Nr 1 (49)/2011

ISSN 1507-2711 Cena: 25 z³

EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOŚĆ Maintenance And Reliability



Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne (Warszawa)

POLISH MAINTENANCE SOCIETY (WARSAW)

Scientific Board

Professor Andrzej Niewczas, PhD, DSc (Eng)

Chair of Scientific Board President of the Board of the Polish Maintenance Society

Professor Holm Altenbach, PhD, DSc (Eng) Martin Luther Universität, Halle - Wittenberg, Germany

Senior Brig. Gen. Professor Zoja Bednarek, PhD, DSc (Eng) The Main School of Fire Service, Warsaw

Associate Professor Jan Dąbrowski, PhD, DSc (Eng) Białystok Technical University, Białystok

Professor Slawczo Denczew, PhD, DSc (Eng) *Warsaw University of Technology, School of Technical and Social Sciences in Plock*

Professor Milosz P. Wnuk University of Wisconsin - Milwaukee, USA

Professor Andrzej Kusz, PhD, DSc (Eng) University of Life Sciences in Lublin

Professor Štefan Liščak Żylinska Universita, Żylina, Slovak Republic

Professor Vaclav Legat *Czech University of Agriculture, Prague, Czech Republic*

Professor Jerzy Merkisz, PhD, DSc (Eng) *Poznań University of Technology, Poznań*

Professor Gilbert De Mey University of Ghent, Belgium

Associate Professor Zdzisław Chłopek, PhD, DSc (Eng) Warsaw University of Technology, Warsaw

Dr Ilia Frenkel Shamoon College of Engineering, Beer Sheva, Israel

Associate Professor Tomasz Nowakowski, PhD, DSc (Eng) Wrocław University of Technology, Wrocław **Professor Leonas Povilas Lingaitis** Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania

Professor Stanisław Radkowski, PhD, DSc (Eng) *Warsaw University of Technology, Warsaw*

Professor Marek Orkisz, PhD, DSc (Eng) Rzeszów University of Technology, Rzeszów

Professor Stanislaw Piasecki, PhD, DSc (Eng) Systems Research Institute of the Polish Academy of Sciences, Warsaw

Professor Leszek Piaseczny, PhD, DSc (Eng) *Polish Naval Academy, Gdynia*

Professor Andrzej Seweryn, PhD, DSc (Eng) *Białystok Technical University, Białystok*

Professor Zbigniew Smalko, PhD, DSc (Eng) *Air Force Institute of Technology, Warsaw*

Professor Andrzej Sobiesiak University of Windsor, Canada

Professor Marian Szczerek, PhD, DSc (Eng) *Institute for Sustainable Technologies, Radom*

Professor Katsumi Tanaka *Kyoto University, Kyoto, Japan*

Professor Jan Szybka, PhD, DSc (Eng) *AGH University of Science and Technology, Cracow*

Professor Irina Yatskiv *Riga Transport and Telecommunication Institute, Latvia*

Co-financed by the Minister of Science and Higher Education

The Journal is indexed and abstracted in the Journal Citation Reports (JCR Science Edition), Scopus, Science Citation Index Expanded (SciSearch®) and Index Copernicus International.

The Quarterly appears on the list of journals credited with a high impact factor by the Polish Ministry of Science and Higher Education and is indexed in the Polish Technical Journal Contents database – BAZTECH and the database of the Digital Library Federation.

All the scientific articles have received two positive reviews from independent reviewers.

Editorial staff:	Dariusz Mazurkiewicz, PhD Eng (Editor-in-Chief, Secretary of the Scientific Board) Anna Rudawska, PhD Eng (Editorial secretary) Leszek Semotiuk, PhD Eng (Typesetting and text makeup) Krzysztof Olszewski, PhD Eng (Webmaster)
Publisher:	Polish Maintenance Society, Warsaw
Scientific patronage:	Polish Academy of Sciences Branch in Lublin
Address for correspondence:	"Eksploatacja i Niezawodność" - Editorial Office
	20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, Poland
	e-mail: office@ein.org.pl
	http://www.ein.org.pl
Circulation:	550 copies

Nauka i Technika

Anna RUDAWSKA, Hubert DĘBSKI Ocena wytrzymałości połączeń klejowych blach ze stopu aluminium z wykorzystaniem analizy numerycznej MES Experimental and numerical analysis of adhesiyely bonded aluminium allow sheets joints	1
Wang QINGJUN, Hanxin CHEN, Xubing CHEN, Hong YANG, Gaoping WANG Wczesne wykrywanie uszkodzeń przekładni zębatej z wykorzystaniem słabych sygnałów drgań Early fault detection of gearbox using weak vibration signals	
Krzysztof BIEŃCZAK Zapwenienie bezpieczeństwa konsumentowi żywności w ogniwie transportowym łańcucha chłodniczego Providing security for food consumer in transport link of refrigeration chain	16
Zhong HAN, Jianmin GAO Optymalna alokacja zapewniająca bezpieczeństwo w układach procesowych oparta na przepływach sieciowych Network flow-based optimal allocation for safety in process systems	27
Norbert LESZCZYŃSKI Wpływ parametrów użytkowych kombajnu na uszkodzenia obrabianego materiału (uszkodzenia marchwi) The influence of working parameters of a carrot harvester on carrot root damage	
Yongsheng BAI, Xisheng JIA, Zhonghua CHENG Modele optymalizacji grupowej dla złożonych zadań obsługowych dotyczących systemów wieloskładnikowych Group optimization models for multi-component system compound maintenance tasks	
Marcin KOWALSKI, Jan MAGOTT, Tomasz NOWAKOWSKI, Sylwia WERBIŃSKA-WOJCIECHOWSKA Analiza systemu transportowego z wykorzystaniem sieci Petriego Analysis of transportation system with the use of Petri nets	
Dan LING, Wei SONG, Rui SUN Metoda przewidywania niezawodności elementów składowych silnika diesla oparta na analizie przyczyn i skutków uszkodzenia FMEA A reliability prediction method for diesel engine components based on FMEA	63
Bogusław ŁAZARZ, Grzegorz WOJNAR, Piotr CZECH Wykrywanie wczesnych faz uszkodzeń kół zębatych w warunkach eksploatacyjnych Early fault detection of toothed gear in exploitation conditions	
Jerzy DETYNA Analiza stanów nierównowagowych w procesie separacji sitowej Analysis of nonequilibrium states in the sieve separation process	

_

RUDAWSKAA., DĘBSKI H.: Ocena wytrzymałości połączeń klejowych blach ze stopu aluminium z wykorzystaniem analizy numerycznej MES; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 4-10.

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z wytrzymałością połączeń klejowych blach ze stopów aluminium. Celem pracy było określenie wytrzymałości analizowanych połączeń zarówno na podstawie badań eksperymentalnych, jak i z wykorzystaniem analizy numerycznej MES, która jest istotna ze względów eksploatacyjnych konstrukcji. Przedmiotem badań były jednozakładkowe połączenia klejowe blach ze stopu aluminium 2024PLT3 oraz 7075PLT0, obciążone na ścinanie. Analizę numeryczną przeprowadzono w oparciu o przestrzenne modele połączeń klejowych, wykorzystując do zamodelowania spoiny klejowej elementy typu cohesive. Zastosowanym w analizie numerycznej narzędziem był program ABAQUS/standard. Przeprowadzone badania umożliwiły symulację procesu zniszczenia połączenia klejowego oraz określenie momentu inicjacji zniszczenia spoiny klejowej.

QINGJUN W., CHEN X., CHEN X., YANG H., WANG G.: Wczesne wykrywanie uszkodzeń przekładni zębatej z wykorzystaniem słabych sygnałów drgań; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 11-15.

Zaproponowano nową metodę wczesnego wykrywania pęknięć zębów przekładni zębatej polegającą na analizie słabego sygnału drganiowego zmodułowanego niskimi częstotliwościami. Uzyskaną obwiednię zmodułowanego sygnału drgań wykorzystano do wyznaczenia częstotliwości modulujących. Zdemodułowane częstotliwości charakterystyczne otrzymano za pomocą adaptacyjnej, czasowo-częstotliwościowej reprezentacji sygnału z obwiedni sygnału drganiowego wyznaczonej z wykorzystaniem transformaty Hilberta. Spektrogram adaptacyjny odzwierciedla częstotliwość zazębienia i jej harmoniczne, częstotliwość sprzęgla, częstotliwość nośną oraz wstęgi boczne w sygnale drganiowym poddanym analizie z użyciem zoptymalizowanego przekształcenia fałkowego. Proponowaną metodę weryfikowano przy użyciu sygnału symulowanego i rzeczywistego. Wyniki wskazują na możliwość efektywnego zastosowania proponowanej metody do detekcji pęknięć zębów przekładni zębatej.

BIEŃCZAK K.: Zapwenienie bezpieczeństwa konsumentowi żywności w ogniwie transportowym lańcucha chlodniczego; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 16-26.

W Zakładzie Maszyn Spożywczych i Transportu Żywności Politechniki Poznańskiej od kilku lat prowadzone są prace mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa konsumentowi żywności w ogniwie transportowym łańcucha chłodniczego. W artykule tym przedstawiono program obliczeniowy umożliwiający wyznaczenie temperatury transportowanej żywności w zależności od stanu nadwozia, temperatury otoczenia, wydajności agregatu chłodniczego i właściwości ładunku. Wskazano na potrzebę opracowania procedur pozwalających diagnozować stan nadwozi przeznaczonych do przewozu żywności łatwo psującej się. Scharakteryzowano wybraną procedurę diagnostyczną. Omówiono narzędzia wspomagające diagnozowanie.

HAN Z., GAO J.: **Optymalna alokacja zapewniająca bezpieczeństwo w ukladach procesowych oparta na przepływach sieciowych;** Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 27-34.

Bezpieczeństwo stanowi w inżynierii procesowej czynnik krytyczny, o którym należy pamiętać podczas całego czasu eksploatacji układów procesowych. W niniejszym artykule przedstawiono nową metodę optymalnej alokacji zasobów, portą na przepływach w sieci, mającą zapewnić bezpieczeństwo układów procesowych. Istniejące optymalne alokacje zasobów wspierające bezpieczeństwo opierają się na rozwiązaniach fizycznych (np. unowocześnianiu podstawowych elementów wyposażenia i wbudowywaniu nadmiarowości) nieodpowiednich dla układów procesowych, które ulegają częstym awariom. Takie rozwiązania pociągają za sobą konieczność częstych alokacji fizycznych, które poważnie zakłócają normalne działanie całego układu. Dodatkowo, metody fizyczne stosuje się tylko wtedy, kiedy uszkodzenia układu nawarstwią sie do pewnego stopnia. Stan układu procesowego w inżynierii chemicznej częstyc ulega wahaniom z powodu wielu czynników, takich jak niekontrolowane uwolnienie energii czy użycie niejednolitych materiałów produkcyjnych. Częste wahania mogą prowadzić do awarii układu. Konieczna jest zatem umiejętność unikania akumulacji błędów poprzez kontrolę wahań i stabilizację stanu układu, co prowadzi do zapewnienia bezpieczeństwa układu procesowego. W niniejszej pracy przedstawiamy metodę optymalnej alokacji, opartą na przepływało w sieci, która umożliwia osiągnięcie powyższego celu. Wedle nowej metody, przepływy osiągalne konstruuje się na podstawie przepływów w sieci układu, stanu wyposażenia układu oraz wymagań procesu. Wzory rozwiązań dla zmiennych stanu konstruowanych przepływów osiągalnych dają wartości korygujące, które używane są do kontrolowania wahań systemu i stabilizacji jego stanu. Prezentowane studium przypadku demonstruje możliwe zastosowania i efektywność proponowanej metody.

LESZCZYŃSKIN.: Wpływ parametrów użytkowych kombajnu na uszkodzenia obrabianego materiału (uszkodzenia marchwi); Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 35-41.

Celem pracy było określenie jakości pracy jednorzędowego kombajnu Dewulf P3K zaopatrzonego w przenośnik załadowczy do skrzyniopalet, przy zbiorze marchwi odmiany Nerac. Badania kombajnu przeprowadzono w warunkach polowych na glebie bielicowej. Zdefiniowano typy uszkodzeń korzeni marchwi oraz ich procentowe udziały w zbieranej masie jak również określono straty korzeni. Zaproponowano również rozwiązanie pozwalające na zmniejszenie strat korzeni powstających podczas zbioru. W pracy zamieszczono wynik testu dotyczący niedokładności obcinania naci przez zespół obcinający kombajnu, a także określono wielkość zanieczyszczeń w zbieranym materiale.

RUDAWSKA A., DĘBSKI H.: Experimental and numerical analysis of adhesively bonded aluminium alloy sheets joints; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 4-10.

The paper presents issues concerning aluminium sheets adhesive joints strength. The aim of the work was to determine the strength of analysed joints basing on experimental tests, as well as on finite elements numerical analysis (FEA), of high importance to operating properties of the construction. The type of adhesive joint tested was a single-lap joint, adhereneds were 2024PLT3 and 7075PLT0 aluminium alloy sheets, tested in loading which creates shear across the bondline. The numerical analysis was based on spatial adhesive joints models created with cohesive elements. The programme used in the analysis was ABAQUS/Standard. The conducted research simulated adhesive failure and adhesive failure initiation point

QINGJUN W., CHEN X., CHEN X., YANG H., WANG G.: Early fault detection of gearbox using weak vibration signals; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 11-15.

A new method for the early detection of the gear crack was proposed by the analysis of the weak low-frequency modulated vibration signal. The envelope of the modulated vibration signal was extracted and used to demonstrate the modulating frequencies. The demodulated characteristic frequencies were obtained with the adaptive joint time-frequency signal representation from the Hilbert transform envelope of the vibration signal. The adaptive spectrogram matches the meshing frequency and its harmonics, the coupling frequency, the carrier frequency and the sidebands in the vibration signal by the optimized wavelet. Simulated and experimental vibration signals are used to test the proposed method. The results show the applicability and effectiveness of the proposed method for gear crack detection.

BIEŃCZAK K.: Providing security for food consumer in transport link of refrigeration chain; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 16-26.

For some years, Division of Food Machines and Transport of Poznań University of Technology carries out works aiming at providing security for food consumer in transport link of refrigeration chain. This paper presents a computer programme enabling to determine the food transport temperature depending on the body condition, ambient temperature, capacity of the refrigerated unit and load property. There is pointed out the necessity to elaborate procedures allowing to diagnose the condition of the bodies designed for perishable food transport. The chosen diagnostic procedure has been characterised. The tools aiding diagnosis have been discussed.

HAN Z., GAO J.: Network flow-based optimal allocation for safety in process systems; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 27-34.

Safety is a critical factor to be considered throughout the entire lifetime of process systems in process engineering. This paper presents a novel optimal resource allocation method based on network flows for assuring the safety of process systems. Existing optimal resource allocations for safety mainly depend on physical ways (for example, updating core equipments, and incorporating redundancies), which are not suitable for process systems experiencing frequent malfunctions. As a result, frequent physical allocations are needed, which severely interrupt the normal operation of the entire system. In addition, the physical methods are applied only when system failts accumulate to some extent. The state of a process system in chemical engineering often dithers due to many factors such as uncontrollable energy release and inconsistent production of materials. The frequent dithering can lead to the system failure. It is necessary to be able to avoid the accumulation of the process system. In this paper, we propose a network flow-based optimal allocation method to achieve the above goal. Feasible flows give the adjustment values, which are used to control the dithering of the system, flaus stabilize the system state. A case study is given to show the application and effectiveness of the process differed so the system state. A case study is given to show the application and effectiveness of the process of the process differed so the system state.

LESZCZYŃSKI N.: The influence of working parameters of a carrot harvester on carrot root damage; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 35-41.

The objective of the research was to evaluate the performance of a one-row, tractor mounted Dewulf combine harvester with a P3K elevator in terms of the harvest quality of carrot roots of the Nerac variety. The field research of the combine harvester was conducted on podsolic soils. The types of root damages were defined, and their percentage share in the harvested material as well as the share of root losses were established. Moreover, a solution was suggested for reducing root losses during harvesting. The article presents the results of tests concerning the share of incompletely topped roots as well as the content of organic and inorganic impurities in the gathered material. BAI Y., JIA X., CHENG Z: Modele optymalizacji grupowej dla złożonych zadań obsługowych dotyczących systemów wieloskładnikowych; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 42-47.

W ostatnich latach prowadzi się coraz więcej badań w zakresie optymalizacji eksploatacji systemów wieloskładnikowych, czego wynikiem są licznie proponowane metody optymalizacji oraz modele matematyczne. Jednakże najczęściej bada się proste zadania obsługowe, a rzakło występujące w praktyce zadania złożone, wymagające kilku rodzajów obsługi. W artykule przedstawiono strategię obsługi grupowej służącą optymalizacji przerw na złożone czynności obsługowe w systemach wieloskładnikowych oraz zaproponowano etapy i metody optymalizacji. Przeprowadzono analizę struktury kosztów utrzymania systemu oraz wyznaczono modele kosztów w celu optymalizacji przerw na złożone czynności obsługowe. Wydajność proponowanych modeli zilustrowano przykładem numerycznym.

KOWALSKI M., MAGOTT J., NOWAKOWSKI T., WERBIŃSKA-WOJCIE-CHOWSKA S.: Analiza systemu transportowego z wykorzystaniem sieci Petriego; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 48-62.

W pracy poruszono problem analizy funkcjonowania systemu transportu miejskiego. Badanie niezawodności tego typu złożonych systemów powinno dodatkowo uwzględnić szereg zagadnień. Jednym z nich jest zawodność elementów wsparcia logistycznego, zdefiniowana jako możliwość pojawienia się braku elementów wymiennych w zapasie, w chwili i miejscu gdy wystąpi na nie zapotrzebowanie. Taka sytuacja może doprowadzić do pogorszenia się charakterystyk eksploatacyjnych systemu wspieranego. Dlatego też oba systemy, wspierany i wspierający, powinny być wspólnie modelowane. Jednakże, uwzględnienie wszystkich parametrów strukturalnych systemów (np. rezerwowanie, zdolność operacyjna systemu obsługi) oraz zmiennych losowych (np. poziom zapasów części wymiennych, parametry polityki obsługiwania, rezerwa czasowa) w jednym modelu jest zadaniem trudnym z matematycznego punktu widzenia. Dlatego też, w artykule przedstawiono porównanie wyników teoretycznych oraz uzyskanych z procesu funkcjonowania rzeczywistego systemu komunikacji miejskiej.

LING D., SONG W., SUN R.: Metoda przewidywania niezawodności elementów składowych silnika diesła oparta na analizie przyczyn i skutków uszkodzenia FMEA; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 63-68.

Przewidywanie niezawodności polega na ocenie niezawodności urządzeń lub wyrobów z użyciem modeli i danych matematycznych przed wejściem tych pierwszych do produkcji lub ich modyfikacją, zanim dostępne są dane empiryczne. Jest to ważna część działań mających na celu poprawę niezawodności, jakie prowadzi się podczas całego czasu eksploatacji danego systemu. Artykuł koncentruje się na zagadnieniu przewidywania niezawodności elementów składowych silnika Diesła. Dla skrócenia czasu gromadzenia potrzebnych informacji oraz poprawy skuteczności predykcji zaproponowano metodę zintegrowaną z analizą przyczyn i skutków uszkodzenia (FMEA). Metoda stanowi modyfikację metody podobieństwa konstrukcyjnego (design similarity), w której niezawodność nowego elementu składowego oblicza się porównując występowanie przyczyn jego uszkodzeń w nowej konstrukcji z ich występowaniem w podobnym, już istniejącym elemencie składowym. Proponowaną metodę omówiono na przykładzie predykcji niezawodności uszczelki głowicy cylindra silnika o zapłonie samoczynnym.

ŁAZARZ B., WOJNAR G., CZECH P.: Wykrywanie wczesnych faz uszkodzeń kól zębatych w warunkach eksploatacyjnych; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 68-77.

Przekładnie zębate są powszechnie wykorzystywane w układach napędowych maszyn i urządzeń. W trakcie ich eksploatacji bardzo istotne jest odpowiednio wczesne pozyskanie informacji o postępujących procegałądów oraz napraw, zwiększając w ten sposób niezawodność wszystkich elementów hracucha kinematycznego. Z tego powodu w artykule zawarto wyniki prac zespołu w zakresie diagnostyki wibroakustycznej uszkodzeń elementów przegłądów oraz napraw, zwiększając w ten sposób niezawodność wszystkich elementów przegłąd badań symulacyjnych i doświadczalnych, których celem było opracowanie metod pozwalających na wczesną identyfikację uszkodzeń zębów w postaci pittingu powierzchni roboczych, wykruszenia wierzcholka, pęknięcia u podstawy zęba oraz częściowego wyłamania zęba. Dokonano oceny efektywności wybranych metod przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w procesie wykrywania uszkodzeń hożyskowania przekładni pracujących w różnych warutakach. Wstępnie przetworzone sygnały drganiowe analizowane w dziedzinie czasu i częstotliwości stanowiły podstawę do opracowania miar diagnostycznych wrażliwych na wczesne stadia uszkodzeń. Miary otrzymane w wyniku symulacji oraz badań doświadczalnych wykorzystano do budowy zestawu wzorców kłasyfikatora neuronowego diagnozującego rodzaj i stopień uszkodzenia kół przekładni z będem walidacji poniżej 5%. Uzyskana zgodność jakościowa i ilościowa wyniki powanego modelu dynamicznego przekładni w układzie napędowym, umoźliwia pozyskanie wiarygodnych relacji diagnostycznych.

DETYNA J.: Analiza stanów nierównowagowych w procesie separacji sitowej; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 78-85.

Process separacji sitowej można potraktówać jako pewnego rodzaju doświadczenie losowe, w którym to czy cząstka (o wielkości mniejszej od wielkości separacyjnej sita) w danym miejscu na sicie przejdzie przez jego szczelinę określamy za pomocą prawdopodobieństwa. Inaczej można powiedzieć, że podczas klasycznej separacji sitowej istnieją obszary na sicie, dla których prawdopodobieństwo separacji jest większe, no i obszary z mniejszą miarą prawdopodobieństwa. Jeśli założymy, że proces separacji przebiega stabilnie w aspekcie czynników zewnętrznych, to można powiedzieć, że wartości wspomnianych prawdopodobieństw w danych obszarach nie ulegają zasadniczym zmianom. Niewielkie odchylenia od wartości średnich nazywamy fluktuacjami i są one zjawiskiem zupełnie normalnym. Jednakże, jeśli warunki zewnętrzne (np. zmiana składu granulometrycznego nadawy, zmiana kąta nachylenia powierzchni sita itp.) ulegną zmianie, to zmienić się powinna również konfiguracja opisanych wyżej prawdopodobieństw.

BAI Y., JIA X., CHENG Z: Group optimization models for multi-component system compound maintenance tasks; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 42-47.

More and more researches have been made on maintenance optimization of multi-component system in recent years, and a lot of optimization methods and mathematical models have been proposed. However, the maintenance tasks in present researches are mostly simplex, while the compound maintenance tasks integrating several kinds of maintenance types that exist in practice are seldom studied. To optimize the compound maintenance intervals of multi-component system, the group maintenance strategy is introduced in this paper, and the optimization steps and methods are proposed. The maintenance cost structure and composition are analyzed from system point of view, and the cost models to optimize the compound maintenance intervals are established. Finally, a numerical example is presented to illustrate the efficiency of the proposed models.

KOWALSKI M., MAGOTT J., NOWAKOWSKI T., WERBIŃSKA-WOJCIE-CHOWSKA S.: Analysis of transportation system with the use of Petri nets; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 48-62.

The paper considers problem of city transportation system performance. Reliability analysis of such a complex system is complicated by several factors. One of them is the possibility of logistic support elements unreliability defined as unavailability of spare elements when desired, what in result may lead to decrease of performance of the system being supported. Thus, both systems must be considered in a single model. However, the simultaneous setting of all structural parameters (e.g. redundancy, repair shop capacity) and control variables (e.g. spare part inventory levels, maintenance policy parameters, time resource) is mathematically a hard problem. This paper investigates Petri net model of the system with the use of Monte Carlo simulation as a solution technique. Comparison of the simulation results with characteristics of real-life system is given.

LING D., SONG W., SUN R.: A reliability prediction method for diesel engine components based on FMEA; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 63-68.

Reliability prediction involves reliability estimation of equipment or products prior to their production or modification by applying mathematical models and data before empirical data are available. It is an important part of reliability improvement work in the whole lifetime of a system. This paper focuses on the reliability prediction of diesel engine components. To reduce the time of gathering useful information and to improve prediction efficiency, a method integrated with design failure mode and effects analysis (FMEA) is proposed. The method is a modification of design similarity method in which the reliability of a new component is calculated by comparing its failure modes occurrence in the new design with the one of a similar existing component. An example about reliability prediction of a cylinder head gasket in a diesel engine is used to illustrate the proposed method.

ŁAZARZ B., WOJNAR G., CZECH P.: Early fault detection of toothed gear in exploitation conditions; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 68-77.

Toothed gears are commonly used in various power transmission systems. Collecting information about degradation processes early enough is crucial during their exploitation. It enables suitable planning of required inspections and repairs, improving the reliability of all kinetic chain elements. The article includes results of the team's research work on vibroacoustic diagnostic of gearbox components' faults. A review of simulation and experimental researches that aimed at elaboration of methods which would enable early identification of teeth faults in the form of working surface pitting, spalling of tooth crest, crack at the tooth bottom as well as partial breaking of a tooth, is presented. Assessment of selected methods of processing the vibroacoustic signals during the detection of gear faults has been carried out while faults occur in gear bearings working under various conditions. The initially processed vibration signals analyzed within time and frequency domains constituted a basis for preparation of detection measures that were sensitive to early stages of damage. The measures obtained as a result of simulation and experimental tests were used to construct a set of neuron classifier models to diagnose the type and degree of toothed wheels faults with a validation error below 5%. The achieved qualitative and quantitative conformity of simulation and experimental research results has shown that application of an expanded and identified dynamic model of the gear in a power transmission system enables the acquisition of reliable diagnostic relations.

DETYNA J.: Analysis of nonequilibrium states in the sieve separation process; Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011; 1: 78-85.

Insploated a FireZawounose - Mannenance and Renability 2011, 1. 7653. The process of sieve separation might be treated as some kind of random experience, in which the fact that a particle (of a size smaller than the sieve separation size) will pass through its slot in a given place, is to be determined by probability. It could be alternatively said that during classic sieve separation, there are areas at the sieve for which the probability of separation is higher and, in consequence, areas with the lower probability measure. If we assume that the separation process runs stable in regard of the external conditions, then we could say that values of the mentioned probabilities in given areas are not varying significantly. Relatively small deviations from average values are called fluctuations, and are considered to be perfectly normal. However, when the external conditions (e.g. a change in the granulometric composition of a mechanically fed material, a change in the sieve inclination, etc.) are changing, then the configuration of the above mentioned probabilities should also change.

NAUKA I TECHNIKA

Anna RUDAWSKA Hubert DĘBSKI

OCENA WYTRZYMAŁOŚCI POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLACH ZE STOPU ALUMINIUM Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY NUMERYCZNEJ MES

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF ADHESIVELY BONDED ALUMINIUM ALLOY SHEETS JOINTS

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z wytrzymałością połączeń klejowych blach ze stopów aluminium. Celem pracy było określenie wytrzymałości analizowanych połączeń zarówno na podstawie badań eksperymentalnych, jak i z wykorzystaniem analizy numerycznej MES, która jest istotna ze względów eksploatacyjnych konstrukcji. Przedmiotem badań były jednozakładkowe połączenia klejowe blach ze stopu aluminium 2024PLT3 oraz 7075PLT0, obciążone na ścinanie. Analizę numeryczną przeprowadzono w oparciu o przestrzenne modele połączeń klejowych, wykorzystując do zamodelowania spoiny klejowej elementy typu cohesive. Zastosowanym w analizie numerycznej narzędziem był program ABAQUS/Standard. Przeprowadzone badania umożliwiły symulację procesu zniszczenia połączenia klejowego oraz określenie momentu inicjacji zniszczenia spoiny klejowej.

Słowa kluczowe: wytrzymałość połączeń klejowych, blachy ze stopu aluminium, metoda elementów skończonych (MES).

The paper presents issues concerning aluminium sheets adhesive joints strength. The aim of the work was to determine the strength of analysed joints basing on experimental tests, as well as on finite elements numerical analysis (FEA), of high importance to operating properties of the construction. The type of adhesive joint tested was a single-lap joint, adhereneds were 2024PLT3 and 7075PLT0 aluminium alloy sheets, tested in loading which creates shear across the bondline. The numerical analysis was based on spatial adhesive joints models created with cohesive elements. The programme used in the analysis was ABAQUS/Standard. The conducted research simulated adhesive failure and adhesive failure initiation point.

Keywords: adhesive joints strength, aluminium alloy sheets, finite element analysis (FEA).

1. Wprowadzenie

Wytrzymałość w znaczeniu ogólnym oznacza odporność na niszczace działanie czynników mechanicznych, których przykład moga stanowić różnego rodzaju obciążenia. W odniesieniu do połączeń klejowych, najczęściej uwzględnia się wytrzymałość statyczna. Związane jest to z faktem, iż jednym z podstawowych warunków, jakie powinno spełnić połączenie klejowe, jest osiągnięcie założonej wytrzymałości statycznej [5, 6, 9, 11, 15]. Podczas eksploatacji połączeń klejowych jest to niezwykle istotna informacja, pozwalająca m.in. na określenie wartości oraz rodzajów obciążeń, przy których połączenie może być eksploatowane. Znajomość wytrzymałości połączeń klejowych oraz zagadnień z nią związanych pozwala m.in. na dobór właściwych parametrów projektowanego połączenia oraz określenie warunków eksploatacyjnych (np. obciążeń), w których połączenie będzie wykazywało odpowiednie właściwości. Niezwykle istotna staje się zatem możliwość wyznaczenia kry-

1. Introduction

Strength in general stands for resistance to destructive effect of mechanical factors, such as various loads. In case of adhesive bonds this is static strength which is the most frequently taken into account. It is mainly due to the fact that achieving definited static strength is one of the key conditions for the adhesive bond to meet [5, 6, 9, 11, 15]. This is a highly important indicator determining values and types of loads which may be applied to the bond in operation. The knowledge of adhesive bonds strength problems allows the engineer to design the bond appropriately and determine operating conditions, such as loads, in which the joint will retain required properties. Therefore, determining failure load, when joint fails, appears to be of utmost importance. Consequently, the knowledge of adhesive bonds strength plays a leading role in the process of their designing and operation.

Due to the fact that shear loaded joints are able to handle the biggest loads [11], they are the most recognised adhesive joints.

tycznej wartości obciążenia, przy której następuje zniszczenie połączenia (utrata właściwości wytrzymałościowych połączenia). W związku z tym znajomość wytrzymałości połączeń klejowych ogrywa kluczową rolę podczas ich projektowania i eksploatacji.

W przypadku analizowanych połączeń najczęściej rozpatruje się połączenia klejowe obciążone na ścinanie, ponieważ ten rodzaj połączeń może przenosić największe obciążenia [11]. Z tego względu podczas projektowania i eksploatacji połączeń klejowych dąży się do zapewnienia dominacji w połączeniach obciążenia ścinającego.

Stosowane w analizie wytrzymałości połączeń klejowych obliczeniowe metody analityczne są wykorzystywane do połączeń podobnie ukształtowanych i obciążonych w sposób określony w normach [3, 5, 11]. Oprócz tego metody dotyczące określania naprężeń w spoinach połączeń są obarczone pewnymi błędami, wynikającymi z przyjmowanych założeń upraszczających [4, 5, 9-11]. Umożliwia to prowadzenie obliczeń wytrzymałościowych dla wybranych typów połączeń, które są najbliższe modelom przyjmowanym przy formułowaniu zależności analitycznych [3, 11, 13].

Współczesnym narzędziem obliczeniowym stanowiącym uzupełnienie i rozszerzenie możliwości analizy stanu wytężenia połączeń klejowych jest metoda elementów skończonych (MES) [7-10, 14, 16, 17, 18]. Obliczenia numeryczne z wykorzystaniem MES umożliwiają określenie najkorzystniejszych parametrów połączenia [9, 10, 12], zapewniających wymaganą wytrzymałość już na etapie projektowania połączenia klejowego.

Celem prowadzonych badań była analiza rozkładów naprężenia w jednozakładkowych połączeniach klejowych blach ze stopów aluminium z wykorzystaniem metody elementów skończonych [16, 19], stosując jako narzędzie numeryczne program ABAQUS/Standard [1, 2] Obliczenia numeryczne prowadzono z uwzględnieniem mechanizmu zniszczenia spoiny klejowej [2, 14, 16], weryfikując otrzymane wyniki z rezultatami badań eksperymentalnych. Określono wartość obciążenia inicjującego proces zniszczenia spoiny, jak również wartość obciążenia krytycznego, przy której nastąpiło całkowite zniszczenie połączenia. Wykonane obliczenia numeryczne stanowiły zagadnienie geometrycznie i fizycznie nieliniowe, wpływające na dokładność uzyskiwanych wyników. Wykonana analiza dostarcza wielu cennych informacji, mogących mieć istotne znaczenie przy projektowaniu połączeń klejowych.

2. Badania eksperymentalne

Przedmiot badań stanowiły jednozakładkowe połączenia klejowe blach ze stopu aluminium 2024PLT3 oraz 7075PLT0. Wymiary geometryczne połączenia wynosiły: długość łączonego elementu *l*=100 mm, szerokość: *b* = 20 mm, grubość warstwy kleju: $g_k = 0,1$ mm (rys. 1). Badania prowadzono dla różnych grubości blach oraz zależnych od nich długości zakładek połączeń klejowych. Wykorzystano klej epoksydowy dwuskładnikowy Loctite 3430, utwardzany w temperaturze otoczenia 20 ±2°C w czasie 48 godzin. Jako sposób przygotowania powierzchni zastosowano odtłuszczanie środkiem odtłuszczającym Loctite 7063.

W badaniach wykorzystano następujące rodzaje jednozakładkowego połączenia klejowego, zamieszczone w tabeli 1.

Przeprowadzone badania wytrzymałościowe miały na celu wyznaczenie wartości krytycznej obciążenia, przy której nastą-

That is why, in designing and application this type is predominantly taken into consideration.

The analytic methods of adhesively bonded joints analysis are applied in case of similarly shaped and loaded bonds, with accordance to norms [3, 5, 11]. Additionally, stress determining methods are burdened with error as a result of simplifying assumptions made [4, 5, 9-11]. This allows to carry out strength analysis for selected joint types, which are closest to the model assumed while formulating analytical dependencies [3, 11, 13].

Finite element analysis (FEA) is a modern analytical tool, which expands the possibilities of examining adhesive joints effort [7-10, 14, 16, 17, 18]. FEA numerical computations enable to determine the best bonding parameters [9, 10, 12], assuring desired strength in the initial stages of designing the adhesive bond.

The aim of conducted research was to analyse stress distribution in aluminium alloy single-lap bonded joints, applying finite element method [16, 19] and the numerical tool being ABAQUS/Standard programme [1, 2]. The numerical analysis included adhesive joint failure mechanism [2, 14, 16]; the results were then verified with the results of experimental tests. Both adhesive failure initiation load and critical load were determined. The numerical computation was a geometrically and physically non-linear problem, having an impact on the accuracy of the results. This analysis provides plenty information which may prove invaluable in designing bonded joints.

2. Experimental tests

The type of adhesive joint tested was a single-lap bonded of joint, adhereneds were 2024PLT3 and 7075PLT0 aluminium alloys. The geometrical dimensions of the joint were as follows: length of the adhered element -l = 100 mm, width -b = 20 mm, adhesive layer thickness $-g_k = 0.1$ mm (fig. 1). The tests were conducted for alloys of various thicknesses and accordingly thick adhesive joints. The adhesive used was the two-component epoxy Loctite 3430, setting in $20 \pm 2^{\circ}$ C for 48 hours. The surface treatment method applied was degreasing with Loctite 7063.

The following types of single-lap bonded joint presented in table 1 were used in the tests.

The tests aimed at determining critical load value, causing adhesive joint failure. Determined load values provided the



Rys. 1. Schemat połączenia klejowego jednozakładkowego Fig. 1. Single-lap bonded joint geometry

Tab. 1. Rodzaje badanych połączeń klejowych Tab. 1. Tested bonded joints types

Lp. No	Rodzaje badanych połączeń Tested joint types	Grubość łączonych blach Adhered alloys thickness g [mm]	Długość zakładki spoiny klejowej Joint length I _z [mm]
1	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3 2024PLT3 aluminium alloy	0,64	24
2	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3 2024PLT3 aluminium alloy	1,00	30
3	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0 7075PLT0 aluminium alloy	0,80	27
4	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0 7075PLT0 aluminium alloy	1,00	30

piło zniszczenie połączenia klejowego. Wyznaczone wartości obciążenia stanowiły podstawę do opracowania modeli dyskretnych analizowanych połączeń klejowych oraz weryfikacji otrzymanych wyników obliczeń numerycznych.

3. Analiza numeryczna

Analize numeryczna z wykorzystaniem metody elementów skończonych przeprowadzono w oparciu o przestrzenne modele dyskretne połączeń klejowych. W procesie dyskretyzacji połączenia klejowego zastosowano heksagonalną siatkę elementów skończonych z wykorzystaniem różnych typów elementów. Do zamodelowania blach aluminiowych zastosowano ośmiowęzłowe elementy objętościowe typu solid, posiadające po trzy translacyjne stopnie swobody w weźle elementu, natomiast spoinę klejową odwzorowano przy wykorzystaniu elementów skończonych typu cohesive, umożliwiających uwzględnienie mechanizmu zniszczenia spoiny w procesie obciążania połączenia klejowego. Do opisu właściwości materiałowych poszczególnych elementów połączenia klejowego zastosowano model materiału spreżysto-plastycznego w przypadku blach aluminiowych oraz model materiału sprężystego z charakterystyką zniszczenia opartą o kryterium Traction-Separation (siła rozrywająca - graniczna wartość separacji) [2, 14, 16] w oparciu o charakterystyki zamieszczone w pracy [16]. Wartość separacji określającej przemieszczenie węzłów elementu od momentu inicjacji zniszczenia do całkowitej utraty sztywności elementu skończonego przyjęto na poziomie 0,035 mm, co stanowiło korektę do wartości średniej 0,05 mm zalecanej w instrukcji oprogramowania ABAQUS. Wprowadzenie korekty separacji było spowodowane koniecznością kalibracji modelu numerycznego do wyników badań eksperymentalnych (porównywano wartości siły niszczącej). Model numeryczny połączenia klejowego przedstawiono na rys. 2

Zdefiniowane dla połączenia klejowego warunki brzegowe zapewniały utwierdzenie czołowej ścianki górnej blachy oraz możliwość przemieszczeń czołowej ścianki blachy dolnej tylko na kierunku przyłożenia obciążenia (rys. 3). base for mesh models of the analysed joints and verified the numerical computation results.

3. Numerical analysis

The finite elements numerical analysis was based on spatial mesh models of adhesive joints. In adhesive joint meshing process, hexagonal finite elements mesh with various elements types was applied. Aluminium alloys modelling employed 8-noded solid elements with 3 translational degrees of freedom each, while the adhesive joint was modelled with cohesive finite elements, as a result of which incorporating joint failure mechanism in loading process was possible. Mechanical properties of individual joint elements were described using elastic-plastic model for aluminium alloys and elastic model with Traction-Separation properties [2, 14, 16] based on the paper [16]. The value of separation factor, referring to the element's nodes displacement from failure initiation point to loss of rigidity of a finite element, was set at 0.035 mm, therefore adjusted to average value of 0.05 mm, as recommended in ABAQUS software instruction manual. This adjustment was dictated by the necessity to calibrate the numerical model to the results of experimental tests (the values of destructive forces were compared). The numerical model of the adhesive layer is presented in figure 2.

Boundary conditions defined for the adhesive bond ensured restraining the front side of the upper sheet, at the same time allowing displacement of the front side of the lower sheet only in the direction of load application (fig. 2).

The loads applied in numerical models were failure forces, the values of which were determined in experimental tests.

SCIENCE AND TECHNOLOGY



Obciążenie zastosowane w modelach numerycznych stanowiły siły niszczące połączenie, których wartości wyznaczono w badaniach eksperymentalnych.

4. Wyniki badań

4.1. Siła niszcząca połączenie klejowe

Przeprowadzone badania połączeń klejowych umożliwiły wyznaczenie wartości sił niszczących, które przyjęto jako podstawę do oszacowania wytrzymałości analizowanych połączeń. W tabeli 2 przedstawiono wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach eksperymentalnych oraz na podstawie analizy numerycznej badanych połączeń.

