnych pojazdu na jego zasięg przedstawiono na rys. 1.

Na rys. 1 przedstawiono wykres ilustrujący zasięg pojazdu od prędkości jazdy dla przyjętych charakterystyk eksploatacyjnych układu napędowego pojazdu.

Dla przyjętych koncepcji elektrycznego układu napędowego pojazdu samochodowego założono następujące parametry[1]:

- masa konstrukcyjna pojazdu	580 kg
- masa akumulatorów (4 x 38 kg)	152 kg
- prędkość maksymalna	19,44m/s (70 km/h)
- przyspieszenie	0,4 m/s <sup>2</sup>

Bazując na doświadczeniach przeprowadzonych z pojazdem miejskim o napędzie elektrycznym przyjmujemy do wyliczenia zasięgu pojazdu elektrycznego wartość współczynnika  $\beta=0,24$ . Po podstawieniu do zależności (7) otrzymujemy wykres zmian zasięgu w zależności od prędkości jazdy pojazdu przedstawiony na rys. 2.

Przykładowe zestawienie podzespołów do budowy elektrycznego pojazdu miejskiego na bazie taniego samochodu miejskiego Trabant przedstawiono w tabeli 1 [1].

Assuming that  $E_n$  and  $N$  are parameters determined on the driving wheels, the value of the energy and power can be calculated from the following relationship:

$$E_n = E_{n1} \cdot f \cdot h_p \quad (5)$$

where:  $E_{n1}$  – the actual unit energy of a battery, which for a traction battery ranges from 100 to 200 when the durability ranges from about 1500 to about 3000 charge-discharge cycles and the efficiency  $\eta_a=0,8-0,9$ ;  $f=m_a/m_p$  - the coefficient describing the vehicle load with the battery weight;  $h_p$  – efficiency of the power transmission system.

And:

$$N = V \cdot F_n \quad (6)$$

where:  $F_n$  – driving force on wheels  $F_n \geq \sum_{i=1}^n O_i$ ,  $O_i$  – resistance to motion of a vehicle.

In this case, when the relationships (5) and (6) are substituted in formula (4), the range  $Z$  can be expressed as:

$$Z = 3,6 \cdot V \cdot \left( \frac{E_{n1} \cdot f \cdot h_p}{3,6 \cdot V \cdot F_n} \right)^{(1+b)} \quad (7)$$

Based on the value of the vehicle range, described by relationship (7), the vehicle having the assumed operational parameters ( $V, F_n, O_i, m_{poj}$ , etc.), the power of the drive, the unit energy of batteries and the type of the drive system can be determined. The influence of the variable operational parameters of a vehicle on its range is shown in Fig. 1.

Fig.1 shows the diagram which illustrates the relationship between the vehicle range and the driving speed for the assumed operational characteristics of the vehicle power transmissions system.

The following parameters were assumed for the adopted concepts of the electric drive system of a car[1]:

- weight of a car	580 kg
- weight of batteries (4 x 38 kg)	152 kg
- maximal speed	19.44m/s (70 km/h)
- acceleration	0.4 m/s <sup>2</sup>

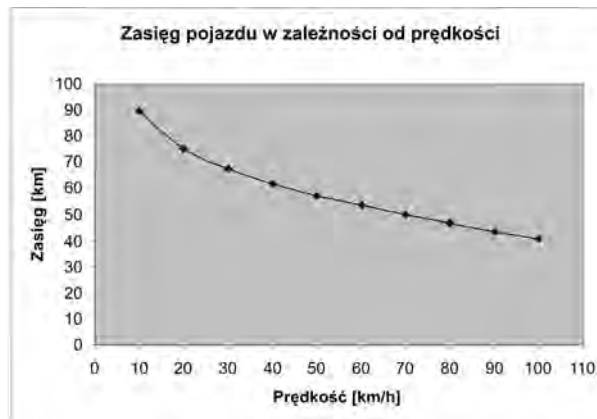
Based on the experiments with an electric drive urban car, the range of an electric drive car was calculated using the coefficient value  $\beta=0.24$ . Substituting to relationship (7) yields the relationship between changes of the range and the driving speed; the diagram is shown in Fig. 2.

An example list of elements of construction of an electric drive urban car, based on an inexpensive Trabant car, is shown in Table 1 [1].



Rys. 1. Wykres zależności zasięgu pojazdu od prędkości jazdy przy różnych wartościach współczynnika  $\beta$

Fig. 1. Diagram of the relationship between the range of a vehicle and the driving speed at various values of coefficient  $\beta$



Rys.2. Wykres zmian zasięgu pojazdu elektrycznego w zależności od prędkości jazdy przy założonym współczynniku  $\beta=0,24$

Rys.2. The relationship between changes of the range and the driving speed, with the adopted value of  $\beta=0,24$

Tab. 1 Przykładowe zestawienie elementów do budowy pojazdu miejskiego z napędem elektrycznym

Tab. 1. An example list of construction elements of an electric drive urban car.

Elementy przykładowego pojazdu elektrycznego / Elements of an example electric drive car	
Samochód osobowy Trabant model 1,1 A Trabant car, model 1,1	
Silnik elektryczny Etek Electric engine Etek	
Sterownik impulsowy silnika elektrycznego Alltrax AXE-7245 A pulse programmer of an electric engine Alltrax AXE-7245	
Akumulatory Trojan T-1275 Trojan T-1275 Batteries	
Inne elementy (okablowanie, styczniki itp.) / Other elements (wiring, contactors, etc.)	

### 3. Wnioski

Opracowany model obliczeniowy doboru parametrów eksploatacyjnych pojazdu samochodowego z napędem elektrycznym pozwala na wyznaczenie jego zasięgu w zależności od: prędkości jazdy, gabarytów pojazdu, jednostkowego zużycia energii [kJ/kg], jednostkowych oporów ruchu, współczynnika obciążenia pojazdu  $f$ , sprawności układu napędowego, realnej energii jednostkowej akumulatorów [kJ/kg]. Na podstawie przeprowadzonych badań eksploatacyjnych wyznaczono współczynnik  $\beta=0,24$ , który dla przyjętych pozostałych parametrów umożliwia wyznaczenie realnego zasięgu na podstawie wzoru 7.

### 4. References

- [1] Janulin M., Nowacki B.: Praca magisterska: *Model fizyczny pojazdu miejskiego z napędem elektrycznym* WNT UWM 2007 wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Ryszarda Michalskiego.
- [2] Michałowski K., Ocioszyński J.: *Pojazdy samochodowe o napędzie elektrycznym i hybrydowym*. WKiŁ; Warszawa 1989.
- [3] Olszowiec P.: *Elektryczne samochody, słoneczne rowery*, Energia gigawat nr 12/2003, 2003.
- [4] Szczepaniak C.: *Motoryzacja na przełomie epok*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa-Łódź 2000.

### 3. Conclusions

Thanks to the computational model of the choice of parameters for an electric drive car it is possible to determine its range depending on: driving speed, car size, unit energy consumption [kJ/kg], unit resistance to motion, car load coefficient  $f$ , efficiency of the power transmission system, real unit energy of batteries [kJ/kg]. The operational experiments yielded the coefficient value of  $\beta=0.24$ , which for the other adopted parameters makes it possible to determine the real range from formula 7.