Porównując otrzymane w tabeli 2 wyniki badań zauważono dużą zgodność wartości obciążenia niszczącego wyznaczonego w badaniach eksperymentalnych z wynikami obliczeń numerycznych. Dotyczy to przede wszystkim trzech pierwszych przypadków, dla których uzyskano prawie 100% zgodność. W ostatnim wariancie połączenia otrzymano różnicę wyników wynoszącą ok. 17,5%, jednakże rozbieżność ta może wynikać z przybliżonego charakteru metody elementów skończonych oraz sposobu odzwierciedlenia warunków rzeczywistych. Rys. 2. Model dyskretny jednozakładkowego połączenia klejowego Fig. 2. Single-lap bonded joint mesh

- Rys. 3. Warunki brzegowe przyjęte w modelu numerycznym jednozakładkowego połączenia klejowego [16]
- Fig. 3. Inite element model single-lap bonded joint boundary conditions [16]

4. Tests results

4.1. Failure force

Adhesive joints tests determined values of failure force accepted as base values for estimating strength of the analysed joints. Table 2 presents failure force values determined in the experimental tests and in the numerical analysis of the joints.

The comparison of tests results presented in table 2 reflects considerable similarity of failure force values in both experimental and numerical tests. This concerns predominantly the first three cases, where consistency amounted to nearly 100%. Although the values discrepancy in the last variant settles at approximately 17.5%, this may be due to the approximate character of the finite element analysis, along with the method of reflecting real conditions.

 Tab. 2.
 Wartości siły niszczącej uzyskanej w badaniach eksperymentalnych oraz na podstawie analizy numerycznej badanych połączeń

 Tab. 2.
 Values of failure force derived from experimental and numerical analyses of the joints

Lp. No	Rodzaj połączenia klejowego Tested joint types	Wartość siły niszczącej oraz wartość odchylenia standardowego σ w przypadku badan doświadczalnych Failure force value and standard deviation σ in experimental tests [N]		
		badania doświadczalne Experimental tests	analiza numeryczna Numerical analysis	
1	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3, g=0,64 2024PLT3 aluminium alloy, g=0.64	3971 σ=422	3955	
2	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3, g=1,00 2024PLT3 aluminium alloy, g=1.00	4093 σ=686	4081	
3	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0, g=0,80 7075PLT0 aluminium alloy, g=0.80	2568 σ=192	2672	
4	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0, g=1,00 7075PLT0 aluminium alloy, g=1.00	2724 σ=189	3200	

4.2. Inicjacja zniszczenia spoiny klejowej

Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń numerycznych określono również wartość obciążenia, przy którym następowała inicjacja procesu zniszczenia spoiny klejowej. Wartość siły inicjującej zniszczenie określono analizując stan odkształcenia warstwy kleju, przyjmując jako początek zniszczenia moment utraty sztywności elementów znajdujących się na końcach zakładki spoiny klejowej – rys. 4c.

Wybrane etapy niszczenia spoiny klejowej dla połączenia klejowego blach aluminiowych 2024 PLT3 przedstawiono na rys. 4.

4.2. Adhesive joint failure initiation

Basing on the results of numerical analysis, the value of load which initiated the failure process of the adhesive joint was determined. The failure force value was established by analysing the adhesive layer tension, considering the moment of rigidity loss of the elements on the edge of overlap section as failure initiation point – fig. 4c.

Figure 4 presents selected stages of adhesive joint failure for 2024 PLT3 aluminium sheets.



Rys. 4.Wybrane etapy niszczenia spoiny klejowej Fig. 4. Stages of adhesive joint failure

Wartości wyznaczonych sił inicjujących proces zniszczenia spoiny klejowej dla analizowanych wariantów połączeń klejowych zestawiono w tabeli 3.

Na podstawie zamieszczonych w tabeli 3 wartości obciążenia można określić stosunek wartości obciążenia inicjującego zniszczenie spoiny do całkowitej siły niszczącej, przy której następuje zniszczenie połączenia klejowego. W analizowanych przypadkach początek zniszczenia spoiny klejowej następował w przedziale 91 ÷ 99 % wartości siły niszczącej. Values of adhesive joint failure initiation force for the analysed joint variants are compiled table 3.

Basing on load values presented in table 3 it is possible to determine the ratio of adhesive joint failure initiation force/joint failure force (under which the joint fails). In the analysed cases the joint failure initiation occurred within the range of 91 \div 99 % of failure force value.

Tab. 3.	Wartości siły inicjującej zniszczenie określonej na podstawie analizy numerycznej badanych połączeń
Tab. 3.	Values of joint failure initiation force derived from experimental and numerical joints analyses

Lp. No	Podroj nologranja klajovana	Wartość obciążenia / Load value [N]		
	Tested bonded joint types	siła inicjująca zniszczenie Failure initiation force	siła niszcząca Failure force	
1	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3, g=0,64 2024PLT3 aluminium alloy, g=0.64	3812,6	3955	
2	Blacha ze stopu aluminium 2024PLT3, g=1,00 2024PLT3 aluminium alloy, g=1.00	4052,1	4081	
3	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0, g=0,80 7075PLT0 aluminium alloy, g=0.80	2440,0	2672	
4	Blacha ze stopu aluminium 7075PLT0, g=1,00 7075PLT0 aluminium alloy, g=1.00	3040,0	3200	

4.3. Rozkłady naprężenia w połączeniu klejowym

Przeprowadzona analiza numeryczna umożliwia obserwację rozkładów naprężenia w poszczególnych elementach struktury

4.3. Stress distribution in adhesive joints

Numerical analysis enables observation of stress distribution in particular structure elements of analysed adhesive joints. badanych połączeń klejowych. Analizowano rozkłady naprężenia zredukowanego wg hipotezy wytrzymałościowej H-M-H na poszczególnych etapach obciążenia konstrukcji, które przykładowo przedstawiono na rys. 5 dla połączenia klejowego blach ze stopu aluminium 2024 PLT3. Reduced stress distribution was analysed according to HMH hypothesis on particular stages of loading, presented in figure 5 for 2024 PLT3 aluminium alloy sheets.

Presented results visualise the adhesive joint strain state and reduced stress distribution mesh, which allows the analysis



Rys. 5. Wizualizacja procesu niszczenia połączenia klejowego blachy ze stopu aluminium 2024 PLT3 o grubości 0,64 mm Fig. 5. Visualisation of adhesive joint failure process for 0.64 mm thickness 2024 PLT3 aluminium alloy sheets

Zaprezentowane wyniki przedstawiają wizualizację stanu odkształcenia połączenia klejowego z umieszczoną mapą naprężenia zredukowanego, umożliwiającą analizę stopnia wytężenia poszczególnych elementów analizowanych połączeń klejowych. Otrzymane odkształcenie modelu numerycznego potwierdza stan odkształcenia obserwowany w trakcie badań wytrzymałościowych badanych połączeń klejowych.

Wykorzystując analizę numeryczną oraz odpowiedni sposób modelowania połączenia można analizować rozkłady naprężeń oraz obserwować mechanizm niszczenia spoiny klejowej wraz z określeniem w przybliżeniu wartości siły, przy której następuje początek (inicjacja) zniszczenia. Ze względów eksploatacyjnych znajomość ta jest bardzo istotna, ponieważ pozwala określić wartość obciążenia, eliminującego takie połączenie z dalszej eksploatacji.

5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionej analizy numerycznej można zauważyć, iż:

- zastosowany w obliczeniach numerycznych model spoiny klejowej umożliwia wizualizację odkształcenia połączenia klejowego oraz poszczególnych etapów niszczenia spoiny klejowej w funkcji obciążenia modelu;
- 2) przyjęty sposób modelowania połączenia klejowego zapewnia dużą zgodność (powyżej 90 %) ilościową i jakościową z wynikami prowadzonego równolegle eksperymentu w 3 analizowanych przypadkach (porównując wartość siły niszczącej uzyskaną w badaniach doświadczalnych z wynikami analizy numerycznej – tabela 2), natomiast w czwartym przypadku otrzymano zgodność wyników na poziomie powyżej 80 %. Uzyskana zgodność wyników potwierdza adekwatność opracowanych modeli numerycznych analizowanych połączeń klejowych blach ze stopów aluminium;
- na podstawie zamieszczonych w tabeli 3 wyników można określić początek inicjacji zniszczenia spoiny klejowej, który w analizowanych połączeniach kształtuje się na poziomie powyżej 90 % wartości siły niszczącej.

of the degree of material effort for particular elements of analysed adhesive joints. The observed strain supports the results of adhesive joints strength tests and strains observable there.

Through numerical analysis as well as appropriate joint modelling it is possible to analyse stress distribution and monitor adhesive joint failure mechanism, including determining the approximate joint failure initiation force value. The knowledge of such dependencies is invaluable for functional purposes as it enables determining the value of load which would eliminate such a joint from further operation.

5. Conclusions

The conducted numerical analysis leads to several conclusions.

- The adhesive joint model used in numerical analysis enables visualisation of adhesive bond strain as well as particular stages of joint failure through model loading.
- 2) The analysed adhesive joint modelling method ensures high quantitative and qualitative consistency (over 90%) with the results of simultaneously conducted test in 3 analysed variants (comparing failure force values for experimental and numerical tests table 2); while in the fourth case the results consistency reached 80%. The concordance validates the adequacy of designed numerical models of analysed aluminium sheets adhesive joints.
- Results compiled in table 3 determine adhesive joint failure initiation point, which, for analysed joints, occurs at the level of 90% of failure force value.

The conducted research indicate that numerical analysis should be considered as an invaluable tool, providing supplement and extension of experimental tests, regarding particularly the visualisation of adhesive joint behaviour undergoing failure

sible.

Przeprowadzone badania wykazują, że analiza numeryczna może stanowić cenne uzupełnienie i rozszerzenie badań doświadczalnych, zwłaszcza w zakresie możliwości wizualizacji zachowania się połączenia klejowego w procesie niszczenia, co podczas badań doświadczalnych, z zastosowaniem standardowych metod eksperymentalnych, w wielu przypadkach jest utrudnione lub niemożliwe.

7. References

- 1. Abaqus 6.9 Documentation.
- 2. Abaqus/Standard User's Manual version 6.5, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. 2005.
- 3. Cheuk P T, Tong L, Rider A N, Wang J. Analysis of energy release for fatigue cracked metal-to-metal double-lap shear joints. Int. J. Adh. Adhesives 2005; 56: 181-191.
- 4. Crocomble A D, Hua Y X, Loh W K, Wahab M A, Ashcroft I A. Predicting the residual strength for environmentally degraded adhesive lap joints. Int. J. Adh. Adhesives 2006; 26: 325-336.
- Czaplicki J, Ćwikliński J, Godzimirski J, Konar P. Klejenie tworzyw konstrukcyjnych. Warszawa: WKiŁ, 1987. 5.
- 6. de Morais A B, Pereira A B, Teixeira J P, Cavaleiro N C. Strength of epoxy adhesive-bonded stainless-steel joints. Int. J. Adh. Adhesives 2007; 27: 679-686.
- de Moura M F S F, Daniaud R, Magalhaes AG. Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip 7. defects. Int. J. Adh. Adhesives 2006; 26: 464-473.
- 8. Dębski H, Rudawska A. Analiza rozkładów naprężeń jednozakładkowym połączeniu klejowym. Rozdział nr 18 w monografii: "Analizy numeryczne wybranych zagadnień mechaniki" pod red. T. Niezgody. Warszawa: Redakcja Wydawnictw WAT, 2007.
- 9 Godzimirski J. Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. Warszawa WNT, 2002.
- 10. Godzimirski J, Tkaczuk S. Możliwości wykorzystywania MES do obliczania wytrzymałości połączeń klejowych. Technologia i Automatyzacja Montażu 2001; 2: 43-46.
- 11. Godzimirski J, Kozakiewicz J, Łunarski J, Zielecki W. Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1997.
- 12. Markiewicz I. Analiza połączenia spawanego zaprojektowanego metodami nośności granicznej. Eksploatacja i Niezawodnosc -Maintenance and Reliability, 2008;3: 12-21.
- 13. Mazurkiewicz D. Tests of extendability and strength of adhesive-sealed joints in the context of developing a computer system for monitoring the condition of belt joints during conveyor operation. Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability, 2010;3: 12-21.
- 14. Moura M F S F, Concalves J P M, Chousal J AG, Campilho R D S G. Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behavior of bonded joints. Int. J. Adh. Adhesives 2008; 28: 419-426.
- 15. Rudawska A, Kuczmaszewski J. Klejenie blach ocynkowanych. Lublin: Wydawnictwa Uczelnianie PL, 2005.
- 16. Rudawska A, Dębski H. Modelowanie procesu zniszczenia spoiny klejowej w jednozakładkowym połączeniu klejowym blach aluminiowych. Mechanik 2010;2: 118-121.
- 17. Rusiński E, Czmochowski J, Smolnicki T. Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2000.
- 18. Ważny M, Jasztal M, Szajnar S. CFD-Fastran – narzędzie do numerycznej analizy opływu obiektów przez strumień powietrza. Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability, 2008;4: 55-62.
- You M, Yan Z-M, Zheng X-L, Yu H-Z, Li Z.A numerical and experimental study of gap length on adhesively bonded aluminium 19. double-lap joint. Int. J. Adh. Adhesives 2007; 27: 696-702.

Dr inż. Anna RUDAWSKA

Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Polska

processes. Observation of such occurrences in standard experi-

mental research proves, in most cases, hindered if not impos-

Dr inż. Hubert DĘBSKI

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Polska e-mail: a.rudawska@pollub.pl

WCZESNE WYKRYWANIE USZKODZEŃ PRZEKŁADNI ZĘBATEJ Z WYKORZYSTANIEM SŁABYCH SYGNAŁÓW DRGAŃ

EARLY FAULT DETECTION OF GEARBOX USING WEAK VIBRATION SIGNALS

Zaproponowano nową metodę wczesnego wykrywania pęknięć zębów przekładni zębatej polegającą na analizie slabego sygnalu drganiowego zmodulowanego niskimi częstotliwościami. Uzyskaną obwiednię zmodulowanego sygnalu drgań wykorzystano do wyznaczenia częstotliwości modulujących. Zdemodulowane częstotliwości charakterystyczne otrzymano za pomocą adaptacyjnej, czasowo-częstotliwościowej reprezentacji sygnalu z obwiedni sygnalu drganiowego wyznaczonej z wykorzystaniem transformaty Hilberta. Spektrogram adaptacyjny odzwierciedla częstotliwość zazębienia i jej harmoniczne, częstotliwość sprzęgła, częstotliwość nośną oraz wstęgi boczne w sygnale drganiowym poddanym analizie z użyciem zoptymalizowanego przekształcenia falkowego. Proponowaną metodę weryfikowano przy użyciu sygnału symulowanego i rzeczywistego. Wyniki wskazują na możliwość efektywnego zastosowania proponowanej metody do detekcji pęknięć zębów przekładni zębatej.

Słowa kluczowe: wczesne wykrywanie uszkodzeń, adaptacyjna reprezentacja czasowo-częstotliwościowa, słaby zdemodulowany sygnał drań.

A new method for the early detection of the gear crack was proposed by the analysis of the weak low-frequency modulated vibration signal. The envelope of the modulated vibration signal was extracted and used to demonstrate the modulating frequencies. The demodulated characteristic frequencies were obtained with the adaptive joint time-frequency signal representation from the Hilbert transform envelope of the vibration signal. The adaptive spectrogram matches the meshing frequency and its harmonics, the coupling frequency, the carrier frequency and the sidebands in the vibration signal by the optimized wavelet. Simulated and experimental vibration signals are used to test the proposed method. The results show the applicability and effectiveness of the proposed method for gear crack detection.

Keywords: Early Fault detection, adaptive joint time-frequency, weak demodulated vibration signal.

1. Introduction

The analysis of vibration signals from the gearbox casing is the most modern technique for fault detection of gearbox. The presence and type of fault at its early stage and its evolution are detected in order to estimate the machine's residual life and choose an adequate plan of maintenance [10]. The most important components in gear vibration spectra are the tooth-meshing frequency and its harmonics, together with sidebands due to the modulation phenomenon. The fault condition may change the number and the amplitude of the sidebands. The sidebands are the frequency components equally spaced around a center frequency. The center frequency called the carrier frequency is the gear mesh frequency. The faults localized on one tooth or a few teeth such as cracks and spalls produce modulation effects during the engagement of the fault teeth. Consequently, a large number of sidebands around the tooth-meshing frequency and its harmonics in the spectrum are generated and spread over a wide range, which is spaced by the rotation frequency of the faulty gear and characterized by low amplitudes [13]. Amplitude modulation can be considered to be a feature of gear crack. Ma and Li [5] developed a model-based demodulation scheme to extract the information contained in wideband gear vibration signals and reported a wideband demodulation algorithm. Lin and Zuo [2] used an adaptive wavelet filter (by varying the parameters of the mother wavelet) to get the impulsive vibration signal for gearbox crack detection. Dalpiaz et al [7] studied the effectiveness and sensitivity of signal processing techniques for gear fault detection, including power cepstrum, time-synchronous average, and wavelet analysis.

Wavelet transform is most often used because of the feature of time-frequency localization that is capable of exhibiting the instantaneous frequencies of vibration signal and gives a description of how energy distribution over a range of frequencies from one instance to another [3, 4, 6, 9, 12]. Hilbert transform is an effective method to demodulate the vibration signal in fault diagnosis of gear [8]. It is difficult for wavelet transform and Hilbert transform to represent the characteristic frequencies from many frequency components of the faulty gear with visual inspection. The adaptive time-frequency method makes the interference coincide with the main signal components to detect the weak signals in the presence of noise, which prevents over complication of the time-frequency plane, and which also causes reinforcement of the pertinent signal features. This research proposes a new method based on the Hilbert transform and adaptive Gaussian wavelet for the demodulation of the gear vibration signal. The adaptive spectrogram is applied to analyze the vibration signal in a fine resolution. The result shows good performance of this adaptive wavelet and great capability to detect the gear fault.

2. Adaptive wavelet analysis

The Gaussian wavelet is a popular non-orthogonal complex wavelet. The normalized adaptive Gaussian wavelet function is defined as:

$$\psi_{p}(t) = \left(\pi\sigma_{p}^{2}\right)^{-0.25} exp\left[-\left(t-t_{p}\right)^{2}/2\sigma_{p}^{2}\right] exp\left(j2\pi f_{p}t\right)$$
(1)

where σ_p , t_p , $f_p \in R^+$, σ_p is the adjustable standard deviation and determines the tradeoff between the time and frequency resolution and (t_p, f_p) is the time-frequency center. The adaptive wavelet function $\psi_p(t)$ can be optimally determined in the joint time-frequency domain. The ratio of the center frequency to the frequency bandwidth is $\sqrt{2}\pi\sigma_p f_p$, which is variable. Adaptive Gaussian wavelet function can adjust its parameter to represent the signal in fine resolution. A novel joint time-frequency algorithm based on adaptive Gaussian wavelet is adopted for adaptive signal representation [1]. This method is to use the adaptive normalized Gaussian functions to expand signal $\phi(t)$ defined as follow:

$$\phi(t) = \sum_{p=1}^{\infty} B_p \left(\pi \sigma_p^2\right)^{-0.25} exp\left[-\left(t - t_p\right)^2 / 2\sigma_p^2\right] exp\left(j2\pi f_p t\right)$$
(2)

The adaptive Gaussian basis representation can match a signal by adjusting the time and frequency resolution and its time-frequency center that is different from the Gabor expansion and the wavelet decomposition. To characterize the timevarying nature of the signal, the elementary function $\psi_p(t)$ is localized in the joint time-frequency domain and the coefficient B_p reflects the signal local behavior. Here the parameters σ_p , t_p and f_p are chosen such that $\psi_p(t)$ is most similar to $\phi(t)$. The parameter σ_p can be used to adjust the bandwidth of $\psi_p(t)$ to best match a variety of signals. The adaptive spectrogram (ADS) is obtained as follows:

$$\phi_{p}(t) = \phi_{p-1}(t) - B_{p-1}\psi_{p-1}(t)$$
(3)

$$ADS(t,f) = 2\sum_{p=0}^{\infty} |B_p|^2 \exp\left\{-\frac{(t-t_p)^2}{\sigma_p^2} - (2\pi)^2 \sigma_p^2 (f-f_p)^2\right\}$$
(4)

where $\sigma_p \in R^+$, $t_p \in R^+$, $f_p \in [0, +\infty]$. It is shown that the exponential term in equation (4) is the WVD for a normalized Gaussian function. The adaptive spectrogram equation can be expressed as:

$$\|ADS(t,f)\|^2 = \sum_{p=0}^{\infty} |B_p|^2 = \|\varphi(t)\|^2$$
 (5)

Equation (5) shows that the energy contained in ADS(t,f) is identical to the energy contained in the signal $\phi(t)$. The ADS can be considered as a signal energy distribution in the joint timefrequency domain. This adaptive spectrogram is non-negative, cross-term interference free and high in resolution. The procedure that is applied to obtaining the adaptive spectrogram is as follows: Set p = 1, where p is the index of iteration to extract the optimal parameters in equation (2) from the p^{th} signal $\phi_p(t)$. (1) Obtaining the optimal parameters $(B_{p_i}t_{p'}\sigma_p)$ by minimizing E_p the following section as shown in the following equation

$$E_{p} = \sum_{i=1}^{K} \left| \varphi_{p}\left(t_{i}\right) - B_{p} \psi_{p}\left(t_{i}\right) \right|^{2}$$

$$\tag{6}$$

- (2) As shown in equation (3), obtain the remaining signal ϕ_{p+1} after subtracting the signal obtained in step 2.
- (3) Let p = p+1. Return to step 2 unless the reconstructed error E_a is sufficiently small.
- (4) The optimal parameters are then applied to equation (4) to obtain the adaptive spectrogram.

The algorithm is coded in Matlab by the authors. Genetic algorithm (GA) is used to optimize the parameters in equation (2). For details on GA, check ref. [11]. The chromosome (C) contains the five real numbers of the features. The features represent the four parameters of the model as shown in equation (2). An example is shown as:

$$C = \{c_1, c_2c_3, c_4, c_5\} = \{real(B_p), imag(B_p), f_p, t_p, \sigma_p\} = \{0.003, -0.002, 55, 0.04, 0.003\}$$
(7)

The numbers in the chromosome represent respectively the real part and the imaginary part of the amplitude, the center of the frequency, the time and the standard deviation. The objective function is the sum of squared error function in equation (6). The GA procedure is applied to obtain the next optimal parameters again. So the results of all the optimal parameters applied in equation (2) are the optimal signal representation of the original signal $\phi(t)$. The optimal parameters are also used in equation (4) to obtain the adaptive spectrum.

3. Gearbox Experimental System

The experimental vibration signals collected from a gearbox dynamics simulator of SpectraQuest are employed to test the proposed method. Two accelerometers of model PCB 352C67 are mounted on the gearbox in both vertical and horizontal directions. Through the signal conditions, the vibration data is acquired by DSP Siglab 20-42 Signal Analyzer and Dell Inspiration 7500 laptop. The transmission diagram of the gearbox is shown in Figure 1. Five spur gears are installed on three shafts. The vibration generated by the impact force between gears 3 and 4 is in the vertical direction as shown in Figure 1. The vertical sensor can catch the vibration signal with higher sensitivity along the vertical direction. Gear 3 is chosen to be the one to be studied in this experiment. Figure 2 shows the gear crack on this gear in the experiment. The crack occures along the normal line of the tooth's root curve. The angle of the crack with the line a is in the range of 40°-50°. The crack angle in the faulty gear 3 is 45°. The sampling frequency is $2.56 \times 1k$ (1k=1024). The number of data points in each sample is set at 2048. The rotational speed of the motor is 800 rpm. The load force by the brake is half of 51.77 Nm. Based on the drive ratios between the teeth number of teeth of the driving gear and the teeth number of teeth of the driven gear, and rotational speed of the drive motor, the rotational speed and the charactersitic frequency of each gear are determined as shown in Table 1. Here F₁ is the rotational speed of shaft 1 and gear 1, F₂ is the rotational speed of shaft 2 and gears 2 and 3, F₃ is the rotational speed of shaft 3 and 4, F_{12} is the meshing frequency of gears 1 and 2 and F_{34} is the meshing frequency of gears 3 and 4.



Fig. 1. The diagram of the experimental system

4. Results and discussion

x

A simulated signal is used to test the proposed method in Equation 8. The signal $\cos(2\pi.1560t)+\cos(2\pi.1600t)$ in time interval [0,0.5] is modulated by frequencies of 40 Hz and 80 Hz. The 80 Hz frequency exists during the time period of (0, 0.099) and (0.301, 0.5) seconds, which simulates that the modulating frequency varies with time. Both amplitude and phase modulations are considered in the simulated singal. The frequency component (1560+40) Hz is set to equal to one of the original signal frequency of 1600 Hz. Here Rand(t) denotes the normally distributed white noise.

$$\begin{aligned} (t) &= 0.7 \left(1 + \sin(80\pi t) \right) \cos\left(3120\pi t + \sin(80\pi t) \right) + 1.5Rand\left(t \right) \\ &+ \begin{cases} (1 + \sin160\pi t) \times \\ \cos\left(3200\pi t + \cos\left(3200\pi t + \cos\left(3200\pi t + \sin160\pi t \right) \right) \right) \\ t &= \begin{bmatrix} 0, 0.099 \end{bmatrix} \\ \cos\left(3200\pi t \right) \quad t &= \begin{bmatrix} 0.1, 0.3 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{cases} (1 + \sin(160\pi t)) \cos\left(3200\pi t + \sin(160\pi t) \right) \\ t &= \begin{bmatrix} 0.301, 0.5 \end{bmatrix} \end{aligned}$$
(8)

The sampling frequency of the simulated signal is 4 kHz (1k=1024). The proposed method is applied to analyze the simulated signal to get the modulated signal of 40 Hz and 80 Hz frequency components. Firstly, Hilbert transform is used to analyze the simulated signal to generate the signal envelope. Figure 3(a) shows the spectrum of the simulated signal defined in equation (8). There are some sidebands around the frequency of 1600 Hz, which are 1520 Hz, 1560 Hz and 1680 Hz. It is not clear that there is a modulated signal with 40 Hz and 80 Hz frequency components in it. Secondly, Hilbert transform is used to analyze the simulated signal in figure 3(a). Figure 3(b) shows the power spectrum of the Hilbert transform signal envelope. The signal envelope of the Hilbert transform includes the 40 Hz and 80 Hz signal components. It does not differentiate the carrier frequencies of 1560 Hz and 1600 Hz, modulating frequencies of 40 Hz and 80 Hz and the coupled frequencies.

In order to demodulate the 40 Hz and 80 Hz frequency components from the signal envelope by Hilbert transform, the proposed adaptive spectrogram is used to analyze the signal envelope of Hilbert transform. Figure 4 shows the adaptive spectrogram of the signal envelope from Hilbert transform as shown in figure 3(b). The 40 Hz and 80 Hz frequency components can be differentiated and identified clearly, especially the time range of the 80 Hz frequency is shown in detail, which is the same as equation (8). The proposed method based on the Hilbert transform and adaptive spectrogram is effective to demodulate the modulated frequency component of the simulated signal.

The experimental vibration signals collected from the gearbox dynamics simulator of SpectraQuest are used to test the proposed method. When a gear has a local fault such as crack, the vibration signal of the gearbox contains amplitude and phase modulations, which are periodic with the rotational frequency of the gear. The modulation of the meshing frequency from the faulty gear generates the sidebands. The sidebands are either the shaft rotational speed or one of its multiples. As described in Section 3, the gear 3 has a crack, the sidebands on the rotational speed and its harmonics are produced as the modulation from the gear.

In order to demodulate the sidebands generated by gears 3,4 and 5 on shafts 3, gears 4 and 5, Hilbert transform is used



Fig. 3. (a) Spectrum of the simulated signal, (b) Spectrum of the simulated signal envelope with Hilbert transform

MAINTENANCE AND RELIABILITY NR 1/2011



Fig. 4. The adaptive spectrogram of the simulated signal envelope from Hilbert transform (a) (0,120) Hz (b) (60,100) Hz



Fig. 5. Power density spectrum of the Hilbert transform envelope of the experimental vibration signals (a) the normal gearbox (b) the faulty gearbox



Fig. 6. The adaptive spectrogram of the experimental vibration signal envelope from Hilbert transform under normal condition (a) (0,300) Hz (b) (0,30) Hz

to analyze the experimental vibration signal. Figure 5 Power density spectrum of the Hilbert transform envelope of the experimental vibration signals under normal condition and faulty condition. Figure 5(a) shows the center frequency components of 5.17 Hz generated by gears 4. The meshing frequency components of 152 Hz and 231 Hz between gears 1, 2 and gears 3, 4 are presented. Figure 5(b) shows the center frequency components of 5.71 Hz generated by gear 4 and meshing frequency components of 154 Hz and 231 Hz generated between gears 1, 2 and 3, 4. Although the frequency components of 5.71 Hz and 231 Hz are shown in figure 5(a) and (b) at the same time and their amplitudes are different, there are harmonic frequency components around the frequencies generated by the gears 3 and 4 in figure 5(a) and (b). It is not enough to identify the fault gear by using the power density spectrum of the Hilbert transform envelope. We need to demodulate the frequency of 5.71 Hz by the gear 4 in the time-frequency domain.

The adaptive spectrogram is applied to analyze the Hilbert transform envelope of the vibration signal. Figure 6 shows the results by the adaptive spectrogram of the Hilbert transform under normal condition. It shows the modulating frequency of 5.71 Hz in gear 4 and meshing frequency of 228.57 Hz between gears 3, 4 clearly. Figure 7 shows the results by the adaptive spectrogram of the Hilbert transform under faulty condition. The modulating frequency of 5.71 Hz in gear 4 and meshing frequency of 228.57 Hz between gears 3, 4 are identified. The amplitudes of frequencies 5.71 Hz and 228.57 Hz are different by comparison between figures 6 and 7. As we discussed, when there is crack in gear, the rotational frequency and meshing frequency of the faulty gear are generated. The results in figures 6 and 7 show that the proposed method demodulates the frequency component of 5.71 Hz in gear 4 and meshing frequency component of 228.57 Hz effectively and clearly, which is used to detect the early gear fault in the gearbox.



Fig. 7. The adaptive spectrogram of the experimental vibration signal envelope from Hilbert transform under faulty condition (a) (0,300) Hz (b) (0,30) Hz

4. Conclusion

This paper proposed a new method based on Hilbert transform and adaptive spectrogram for the early fault detection of gearbox by demodulation of the weak modulating frequency components and meshing frequency to detect the gear crack. Both simulated signal and experimental vibration signal are used to test the proposed method. The results show the applicability for the adaptive spectrogram to extract and identify the demodulating frequencies in fine resolution.

The experimental data is provided by the Reliability Research Lab in the Department of Mechanical Engineering at the University of Alberta in Canada. The project is supported by the Natural Science Foundation of Hubei Province of China (2008CDB300)), Major project of Hubei Provincial Department of Education (Z20101501) and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC).

5. References

- 1. Chen H. X, Chua P. S. K, Lim G. H., Vibration Analysis With Lifting Scheme and Generalized Cross Validation in Machinery Fault Diagnosis. Journal of Sound and Vibration 2007; 301(3-5): 458-480.
- 2. Chen H. X, Chua P. S. K, Lim G. H, Adaptive wavelet transform for model of vibration signal and application in fault diagnosis of water hydraulic motor. Mechanical Systems and Signal Processing 2006; 20(8): 2022-2045.
- Dalpiaz G, Rivola A, Rubini R, Effectiveness and sensitiveness of vibration processing techniques for local fault detection in gears. Mechanical Systems and Signal Processing 2000; 4(3): 387-412.
- Hoseini M, Mandal M. K, Zuo M. J, and Mani G, Gearbox fault diagnosis using Hilbert transform and segmented regression. Proceedings of the Fifth International Conference on Condition Monitoring & Machinery Failure Prevention Technologies, Edinburgh, Scotland, UK, July 14 - July 18, 2008: 650-656.
- 5. Li Z, Han J, Sun J, He Y, Chu F, Fault recognition method based on independent component analysis and hidden Markov model. Journal of Vibration and Control 2007; 13(2): 125-137.
- 6. Li Z., He Z. J, Zi Y. Y. Jiang H. K, Rotating machinery fault diagnosis using signal-adapted lifting scheme. Mechanical Systems and Signal Processing 2008; 22(3): 542-556.
- Lin J, Zuo M. J, Gearbox fault diagnose using adaptive wavelet filter. Mechanical Systems and Signal Processing 2003; 17(6): 259-1269.
- 8. Ma B, Ma R, Jiang Z, Gao J, A system of real-time monitoring and fault self-recovering for centrifuge. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition) 2005; 32(3): 92-94.
- 9. Ma J, Li C. J, Gear defect detection through model-based wideband demodulation of vibrations. Mechanical System and Signal Processing 1996; 10(5): 653-665.
- 10. Qian S. Chen D, Signal representation using adaptive normalized Gaussian functions. Signal Processing 1994; 36(1): 1-11.
- 11. Sun W, Chen J, Li J, Decision tree and PCA-based diagnosis of rotationg machinery. Mechanical Systems and Signal Processing 2007; 21(3): 1300-1317.
- Yimin Shao, Xiaoxia Li, Chris K. Mechefske and Zaigang Chen, Rear axle gear damage prediction using vibration signal preprocessing coupled with RBF neural networks, Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 2009; 4(44): 57-64.
- 13. Yu D, Yu Y, Cheng J, Application of time-frequency entropy method based on Hilbert-Huang transform to gear fault diagnosis. Source: Measurement: Journal of the International Measurement Confederation 2007; 40(9-10): 823-830.

Prof. Wang QINGJUN Prof. Hanxin CHEN Prof. Xubing CHEN Prof. Hong YANG Prof. Gaoping WANG School of Mechanical and Electrical Engineering Wuhan Institute of Technology 693#, XiongChu Road, Wuhan, P.R. China e-mail: pg01074075@ntu.edu.sg

ZAPWENIENIE BEZPIECZEŃSTWA KONSUMENTOWI ŻYWNOŚCI W OGNIWIE TRANSPORTOWYM ŁAŃCUCHA CHŁODNICZEGO

PROVIDING SECURITY FOR FOOD CONSUMER IN TRANSPORT LINK OF REFRIGERATION CHAIN

W Zakładzie Maszyn Spożywczych i Transportu Żywności Politechniki Poznańskiej od kilku lat prowadzone są prace mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa konsumentowi żywności w ogniwie transportowym łańcucha chłodniczego. W artykule tym przedstawiono program obliczeniowy umożliwiający wyznaczenie temperatury transportowanej żywności w zależności od stanu nadwozia, temperatury otoczenia, wydajności agregatu chłodniczego i właściwości ładunku. Wskazano na potrzebę opracowania procedur pozwalających diagnozować stan nadwozi przeznaczonych do przewozu żywności łatwo psującej się. Scharakteryzowano wybraną procedurę diagnostyczną. Omówiono narzędzia wspomagające diagnozowanie.

Słowa kluczowe: transport, żywność, diagnoza, bezpieczeństwo konsumenta.

For some years, Division of Food Machines and Transport of Poznań University of Technology carries out works aiming at providing security for food consumer in transport link of refrigeration chain. This paper presents a computer programme enabling to determine the food transport temperature depending on the body condition, ambient temperature, capacity of the refrigerated unit and load property. There is pointed out the necessity to elaborate procedures allowing to diagnose the condition of the bodies designed for perishable food transport. The chosen diagnostic procedure has been characterised. The tools aiding diagnosis have been discussed.

Keywords: transport, food, diagnosis, consumer security.

1. Wstęp

Konsument bezwzględnie domaga się, aby spożywana żywność nie zagrażała jego życiu i zdrowiu. Ważne jest zatem dążenie, aby ograniczyć potencjalne zagrożenie do akceptowalnego poziomu w każdym z ogniw łańcucha żywnościowego. Służą temu między innymi systemy zapewnienia jakości, np. HACCP. W łańcuchu żywnościowym występują nie tylko ogniwa związane z przetwarzaniem i szeroko rozumianym magazynowaniem, ale także ogniwa transportowe. Łańcuch żywnościowy w przypadku żywności łatwo psującej się zwany jest w literaturze łańcuchem chłodniczym. W łańcuchu chłodniczym ogniwo transportowe występuje wielokrotnie.

Do przemieszczania żywności łatwo psującej się na lądzie wykorzystywane są specjalistyczne pojazdy drogowe zapewniające transport w kontrolowanych temperaturach. Wymagania, jakie mają spełniać środki transportu żywności łatwo psującej się określone są przez "Umowę o międzynarodowych przewozach szybko psujących się artykułów żywnościowych i o specjalnych środkach transportu przeznaczonych do tych przewozów (ATP)" [16]. W umowie ATP określone są:

- temperatury, w jakich należy przewozić wybrane produkty spożywcze,
- klasyfikacja pojazdów do przewozu żywności,
- metody badania i znakowania pojazdów do przewozu żywności.

W dalszej części artykułu zostaną omówione prace realizowane w Zakładzie Maszyn Spożywczych i Transportu Żywności wchodzącym w skład Instytutu Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej mające na celu wzrost bezpieczeństwa żywnościowego w ogniwie transportowym.

Prace te dotyczą:

- prognozowania temperatury ładunku w zależności od stanu nadwozia i temperatury otoczenia,

1. Introduction

Consumers are absolutely demanding that the consumed food cannot be dangerous for their life or health. So, it is important to aim at restricting the potential danger of an accepted level in each link of the food chain. The quality assurance systems, such as for example HACCP are, among others, used for this purpose. The food chain contains not only links connected with processing and widely ment storing but also the transport ones. In case of the perishable food, the food chain in the literature is called the refrigeration chain. In the refrigeration chain the transport link occurs many times.

In order to transport the perishable food on land they use special road vehicles ensuring transport in controlled temperatures. Requirements which are to be met by the perishable foodstuff transport means are determined by "Agreement on the international carriage of perishable foodstuff and on the special equipment to be used for such carriage (ATP)" [16]. The agreement ATP determines the following:

- temperatures in which given food products should be transported,
- classification of vehicles designed for food transport,
- methods of testing and marking the vehicles for food transopt.

The further part of this paper discusses works carried out in The Division of Food Machines and Transport being a part of The Institute of Machines and Motor Vehicles of Poznań University of Technology aiming at increasing the food safeness in the transport link.

These works refer to:

- forecasting the load temperature depending on the body condition and ambient temperature,

 zapewnienia wysokiego poziomu technicznego nadwozi do przewozu żywności.

2. Kod do wyznaczania temperatury ładunku

Jak wynika z rozważań zamieszczonych w pracy S. Jamesa [7] temperatura jest tym parametrem, który najsilniej wpływa na zachowanie cech jakościowych transportowanej żywności. S. E. Flores w opracowaniu [6] wyraża pogląd, iż w przypadku warzyw świeżo ciętych odstępstwa od optymalnej temperatury podczas przechowywania i transportu są miarą zagrożenia konsumenta. Uzasadnione jest rozszerzenie tegoż poglądu na całą transportowaną żywność łatwo psującą się. Dlatego też zachodziła potrzeba przygotowania narzędzi obliczeniowych umożliwiających wyznaczenie temperatury transportowanej żywności.

2.1. Prace związane z modelowaniem warunków chłodniczego transportu żywności

Przed przystąpieniem do budowy własnego kodu obliczeniowego przeanalizowano prace realizowane w innych ośrodkach naukowych na świecie.

Analizę przepływu powietrza i odbioru ciepła z nadwozia wypełnionego ładunkiem ułożonym na paletach z wykorzystaniem metod komputerowej dynamiki płynów i metod eksperymentalnych przedstawiono w artykule [11] J. Moureh'a i D. Flicka. Wyniki eksperymentów numerycznych porównywano z wynikami eksperymentów fizycznych. Budując stanowisko modelowe, jak i tworząc procedury obliczeniowe, przyjęto bardzo silne założenie upraszczające, iż nie zachodzi wymiana ciepła pomiędzy ładunkiem a cyrkulującym w nadwoziu powietrzem. Założono, że wymiana ciepła odbywa się tylko pomiędzy ścianami nadwozia a powietrzem, które transportuje ciepło wnikające do parownika.

Przyjęte założenie nie jest spełnione:

- po załadunku, gdyż temperatura powietrza i ładunku mogą
- się różnić (różnica temperatur powoduje przepływ ciepła),
- w przypadku przewozu świeżych owoców i warzyw.

Świeże owoce i warzywa generują tzw. ciepło oddychania. Wartość tego ciepła dla wielu owoców i warzyw jest tego samego rzędu co ciepło przenikające przez ściany nadwozia na drodze przewodzenia. Należy w tym miejscu nadmienić, że z punktu widzenia równań opisujących transport ciepła to ciepło oddychania należy traktować jako "produkt" wewnętrznych źródeł ciepła. Przedstawione w omówionym artykule wyniki należy traktować jako przybliżone.

G. Comini, G. Cortella i O. Saro w pracy [5] przedstawili model matematyczny opisujący transport ciepła w ładunku i w przestrzeniach międzyładunkowych nadwozia, a także w ścianach nadwozia chłodniczego. Cyrkulację powietrza w nadwoziu wymuszają wentylatory stanowiące integralną część chłodnicy agregatu chłodniczego. Do rozwiązania układu równań różniczkowych autorzy wykorzystują metodę elementów skończonych. Przyjęte w trakcie rozwiązywania równań założenia upraszczające podlegały weryfikacji eksperymentalnej. W efekcie rozwiązania równań otrzymano pola temperatur w ładunku i przestrzeniach międzyładunkowych.

Modelowanie przepływu powietrza w nadwoziu chłodniczym omówiono w artykule N. Zental-Menia, J. Moureh'a, D. Flicka [17]. Autorzy przebadali wymienione zjawisko na modelu fizycznym i przy użyciu programu obliczeniowego FLUENT. Wykonane eksperymenty potwierdziły przydatność tego programu. - assuring the high mechanical level of bodies designed for food transport.

2. Code for load temperature determination

Following the discussions presented in the work by S. James [7] the temperature is the parameter being the most influencing on maintaining the quality features of the transported food. S. E. Flores in his work [6] expresses the opinion that in case of fresh cut vegetables the departures from the optimum temperature during their storage and transport are the measure of danger for consumers. It is well-founded to expand the opinion for the whole transported perishable food. For this reason, it was necessary to prepare calculation tools enabling to determine the temperature of the transported food.

2.1. Works concerning modelling of conditions for refrigeration food transport

Before starting to build the own computer code the works carried out in other research centers in the world were analised.

The analysis of the air flow and heat reception from the body filled with load placed on palletes with the use of computer fluid dynamic methods and the experimental methods, is presented in the paper [11] by J. Moureh i D. Flick. The results of the numerical experiments were compared with the ones of the physical experiments. Building a model stand and creating calculation procedures, they assumed a very strong simplifying presumption that there was no heat transfer between the load and air circulating in the body. They assumed that the heat transfer took place only between the body walls and air transporting heat entering to the evaporator.

The presumption is not met:

- after loading, as the temperature of air and load can be different (the temperature difference causes the heat transfer),
- when fresh fruit and vegetables are transported.

Fresh fruit and vegetables generate heat of respiration. The value of this heat for many fruit and vegetables is of the same order as the heat transfer the body walls through conduction. It should be pointed out here that from the point of view of equations describing the heat transfer, the heat of respiration should be treated as "a product" of internal heat sources. The results presented in the discussed paper should be treated as rough.

G. Comini, G. Cortella and O. Saro in the work [5] presented a mathematical model describing the heat transfer in the load and in the body interload spaces and also in the refrigeration body walls. The air circulation in the body is enforced by the fans being the integral part of the evaporator of the refrigeration unit. The authors use the finite elements method for solving the differential equations system. The simplifying presumptions used when solving equations were the subject of of the experimental verification. In the effect of solving the equations they obtained the thermal fields in the load and interload spaces.

Modelling of the air flow in the refrigeration body was discussed in the paper by N. Zental-Menia, J. Moureh, D. Flick [17]. The authors tested the mentioned phenomenon on the physical model and with the use of the comuter programme FLU-ENT. The performed experiments confirmed the effectiveness of the programme.

The influence of the refrigeration chamber design solutions on the temperature distribution and the air flow speed was analysed in the elaboration [8] by Jing Xie, Xiao-Hua Qu, Jun-Ye Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych komory chłodniczej na rozkład temperatur i prędkości przepływu powietrza analizowali w opracowaniu [8] Jing Xie, Xiao-Hua Qu, Jun-Ye Shi, Da-Wen Sun. Analizy były prowadzone dla komory nie wypełnionej ładunkiem.

Proces wymiany ciepła pomiędzy ścianą a upakowanym złożem rozważany jest w pracy [9] przez O. Laguerre, S. Ben Amara, D. Flicka. Problem ten rozwiązywany jest z użyciem metod obliczeniowych i eksperymentalnych.

Zmiany temperatury mrożonej żywności ułożonej na paletach w kartonach w zależności od temperatury otoczenia analizowali w pracy [10] J. Moureh i E. Derens. Obliczenia wykonano dla temperatur otoczenia występujących we Francji w lutym i lipcu. W modelu obliczeniowym uwzględniany jest transport ciepła na drodze promieniowania. Wyniki obliczeń porównywane są z wartościami z pomiarów. Różnice temperatur pomiędzy wartościami obliczonymi i zmierzonymi nie przekraczają 1,5 °C.

Zagadnieniom związanym z budową ogólnego modelu umożliwiającego symulację schładzania żywności w powietrzu poświęcona jest praca [4] L.A. Companone, S.A Giner, R.H. Maschroni. Autorzy do budowy modelu wykorzystują ogólne równanie bilansu energii i masy. Równanie to uprościli dla założonych kształtów schładzanych ciał (nieskończona płyta, nieskończony walec, kula). Dla wymienionych geometrii określono warunki brzegowe, korzystając miedzy innymi z warunków symetrii. W obliczeniach przyjęto, iż współczynnik wnikania ciepła zależny jest zarówno od składowej konwekcyjnej jak i od składowej radiacyjnej.

Do analizy przyjęto dwa przypadki:

- podczas schładzania powierzchnia ciała jest zwilżona,
- podczas schładzania powierzchnia ciała zwilżona jest sporadycznie.

Do rozwiązania opracowanego układu równań zastosowano metodę Cranka-Nicolsona.

Wykonany program poddano walidacji. Do analizy przyjęto, iż schładzane ciało ma kształt kuli o promieniu 0,03m.

Obliczenia wykonano dla następujących danych wejściowych:

- temperatura początkowa 25°C,
- prędkość przepływu powietrza 2 m/s,
- współczynnik wnikania ciepła 21,57 W/(m²K),
- wilgotność względna 70%,
- temperatura powietrza 0 °C.

Parametry ciała stałego przyjęto takie, jak wartości średnie dla jabłek:

- przewodność cieplna 0,5626 W/(mK),

- ciepło właściwe 3751,79 J/(kgK),
- gęstość 864,16 kg/m3.

W obliczeniach każdą z kul dyskretyzowano 11 punktami odległymi o $\Delta r = 0,003$ m, krok czasowy wynosił $\Delta t = 60$ s.

Wyniki z obliczeń porównane z wartościami zmierzonymi wykazały dobrą zgodność.

2.2. Charakterystyka własnego modelu obliczeniowego

Po wnikliwej analizie przydatności programów komercyjnych i autorskich w sposób świadomy zrezygnowano z tych pierwszych do wyznaczania temperatury ładunku w czasie transportu, gdyż niemożliwe jest wniknięcie w ich strukturę i przystosowanie do specyficznych warunków panujących w nadwoziu chłodniczym. Shi, Da-Wen Sun. The analyses were done for the chamber being not filled with the load.

The process of the heat transfer between the wall and the packed load is considered in the work [9] by O. Laguerre, S. Ben Amara, D. Flick. This problem is solved with the use calculation and experimental methods.

Temperature changes of frozen food placed on the palletes in cardboard boxes depending on the ambient temperature were analised in the work [10] by J. Moureh and E. Derens. Calculations were carried out for ambient temperatures occurring in France in February and July. The heat transport on the radiation path is taken into account in the calculation model. The calculation results are compared with the measurements values. The temperature differences between the calculation and measurement values do not exceed 1.5 °C.

The work [4] by L.A. Companone, S.A Giner, R.H. Maschroni discusses problems connected with the construction of the general model enabling the simulation of food cooling with air. The authors use the general equation of the energy and mass balance for the construction of the model. They simplified the equationfor the assumed shapes of the cooled objectes (infinite plate, infinite cylinder, sphere). For the mentioned geometries they determined the boundary conditions using, among others, symmetry conditions. They assumed in the calculations that the convective heat transfer coefficient depends both on the convective component and on the radiation component.

- The following two case were assumed for the analysis:
- the surface of the object is wetted during cooling,
- the surface of the object is occasionally wetted during cooling.

In order to solve the elaborated system of equations the Crank-Nicolson method was used.

The executed programme was subjected to validation. For the analysis, they assumed that the shape of the cooled object is a sphere of the radius 0.03m.

The calculations were carried out for the following input data:

- initial temperature 25°C,
- airflow speed 2 m/s,
- convective heat transfer coefficient 21.57 W/(m²K),
- relative humidity 70%,
- air temperature 0 °C.

Parameters of the solid were taken as for mean values for apples:

- thermal conductivity 0.5626 W/(mK),
- specific heat 3751.79 J/(kgK),
- density 864.16 kg/m³.

In calculations, each sphere was digitized with 11 points distanced of Δr =0.003m, the time step was Δt =60s.

The calculation results compared with the measured values showed good conformity.

2.2. Characteristics of own calculation model

After deep analysis concerning usefulness of commercial and author's programmes, they intentionally resigned of the first ones designed for the load temperature determination during transport as it is impossible to penetrate their structure and to adapt to special conditions taking place in the refrigeration body. W Zakładzie Maszyn Spożywczych i Transportu Żywności Politechniki Poznańskiej stworzono kod umożliwiający określenie rozkładu temperatury w transportowanym ładunku i cyrkulującym w nadwoziu powietrzu. Do budowy kodu przyjęto schemat koncepcyjny pokazany na rysunku 1.

W modelu obliczeniowym chłodniczego środka transportu uwzględniono:

- ścianki nadwozia o znanym współczynniku przenikania ciepła (k); temperatura powietrza otaczającego nadwozie wynosi (t_o),
- rzędy opakowań z ładunkiem rozmieszczone wzdłuż nadwozia w odstępach (δ₂),
- powietrze przepływające w kanałach wzdłuż ładunku; znana jest temperatura powietrza wpływającego (z agregatu chłodniczego) do przestrzeni ładunkowej oraz prędkość powietrza w każdym z kanałów.

Zasadniczo do matematycznego opisu wymiany ciepła w ładunku i w ścianach środka transportu wykorzystano równanie nieustalonego przewodzenia ciepła [14]:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q \tag{1}$$

gdzie: ρ - gęstość, c - ciepło właściwe, t - temperatura, τ - czas, λ - przewodność ciepłna, q - moc wew. źródła ciepła odniesiona do jednostki objętości, x,y - współrzędne położenia.

Warto w tym miejscu nadmienić, iż przewodność cieplna przemieszczanej żywności może ulegać zmianie wskutek zachodzących procesów fizyko-chemicznych związanych przykładowo z dojrzewaniem czy też psuciem. Dlatego też w równaniu (1) przyjęto, iż przewodność jest zmienna, chociaż w praktycznych obliczeniach trudno jest uwzględnić powyższy fakt, gdyż w literaturze np. [1] brak jest informacji o zmianach przewodności produktów spożywczych w procesie przechowywania i transportu.

Przy rozwiązywaniu zagadnień nieustalonego przepływu ciepła muszą być znane warunki brzegowe, które informują o wielkościach determinujących przebieg procesu na powierzchni (brzegu) ciała. W analizowanej sytuacji mogą wystąpić trzy rodzaje warunków brzegowych:

1. dany jest rozkład temperatury na powierzchni ciała,

$$t = t_B \tag{2}$$

2. dany jest rozkład strumieni ciepła na powierzchni ciała (warunek brzegowy drugiego rodzaju występuje na powierzchni adiabatycznej oraz w płaszczyźnie symetrii $q_s = 0$,)

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = q_{x} \tag{3}$$

The Division of Food Machines and Transport of Poznań University of Technology created a code enabling to determine the temperature distribution in the transported load and air circulating in the body. For the code building the theory scheme shown in the figure 1 was assumed.

The calculation model of the transport mean covers as follows:

- body walls of the known heat transfer coefficient (k); the body ambient temperature is (t_o) ,
- rows of packs with the load distributed along the body at intervals (δ₂),
- air overflowing in passages along the load; the temperature of air flowing-in (from the refrigerated unit) to the load space and air velocity in each passage are known.

Fundamentally, for the mathematic description of the heat transfer in the load and in the walls of the transport mean the following equation of the transient heat conduction was applied [14]:

$$DC\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q \tag{1}$$

where: ρ - density, *c* - specific heat, *t* - temperature, τ - time, λ - thermal conductivity, *q* - rate of internal heat generation, *x*,*y* - position coordinates.

It is worth mentioning here that thermal conductivity of the relocated foodstuff can change in the effect of occurring physical chemistry processes caused, for example, by ripening or spoilage. For this reason, in the equation (1) they assumed that conductivity is a variable, although in practice, in calculations it is difficult to take the above fact into account as in literature, e.g. [1] there is no information on changes of foodstuff products conductivity during the storage and transport process.

When solving problems of transient heat overflow the boundary conditions have to be known as they inform about values determining the process course on the surface of the object. In the analysed situation, three kinds of boundary conditions can occur:

1. there is given the temperature distribution on the surface of the object,

$$t = t_{R} \tag{2}$$

2. there is given the heat flux distribution on the surface of the object (the boundary condition of the second kind occurs on the adiabatic surface and in the symmetry plane $q_s=0$,)

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = q_{\lambda} \tag{3}$$



Rys. 1. Model obliczeniowy chłodniczego środka transportu [5]

Fig. 1. Calculation model of refrigerated transport mean [5]

gdzie: $\partial t/\partial n$ –gradient temperatury w kierunku zewnętrznej normalnej do powierzchni, q_s – strumień ciepła dopływający do powierzchni

3. dana jest temperatura t_F strugi płynu omywającego powierzchnię i współczynnik α wnikania ciepła

$$\alpha (t_F - t_S) = \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \tag{4}$$

W przypadku łącznej analizy przewodzenia i konwekcji należy uwzględnić oddziaływanie między ładunkiem i powietrzem. Dlatego też w modelu matematycznym zastosowano [5] dodatkowo ogólne równanie bilansu energii dla powietrza przepływającego w kanale:

$$\rho_{p}c_{p}S_{p}\left(\frac{\partial t_{p}}{\partial \tau}+u_{p}\frac{\partial t_{p}}{\partial s}\right)=\frac{\partial}{\partial s}\left(-\lambda_{p}S_{p}\frac{\partial t_{p}}{\partial s}\right)-\alpha_{r}p\left(t_{p}-t_{s}\right)$$
(5)

gdzie: S_p – pole przekroju kanału w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu powietrza, *p*- wysokość kanału, t_s – temperatura ścianki u_p – prędkość powietrza, α_r – współczynnik przejmowania ciepła, t_p – temperatura powietrza (indeks "*p*" oznacza powietrze w kanale)

Powyższa zależność może być stosowana w przypadku, gdy wymiary kanału spełniają następujący warunek (długość/szerokość >> 1). Po przekształceniach równanie (5) przyjmuje postać:

$$\rho_{p}c_{p}\delta_{p}\left(\frac{\partial t_{p}}{\partial \tau}+u_{p}\frac{\partial t_{p}}{\partial s}\right)=\frac{\partial}{\partial s}\left(\lambda_{p}\delta_{p}\frac{\partial t_{p}}{\partial s}\right)-\alpha_{r}\left(t_{p}-t_{s}\right) \quad (6)$$

gdzie: δ_n - szerokość kanału.

Przedstawione równania posłużyły do budowy własnego kodu obliczeniowego. W kodzie tym do rozwiązania otrzymanego układu równań wykorzystano metodę elementów skończonych. Stworzony kod uwiarygodniono w sposób eksperymentalny. Proces walidacji opisano w pracy [2]. Na rysunku 2 pokazano zgodność wyników uzyskanych z programu obliczeniowego i eksperymentu fizycznego w tych samych punktach ładunku (wartości z pomiarów poprzedzone są literami "cz", a z obliczeń słowem "punkt").

3. Charakterystyka narzędzi wspomagających doskonalenie nadwozi do przewozu żywności

Ogólne wymagania, jakie muszą spełniać nadwozia, aby można było transportować w nich żywność szybko psującą się w sposób bezpieczny dla konsumenta określone są w umowie ATP.

W tym celu stworzono, w ramach grantu KBN 5T7B02022 pt. "Fizyczne podstawy diagnostyki układów termoizolacyjnych do transportu żywności", kompleksowy system oceny nadwozi do przewozu żywności.

Diagnoza może służyć:

- klasyfikacji nadwozia zgodnie z wymogami umowy ATP,
- ocenie eksploatowanego nadwozia w celu określenia jego stanu.
- określeniu słabych miejsc w celu:
- doskonalenia nowej konstrukcji,
- planowania remontu,
- ocenie wykonanej naprawy.

Optymalne sekwencje badań cząstkowych umożliwiające pełną realizację celu diagnozy przedstawiono w pracy [3] będącej sprawozdaniem ze wspomnianego grantu. where: $\partial t/\partial n$ – temperature gradient in the direction of normal external to the surface, q_s – heat flux flowing to the surface

3. there is given the temperature t_F of the liquid stream flowing on the surface and the convective heat transfer coefficient α

$$\alpha \left(t_{F} - t_{S} \right) = \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \tag{4}$$

In case of total analysis of conduction and convection, the interaction between the load and air should be taken into account. That is why in the mathematic model, they applied [5] the additional, general equation of the energy balance for air flowing in the pasage:

$$\rho_{\rho}c_{\rho}S_{\rho}\left(\frac{\partial t_{\rho}}{\partial \tau}+u_{\rho}\frac{\partial t_{\rho}}{\partial s}\right)=\frac{\partial}{\partial s}\left(-\lambda_{\rho}S_{\rho}\frac{\partial t_{\rho}}{\partial s}\right)-\alpha_{s}p\left(t_{\rho}-t_{s}\right)$$
(5)

where: S_p – the canal area in the perpendicular direction to the air movement, t_s – wall temperature u_p – air speed, α_r – heat transfer coefficient, t_p – air temperature, $S_p = \delta_p p$ – corss-section of the flow passage, p – thickness of the domain, (index "p" means: air in the passage),

The above equation can be applied when the passage dimensions meet the following condition (length/width>> 1). After rearranging the equation (5) has the following form:

$$\rho_p c_p \delta_p \left(\frac{\partial t_p}{\partial \tau} + u_p \frac{\partial t_p}{\partial s} \right) = \frac{\partial}{\partial s} \left(\lambda_p \delta_p \frac{\partial t_p}{\partial s} \right) - \alpha_p \left(t_p - t_s \right) \quad (6)$$

where: δ_p – width of the flow passage.

The presented equations were used for building the own computer code. In this code the finite elements method was used for solving the obtained system of equations. The created code was made valid in the experimental way. The process of validation was described in the work [2]. The figure 2 shows the conformity of results obtained on the basis of the computer programme and the physical experiment in the same load points (the measurements values are preceded with the letters "cz", and the calculation ones with the word "punkt" ["point"]).

3. Characteristics of tools helpful in improving foodstuff transport bodies

General requirements concerning the bodies which have to be met for the perisable foodstuff transport to be safe for the consumer are determined in the agreement ATP.

For this purpose within the grant KBN 5T7B02022 entitled "Phisical bases of diagnostics concerning heat-insulating systems for foodstuff transport" a complex system of evaluation for the foodstuff transport bodies was created.

- Diagnisis can be used to:
- classify bodies in accordance with the requirements of the agreement ATP,
- evaluate the used body in order to determine its condition,
- define weak points in order to:
 - improve new design,
- plan a repair,
- evaluate the performed repair.

Optimum sequences of partial examinations enabling complete achievement of the purpose of the diagnosis are presented



Rys. 2a.Temperatury ładunku w wybranych punktach podczas schładzania

Fig. 2a.Load temperatures in selected points during cooling down



Na rysunku 3 przedstawiono przykładowo działania diagnostyczne przy doskonaleniu nowej konstrukcji.

Proces doskonalenia polega miedzy innymi na eliminacji słabych miejsc tzw. "mostków cieplnych". Lokalizacji mostków cieplnych, po wytworzeniu różnicy temperatur pomiędzy wnętrzem nadwozia a otoczeniem, najlepiej dokonać przy użyciu kamery termowizyjnej. Analizując termogramy można określić ilość mostków, powierzchnię każdego z mostków oraz ich położenie. Jeśli powierzchnia A, i-tego mostka zawiera się w kole o powierzchni A_{kr} , to można przyjąć, iż mostek ma charakter punktowy. Oceny ilościowej (lokalny współczynnik przenikania ciepła) dla tegoż mostka można dokonać metodą ścianki pomocniczej. Wartość powierzchni A zależna jest od średnicy czujnika typu "ścianki pomocniczej". Jeśli wzmiankowana relacja nie zachodzi $(A \subset A_{in})$, to do oceny mostka należy wykorzystać skrzynkę grzejną.

Powyższą analizę należy przeprowadzić dla wszystkich wykrytych mostków, spełnienie tegoż warunku oznacza, iż prawdziwa jest relacja i = I, gdzie i kolejny numer analizowanego







Rys. 2b. Temperatury ładunku w wybranych punktach podczas schładzania

Fig. 2b. Load temperatures in selected points during cooling down

Rys. 2c. Temperatury ładunku w wybranych punktach podczas schładzania Fig. 2c. Load temperatures in selected points during cooling down

in the work [3] being a report of the mentioned grant.

The figure 3 presents exemplary diagnostic actions when improving a new design.

The process of improvement, among others, lies in the elimination of weak points, so called heat leakage bridges. The best way to localize the thermal bridges is to use an infrared camera when the temperature difference between the body inside and the environment takes place. Analysing the thermograms one can determine the number of bridges, the area of each bridge and their location. If the area A of ith bridge is contained in the circle of the area $A_{\mu r}$, it can be assumed that the bridge is of pointwise character. The quantitative evaluation (local heat transfer coefficient) for this bridge can be made with the auxiliary wall method. The value of the area A depends on the diameter of the "auxiliary wall" type sensor. If the mentioned situation does not occur $(A_i \subset A_{ir})$, one can use the thermal box for the evaluation of the bridge.

The above analysis should be carried out for all the found bridges; when this condition is met it means that relation i = I, where i – the consecutive nummostka, I – najwyższy numer przypisany mostkowi. Po dokonaniu analizy ilościowej wszystkich zarejestrowanych mostków należy ustalić przyczynę ich powstania. W procesie tym pomocny jest projekt nadwozia oraz opis technologii wykonania elementów składowych nadwozia i ich montażu. Wykonana analiza powinna określić przyczyny powstania mostków, tzn. czy są one spowodowane:

- koniecznymi (np. ze względów wytrzymałościowych) rozwiązaniami konstrukcyjnymi,
- błędami konstrukcyjnymi, np. złe zaprojektowanie wzmocnień pod agregat,
- błędami technologicznymi (np. wystąpienia niedolewek pianki w procesie spieniania z powodu niewykonania odpowietrzników w okładzinach płyt).

Po usunięciu mostków będących następstwem błędów konstrukcyjnych i technologicznych należy wykonać wyznaczenie wartości globalnego współczynnika przenikania ciepła "*k*" metodą dokładną. Jeśli wartość współczynnika "*k*" nie przekracza wartości granicznej (k_{gr}), to nadwozie otrzymuje potwierdzenie klasy. W przeciwnym razie należy sformułować propozycję zmian konstrukcji np. pogrubienia dachu lub podłogi.

Z powyżej przedstawionych rozważań wynika, iż nadwozia te muszą cechować się określoną izolacyjnością cieplną, której miarą jest globalny współczynnik przenikania ciepła.

Globalny współczynnik przenikania ciepła "k" wyznaczany jest w stanie ustalonym z zależności (7):

$$k = \frac{Q}{A_{sr} \mid t_w - t_z \mid} \tag{7}$$

gdzie: k – globalny współczynnik przenikania ciepła, Q – ciepło przenikające przez ściany, dach, podłogę i drzwi nadwozia, A_{sr} – średnia powierzchnia nadwozia obliczana z wzoru (8), t_z – temperatura zewnętrzna, t_w – temperatura wewnętrzna,

$$A_{sr} = \sqrt{A_z A_w} \tag{8}$$

gdzie: A_z – powierzchnia zewnętrzna nadwozia, A_w – powierzchnia wewnętrzna nadwozia.

Procedury wyznaczania współczynnika "*k*" opisane są w umowie ATP. Praktyczny sposób wyznaczania przedstawiono w monografii [3].

W zależności od wartości globalnego współczynnika przenikania ciepła wyróżnia się dwie klasy nadwozi izotermicznych:

- nadwozia izotermiczne z izolacją wzmocnioną k ≤ 0,4W/ (m²K),
- nadwozia izotermiczne z izolacją normalną $k \leq 0.7 \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Wyznaczaniem wartości wspomnianego współczynnika zajmuje się sieć upoważnionych laboratoriów spełniających wymagania sformułowane przez Grupę Roboczą WP-11 ONZ i Podkomisję D2/3 Międzynarodowego Instytutu Chłodnictwa.

- W Polsce upoważnione laboratoria znajdują się w:
- Centralnym Ośrodku Chłodnictwa w Krakowie,
- Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej.

Wymienione powyżej laboratoria dokonują również wyznaczenia wydajności chłodniczej lub grzewczej urządzeń kształtujących kryptoklimat w nadwoziu.

Globalny współczynnik przenikania ciepła stanowi uśrednioną po powierzchni wartość lokalnych współczynników przenikania ciepła. Dążąc do minimalizacji wartości współczynnika ber of the analysed bridge, I – the highest number of the bridge, is true. After the quantity analysis of all the recorder bridges the reason of their occurrence should be established. In this process the body design and the description of the executive technology of the body components and their assembly are very useful. The performed analysis should determine the reasons of the occurrence of bridges, i.e. if they are caused by:

- necessary (for example, for strength reasons) design solutions,
- design errors, for example, incorrect design of reinforcement for the unit,
- technology errors (for ex., misrun foam casting in the process of foaming in the effect of the lack of vents in the plate lining).

After the elimination of bridges being the effect of design and technology errors the determination of the value of the overall heat transfer coefficient "k" should be made with the use of the precise method. If the value of the coefficient "k" does not exceed the boundary value (k_{gr}) , the class of the body is confirmed. Otherwise, the proposal of the design changes, for ex. roof or floor thickening, should be prepared.

The above presented considerations show that the bodies must have certain thermal insulating power the measure of which is the overall heat transfer coefficient.

The overall heat transfer coefficient "k" is determined in a steady state in the equation (7):

$$k = \frac{Q}{A_{sr} \mid t_w - t_z \mid} \tag{7}$$

where: k – overall heat transfer coefficient, Q – heat transfer through the body walls, roof, floor and doors, A_{sr} – mean body surface calculated from the formula (8), t_z – external temperature, t_w – internal temperature,

$$A_{sr} = \sqrt{A_z A_w} \tag{8}$$

where: A_z – external surface of the body, A_w – internal surface of the body.

Procedures for the determination of the coefficient "k" are described in the agreement ATP. A functional way for the determination was presented in the monograph [3].

Depending on the value of the overall heat transfer coefficient there are two classes of the insulated bodies:

- insulated bodies with reinforced insulation $k \leq 0.4$ W/(m²K),
- insulated bodies with normal insulation $k \le 0.7 \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$.

A net of authorised laboratories meeting the requirements defined by the United Nations Working Group WP-11 and Subcommittee D2/3 of the International Institute of Refrigeration.

- In Poland the authorised laboratories are in:
- Research Refrigeration Centre in Cracow,
- Institute of Machines and Motor Vehicles of Poznań University of Technology.

The above mentioned laboratories also determine the refrigerating capacity or calorific effect creating the body cryptoclimate.

The overall heat transfer coefficient is the averaged value, after the surface, of the local heat transfer coefficients. Aiming at the minimization of the heat transfer coefficient value, the heat leakage bridges should be eliminated at first. The mentioned bridges cause not only the increase of overall heat transfer

przenikania ciepła w pierwszej kolejności należy eliminować mostki ciepła. Wspomniane mostki powodują nie tylko wzrost wartości globalnego współczynnika przenikania ciepła, ale także są miejscami, w których mogą rozwijać się mikroorganizmy zakażające transportowaną żywność. Problem zakażania żywności przez rozwijające się mikroorganizmy jest szczególnie istotny w przypadku cystern używanych do przewożenia mleka. Na powyższy fakt zwrócono uwagę w monografii [18], w rozdziale poświęconym cysternom.

Do identyfikacji miejsc, w których występują mostki ciepła najwygodniej jest wykorzystać technikę termowizyjną. Zdjęcia termowizyjne umożliwiają nie tylko wskazanie miejsca występowania mostka, ale także jego powierzchnię. Przykładowe zdjęcie termowizyjne drzwi tylnych nadwozia izotermicznego pokazano na rysunku 4.

Powyższe zdjęcie wykonano od strony zewnetrznej nadwozia, przy temperaturach wewnątrz nadwozia 32,5 °C a na zewnątrz nadwozia 7, 5 °C.

Należy w tym miejscu nadmienić, iż obszerny katalog mostków cieplnych przedstawiono w pracach [3, 18].

Metoda termowizyjna pozwala wskazać miejsca występowania mostków cieplnych, jednakże nie umożliwia wyznaczenia wartości lokalnych współczynników przenikania ciepła.

Do wyznaczenia wartości lokalnych współczynników przenikania ciepła w pracy [3] rekomendowane są dwie metody:

- ścianki pomocniczej dla mostków o małej powierzchni,
- osłoniętej skrzynki grzejnej dla mostków o większej powierzchni.

Ścianka pomocnicza musi być znacznie cieńsza niż ścianka, dla której wyznaczany jest strumień przepływającego ciepła. W sposób poglądowy ideę pomiaru przy użyciu wspomnianych czynników pokazano na rysunku 5.

(9)

W układach pomiarowych wykorzystujących czujniki typu ścianka pomocnicza wymagane jest spełnienie warunku (9):

$$\Delta t << (t_{12} - t_{11})$$

Spełnienie tegoż warunku oznacza, iż czujnik w sposób nieistotny zakłóca przepływ ciepła przez badany element.

Wspomniany typ czujników jest produkowany przez wyspecjalizowane firmy. Przykładowe rozwiązanie czujników pokazano na zdjęciu zamieszczonym na rysunku 6.

Idee pomiarów przy użyciu skrzynki grzejnej, w oparciu o informacje zawarte w normie coefficient value but they are also the places where micro-organisms infecting the transported foodstuff can develop. The problem of infecting food by expanding micr-organisms is specially important in case of tanks used to transport milk. The above fact was pointed out in the monograph [18], in the chapter devoted to tanks.

In order to identify places where the thermal bridges occur, it is most convenient to use the infrared technology. The infrared photos enable not only to indicate places where the bridge can occur but also determine its surface. The exemplary infrared photos of the back door of the insulated body are shown in fig. 4.

The above photo was taken from outside the body at temperatures: inside the body 32.5 °C and outside the body 7.5 °C.

18,0°C

18

16

14

12

10

6.0°C

It should be pointed out here that a wide-ranging catalogue of heat leakage bridges was presented in the works [3, 18].

The infrared method allows

to show places of heat leakage bridges occurrence, however, it does not allow to determine the local heat transfer coefficient values.

The work [3] recommends two methods for the determination of the local heat transfer coefficient values, namely:

- auxiliary wall for bridges of small surface.
 - shielded thermal box for bridges of larger surface.

The auxiliary wall must be

much thinner than the wall for which the flowing heat flux is determined. The idea of the measurement with the use of the mentioned elements is shown, in a pictorial way, in the figure 5

> In the measurement systems where sensors of the auxiliary wall type are applied the following condition (9) must be met.

$$\Delta t \ll (t_{12} - t_{11})$$
 (9)

Meeting of this condition means that the sensor inessentially disturbs heat transfer through the tested element.

The mentioned type of sensors is manufactured by specialized firms. The exemplary sensor solution is shown in the photo in the figure 6.

The idea of measurements with the use of the thermal box on the basis of information contained in the standard PN EN



Rys. 4. Zdjęcie termowizyjne drzwi tylnych nadwozia izotermicznego

Fig. 4. The infrared photo of of the back door of the insulated body



Fig. 5. Determination of the flowing heat flux with the auxiliary wall method: 1-heat insulating system, 2-sensor of auxiliary wall type, t_{f} , t_{f} -temperatures on walls of heat insulating system, Δt temperature drop on the auxiliary wall, q-flowing heat flux

NAUKA I TECHNIKA

PN EN ISO 8990:1998 [12], ilustruje rysunek 7.

Pomiar przeprowadza się w warunkach ustalonego przepływu ciepła. Temperatura we wnętrzu skrzynki pomiarowej t_{w1} ma taką samą wartość jak temperatura t_{w2} w skrzynce zewnętrznej osłonowej. Równość temperatur $t_{w1} = t_{w2}$ zapewnia, iż przez ściany skrzynki wewnętrznej nie następuje przepływ ciepła. Całkowite ciepło wygenerowane w skrzynce wewnętrznej przepływa przez badany fragment układu termoizolacyjnego.



Rys. 6. Czujnik pomiarowy typu ścianka pomocnicza Fig. 6. The mesurement sensor of the auxiliary wall type



Skrzynkę ochronną w przypadku badanego nadwozia izotermicznego może stanowić samo nadwozie, tak jak to pokazano na rysunku 8.



Skrzynkę pomiarową projektuje się tak, aby zminimalizować strumienie ciepła:

- przepływające przez ścianki skrzynki,
- przepływające równolegle do badanej powierzchni.

Pierwszy z wymienionych strumieni można zminimalizować w dwojaki sposób:

- stosując do budowy skrzynki pomiarowej materiały o dużym oporze cieplnym,
- minimalizując różnicę temperatur pomiędzy przestrzenią utworzoną przez skrzynkę pomiarową i nadwoziem stanowiącym skrzynkę ochronną.

Drugi z wymienionych strumieni można zmniejszyć, jeśli:

 stosunek powierzchni ograniczonej przez skrzynkę badawczą jest znacznie mniejszy niż powierzchni badanej ściany, ISO 8990:1998 [12] is illustrated in the figure 7.

The measurement is to be carried out in the steady state heat transfer conditions. The temperature inside the the measurement box t_{w1} has the same value as the temperature t_{w2} in the external insulating box. The equal temperatures $t_{w1} = t_{w2}$ ensure that the thermal flow does not occur through the walls of the internal box. The total heat generated in the internal box flows through the tested fragment of the heat-insulating system.

- Rys. 7. Układ pomiarowy z osłoniętą skrzynką grzejną: 1-badany element, 2-wewnętrzna skrzynka grzejna, 3-zewnętrzna skrzynka grzejna, 4-wentylator, 5- czujnik temperatury, 6-grzejnik o regulowanej mocy, t_{wl}-temperatura w wewnętrznej skrzynce grzejnej, t_{w2}-temperatura w zewnętrznej skrzynce grzejnej, t₀temperatura otoczenia
- Fig. 7. The measurement system with the shielded thermal box: 1-tested element, 2-internal thermal box, 3-external thermal box, 4-fan, 5- temperature sensor, 6-heater of adjustable power, t_{wl} temperature in the internal thermal box, t_{w2} -temperature in the external thermal box, t_{o} -ambient temperature

In case of the tested insulation body the protecting box can be the body itself as it is shown in the figure 8.

- Rys. 8. Układ do pomiaru współczynnika przenikania ciepla 1-nadwozie (naczepa), 2-skrzynka grzejna, 3-grzejnik, 4-wentylator, 5-czujnik, t_w-temeratura wewnątrz skrzynki grzejnej, t_{w2}- temperatura we wnętrzu nadwozia, t₀-temperatura otoczenia
- Fig. 8. The system for the measurement of the heat transfer coefficient, 1-body (semi trailer), 2-thermal box, 3-heater, 4-fan, 5-sensor, t_{w1} -temerature inside the thermal box, t_{w2} - temperature inside the body, t_0 -ambient temperature

The measurement box is designed so as to minimize the heat fluxes:

- flowing through the box walls,
- flowing in parallel to the tested surface.

The first of the mentioned fluxes can be minimized in one of the bellow two ways:

- applying for the construction of the measurement box, materials of high heat resistance,
- minimizing the temperature difference between the space created by the measurement box and the body being the protecting box.

The second of the mentioned fluxes can be decreased, when:

- the ratio of the area restricted by the test box is much smaller than in case of the surface of the tested wall,

 stosunek powierzchni ograniczonej przez skrzynkę grzejną do obwodu tej powierzchni ma dużą wartość.

W przestrzeni skrzynki pomiarowej, jak i skrzynki ochronnej winno być zachowane jednorodne pole temperatur. Uzyskuje się to przez zainstalowanie w skrzynce pomiarowej jak i w nadwoziu wentylatorów. Sprawdza się to przez umieszczenie czujników temperatury.

Czujniki temperatury powinny być umieszczone w odległości nie mniejszej niż 0,1 m od ścianek, tak aby znajdowały się poza obszarem termicznej warstwy przyściennej. Skrzynkę grzejną przedstawiono na zdjęciu zamieszczonym na rysunku 9.

Nadwozia do przewozu żywności winny być szczelne i ograniczać:

- wnikanie zanieczyszczeń z otoczenia.
- wymianę ciepła na drodze infiltracji powietrza.

Zbudowany w Politechnice Poznańskiej układ pomiarowy do badania szczelności nadwozia powstał w oparciu o wytyczne zawarte w normie PN-EN 13829 [13].

Układ pomiarowy do badania szczelności nadwozi izotermicznych przedstawiono na rysunku 10.

Zastosowanie normy miało na celu wykorzystanie metod badania szczelności budynków do badania szczelności komór chłodniczych zarówno stacjonarnych, jak i samochodowych.

Norma PN-EN 13829 [13] ogólnie określa, iż urządzenie wprowadzające powietrze w ruch ma umożliwić wytworzenie określonego zakresu wartości

nadciśnienia i podciśnienia w stosunku do otoczenia oddzielonego obudową. System wprowadzający w ruch powinien zapewnić stały przepływ powietrza przy każdej różnicy ciśnień w czasie niezbędnym do wykonania odczytów strumienia przepływu powietrza. Jako urządzenie wprowadzające powietrze w ruch wykorzystano wentylator.

Z uwagi na małe wartości badanej różnicy ciśnień zastosowano do pomiarów U-rurkę. Wymieniony przyrząd spełnia wymogi normy, gdyż umożliwia pomiar ciśnienia z dokładnością ± 2 Pa w zakresie od 0 Pa do 60 Pa.

Do pomiaru strumienia przepływu powietrza zastosowano zwężkę pomiarową typu kryza o średnicy wewnętrznej *d*



Rys. 9. Widok wnętrza skrzynki grzejnej Fig. 9. View of the thermal box inside

- the ratio of the surface restricted by the thermal box to the circuit of the surface has a high value.

In the space of the measurement box and the protecting box the temperature field should be maintained as homogenous. It can be achieved by installing fans in the measurement box and in the body. This can be checked by mounting the temperature sensors.

The temperature sensors should be located in the distance not smaller than 0.1 m from the walls so as to be outside the thermal boundary layer. The thermal box is presented in the photo shown in the figure 9. the nearsurface layer.

> The bodies for the foodstuff transport should be tight and should keep to minimum:

> - impurity penetration from the environment,

- heat transfer through air infiltration.

The measurement system for testing the body tightness was built in Technical University in Poznan on the basis of guidelines contained in the standard PN-EN 13829 [13].

The measurement system for testing the insulation body tightness is presented in the figure 10.

The aim of the application of the standard was to use methods for testing the buildings tightness to test the refrigeration chambers.

The standard PN-EN 13829 [13] determines, in general, that the apparatus putting air in motion is to enable the creation of the defined values range of overpressure and underpressure in relation to

environment separated with the casing. The system which is putting in motion should ensure a constant air flow at each pressure difference and in time being necessary to make readings of the air flow flux. As the apparatus putting air in motion the fan was used.

Due to small values of the tested pressure difference the U-pipe was used for the measurements. The mentioned device meets the requirements of the standard as it makes possible the measurement of pressure with exactness ± 2 Pa in the range from 0 Pa to 60 Pa.

In order to measure the air flow flux they applied a measuring reducer of the orifice type of the inside diameter d = 0.025



Rys. 10.Schemat stanowiska do pomiaru szczelności komory chłodniczej

Fig. 10. The scheme of the stand for the measurement of the refrigerated chamber = 0,025 m i średnicy zewnętrznej D = 0,070 m (przewężenie zwężki wynosi β = 0,36). Instalację wykonano z rur PCV.

4. Podsumowanie

Przedstawione w artykule prace zrealizowane w Zakładzie Maszyn Spożywczych i Transportu Politechniki Poznańskiej zostały wdrożone do praktyki gospodarczej. Program obliczeniowy posłużył między innymi do rozstrzygania kwestii spornych w relacji przewoźnik – załadowca – towarzystwo ubezpieczeniowe. Program ten jest także bardzo pomocny w procesie szkolenia przewoźników, gdyż pozwala modelować rzeczywiste sytuacje, jakie mogą wystąpić w trakcie przemieszczania żywności, w szczególności na dalekie odległości.

Natomiast procedury wspomagające doskonalenie nadwozi izotermicznych znalazły zastosowanie w firmach je wytwarzających i serwisujących. Niektóre z tych firm wyrażają pogląd, iż dzięki zastosowaniu tych procedur wzrosła ich konkurencyjność. m and the outer diameter D = 0.070 m (the reducer contraction is $\beta = 0.36$). The installation was made of PCV pipes.

4. Recapitulation

The works presented in this paper and carried out at The Division of Food Machines and Transport of Poznań University of Technology were applied in practise. The calculation programme was used, among others, to settle disputable matters in relations: carrier – shipper – insurance company. The programme is also very useful during the training process designed for carriers as it allows to model the real situations which can take place during the food transport, especially for long distances.