---

**Prof. dr hab. inż. Ryszard MICHALSKI**

**Mgr inż. Michał JANULIN**

Katedra Budowy Eksploatacji Pojazdów i Maszyn  
UWM w Olsztynie

ul. Oczapowskiego 2

10-719 Olsztyn

tel.: (089) 523-34-63

e-mail: [michal.janulin@wp.pl](mailto:michal.janulin@wp.pl)

---

## INTEGRACJA NA RYNKU USŁUG POCZTOWYCH

### CONVERGENCE AT THE POSTAL MARKET

*Artykuł omawia oddziaływanie zmian technologicznych na strategię rynków usług pocztowych. Głównym tematem jest integracja technologii, usług i tworzenia nowych form kooperacji przedsiębiorstw—pionowych i poziomych sojuszy firm. Termin „integracja” (ang. convergence) rozumiany jest w odniesieniu do technologii, zawartości usług, oraz wymiaru ekonomicznego i instytucjonalnego.*

**Słowa kluczowe:** integracja, poczta, usługi, technologia informacyjna, strategia, operator.

*The paper deals with impacts of technology change on the strategy of postal markets. It concentrates on the convergence of technology, services and creation of new forms of firm cooperation – vertical and horizontal alliances. The term “convergence” is defined in relation with technology, content, economic and institutional dimensions.*

**Keywords:** convergence, post, services, information technology, strategy, operator.

Current world economic environment can be characterized as knowledge technologies arrival, accompanied by mobility development and capital liquidity, as well as regulation and liberalization reforms in wide dynamic international economic sectors, especially in the area of financing, business and information technologies. Science and technique results and institutional innovations in the area of transport and telecommunication are not related only to distance shortening, time barriers elimination and restrictions, but all this information mentioned represent also the core of world economy development of global production systems of knowledge. Global markets with an extensive outsourcing and just-in-time deliveries demand considerable increase semi-finished products transportation, components and goods between the production and logistical centers all over the world. Tempo of product obsolescence and service obsolescence remain in demand and supply. Spatial distribution is changed extensively concerning the subject, manner and the area of transportation.

In connection with these changes, the term convergence is more often used in economics and management description:

- processes of adjusting various economics indexes differences within the group of countries or the process of run highly developed countries down and standard of living individual countries adjustment,
- processes of changes, traditionally not connected areas, or the dismantling of borders between traditional branches and markets.

From the systematic point of view and convergence change analysis expressions, it is possible to initiate these four areas [1]:

1. technology convergence,
2. content convergence, or product convergence,
3. economic convergence,
4. institutional convergence.

Technique and technology convergence concern the possibilities of the postal network usage, for the innovative services or new services providing, as well as, new markets entering [11].

Content convergence and product convergence result from the existence of product in material and immaterial form, or

the content in digital form and the multiple use possibility, its storage etc. [5,6].

Institutional convergence can be observed in an administration and political level. This convergence is especially connected with an economic and fiscal policy, integration alignments forming and common legislative frame development. The particular demonstrations of institutional convergence at the post can be seen at regulation frame determination. It depends whether it is connected with regulator assignments, market access, universal service content and scope, quality assurance, price making progress, etc.

Technique and technology convergence caused changes in the meaning of knowledge, human capital and financial capital utilization comprehension [3, 4, 8]. This gives rise to join the enterprises in corporation, alliances and fusions. Strong firms act all over the world like a „global players“. Economics activities are based on various regulation rules, norms and laws. Harmonization is not easy, for the reason of disparity in national interest. Free trade with a free competition represents a threat for a national production and an employment, especially for the fast industrial development.

In term of economic real and nominal convergence is differentiated [2,10]. Nominal convergence especially means the convergence of specific economics indicators of grade (or of specific reference value for the indicators defined) engaging stability at the economic integrated area. The real convergence from an individual point of view implies, if it is possible to gain the same quantity of goods and services like in a highly-developed countries when the prices are comparable. On the other hand, this means, that employee has to produce the same value per one foot-poundal as an employee in the highly-developed economic. Comparability economic efficiency analysis, comparability wage scale analysis, productivity and prices are considered as the basic measurable coefficients of the real convergence.

Total revenue analysis of the universal postal service provider has shown some common tendencies, presented in the figure 1a and 1b [7]. Consecutive total revenue increase reduction has occurred in V4 countries as well as in Balt countries. Whereby, an absolute revenue decrease occurred in Czech Republic and

Estonia in the year 2000. But this effect was not characteristic for all the European countries.

These two convergences are the processes methodological starting point of the economic convergence observation [9]:

- beta convergence, the consequence of currently poor countries tend to reach gradually the economic coefficients of wealthy countries,
- sigma convergence focus on economic coefficients variability between the countries. This is expressed in economic coefficient logarithms standard deviation fall between the countries. Further, this implicates lowering the gap abreast of economics coefficients.

Beta convergence validity observation in condition of European countries in term of universal service provider revenues is presented in fig. 2-3. Horizontal line expresses general returns starting point, or postal service returns, universal service provider per capita in logarithms. Vertical line expresses average growth rate of this coefficient during the years 1998 – 2002.

From the figure 2, beta convergence validity results, whereas regression axis has got negative trend, this means oncoming the less developed countries to developed countries. Coefficient of determination is 29,7 %. Most of the countries, which entered the EU in the years of 2004 or 2007, are in the left side of the graph, with the exception of CR, Slovenia, Malta. These countries make the shed between the countries. All these countries mentioned abreast of Spain and Portugal. Concurrent, it is clear, that countries with a long-term going market economy are at the right side of the graph. Differences in the coefficient level between the countries entering the EU in 2004 and also in the year of 2007 are more expressive, and it is not possible to expressly assert the variability decrease in the search period,

nor the sigma convergence validity. Analogical conclusion can be done following the analysis in the figures 3 and 4.

Postal market analyses results support forecast changes in postal environment. Trends bring new ways of looking on overall conception of postal services and operator networks, technology suppliers and especially customers. In a worldwide basis, thanks to internet popularity and e-business applications increase, the demand for data communication and transport-logistics services rises. According to analysts, the situation will have persisted in the near future of 3 or 4 years, and probably in a space of time 7 to 10 years. This fact is one of the key facts in creating traditional postal operator business plans as well as the new operators at the postal market.

New postal operators have to come up with new services and new possibilities for their customers to have theirs way at the postal market and attract customers. Postal operators have to make their supply (of the postal services) more attractive. Network building succumbs to all these conditions. There is an advantage for new subjects in building the networks from the core. Therefore, question of contact points abolishing is not needed to handle with any more. Network draft and submission can be built to respect operator's business intention and especially meets the customer needs.

For reasons given, convergence utterances at the post or at the postal markets are possible to follow, in term of capital corporations, customer structures, or consumers, infrastructure, investments, individual choice etc. Global operator strategies reflect a convergence trend, in the term of technology, content, economics or management.

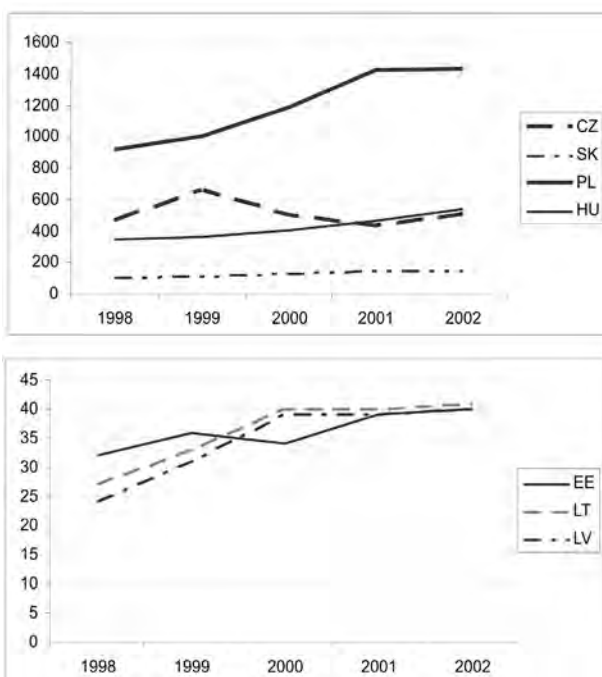


Fig. 1. a) USPS revenue in mil Euro in V4 countries, b) USPS revenues in mil Euro in Balt countries: Key: CZ – Czech Republic, SR – Slovak Republic, HU – Hungary, PL – Poland, EE – Estonia, LT – Latvia, LV – Lithuania