On the other hand, procedures aiding the improvement of the insulated bodies were applied in firms producing them and servicing. Some of the firms express the opinion that their competitiveness grew due to the application of the procedures.

5. Literatura

- 1. ASHRAE Handbook, 1994, Refrigeration. Systems and applications.
- 2. Bieńczak K. Modelowanie warunków termicznych chłodniczego przewozu żywności. Rozprawy nr 434. Poznań: Wydawnictwo PP, 2009.
- 3. Bieńczak K (red.). Fizyczne podstawy diagnostyki układów termoizolacyjnych do transportu żywności, Poznań: ITE, 2004.
- 4. Campanone L A, Giner S A, Mascheroni R H. Generalized model for the simulation of food refrigeration. Development and validation of the predictive numerical method. International Journal of Refrigeration 2002; 25: 975-984.
- Comini G, Cortella G, Saro O. Finite element Analysis of coupled conduction and convection in refigerated transport. International Journal of Refrigeration 1995; 18(2): 123 – 131.
- 6. Estradu-Flores S. Safe temperature regulations during the road transport of fresh cuts. Washington, D.C: International Congress of Refrigeration, 2003.
- 7. James S. The Chill Chain "from Caracass to Consumer". Meat Science 1996; 43(8): 203-216.
- 8. Jing Xie, Xiao-Hua Qu, Jun-Ye Shi, Da-Wen Sun. Effects of design parameters on flow and temperature fields of a cold store by CFD simulation. Journal of Food Engineering 2006; 77: 355-363.
- 9. Laguerre O, Ben Amara S, Flick D. Heat transfer between wall and packed bed crossed by low velocity airflow. Applied Thermal Engineering 2006; 26.
- 10. Moureh J, Derens E. Numerical modelling of the temperature increase in frozen food packaged in pallets in the distribution chain. International Journal of Refrigeration 2000; 23: 540-552.
- 11. Moureh J, Flick D. Airflow pattern and temperature distribution inatriptical refrigerated truck with palets. International Journal of Refrigeration 2004; 27 (5).
- 12. PN-EN ISO 8990, 1998 Izolacja cieplna. Określenie właściwości związanych z przenikaniem ciepła w stanie ustalonym. Metoda kalibrowanej i osłoniętej skrzynki grzejnej.
- 13. PN-EN 13829, Właściwości cieplne budynków. Określenie przepuszczalności powietrznej budynków, Metoda pomiaru ciśnieniowego z użyciem wentylatora.
- 14. Szargut J. Modelowanie numeryczne pól temperatury. Warszawa: WNT, 1992.
- 15. Tso C P, Yo S C M, Poh H J, Jolly P G. Experimential Study on the Heat and Mass Transfer Charasteristics in Refrigerated Truck. Internationl Journal of Refrigeration 2002; 25.
- Umowa o międzynarodowych przewozach szybko psujących się artykułach żywnościowych i o specjalnych środkach transportu przeznaczonych do tych przewozów. Dziennik Ustaw PRL, załącznik do numeru 49, poz. 254 z dnia 26 października 1984 roku.
- 17. Zertal-Menia N, Moureh J, Flick D. Modelisation simplifiee des coulements d'air dans un vehicule frigorifique. International Journal of Refigeration 2002; 25.
- 18. Zwierzycki W, Bieńczak K (red.). Pojazdy chłodnicze w transporcie żywności. Poznań: SYSTHERM D. Gazińska S.J., 2006.

Dr inż. Krzysztof BIEŃCZAK

Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechnika Poznańska ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska e-mail: krzysztof.bienczak@put.poznan.pl

OPTYMALNA ALOKACJA ZAPEWNIAJĄCA BEZPIECZEŃSTWO W UKŁADACH PROCESOWYCH OPARTA NA PRZEPŁYWACH SIECIOWYCH

NETWORK FLOW-BASED OPTIMAL ALLOCATION FOR SAFETY IN PROCESS SYSTEMS

Bezpieczeństwo stanowi w inżynierii procesowej czynnik krytyczny, o którym należy pamiętać podczas całego czasu eksploatacji układów procesowych. W niniejszym artykule przedstawiono nową metodę optymalnej alokacji zasobów, opartą na przepływach w sieci, mającą zapewnić bezpieczeństwo układów procesowych. Istniejące optymalne alokacje zasobów wspierające bezpieczeństwo opierają się na rozwiązaniach fizycznych (np. unowocześnianiu podstawowych elementów wyposażenia i wbudowywaniu nadmiarowości) nieodpowiednich dla układów procesowych, które ulegają czestym awariom. Takie rozwiązania pociągają za sobą konieczność częstych alokacji fizycznych, które poważnie zakłócają normalne działanie całego układu. Dodatkowo, metody fizyczne stosuje się tylko wtedy, kiedy uszkodzenia układu nawarstwią sie do pewnego stopnia. Stan układu procesowego w inżynierii chemicznej często ulega wahaniom z powodu wielu czynników, takich jak niekontrolowane uwolnienie energii czy użycie niejednolitych materiałów produkcyjnych. Częste wahania mogą prowadzić do awarii układu. Konieczna jest zatem umiejętność unikania akumulacji blędów poprzez kontrolę wahań i stabilizację stanu układu, co prowadzi do zapewnienia bezpieczeństwa układu procesowego. W niniejszej pracy przedstawiamy metodę optymalnej alokacji, opartą na przepływach w sieci, która umożliwia osiągnięcie powyższego celu. Wedle nowej metody, przepływy osiągalne konstruuje się na podstawie przepływów w sieci układu, stanu wyposażenia układu oraz wymagań procesu. Wzory rozwiązań dla zmiennych stanu konstruowanych przepływów osiągalnych dają wartości korygujące, które używane są do kontrolowania wahań systemu i stabilizacji jego stanu. Prezentowane studium przypadku demonstruje możliwe zastosowania i efektywność proponowanej metody.

Słowa kluczowe: przepływ w sieciach; przepływ osiągalny; optymalna alokacja; układ procesowy.

Safety is a critical factor to be considered throughout the entire lifetime of process systems in process engineering. This paper presents a novel optimal resource allocation method based on network flows for assuring the safety of process systems. Existing optimal resource allocations for safety mainly depend on physical ways (for example, updating core equipments, and incorporating redundancies), which are not suitable for process systems experiencing frequent malfunctions. As a result, frequent physical allocations are needed, which severely interrupt the normal operation of the entire system. In addition, the physical methods are applied only when system faults accumulate to some extent. The state of a process system in chemical engineering often dithers due to many factors such as uncontrollable energy release and inconsistent production of materials. The frequent dithering can lead to the system state, thus assuring the safety of the process system. In this paper, we propose a network flow-based optimal allocation method to achieve the above goal. Feasible flows will be constructed based on the system's network flows give the adjustment values, which are used to control the dithering of the system state. A case study is given to show the application and effectiveness of the proposed method.

Keywords: network flow; feasible flow; optimal allocation; process system.

1. Introduction

Recently, accidents have occurred frequently in large-scale industrial production, which brings the risk and loses in equipment, personnel casualty, and environment pollution. So, guaranteeing the safety production has become an urgent problem, and safety requirements are becoming very important in process systems. At present, plenty of research results have achieved the optimal allocation for the safety and reliability of complex systems. These optimal allocations have been carried out according to the system composition structure to find weak points ([5, 14]), in terms of component states to indentify an aging degree ([12-13]), or aiming at the special facts to adopt an effective strategy [5, 20, 27-28]. By analyzing research achievements, it will be easily discovered that these optimal allocations are implemented after the system has aged to some extent and will be disable. Most allocation actions are used to exchange old equipment for new ones. However, the physical change is not suitable for the frequent operation of the process system specifically. In addition, the aging of equipment is often caused by the dithering of system states. As well as existing research results are rarely considered effects of multi-medium flow changes (matter flows, energy flows, and control flows) to device conditions ([2, 19, 30]). The safety analysis shows that the dithering of the multi-medium flow often results in the instability and danger of using the system operation in practice. So, a novel optimal allocation based on network flows for process systems is presented to stabilize system states and reduce the risk for the system safety.

The network flow theory is widely applied in systems engineering such as energy transfers ([1, 18, 25]), traffic controls ([17, 22, 24, 26]) and so on. In applications, the network flow is used to obtain feasible solutions for system designs in the initial stage ([4, 6-9, 15-16, 23, 29]) and solve the maximal flow and minimal cost in the system running and maintenance stage ([3, 10-11, 21]). In the paper, a series of models based on network flows are constructed for the process system. The network cut and load balance principle is used to analyze flow states on the basics of the network model. The optimal function solving the maximal system safety and maximal network flow is set up to achieve optimal feasible flows. Labeling algorithm is adapted to allocate flows in the network, and many variables are introduced such as the adjustable quantity, requiring adjusting quantity, adjusting quantity and so on. In addition, presented methods have complementarities and extensibilities to existing allocation methods for the system safety.

2. Analysis and modeling

2.1. Overall analysis

The network flow model is set up firstly to carry out the optimal allocation of the system safety. The inflow and outflow through network nodes are analyzed and flow change laws are explored on the basis of this model. All inflows and outflows of nodes must be cooperated in networks to keep the system's normal work. The network cut principle is used to construct the feasible flow of the network. The purpose of optimal allocations is the maximal system safety and the maximal network flows. Network flow states are always monitored in practice. Network flow states will be adjusted according to requirements of feasible flows when they run out of the normal range. Some solution formulas are defined in the paper. All adjustment variables will be calculated according to those formulas. Allocation processes are accomplished by utilizing the labeling algorithm, so, the system may be stabilized under a balance environment and the safety.

2.2. Building network model

Some formal models for network flows must be constructed to achieve the optimal allocation for process systems' safety. The following definitions of modeling are:

Definition 1: A connected directed acyclic network graph is represented by G=(V, E), the node set is represented by V, and the edge set is represented by E. Formed network model is shown in fig. 1.



Fig. 1. Network model

Supposing v_i , $v_j \in V$ (i, j=1...n), then arbitrary edge e_{ij} denotes a connection between node v_i and node v_j , and there is $e_{ij} \in E$.

⁹ Definition 2: The real flux through edge e_{ij} is represented by f_{ij} , the most carrying capability of the edge e_{ij} is represented by h_{ij} , called the flux upper bound; the lowest carrying capability is represented by l_{ij} , called the flux lower bound. Then the following equation may be obtained:

$$l_{ii} \le f_{ii} \le h_{ii} \tag{1}$$

So, the network weight is often represented by f_{ij} , h_{ij} and l_{ij} . Definition 3: In network *G*, the outflow amount denoted by $\sum_{j \in V} f_{kj}$ from node *k* is called flow value *f* of node *k* denoted by f_k , which is represented by $f_k = \sum_{j \in V} f_{kj}$ also; similarly, the inflow amount denoted by $\sum_{k \in V} f_{kj}$ to node *k* is called flow value *f* of node *k* denoted by f_j , which is represented by $f_j = \sum_{k \in V} f_{kj}$.

Definition 4: In network *G*, for all middle nodes *m*, there is the relationship as the following formula:

$$\sum_{i \in V} f_{im} = \sum_{j \in V} f_{mj} \tag{2}$$

Definition 4 is expressed that the inflow amount equals the outflow amount for each processing unit (node). Taken fig. 2 as an example to illuminate the network flow condition, a pair figures are labeled in each edge. Here, this edge capability is expressed in the first figure and this edge flux is expressed in the second figure.



Fig. 2. Network flow

There are two characteristic nodes in a process system network, only one has the outflow, called the beginning node denoted by s; the other has the inflow, called the ending node or the final node denoted by t. All others simultaneously have the outflow and inflow, namely called the middle node denoted by m above stated. Beginning node s often represents the input equipment of the system, while ending node t often represents the output equipment. Middle node m represents different kinds of equipment such as reactors. All equipment is regarded as nodes of the system network, and the processing capacity of equipment represents the flux of this node.

For a complex network system, network performances are often considered in research. Maximal network flow and maximal system safety are concerned to solve the optimization for system safety in this paper, so, an objective function is constructed to achieve the maximal network flow and maximal system safety. Furthermore, this problem is converted into obtaining the maximal feasible flow of the network under constrained conditions of the system.

Definition 5: In network G, flow value f satisfied the maximal system safety and maximal network flow is called the optimal feasible flow.

In the following, this method will gradually get the optimal feasible flow.

2.3. Constucting feasible flows

In a real process system, some constraints are often set for the network flow, for example, the flux of each edge must be in between the maximal capability and the minimal capability, or each edge must have an upper bound and a lower bound. Under normal condition, all nodes working in the constraint range are thought to be safe. However, any abnormal dithering is caused when uncontrolled energies are released, non-uniform materials are processed, or device performances suddenly degrade. Then the dithering will result in that some nodes deviate from normal work states. Because of network characteristics of the system, the abnormal dithering is propagated to other adjacent nodes. Adjacent nodes are deflected normal work states; furthermore, the whole system will go out of the work. In the conditions, past physical allocation methods aren't obviously able to solve these kinds of problem. Therefore, a novel allocation method based on optimal feasible flow is adopted to stabilize system work states and guarantee the system safety. The network cut is used to construct the optimal feasible flow. The building process of the feasible flow is introduced as follows.

Define 6: For each edge e_{ij} , there are some constraints of upper bound t_{ij} lower bound b_{ij} , and relationship $b_{ij} \leq t_{ij}$. Supposing flow f_{ij} satisfies the following equation:

$$b_{ij} \le f_{ij} \le t_{ij} \tag{3}$$

Then, flow f satisfying formula (3) is called the feasible flow of this network.

In terms of equation (3), arbitrary edge has to work in the interval range, and has the upper constraint and lower constrain, which are basic function constraints of nodes composing the system. The feasible flow of system network has to exist if systems can normally operate. So, the network cut is used to analyze the conditions of feasible flow existence in the following.

For network G, arbitrary feasible flow f and arbitrary cut (S, \overline{S}) , there is the following held:

$$\sum_{\substack{i \in S \\ j \in \overline{S}}} b_{ij} - \sum_{\substack{i \in S \\ j \in \overline{S}}} t_{ji} \le f_{ij} \le \sum_{\substack{i \in S \\ j \in \overline{S}}} t_{ij} - \sum_{\substack{i \in S \\ j \in \overline{S}}} b_{ji} \tag{4}$$

Therefore, arbitrary two cuts $(S_1, \overline{S_1}), (S_2, \overline{S_2})$ in complex network, there must are:

$$\sum_{i \in \underline{S_{i}} \atop j \in \overline{S_{i}}} b_{ij} - \sum_{i \in \underline{S_{i}} \atop j \in \overline{S_{i}}} t_{ji} \le f_{ij} \le \sum_{i \in \underline{S_{i}} \atop j \in \overline{S_{i}}} t_{ij} - \sum_{i \in \underline{S_{i}} \atop j \in \overline{S_{i}}} b_{ji}$$
(5)

$$\sum_{i\in \underline{S}_2\atop j\in \overline{S}_2} b_{ij} - \sum_{i\in \underline{S}_2\atop j\in \overline{S}_2} t_{ji} \le f_{ij} \le \sum_{i\in \underline{S}_2\atop j\in \overline{S}_2} t_{ij} - \sum_{i\in \underline{S}_2\atop j\in \overline{S}_2} b_{ji}$$
(6)

Disposing equation (5) and (6), the following formula is obtained:

$$\sum_{\substack{i \in S_1 \\ i \in S_i}} b_{ij} - \sum_{\substack{i \in S_1 \\ i \in S_i}} t_{ji} \le \sum_{\substack{i \in S_2 \\ i \in S_2}} t_{ij} - \sum_{\substack{i \in S_2 \\ i \in S_2}} b_{ji}$$
(7)

$$\sum_{\substack{\epsilon \leq S_1 \\ \epsilon \leq S_2}} b_{ij} - \sum_{\substack{i \in S_1 \\ j \in S_2}} t_{ji} \leq \sum_{\substack{i \in S_1 \\ j \in S_1}} t_{ij} - \sum_{\substack{i \in S_1 \\ j \in S_1}} b_{ji}$$
(8)

So, the system feasible flow is existent if network flows satisfy equation (7) and (8).

If network flows satisfy the following equations (9) and (10), then the feasible flow is inexistent. It also indicates that the operating network is under instable or unsafe states.

$$\sum_{i\in \underline{S}_1\atop j\in \overline{S}_1} b_{ij} - \sum_{i\in \underline{S}_1\atop j\in \overline{S}_1} t_{ji} > \sum_{i\in \underline{S}_2\atop j\in \overline{S}_2} t_{ij} - \sum_{i\in \underline{S}_2\atop j\in \overline{S}_2} b_{ji}$$
(9)

$$\sum_{\substack{i \in S_2 \\ j \in \overline{S_2}}} b_{ij} - \sum_{\substack{i \in S_2 \\ j \in \overline{S_2}}} t_{ji} > \sum_{\substack{i \in S_1 \\ j \in \overline{S_1}}} t_{ij} - \sum_{\substack{i \in S_1 \\ j \in \overline{S_1}}} b_{ji}$$
(10)

So, in a process network, flows of all edges have constraints of upper bound t_{ij} and lower bound b_{ij} , all cuts (S, \overline{S}) have to satisfy formula (11). Then, it implies that this system is running in optimal work states.

$$\max f_{ij} = \min\{\sum_{\substack{i \in S \\ i \in \overline{S}}} t_{ij} - \sum_{\substack{i \in S \\ i \in \overline{S}}} b_{ji}\}$$
(11)

3. Optimal allocation processes

3.1. Optimal allocation functions

Now, utilizing the optimal feasible flow to establish the optimal allocation model, the maximal safety constraint function of work states for arbitrary edge e_{ij} can be determined. These variables such as the adjustable quantity, requiring adjusting quantity, and requiring adjusting state, are introduced to illuminate the optimal allocation process and to determine methods are given for these variables.

Therefore, the optimal allocation model is given as follows to realize the stability of network *G* and to guarantee the system safety.

$$\max \sum_{e_{ij} \in E} s_{ij}(f_{ij})$$

s.t. $If_v = a$ (12)
 $q \le f_v \le w$

In equation (12), e_{ij} is the edge of that the forward node is v_i and sequence node is v_j . $s_{ij}(f_{ij})$ is safety importance function of edge e_{ij} . *I* is the node relation matrix, f_v is the flux, and *a* is a constant. *q* and *w* are the flux range under process conditions, which forms constraints of the upper and lower bounds of network flows.

An auxiliary edge is designed from ending node t to beginning s for the network, edge flow value is represented by f. Initially, the lower bound is zero, the upper bound and safety importance is infinite. Supposing that solving flow value of network G is f_v , and then flow f equals f_v according to the flow balance principle. In this way, equation (12) may be converted into the equivalent loop to solve the flux value.

$$\max \sum_{e_{ij} \in E} s_{ij}(f_{ij})$$

s.t. $If_v = 0$ (13)
 $q \le f_v \le w$

Further, refining ways can be carried out when equation (13) has the optimal solution, and then the following formula is further obtained:

$$\frac{\partial s_{ij}}{\partial f_{ij}} = p_{ij}, \quad \text{if} \quad q_{ij} \le f_{ij} \le w_{ij} \tag{14}$$

$$\frac{\partial s_{ij}}{\partial f_{ij}} \ge p_{ij} , \quad \text{if} \quad f_{ij} = q_{ij}$$
(15)

$$\frac{\partial s_{ij}}{\partial f_{ii}} \le p_{ij} , \quad \text{if} \quad f_{ij} = w_{ij}$$
(16)

In the above equation (14), (15) and (16), p_{ii} is the coupling parameter variable corresponding node v_i , v_j , is called the node state related edge e_{ii} . It represents these objective physical variables of the practice process system such as the temperature, presses, and fluxes. So, node state p_{ii} can relatively and objectively reflect work states of these physical variables. Equation (14), (15), and (16) is the optimal condition of the model function for the network flow.

If network flow f_{ii} and state p_{ii} under current status is in expandable increasable safety range and edge e_{ii} satisfies the optimal condition, which can be made out from equation (14), (15), and (16). So, when flow f_{ii} and state p_{ii} are observed they are not in the expandable increasable safety range, the edge flux or node state must be adjusted to satisfy the optimization condition. Under processing conditions, node states are often fixed, while edge fluxes are adjusted to satisfy optimal conditions. The maximal flux can be increased by adjusting the edge flux, which is called the positive maximal adjustable quantity of this edge, denoted by Δf_{ii}^+ ; while the maximal flux can be reduced by adjusting the edge flux is called the reverse maximal adjustable quantity, denoted by Δf_{ii}^{-} . The minimal flux can be increased or reduced by adjusting the edge flux corroding to practice desires is called the requiring adjusting quantity of the edge, denoted by Δf_{ii}^n . In addition, when optimal conditions of the edge still cannot be reached by adjusting the edge flux, it will be satisfied by adjusting node states. The minimal node state which can be increased or reduced is called the requiring adjusting state of the edge, denoted by Δp_{ij}^+ . When $f_{ij} < q_{ij}$ or $f_{ii} > w_{ii}$ conditions hold to still satisfy the optimal conditions, then the node state will be adjusted and the requiring adjusting state is set into a positive indefinite. Simultaneously, $\left|\partial s / \partial f\right|_{f_{ij}=q_{ij}} - p_{ij}$ is defined as reverse state difference of the

edge, and $\left|\partial s / \partial f\right|_{f_{ij}=w_{ij}} - p_{ij}$ as positive state difference of the

edge, denoted by Δp_{ij}^- , Δp_{ij}^+ respectively.

After allocation according to the requiring adjusting quantities, optimal work system will have these rules as follows:

- 1) If optimal conditions of network nodes or edges are satisfied, then its requiring adjusting quantities are zero. If adjustable quantities of nodes or edges are zero, it verifies that optimal conditions of edges or nodes have been satisfied.
- 2) If requiring adjusting quantities of all nodes and edges of network are zero, it shows that the optimal solution for the system safety has been obtained.

3.2. Algorithm description

The core idea of the algorithm for the optimal allocation is that an expandable increasable route of the network is found out and that the increasing flux is accomplished. The labeling method is adopted to find the expandable increasable route according to node states, and a series of formulas is given to obtain these values of adjusting quantities. Processes of the finding route and the increasing flux are repeated until requiring adjusting quantities of all edges are equal to zero or requiring states are equal to zero.

Supposing a route connected from beginning node s to ending node t is r in the network, defining a route direction from s to t is regarded as a positive direction; contrarily, as a reverse direction. Then edges in route r will be divided into two kinds according to these directions: one is called positive edge, whose direction is same with this route direction; another is called reverse edge, its direction is opposite with this route direction. All positive edges are denoted by r^+ , and all reverses are denoted by *r*⁻. Each edge e_{ii} belonging to *r* has that $e_{ii} \in r^+$ and Δf_{ii}^+ is large zero, or $e_{ii} \in r^-$ and Δf_{ii}^- is large zero, they all are called an expandable increasable route of r. Algorithm is divided into four part works: adjusting quantity computation, labeling process, adjusting flux, adjusting node states. The description is given as follows.

1) Adjusting quantity computations.

Requiring adjusting quantities, positive maximal adjustable quantities, and reverse maximal adjustable quantities of edges are figured out for arbitrary initial solutions satisfied the flux balance condition.

The calculating formula of adjustable quantities for positive edges is given as follows.

$$\Delta f_{ij}^{+} = w_{ij} - f_{ij} \tag{17}$$

The formula for reverse edges is also obtained as follows.

$$\Delta f_{ij}^{-} = f_{ij} - q_{ij} \tag{18}$$

The formula of requiring quantities for positive edges is gotten.

$$\Delta f_{ij}^{n} = \min \{ \Delta f_{ij}^{+}, \sum_{p \in V} f_{pt} \}$$
(19)

The formula of requiring quantities for reverse edges is hold as follows.

$$\Delta f_{ij}^n = \min\{\Delta f_{ij}^-, \sum_{t \in V} f_{pt}\}$$
(20)

Increasable flux of route r is calculated out as follows.

$$\delta = \min\{\min(\Delta f_{ij}^+), \min(\Delta f_{ij}^-), \Delta f_{ij}^n\}$$
(21)

2) Labeling process.

A. The beginning node is labeled with (s^+,∞) .

- B. Non-labeled adjacent node *i* of node *i* is labeled according to the following steps.
 - a) When $e_{ij} \in E$ and $f_{ij} < w_{ij}$, node v_j is labeled with
 - (v_j⁻, δ_j); when f_{ij} = w_{ij}^y, node v_j is not labeled.
 b) When e_{ji} ∈ E and f_{ji} > q_{ji}, node v_j is labeled with (v_j⁻, δ_j); when f_{ji} = q_{ji}, node v_j is not labeled.

- c) Step 2 is continuously repeated until ending node t is labeled, or all nodes have been labeled. When ending node t is labeled, it shows that there is an expandable increasable route from s to t, the programming will jump into step 3) to adjust the flux. When ending node t can't be labeled, it shows that there is not an expandable increasable route from s to t, so the algorithm is ended, this state is also the optimal network flow.
- 3) Adjusting flux.
 - A. Each expandable increasable route begins from beginning node *s*. From expandable increasable route definition, it is known as $\delta > 0$. When $\delta = +\infty$, an infinite flow may be increased in the expandable increasable route, means that limited optimal solution is inexistence, and the algorithm is stopped. These illumines that expandable increasable route *r* is inexistence in network *G*, the programming jumps to step 4) to adjust node states.

B. When node
$$v_j$$
 labeled is with (v_j^+, δ_j) , then

$$f_{ii} = f_{ii} + \delta_i, \quad if \quad e_{ii} \in r^+.$$

When node v_i labeled is with (v_i, δ_i) , then,

 $f_{ij} = f_{ij} - \delta_j$, if $e_{ij} \in r^-$.

- C. When $v_j = s$, all labels are taken out, and the program comes back to step 2 of labeling process 2). Otherwise, it comes back to the adjusting flow process, and next node will achieve the increasing flux.
- 4) Adjusted node states.

When the expandable increasable route is inexistence above stated in network G, the network cut principle is adopted to adjust node states. From minimum-cut maximum-flow theorem it is known that a minimum cut (S, \overline{S}) is formed in network G under these states. Set E_1 and E_2 is defined as follows.

$$\begin{split} E_1 &= \{e_{ij} \mid i \in S, j \in S, e_{ij} \in E\} \\ E_2 &= \{e_{ij} \mid i \in \overline{S}, j \in S, e_{ij} \in E\} \end{split}$$

When using Δf_m expresses total adjustable quantities in (S, \overline{S}) , then the following formula will be obtained:

$$\Delta f_m = \sum_{e_{ij} \in E_1} \Delta f_{ij}^+ + \sum_{e_{ij} \in E_2} \Delta f_{ij}^-$$
(22)

Node states in set \overline{S} are adjusted according to the following formula:

$$p_i = p_i + \Delta p, \quad j \in S \tag{23}$$

The following formula is obtained by adjusting node states to solve state adjustable quantity ΔP :

$$\Delta f_{ij}^n = \Delta f_m \tag{24}$$

Firstly, upper bound ΔP_{max} of state adjustable quantity is determined, and sets:

$$\Delta P_{\max} = \max\{\max_{e_{ij} \in E_1} (\Delta p_{ij}^+), \max_{e_{ij} \in E_2} (\Delta p_{ij}^-)\}$$
(25)

When $\Delta p_{\text{max}} > \Delta p_{ij}^n$, then sets

$$\Delta P_{\max} > \Delta p_{ij}^n$$

Taking $\Delta P = \Delta P_{\max}$, node states in set \overline{S} are adjusted according to equation (9). If there is $\Delta f_{ij}^n > \Delta f$, this illuminates that the feasible solution is inexistent for original problem, then the algorithm stops. Otherwise, system safety effects caused by each edge increasing flux have astringency, so some state adjusting quantity ΔP has existed in range $[0, \Delta P_{\max}]$, and equation (25) is hold.

State adjusting quantity ΔP satisfied equation (25) will be searched out in range $[0, \Delta P_{max}]$, then node states in set \overline{S} are adjusted according to the equation (24).

Next, the programming comes back to step 2).

4. An example

This research is partly supported by the National High-Tech Project (863) of China and by the NSF of US. The optimal allocation for the safety of process systems is a part of the whole research. The development of the application system has been completed. A heat supply exchange system of the chemical system is regarded as the research prototype. The equipment in the system is regarded as nodes of the network model, multiple medium flows in the system forms the relationship of the network model. Then, the network flow method is used to allocate the equipment by their states, and carry out the cooperation work of the whole system.

The fuel and steam is used as the raw material of the heat supply exchange system, and required energies are offered uniformly and equably for the chemical process. From fig. 3, it may see that the abstract model of the system is composed of 6 nodes and 8 edges, which express 6 processing units and 8 couplings of the system. These equipment cooperate each other to complete these functions of the oil supply, steam supply, heat transfer, and waste oil treatment.

Optimal allocation processes of the system safety are illuminated by the abstract model, given in fig. 4. The work para-



Fig. 3. Model of the heat supply exchange system



Fig. 4. Optimal allocation processes

meters of network nodes and edges under processing conditions are labeled in fig. 4(a). When the work states of monitored nodes produce a dithering and jump out limited state range, the suggested method is applied to adjust the work states of each unit, and then the system is guaranteed to go into the stable work states. Thus, a real-time optimal allocation process of the system safety is achieved.

1) Adjusting quantities of network flows are calculated.

- A. The calculated result of the increasing quantity for the beginning *s* is labeled $\delta = \infty$, seeing fig. 4(a).
- B. For node v_{j} , having $w_{s1} = 9$ and $f_{s1} = 0$, adjustable quantity $\Delta f_{s1}^+ = w_{s1} f_{s1} = 9$ and requiring adjusting quantity $\delta_1 = \min\{\infty, 9\} = 9$ are obtained according to formula (17).
- C. Computing processes of other nodes all are same. Labeling processes of adjacent nodes are continued until ending node *t* is labeled. This labeling process is illustrated in fig. 4.
- 2) The labeling of nodes is finished.
 - A. Beginning node s is labeled with (s^+,∞) , seeing fig. 4(a).
 - B. Adjacent node v_1 and v_2 of node s is labeled.
 - C. For node v_{j} , having $w_{s1} = 9$ and $f_{s1} = 0$, adjustable quantity $\Delta f_{s1}^+ = w_{s1} f_{s1} = 9$ and requiring adjusting quantity $\delta_1 = \min\{\infty, 9\} = 9$ are obtained according to formula (17). So, node v_j is labeled with $(s^+, 9)$.
 - D. Labeling processes of adjacent node are continued until ending node *t* is labeled, and seeing fig. 4 in detail.
- 3) Adjusting flow processes are implemented.
 - A. Expandable increasable route $s-v_1-v_3-t$ can be obtained from *s* to *t* by the labeling process, seeing fig. 4(b).
 - B. $\delta = \min\{\infty, 5\} = 5$ is figured out according to formula (21).
 - C. All labels are gotten rid of, then a new network is obtained. The increasing flow and labeling process will be recalculated.
 - D. The program jumps to step 4) to adjust node states if $\delta > 0$, $\delta = +\infty$. Adjusting computations is executed

according to equation (22)-(25) in steps. Then the program comes back step 2).

The increasing network is finally obtained, seeing fig. 5. The maximal flow and minimal cut of this network is 14 from this figure.



Fig. 5. Optimal network flow

5. Conclusions

The network flow-based optimal allocation for the process system safety is presented in this paper. This method has a powerful complement and extensibility to past optimal resource allocation for system safety. The suggested method can guarantee the system safety in nature because some of system faults are caused by the dithering of system states. The system safety can be guaranteed both on the whole and in detail by using the network flow. The proposed method can be effectively applied in the accident prevention and real-time state control for system safety. In the allocation, the solving of each objective function can be treated easy, and it may be very suitable in the complex system safety. However, the optimal allocation function is only given a basic definition description in this text, how the specific function is determined is a valuable study in the future, and which directly affects the allocation accuracy for the system safety.

The work is supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 program) (Grant No.: 2007AA04Z432) and by the State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering at Xi'an Jiaotong University and by CIMS Institute of School of Mechanical Engineering of Xi'an Jiaotong University. And we need to express our thanks to Wei He Chemical LTD of Shaan'xi of China for providing a practical environment and analytical data.

6. References

- 5. Ana Q, Esteban G, James DM, Sarah MR. A multiperiod generalized network flow model of the U.S. integrated energy system: Part I - Model description. IEEE Trans Power Syst 2007; 22(2): 829-36.
- Andrew L, Brian R, Fei X, Xingwen Z. Adjusted network flow for the shelf-space allocation problem. Proceedings of the International Conference on Tools with Artificial Intelligence 2002; 224-32.
- 7. Artyom N, Panos P. Adaptive dynamic cost updating procedure for solving fixed charge network flow problems. Comput Optim Appl 2008; 39(1): 37-50.
- Castro J, Nabona N. An implementation of linear and nonlinear multicommodity network flows. Eur J Oper Res 1996; 92(1): 37-53.
- Coit DW, Smith AE. Reliability Optimization of Series-Parallel Systems Using a Genetic Algorithm. IEEE Trans Reliab 1996; 45(2): 254-259.
- Fan Y, Zhong-Ping J, Hao Z. Network flow control under capacity constraints: A case study. Syst Contr Lett 2006; 55(8): 681-688.
- 11. Fathabadi HS, Ghiyasvand M. A new algorithm for solving the feasibility problem of a network flow. Appl Math Comput 2007; 192(2): 429-38.
- 12. Fernando P. A global stability result in network flow control. Syst Contr Lett 2002; 46(3): 165-72.

- Hao Z, Zhong-Ping J, Fan Y, Panwar S. Analysis and comparison of optimization algorithm for network flow control. Decision and Control 2002; Proceedings of the 41st IEEE Conference on 2002; 1(1):1129 - 1134.
- 14. Holmberg K, Joborn M, Melin K. Lagrangian based heuristics for the multicommodity network flow problem with fixed costs on paths. Eur J Oper Res 2008; 188(1): 101-8.
- 15. Konstantinos P, Nikolaos S, Angelo S. An exterior simplex type algorithm for the Minimum Cost Network Flow Problem. Comput Oper Res 2009; 36(4): 1176-1190.
- 16. Levitin G, Amari SV. Multi-state systems with multi-fault coverage. Reliab Eng Syst Saf 2008; 93(11): 1730-39.
- Levitin G, Lisnianski A. Optimizing survivability of vulnerable series-parallel multi-state systems. Reliab Eng Syst Saf 2003; 7(9): 319–31.
- Lisnianski A, Levitin G, Ben-Haim H. Structure optimization of multi-state system with time redundancy. Reliab Eng Syst Saf 2000; 67(2): 103-12.
- 19. Maurras JF, Vaxes Y. Multicommodity network flow with jump constraints. Discrete Math 1997; 165-166: 481-6.
- McCamant S, Ernst MD. Quantitative information flow as network flow capacity. Proceedings of the ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI) 2008; 193-205.
- 21. Nygard KE, Chandler PR, Pachter M. Dynamic network flow optimization models for air vehicle resource allocation. Proceedings of the American Control Conference 2001; 3: 1853-8.
- 22. Oliveira ARL, Soares S, Nepomuceno L. Short term hydroelectric scheduling combining network flow and interior point approaches. Int J Electr Power Energ Syst 2005; 27(2): 91-99.
- 23. Qi X, Salapaka MV, Voulgaris PG, Khammash M. Structured optimal control with applications to network flow coordination. Proceedings of the American Control Conference 2003; 1: 272-277.
- 24. Ramirez-Marquez JE, Coit DW. Optimization of system reliability in the presence of common cause failures. Reliab Eng Syst Saf 2007; 92(10): 1421-34.
- 25. Shangyao Y, David B, Yosef S. Intermodal pricing using network flow techniques. Transportation Research Part B: Methodological 1995; 29(3): 171-180.
- 26. Suh-Wen C. An efficient algorithm for optimal design of area traffic control with network flows. Appl Math Model 2009; 33(6): 2710-22.
- 27. Suh-Wen C. An iterative scheme for signal settings and network flows. Appl Math Comput 2007; 189(n): 1808-15.
- 28. Suh-Wen C. Joint optimization for area traffic control and network flow. Comput Oper Res 2005; 32(11): 2821-41.
- 29. Swaminathan V, Chakrabarty K. Generalized Network Flow Techniques for Dynamic Voltage Scaling in Hard Real-Time Systems. IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, Digest of Technical Papers 2003; 21-5.
- 30. Xiaoyan G, Xiaoming L. A data mining based algorithm for traffic network flow forecasting. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 2003; 2: 1253-8.
- 31. Xing L, Amari SV. Effective Component Importance Analysis for the Maintenance of Systems with Common-Cause Failures. Int J Reliab Qual Saf Eng 2007; 14(5): 459-478.
- 32. Xing L. Reliability Evaluation of Phased-Mission Systems with Imperfect Fault Coverage and Common-Cause Failures. IEEE Trans Reliab 2007; 56(1): 58-68.
- 33. Xingzhe F, Arcak M, Wen, JT. Robustness of network flow control against disturbances and time-delay. Syst Contr Lett 2004; 53(1): 13-29.
- 34. Yusuf S, Luk W, Sloman M, Dulay N, Lupu EC, et al. Reconfigurable architecture for network flow analysis. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems 2008; 16(1): 57-65.

Dr. Zhong HAN Prof. Jianmin GAO State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering Xi'an Jiaotong University Xi'an, 710049, P.R.China e-mail: hanyaozhong@sina.com; gjm@mail.xjtu.edu.cn.
WPŁYW PARAMETRÓW UŻYTKOWYCH KOMBAJNU NA USZKODZENIA OBRABIANEGO MATERIAŁU (USZKODZENIA MARCHWI)

THE INFLUENCE OF WORKING PARAMETERS OF A CARROT HARVESTER ON CARROT ROOT DAMAGE

Celem pracy było określenie jakości pracy jednorzędowego kombajnu Dewulf P3K zaopatrzonego w przenośnik załadowczy do skrzyniopalet, przy zbiorze marchwi odmiany Nerac. Badania kombajnu przeprowadzono w warunkach polowych na glebie bielicowej. Zdefiniowano typy uszkodzeń korzeni marchwi oraz ich procentowe udziały w zbieranej masie jak również określono straty korzeni. Zaproponowano również rozwiązanie pozwalające na zmniejszenie strat korzeni powstających podczas zbioru. W pracy zamieszczono wynik testu dotyczący niedokładności obcinania naci przez zespół obcinający kombajnu, a także określono wielkość zanieczyszczeń w zbieranym materiale.

Słowa kluczowe: marchew, zbiór kombajnowy, straty, uszkodzenia korzeni.

The objective of the research was to evaluate the performance of a one-row, tractor mounted Dewulf combine harvester with a P3K elevator in terms of the harvest quality of carrot roots of the Nerac variety. The field research of the combine harvester was conducted on podsolic soils. The types of root damages were defined, and their percentage share in the harvested material as well as the share of root losses were established. Moreover, a solution was suggested for reducing root losses during harvesting. The article presents the results of tests concerning the share of incompletely topped roots as well as the content of organic and inorganic impurities in the gathered material.

Keywords: carrot, harvesting, root losses, root damages.

1. Wprowadzenie

Uszkodzenia korzeni marchwi są czynnikiem, który determinuje o ich przydatności w przemyśle. Badania uszkodzeń marchwi prowadzone są w różnych kierunkach. Ponieważ czasem badania obiektów rzeczywistych nie dają zadowalających rezultatów, prowadzone są prace nad opracowaniem wiarygodnych modeli obliczeniowych pozwalających na poznanie oddziaływania części roboczych maszyn na strukturę wewnętrzną warzyw oraz wzajemnego oddziaływania elementów ich budowy wewnętrznej. W takim celu został wyznaczony rozkład przemieszczeń dwuwarstwowych modeli przekroju poprzecznego korzeni marchwi za pomocą metody fotografii plamkowej [20, 21]. Wyprowadzono też równanie będące miarą prędkości zaniku naprężenia w korzeniach marchwi, pozwalające na ocenę fizycznego stanu korzeni [8, 22]. Modelowania materiałów pochodzenia roślinnego są opisywane przez modele reologiczne [4, 5, 6]. Już pod koniec XX-tego wieku została zaprezentowana możliwość użycia mikroskopu elektronowego (ESEM) do obserwacji tkanek marchwi - poddanej testom mechanicznym [19, 23].

Badania dotyczące uszkodzeń marchwi prowadzone są także w warunkach polowych, które pozwalają na ocenę jakości pracy kombajnów do zbioru marchwi. Pierwsze badania kombajnów wyrywających - wyciągających podkopywane korzenie za nać prowadzone były w latach 80-tych. Kombajny te uszkadzały aż 39,8-44,8 % korzeni [7], z czego ok. 2/3 stanowiły korzenie połamane. Dopracowywanie konstrukcji kombajnów i opracowanie właściwych parametrów roboczych pozwoliły na znaczne obniżenie ilości sumarycznych uszkodzeń grubych – poniżej 10% [15], a nawet poniżej 2% [16]. Na wielkość uszkodzeń w zbieranym plonie korzeni mogą mieć także wpływ inne czynniki takie jak choroby, czy szkodniki marchwi [2, 3, 9, 12,

1. Introduction

Carrot root damages are a factor which determines their usefulness to the vegetable processing industry. The research on root damages takes different directions. Since the investigations of physical objects do not always produce satisfactory results, attempts are made at developing reliable computation models which would make it possible to investigate the impact of working parts of the machine on the internal structure of vegetables and the interplay between particular elements of that structure. For that purpose, displacement distributions of two-layer cross-section models of carrot roots were established, using the speckle photography method [20, 21]. Furthermore, a formula was derived to calculate the rate stress relaxation in carrot roots, which makes it possible to evaluate the physical condition of the roots [8, 22]. Materials of plant origin are described by rheological models [4, 5, 6]. Even towards the end of the 20th c. Thiel and Donald demonstrated the application of the Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) for the observation of carrot tissue subjected to mechanical tests [19, 23].

Carrot root damages are also a subject of field research, which makes it possible to evaluate the performance of carrot combine harvesters. The first studies of combines plucking the uprooted carrots by the top were conducted in the 1980s. Those combines damaged as much as 39.8-44.8% of roots [7], of which about two thirds were broken. The perfectioning of the construction of combines and identifying their optimal operating parameters have substantially reduced the total ratio of gross root damages: to less than 10% [15] or even below 2% [16]. The share of damages in the root harvest can be additionally influenced by other factors, such as carrot diseases or pests [2, 3, 9, 12, 13, 17, 18]. Gracie and Brown [10] noted that

13, 17, 18]. Gracie i Brown [10] zauważyli, że częściowe usunięcie liści zmniejsza występowanie podłużnych pęknięć korzeni marchwi podczas zbioru.

2. Cel i przedmiot badań

Celem badań było określenie strat i uszkodzeń korzeni marchwi powstających podczas zbioru kombajnem jednorzędowym P3K firmy Dewulf (rys. 1). Badany kombajn jest typu wyrywającego [14] i jest wyposażony w aktywne (hydrauliczne) podnośniki naci montowane przed lemieszem podkopujacym korzenie i przed pasami chwytnymi wyciągającymi korzenie z gleby za nać (rys. 2). Kombajn nie był doposażony w elektrohydrauliczny system kierujący ustawieniem wysokości pracy przy podnoszeniu naci. Natomiast miał zamontowany podwójny bijakowy zespół (pod pasami chwytnymi) do oczyszczania korzeni z gleby (rys. 3) oraz urządzenie do obrywania naci i był ciagniety przez ciagnik Valtra A. Jest to kombajn z przenośnikiem załadowczym przeznaczonym do załadunku skrzyniopalet (rys. 4a). Standardowo jest wyposażony w elastyczny kosz załadowczy podwieszony do końca przenośnika (rys. 4b). Kosz ten przy załadunku umieszcza się w środku skrzyniopalety w celu obniżenia wysokości spadku korzeni. Marchew zbierana była do skrzyniopalet umieszczonych na przyczepie ciągniętej drugim ciągnikiem obok kombajnu. Badania polowe kombajnu przeprowadzono w październiku 2009 roku, w Sobieskiej Woli koło Krzczonowa na glebach bielicowych II i III-ej klasy. Przeprowadzono je przy zbiorze marchwi odmiany Nerac, przy prędkości roboczej 0,85 km·h-1. Prędkość ta była dobrana wstępnie jako najlepsza po przeprowadzeniu prób wstępnych. Przy mniejszej prędkości jazdy (na niższym biegu) nie dało się ustawić odpowiednio niskiej prędkości pasów chwytnych -wyciągały korzenie do tyłu zamiast pionowo przyczyniając się do urywania naci i pozostawiania korzeni na polu. Przy wyższych biegach operator nie nadążał z nakierowywaniem zespołu podbierającego korzenie - więcej korzeni pozostawało niewyoranych.

partial defoliation treatment reduced longitudinal tissue fractures of carrot taproots during harvest.

2. The objective and the subject of investigations

The objective was to establish root losses and damages which occurred in the process of plucking carrots with a onerow, tractor-mounted Dewulf harvester with a P3K elevator (fig. 1). The tested combine is one of the top lifting type [14]. It is equipped with active hydraulic dividers which are fixed in front of the digging share which uproots the carrots and pick-up belts which pluck the roots by the tops out of the soil (fig. 2). This version has not been additionally equipped with an electro-hydraulic system controlling the elevation of the picking element. However, it was equipped with a double brushing unit (under the pick-up belts) for cleaning the roots of soil (fig. 3) and with a topping device and was drawn by a Valtra A tractor. The combine has a loading elevator which conveys the carrot roots into pallet boxes (fig. 4a). The standard version is equipped with an elastic funnel chute suspended at the end of the elevator (fig. 4b). During loading, the chute is placed inside a pallet crate in order to reduce the drop height of the roots. Plucked carrots were collected into pallet boxes placed on a trailer pulled along the combine by another tractor. The field research of the combine harvester was carried out in October 2009 in Sobieska Wola near Krzczonów (eastern Poland) on podsolic soils of the 2nd and 3rd class. The investigations were conducted while harvesting Nerac carrots at a working speed of 0.85 km·h⁻¹. Upon initial tests, that speed was selected as the optimal one. At a lower driving speed (in a lower gear) it was impossible to set a sufficiently low speed of the pick-up belts. Consequently the pick-up belts plucked roots backwards rather than vertically upwards, which contributed to tops being torn off and the roots remaining in the soil. In higher gears, the operator had insufficient time to direct the uprooting unit so that more roots remained in the soil.



Rys. 1. Kombajn typu wyrywającego, jednorzędowy Dewulf P3K Fig. 1. A one-row top lifting P3K Dewulf harvester



Rys. 2. Obrotowe (hydrauliczne) podnośniki naci Fig. 2. Rotary (hydraulic) dividers

SCIENCE AND TECHNOLOGY



Rys. 3. Obrotowy podwójny bijakowy zespół czyszczący (a) oraz wielonożowy, rotacyjny zespół obrywający nać (b) Fig. 3. A rotary double brushing unit for cleaning the roots (a) and a rotary multi-blade topping unit (b)



Rys. 4. Przenośnik załadowczy do napełniania skrzyniopalet umieszczonych na przyczepie (a) wyposażony w elastyczny kosz zasypowy (b) Fig. 4. An elevator with an elastic funnel chute (b) for loading carrot roots into pallet boxes on a trailer (a)

3. Metodyka badań

W celu określenia warunków pracy kombajnu badano zwięzłość i wilgotność gleby (w sześciu powtórzeniach) oraz wykonywano charakterystykę plantacji marchwi. W tym celu mierzono losowo w stu powtórzeniach: wysokość roślin przed i po wyprostowaniu naci, wysokość wystawania główek korzenia nad powierzchnię redlin, rozstaw redlin oraz odległość między: rzędami roślin na redlinie oraz roślinami w rzędach. Następnie losowo wykopano sto korzeni i zmierzono ich długość i największą średnicę. Plon biologiczny korzeni marchwi, naci i chwastów określano z powierzchni 1 m², losowo w dziesięciu powtórzeniach.

Jakość kombajnowego zbioru korzeni marchwi określano na poletkach pomiarowych o długości 10 m (w sześciu powtórzeniach). Zbiór kombajnem prowadzony był do skrzyniopalet wyłożonych od wewnątrz plandeką (oddzielnie dla każdego powtórzenia) w celu uchwycenia zbieranej masy. Korzenie zebrane kombajnem na odcinkach pomiarowych dzielono na: nieuszkodzone, pęknięte i złamane oraz z nie oberwaną nacią. Poszczególne frakcje były ważone na wadze hakowej (Radwag

3. Investigation method and conditions

In order to determine the working conditions of the combine harvester, the compaction and relative humidity of the soil were determined (six times), and characteristics of the plantation were described. The characterization involved one hundred random measurements of the height of plants before and after their tops were straightened, protrusion of root heads above the ridge surface, the spacing of ridges as well as the distances between the middles of the ridges, rows of plants on a ridge and plants in a row. Next, one hundred random roots were plucked so as to measure their length and maximum diameter. Biological yields of carrot roots, tops and weeds per 1 m² were measured randomly ten times.

The quality of root harvesting was determined on 10-meter long stretches of the field (six times). Each time the material collected by the combine was loaded into separate pallet boxes lined with tarpaulin. Roots harvested by the combine at particular sections of the field were segregated into undamaged, fractured, broken and untopped. Each of these fractions was weighed on a hook scale (Radwag WPT 30/CG). Additionally, WPT 30/CG). Dodatkowo, z odcinków pomiarowych, ręcznie zbierano korzenie nie wydobyte z gleby i zgubione przez kombajn. Następnie określano udział uszkodzonych korzeni i korzeni z nie oberwaną nacią w procentach w stosunku do całkowitej masy korzeni zebranych kombajnem oraz zanieczyszczenia w procentach w stosunku do masy próbki zebranej kombajnem. Procentowy udział strat obliczano w stosunku do sumarycznej masy korzeni zebranych kombajnem i ręcznie.

Wyniki badań poddano analizie statystycznej przy wykorzystaniu programu Excel. Wyliczono współczynnik zmienności V:

$$V = \frac{D}{A} \cdot 100[\%] \tag{1}$$

gdzie: A - wartość średnia, D - odchylenie standardowe.

Pomiar zwięzłości gleby był przeprowadzony przy użyciu sondy dynamicznej w sześciu powtórzeniach, w różnych miejscach plantacji, do głębokości 35 cm w warstwach co 5 cm i wyliczano ją ze wzoru:

$$Z = 0,087 \cdot \frac{k}{s} [MPa] \tag{2}$$

gdzie: k - liczba uderzeń ciężarka sondy, s - głębokość wbicia sondy, 0,087 [MN·m] – stała wynikająca z cech konstrukcyjnych sondy uwzględniająca: masę ciężarka (1kg), przyspieszenie ziemskie (9,81 m·s⁻¹), wysokość spadania ciężarka (1 m) i przekrój wgłębnika (113·10⁻⁶ m²).

Pomiar wilgotności gleby przeprowadzono w sześciu powtórzeniach. Próbki pobierano z trzech poziomów głębokości (0-10, 10-20, 20-30 cm) dla każdego powtórzenia (ASAE 1996).

4. Wyniki i dyskusja

Wyniki pomiarów charakterystyki plantacji marchwi, na której przeprowadzono badania kombajnu Dewulf zamieszczono w tabeli 1. Warunki glebowe zostały zamieszczone w tabeli 2.

Plantacja prowadzona była na redlinach (formowanych przez aktywny agregat Struik Diabolo Roller) i uzyskano redliny o wysokości 0,184 m i rozstawie 0,707 m. Nasiona marchwi wysiewane były (siewnikiem pneumatycznym firmy Monosem) w dwóch rzędach na każdej redlinie oddalonych od siebie o 0,08 m (zgodnie z zaleceniami pod zbiór kombajnowy firmy Dewulf). W czasie wegetacji rzędy się oddaliły od siebie na odległość 0,12 m. Odległość między roślinami w rzędach wynosiła 0,049 m. Nać uformowała się w łan o wysokości 0,236 m i wskaźniku wylegania 35,4%. Korzenie Nerac osią gnęły średnią długość 0,195 m oraz średnicę 0,028 m. Na 1 m² znajdowało się 79 korzeni. Plon biologiczny korzeni marchwi wyniósł 89,9 t ha⁻¹, zaś chwastów 3,1 t ha⁻¹. Zbiór kombajnowy przeprowadzono przy wilgotności gleby 14,1% i jej zwięzłości 1,12 MPa.

Wyniki badań dotyczące oceny jakości pracy kombajnu Dewulf przy zbiorze marchwi odmiany Nerac zamieszczono na rysunku 5 i 6.

Kombajn Dewulf podczas zbioru przyczyniał się do powstawania uszkodzeń mechanicznych korzeni marchwi. Największy udział uszkodzeń, choć stosunkowo niewielki, stanowiły otarcia (3%) pojawiające się przy główce korzeni. Otarcia te powstawały w wyniku pracy zespołu obrywającego nać. Można by wprawdzie jeszcze zmniejszyć ilość otarć przez mniej roots that the combine had failed to pluck from the soil or lost were collected by hand. Subsequently, the share of damaged and untopped roots was determined as the percentage of the weight of all roots harvested by the combine, whereas the amount of impurities was determined as the percentage of the weight of all material gathered. The share of lost roots was calculated as the percentage of the overall weight of all roots harvested by the combine and collected by hand.

The results obtained were analyzed statically with Microsoft Excel software. The coefficient of variation (V) was calculated:

$$V = \frac{D}{A} \cdot 100[\%] \tag{1}$$

where: A - the mean value, D - standard deviation

The measurements of soil compaction were taken with a dynamic penetrometer six times at various locations in the field, every 5 cm until the depth of 35 cm, and it was calculated by the following formula:

$$Z = 0,087 \cdot \frac{k}{s} [MPa] \tag{2}$$

where: *k* - the number of blows of the drop weight, *s* - the depth of penetration, 0,087 [MN·m] – a constant depending on the technical properties of the penetrometer, which takes into account the mass of the drop weight (1kg), gravitational acceleration (9,81 m·s⁻¹), the height of the drop (1 m) and the cross-section of the probe rod (113·10⁻⁶ m²).

Soil relative humidity was measured six times. Each time samples were collected from three depths (0-10, 10-20, 20-30 cm) (ASAE standards1996).

4. Results and discussion

The results of measurements of the carrot plantation where the performance of the Dewulf harvester was investigated are presented in table 1. Soil conditions are presented in table 2.

The carrots were grown on 0.184 m high ridges (formed by a Struik Diabolo Roller bed-forming aggregate) spaced 0.707 m apart. Carrot seeds were drilled (with a pneumatic Monosem seeder) in two rows, 0.08 m apart (as recommended by Dewulf for combine harvesting). During vegetations the distance between the rows grew to 0.12 m. The distance between plants in the rows was 0.049 m. The height of plants before top straightening was 0.236 m, and the plant droop index was 35.4%. The average length of Nerac carrot roots was 0.195 m, and their diameter was 0.028 m. The number of roots per 1 m² was 79. The biological yield of carrot roots was 89.9 t ha⁻¹, and that of weeds amounted to 3.1 t ha⁻¹. Combine harvesting was conducted at soil relative humidity of 14.1% and soil compaction of 1.12 MPa.

The research results concerning the performance of the Dewulf combine at harvesting Nerac carrot roots are presented in figures 5 and 6.

The Dewulf combine caused certain mechanical damages to carrot roots. The greatest, though a relatively small percentage of damages, i.e. 3%, were scratches, which could be observed on root heads. The scratches were caused by the operation of the topping unit. Their relatively small incidence could be reduced even further by a less aggressive setting of the topping unit; however, at such a setting, tops would not be completely remo-

Tab. 1. Charakterystyka plantacji marchwi odmiany Nerac

 Tab. 1.
 Characterization of the Nerac carrot plantation

	Wyszczególnienie Specification	Jednostka miary Unit of measure	Średnie wyniki pomiarów Mean	Współczynnik zmienności, % Coefficient of variation, %
Wysokość roślin przed wyprostowaniem naci Height of plants before straightening the tops		m	0,236	26,5
Wysokość roślin po Height of plants af	o wyprostowaniu naci ter straightening the tops	m	0,353	27,4
Wskaźnik wylegan	ia roślin / Plant droop index	%	35,4	-
Rozstaw redlin / Th	e spacing of the ridges	m	0,707	1,1
Wysokość redlin / I	Height of the ridges	m	0,184	4,4
Odległość między rzędami roślin The distance between the rows of plants		m	0,120	10,6
Odległość między The distance betw	roślinami w rzędach een plants in the rows	m	0,049	44,6
Wysokość wystawania główek korzeni nad redliną The protrusion of root heads above the ridge surface		m	0,014	72,4
Długość korzeni / 1	The length of roots	m	0,195	17,0
Maksymalna średn	ica korzeni / Max diameter of roots	m	0,028	17,6
Liczba korzeni na 1	m ² /The number of roots per m ²	-	79	14,0
	Korzeni marchwi / Carrot roots		89,9	14,0
Biological vield	Naci / Top leaves	t∙ha⁻¹	6,5	24,8
	Chwastów / Weeds		3,1	42,5

Tab. 2. Warunki glebowe plantacji

Tab. 2. Soil conditions of the plantation

Wyszczególnienie Specification	Jednostka miary Średnie wyniki pomiarów Unit of measure Mean		Współczynnik zmienności, % Coefficient of variation, %	
Zwięzłość gleby / Soil compaction	MPa	1,12	19,4	
Wilgotność gleby / Soil relative humidity	%	14,1	14,7	



^{*} współczynnik zmienności, % / coefficient of variation, %

Rys. 5. Uszkodzenia pojawiające się podczas zbioru marchwi odmiany Nerac

Fig. 5. Damages to Nerac carrots during combine harvesting

agresywne ustawienie zespołu obrywającego, jednak wtedy przy korzeniach zostawałaby część naci. Przy zastosowanym ustawieniu zespół obrywający działał prawidłowo i pozbawiał korzenie całkowicie z naci. W zebranym materiale korzeni z niecałkowicie oberwaną nacią było 2,3%. Trzeba tu podkreślić, że przy korzeniach pozostawiane były jedynie co najwyżej zielone, pojedyncze, kilkucentymetrowe liście lub pojedyncze zbutwiałe, całkowicie opadnięte. Nać zdrowa i wyrośnięta ob-



* współczynnik zmienności, % / coefficient of variation, % Rys. 6. Straty i zanieczyszczenia

Fig. 6. Carrot losses and impurities in the gathered material

ved from the roots. At the adopted setting, the topping unit operated properly and entirely removed top leaves from the roots. The material collected included 2.3% of incompletely topped roots. It should be emphasized that the only elements of the top left were, at the most, single green leaves of a few centimeters or decayed, drooping leaves. Healthy, well-formed tops were removed entirely in all cases. In order to reduce the percentage of imperfectly topped roots, it is advisable to harvest carrots rywana była w 100%. Warunkiem uzyskania jeszcze mniejszego udziału korzeni z nie oberwaną nacią jest zadbanie o to, by zbiór przeprowadzony był zanim nać zbutwieje i zacznie opadać. Drugim typem zaobserwowanych uszkodzeń były złamania korzeni (2,4%). Trzeba przyznać, że jest to bardzo niewielki procent uszkodzeń [7, 15, 16] zważywszy na to, że przenośnik załadowczy jest umieszczany nad skrzyniopaletą i korzenie muszą spaść z wysokości ponad 1 m. Wysokość spadku bardzo dobrze amortyzuje zatem kosz załadowczy. Wśród uszkodzonych korzeni nie było zupełnie pękniętych wzdłużnie.

Stwierdzono znaczny udział strat - pozostawianie korzeni w glebie (5%) lub ich gubieniem podczas transportu pasami chwytnymi (2,2%). Straty te spowodowane były ułamywaniem się naci na skutek niewłaściwego chwytania jej przez pasy chwytne, tzn. pasy chwytne zamiast ciągnąć za nać pionowo do góry ciągnęły ją w znacznym stopniu w bok. Przyczyną tego było oddalenie się od siebie rzędów marchwi (0,12 m), a pasy muszą uchwycić nać z obu rzędów jednocześnie. Podobne straty odnotowali przy zbiorze kombajnem Supernowa dla rozstawu rzędów 0,11 m Kowalczuk i Leszczyński [16]. Dobrze było-by zatem, szczególnie przy plantacji na glebach lżejszych, siać marchew z mniejszym rozstawem rzędów, uwzględniając ich rozejście się w czasie wegetacji (na badanej plantacji oddaliły się od siebie aż o 50%). Zatem siew powinien być prowadzony w rzędach oddalonych od siebie do 0,06 m.

W zebranym materiale zanieczyszczeń organicznych odnotowano 3,4%, zaś nieorganicznych 2,0%.

5. Wnioski

- 1. Udział strat korzeni marchwi (pozostawianie w glebie i gubienie) (7,2%) można by ograniczyć przez zmianę techniki siewu np. przez wysiew w pasach, bądź w rzędach o rozstawie do 0,06 m na jednej redlinie.
- Badany kombajn jednorzędowy Dewulf w zastanych warunkach zbioru nie przyczyniał się do powstawania pęknięć korzeni oraz uszkadzał korzenie w niewielkim procencie: 2,4% złamań i 3,0% otartych główek.
- Zespół obrywający zastosowany w kombajnie Dewulf działa idealnie w odniesieniu do długiej i zdrowej naci (obrywa 100% naci). Jedynie pozostawiał krótką do 5 cm nać lub zbutwiałą całkowicie opadnietą nać. Takiej naci było 2,3%.

before tops begin to decay and droop. Another type of damage observed were root breakages (2.4%). It is worth noting that the percentage of such damages [7, 15, 16] was very low, considering that the elevator is placed above the pallet box, and roots are dropped from the height of 1 m. It appears that the drop is effectively cushioned by the chute. No longitudinal fractures were observed in the gathered roots.

A considerable percentage of losses was observed, which included roots remaining in the soil (5%) and lost while being transported by the pick-up belts (2.2%). These losses occurred when tops were broken off as a result of being inappropriately picked by the pick-up belts, i.e. instead of pulling the tops upwards, the belts pulled them considerably sideways. This effect was caused by an excessive distance between the rows of carrots (0.12 m) since the belts must simultaneously pluck up roots from both rows. Similar losses were noted by Kowalczuk and Leszczyński [16] during carrot harvesting with a Supernova combine in a plantation where the distance between rows was 0.11 m. Therefore, it is advisable, especially on lighter soils, to sow carrots in drills that are spaced closer apart, allowing for the fact that the distance between the rows increases during vegetation (it increased by as much as 50% in the studied plantation). It appears that carrot seeds should be sown in drills 0.06 m apart.

In the material collected, organic impurities constituted 3.4%, whereas the share of inorganic impurities amounted to 2.0%.

5. Conclusions

- 1. The percentage of root losses (roots left in the soil or lost after plucking) (7.2%) could be reduced by changing the sowing technique e.g. by sowing carrot seeds in two drills 0.06 m apart on each ridge.
- 2. Under the existing conditions the Dewulf combine did not cause any longitudinal fractures and damaged only a small percentage of roots, including 2.4% of breakages and 3.0% of roots with scratched root heads.
- 3. The topping unit of the Dewulf combine worked perfectly on long and healthy tops, removing them completely. At worst, it was observed to leave short tops, under 5 cm, or single decayed and drooping leaves. There were 2.3% of such roots.

6. References

- 1. ASAE Standards. S352.2 Moisture Measurement Unground Grain and Seeds. 4rd Ed. ASAE, St. Joseph 1996.
- 2. Baur R, Sauer C, Krauss J, Keller M. Carrot fly (Psila rosae) control in Switzerland current strategies and prospective developments. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin 2009; 39(2): 134-137.
- 3. Boag B. Nematodes associated with carrots in Scotland. Annals of Applied Biology 1979; 93(2): 199-204.
- 4. Bzowska-Bakalarz M. Właściwości mechaniczne korzeni buraków cukrowych. Rozprawy Naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie 1994: 166.
- 5. De Baerdemeaker J G, Segerlind L J. Determination of the viscoelastic properties of the apple flesh. Transaction of the ASAE 1976; 19: 346-353.
- 6. Fincan M, Dejmek P. Efect of osmotic pretreatment and pulsed electric field on the viscoelastic properties of potato tissue. Journal of Food Engineering 2003; 59: 169–175.
- 7. Furtak J, Świć K. Badania jakości pracy kombajnu "Asa-Lift" do zbioru marchwi. Rocznik Nauk Rolniczych 1986; t. 76-C-2.
- 8. Gołacki K. A quick method to determine the mechanical condition of carrot roots. Acta Horticulturae 1998; 421: 259-263.
- Goodliffe J P, Heale J B. Incipient infections caused by Botrytis cinerea in carrots entering storage. Annals of Applied Biology 1975; 80(2): 243-246.
- Gracie A J, Brown P H. Partial defoliation treatments to reduce carrot (Daucus carota L.) taproot splitting. Australian Journal of Agricultural Research 2004; 55(8): 887-894.

- 11. Groves S J, Bailey R J. The effect of irrigation upon the root yield and incidence of common scab of carrots. Annals of Applied Biology 1994; 38: 217-221.
- 12. Kainulainen P, Nissienen A, Piirainen A, Tiilikkala H K. Essential oil composition in leaves of carrot varieties and preference of specialist and generalist sucking insect herbivores. Agricultural and Forest Entomology 2002; 4: 211-216.
- 13. Keller M. Supervised control strategies against carrot fly and swede midge. Der Gemüsebau 2006; 2: 11-12.
- Kowalczuk J, Leszczyński N, Bieganowski F. Ocena jakości zbioru korzeni marchwi jednorzędowymi kombajnami typu Simon i Alina. Evaluation of the quality of Carnot root harvested with Alina and Simon one-row harvesters. Acta Agrophysica 2003; 2(1): 105-111.
- 15. Kowalczuk J, Leszczyński N. Straty i uszkodzenia korzeni marchwi powstające podczas zbioru jednorzędowym kombajnem Simon. Carrot root losses and demages ocurring during harvest by means of one-row Simon harvester. Acta Agrophysica 2005; 6(3): 671-676.
- 16. Kowalczuk J, Leszczyński N. An Influence of the working parameters of Alina Supernova Combine on harvest quality of Carrot roots. Teka komisji motoryzacji i energetyki rolnictwa 2009; 9: 128-133.
- Lee H K, Park C, Ahn Y J. Insecticidal activities of asarones identified in Acorus gramineus rhizome against Nilaparvata lugens (Homoptera Delphacidae) and Plutella xylostella (Lepidoptera: Yponomeutoidae). Applied Entomology and Zoology 2002; 37: 459-464.
- Nissinen A, Vanhala P, Holopainen J K, Tiilikkala K. Short feeding period of carrot psyllid (Trioza apicalis) females at early growth stages of carrot reduces yield and causes leaf discolouration. Entomologia Experimentalis et Applicata 2007; 125: 277-283.
- 19. Préstamo G, Fuster C, Risueño M C. Effects of blanching and freezing on the structure of carrots cells and their implications for food processing. Journal of the Science of Food and Agriculture 1998: 77(2); 223-229.
- Stopa R, Jankowski L J. Displacement distributions in mechanical model of carrot roots cross-section. Inżynieria Rolnicza 2008; 5(103): 275-282.
- 21. Stopa R, Romański L. Izochromtic pattern distributions In Carnot root's cross-section model for different cohesion force between core and bark layer. Inżynieria Rolnicza 2008; 5(103): 383-390.
- 22. Stropek Z, Gołacki K. Metoda porównania przebiegów krzywych relaksacji naprężeń różnych materiałów roślinnych. Inżynieria Rolnicza 2006; 12: 473-479.
- 23. Thiel B L, Donald A M. In Situ Mechanical Testing of Fuldy Hydrated Carrot (Daucus Carota) in the Environmental SEM. Annals of Botany 1998; 82: 727-733.

Dr inż. Norbert LESZCZYŃSKI

Katedra Maszyn i Urządzeń Ogrodniczych Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie Ul. Głęboka nr 28, 20-612 Lublin, Polska e-mail: norbert.leszczynski@up.lublin.pl

MODELE OPTYMALIZACJI GRUPOWEJ DLA ZŁOŻONYCH ZADAŃ OBSŁUGOWYCH DOTYCZĄCYCH SYSTEMÓW WIELOSKŁADNIKOWYCH

GROUP OPTIMIZATION MODELS FOR MULTI-COMPONENT SYSTEM COM-POUND MAINTENANCE TASKS

W ostatnich latach prowadzi się coraz więcej badań w zakresie optymalizacji eksploatacji systemów wieloskładnikowych, czego wynikiem są licznie proponowane metody optymalizacji oraz modele matematyczne. Jednakże najczęściej bada się proste zadania obsługowe, a rzadko występujące w praktyce zadania złożone, wymagające kilku rodzajów obsługi. W artykule przedstawiono strategię obsługi grupowej służącą optymalizacji przerw na złożone czynności obsługowe w systemach wieloskładnikowych oraz zaproponowano etapy i metody optymalizacji. Przeprowadzono analizę struktury kosztów utrzymania systemu oraz wyznaczono modele kosztów w celu optymalizacji przerw na złożone czynności obsługowe. Wydajność proponowanych modeli zilustrowano przykładem numerycznym.

Słowa kluczowe: złożone czynności obsługowe, optymalizacja grupowa, system wieloskładnikowy, zależność ekonomiczna, przerwa konserwacyjna.

More and more researches have been made on maintenance optimization of multi-component system in recent years, and a lot of optimization methods and mathematical models have been proposed. However, the maintenance tasks in present researches are mostly simplex, while the compound maintenance tasks integrating several kinds of maintenance types that exist in practice are seldom studied. To optimize the compound maintenance intervals of multi-component system, the group maintenance strategy is introduced in this paper, and the optimization steps and methods are proposed. The maintenance cost structure and composition are analyzed from system point of view, and the cost models to optimize the compound maintenance intervals are established. Finally, a numerical example is presented to illustrate the efficiency of the proposed models.

Keywords: compound maintenance, group optimization, multi-component system, economic dependency, maintenance interval.

1. Introduction

With the development of modern devices and equipments, the number of their components is becoming more and more, and the structures and relationships between components are becoming more and more complex, which result in so-called "multi-component system" consisting of multiple dependent components [4]. Different from the single component system or simple system with independent components, interactions between components complicate the maintenance modeling and optimization. However, the interactions also offer the opportunity to group maintenance tasks, reduce maintenance costs, and improve availability further [11].

The present researches on multi-component system maintenance are primarily based on the stochastic, structural or economic dependency between components [11]. This paper exclusively deals with multi-component system with economic dependency. Economic dependency implies the maintenance costs can be saved when several components are jointly maintained instead of separately [12]. Many relevant researches have been done for the maintenance optimization of multicomponent system with economic dependency. References [1, 13, 14] adopted the fixed group maintenance strategy, and optimized the intervals of block replacement, minimal repair and preventive replacement. References [3, 5, 6, 10, 15, 16] focused on the optimized group maintenance strategy. Among them, reference [10] proposed a heuristic approach to group the maintenance tasks of periodic replacement; reference [3] dealt with the joint execution of traditional periodic replacement and functional check considering potential failure; and reference [16] eliminated the maintenance tasks unworthy of grouping with the principle of maximum gradient, which optimized the optimal solution further.

However, the maintenance tasks in above researches are all simplex, such as periodic replacement, functional check, operational check, and so on. In practice, there still exist the compound maintenance tasks. The compound maintenance means the maintenance mode integrating two or more kinds of maintenance types. For example, the maintenance policy for the transmissions of the locomotive is usually under periodic major repair with some times of preventive minor repair [8]. The researches on such type of maintenance mode are little.

Because functional check and periodic replacement are typical in practical maintenance, the maintenance mode of periodic replacement with functional checks is illustrated to study the multi-component system compound maintenance optimization. The mathematical models are established for expected system maintenance cost per unit time, and the intervals of functional check and the inspection times in a periodic replacement span are optimized, which minimize the whole system maintenance cost.

2. The group optimization strategy of multi-component system compound maintenance tasks

2.1. Periodic replacement with functional checks

The detailed process of periodic replacement with functional checks is as follows: the component is preventively replaced with the interval of T_r , and between successive replacements the functional checks are implemented with the interval of $T_n = T_r/k$, which means there are (k-1) times of inspections before the replacement (see fig. 1). When carrying on functional checks, if a potential failure is identified, preventive maintenance should be adopted; if not, the component will continue to work until either a failure occurs or the next check. During the replacement period, if a functional failure occurs, the item should be repaired.

Through compound maintenance, the component life can be made full use of, the failure rate can be effectively reduced, and the maintenance cost can be greatly saved in practical maintenance.

2.2. The group optimization strategy of compound maintenance

Group maintenance is a maintenance optimization strategy fit for multi-component system. Under this strategy, an occasion for preventive maintenance is determined at a basis maintenance interval, then each components is maintained at an integer multiple of this interval [16]. From the viewpoint of system availability or cost, the group maintenance is an effective method to optimize multi-component system maintenance tasks, and it is especially suitable when the overhaul or set-up costs are relatively high.

For compound maintenance tasks, the inspection and replacement intervals of the system should be determined first, to which the maintenance time of the components should then be adjusted, thus some maintenance tasks can be carried out simultaneously, and the times of breakdown and set-up costs could be reduced (see fig. 2).

3. The group optimization models of multi-component system compound maintenance

3.1. Modeling notation and assumption

- The run time of the system is far longer than its maintenance interval;
- The failures of the components occur independently with single failure mode;
- Inspection is perfect in that any potential failure present will be identified at an inspection time;
- The system consists of *L* components. The inspection and replacement intervals of component *i* are respectively T_{ni} and T_{ri} before grouping, and T_{Sni} and T_{Sri} after grouping;
- U_i : The time when potential failure of component *i* arises, and its *p.d.f* and *c.d.f* are denoted by $g_i(u)$ and $G_i(u)$, respectively;





MAINTENANCE AND RELIABILITY NR 1/2011

- H_i : The delay time of component *i* from potential failure to functional failure, and its its *p.d.f* and *c.d.f* are denoted by $f_i(h)$ and $F_i(h)$, respectively;
- C_n : the periodic replacement cost of component *i*;
- C_{ni} : the functional check cost of component *i*;
- C_{ni}^{m} : the inspection renewal cost of component *i*;
- C_{fi} : the failure renewal and failure loss cost of component *i*;
- D_{ii} : the cost of set-up and system shutdown loss for periodic replacement of component *i*;
- D_{ni} : the cost of set-up and system shutdown loss for functional check of component *i*;
- D_{ij} : the cost of set-up and system shutdown loss for the *j*th maintenance tasks package.

3.2. The compound maintenance interval optimization of single component

According to the optimization process proposed in 2.3, it starts from the analysis of maintenance cost of single component's periodic replacement with functional check. Considering from the aspect of single component, the component is under the periodic replacement policy in infinite time horizon. From the renewal reward theorem, component *i*'s mean cost per unit time can be expressed as:

Total expected cost in one periodic replacement cycle The length of one periodic replacement cycle

That is
$$CR_i(T_{ri}) = \frac{CP_i(T_{ni}, T_{ri}) + C_{ri} + D_{ri}}{T_{ri}}$$
 (1)

Where $CP_i(T_{ni}, T_{ri})$ denote component *i*'s expected cost during $[0, T_{ri}]$ with T_{ni} as its functional check interval. As can be seen, the key of the equation is $CP_i(T_{ni}, T_{ri})$.

During every periodic replacement period $[0, T_n]$, the component *i* is under functional check policy in finite time horizon, and the inspection time is $k_i = \left\lceil \frac{T_n}{T_{ni}} \right\rceil - 1$ ($\lceil * \rceil$ means the upper

bound integer of *). The cost $CP_i(T_{ni},T_{ri})$ is made up of the following three mutually exclusive events:

Event A: Neither inspection renewal nor failure renewal occurs during periodic replacement period, that is, there is no renewal event over T_{n} . The cost can be expressed as $k_i \cdot C_{n}$, and may be resulted from the following two cases:

- Case 1: there is no potential failure occurring before T_{n} , i.e. $U \ge T_{n}$;
- Case 2: a potential failure occurs at *u* between the last two checks, and there is no functional failure occurring before replacement, i.e. $k_i T_{ni} < U_i < T_{ri} \cap \Box U_i + H_i > T_{ri}$

Therefore, we have the probability of no renewal event occurring before T_{ri}

$$P_{ni}(T_{ri}) = 1 - \int_{0}^{T_{ri}} g_i(u) du + \int_{(k_i - 1)T_{ni}}^{T_{ri}} g_i(u) [1 - F_i(T_{ri} - u)] du \quad (2)$$

Event B: Renewal events occur, and the first renewal is an inspection renewal at the *lth* inspection. The cost can be expressed as: $l \cdot C_{ni} + C_{pi} + CP_i(T_{ni}, T_{ri} - l T_{ni})$.

To derive the probability of an inspection renewal at time lT, we note that the condition for a defect occurring in (u, u+du)

 $((l - 1)T_{ni} < u < lT_{ni})$ and being identified at the *lth* inspection is a combination of the following events:

- The defect didn't occur before $(l 1)T_{ni}$ and was identified at the *lth* inspection.
- The delay time of the defect must be longer than lT_{ni} u.

The probability of this event is $g_i(u)du[1-F_i(lT_{ni}-u)]$. Integrating all possible *u* between $((l-1)T_{ni}, lT_{ni})$, we have the probability of a defect being identified at inspection *lT* as

$$P_{mi}(lT_{ni}) = \int_{(l-1)T_{ni}}^{lT_{ni}} g_i(u) [1 - F_i(T_{ni} - (lT_{ni} - u)] du \quad (3)$$

Event C: Renewal events occur, and the first renewal is a failure renewal at time $x((j-1)T_{ni} < x < jT_{ni})$. The cost can be expressed as: $(j-1)C_{ni} + C_{ji} + CP_i(T_{ni}, T_{ri} - x)$.

To derive the *p.d.f* of a failure renewal at time *x*, we assume that a defect arises at $(u, u+du)((j-1)T_{ni} < u < jT_{ni})$, for it is to become a failure in (x, x+dx), the delay time *h* must satisfies x-u < h < x+dx-u. So the probability density is:

$$p_{bi}(x) = \int_{(j-1)T_{ni}}^{jT_{ni}} g_i(u) f_i(x-u)] du$$
 (4)

Plus the system shutdown and set-up activities, we have the function of expected maintenance cost over T_{i} as:

$$CP_{i}(T_{ni}, T_{ri}) = k_{i} \cdot C_{ni} \cdot P_{ni}(T_{ri}) +$$

$$+ \sum_{l=1}^{k_{i}} [l \cdot C_{ni} + C_{pi} + CP_{i}(T_{ni}, T_{ri} - lT_{ni})] \cdot P_{mi}(l \cdot T_{ni}) +$$
(5)
$$\sum_{j=1}^{k_{i}+1} \int_{(j-1)T_{mi}}^{jT_{mi}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{ni}, T_{ri} - x)] \cdot P_{bi}(x) dx + k_{i} \cdot D_{ni}$$

By the equations (1)-(5), we can get the function of component *i*'s mean cost per unit time, then the optimal interval T_{ni} and T_{ri} can be obtained.

3.3. The adjustment of compound maintenance interval

The maintenance intervals need optimization from the viewpoint of system to obtain T_{Sn} and T_{Sr} . The adjustment rules of maintenance intervals for component *i* are as follows: the interval of replacement $T_{Sri} = \left| \frac{T_{ri}}{T_{Sr}} \right| \cdot T_{Sr} = N_{ri} \cdot T_{Sr} \left(T_{Sr} \le T_{ri} \right)$, the interval of inspection $T_{Sni} = \left| \frac{T_{ni}}{T_{Sn}} \right| \cdot T_{Sn} = N_{ni} \cdot T_{Sn} \left(T_{Sn} \le T_{ni} \right)$, the

inspection times in a replacement span
$$k_{Si} = \left| \frac{T_{Sri}}{T_{Sni}} \right| - 1$$
. Note

that, k_i sometimes may not be an integer (see fig. 3), then the equation (5) for $CP_i(T_{ni}, T_{ri})$ needs amendment.



$$CP_{i}(T_{ni}, T_{ri}) = k_{i} \cdot C_{ni} \cdot P_{ni}(T_{ri})s +$$

$$+ \sum_{l=1}^{k_{i}} [l \cdot C_{ni} + C_{pi} + CP_{i}(T_{ni}, T_{ri} - lT_{ni})] \cdot P_{mi}(l \cdot T_{ni}) +$$

$$+ \sum_{j=1}^{k_{i}} \int_{(j-1)T_{mi}}^{jT_{mi}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{ni}, T_{ri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + (6)$$

$$+ \int_{k_{i}T_{mi}}^{T_{i}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{ni}, T_{ri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + k_{i} \cdot D_{ni}$$

$$C_{S}(T_{Sn}, T_{Sr}) = C_{S1}(T_{Sn}, T_{Sr}) + C_{S2}(T_{Sn}, T_{Sr}) =$$

$$= \sum_{i=1}^{L} \left[\frac{CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri}) - k_{Si} \cdot D_{ni} + C_{ri}}{T_{Sri}} \right] + \frac{\sum_{j=1}^{N} D_{Sj}}{T_{Sr \max}}$$
(10)

If the maintenance activities are not packaged, the system may need shutdown for every task, which would result in higher maintenance cost. Then, the system maintenance cost in a unit time can be expressed as:

Integrating equation (5) and (6), we can get

$$CP_{i}\left(T_{Sni}, T_{Sri}\right) = \begin{cases} k_{Si} \cdot C_{ni} \cdot P_{ni}(T_{Sri}) + \sum_{l=1}^{k_{Si}} [l \cdot C_{ni} + C_{pi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - lT_{Sni})] \cdot P_{mi}(l \cdot T_{Sni}) + \\ \sum_{j=1}^{k_{Si}+1} \int_{(j-1)T_{Sui}}^{jT_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + k_{Si} \cdot D_{ni}, \quad \frac{T_{Sri}}{T_{Sni}} = N \\ k_{Si} \cdot C_{ni} \cdot P_{ni}(T_{Sri}) + \sum_{l=1}^{k_{Si}} [l \cdot C_{ni} + C_{pi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - lT_{Sni})] \cdot P_{mi}(l \cdot T_{Sni}) + \\ \sum_{j=1}^{k_{Si}} \int_{(j-1)T_{Sui}}^{jT_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{j=1}^{k_{Si}} \int_{(j-1)T_{Sui}}^{jT_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{k_{Si},T_{Sui}} \int_{(j-1)C_{ni}}^{T_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{k_{Si},T_{Sui}} \int_{Sui}^{T_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{k_{Si},T_{Sui}} \int_{Sui}^{T_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{k_{Si},T_{Sui}} \int_{Sui}^{T_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{k_{Si},T_{Sui}} \int_{Sui}^{T_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{k_{Si},T_{Sui}} \int_{Sui}^{T_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{k_{Si},T_{Sui}} \int_{Sui}^{T_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sni}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{k_{Si},T_{Sui}} \int_{Sui}^{T_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sui}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{k_{Si},T_{Sui}} \int_{Sui}^{T_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sui}, T_{Sri} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{k_{Si},T_{Sui}} \int_{Sui}^{T_{Sui}} [(j-1)C_{ni} + C_{fi} + CP_{i}(T_{Sui}, T_{Sui} - x)] \cdot P_{bi}(x)dx + \\ \sum_{k_{Si},T_{Sui}} [(j-1)C_{ki} + CP_{ki}(T_{Sui}, T_{Sui} - x)] \cdot P_{ki}(T_{Sui}, T_{Sui} - x]$$

3.4. The optimization of compound maintenance intervals for multi-component system

The system maintenance cost consists of two parts: one is the cost for inspection, preventive maintenance and corrective maintenance; the other is the cost for set-up and shutdown loss of system group maintenance [16].