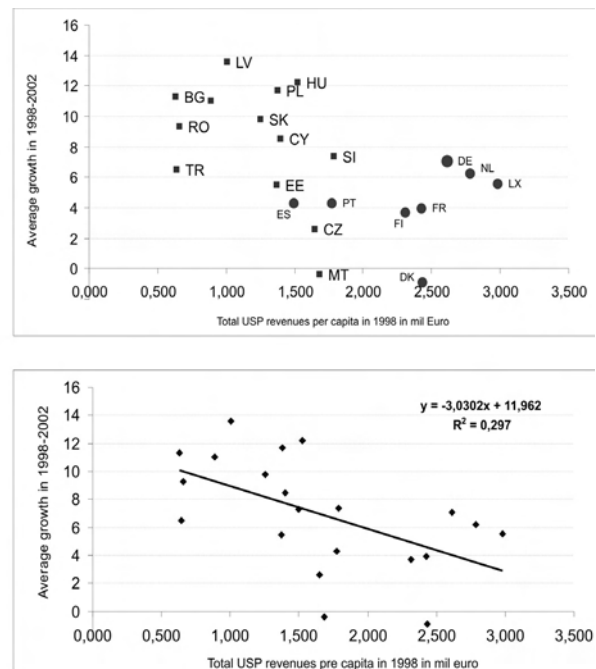


Fig. 2. Linear function of beta convergence: Key: CZ – Czech Republic, SR – Slovak Republic, HU – Hungary, PL – Poland, EE – Estonia, LT – Latvia, LV – Lithuania, BG – Bulgaria, CY – Cyprus, MT – Malta, RU – Romania, SI – Slovenia, DK – Denmark, DE – Germany, ES – Spain, FI – Finland, FR – France, LX – Luxembourg, NL – Nedherlands, PT – Portugal



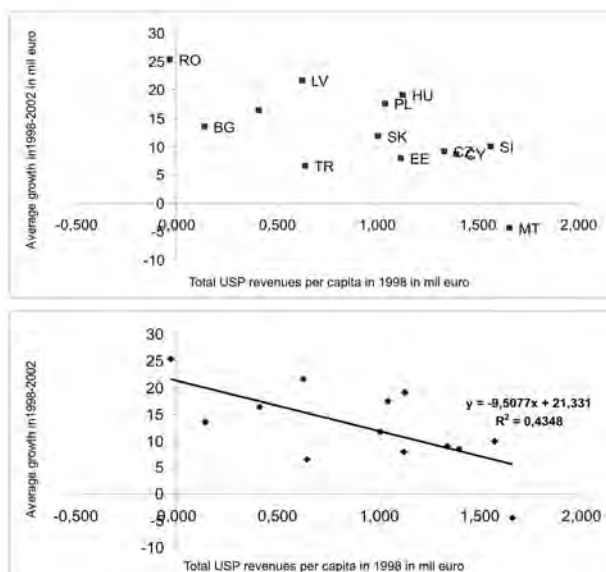


Fig. 3. Linear function beta convergence

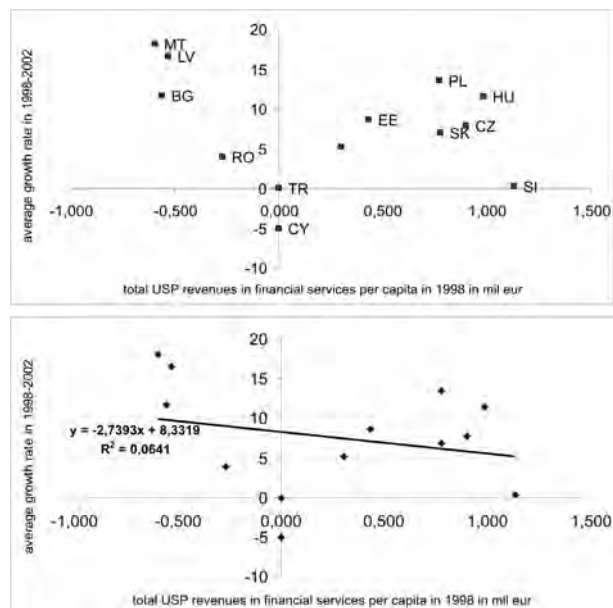


Fig. 4. Linear function of beta convergence

### Acknowledgement

This contribution was undertaken as part of the research project VEGA 1/4573/07 Possibilities, limits and development trends of the obligatory service conception in post and telecom-

munication in the process of globalization and project MVTS Nem/SR/ŽU3/07 Application of PDCA cycle in services. It benefited from grants from the Ministry of Education of Slovak Republic for which the authors express their gratitude.

### References

- [1] Komarek, G.: *On the role of telecommunication for the integration of Europe. Proceedings*, TEMPUS MADECISE, 2002 ISBN 80-7100-950-4.
- [2] Konvergencia ekonomiky SR k vyspelým ekonomikám. IFP MF SR, Bratislava 2006.
- [3] Kubovová, E.: *Konvergenčné stratégie na trhoch elektronických komunikácií*. Diplomová práca, F PEDAS ŽU, Žilina, 2006, ved. práce: prof. Ing. Tatiana Čorejová, PhD.
- [4] Low, L.: *Economics of IT and the Media*. Singapore University Press 2000, ISBN 981-02-3844-4.
- [5] Majerčáková, M.: *Technológia telekomunikácií*. EDIS Žilina, 2003, ISBN 80-8070-159-8.
- [6] Madleňák, R.: *Elektronický obchod* 1. vyd. - Žilina : Žilinská univerzita, 2004. - 160 s., AH 13,53, VH 14,01 : obr., tab. - ISBN 80-8070-192-X.
- [7] Main Developments in the European Postal Sector; [http://europa.eu.int/comm/internal\\_market/post/doc/studies/2004-wik-final\\_en.pdf](http://europa.eu.int/comm/internal_market/post/doc/studies/2004-wik-final_en.pdf).
- [8] Rostášová, M. - Kremeňová, I.: *Marketing v službách. Algoritmy marketingových činností*. EDIS, Žilinská univerzita v Žiline, Žilina, 2005, ISBN 80-8070-355-8.
- [9] Sojková, Z.: *Globalizácia a konvergencia*. Katedra štatistiky a operačného výskumu, SPU v Nitre, Tr. A.Hlinku 2, 979 76 Nitra.
- [10] Šikulová, I.: *Konvergencia v procese európskej menovej integrácie*. EÚ SAV Bratislava, 2006, ISBN 80-7144-155-4.
- [11] [www.upu.int](http://www.upu.int)

**Prof. Ing. PhD. Tatiana ČOŘEJOVÁ**  
**Ing. Emília IMRIŠKOVÁ**

Department of Communications  
 Faculty of Operation and Economics of Transport and Communications  
 University of Žilina, Univerzitna 1, 010 26 Žilina, Slovak Republic  
 e-mail: tatiana.corejova@fpedas.uniza.sk  
 e-mail: emilia.imriskova@fpedas.uniza.sk

## TRANSPORT INTERMODALNY NA BLISKIE I ŚREDNIE ODLEGŁOŚCI

### INTERMODAL TRANSPORT OVER SHORT AND LONG DISTANCES

*W artykule przedstawiono możliwości realizacji przewozów kolejowo-drogowych na dystansach 150 – 500 km, rozumianych jako transport zunifikowanych jednostek ładunkowych na małe i średnie odległości. Zdefiniowano czynniki determinujące wysokie koszty przewozów kolejowo-drogowych, a tym samym wpływające na efektywność tych przewozów przede wszystkim na duże odległości – powyżej 500 km. Zaproponowano kryteria, które należy uwzględnić aby transportem kombinowanym przewozić ładunki na mniejsze odległości. Zaproponowano do transportu, odpadów komunalnych, złomu, gruzu komunalnego, kruszywa budowlanego system ACTS – poziomego przeladunku standardowych pojemników wymiennych.*

**Słowa kluczowe:** transport kombinowany, terminal przeladunkowy, technologie przeladunkowe, organizacja przewozów kombinowanych kolejowo-drogowych, system ACTS, strumień ładunków.