The system maintenance cost in a unit time can be expressed as:

$$C_{S1}(T_{Sn}, T_{Sr}) = \sum_{i=1}^{L} \left[CR_i(T_{Sri}) - \frac{k_{Si} \cdot D_{ni} + D_{ri}}{T_{Sri}} \right] =$$

$$= \sum_{i=1}^{L} \left[\frac{CP_i(T_{Sni}, T_{Sri}) - k_{Si} \cdot D_{ni} + C_{ri}}{T_{Sri}} \right]$$
(8)

The system set-up and shutdown cost in a unit time can be expressed as:

$$C_{S2}(T_{Sn}, T_{Sr}) = \frac{\sum_{j=1}^{m} D_{Sj}}{T_{Sr \max}}$$
(9)

Where $T_{Srmax} = \max(T_{Sri}), M = \frac{T_{Srmax}}{T_{Sri}}, D_{Sj} = \max(D_{nX}, D_{rY})$

$$X = \left\{ x \middle| T_{Snx} / T_{Sn} \in N \right\}, \ Y = \left\{ y \middle| T_{Sry} / T_{Sr} \in N \right\}$$

Tab. 1. Maintenance costs and lifetime distribution parameters

$$C_{s0} = \sum_{i=1}^{L} CR_i \left(T_{r_i}\right) = \sum_{i=1}^{L} \frac{CP_i \left(T_{n_i}, T_{r_i}\right) + C_{r_i} + D_{r_i}}{T_{r_i}} \quad (11)$$

By (1)—(9), the equations (10) and (11) can be solved. If
result of (10) could reduce the maintenance cost satisfac-

the result of (10) could reduce the maintenance cost satisfactorily compared with that of (11), the effectiveness of group maintenance can be validated.

4. A numerical example

A simple numerical case is computed here to demonstrate and validate the group optimization for the compound maintenance tasks of multi-component systems. Assuming that a system consists of five components, the initial time and delay time of each component all follow Weibull distribution, the related maintenance costs and life distribution parameters are listed in Table 1.

By the models established in this paper, the intervals and costs before and after group maintenance for the compound maintenance tasks of multi-component system can be optimized with MatLab 7.1. Fig. 4 is the three-dimensional diagram reflecting the changes of system maintenance cost with intervals of replacement and times of inspection in a replacement span.

It can be obtained that when the basis intervals for replacement and inspection are respectively 186 and 31, the whole system maintenance cost can be minimized with the result of 797.5324. If the maintenance tasks are not grouped, the sys-

Ir										
i	C _{ri}	D _{ri}	C _{pi}	C _{fi}	C _{ni}	D _{ni}	m _{ui}	I _{ui}	m _{hi}	I _{hi}
1	1500	2000	500	6000	100	1000	1	30	1	25
2	1000	3000	400	4000	50	800	3	18	1.6	20
3	1400	2100	800	3000	150	1200	2	20	1	15
4	3800	7000	1900	9000	400	2800	3	19	5	27
5	2900	5500	700	6700	200	1100	2	25	1.5	10



Fig. 4. The three-dimensional diagram of cost optimization for multi-component system

tem maintenance cost would rise to 912.1948. The maintenance intervals and costs before and after group optimization can be seen in Table 2. As is seen, the group optimization of compound maintenance tasks can reduces the system maintenance cost by 12.57% than before.

5. Conclusions

Aiming to the requirements of maintenance tasks combination optimization for multi-component system, the group maintenance policy is introduced to optimize the periodic replacement and functional check from the viewpoint of system. The mathematical models for system group maintenance intervals are established, and the effectiveness is validated by a case study. Actually, the model is established only from the aspect of cost; if the failure consequences are evaluated by other factors, such as availability, risk and so on, the corresponding models can also be established in the similar way. The researches on maintenance modeling and optimization of multi-component system, could provide reference for maintenance decision; furthermore, they are of great significance for improving decision scientificity and practical application.

Tab 2	Maintonanco intervals and	costs before and	after aroun o	ntimization
100.2.	wantenance intervals and	costs before and	unter group o	punnzation

	Before group optimization				After group optimization						
Result		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Intervals of insp	pection	43	32	51	35	26	31	31	62	31	31
Times of inspe	ection	5	6	7	8	6	6	6	6	12	6
Intervals of replacement		215	192	357	280	156	186	186	372	372	186
System maintena	ince cost			912.1948	3		797.5324				

The research work financed with the means of the National Natural Science Foundation of China under contract number 70971135 and the Materiel Pre-research Foundation under contract number 9140A27070108JB3410.

6. References

- 1. Archibald T. W., Rommert Dekker. Modified Block Replacement for Multiple Component Systems. IEEE Transaction on Reliability, 1996,45:75-83.
- 2. Bai Yongsheng, Jia Xisheng, Cheng Zhonghua. A Cost Model of Block Replacement with Functional Checks. Proceedings of the First International Conference on Maintenance Engineering, 2006.
- Bai Yongsheng, Jia Xisheng, Li Feng. Cost Model Based Optimization of RCM Group Maintenance Interval. Proceedings of the Sixteenth International Conference on IE&EM, 2009.
- Cai Jing, Zuo Hongfu, Liu Ming. Optimal Group Preventive Maintenance Model for Complex Systems. Journal of Applied Sciences 2006; 24(5): 533-537.

- 5. Cai Jing, ZuoHongfu, Wang Huawei. Study on optimal model of complex systems with economic dependency. Systems Engineering and Electronics 2007; 29(5): 835-838.
- 6. Defeng Lv, Hongfu Zuo, Jing cai. Preventive Maintenance Cycle's Optimization of Complex System. The Fourth International Conference on Natural Computation 2008.
- 7. Gan Maozhi, Kang Jianshe, Gao Qi. Military Equipment Maintenance Engineering (Edition 2). National Defense Industry Press 2005.
- 8. Gao Ping. The Research on Preventive Maintenance Decision of Complex Equipment Based on Reliability Analysis. Tsinghua University Doctoral Dissertation 2008.
- 9. Jia Xisheng. The Decision Models for Reliability Centered Maintenance. National Defense Industry Press 2007.
- 10. Renyan Jiang, D.N.Prabhakar Murthy. Maintenance: decision models for management. Science Press 2008.
- 11. Robin P. Nicolai, Rommert Dekker. Optimal Maintenance of Multi-Component Systems: a Review. Econometric Institute Report 2006-29.
- 12. Rommert Dekker, Frank A. van der Duyn Schouten, Ralph E. Wildeman. A Review of Multi-Component Maintenance Models with Economic Dependence. Mathematical Methods of Operations Research 1997; 45(3): 411-435.
- 13. Sheu S. H. A Generalized Block Replacement Policy with Minimal Repair and General Random Repair Costs for a Multi-Unit System. Journal of the Operational Research Society 1991; 42: 331-341.
- 14. Vladimír Jurča, Tomáš Hladík, Zdeněk Aleš. Optimization of preventive maintenance intervals. Eksploatacja i Niezawodnosc Maintenance and Reliability 2008; 3: 41-44.
- 15. Wei Peng, Hong Zhong Huang, XiaoLing Zhang etc. Reliability based optimal preventive maintenance policy of series-parallel systems. Eksploatacja i Niezawodnosc Maintenance and Reliability 2009; 2: 4-7.
- 16. Zhao Jianhua, Zhao Jianmin and Zhao Liqin. An optimization of joint preventive maintenance for a multi-component system. Mathematics in Practice and Theory 2005; 35(6): 182-188.

Yongsheng BAI, Ph.D. Prof. Xisheng JIA, Ph.D. Prof. Zhonghua CHENG, Ph.D. Department of Management Engineering Mechanical Engineering College Shijiazhuang, Hebei, 050003, P.R. China e-mail: xiaobai2004@sohu.com

ANALIZA SYSTEMU TRANSPORTOWEGO Z WYKORZYSTANIEM SIECI PETRIEGO

ANALYSIS OF TRANSPORTATION SYSTEM WITH THE USE OF PETRI NETS

W pracy poruszono problem analizy funkcjonowania systemu transportu miejskiego. Badanie niezawodności tego typu złożonych systemów powinno dodatkowo uwzględnić szereg zagadnień. Jednym z nich jest zawodność elementów wsparcia logistycznego, zdefiniowana jako możliwość pojawienia się braku elementów wymiennych w zapasie, w chwili i miejscu gdy wystąpi na nie zapotrzebowanie. Taka sytuacja może doprowadzić do pogorszenia się charakterystyk eksploatacyj-nych systemu wspieranego. Dlatego też oba systemy, wspierany i wspierający, powinny być wspólnie modelowane. Jed-nakże, uwzględnienie wszystkich parametrów strukturalnych systemów (np. rezerwowanie, zdolność operacyjna systemu obsługi) oraz zmiennych losowych (np. poziom zapasów części wymiennych, parametry polityki obsługiwania, rezerwa czasowa) w jednym modelu jest zadaniem trudnym z matematycznego punktu widzenia. Dlatego też, w artykule zastosowano model sieci Petriego oraz procesy symulacji Monte Carlo. Ponadto, w artykule przedstawiono porównanie wyników teoretycznych oraz uzyskanych z procesu funkcjonowania rzeczywistego systemu komunikacji miejskiej.

Słowa kluczowe: system wsparcia logistycznego, system transportowy, sieci Petriego, proces symulacji.

The paper considers problem of city transportation system performance. Reliability analysis of such a complex system is complicated by several factors. One of them is the possibility of logistic support elements unreliability defined as unavailability of spare elements when desired, what in result may lead to decrease of performance of the system being supported. Thus, both systems must be considered in a single model. However, the simultaneous setting of all structural parameters (e.g. redundancy, repair shop capacity) and control variables (e.g. spare part inventory levels, maintenance policy parameters, time resource) is mathematically a hard problem. This paper investigates Petri net model of the system with the use of Monte Carlo simulation as a solution technique. Comparison of the simulation results with characteristics of real-life system is given.

Keywords: logistic support system, transportation system, procurement process, Petri nets, simulation process.

1. Wprowadzenie

Właściwie zorganizowane oraz niezawodne wsparcie logistyczne obejmujef funkcjonowanie wszystkich elementów, niezbędnych do zapewnienia efektywnego oraz ekonomicznego wsparcia systemu technicznego oraz jego podsystemów, na wszystkich poziomach procesu obsługiwania, w trakcie jego okresu eksploatacji. Jeżeli aktywność logistyczną ograniczymy do obszaru zaopatrzenia, elementy wsparcia logistycznego, postrzegane jako niezbędne zasoby w procesie obsługiwania i użytkowania systemu, obejmują m.in.: zasoby obsługiwania, personel, informacje logistyczne, oraz części wymienne [19].

Zgodnie z wiedzą autorów, efektywną metodą prowadzącą do uzyskania niezawodnego systemu wsparcia logistycznego jest skupienie się na dwóch podstawowych wymaganiach: nieuszkadzalności/ gotowości oraz uwarunkowaniach ekonomicznych. Nieuszkadzalność powinna być rozpatrywana w pierwszej kolejności. Każdy system logistyczny, funkcjonując w zmiennym otoczeniu, może ulec uszkodzeniu, co w konsekwencji może prowadzić do:

- zakłócenia realizacji zadania wspierającego,
- niezdolności systemu do podjęcia się realizacji nowych zadań.

1. Introduction

The proper organized and reliable logistic support is a composite of all the elements necessary to assure the effective and economical support of a system or its subsystems, at all levels of maintenance for its anticipated life cycle. When logistic activity is narrowed down to the supply activity, logistic support element which represents all the resources necessary to maintain and operate equipment includes: maintenance resources, support personnel, logistic information and data, spares and repair parts, and facilities [19].

To the best authors' knowledge, an effective way for achieving the reliable systems support especially bases on meeting two targets: reliability/availability and cost constraints. Reliability of the logistic support system must come before costs considerations. Every logistic system, operating under diverse system environment, may fail what in consequence may lead to:

- disruption of supporting task realization,
- inability of system to undertake a new task.

W związku z tym, należy wziąć pod uwagę możliwą zawodność elementów systemu wsparcia logistycznego, która może doprowadzić do pogorszenia się charakterystyk operacyjnych systemu wspieranego.

Z drugiej jednakże strony, wysokie koszty motywują do poszukiwania nowych rozwiązań w celu:

- poprawy nieuszkadzalności,
- zapewnienia dostaw na czas,
- poprawy gotowości wyposażenia oraz części wymiennych,
- redukcji kosztów oraz eliminacji problemów związanych z procesem uszkodzeń systemu.

Przykładowo, długi okres między uszkodzeniami systemu wiąże się z wysoką zdolnością operacyjną, niższym poziomem wymaganych zapasów, mniejszym zapotrzebowaniem na ekipy remontowe, co w rezultacie przekłada się na niższe koszty funkcjonowania systemu.

Większość modeli analizowanych w literaturze teorii niezawodności skupionych jest na procesach obsługi. Podstawowym celem procesu obsługi jest zapewnienie możliwości ciągłej realizacji podstawowych funkcji systemu. W związku z tym, procesy obsługiwania powinny zapewniać optymalny poziom funkcjonowania systemu będący równowagą określonych parametrów (lub kosztów) strategii obsługiwania oraz wymaganego poziomu operacyjnego.

Zainteresowanie problemami teorii odnowy w literaturze można zauważyć od lat 60. XXw. Jedna z podstawowych prac przeglądowych w tym obszarze została opracowana przez Pierskalla & Voelker [21], gdzie autorzy omówili podstawowe modele optymalnej strategii obsługiwania obiektów technicznych, później zaktualizowana przez Valdez-Flores & Feldman [24]. Inne prace analizujące modele opracowane w tym obszarze to m.in. [4, 15, 16, 17, 20, 23, 25, 26].

Jednakże, większość znanych modeli obsługiwania bazują na założeniu, że wszelkie zasoby, niezbędne w procesie jego odnowy są natychmiast dostępne do wykorzystania. W praktyce, liczba ekip remontowych jest ograniczona, a informacja logistyczna może być niepewna. Ponadto, problemu wspólnego doboru optymalnej strategii odnowy oraz ustalenia polityki zarządzania zapasami nie można ignorować, gdyż liczba dostępnych części wymiennych zwykle jest ograniczona, a czas dostawy nie może być pominięty.

Problem zapewnienia właściwego zaopatrzenia systemu technicznego w części wymienne w procesie jego odnowy jest przedmiotem badań od wielu dekad. Przegląd danych modeli został przedstawiony w [18].

Analiza niezawodności złożonych systemów (np. systemów transportowych) może wiązać się z pewnymi trudnościami. Po pierwsze, systemy – wspierający i wspierany są zintegrowane, przez co powinny być rozpatrywane wspólnie. Natomiast, wiele znanych literaturze modeli rozpatruje zagadnienie obsługiwania, procesy wymiany oraz problem zarządzania zapasami osobno [26].

Po drugie, podstawowe metody matematyczne, wykorzystywane w modelowaniu obsługi obiektów technicznych, obejmują metody probabilistyczne, procesy odnowy, teorię procesów Markowa czy Analizę Drzew Uszkodzeń. Każda z tych metod ma swoje ograniczenia, co warunkuje jej wykorzystanie w praktyce.

Wszystkie z wymienionych metod bazują na założeniach upraszczających odnośnie opisu zmiennej losowej czasu do uszkodzenia elementów systemu. Ponadto, wykorzystanie proAs a result, there is a need to take into account the possible unreliability of logistic support elements, which may lead to decrease of performance of the system being supported.

On the other hand, high costs motivate seeking new solutions to reliability and logistic problems for:

- enhancing reliability,
- providing on-time deliveries,
- increased equipment, spare parts and repair parts availability,
- reducing costs and problems arising from systems that fail easily.

For example, long failure free periods result in increased operational capability, fever spare parts need to be stocked, less manpower employed on maintenance activities, and hence lower costs of the whole system and its processes performance.

Most models investigated in the literature on reliability theory focus on maintenance. The prime maintenance objective is to ensure the system performs its intended function. As a result, maintenance should provide the optimal performance level as a balance between maintenance parameters (or cost of maintenance) on one side, and the performance level on the other.

The interest in development and investigation of maintenance problems has been extensively discussed in the literature since the early 1960s. The basic review in the area of maintenance modelling is prepared by Pierskalla & Voelker [21], where authors investigated discrete time vs. continuous time maintenance models, later updated by Valdez-Flores & Feldman [24]. For other surveys see e.g. [4, 15, 16, 17, 20, 23, 25, 26].

However, most of the maintenance models investigated in the literature on reliability theory assume, that all the necessary logistic support resources, which include maintenance resources, support personnel, logistic information and data, spares and repair parts, and facilities, are immediately provided when it is desired. In practice, the repair capacity is not infinite, and logistic information may be unreliable. Moreover, the influence of a spare provisioning policy on the maintenance policy also cannot be ignored, since spares are ordered and carried in the limited quantity, and the procurement lead time is not negligible.

The problem of providing an adequate and efficient supply of spare parts, in support of maintenance and repair of operational systems, has been researched for many decades. Recent overview of these models is made by Nowakowski & Werbińska-Wojciechowska in [18].

Consequently, reliability of complex systems (e.g. transportation systems, aircraft systems) can be difficult to analyze for several reasons. First, both systems, logistic and being supported are integrated and thus should be considered in a single model. However, growing body of existing literature in the investigated research area treats maintenance, replacement and inventory decisions separately [26].

Second, commonly used analytical techniques for reliability evaluation are applied probability theory, renewal reward processes, Markov decision theory, and Fault Trees. Each of these techniques has advantages and disadvantages and the choice depends on the system being modelled.

All of them require simplifying assumptions about time to failure behavior of the system components. Moreover, Markov method analyses the system by identifying all the different states in which the system can reside and is able to produce accurate system reliability measures by assigning rates of transition cesów Markova wymaga analizy niezawodności systemu poprzez identyfikację wszystkich stanów, w których system może przebywać, oraz pozwala na definicję miar niezawodności systemu poprzez oszacowanie intensywności przejść pomiędzy tymi stanami. Zatem, aplikacja procesów Markova do analizy niezawodności bardzo złożonych systemów wymagająca budowy modelu stanów jest zadaniem nieopłacalnym.

Standardowa Analiza Drzew Niezdatności (FTA) [7] jest probabilistycznym podejściem pozwalającym na analizę bezpieczeństwa, niezawodności czy ryzyka. Tradycyjne drzewo uszkodzeń wykorzystuje bramki logiczne Boole'a w celu przedstawienia jak uszkodzenia komponentów przekładają się na uszkodzenia systemu. Drzewa te są zwane statycznymi. W artykułach [5], [6], przedstawiono metodę dynamicznych drzew niezdatności (DFT). Dynamiczne bramki DFT mogą definiować:

- dynamiczną wymianę uszkodzonych komponentów z komponentami zapasowymi,
- pojawianie się uszkodzeń tylko we wcześniej ustalonej kolejności.

W pracy [2], metoda DFT została rozwinięta o wykorzystanie tzw. bramek naprawy. Bramki te pozwalają na definicję czasu naprawy komponentów. W artykule tym, została przedstawiona transformacja wykorzystanych bramkach logicznych oraz bram naprawy w stochastyczne sieci Petriego (SHLCPN).

W procesie wyznaczania charakterystyk probabilistycznych systemu z wykorzystaniem DTF zostały wykorzystane następujące metody: model Markova [5, 6], sieci Petriego [2], sieci Bayesa [14].

Analizując system transportowy, należy nie tylko uwzględnić czas naprawy czy dostawy, ale także czasy wymiany oraz rezerwę czasową.

Metoda DTF z bramkami napraw ma znaczne ograniczenia w zakresie wyrażania zależności czasowych w sposób ilościowy. Dlatego metoda ta nie pozwala na właściwą prezentację systemu transportowego.

Metoda Drzew Niezdatności z Zależnościami Czasowymi (ang. Fault Tree with Time Dependencies – FTTD) [13] może być wykorzystana w modelach niedeterministycznych systemów transportowych [10, 11, 12]. W modelach tych, parametry czasowe są określone przez wartości minimalne i maksymalne, nie posiadając charakteru probabilistycznego. Technika FTTD została zaproponowana jako wygodne podejście do opisu zależności czasowych nadsystemu z rezerwą czasową na konferencji ESREL 2008 [11]. W pracy tej przeanalizowano proces funkcjonowania prostego modelu wsparcia logistycznego. Następnie, w pracy [10] zaproponowano przykład aplikacji opracowanego modelu. Jednakże, opracowana metoda nie może zostać zastosowana w przypadkach, kiedy czas pomiędzy uszkodzeniami oraz czasy napraw są zmiennymi probabilistycznymi.

Szeroko wykorzystywana metodą, oprócz podejścia analitycznego, są procesy symulacji Monte Carlo. Jednakże, metoda ta jest zwykle bardzo czasochłonna. Wiąże się to z faktem, iż wysoki poziom wiarygodności obliczeń wymaga przeprowadzenia wielu powtórzeń symulacji [3, 22].

Podsumowując, w artykule wykorzystano sieci Petriego w celu przeprowadzenia analizy niezawodności złożonego systemu rzeczywistego. Podstawowym celem tej pracy jest opracowanie modelu procesu funkcjonowania systemu rzeczywistego z wykorzystaniem stochastycznych sieci Petriego (ang. Stochastic High-level Petri Net – SHLPN). Model ten bazuje na wykorzystaniu techniki High-level Petri Net [8] oraz Uogólniobetween these states. However, the Markov method has its own drawbacks in its application for a relatively large system to establish the state transition model is an intractable task.

Traditional Fault Tree Analysis (FTA) [7] is probabilistic approach to safety, reliability, and risk analysis. Traditional fault trees contain Boolean gates to represent how component failures combine to produce system failures. These fault trees are now called static. In papers [5], [6], dynamic fault trees (DFTs) are presented. Gates of DFTs can express the following features:

- dynamic replacement of failed components from pools of spares,

- failures can occur only in a predefined order.

In paper [2], DFTs have been extended by repair boxes. These boxes can express a repair time of components. In this paper, transformations of different gates and repair boxes into Stochastic High Level Colored Petri Net are given.

In calculation of probabilistic characteristics of systems using DFTs, the following formalisms are used: Markov models [5, 6], Petri nets [2], Bayesian networks [14].

When analyzing the transportation system, we have to analyze not only repair and lead time, but time consuming replacement process and time resource as well. Hence, DFTs with repair boxes are not sufficient to represent the transportation system.

Moreover, Fault Tree with Time Dependencies provides an interesting solution for non-deterministic models [10, 11, 12]. In these models, time parameters are described by minimal and maximal values, but without probabilistic characteristics. The FTTD technique has been proposed as a convenient approach to describe the values of the delay times of system of systems task performance on the ESREL conference in 2008 [11]. The investigated problem has regarded to simple logistic support model performance. Later, there is proposed method application example presented in [10]. However, this method cannot be applied when time between failures and repair times are expressed probabilistically.

In contrast to the analytic approaches Monte Carlo simulation can be broadly used. However, Monte Carlo simulation is time-consuming because of the intensive computations. This is because an extremely large number of simulated samples may be needed to estimate the reliability parameters at a high level of confidence [3, 22].

Following this consideration, in the paper, Petri nets are used to support the reliability analysis of complex real-life system performance.

The primary contribution of this research is to propose a Stochastic High-level Petri Net model for presented below transportation system. This model is based on standard of Highlevel Petri Net [8] and on generalized stochastic Petri nets [1]. For this model, simulation experiments have been performed. Results of the experiments have been compared with real-life city transportation system.

Consequently, the rest of this paper is organized as follows: in Section 2, there is a description of tram network performance including all model assumptions. Later, there is a Petri net model for the investigated system performance provided. Some comparison results with real-life city transportation system are presented. Finally, the work ends up with summary. nych Stochastycznych Sieci Petriego [1]. Przeprowadzono eksperymenty symulacyjne, a uzyskane wyniki zostały porównane z wynikami, uzyskanymi z procesu funkcjonowania rzeczywistego systemu komunikacji miejskiej.

W rezultacie, struktura artykułu obejmuje: w rozdziałach 2.1 i 2.2 opisano proces funkcjonowania systemu komunikacji miejskiej oraz przedstawiono założenia modelu. Następnie, model sieci Petriego został zdefiniowany w rozdziale 2.3. Porównanie uzyskanych wyników zostało przedstawione rozdziale 2.4. Pracę kończy krótkie podsumowanie.

Aplikacja modelu systemu komunikacji miejskiej

2.1. Opis systemu rzeczywistego

Przeprowadzona analiza dotyczy systemu komunikacji miejskiej, funkcjonującego we Wrocławiu. Usługi przewozu ludności na terenie miasta są świadczone przez MPK Wrocławiu.

Podczas eksploatacji systemu komunikacji miejskiej pojazdy uszkadzają się w losowych chwilach czasu. W efekcie wystąpienia uszkodzenia możliwe jest pojawienie się jednej z następujących konsekwencji:

- całkowite wyłączenie pojazdu z ruchu,
- opóźnienie,
- skierowanie objazdem.

W celu minimalizacji skutków zawodności wrocławskich tramwajów w systemie komunikacji miejskiej utrzymywane są dodatkowe tramwaje pełniące funkcję rezerwy.

Funkcjonowanie rezerw czynnych na terenie miasta Wrocławia zostało uruchomione w latach 90. XX w. W dniu roboczym ich liczba powinna wynosić: 5 pojazdów, natomiast w dni wolne – pracują 3 pojazdy rezerwowe. Typowe rozmieszczenie pojazdów rezerwowych na sieci transportowej przedstawiono na rys. 1. Rezerwy zostały oznaczone literami A, B, C, D, E [9].

Proces funkcjonowania systemu komunikacji przedstawiono na rys. 2.

2. Application of tram network

2.1. Tram network performance

Analysis regards to city transportation system performing in Wroclaw city, Poland. The municipal transport services are provided by common carrier MPK Wroclaw.

During operational process of passenger transportation system performance failures of working tram may occur. These unwanted events can cause severe negative consequences for customers, like:

- shutting down of a failed tram from passenger traffic,

- delay of a failed tram,
- detour of other trams working in a system.

In order to minimize the negative consequences of tram unreliability, there are redundant trams maintained in the system.

The redundant trams have been performing in the discussed system since 1990. There is made an assumption, that during average working days there are five redundancies operating in the system, and only three in weekends. Typical allocation of redundancies in the tram network is presented in *figure* 1. The redundancies have notations of A, B, C, D, E. More information can be found in [9].



Rys. 1. Rozmieszczenie rezerw w dniu roboczym w roku 2002 [9] Fig. 1. Allocation of redundant trams in the tram network in 2002 [9]

NAUKA I TECHNIKA

czas	dos	Lawy

czas wymiany			
x chwila uszkodzenia systemu = pobranie elementu rezerwowego	chwila wjazdu na trasę tramwaju reżerwowego	chwila powrotu na trasę tramwaju podstawowego	i

Rys. 2. Proces eksploatacji taboru kolejowego systemu komunikacji miejskiej [26] Fig. 2. Exploitation process of trams performing in the system [26]

Z chwilą pojawienia się uszkodzenia pojazdu, tramwaj rezerwowy jest wysyłany na trasę, o czym decyduje dyspozytor ruchu, znający oczekiwany czas wymiany pojazdu, pozostały czas pracy rezerw, itp. Po usunięciu uszkodzenia, tramwaj powraca na linię trasy, zwalniając rezerwę.

Czasy dojazdu pojazdu rezerwowego z miejsca postoju na trasę oraz czasy naprawy uszkodzonego tramwaju są zmiennymi losowymi. W związku z tym może wystąpić sytuacja, w której liczba tramwajów rezerwowych nie wystarcza na pokrycie wszystkich kursów.

Jednocześnie przyjęto, że długość rezerwy czasowej systemu komunikacji przeznaczonej na przywrócenie uszkodzonego pojazdu do stanu zdatności i powrót na trasę obejmuje minimalny czas trwania jednego kursu linii dziennej. Przekroczenie danego czasu niezdatności pojedynczej linii, równoznaczne jest z koniecznością poniesienia przez MPK Wrocław kary finansowej.

Kontynuując, podstawowym zagadnieniem, z punktu widzenia niezawodności/gotowości systemu, jest ustalenie liczebności pojazdów rezerwowych. Zbyt mała ich liczba skutkuje m.in. dużą liczbą niewykonanych kursów. Z kolei zbyt duża liczba pojazdów rezerwowych niesie za sobą negatywne konsekwencje ekonomiczne.

Z drugiej strony, istotnym zagadnieniem jest oszacowanie czasu tolerancji zakłóceń w systemie, mierzonego parametrem rezerwy czasowej. Zbyt długi czas rezerwy czasowej będzie bezpośrednio przekładał się na większą liczbę zakłóceń w systemie, co odczują przede wszystkim pasażerowie. Zbyt krótki, związany będzie bezpośrednio z wyższymi kosztami funkcjonowania systemu.

Implementacja techniki FTTD w procesie modelowania zależności czasowych, występujących w badanym systemie została przedstawiona w pracy [10].

2.2. Parametry modelu systemu komunikacji tramwajowej

Proces funkcjonowania analizowanego systemu można opisać wykorzystując opracowany model nadsystemu z rezerwą czasową, w którym system techniczny posiada strukturę progową (k = M). W modelu wykorzystano strategię sterowania zapasami według stałego poziomu zamawiania (s,Q). W systemie rzeczywistym rolę zapasu stanowią pojazdy rezerwowe.

W przypadku uszkodzenia się pojazdu zapas pomniejszany jest tak, aby pokryć zapotrzebowanie na trasie. W tej samej chwili rozpoczyna się oczekiwanie systemu na "nową dostawę tramwaju", którą jest powrót pojazdu podstawowego na trasę po przywróceniu do stanu zdatności. W związku z tym, wielkość partii zamówienia Q = 1 (rys. 2). Jednocześnie, każdorazowe pobranie tramwaju rezerwowego uruchamia nowe "zamówienie". Oznacza to, że czas oczekiwania na ponowne uzupełnienie tramwajów rezerwowych ("dostawę") trwa od chwili, gdy The exploitation process of tram in the transportation system is presented in *figure* 2.

When failed tram is shot down from the system, the redundant one is sent to continue its operational tasks. The decision about this substitution is made by a dispatcher, who knows the expected replacement time, residual working time of redundancies, and other decision criteria. After repair, the substituted tram returns to operate and the redundant one return to tram depot.

Times to failure, replacement, repair and lead times are random variables. As a result, there such a situation can occur that the number of working redundancies is not enough to substitute all failed trams in the system.

There is also made an assumption, that the time resource given for putting back to service of failed tram is defined as minimal time of one tram course performance. Over crossing the defined time resource results in necessity of fine paying by the transportation company.

Following this, one of the main problems, taking into account reliability/availability of the presented system, is definition of right number of redundancies which should perform in the system. Having not enough redundant trams occur in lots of not performed tasks. On the other side, having too many of them cost lots of money.

Other problem is the right definition of the time resource. Too long tolerance time results in occurrence of many disruptions in the system. However, too short time resource increase performance costs of the system.

The application of FTTD technique to model the time relations which occur in the investigated transportation system is investigated in [10].

2.2. Tram network parameters

The operational processes performance of the chosen system of tram service can be described with the use of a simulation model of the system of systems with time dependency, where the operational system is a k out of M system (k=M). In the chosen model, Critical Inventory Level (s, Q) is used as a stock policy, and spare elements are equivalent to redundant trams, which are assumed to be reliable. When the tram fails, inventory level is decreased according to the occurred request. At the same moment, the "awaiting for new delivery" begins. According to this, the ordering quantity Q is equal to 1 (see *figure* 2).

Moreover, when substitute tram is sending to replace a failed one, new "order" is activated. Thus, the time of waiting for new delivery arrival lasts from the moment when redundant ich liczba zostaje zmniejszona o jeden pojazd. Zatem poziom zapasu alarmowego:

$$s = l_r - 1 \tag{1}$$

gdzie: l_r – liczba pojazdów rezerwowych, utrzymywanych w systemie

Pełny opis modelu można znaleźć np. w [26, 27, 28].

Analiza modelu symulacyjnego została przeprowadzona dla ośmiu przypadków, przedstawionych w tabeli 1, natomiast dodatkowe informacje dotyczące procesu eksploatacji systemu komunikacji zamieszczone zostały w tabeli 2.

W procesie analizy osobno przeanalizowano dni wolne (3 pojazdy rezerwowe) oraz dni robocze (5 pojazdów rezerwowych). Jednocześnie, o zapotrzebowaniu na pojazd rezerwowy można mówić najwcześniej w chwili zgłoszenia uszkodzenia do dyspozytora ruchu ($t_{zgloszenia}$), a najpóźniej w chwili zjazdu tramwaju z trasy (t_{zjazdu}), gdy uszkodzenie pozwoliło na kontynuację jazdy do chwili wymiany na tramwaj rezerwowy.

Kolejny problem to długość rezerwy czasowej warunkująca chwilę pojawienia się uszkodzenia nadsystemu. Wyróżniono dwa graniczne przypadki, w których długość okresu dostępnej rezerwy czasowej jest tożsama z:

- najkrótszym okresem czasu, niezbędnym na realizację kursu (min(T_{kursu})),

Nr	Liczba	Chwila uszkodzenia	Długość rezerwy
przypadku	rezerw	systemu technicznego	czasowej
1		testermin	$\max(T_{kursu})$
2	5	*2głoszenia	$\min(T_{kursu})$
3		max(t-glossonia, t-jordy)	$\max(T_{kursu})$
4		(igiozonia) ijazaa)	$\min(T_{kursu})$
5		traloszenia	$\max(T_{kursu})$
6	3	25.0326/114	$\min(T_{kursu})$
7		max(tzgloszenia, tziazdu)	$\max(T_{kursu})$
8		(*zgioszenia; *zjazau)	$\min(T_{kursu})$

Tab. 1. Analizowane przypadki w procesie symulacji

Tab. 2. Charakterystyki systemu eksploatacji pojazdów tramwajowych MPK Wrocław

Olmes:	21.09.2001r. ÷ 28.02.2002r.		
UNICS.	Dni robocze	Dni wolne	
Liczba pojazdów rezerwowych	5	3	
Okres rezerwy czasowej: minimalny	41	[min]	
maksymalny	101	[min]	
Czas pracy pojazdów rezerwowych	4.30 - 20.00		
	5.00 - 20.30	5.00 - 22.30	
	5.30 - 22.30	6.00 - 23.00	
	6.00 - 23.00	6.30 - 0.00	
	6.30 - 0.00		
Strefy czasowe	przed 6.00		
	6.00 - 8.00	przed 6.00	
	8.00 - 13.00	6.00 - 9.00	
	13.00 - 17.00	9.00 - 20.00	
	17.00 - 20.00	20.00 - 22.30	
	20.00 - 22.30	ро 22.30	
	ро 22.30		

tram reduces inventory level. As a result, critical inventory level is given by the following formula:

$$s = l_r - 1 \tag{1}$$

where: l_r – number of redundant trams maintained in the system

For more information see e.g. [26, 27, 28].

Cases considered during the simulation process performance are presented in table 1.

In the analysis, performance working days, when 5 redundant trams is in a system, and weekends, when only 3 redundant trams perform in a system, are investigated separately. Moreover, when tram fails the moment of its failure can be equal to the moment of informing the dispatcher about the occurred problem ($t_{informing}$). On the other side, the tram failure moment can be also defined as the moment when failed tram returns to tram depot ($t_{turning off}$).

tram depot $(t_{turning off})$. Another problem is the definition of time resource limit. Authors defined two cases, in which the time resource limit is equal to:

- the shortest time necessary to one course performance by a train $(min(T_{course}))$,
- the longest time necessary to one course performance by a train $(\max(T_{course}))$,
- for the analyzed period of operational time of a system.

Case	Number of	Moment of system	Time resource
number	redundant trams	failure	limit
1		t. e. i	$\max(T_{course})$
2	5	* informing	$\min(T_{course})$
3	5	max(tt)	$\max(T_{course})$
4		mon(smjorming, sturning off)	$\min(T_{course})$
5		tintomotion	$\max(T_{course})$
6	3	*injorming	$\min(T_{course})$
7		max(tintoming, turning off)	$\max(T_{course})$
8		Cingornangy - Marining Ogy	$\min(\overline{T_{course}})$

Tab. 1. Analyzed cases in simulation process

Tab. 2. Operational characteristics of system of tram service in Wroclaw city

Operational period of time:	21 th September 2001 ÷ 28 th February 2002			
operational period of time.	Working days	Free days and holidays		
Number of redundant trams:	5	3		
Minimal and maximal time		41 [min]		
resource:	3	101 [min]		
Operational time of redundant	4.30 - 20.00			
trams:	5.00 - 20.30	5.00 - 22.30		
	5.30 - 22.30	6.00 - 23.00		
	6.00 - 23.00	6.30 - 0.00		
	6.30 - 0.00			
Time zones:	before 6.00			
	6.00 - 8.00	before 6.00		
	8.00 - 13.00	6.00 - 9.00		
	13.00 - 17.00	9.00 - 20.00		
	17.00 - 20.00	20.00 - 22.30		
	20.00 - 22.30	after 22.30		
	after 22.30			

MAINTENANCE AND RELIABILITY NR 1/2011

- najdłuższym okresem czasu, jaki zajmuje pokonanie kursu $(max(T_{kursu}))$ linii dziennej, funkcjonującej w analizowanym okresie czasu.

Na tej podstawie możliwe było oszacowanie parametrów rozkładów prawdopodobieństwa podstawowych zmiennych losowych, opisujących funkcjonowanie systemu komunikacji (tabela 3), zgodnych z rozkładem Weibulla:

$$F(t) = 1 - \exp(-B_{u}t^{A_{u}}) \qquad for \ t > 0$$
(2)

gdzie: A_u – parametr kształtu zmiennej losowej u, B_u – parametr skali zmiennej losowej u.

Parametry dystrybuant systemu transportowego podane w tabeli 3. Przykładowe funkcje rozkładów prawdopodobieństwa opisujących wybrane parametry wejściowe do modelu przedstawiono na rys. 3-4. As a result, the transportation system characteristics can be obtained. Main random variables in the model have Weibull distribution:

$$F(t) = 1 - \exp(-B_{u}t^{A_{u}}) \qquad for \ t > 0$$
(2)

where: A_u – shape parameter for random variable u, B_u – scale parameter for random variable u

Parameters of transportation system' probability distributions are given in table 3. The exemplary transportation system characteristics are presented in *figures* 3-4.

 Tab. 3.
 Parametry rozkładów prawdopodobieństwa opisujących funkcjonowanie systemu MPK

 Tab. 3.
 System' probability distributions' parameters

Nr przypadku	Parametry rozkładu / Probability distributions' parameters						
Case nr	A _o	B _o	A _r	B _r	A	B	
1 = 2	0,957	0,016	1,243	0,026	1,213	0,007	
3 = 4	0,928	0,016	1,219	0,032	1,235	0,008	
5 = 6	0,987	0,010	1,345	0,024	1,232	0,008	
7 = 8	0,939	0,010	1,214	0,029	1,255	0,009	
A, B – parametry Weibull'a cza	asu pomiedzy uszł	odzeniami / Weib	ull's parameters of	time between sul	osequent tram fail	ures	

 $A'_{,,B'_{,-}}$ parametry Weibull'a czasu wymiany elementu systemu / Weibull's parameters of single operational element replacement time $A'_{,,B'_{,-}}$ parametry Weibull'a czasu dostawy / Weibull's parameters of lead-time time



Rys. 3. Empiryczna funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu pomiędzy uszkodzeniami systemu technicznego

(przypadek 1) Fig. 3. Cumulative distribution function of tram's time to failure (case 1)

2.3. Model sieci Petriego

Model analizowanego systemu komunikacji miejskiej opracowano z wykorzystaniem stochastycznych sieci Petriego wysokiego poziomu (ang. Stochastic High-level Petri Net -SHLPN). Model ten bazuje na standardowych sieciach Petriego wysokiego poziomu (ang. High-level Petri Net [8] HLPN) oraz uogólnionych stochastycznych sieciach Petriego [1].



β=1,2429, η=38,5077, p=0,9794, Z=0,9757

- Rys. 4. Empiryczna funkcja dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa czasu wymiany elementów systemu technicznego (przypadek 1)
- Fig. 4. Cumulative distribution function of tram's replacement time (case 1)

2.3. Petri net model

We propose a Stochastic High-level Petri Net model of the investigated transportation system. This model is based on standard of High-level Petri Net [8] and on generalized stochastic Petri nets [1].

High-level Petri Net (HLPN) [8] are bi-parted graphs with two kinds of vertices: places and transitions, see *figure 5*. PlaHLPN [8] jest grafem dwudzielnym z dwoma rodzajami wierzchołków: miejscami i przejściami (rys. 5). Miejsca są oznaczone przez okręgi. Znaczniki są lokowane w miejscach. Znaczniki są oznaczane przez zaczernione okręgi. Rozkład znaczników w miejscach częściowo opisuje stan sieci. Przemieszczanie znaczników między miejscami jest powodowane odpalaniem przejść.

Reprezentacja czynnika czasu bazuje na wykorzystaniu uogólnionych stochastycznych sieci Petriego [1]. W sieciach tych występują dwa rodzaje przejść: natychmiastowe i czasowe. Czas odpalania przejść natychmiastowych jest równy zero a ich symbole graficzne to kreska. Czas odpalania przejść czasowych wyrażony jest poprzez zmienne losowe, a ich symbol graficzny to prostokąt. W szczególnym przypadku, czas odpalania przejścia czasowego może być liczbą rzeczywistą. Jeśli zarówno natychmiastowe, jak i czasowe przejścia są gotowe do odpalenia, wtedy przejścia natychmiastowe odpalane są jako pierwsze.

Znaczenie miejsc modelu HLPN przedstawionego na rys. 5 jest następujące:

p ₀	- każdy znacznik w tym miejscu oznacza przyszłą
	awarię tramwajów o identyfikatorze i typu Integer,
\mathbf{p}_1	– tramwaj jest zepsuty na skutek awarii,
p ₂	- następuje wymiana tramwaju uszkodzonego na za-
-	pasowy,
p ₃	 zostanie wyjaśnione w dalszej części,
p_4	– tramwaj w naprawie,
p ₅	 – naprawiony tramwaj jest gotowy do pracy,
\mathbf{p}_6	– rezerwa czasowa tramwaju zepsutego nie upłynęła,
p ₇	 – rezerwa czasowa tramwaju zepsutego upłynęła,
p_8	– tramwaj zapasowy jest w gotowości,
p _o	– znacznik w tym miejscu oznacza, że znacznik
- /	z miejsca p. został usunięty.

Integer to typ znaczników w miejscach $p_1, ..., p_6, p_9$. Jego wartości to identyfikatory awarii tramwajów. Zatem żetony w tych miejscach posiadają identyfikatory. Z kolei żetony w miejscach: p_7, p_8 nie mają identyfikatorów. Żetony w miejscu p_8 reprezentują tramwaje w stanie gotowości. Żetony w miejscu p_7 oznaczają awarie tramwajów, dla których rezerwa czasowa została przekroczona.

Znaczenie przejść jest następujące:

t ₀	– awaria tramwaju,
t ₁	- początek wymiany tramwaju zepsutego na zapaso-
	wy,
t ₂	 koniec wymiany zepsutego tramwaju na zapasowy,
t_3	– powrót tramwaju naprawionego (tramwaj zapasowy
5	jest ponownie dostępny),
t ₄	 tramwaj naprawiony jest gotowy do pracy,
t	- rezerwa czasowa nie została przekroczona,
t ₆	 rezerwa czasowa została przekroczona,
t ₇	- naprawiony tramwaj jest gotowy do pracy przed za-
,	kończeniem wymiany zepsutego na zapasowy,
t。	- naprawiony tramwaj jest gotowy do pracy przed
0	chwilą dostępności zapasowego

Obecnie wyjaśnimy znaczenie miejsca p₃. Niech $\tau(t)$ oznacza chwilę odpalenia przejścia t.

 p_3 – znacznik w tym miejscu wyraża, że: zapasowy tramwaj pracuje jeśli $\tau(t_2) < \tau(t_4)$, zapasowy tramwaj jest dostępny w przeciwnym przypadku. ces are denoted by circles. Tokens are located in places. Tokens are denoted by dotes. Distribution of tokens in places describes a state of the net partially. Transitions are fired, what causes a change of distribution of tokens over places.

Representation of time factor is based on generalized stochastic Petri nets [1]. In these nets, there are two kinds of transitions: immediate and timed. Firing time of immediate transition is equal to zero. This transition is denoted by dash. Firing time of timed transitions is expressed by a random variable. That transition is denoted by rectangle. Special case of firing time of timed transition is time given by a real number. If immediate and timed transitions are enabled (can fire) then the immediate one is fired as first.

Meaning of the places of the HLPN from *figure* 5 is as follows:

p ₀	- tokens in this place represent future tram failures
- 0	with identifier <i>i</i> of type <i>Integer</i> ,
\mathbf{p}_1	- tram is failed, token in that place expresses tram
	failure,
p ₂	– failed tram replacement by redundant tram is being
- 2	performed,
p ₃	– it will be explained,
\mathbf{p}_4	– tram in repair,
\mathbf{p}_5	- repaired tram is ready to work,
\mathbf{p}_6	- time resource for a failed tram has not yet passed,
\mathbf{p}_7	- time resource for a failed tram has passed,
p_8	– redundant tram is idle,
p ₉	- token in this place expresses that token from the
<i>,</i>	place p_6 has been removed.

Integer is the type that is assigned to the following places: $p_1, ..., p_6, p_9$. This type contains identifiers of tram failures. Hence, tokens that are located in these places have identifiers. Tokens in places: p_7, p_8 have no identifiers. Tokens in the place p_8 represent idle redundant trams. Tokens in the place p_7 represent tram failures for that time resource has been exceeded.

Meaning of transitions is as follows:

	8							
t ₀	– tram failure,							
t ₁	- start of failed tram replacement by a redundant							
t ₂	tram,							
t ₃	- end of failed tram replacement by a redundant							
t ₄	tram,							
t ₅	- repaired tram returning (redundant tram becomes							
$t_{6} t_{7}$	available),							
	- repaired tram is becoming ready to work,							
t _s	 time resource has not been exceeded, 							
Ũ	– time resource has been exceeded,							
	- repaired tram is ready to work before completion of							
	failed tram replacement by a redundant one,							
	- repaired tram is ready to work before spare tram							
	is available.							

Now meaning of the place p_3 will be explained. Let $\tau(t)$ denote firing time instant of the transition *t*.

 p_3 – token in this place expresses that: redundant tram is working if $\tau(t_2) < \tau(t_4)$, redundant tram is idle if otherwise.

NAUKA I TECHNIKA



Rys. 5. Sieć Petriego Wysokiego Poziomu dla analizowanego systemu transportowego Fig. 5. High-Level Petri Net for the investigated transportation system

Czasy odpalenia przejść czasowych są określone następująco:

 $t_0 \rightarrow d$ ługość interwału czasu między kolejnymi uszkodzeniami tramwaju w systemie opisana rozkładem Weibulla. To nie jest przedział czasu między kolejnymi uszkodzeniami tego samego tramwaju.

 $t_2 \rightarrow$ długość interwału czasu wymiany tramwaju uszkod
zonego na zapasowy wyrażona rozkładem Weibulla.

 $t_4 \rightarrow$ suma czasów naprawy uszkodzonego tramwaju i dostawy zadana rozkładem Weibulla.

 $t_6 \rightarrow$ rezerwa czasowa zadana liczbą rzeczywistą.

Przejścia t_2 , t_4 , t_6 są odpalane zgodnie z semantyką wielokrotnego serwera: w danej chwili może przebiegać wiele procesów odpalenia. Przejście t_0 z powodu pętli wokół tego, jest odpalane zgodnie z semantyką jednokrotnego serwera: w danej chwili może przebiegać co najwyżej jeden proces odpalenia.

Dla znakowania początkowego, $M_0(\mathbf{p}_8)=k$, gdzie k jest liczbą zapasowych tramwajów. Cykl aktywności zapasowego

Firing times of timed transitions are given as follows:

 $t_0 \rightarrow$ length of time interval between subsequent tram failures in the system; it is given by Weibull's distribution. It is not time interval between subsequent tram failures of the same tram.

 $t_2 \rightarrow$ length of time interval when failed tram replacement by redundant tram is being performed; it is given by Weibull's distribution.

 $t_4 \rightarrow$ sum of repair time for failed tram and lead time; it is given by Weibull's distribution.

 $t_6 \rightarrow$ time resource given by a real number.

The transitions t_2 , t_4 , t_6 are fired according to multiple server semantics: many firing processes can undergo in a given time instant. The transitions t_0 because of the loop around it, is fired according to single server semantics: at most one firing processes can undergo in a given time instant.

For initial marking, $M_0(\mathbf{p}_8)=k$, where k is the number of redundant trams. Cycle of redundant tram activities is expressed by cycle of places and transitions \mathbf{t}_1 , \mathbf{p}_2 , \mathbf{t}_2 , \mathbf{p}_3 , \mathbf{t}_3 , \mathbf{p}_8 , \mathbf{t}_1 .

tramwaju jest wyrażony cyklem miejsc i przejść t_1 , p_2 , t_2 , p_3 , t_3 , p_8 , t_1 .

Jeśli przejście t_0 jest odpalone, to znaczniki z identyfikatorem *i* uszkodzenia tramwaju są umieszczane w miejscach p_1, p_4, p_6 . Jeśli ponadto jest znacznik w miejscu p_8 , to przejście t_1 jest odpalane. Ten akt reprezentuje fakt, że tramwaj zapasowy jest przypisywany w celu zastąpienia uszkodzonego a skojarzonego z identyfikatorem *i* uszkodzenia tramwaju.

Jeśli wymiana tramwaju uszkodzonego na zapasowy jest zakończona przed chwilą gdy tramwaj uszkodzony jest gotowy do pracy po naprawie, to tramwaj zapasowy rozpoczyna pracę. W tym przypadku, znacznik z identyfikatorem i jest dodawany do miejsca p₃ wcześniej niż znacznik z identyfikatorem *i* jest dodawany do miejsca p_s. Załóżmy, że zostało odpalone przejście t_4 . Zatem istnieje znacznik z identyfikatorem *i* w miejscu p₅. Załóżmy, że rezerwa czasowa dla uszkodzenia tramwaju i jeszcze nie minęła. Zatem, w miejscu p_c jest znacznik z identyfikatorem *i*. Ponieważ w miejscach p₃ i p₆ są znaczniki z identyfikatorem *i*, a więc przejście t_s może być odpalone dla przypisań x = i i y =*i*. W rezultacie, znacznik z identyfikatorem *i* jest dodawany do miejsca p_0 . Zatem znaczniki z identyfikatorem *i* są w miejscach p₃, p₅ i p₀. Odpalane jest przejście t₃, a więc znacznik reprezentujący dostępny tramwaj zapasowy jest dodawany do miejsca p_o. Przejście t_a jest natychmiastowe. Stąd przejście t_a jest odpalane w tej samej chwili na osi czasu gdy przejście t, jest odpalane. Reprezentuje to fakt, że tramwaj zapasowy jest dostępny natychmiast po chwili gdy naprawiony tramwaj jest gotowy do pracy.

Rozważmy przypadek podobny jak poprzednio, z tym, że rezerwa czasowa dla uszkodzenia *i* tramwaju upłynęła przed chwilą gdy tramwaj zapasowy dla tego uszkodzenia będzie go-towy do pracy. Wtedy przejście t₆ jest odpalane przed odpaleniem przejścia t₂. W wyniku odpalenia przejścia t₆, znaczniki są umieszczane w miejscach p₇ i p₉. Znacznik jest lokowany w miejscu p₃ po usunięciu znacznika z miejsca p₆. W tym przypadku przejście t₅ nie jest odpalane.

Jeśli uszkodzony tramwaj jest gotowy do pracy przed zakończeniem wymiany tramwaju uszkodzonego na rezerwowy, to tramwaj naprawiony powinien rozpocząć pracę, a zapasowy powinien stać się dostępny dla następnego uszkodzenia. W tym przypadku, najpierw odpalane jest przejście t_4 , a następnie przejście t_7 . Zatem w miejscu p_3 pojawia się znacznik z identyfikatorem *i*. Analiza podobna do poprzedniej może być przeprowadzona. Skoncentrujmy się jedynie na niektórych aspektach.

Załóżmy, że rezerwa czasowa dla uszkodzenia *i* tramwaju jeszcze nie minęła. Zatem jest znacznik z identyfikatorem *i* w miejscu p_6 . Przejście t_5 może być odpalone. Znacznik z identyfikatorem *i* jest dodawany do miejsca p_9 . Stąd są znaczniki w miejscach z identyfikatorem *i* w miejscach p_3 , p_5 i p_9 . zatem odpalane jest przejście t_3 , i znacznik reprezentujący bezczynny tramwaj rezerwowy jest dodawany do miejsca p_8 . Przejścia t_7 , t_5 , t_3 są natychmiastowe. Zatem przejście t_3 jest odpalane w tej samej chwili na osi czasu gdy przejście t_4 jest odpalane. Reprezentuje to fakt, że zapasowy tramwaj staje się dostępny natychmiast po chwili, gdy naprawiony tramwaj jest gotowy do pracy.

2.4. Uzyskane wyniki

Proces funkcjonowania nadsystemu z rezerwą czasową, przedstawiony w Sekcji 2.2, zamodelowano przy wykorzystaniu oprogramowania *GNU Octave*. Jednocześnie przykłady empirycznych funkcji dystrybuanty rozkładu prawdopodobieńIf the transition t_0 is fired, then tokens with tram failure identifier *i* are put in the places p_1, p_4, p_6 . If there is a token in place p_8 , then the transition t_1 can be fired. It represents the fact that a redundant tram can be assigned in order to replace the failed tram associated with tram failure identifier *i*.

If failed tram replacement by a redundant tram is finished before a failed one is ready to work after repair, then redundant tram starts its work. In this case, the token with identifier i is added to the place p_1 earlier than the token with identifier *i* is added to the place p_{e} . Let there be the token with identifier *i* in the place p₁. Let us suppose that time resource for the tram failure *i* have not yet passed. Hence, there is the token with identifier *i* in the place p_6 Because there are the tokens with identifier *i* in the places p_3 and p_6 , so the transition t_5 can be fired for bindings x = i and y = i. As a result, token with identifier *i* is added to the place p_{0} . Let us suppose that the transition t_{4} has fired. Now, there are tokens with identifier *i* in places p_3 , p_5 , and p_9 . Hence, the transition t, is fired, and the token that represents idle redundant tram is added to the place p_s . The transition t_s is immediate. Therefore, the transition t, is fired in the same time instant when the transition t₄ is fired. It represents such a fact that redundant tram is becoming available immediately after the time instant when the repaired tram is ready to work.

Let us analyze similar case as before, but time resource for the tram failure *i* have passed before time instant when the redundant tram is ready to work. In this case, the transition t_6 is fired before the transition t_2 is fired. As a result of firing the transition t_6 , tokens are put in the places p_7 and p_9 . A token is located in the place p_3 after removing the token from the place p_6 . In this case, the transition t_5 is not fired.

If failed tram is ready to work before completion of failed tram replacement by redundant tram then repaired tram should start to work, and redundant tram should become available for next failure. In such a case, transition t₄ is fired, and next transition t_{i} is fired. Therefore, there is the token with identifier *i* in the place p₂. Similar analysis as before can be performed. Let us concentrate on some aspects only. Let us suppose that time resource for the tram failure *i* have not yet passed. Hence, there is the token with identifier *i* in the place p_6 The transition t_5 can be fired. Token with identifier *i* is added to the place p_0 . Now, there are tokens with identifier *i* in places p_3 , p_5 , and p_9 . Hence, the transition t, is fired, and the token that represents idle redundant tram is added to the place p_{o} . The transitions t_{7} , t_{5} , t_{5} are immediate transitions. Therefore, the transition t, is fired in the same time instant when the transition t_4 is fired. It represents such a fact that redundant tram is becoming available immediately after the time instant when the repaired tram is ready to work.

2.4. Obtained results

First, the Monte Carlo simulation model of system of systems with time dependency performance obtained with the use of *GNU Octave*, presented in the Section 2.2, has been analyzed

stwa czasu uszkodzeń systemu technicznego przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Uzyskane wyniki empiryczne są zgodne z tymi, uzyskanymi w procesie symulacji. Dla sprawdzenia podstawowych wyników modelowych i rzeczywistych, zastosowano test zgodności λ -Kołmogorowa. Obliczone wartości statystyki λ_{obl} nie przekraczają wartości 1,57 (patrz tabela 4). Na podstawie uzyskanych wyników nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności rozkładów prawdopodobieństw czasów niezdatności systemu wsparcia logistycznego i nadsystemu, uzyskanych z danych rzeczywistych oraz z symulacji, na poziomie istotności $\alpha_o = 0,01(\lambda_o = 1.63)$. Więcej informacji można znaleźć w pracy [26].

Jednocześnie istotne jest porównanie podstawowych charakterystyk niezawodnościowych uzyskanych w procesie symulacji, jak również w procesie analizy funkcjonowania systemu rzeczywistego. Na rysunku 8 przedstawiono poziom prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu w wyniku przekroczenia dostępnej rezerwy czasowej.

Wartości obliczonego błędu względnego e_{nvzg} dla obliczonego prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu P_{nnj} nie przekracza 6,5% dla wszystkich analizowanych przypadków.

Podsumowując dotychczasowe rozważania, należy podkreślić, że:

 porównanie wyników symulacyjnych z danymi rzeczywistymi wykazało, że wyniki rzeczywiste zależą nie tylko do samego procesu zaopatrzenia w elementy wymien-



Rys. 6. Empiryczna dystrybuanta czasu pomiędzy uszkodzeniami systemu technicznego (przyp. 1 z tab. 3)

Fig. 6. Empirical CDF for the system of system's failure time - test case 1 from table 3

Tab. 4. Wyniki testu zgodności λ-Kołmogorowa

Tab. 4. Kolmogorov-Smirnov test results for the investigated cases

in addition to obtained results from real system performance data.

Examples of empirical cumulative distribution functions for the system of systems failure time are given in *figures* 6 and 7.

Empirical results are convergent with simulation effects. The convergence of both the models, empirical and simulation one has been tested with Kolmogorov-Smirnov test. Calculated values of λ_{obl} for both tests do not exceed 1.57 in every trial (see table 4). That testifies for well fitting both series of results at the rejection level $\alpha = 0.01$ ($\lambda_o = 1.63$). More information can be found in [26].

Moreover, there is also very important to compare the main reliability characteristics obtained from simulation performance and real life data. In *figure* 8, there is presented a comparison of empirical and simulated system of system's failure probability. The values of the relative errors $e_{i_{NZB}}$ for the probability of system of systems downtime P_{nnj} do not exceed 6,5% for every analyzed cases.

For summarizing the above considerations, it has to be underlined that:

- the comparison of obtained empirical and simulated results shows, that except supply process parameters, the human factor has great influence on empirical results.
- in the situation, when spare elements are ordered according to FIFO queue both series of results well fits.



Rys.. 7. Empiryczna dystrybuanta rozkładu czasu pomiędzy uszkodzeniami systemu technicznego (przyp. 2 z tab. 3)

Fig. 7. Empirical CDF for the system of system's failure time - test case 2 from table 3

	λ_{obl}									
Hipoteza Hypothesis	Przypadek / Case number								λ	
	1	2	3	4	5	6	7	8	(a _o = 0,01)	
$\Psi(\tau)_{sym} = \Psi(\tau)_{MPK}$	0,93	1,01	0,98	1,13	1,21	1,12	0,95	0,95	1.63	
$B_2(\xi_1)_{sym} = B_2(\xi_1)_{MPK}$	1,48	1,38	1,35	1,57	1,61	1,09	1,46	1,12	1,05	

ne, ale także od czynnika ludzkiego.

 przypadkach, gdy liczba uszkodzeń w systemie nie pozwala na zupełną dowolność przydzielania elementów wymiennych (zasada FIFO), wyniki symulacji oraz empiryczne wykazują dużą zgodność.

Przykładowo, opracowany model może zostać wykorzystany w procesie analizy m.in.:

- wyboru dostawcy przy znanych wymaganiach odnośnie wymaganego czasu dostawy,
- poziomu niezawodności systemu rzeczywistego, (np. w aspekcie osiąganych czasów pomiędzy uszkodzeniami systemu),
- procesu obsługiwania systemu operacyjnego (np. w aspekcie oceny wymaganych czasów napraw),
- poziomu zapasu informacyjnego,
- doboru najlepszych parametrów rezerwy czasowej.

Jednocześnie należy pamiętać, iż model obliczeniowy korzystający z techniki Monte Carlo jest wymagający obliczeniowo, gdyż znaczna liczba próbek była konieczna do estymacji niezawodności na wysokim poziomie ufności. Ponadto, również wpływ czynnika ludzkiego na działanie nadsystemu przyczynia się do poważnych trudności z zamodelowaniem rzeczywistego zachowania systemu tramwajowego. W celu potwierdzenia otrzymanych wyników, zbudowano drugi model w języku Sieci Petriego Wysokiego Poziomu (rys. 5), a następnie zasymulowano go dedykowanym narzędziem. Podstawowym celem drugiego podejścia było wyznaczenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu. Drugim celem był pomiar prawdopodobieństwa warunkowego: zdarzenia awarii nadsystemu pod warunkiem awarii tramwaju. Dla tramwaju *i*, którego czas naprawy jest dłuższy od czasu dostawy wyznacza się:

$x_i = \tau(t_4) - \tau(t_6)$ if $\tau(t_4) > \tau(t_6)$.

Stąd x_i oznacza czas niezdatności nadsystemu z powodu tramwaju *i*. Analizując kolejno awarie wszystkich tramwajów można wyznaczyć gęstość prawdopodobieństwa awarii nadsystemu (rys. 9 i 10). Wyniki dotyczą przypadków 1 i 2 (tab. 3). Następnie przeprowadzono porównanie z funkcją gęstości systemu rzeczywistego. Nie ma powodów do odrzucenia hipotezy zgodności funkcji przy pomocy testu Kolmogorova-Smirnowa na poziomie zaufania 0.01. Wyniki dalszej analizy ilościowej dla przypadku 1 widoczne są na rys. 11 i 12.

Szukane prawdopodobieństwo warunkowe jest wyznaczono poprzez podzielenie liczby znaczników w miejscu p_9 przez liczbę odpaleń przejścia t_0 . Wyniki ilustruje rys. 13.

W celu uzyskania pełnego obrazu analizy, na rys. 14 przestawiono porównanie niezdatności nadsystemu dla wszystkich przypadków testowych.



Rys. 8. Porównanie empirycznego (Pnnj(MPK)) i symulacyjnego (Pnnj(sym)) prawdopodobieństwa niezdatności nadsystemu dla analizowanych przypadków

Fig. 8. A comparison of empirical (Pnnj(MPK)) and simulated (Pnnj(sym)) system of system's failure probability when a tram is damaged For example, the developed model can be used in analysis of the following aspects:

- selection of suppliers in terms of the required delivery time,
- reliability of operational system (e.g. in terms of achieved times between failures),
- maintainability of operational system (e.g. in terms of required repair times),
- minimal CIL quantity appraisement,
- definition of minimal redundancy time.

However, presented model developed with the use of Monte Carlo simulation is time-consuming, because a large number of simulated samples have been needed to estimate the reliability parameters at a high level of confidence. Moreover, there is very difficult to simulate the real system behaviour – espe-

cially in the field of human factor influence on the obtained system of systems reliability characteristics. Thus, results from the Petri Net model have been obtained. A High Level Petri Net simulator was designed to collect data regarding execution of the net presented in the fig. 5. The Monte Carlo simulation's purpose is twofold. For one thing, to estimate a probability distribution function of the system of system's failure time caused by a damaged tram. Secondly, to measure a conditional probability that a failed tram will cause system of system's failure.

For the *i*th tram failure whose repair and lead time is longer than the resource time, the following calculation is made:

$$\mathbf{x}_{i} = \tau(\mathbf{t}_{4}) - \tau(\mathbf{t}_{6}) \text{ if } \tau(\mathbf{t}_{4}) > \tau(\mathbf{t}_{6}).$$

Hence, x_i denotes system of system's failure time caused by the *i*th tram failure. Consequently, by means of the statistical analysis of each tram failure, probability distributions of estimated system of system's failure time are done with the outcome presented in fig. 9 and 10. The results concern the test cases no. 1 and 2 from table 3 respectively. A comparison with real system CDF is provided. There is no reason to reject the hypothesis of convergence using Kolmogorov–Smirnov test with confidence at 0.01 level.

Figures 11 and 12 refine quantitative analysis for test case 1.

After the simulation has finished, the conditional probability is obtained through dividing a number of tokens in the place p_9 by a number of transition t_0 has fired. The fig. 13 displays the results.

For the sake of completeness, in the fig. 14 expected system of systems' failure time from all test cases are compared.



Rys., 9. Dystrybuanty czasu niezdatności nad systemu: na postawie sieci Petriego (linia gruba) i z rzeczywistego systemu (linia cienka) dla przypadku testowego nr 2





Rys. 11. Porównanie gęstości prawdopodobieństwa czasu niezdatności nadsystemu – przypadek 1 z tab 3.

Fig. 11. A PDF comparison for the system of system's failure time - test case 1 from table 3

3. Podsumowanie

W niniejszej pracy omówiono podstawowe ograniczenia dotychczas zbadanych metod modelowania niezawodności i eksploatacji systemów. W wyniku tej analizy wybrano dwie metody do zbadania wydajności systemu komunikacji tramwajowej.

Wykorzystując języki: Sieci Petriego Wysokiego Poziomu oraz uogólnionych, stochastycznych sieci Petriego, zbudowano model opisujący działanie systemu komunikacji. Następnie przeprowadzono eksperyment numeryczny, w rezultacie którego potwierdzono zbieżność wyników obydwu modeli symulacyjnych. Uzyskane błędy względne e_{nvzg} prawdopodobieństwa awarii nadsystemu P_{nnj} nie przekraczają 11% dla badanych przypadków testowych. Porównując wyniki z modelu sieci Petriego z rezultatami rzeczywistego systemu, błędy względne e_{nvzg} awarii nadsystemu P_{nnj} nie przekraczają 16% dla badanych przypadków. Uzyskana dokładność odwzorowania wiąże się



Rys. 10. Dystrybuanty czasu niezdatności nad systemu: na postawie sieci Petriego (linia gruba) i z rzeczywistego systemu (linia cienka) dla przypadku testowego nr 2





Rys. 12. Wykresy dystrybuanty rozkładu Weibulla czasu niezdatności nadsystemu – przypadek 1 z tab. 3

3. Conclusions

In the presented paper, there have been discussed the main limitations of known modelling methods used in real-life system reliability and supportability analysis. As a result, two modelling techniques have been applied to describe the investigated tram network performance processes.

The Petri Net model has been developed as a combination of High-level Petri Net and general stochastic Petri Net techniques. Some numerical experiments have been carried out. Obtained results confirm the convergence between both presented simulation models. The relative errors e_{nvrg} for the probability of system of systems downtime P_{nnj} do not exceed 11% for every analyzed case. When comparing Petri net model to results obtained from real system performance processes, relative errors e_{nvrg} for the probability of system of systems downtime P_{nnj} do not exceed 16% for every analyzed case. The obtained modelling accuracy is related to the necessity of many simplified as-

Fig. 12. A Weibull probability plot comparison for the system of system's failure time - test case 1 from table 3

SCIENCE AND TECHNOLOGY



- Rys. 13. Porównanie prawdopodobieństwa niezdatności pod warunkiem uszkodzenia tramwaju dla badanych przypadków
- Fig. 13. A comparison of system of system's failure probability when a tram is damaged

z koniecznością przyjęcia wielu upraszczających założeń związanych z możliwością zastosowania modelu Petriego. Autorzy uważają, iż w tym przypadku osiągnięty poziom błędu odwzorowania jest do przyjęcia. W dalszych badaniach – odchodzenie od silnych założeń powinno pozwolić na osiągnięcie większej poprawności odwzorowania.

Niniejsza praca jest zatem punktem wyjścia do poszukiwania nowych analitycznych metod szacowania wydajności systemów przy pomocy sieci Petriego.

4. References

- 1. Ajmone Marsan M., Balbo G., Conte G.: A class of generalized stochastic Petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems. ACM Trans. Computer Systems, Vol. 2 No 2, 1984, 93-122.
- 2. Bobbio A., Codetta D.: Parametric fault trees with dynamic gates and repair boxes, in: Proc. Annual Symposium on Reliability and Maintainability, 2004, 459-465.
- 3. Bobyr M., Yakhno B., Rusinski E., Harnatkiewicz P.: Damage in the complex low-cycle fatigue. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008, Vol. VIII, no. 3, 23-31.
- Cho I.D., Parlar M.: A survey of maintenance models for multi-unit systems. European Journal of Operational Research, 1991, 51, 1-23.
- Dugan J. B., Bavuso B., Boyd M.: Dynamic fault tree models for fault tolerant computer systems. IEEE Trans. Reliability, 1992, Vol. 41, 363-377.
- Dugan J. B., Bavuso B., Boyd M.: Fault trees and Markov models for reliability analysis of fault tolerant systems. Reliability Engineering and System Safety, 1993, Vol. 39, 291-307.
- 7. Fault Tree Analysis, International Technical Commission, IEC Standard, Publication 1025, 1990.
- 8. ISO/IEC 15909-1, High-level Petri nets: Concepts, definitions and graphical notation, 2004.
- 9. Jodejko A., Molecki B.: Methods of number of redundancies determination in the example of tram network (in Polish). City and Regional Transportation, 2008, No. 1.
- Magott J., Nowakowski T., Skrobanek P., Werbińska S.: Logistic system modelling using Fault Trees with Time Dependencies

 example of tram network. European Safety and Reliability Association Conference, ESREL, 2009, Praha, Czech Republic, Leiden: Taylor and Francis, 2008, 2293-2300.
- Magott J., Nowakowski T., Skrobanek P., Werbińska S.: Analysis of possibilities of timing dependencies modelling example of logistic support system. European Safety and Reliability Association Conference, ESREL, 2008, Valencia, Spain, Leiden: Taylor and Francis, 2008, 1055-10.



Rys. 14. Porównanie średniego czasu niezdatności nadsystemu dla badanych przypadków testowych

Fig. 14. A comparison of average system of system's failure time

sumptions of Petri net modelling taking. Authors deem, that in the investigated case obtained error level is to be accepted. In future research, better modelling accuracy can be achieved by changing the simplified assumptions.

Thus, the presented paper can be the starting point of consideration about searching new analytical ways of real-life system performance estimation with the use of Petri Nets.

61

- 12. Magott J., Nowakowski T., Skrobanek P., Werbińska S.: Analysis of logistic support system using Fault Trees with Time Dependencies. Archives of Transport, 2007, No. 4.
- 13. Magott, J., Skrobanek, P.: A method of analysis of fault trees with time dependencies. In Proc. SAFECOMP'2000, Rotterdam, The Netherlands, LNCS, Vol. 1943, Springer-Verlag, 2000, 176-186.
- Montani S., Portinale L., Bobbio A., Codetta-Raiteri D.: RADYBAN: a tool for reliability analysis of dynamic fault trees through conversion into dynamic Bayesian networks. Reliability Engineering and System Safety, 2008, Vol. 93, 922-932.
- 15. Nakagawa T.: A summary of discrete replacement policies. European Journal of Operational Research, 1984, 17, 382-392.
- 16. Nicolai R.P., Dekker R.: Optimal maintenance of multicomponent systems: a review. Economic Institute Report 2006.
- 17. Nowakowski T., Werbińska S.: Maintenance modelling concepts state of art. International Journal of Materials and Structural Reliability, 2008 vol. 6, nr 2, 229-254.
- 18. Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S.: Models of logistic support systems (in prep.).
- 19. OPNAV Instruction 3000.12A.: Operational availability of equipments and weapons systems, Department of the Navy, Washington D.C. 2003.
- 20. Pham H., Wang H.: Imperfect maintenance. European Journal of Operational Research, 1996, 94, 425-438.
- 21. Pierskalla W.P., Voelker J. A.: A survey of maintenance models: the control and surveillance of deteriorating systems. Naval Research Logistics Quarterly, 1976, 23, 353-388.
- 22. Rusinski E., Harnatkiewicz P., Bobyr M., Yakhno B.: Caterpillar drive shaft damage causes analysis. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008, Vol. VIII, no. 3, 117-129.
- 23. Sherif, Y.S.: Reliability analysis: Optimal inspection & maintenance schedules of failing equipment. Microelectronics and Reliability, 1982, Vol. 22, No. 1, 59-115.
- 24. Valdez-Flores C., Feldman, R.: A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. Naval Research Logistics, 1989 Vol. 36, 419-446.
- 25. Wang H.: A survey of maintenance policies of deteriorating systems. European Journal of Operational Research, 2002, 139, 469-489.
- 26. Werbińska S.: Model of logistic support for exploitation system of means of transport. PhD. Thesis, Technical University of Wroclaw, Poland, report: PRE. 3/2008.
- 27. Werbińska S.: Model of logistic support system with time dependency. European Safety and Reliability Association Conference, ESREL, 2008, Valencia, Spain, Leiden: Taylor and Francis, 2008, 1851-1859.
- 28. Werbińska S.: Simulation-based approach for calculating the reliability of logistic support processes. Journal of KONBiN, 2008 vol. 4, nr 4, s. 239-248.

Mgr inż. Marcin KOWALSKI Prof. dr hab. inż. Jan MAGOTT Dr hab. inż. Tomasz NOWAKOWSKI, Prof. Pwr. Dr inż. Sylwia WERBIŃSKA-WOJCIECHOWSKA Politechnika Wrocławska Ul. Wybrzeże Wyspiańskiego nr 27 51-370, Wrocław, Polska e-mail: sylwia.werbinska@pwr.wroc.pl

METODA PRZEWIDYWANIA NIEZAWODNOŚCI ELEMENTÓW SKŁADOWYCH SILNIKA DIESLA OPARTA NA ANALIZIE PRZYCZYN I SKUTKÓW USZKODZENIA FMEA

A RELIABILITY PREDICTION METHOD FOR DIESEL ENGINE COMPONENTS BASED ON FMEA

Przewidywanie niezawodności polega na ocenie niezawodności urządzeń lub wyrobów z użyciem modeli i danych matematycznych przed wejściem tych pierwszych do produkcji lub ich modyfikacją, zanim dostępne są dane empiryczne. Jest to ważna część działań mających na celu poprawę niezawodności, jakie prowadzi się podczas calego czasu eksploatacji danego systemu. Artykuł koncentruje się na zagadnieniu przewidywania niezawodności elementów składowych silnika Diesla. Dla skrócenia czasu gromadzenia potrzebnych informacji oraz poprawy skuteczności predykcji zaproponowano metodę zintegrowaną z analizą przyczyn i skutków uszkodzenia (FMEA). Metoda stanowi modyfikację metody podobieństwa konstrukcyjnego (design similarity), w której niezawodność nowego elementu składowego oblicza się porównując występowanie przyczyn jego uszkodzeń w nowej konstrukcji z ich występowaniem w podobnym, już istniejącym elemencie składowym. Proponowaną metodę omówiono na przykładzie predykcji niezawodności uszczelki głowicy cylindra silnika o zapłonie samoczynnym.

Słowa kluczowe: przewidywanie niezawodności, silnik Diesla, podobieństwo konstrukcyjne, FMEA.

Reliability prediction involves reliability estimation of equipment or products prior to their production or modification by applying mathematical models and data before empirical data are available. It is an important part of reliability improvement work in the whole lifetime of a system. This paper focuses on the reliability prediction of diesel engine components. To reduce the time of gathering useful information and to improve prediction efficiency, a method integrated with design failure mode and effects analysis (FMEA) is proposed. The method is a modification of design similarity method in which the reliability of a new component is calculated by comparing its failure modes occurrence in the new design with the one of a similar existing component. An example about reliability prediction of a cylinder head gasket in a diesel engine is used to illustrate the proposed method.

Keywords: Reliability prediction, diesel engine, design similarity method, FMEA.

1. Introduction

A diesel engine is an internal combustion engine that uses the heat of compression to initiate ignition to burn the fuel, which is injected into the combustion chamber during the final stage of compression. It has been widely used in automobiles, vessels, military vehicles, electrical generators, etc [14]. As an important factor, reliability is taken into account through the whole lifetime of diesel engines. Reliability modeling and prediction of the engine has been one of the most important issues in the engine manufacturing industry.

Many engineers have made significant efforts on improving reliability of diesel engine or its components. Liu and Huang [11] discussed the evaluation of diesel engine using general reliability indexes and automobile specific reliability indexes based on maintenance records. Arcidiacono and Campatelli [1] developed an approach called failure mode and effect tree analysis (FMETA), which is the combination of axiomatic design, FMEA and fault tree analysis (FTA). FMETA can be used to evaluate the Risk Priority Number (RPN) for a component of the product and to find the reliability relation among its components. The method has been validated by an application to an automotive heavy-duty diesel engine. Jardine and Ralston [9] examined whether or not prognostics and health management (PHM) could improve the accuracy of the oil-analyst/expert system in determining the risk of failure of a diesel engine used on Canadian Pacific Rail.

Reliability prediction deals with evaluation of a design prior to actual construction of the system [3,16]. Although the product reliability is not increased by the prediction process, the result of reliability prediction provides an early indication as to whether a design is likely to meet reliability goals, points to potential reliability problem areas in a new design or design modifications, and identifies components needing further testing. It is a tool to determine as early as possible whether the equipment will be reliable enough or whether it needs further improvement to function successfully for the company [2, 5,15].

It is highly desirable to obtain precise prediction of the reliability of a new product before it is manufactured. Systemlevel reliability predictions are generally developed based on a system model and component-level reliability prediction [6-8, 12, 18]. Component-level reliability can be determined from a variety of sources [17]. Traditional reliability prediction approach is based on reliability block diagram (RBD). Three commonly used prediction techniques are part count method, stress analysis method and design similarity method. The part count method approximately produces the prediction on the number of parts in the proposed design. The stress analysis method evaluates designs by comparing predicted strengths with anticipated stresses. The design similarity method analyzes similar systems currently in operation and uses the results to predict the reliability of a proposed design. This requires a careful comparison of components to determine which are truly comparable in the new design and a separate evaluation for those that are not. It also requires valid and reliable data on the performance of the similar components [17].

The design similarity method is usually used in the early design phase. For a diesel engine, most designs are modifications on the basis of existing ones. There is no natural distinction between new and existing designs except absolutely fresh technology is presented. Although there is a limited amount of information about new design, information about similar designs can always be found, providing important references for reliability prediction of new types of diesel engine.

Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) is methodology for analyzing potential reliability problems early in the development cycle where it is easier to take actions to overcome these issues, thereby enhancing reliability through design. FMEA has been paid more attention in many diesel engine manufacturing industries. If the reliability information provided by FMEA can be taken full advantage in reliability prediction, it is possible to decrease the time for gathering data and then improve prediction efficiency.

Research studies on reliability prediction integrated with FMEA have been focused by scholars in recent years. Jin and Tu [10] established a reliability prediction model integrated with FMEA considering different effects of each failure mode. Yang et al (2008) developed a fuzzy rule-based Bayesian reasoning approach for prioritization of failures in FMEA on a rational basis [19]. Reliability prediction values and mean time between failure (MTBF) are calculated using criticality scales. The method proposed in Reference [12] is suitable for the detailed design phase. When using this method, a great deal of information about the product is needed. The accuracy of prediction relies on the validity of FMEA.

In this paper, a reliability prediction model based on FMEA and design similarity is proposed. In the design phase of a new type of diesel engine, reliability prediction can be executed according to FMEA of similar existing types. The difficulty of evaluating defects number is overcome by evaluating failure modes occurrence of similar existing items. The paper is organized as follows. In Section 2 design similarity method considering variation of fault rate is discussed. In Section 3, a method for estimating reliability using FMEA occurrence is proposed. A case study about a cylinder head gasket of a diesel engine is given to show the prediction process. Section 5 gives a brief summary.