*The article presents the possibilities for rail and road transport over the distance of 150-500 km, understood as transport of standardized loading units over short and medium distances. It identifies factors determining high costs of rail and road transport, which have an influence on the effectiveness of this transport, in particular over long distances, exceeding 500 km. It puts forward criteria to be taken into consideration when carrying goods by combined transport over shorter distances. It suggests the use of ACTS (Abroll Container Transport System) – horizontal transshipment of standard exchangeable containers – for transport of municipal waste, scrap, municipal rubble, and construction aggregate.*

**Keywords:** combined transport, transshipment terminal, transshipment technologies, organization of rail and road transport, ACTS, freight flow.

#### 1. Wstęp

Transport kombinowany kolejowo-drogowy stanowi obecnie w Europie znaczącą alternatywę dla towarowego transportu samochodowego. Zatłoczone drogi z jednej strony oraz niewykorzystany potencjał przewozowy transportu kolejowego przy jego dobrze rozwiniętej sieci połączeń i infrastrukturze sprzyjają rozwojowi przewozów kombinowanych z wykorzystaniem klasycznych już dzisiaj technologii przewozowych.

Rezultaty opublikowane w [3] wskazują, że przeciętna odległość, na jaką transportowana jest IJT w przewozach kombinowanych przekracza 500 km. Największy operator przewozów intermodalnych, firma ICF (Intercontainer-Interfrigo) przewoził kontenery w 2002 r. na średnią odległość 952 km, obecnie (2007 r.) odległość ta zwiększyła się do 1192 km [4]. Średnia odległość przewozu IJT wśród operatorów transportu kombinowanego należących do organizacji UIRR wynosi 760 km [3]. Jednocześnie w państwach UE udział ładunków transportowanych na odległość ponad 500 km stanowi tylko około 22%, natomiast aż 46% ładunków przewożona jest na odległość od 150 do 500 km [3]. Tak znaczący udział towarów transportowanych na dystansie 150 – 500 km wymaga zdecydowanych działań na rzecz organizacji transportu kombinowanego na małe i średnie odległości, aby przejąć część rynku tych przewozów. Powszechnie stosowane technologie przewozów kolejowo-drogowych wymagają zatem nowego podejścia i dostosowania do potrzeb rynku.

#### 1. Introduction

Rail-and-road combined transport is nowadays a significant alternative to car transport in Europe. Crowded roads on one hand and unused rail transport potential with its well-developed connection network and infrastructure favour the development of combined transport using classic transport technologies.

Results published in [3] show that an average distance over which ILU is transported using combined transport exceeds 500 km. The largest intermodal transport operator, ICF (Intercontainer-Interfrigo), in 2002 transported containers over the distance of 952 km, and this year (2007) this distance increased to 1,192 km [4]. An average distance of ILU transport among combined transport operators belonging to UIRR is 760 km [3]. At the same time the European Union Member States transport only 22% of loads over the distance exceeding 500 km, and as much as 46% of loads over the distance of 150-500 km [3]. Such a significant number of goods transported over the distance of 150-500 km requires decisive steps to organize combined transport over short and medium distances to take over a part of this transport market. Therefore, widely used technologies of rail and road transport require a new approach and adaptation to market needs.

2. Klasyczne technologie przewozów kolejowo-drogowych

Cechą charakterystyczną przewozów kolejowo-drogowych wynikającą z samej istoty transportu kombinowanego jest występowanie co najmniej dwukrotnego przeładunku intermodalnej jednostki transportowej (IJT) w punktach styku transportu drogowego i kolejowego. Drugą cechą jest przewóz ładunku w zunifikowanej, standardowej jednostce ładunkowej zwanej intermodalną jednostką ładunkową. W terminalu najczęściej ma miejsce przeładunek pionowy za pomocą suwnicy kontenerowej lub wozu podnośnikowego czołowego charakteryzujący się wysokimi kosztami. Dodatkowe koszty wynikające z podwójnego przeładunku IJT niwelowane są niskimi kosztami przewozu transportem kolejowym. Rysunek 1 przedstawia udział poszczególnych kosztów w całkowitych kosztach przewozów kolejowo –drogowych. Przeładunek w terminalach stanowi około 7% wszystkich kosztów. Sprostanie konkurencji wobec transportu drogowego, (około 50% wszystkich kosztów w transporcie kombinowanym stanowią koszty operatora kolejowego, rys. 1), wymaga zatem obniżenia zarówno kosztów przeładunku IJT jak i kosztów operatora kolejowego przy jednoczesnym znaczącym zwiększeniu prędkości pociągów. Jednocześnie, obserwacje poczynione przez M. Janic wydatnie wskazują na prostą zależność pomiędzy kosztami jednostkowymi przewozu IJT i odległością przewozu (rys. 2) Powyżej 500 km koszty w transporcie kombinowanym wykazują zdecydowany spadek, natomiast przewóz IJT powyżej 900 jest nawet korzystniejszy niż transportem samochodowym. Istniejące technologie przeładunkowe w terminalach intermodalnych oparte w zdecydowanej większości na przeładunku pionowym (kontenery, nadwozia wymienne, naczepy) nie zapewniają dalszego obniżenia kosztów przeładunkowych. Transport kombinowany jednostki ładunkowej na małe i średnie odległości wymaga zatem obniżenia kosztów przeładunku i nowej organizacji przewozów kolejowych.

Organizacja przewozów kolejowo-drogowych oparta jest na kilku schematach, w których ma miejsce co najmniej dwukrotny przeładunek IJT. Na rys. nku 3 przedstawiono schematy rozwiązań organizacji przewozów kombinowanych z różnymi

Struktura kosztów w transporcie kombinowanym



Rys. 1. Struktura kosztów w przewozach kolejowo-drogowych [2]

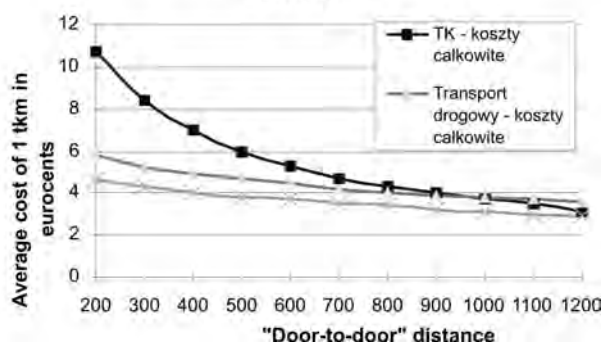
Fig. 1. Rail and road transport cost structure [2]

2. Classic rail and road transport technologies

A characteristic feature of rail and road transport resulting from the essence of combined transport is two transshipments of the intermodal loading unit (ILU) where road and rail transports meet. Another feature is the transport of goods in a standardized loading unit called intermodal loading unit. At the terminal usually vertical transshipment is under way using container overhead crane or front lift truck, which is very expensive. Additional costs resulting from double ILU transshipment are equalized by low costs of rail transport. Fig. 1 shows a share of particular costs in total rail and road transport costs. Transshipment at terminals constitutes around 7% of all costs. To beat the competition of road transport (around 50% of all costs in combined transport are the costs of a rail operator, Fig. 1) both the costs of ILU transshipment and rail operator need to be lowered, together with significant increase of train speed. At the same time observations made by M. Janic point to a simple relation between ILU transport costs and the distance covered (Fig. 2). Combined transport costs over the distance exceeding 500 km are significantly lower, and ILU transport over the distance exceeding 900 km is more cost-effective than car transport. The existing transshipment technologies used at intermodal terminals mostly based on vertical transshipment (containers, exchangeable bodies, semi-trailers) do not guarantee further lowering of transshipment costs. Loading unit combined transport over short and medium distances requires the lowering of transshipment costs and new organization of rail transport.

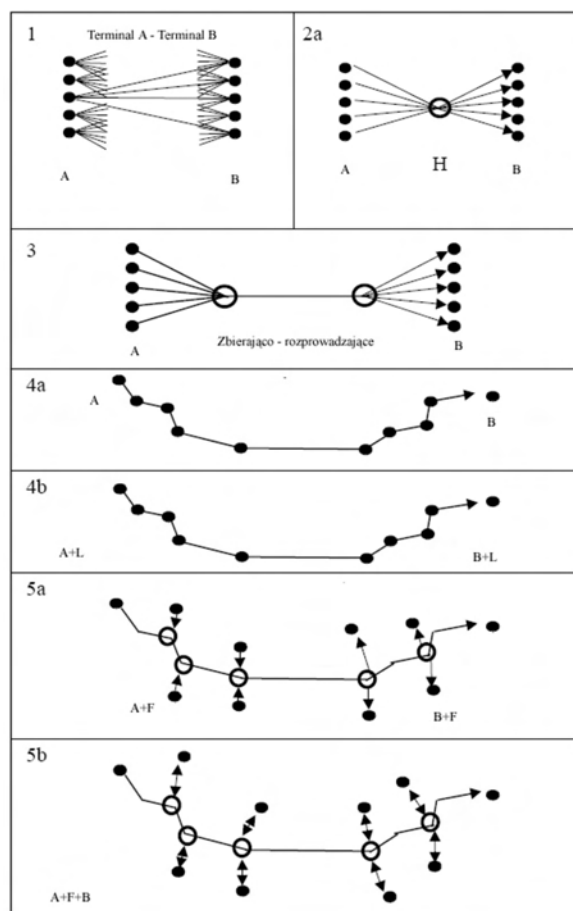
Organization of rail and road transport is based on several patterns which use at least two ILU transshipments. Fig. 3 shows patterns as regards the solutions to organization of combined transport with various functions of transshipment terminals. Pattern 1 – direct connections between initial terminal A and final terminal B. Transport to and from the terminal is done by car. Pattern 2a – all trains going from initial terminal A to final terminal B pass through interchange terminal H, at which the train set is rearranged. Pattern 2b – trains go from terminal A to interchange terminal H and back. At interchange terminal

Combined transport and road transport - relation between transport costs and distance



Rys.2. Porównanie kosztów w transporcie kombinowanym i drogowym w funkcji odległości na jaką przewożona jest jednostka ładunkowa [5]

Fig. 2. Comparison of combined transport and road transport costs with regard to the distance over which a loading unit is transported [5]



Rys.3. Schematy organizacji sieci połączeń transportem kombinowanym i funkcje terminali przeładunkowych [6]

Fig. 3. Patterns of organization of connection network using combined transport and functions of transshipment terminals [6]

funkcjami terminali przeładunkowych. Schemat 1 - bezpośrednie połączenia pomiędzy terminalem początkowym A i terminalem końcowym B. Dowóz i odwóz odbywa się tradycyjnie transportem samochodowym. Schemat 2a - wszystkie pociągi kursujące z terminala początkowego A do terminala końcowego B przejeżdżają przez terminal węzłowy H, w którym ma miejsce przeformowanie składów pociągów. Schemat 2b - pociągi kursują z terminala A do terminala węzłowego H i z powrotem. W terminalu węzłowym H następuje przeładunek jednostki ładunkowej na inny skład. Schemat 3 - z małych terminali jednostki ładunkowe dostarczane są do terminala zbierającego. W terminalu zbierającym grupy wagonów są łączone w skład liniowy, który dociera do terminala rozprowadzającego, w którym następuje rozdzielenie składu na grupy wagonów i dostarczenie ich do terminali końcowych. Czas tracony w terminalach zbierająco-rozprowadzających wynika tylko z czynności związanych z formowaniem i rozformowaniem pociągów.

Schematy 4a i 4b przedstawiają połączenia pociągiem liniowym. W terminalach pośrednich następuje rozładunek lub załadunek jednostek ładunkowych (w najprostszym modelu w terminalach przeładunkowych załadunkowi podlega tylko taka liczba i rodzaj jednostek ładunkowych ile zostało zdjętych z wagonów). Schematy 5a i 5b przedstawiają połączenia pociągiem blokowym stanowiącym trzon połączenia pomiędzy

H a loading unit is transhipped to another train set. Pattern 3 - from small terminals loading units are transported to collection terminal. At the collection terminal groups of carriages are connected to form a line set which goes then to the distribution terminal, at which the train set is divided into groups of carriages, which then go to final terminals. Loss of time at collection and distribution terminals is due to arranging and rearranging train sets.

Patterns 4a and 4b show connections by a linear train. At intermediate terminals loading units are either unloaded or loaded (the simplest way means loading only such quantity and type of loading units at transshipment terminals which has been unloaded from carriages). Patterns 5a and 5b show connections by a block train which is the main connection between initial and final terminals. At intermediate terminals groups of carriages sent from or to small terminals are connected or disconnected.

terminalem początkowym i terminalem końcowym. W terminalach pośrednich następuje dołączenie lub oddzielenie grupy wagonów skierowanych z lub do małych terminali.

### 3. Możliwości przewozów na małe średnie odległości

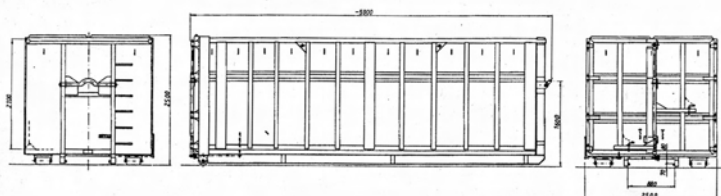
Realizacja przewozów jednostki ładunkowej na dystansie 150 – 500 km wymaga po pierwsze zastosowania przeładunku poziomego, w którym wyeliminować należy urządzenia ładunkowe na rzecz systemów przeładunkowych montowanych na pojazdach samochodowych lub prostych i tanich systemów przeładunku poziomego instalowanych w terminalach, co w konsekwencji umożliwi zbudowanie większej liczby tanich terminali. Zwiększona liczba terminali ułatwia jednocześnie dostęp do infrastruktury kolejowej przewoźnikowi drogowemu. Po drugie organizując połączenia kolejowe na dystansie 150 – 500 km należało by rozpatrzyć taką organizację przewozów, w której nie występują terminale pośrednie jak to ma miejsce w niektórych systemach organizacji przewozów (rys. 3).

Jednym z takich systemów jest system zwany jako ACTS (Abroll Container Transport System) – poziomy przeładunek pojemników wymiennych. Zalety to przede wszystkim: niskie koszty zbudowania i utrzymania terminali przeładunkowych – tor postojowy o odpowiedniej długości (co najmniej 650 m według wymagań AGCT) oraz przylegający do niego plac o szerokości około 10 m, umożliwiający manewrowania pojazdami samochodowymi, pojazdy samochodowe o ładowności co najmniej 16 ton z hakowym systemem zabierakowym, standardowy pojemnik wymienny o konstrukcji dostosowanej do rodzaju przewożonego ładunku (rys. 4), wagon platforma z obrotowymi ramami do przewozu dwóch lub trzech pojemników wymiennych (rys. 5).

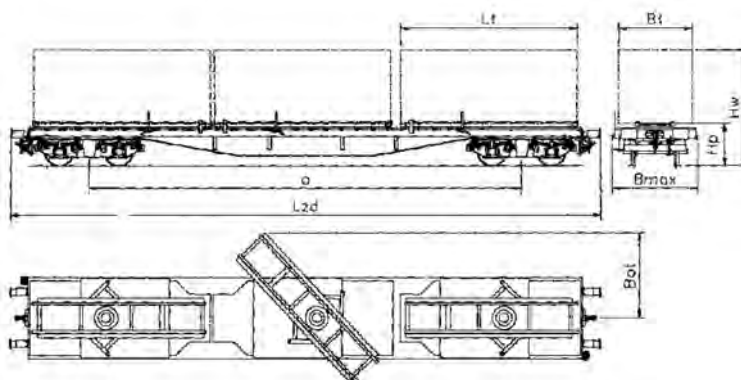
### 3. Transport possibilities over short and medium distances

Firstly, loading unit transport over the distance of 150-500 km requires the use of horizontal transshipment, in which loading equipment should be eliminated to make room for transshipment systems installed in cars or simple and low-cost horizontal transshipment systems installed at terminals, which as a result will make possible the establishment of more low-cost terminals. Larger number of terminals facilitates road carrier's access to rail infrastructure. Secondly, arranging rail connections over the distance of 150-500 km we should take into consideration such transport organization which leaves no room for intermediate terminals, as is the case in some transport systems (Fig. 3).

One of such systems is ACTS (Abroll Container Transport System) – horizontal transshipment of exchangeable containers. The system advantages include low cost of construction and maintenance of transshipment terminals – storage track of sufficient length (at least 650 m long according to AGCT requirements) and adjacent square, 10 m wide, allowing for manoeuvring cars, cars of load capacity of at least 16 tonnes, equipped with a hook driver system, standard exchangeable container of structure matching the type of load transported (Fig. 4), platform carriage with rotating frames for the transport of two or three exchangeable containers (Fig. 5).



Rys.4. Pojemnik wymienny systemu ACTS przeznaczony do przewozu gruzu, odpadów komunalnych, złomu  
Fig. 4. ACTS exchangeable container for the transport of rubble, municipal waste, and scrap



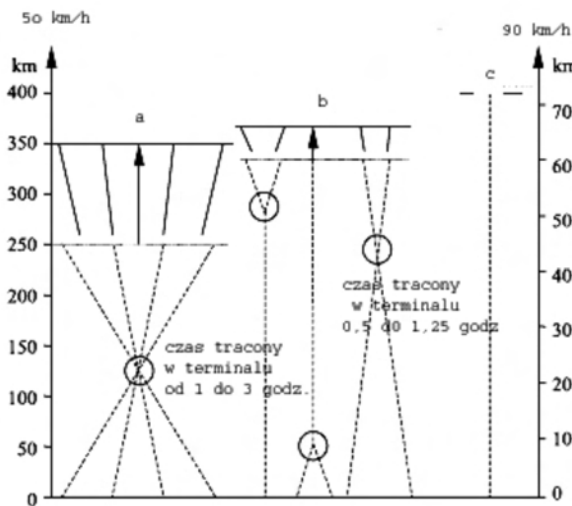
Rys. 5. Wagon platforma do przewozu trzech pojemników wymiennych [7]  
Fig. 5. Platform carriage for the transport of three exchangeable containers [7]

Czynności przeładunkowe w terminalu sprowadzają się ustawienia pojazdu od kątem około 45° do osi wagonu, odblokowaniu i ręcznym obróceniu ramy obrotowej na wagonie, przesunięciu pojemnika z ramy pojazdu na ramę wagonu za pomocą urządzenia hakowego lub łańcuchowego zamontowanego na pojeździe, ponowne przekręcenie ramy już z pojemnikiem do pozycji transportowej, zablokowanie ramy w pozycji transportowej. Rozładunek odbywa się w kolejności odwrotnej. Załadunek i rozładunek może odbywać się z obu stron wagonu, pod siecią trakcyjną. Dzięki temu następuje znaczące skrócenie czasu niezbędnego na przebywanie jednostki ładunkowej w terminalu.

Organizacja połączeń bezpośrednich między terminalem nadania i terminalem odbioru (rys. 6c) przy prędkości pociągów 50 km/h pozwala w tzw. „nocnym skoku” (najczęściej pomiędzy godz. 20:00 i 4:00) pokonać odległość około 350-400 km, a przy dobrym stanie infrastruktury kolejowej i zwiększeniu prędkości pociągów do ok. 90 km/h do 700 km, (rys. 6).

Liczba odprawianych z terminali składów transportu kombinowanego, a tym samym wielkość strumienia ładunków, również ma istotny wpływ na obniżenie kosztów przewozu IJT (rys. 7).

Wraz ze wzrostem liczby odprawianych z terminala pociągów niewątpliwie zwiększa się czas pracy terminala i z jednonozmianowego systemu pracy stopniowo można przejść na system pracy dwuzmianowej i ewentualnie na system pracy całodobowej. Czas aktywnej pracy terminala w ujęciu dobowym lub tygodniowym obniża koszty utrzymania terminala i ostatecznie wpływa na obniżenie kosztów całkowitych transportu kombinowanego.



Rys. 6. Porównanie odległości przewozów transportem kombinowanym przy zastosowaniu różnych systemów organizacji połączeń między terminalami; a – połączenia z terminalem węzłowym typu hub, b – połączenia między terminalami zbierająco-rozprowadzającymi, c – bezpośrednie połączenia między terminalem nadania i terminalem odbioru IJT [8]

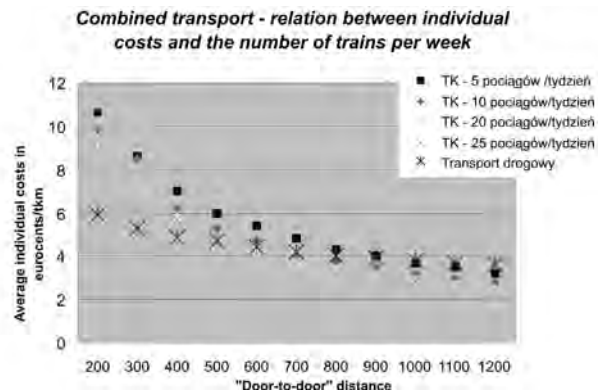
Fig. 6. Comparison of distances in combined transport using different systems of connection organization between terminals: a – connections with hub interchange terminal, b – connections between collection and distribution terminals, c – direct connections between ILU sending terminal and receiving terminal [8]

Transshipment at the terminal consists in positioning a vehicle at an angle of 45° towards carriage axis, unblocking and manually moving the carriage rotating frame, moving the container from the vehicle frame to the carriage frame using a hook or chain installed in the vehicle, moving the frame with the container to the transport position, blocking the frame in transport position. Unloading is done in reverse order. Loading and unloading may be done on both sides of the carriage, under the overhead cables. This makes it possible to save the time needed for the loading unit to stay at the terminal.

Organization of direct connections between the sending terminal and the receiving terminal (Fig. 6c) at the train speed of 50 km/h during a so-called “night leap” (usually between 8:00 p.m. and 4:00 a.m.) allows us to cover the distance of around 350-400 km, and with good rail infrastructure and increase of the train speed to around 90 km/h even up to 700 km (Fig. 6).

The number of combined transport sets sent from terminals, and thus freight flows, also has a significant influence on the lowering of ILU transport costs (Fig. 7).

Together with the increase of the number of trains sent from the terminal, the terminal working time is increased and single-shift system of work could be gradually replaced by a two-shift system, and eventually 24-hour system. Time of terminal active work with regard to a 24-hour day or 7-day week allows for the lowering of terminal maintenance costs and has an influence on the lowering of total combined transport costs.



Rys.7. Porównanie kosztów w transporcie kombinowanym i drogowym w zależności od liczby połączeń kolejowych pomiędzy terminalami [5]

Fig. 7. Comparison of combined transport and road transport costs in relation to the number of rail connections between terminals [5]

### 4. Wnioski

System przewozów kombinowanych określany jako ACTS charakteryzuje się szeregiem zalet i wart jest rozpatrzenia jako sposób przewozu niektórych ładunków transportem kombinowanym na odległość 150 – 500 km w warunkach polskich. Na szczególną, zwłaszcza w aspekcie inwestycji budowlanych takich jak stadiony, zasługuje przewóz materiałów budowlanych w relacjach bocznic kopalni kruszyw – terminal bocznic wytwórni betonu. Zaangażowanie transportu kolejowego w realizacji wspomnianych inwestycji ma jeszcze jedną istotną zaletę. Dostarczenie znaczących ilości materiałów budowlanych transportem kolejowym możliwie najbliżej miejsca ich wykorzystania, w zatoczonych aglomeracjach miejskich, pozwoli na zminimalizowanie użycia ciężkich pojazdów samochodowych stanowiących dodatkową uciążliwość dla ruchu miejskiego i mieszkańców.

### 5. References

- [1] Barthel F., Woxenius J.: *Developing Intermodal Transport For Small Flows Over Short Distances*. Transportation Planning and Technology, October 2004 Vol. 27. No. 5.
- [2] Ballis A., Golias, J.: 2002. *Comparative evaluation of existing and innovative rail–road freight transport terminals*. Transportation Research A 36A, 593–611.
- [3] European Commission (2002) European Union - Energy and Transport in Figures (DG TREN in cooperation with Eurostat. Brussels).
- [4] <http://www.icfonline.com/>
- [5] Janic M.: *Modelling the full cost of an intermodal and Road freight transport network*. Transportation Research Part D 12 (2007).
- [6] Woxenius J.: *Development of small-scale intermodal freight transportation in a systems context*. Report. Chalmers University of Technology, Goteborg 1998.
- [7] Katalog wagonów PKP Cargo SA, Katowice 2001
- [8] Trip J.J.: *Yvonne Bontekoning Integration of small freight flows in the intermodal transport system*, Journal of Transport Geography 10 (2002) 221–229.

### 4. Conclusions

Combined transport system, called ACTS, has several advantages and is worth taking into consideration as a way of transport of some loads using combined transport over the distance of 150-500 km in Poland. Special attention, in particular with regard to construction investments such as stadiums, should be paid to the transport of construction materials from aggregate mine siding to concrete plant siding terminal. The introduction of rail transport in the completion of the above-mentioned investments can offer one more advantage. Delivering significant quantity of construction materials using rail transport as close as possible to the place where they are needed, in crowded urban areas, will allow for the reduction of the use of heavy vehicles, which are an obstacle for city traffic and inhabitants.

---

**Prof. dr hab. inż. Tadeusz CISOWSKI**

**Dr inż. Józef STOKŁOSA**

Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie

ul. Mełgiewska 7/9

e-mail: j.stoklosa@pr.radom.pl

---

# AKTUALNOŚCI PNTTE

## Notki biograficzne członków PNTTE wybranych do Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn przy Polskiej Akademii Nauk



**Prof. dr hab. inż. Andrzej Niewczas** ur. w 1947 roku jest profesorem w zakresie **budowy i eksploatacji maszyn** oraz **transportu samochodowego**, specjalizuje się w tematyce trwałości i niezawodności silników spalinowych oraz stochastycznego modelowania zużycia elementów maszyn.

Jest kierownikiem Katedry Silników Spalinowych i Transportu na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej, pełni obowiązki dziekana Wydziału Transportu i Informatyki w Wyższej Szkole Ekonomii i Innowacji w Lublinie.

Ukończył studia w Politechnice Warszawskiej w 1970 r. W latach 1971-1978 pracował w Fabryce Samochodów „STAR” w Starachowicach, w latach 1978-1992 pracował w Politechnice Radomskiej. W latach 1999-2005 był dziekanem Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. Jest autorem 140 publikacji, 8 książek, 2 patentów. Wypromował 8 doktorów.

Jest prezesem Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego oraz przewodniczącym Komisji Podstaw i Zastosowań Fizyki i Chemii w Technice i Rolnictwie PAN, Oddział w Lublinie. Jest członkiem Amerykańskiego Stowarzyszenia Inżynierów Samochodowych SAE, a także przewodniczącym Rady Programowej kwartalnika „Eksploatacja i Niezawodność” i członkiem Kolegium Wydawniczego czasopisma „Research and Technology” (Łotwa).

Adres e-mail: a.niewczas@pollub.pl



**Prof. dr hab. inż. Marek Wiśniewski** jest profesorem w zakresie **budowy i eksploatacji maszyn** w Instytucie Technologii Eksploatacji – Państwowym Instytucie Badawczym w Radomiu, Zakład Techniki Włókienniczych w Łodzi, oraz na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej, Zakład Eksploatacji Maszyn i Urządzeń; specjalizuje się w badaniach teoretycznych i eksperymentalnych tarcia, zużycia i smarowania i rozwoju tribologicznych urządzeń badawczych i agregatów włókienniczych.

Ukończył studia w Politechnice Łódzkiej w roku 1971, stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1977 w Politechnice Świętokrzyskiej, a stopień doktora habilitowanego w roku 1991 w Politechnice Zittau, RFN. Tytuł profesora otrzymał w roku 2004.

W latach 1971-1976 pracował w Politechnice Łódzkiej, a następnie w Wyższej Szkole Inżynierskiej w Radomiu. W roku 1986 przeszedł do tworzonoego Międzyresortowego Centrum Naukowego Eksploatacji Majątku Trwałego, którego kontynuatorem jest Instytut Technologii Eksploatacji – PIB. Od roku 2004 zatrudniony jest w Politechnice Łódzkiej.

Jest autorem lub współautorem 150 publikacji, w tym 6 pozycji książkowych oraz 15 patentów. Wypromował 2 doktorów. Recenzował prace kwalifikacyjne i dorobek 6 pracowników nauki w kraju i za granicą.

Jest też zastępcą redaktora naczelnego dwumiesięcznika TRIBOLOGIA, członkiem rad programowych wielu konferencji krajowych i zagranicznych. Jest członkiem wielu stowarzyszeń naukowych, w tym Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego (prezes Komisji Regionalnej w Łodzi)

Adres e-mail: marek.wisniewski@itee.radom.pl





**Dr hab. inż. Jan F. Szybka** jest profesorem Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Specjalizuje się w zakresie metod oceny i kształtowania niezawodności złożonych systemów technicznych oraz w problematyce modelowania systemów i procesów eksploatacji.

Jest kierownikiem Zespołu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie.

Studia ukończył w Politechnice Krakowskiej, a doktorat i pracę habilitacyjną bronił na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki w AGH. W latach 1996 – 1998 był prodziekanem tego Wydziału.

Jako autor lub współautor napisał około 100 publikacji, 4 książki. Wypromował 3 doktorów i prawie 100 dyplomantów studiów magisterskich i inżynierskich.

Obecnie jest v-prezesem Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego, członkiem Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn PAN, członkiem Polskiego Towarzystwa Bezpieczeństwa i Niezawodności, sekretarzem naukowym kwartalnika Polskiej Akademii Nauk - Zagadnienia Eksploatacji Maszyn (Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance), członkiem Rady Redakcyjnej kwartalnika Eksploatacja i Niezawodność.

Adres e-mail: [szybja@uci.agh.edu.pl](mailto:szybja@uci.agh.edu.pl)



**Dr hab. inż. Bogdan Antoszewski** ur. w 1951 roku jest profesorem nadzwyczajnym w Politechnice Świętokrzyskiej w zakresie **budowy i eksploatacji maszyn**. Specjalizuje się w tematyce związanej z aspektami tribologicznymi dotyczącymi trwałości i niezawodności przeciwzużyciowych warstw powierzchniowych w węzłach tarcia kształtowanych z wykorzystaniem technologii elektroiskrowych, laserowych i natrys. u cieplnego.

Jest kierownikiem Katedry Inżynierii Eksploatacji na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej.

Ukończył studia w Politechnice Wrocławskiej w 1974 r. W latach 1975 do 1978 pracował w Kieleckiej Fabryce Pomp „Białogon”a w latach 1978 do 1983 w OBR Pomp Przemysłowych w Warszawie O/Kielce. Od 1983 roku pracuje na Politechnice Świętokrzyskiej zajmując kolejno stanowiska specjalisty, kierownika pracowni, adiunkta i profesora 2001. Jest autorem 130 publikacji, 2 opracowań monograficznych, 2 patentów. Wypromował 2 doktorów.

Jest przewodniczącym Świętokrzyskiej Komisji Polskiego Naukowo Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego oraz członkiem Zarządu Krajowego Sekcji Uszczelnień Technicznych SIMP. Jest głównym organizatorem cyklicznej konferencji naukowo –technicznej „Terotechnologia” odbywającej się corocznie w Kielcach. W 2008 roku został powołany do Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn PAN.

Adres e-mail: [ktrba@tu.kielce.pl](mailto:ktrba@tu.kielce.pl)



**Prof. dr hab. inż. Ryszard Michalski** jest kierownikiem **Katedry Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn** na Wydziale Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. W działalności naukowej zajmuje się diagnostyką techniczną, niezawodnością, technologią napraw i analizą systemową eksploatacji pojazdów i maszyn roboczych. Posiada w swoim dorobku naukowym ponad 260 publikacji naukowych i naukowo-technicznych oraz 6 patentów. Jest autorem lub współautorem opracowań zwartych w tym: Pokładowe systemy nadzoru maszyn ze sztuczną inteligencją (1997), Metody oceny stanu technicznego, Wyceny pojazdów i maszyn (1999), Diagnostyka obiektów technicznych (2002), Diagnostyka maszyn roboczych (2004), Utrzymanie pojazdów i maszyn (2007). Jest członkiem Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej, Redaktorem Naczelnym czasopisma „Diagnostyka”, członkiem zarządu Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego, członkiem zespołu środowiskowego Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk, Komitetu Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN Oddział w Lublinie.  
Adres e-mail: [michr@uwm.edu.pl](mailto:michr@uwm.edu.pl)



**Dr hab. inż. Tomasz Nowakowski**, profesor Politechniki Wrocławskiej urodził się w 1953 r. we Wrocławiu. Uzyskał stopnie: mgr inż. w 1976 r., dr inż. w 1980 r., dr hab. inż. w 1999 r. na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn.

Pracuje na Politechnice Wrocławskiej (profesor nadzw. od 2002 r.). Kierownik Zakładu Logistyki i Systemów Transportowych od 2002 r., zastępca dyrektora Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn w latach 1993 – 1999 oraz od 2005, prodziekan Wydziału Mechanicznego w latach 1999 – 2005. Zatrudniony także w Międzynarodowej Wyższej Szkole Logistyki i Transportu we Wrocławiu od 2002 r.

Zakres działalności naukowej obejmuje obszar eksploatacji obiektów technicznych, badania i oceny systemów transportowych, analizy systemów logistycznych. Wypromował 6 dr nauk technicznych. Autor i współautor blisko 200 publikacji i ponad 50 opracowań dla przemysłu, w tym 4 książek, m.in.: „Niezawodność autobusów”, „Miejsce transportu kolejowego w łańcuchach i sieciach logistycznych”, „Uwarunkowania rozwoju systemu transportowego Polski” oraz monografii: „Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych”.

Prowadzi wszystkie formy zajęć dydaktycznych: wykłady, seminaria, projekty, ćwiczenia. Koordynował prace związane z uruchomieniem w 2002 r. na Wydziale Mechanicznym nowego kierunku studiów Transport oraz kieruje komisją programową Rady Wydziału dla tego kierunku. Wypromował kilkudziesięciu inżynierów i magistrów inżynierów na kierunkach kształcenia Mechanika i Budowa Maszyn (specjalność: Konstrukcja i Eksploatacja Maszyn), Zarządzanie i Inżynieria Produkcji (specjalność: Logistyka) oraz Transport (specjalność: Organizacja i projektowanie Systemów Transportowych).

Należy do szeregu towarzystw naukowych, m.in.: Polskiego Towarzystwa Bezpieczeństwa i Niezawodności, Polskiego Towarzystwa Systemowego, Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego (wiceprzewodniczący), Polskiego Towarzystwa Logistycznego (przewodniczący od 2007 r.). Jest członkiem komitetów naukowych 4 krajowych czasopism naukowych, m. in. redaktorem działu Eksploatacja w „Zagadnieniach Eksploatacji Maszyn”.

Adres e-mail: [tomasz.nowakowski@pwr.wroc.pl](mailto:tomasz.nowakowski@pwr.wroc.pl)



**Dr hab. inż. Zdzisław Chlopek**, ur. 1950 r., jest profesorem Politechniki Warszawskiej, dyscyplina naukowa: budowa i eksploatacja maszyn, specjalizuje się w tematyce: dynamiki silników spalinowych, emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych i pojazdów, paliw i napędów alternatywnych oraz ochrony środowiska przed skutkami transportu.

Jest zatrudniony na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych oraz w Instytucie Transportu Samochodowego i w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji.

Ukończył studia na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej w 1974 r. W 1982 r. uzyskał stopień doktora, a w 2000 r. doktora habilitowanego. Od 2002 r. profesor Politechniki Warszawskiej. Jest autorem i współautorem ponad 200 publikacji, w tym 2 monografie oraz rozdziałów do 3 monografii. Wypromował 2 doktorów.

Jest Przewodniczącym Rady Naukowej Przemysłowego Instytutu Motoryzacji, Zastępcą Przewodniczącego Rady Naukowej Instytutu Transportu Samochodowego, członkiem Rady Naukowej Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego. Jest Prezesem Stowarzyszenia „Bioetanol – Ekologia – Transport”, Wiceprezesem Polskiego Towarzystwa Pojazdów Ekologicznych, członkiem Zarządu Polskiego Towarzystwa Naukowego Silników Spalinowych, Przewodniczącym Komisji Motoryzacyjnej Polskiego Naukowo–Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego, członkiem Polskiego Towarzystwa Naukowego Motoryzacji. Jest członkiem Komisji Programowej „Eksploatacji i Niezawodności oraz Rady Programowej „Silników Spalinowych”. Jest członkiem: Zespołu Motoryzacji Sekcji Technicznych Środków Transportu Komitetu Transportu PAN i Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn Polskiej PAN.

Adres koresp.: moriarty@o2.pl

## 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 500 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: d.mazurkiewicz@pollub.pl

## INFORMACJE DLA PRENUMERATORÓW

Opłata za prenumeratę roczną (cztery numery) wynosi 100 złotych i obejmuje również koszty wysyłki. Prenumeratorzy 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**