2. Reliability prediction using design similarity method

New diesel engines are always developed on the basis of existing ones, a great deal of similarities exist between them although there are some variations. Design similarity method utilizes fault rates of existing components to predict fault rates of new products [13]. The failure rate of an existing component can be obtained from sources such as company warranty records, customer maintenance records, component suppliers, or expert elicitation from design or field service engineers.

Defects in a component are imperfections that cause inadequacy or failure. The imperfections are always caused by shortcomings in the design and manufacture process. The relationship between failure rate and defect number is expressed as follows [13]:

$$\lambda_o = m \cdot d_o \tag{1}$$

where λ_o is the failure rate of existing similar components, d_o denotes the total number of known defects, and *m* is a coefficient. The failure rate of the new component is calculated as follows:

$$\lambda_n = m \cdot d_n \tag{2}$$

where λ_n is the failure rate of the new component, d_n is the total defects number of the new design:

$$d_n = d_o + d_i - d_e \tag{3}$$

where d_i is the total number of new defects caused by design modification, d_e is the total number of eliminated defects by design modification. According to Eq. (1), Eq. (2) and Eq. (3), the failure rate of the new component can be calculated as:

$$\lambda_n = \lambda_o \cdot \left(\frac{d_o + d_i - d_e}{d_o}\right) \tag{4}$$

The difference between the failure rates of the new and existing products is defined as $\Delta\lambda$, then:

$$\Delta \lambda = \lambda_o - \lambda_n = k \cdot \lambda_o \tag{5}$$

where *k* represents the coefficient considering the reliability improvement because of design modification. Then:

$$\lambda_n = \lambda_o - \Delta \lambda = \lambda_o \cdot (1 - k) \tag{6}$$

and Eq. (4) can be rewritten as:

$$\lambda_n = \lambda_o \cdot (1 - \frac{d_e - d_i}{d_o}) \tag{7}$$

By comparing Eq. (6) and Eq. (7), the relationship between *k* and defects number is given as follows:

$$k = \frac{d_e - d_i}{d_o} \tag{8}$$

After determining the values of d_o , d_e and d_p , the coefficient k can be obtained. Then the failure rate of the new subsystem/ component can be calculated according to Eq. (7).

After predicting the reliability value of each component, the reliability of the diesel engine system can be estimated on the basis of the reliability block diagram model, which is expressed in Eq. (9):

$$\lambda_s^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i^* \tag{9}$$

where λ_s^* refers to reliability prediction value of the diesel engine system, and λ_i^* refers to the reliability value of the *i*th component.

When using design similar method. It is often difficult to obtain defects number exactly in engineering practice. This motivates us to find a relatively feasible method to estimate the defects number.

3. Estimation of k on the basis of FMEA

FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) is used to identify potential failure modes, determine their effects on the operation of the product, and identify actions to mitigate the failures. Design FMEA is methodology for analyzing potential reliability problems early in the design phase where it is possible to take actions to reduce design defects by modification. It is a product design verification activity that can help avoid a large percentage of product design problems before the design is finalized. While anticipating every failure mode is not possible, the development team should formulate a list of potential failure modes as extensively as possible [4].

A failure mode is the manner by which an equipment or machine failure is observed. It generally describes the way the failure occurs. In FMEA, occurrence is ranked according to the failure probability, which represents the number of failures anticipated during the design life of an item. The range of values and the linguistic terms used to describe the frequency of the failure mode occurrence are shown in Table 1 [4].

Failure modes can be observed and represented by occurrence, and failure modes can be considered as defects representations of the subsystem (assembly or components). In this paper, we try to find the relationship between occurrence and defects number to estimate the value of k. The aim is to obtain creditable reliability prediction through making good use of design FMEA result, to reduce the time for gathering valid reliability information, and to increase the prediction efficiency.

According to table 1, there exists a nonlinear relationship between failure rate and occurrence rank. It is not possible to produce a linear function of occurrence rank. By multiplying the failure rate by eight, the relationship can be transformed to linear. The transformed scale of failure rate is also shown in table 1. The defects number of existing items is estimated by:

$$d_o = \sum_{j=1}^{N} D_j, \quad j = 1, 2, ..., N$$
(9)

where N is the failure modes number of existing diesel engine components, D_j is the transformed scale of the *j*th failure mode occurrence in design FMEA. After design modification, the total number of new defects is given as:

$$d_i = \sum_{t=1}^{M} D_t, \quad t = 1, 2, ..., M$$
(10)

where M is the total number of new failure modes caused by design modification, D_t is the transformed scale of the *t*th new failure mode occurrence in design FMEA. The eliminated defects number is given as:

$$d_e = \sum_{k=1}^{P} D_k, \quad k = 1, 2, ..., P$$
 (11)

where *P* is the total number of failure modes eliminated by design modification, D_k is the transformed scale of the *k*th eliminated failure mode occurrence. Then the factor *k* can be calculated using Eq.(8).

4. Case study

A cylinder head gasket is a gasket that sits between the cylinder block and cylinder head in a diesel engine. It is an integral component of the engine and the most critical sealing application in any engine. The cylinder head gasket must maintain the seal around the combustion chamber at peak operating temperature and pressure. The gasket must seal against air, coolants, combustion and engine oil at their respective peak operating temperature and pressure. The materials used and design employed must be thermally and chemically resistant to the products of combustion and the various chemicals, coolants and oils used in the engine [14]. Design FMEA form of a cylinder head gasket is shown in Table 2, in which five failure modes are considered.

In the design process of a new type of diesel engine on the basis of previously used ones, suppose that design modification is made by increasing the flange of cylinder block. The aim is to decrease the occurrence of "Gas leakage" and to reduce the performance degradation probability subsequently. However, the design modification causes a new potential failure mode, shown in Table 3.

We can execute the reliability prediction process of the cylinder head gasket according to Table 2 and Table 3. The steps are shown as follows:

 Calculate the sum of transformed scales of five failure modes in the previously designed diesel engine:

$d_a = 0.004 + 0.004 + 0.00005 + 0.00005 + 0.004 = 0.0121$

(2) Calculate the sum of transformed scales of potential failure modes in the new design:

$$d_i = 0.00005$$

Rank Occurrence Description		Potential failure rate	Transformed Scale					
1	Very low	Failure is unlikely	≤1/1500000	0.000005				
2	Low	Relatively few failures	about 1/150000	0.00005				
3			about 1/15000	0.0005				
4		Occasional failures	about 1/2000	0.004				
5	Moderate		about 1/400	0.02				
			about 1/80	0.1				
7	High	Depented failures	about 1/20	0.4				
8	High	Repeated failures	about 1/8	1.0				
9	Very high	Failura is also act in a site bla	about 1/3	2.7				
10		Failure is almost inevitable	≥1/2	4.0				

Tab.1. Frequency of occurrence evaluation criteria of diesel engine

ltem	Failure modes	Failure causes	Failure effects	0	s	D	RPN	Recommended actions
	Gas leakage	creep deformation, fatigue, unreasonable flange dimen- sion	overheat, performance degradation	4	8	3	96	increase flange width of cylinder block, modify speci- fications
	water leakage	gasket ring over age,, relative small cylinder mold, defective materiel	cylinder head surface corrosion	4	6	3	72	increase tightness
cylinder head gasket	Small location hole diameter	Nonstandard design	cylinder block cannot be installed	2	6	2	24	
	Big location hole diameter	Nonstandard design	cylinder block displace- ment	2	6	2	24	strictly control dimension, tolerance, productive pro-
	Unreasonable cylinder diam- eter	Unreasonable dimension chain Wrong sickness	blasting pressure in- crease, performance degradation	4	8	3	96	cess

Tab. 2. Design FMEA of cylinder head gasket

 Tab. 3.
 A potential failure mode of new diesel engine

ltem	Failure mode Failure cause		Failure effect			
cylinder head gasket	water leakage	cylinder block cannot be in- stalled	displacement caused by relative bigger flange width	2		

(3) Calculate the sum of transformed scales of eliminated failure modes in the new design:

$$d_{1} = 0.004$$

Then the factor k can be obtained according to Eq. (8):

$$k = \frac{d_e - d_i}{d_o} = \frac{0.004 - 0.00005}{0.0121} = 0.3264$$

Supposed that the failure rate of the previously designed cylinder head gasket is $\lambda = 5.505 \times 10^{-8}$, the failure rate of the cylinder head gasket in the new design is calculated by Eq. (6):

$$\lambda_n = \lambda_0 \cdot (1-k) = 3.7079 \times 10^{-8}$$

Failure rates of other components can be obtained according to above steps based on the design FMEA occurrence. Finally the failure rate or reliability of the whole diesel engine can be estimated using Eq. (9).

5. Conclusions

New types of diesel engine are formed based on design modification of existing ones, and the engine structures are not usually changed in a great extent. In the design stage, detail design FMEAs are always executed for existing types and the analysis documents are preserved permanently. For new designs, potential failure modes are predicted at least. By comparing design FMEA results of existing and new design, it is possible to conclude that some failure modes in the existing types are eliminated, and some new failure modes are presented by design modification.

The reliability prediction method discussed in this paper utilizes FMEA to increase the efficiency of reliability prediction. Through comparing FMEA of existing and new design, changes of failure modes and of failure modes occurrence scales are obtained. Then the factor which characterizes the change of failure rate can be calculated. When there exists a great deal of difference between new and existing designs, the method in this paper cannot be employed with confidence.

This research was partially supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) under the contract number 2007AA04Z403, and the Open Project Program of the Key Laboratory of Manufacture and Test Techniques for Automobile Parts (Chongqing University of Technology), Ministry of Education, Chongqing, 400050, China.

6. References

- 1. Arcidiacono G, Campatelli G. Reliability Improvement of a Diesel Engine Using the FMETA Approach. Quality and Reliability Engineering International. 2004; 20(2):143-154
- Bowles J B. A survey of reliability-prediction procedures for microelectronic devices. IEEE Transactions on Reliability. 1992; 41(1):2-12
- 3. Denson W. The history of reliability prediction. IEEE Transactions on Reliability. 1998; 48(3):321-328
- 4. Dhillon B. S., Singh Chanan. Engineering reliability: new techniques and applications. New York: Wiley, 1981
- 5. Dupow H, Blount G. A Review of Reliability Prediction. Aircraft Engineering and Areospace Technology. 1997; 69(4):356-362

- Huang H Z, Liu Z J, Murthy D N P. Optimal reliability, warranty and price for new products. IIE Transactions 2007, 39(8): 819-827
- Huang H Z, Qu J, Zuo M J. Genetic-algorithm-based optimal apportionment of reliability and redundancy under multiple objectives. IIE Transactions 2009, 41(4): 287-298
- Huang H Z, Zhang X. Design optimization with discrete and continuous variables of aleatory and epistemic uncertainties. ASME Journal of Mechanical Design 2009, 131(3): 031006-1-031006-8
- 9. Jardine A K S, Ralston P, Reid N, Stafford J. Proportional hazards analysis of diesel engine failure data. Quality and Reliability Engineering International. 1989; 5 (3):207-216
- 10. Jin X M, Tu Q C, Lu T X. Reliability Prediction Method Integrated with FMECA. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 1992; (1):32-37 (in Chinese)
- 11. Liu Y, Huang H Z, Miao Q, Zuo M J. Analysis and Evaluation of Reliability of Diesel Engine Based on Maintenance Records. Proceedings of the ASME 2007 IDETC/CIE. 2007; 451-456
- Liu Y, Huang H Z. Comment on "A framework to practical predictive maintenance modeling for multi-state systems" by Tan C.M. and Raghavan N. [Reliab Eng Syst Saf 2008; 93(8): 1138–50]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2009, Vol.94, No.3, pp.776-780.
- 13. Mei Q Z. Fundamentals of system reliability engineering, Beijing: Science Press. 1987
- 14. Moon J F. Rudolf Diesel and the Diesel Engine. London: Priory Press. 1974
- 15. Ormon S W, Cassady C R, Greenwood A G. Reliability Prediction Models to Support Conceptual Design. IEEE Transactions on Reliability. 2002; 51(2):151-157
- 16. Ted W. Yellman. Comment on: Reliability Prediction. IEEE Transactions on Reliability. 1985; 34(5):504-506
- 17. Wallace R. Blischke, D N P Murthy. Reliability Modeling, Prediction and Optimization. John Wiley & Sons, 2000.
- Wang Z, Huang H Z, Du X. Optimal Design Accounting for Reliability, Maintenance, and Warranty. ASME Journal of Mechanical Design 2010, 132(1): 011007-1-011007-8
- 19. Yang Z, Bonsall S, Wang J. Fuzzy Rule-based Bayesian reasoning approach for prioritization of failures in FMEA. IEEE Transactions on Reliability. 2008; 57(3): 517-528.

Associate Prof. Dan LING Wei SONG, Ph.D. Candidate Rui SUN, Ph.D. Candidate School of Mechanical, Electronic, and Industrial Engineering University of Electronic Science and Technology of China Chengdu, Sichuan, 611731, P. R. China Key Laboratory of Manufacture and Test Techniques for Automobile Parts Chongqing University of Technology Ministry of Education, Chongqing, 400050, P. R. China E-mail: lingdan@uestc.edu.cn; hzhuang@uestc.edu.cn

WYKRYWANIE WCZESNYCH FAZ USZKODZEŃ KÓŁ ZĘBATYCH W WARUNKACH EKSPLOATACYJNYCH

EARLY FAULT DETECTION OF TOOTHED GEAR IN EXPLOITATION CONDITIONS

Przekładnie zębate są powszechnie wykorzystywane w układach napędowych maszyn i urządzeń. W trakcie ich eksploatacji bardzo istotne jest odpowiednio wczesne pozyskanie informacji o postępujących procesach degradacyjnych. Pozwala to na zaplanowanie we właściwym czasie niezbędnych przeglądów oraz napraw, zwiększając w ten sposób niezawodność wszystkich elementów łańcucha kinematycznego. Z tego powodu w artykule zawarto wyniki prac zespołu w zakresie diagnostyki wibroakustycznej uszkodzeń elementów przekładni zębatych. Przedstawiono przegląd badań symulacyjnych i doświadczalnych, których celem było opracowanie metod pozwalających na wczesną identyfikację uszkodzeń zębów w postaci pittingu powierzchni roboczych, wykruszenia wierzchołka, pęknięcia u podstawy zęba oraz częściowego wyłamania zęba. Dokonano oceny efektywności wybranych metod przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w procesie wykrywania uszkodzeń kół zębatych przy jednoczesnym występowaniu uszkodzeń łożyskowania przekładni pracujących w różnych warunkach. Wstępnie przetworzone sygnały drganiowe analizowane w dziedzinie czasu i częstotliwości stanowiły podstawę do opracowania miar diagnostycznych wrażliwych na wczesne stadia uszkodzeń. Miary otrzymane w wyniku symulacji oraz badań doświadczalnych wykorzystano do budowy zestawu wzorców klasyfikatora neuronowego diagnozującego rodzaj i stopień uszkodzenia kół przekładni z błędem walidacji poniżej 5%. Uzyskana zgodność jakościowa i ilościowa wyników badań symulacyjnych i doświadczalnych wykazała, że wykorzystanie rozbudowanego i zidentyfikowanego modelu dynamicznego przekładni w układzie napędowym, umożliwia pozyskanie wiarygodnych relacji diagnostycznych.

Slowa kluczowe: przekładnie zębate, drgania, uszkodzenia kół, diagnostyka.

Toothed gears are commonly used in various power transmission systems. Collecting information about degradation processes early enough is crucial during their exploitation. It enables suitable planning of required inspections and repairs, improving the reliability of all kinetic chain elements. The article includes results of the team's research work on vibroacoustic diagnostic of gearbox components' faults. A review of simulation and experimental researches that aimed at elaboration of methods which would enable early identification of teeth faults in the form of working surface pitting, spalling of tooth crest, crack at the tooth bottom as well as partial breaking of a tooth, is presented. Assessment of selected methods of processing the vibroacoustic signals during the detection of gear faults has been carried out while faults occur in gear bearings working under various conditions. The initially processed vibration signals analyzed within time and frequency domains constituted a basis for preparation of detection measures that were sensitive to early stages of damage. The measures obtained as a result of simulation and experimental tests were used to construct a set of neuron classifier models to diagnose the type and degree of toothed wheels faults with a validation error below 5%. The achieved qualitative and quantitative conformity of simulation and experimental research results has shown that application of an expanded and identified dynamic model of the gear in a power transmission system enables the acquisition of reliable diagnostic relations.

Keywords: gearbox, vibration, gear fault, diagnostics.

1. Wstęp

Przekładnie zębate projektowane są do współpracy ze źródłami napędu o coraz większej mocy i są narażone na duże zewnętrzne obciążenia dynamiczne. W procesie projektowania dąży się do uzyskania jak największej wartości stosunku mocy przenoszonej przez koła do ich masy. Mocno obciążona przekładnia powinna być doraźnie lub ciągle monitorowania w celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji. Techniki diagnozowania stanu technicznego przekładni zębatych ukierunkowane są na identyfikację uszkodzeń w początkowej fazie.

Jedną z najczęściej stosowanych metod jest pomiar sygnału wibroakustycznego i określenia na jego podstawie miar wraż-

1. Introduction

Toothed gears are designed for cooperation with sources of drive of higher and higher power and are exposed to high external dynamic loads. In the design process, designers are trying to achieve the highest possible ratio of power transmitted through wheels to their weight. A gear working under high load should be either sporadically or constantly monitored to ensure safe operation. The techniques of diagnosing the technical condition of gears are oriented towards identification of faults in the initial phase. liwych na różne rodzaje uszkodzeń. Szybkość rozprzestrzeniania się zaburzeń wibroakustycznych wywołanych zmianą stanu przekładni powoduje, że metody wibroakustyczne są szczególnie przydatne w diagnozowaniu wczesnych stadiów uszkodzeń.

Ostatnio znacznie rozwinęły się techniki bezkontaktowego pomiaru drgań. Umożliwiają one pomiar prędkości drgań elementów wirujących. Pomiary prędkości drgań wirujących wałów umożliwiają eliminację wpływu złożonej i zmiennej w czasie transmitancji układu łożysko-korpus przekładni.

Ważnym zagadnieniem w diagnozowaniu przekładni jest umiejętność rozróżnienia oddziaływania na sygnał wibroakustyczny różnych zjawisk związanych zarówno z jej normalną pracą jak i zmianami wywołanymi rozwojem uszkodzeń jej elementów.

Najbardziej podatnymi na uszkodzenia elementami przekładni są koła zębate i łożyska. Nowoczesne metody diagnozowania przekładni zębatych ukierunkowane są na wykrywanie wczesnych faz rozwoju uszkodzeń takich jak wykruszenie wierzchołka zęba, pęknięcie zęba u podstawy, zmęczeniowe wykruszenia warstwy wierzchniej, zatarcie współpracujących powierzchni i inne. W diagnozowaniu łożysk tocznych bardzo ważne jest wykrycie początkowych stadiów uszkodzeń bieżni i elementów tocznych.

Rozwój sprzętu komputerowego i metod przetwarzania sygnałów umożliwia wykorzystanie w procesie diagnozowania zaawansowanych metod analizy sygnałów na płaszczyźnie czas -częstotliwość. Metody te pozwalają obserwować niestacjonarne, impulsowe zaburzenia sygnałów wywołane uszkodzeniami w ich początkowych stadiach.

Badania eksperymentalne przekładni są trudne do zrealizowania, kosztowne i czasochłonne, a w przypadku przekładni produkowanych jednostkowo, często niemożliwe. W takich przypadkach celowe jest wykorzystanie zidentyfikowanego modelu dynamicznego przekładni zębatej w układzie napędowym [7, 9, 12, 16, 19]. Umożliwi on przeprowadzenie serii eksperymentów numerycznych, a analiza wyników symulacji pozwala na powiększenie bazy wiedzy diagnostycznej i uzyskanie większej pewności diagnozy.

Do monitorowania stanu wielu układów napędowych, tworzy się systemy ekspertowe, wykorzystujące metody sztucznej inteligencji [3, 17, 23]. Odpowiednio skonstruowany i nauczony system może automatycznie rozpoznać występujące uszkodzenia. Sieci neuronowe w procesie uczenia nabywają zdolność uogólniania wiedzy, co pozwala na wykrywanie uszkodzeń w ich wczesnych fazach. Podstawowym problemem przy budowie tych systemów jest zdefiniowanie zbioru danych wejściowych i pozyskanie odpowiednio licznego zbioru danych uczących [3].

2. Metody analizy sygnałów w diagnostyce przekładni zębatych

W diagnostyce wibroakustycznej przekładni zębatych stosuje się wiele różnych metod analizy sygnałów [2, 4, 8, 10, 11, 13, 14, 20-22].

Na rysunku 1 przedstawiono ogólny podział stosowanych metod przetwarzania sygnałów.

Podstawę stanowi odpowiednio wyselekcjonowany sygnał wibroakustyczny (WA), który w celu eliminacji przypadkowych zakłóceń może zostać uśredniony synchronicznie, dodatkowo, One of the most frequently applied methods is measurement of the vibroacoustic signal and on this basis, determination of measures sensitive to different types of damage.

The rate of propagation of vibroacoustic disturbance caused by a changed condition of a gear makes the vibroacoustic methods particularly useful in diagnosing early stages of faults.

Recently, techniques of non-contact measurement of vibration have developed considerably. They enable measuring the vibration speed of rotating bodies. Measurements of the vibration velocity of rotating shafts make it possible to eliminate the consequences of complex and variable in time transmittance of the bearing/gearbox system.

An essential issue in the diagnosing of gearboxes is the ability to differentiate between various phenomena influencing the vibroacoustic signal connected with both, normal operation of the gearbox and development of faults in its components.

Toothed wheels and bearings are the gearbox components most susceptible to damage. The modern diagnosing methods of gearboxes are oriented to the detection of early phases of fault occurrence, e.g. spalling of tooth crest, crack at the tooth bottom, fatigue chipping of the upper layer, or galling of the interacting surfaces. In the diagnosing of rolling bearings, detection of initial stages of damage to the bearing race or rolling elements is extremely important.

The development of computer hardware and signal processing methods enables using advanced signal analysis methods in the time-frequency plane. The methods allow observation of non-stationary impulse disturbance induced by faults in their initial stages.

Experimental research on gearboxes is difficult to carry out, as well as costly and time-consuming, and in the case of gears produced as single items, most often impossible. In such cases, it is justified to use an identified dynamic model of a gear in a power transmission system [7, 9, 12, 16, 19]. Such model will allow making a series of numerical experiments and analysis of the simulation results will enable expanding the diagnostic knowledge and obtaining higher certainty of the diagnosis.

For the monitoring of the condition of many power transmission units, expert systems are created, which use artificial intelligence methods [3, 17, 23]. A properly constructed and taught system can automatically recognize the existing faults. Neuron networks, in the process of learning, acquire the ability of generalizing knowledge, which allows detection of faults in their early phases. A basic problem while constructing such systems is to define a set of input data and acquire an appropriately large set of training data [3].

2. Signal analysis methods in the diagnosing of gearboxes

In vibroacoustic diagnostic of gearboxes, a number of different signal analysis methods are used [2, 4, 8, 10, 11, 13, 14, 20-22].

Figure 1 presents a general classification of the existing signal processing methods.

The basis consists of a properly selected vibroacoustic signal (WA) which, in order to eliminate incidental disturbance, can be synchronously averaged and from which, by applying

NAUKA I TECHNIKA

stosując odpowiednią filtrację, uzyskuje się z niego sygnały różnicowy i resztkowy oraz sygnał zawierający tylko pasma częstotliwości zazębienia i jej harmonicznych. Na podstawie dwóch pierwszych sygnałów oblicza sie estymatory liczbowe amplitudy oraz dyskryminanty bezwymiarowe, stosuje się metody analizy w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz czasu i częstotliwości a także momenty statystyczne wyższych rzędów. Natomiast na podstawie sygnałów różnicowego i resztkowego [3, 8, 14, 18] najczęściej określa się dyskryminanty bezwymiarowe bazujące na momentach statystycznych wyższych rzędów (FM4, M6A, M8A, NA4 ...).

W przypadku jednoczesnego występowania uszkodzeń kół i łożysk celowe jest stosowanie filtracji grzebieniowej umożliwiającej separację sygnałów drganiowych generowanych przez różne uszkodzenia [13].



appropriate filtration a differential and residual signals are obtained, as well as a signal containing only bands of meshing frequency and its harmonics. On the basis of the first two signals, numerical estimators of amplitude and dimensionless discriminants are calculated. Analysis methods are used in time domain, frequency domain, or in time and frequency domain, as well as statistical moments of higher orders. Those dimensionless discriminants which are based on statistical moments of higher orders (FM4, M6A, M8A, NA4 ...) are most often determined using differential and residual signals [3, 8, 14, 18].

In case of simultaneous occurrence of faults in wheels and bearings, it is justified to apply comb filtration, thus enabling separation of vibration signals generated by different faults [13].

Rys. 1. Sposoby przetwarzania sygnalów wibroakustycznych [13] Fig. 1. Methods of vibroacoustic signal processing [13]

Model przekładni zębatej pracującej w układzie napędowym

W badaniach symulacyjnych wykorzystano zrealizowany w środowisku Matlab–Simulink model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym (rys. 2). Model uwzględnia charakterystykę napędzającego silnika elektrycznego, jednostopniowej przekładni zębatej, sprzęgieł oraz maszyny roboczej.

Model symulacyjny umożliwiał również uwzględnienie w obliczeniach odchyłek cyklicznych i losowych występujących w zazębieniu [5, 9, 15].

Wykorzystanie modelu dynamicznego przekładni zębatej pracującej w układzie napędowym, możliwe było dzięki bardzo dobrej identyfikacji i dostrojeniu parametrów modelu. Dało to w rezultacie dużą zgodność jakościową i ilościową wyników uzyskanych z symulacji z wynikami otrzymanymi z badań na obiekcie rzeczywistym [3, 9, 10, 13].

Model przekładni zębatej umożliwiał również odwzorowanie lokalnych uszkodzeń w postaci pęknięcia u podstawy zęba

3. Model of toothed gear working in a power transmission system

In the simulation tests, a dynamic model was used representing a toothed gear working in a power transmission system (fig.2). The model was created in the Matlab–Simulink environment. It takes into account the characteristics of an electric driving motor, single-stage gear, clutches and working machine.

The simulation model allowed taking account, in the calculations, of cyclic and random deviations which occurred in the mesh [5, 9, 15].

The utilization of a dynamic model of gear in a power transmission system was possible owing to very good identification and tuning of the model parameters. It gave very high qualitative and quantitative consistency of simulation results with the results obtained from tests of a real object [3, 9, 10, 13].


Rys. 2. Model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym Fig. 2. Dynamic model of toothed gear in a power transmission system

i wykruszenia wierzchołka zęba oraz uszkodzeń elementów łożysk tocznych.

Wykruszenie wierzchołka zęba na całej długości zostało zamodelowane jako skrócenie odcinka przyporu o wartość stanowiącą ustaloną część podziałki. Uwzględniono także wpływ zmiany długości odcinka przyporu na czas zazębienia. Wykruszenie wierzchołka zęba zębnika powoduje wcześniejsze zakończenie pracy pary zębów, natomiast wierzchołka koła, opóźnione rozpoczęcie współpracy pary zębów [13].

Pęknięciu u podstawy zęba towarzyszy spadek sztywności zazębienia, stąd uszkodzenie tego rodzaju odwzorowano jako procentowe zmniejszenie sztywności współpracującej pary zębów w stosunku do pary nieuszkodzonej.

Analiza wpływu głębokości pęknięcia w stopie zęba na zmianę sztywności zazębienia została przedstawiona w monografii [13].

W podobny sposób modelowano uszkodzenia powierzchni roboczych współpracujących elementów łożysk tocznych zmniejszając sztywność łożyska w czasie gdy uszkodzony fragment powierzchni znajdował się w strefie przenoszenia obciążenia [13].

4. Wykrywanie wykruszenia wierzchołka zęba

Początkowe fazy rozwoju wykruszenia wierzchołka zęba koła w przekładni zębatej nie mają istotnego wpływu na ogólny poziomu drgań. Stąd wykrywanie tego typu uszkodzeń we wczesnej fazie jest bardzo trudne. Z dotychczasowych badań wynika, że wykorzystanie laserowego bezkontaktowego pomiaru prędkości drgań poprzecznych wirujących wałów przekładni połączone z zaawansowanymi metodami przetwarzania sygnałów takimi jak rozkład Wignera-Ville'a (WV) i ciągła transformata falkowa (CWT) umożliwia wykrywanie tego uszkodzenia w jego początkowych stadiach. Ten sposób pomiaru eliminuje wpływ złożonej transmitancji układu łożyskokorpus przekładni [13].

Na rysunku 3 przedstawiono przetwarzanie zarejestrowanego sygnału drganiowego. W rozkładzie WV, sygnału różniThe gear model also enabled mapping of local faults consisting of a crack at the tooth bottom or chipping of tooth crest, and faults of rolling bearings' components.

The chipping of tooth crest throughout its length was modeled as tooth contact section shortened by a value equal to a predetermined part of pitch. The effect of a changing tooth contact section length on the meshing time was taken into account as well. Chipping of tooth crest in a pinion results in a premature finish of operation by a couple of teeth, whereas chipping of the reference cone apex results in a delayed start of cooperation between the couple of teeth [13].

A crack at the tooth bottom is accompanied by reduced rigidity of meshing. Therefore, a fault of this sort was mapped as a percentage reduction of rigidity of the cooperating couple of teeth in relation to a couple without faults.

Analysis of the effect of the crack depth in the tooth root on a change in mesh rigidity was presented in monograph [13].

Faults of working surfaces of cooperating elements of rolling bearings were modeled in a similar way, by reducing the bearing rigidity while the damaged piece of surface was in the load transmission zone [13].

4. Detection of tooth crest chipping

Initial phases of tooth crest chipping development in a toothed gear do not significantly influence the general level of vibration. Hence, detection of damages of this type in the early phase is very difficult. It appears from the previous research that the use of a contactless laser measurement of transverse vibration speed of rotating gear shafts, combined with advanced methods of signal processing, such as Wigner-Ville distribution (WV) or continuous wavelet transform (CWT), enables detecting such fault in its initial stage. This method of measurement eliminates the influence of complex transmittance of the bearing - gear casing system [13].

Fig. 3 shows the results of measured signal processing. In the time and frequency analysis WV distribution, an increase of amplitude occurs within the pinion turn angle corresponding to the cooperation of the damaged tooth.



Rys. 3. Wykruszenie zęba zębnika – 2 mm (czołowa liczba przyporu ε_a = 1,08): sygnał prędkości drgań poprzecznych wału zębnika zmierzony w kierunku działania siły międzyzębnej (a), sygnał różnicowy (b), rozkład czasowo-częstotliwościowy WV sygnału różnicowego (c)

Fig. 3. Chip of the pinion tooth -2 mm (contact ratio $\varepsilon_a = 1,08$): measurement of vibration speed of pinion shaft in the direction of the force acting between the teeth (a), differential signal (b), WV Time/frequency distribution of differential signal (c)

cowego, występuje wzrost amplitudy w zakresie kąta obrotu zębnika odpowiadającego współpracy uszkodzonego zęba.

W celu łatwiejszej interpretacji uzyskanych wyników dokonano sumowania dyskretnych wartości rozkładu WV (wzór 1):

$$S_{WV}(\varphi) = \sum_{k_{WV}=d}^{b} WV(l_{WV}, k_{WV})$$
(1)

$$WV(l_{WV}, k_{WV}) = WV(t, f)$$
⁽²⁾

gdzie: l_{WV} , k_{WV} – dyskretne wartości odpowiednio czasu i częstotliwości, A, B – dyskretne wartości odpowiadające odpowiednio częstotliwościom granicznym przedziału sumowania $f_{A'}f_{B'}$.

W przedstawionej na rys. 4, sumie rozkładu WV, wyraźnie widoczne są lokalne maksima pochodzące od wykruszenia wierzchołka zęba zębnika, co ułatwia lokalizację uszkodzenia.

Sumy $S_{WV}(\phi)$ rozkładów WV, uzyskane z pomiarów (rys. 4) i symulacji (rys. 5), wykazują wysoką zgodność.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że przetwarzanie sygnału prędkości drgań poprzecznych wałów, zmierzonego w kierunku działania siły międzyzębnej oraz wykorzystanie analiz jednocześnie w dziedzinach czasu i częstotliwości lub czasu i skali (CWT) umożliwia efektywne wyFor easier interpretation of the results obtained, summation was performed of WV distribution discrete values (formula 1):

$$S_{\mu\nu}(\varphi) = \sum_{k_{\mu\nu}=4}^{B} WV(I_{\mu\nu}, k_{\mu\nu})$$
(1)

$$WV(l_{WV}, k_{WV}) = WV(t, f)$$
⁽²⁾

where: l_{WV} , k_{WV} – discrete values of time and frequency, respectively, A, B – discrete values corresponding, respectively, to limit frequencies of the summation interval f_A , f_B .

In the presented in fig. 4 sum of WV distribution, local maxima coming from the chipping of the tooth crest in the pinion are clearly visible, which facilitates localization of the fault.

The sums $S_{WV}(\phi)$ of WV distributions, obtained from measurements (fig. 4) and simulations (fig. 5) show high consistency.

Based on the research, it can be affirmed that processing of the signal of transverse vibration speed of gear shafts, measured in the direction of the force acting between the teeth, and the use of analyses in, simultaneously, time and frequency, or time and scale domains (CWT), facilitate effective detection of chipping of a tooth crest. Using the sums of WV distribution

- $s_{ZZ} 0 \text{ [mm]}; \epsilon_a = 1.33 \text{ [-]} s_{ZZ} 1 \text{ [mm]}; \epsilon_a = 1.21 \text{ [-]}$ 12 szz 2 [mm]; Ea=1.08 [-] 10 szz 3 [mm]; &a=0.96 [-] $S_{\mu\nu}(\phi)$ - s_{ZZ} 4 [mm]; E₀=0.82 [-] 6 3 shortening of pinion 2 tooth szz [mm] 360 315 270 225 180 135 0 90 45 0 ϕ [°] $s_{ZZ} 0 \text{ [mm]}; \mathcal{E}_a = 1.33[-]$ $s_{ZZ} 1 \text{ [mm]}; \mathcal{E}_a = 1.21[-]$ 12 szz 2 [mm]; Ea=1.08[-] 10 szz 3 [mm]; &a=0.96[-] 8 szz 4 [mm]; Ea=0.82[-] $S_{\mu\tau}(\phi)$ 2 4 3 shortening of pinion 2 tooth szz [mm] 360 315 270 225 180 135 0 90 45 0 \$[°]
- Rys. 4. Suma rozkładu czasowo-częstotliwościowego WV w paśmie 0÷4500 [Hz] uzyskana z sygnału różnicowego prędkości drgań wału zębnika, zmierzonego w kierunku działania siły międzyzębnej – wynik badań doświadczalnych; ε_a – czołowa liczba przyporu
- Fig. 4. The sum of time/frequency WV distribution in 0÷4500 [Hz] band, generated from a differential signal of pinion shaft vibration speed measured in the direction of the force acting between the teeth – experimental research result; ε_a – contact ratio
- Rys. 5. Suma rozkładu czasowo-częstotliwościowego WV w paśmie 0÷4500 [Hz] wykonana z sygnału różnicowego prędkości drgań wału zębnika zarejestrowanego w kierunku działania siły międzyzębnej – wynik symulacji; ε_a – czołowa liczba przyporu
- Fig. 5. The sum of time/frequency WV distribution in 0÷4500 [Hz] band, generated from a differential signal of pinion shaft vibration speed recorded in the direction of the force acting between the teeth – simulation result; ε_a – contact ratio

MAINTENANCE AND RELIABILITY NR 1/2011

krywanie wykruszenia wierzchołka zęba. Wykorzystując sumy rozkładu WV (rys. 4, 5) lub skalogramy [13] zbudowano miary pozwalające ocenić głębokość wykruszenia zęba.

Symulacje komputerowe pracy przekładni zębatej z uszkodzonymi elementami, wykonane przy użyciu rozbudowanego i zidentyfikowanego jej modelu dynamicznego, umożliwiły zweryfikowanie miar w przypadku występowania wykruszeń wierzchołka zęba podczas pracy przekładni: o różnych parametrach geometrycznych kół zębatych, przy różnych prędkościach obrotowych, obciążeniach oraz odchyłkach wykonania kół.

Neuronowy klasyfikator uszkodzeń kół zębatych

Wyniki badań związanych z budową klasyfikatorów neuronowych, które były uczone i sprawdzane na danych uzyskanych z modelu symulacyjnego przekładni zębatej pracującej w układzie napędowym przedstawiono w monografii [3].

Do budowy wzorców wykorzystano sygnały prędkości drgań poprzecznych wału koła analizowane przy pomocy FFT (Fast Fourier Transform) oraz CWT (rys. 6).

Ciągła transformata falkowa (CWT) jest zdefiniowana:

$$C_{i}\left(a,b,\psi\right) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f\left(t\right) \psi^{*}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$
(3)

gdzie: a – współczynnik skali, b – parametr przesunięcia w dziedzinie czasu, ψ – funkcja bazowa, falka, ψ * – falka zespolona.

Na podstawie badań wstępnych, wybrano jako klasyfikator, sztuczną sieć neuronową, typu MLP (Multi Layer Perceptron). Zestawy wzorców zbudowano w oparciu o sygnały drganiowe przekładni zębatej pracującej w następujących warunkach:

- *M* = 138 [Nm], *n* = 900 [r.p.m.],

- *M* = 138 [Nm], *n* = 1800 [r.p.m.],
- *M* = 206 [Nm], *n* = 900 [r.p.m.],
- *M* = 206 [Nm], *n* = 1800 [r.p.m.].

Zbudowano klasyfikator neuronowy zdolny rozróżniać stopień uszkodzenia zębów kół w postaci pęknięcia u podstawy zęba i wykruszenia wierzchołka zęba przekładni pracującej przy różnych prędkościach obrotowych wałów i różnych momentach obciążenia. (Fig. 4, 5) or scalograms [13], measures where built enabling the evaluation of the tooth chip depth.

Computer simulations of a toothed gear with damaged components, made using its expanded and identified dynamic model, made it possible to verify the measures of the case of tooth crest chipping during the operation of gears of different geometrical parameters of toothed wheels, at different rotational speeds, loads or deviations in wheel workmanship.

5. Neuron classifier of toothed wheel fault

The results of research connected with the structure of neuron classifiers, which were taught and verified on the basis of data obtained from a simulation model of a toothed gear working in a power transmission system, were presented in monograph [3].

For constructing the models, signals of transverse vibration speed of wheel shaft, analyzed by means of FFT (Fast Fourier Transform) and CWT (fig. 6) were used.

The Continuous Wavelet Transform CWT of the signal is defined:

$$C_{f}\left(a,b,\psi\right) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-r}^{+\infty} f\left(t\right) \psi^{*}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$
(3)

where: a – the scale parameter, b – the time parameter, ψ – the analyzing wavelet, ψ^* – the complex conjugate of ψ .

Based on preliminary tests, an artificial neuron network of MLP (Multi Layer Perceptron) type was chosen as the classifier. Sets of models were built on the basis on vibration signals of a toothed gear working in the following conditions:

- M = 138 [Nm], n = 900 [r.p.m.],
- M = 138 [Nm], n = 1800 [r.p.m.],
- M = 206 [Nm], n = 900 [r.p.m.],
- *M* = 206 [Nm], *n* = 1800 [r.p.m.].

A neuron classifier was built, capable of recognizing the degree of fault in wheel teeth in the form of a crack at the tooth bottom or chipping of tooth crest in a gear working at different shaft speeds and different load torques.

b)



Rys. 6. Ciągła transformata falkowa (CWT) sygnału otrzymanego na podstawie modelu symulacyjnego: przekładnia bez uszkodzeń (a), pęknięcie podstawy zęba l = 3 mm (b)

Fig. 6. Continuous Wavelet Transform CWT of signals obtained from a simulation model: gear without defects (a), a crack at the tooth bottom l = 3 mm(b)

a)

- Założono, że będą rozpoznawane następujące klasy:
- pęknięcie u podstawy zęba w postaci procentowego zmniejszenia sztywności pary zębów w przypadku wystąpienia tego rodzaju uszkodzenia:
 - klasa 1 🗢 0 🗢 9%,
 - klasa 2 ⇒ 10 ⇒ 19%,
 - klasa 3 ⇒ 20 ⇒ 29%,
 - klasa 4 ⇒ 30 ⇒ 40%,
- wykruszenie wierzchołka zęba w postaci procentu długości podziałki o jaki zmniejsza się odcinek przyporu w wyniku wystąpienia tego rodzaju uszkodzenia:
 - klasa 5 ⇔ 0 ⇔ 9%,
 - klasa 6 ⇔ 10 ⇔ 19%,
 - klasa 7 ⇒ 20 ⇒ 29%,
 - klasa 8 ⇒ 30 ⇒ 40%,

Proces uczenia, walidacji testowania przedstawiono na rys. 7.

Zarówno w przypadku wykorzystania wzorców otrzymanych przy wykorzystaniu analiz FFT, jak również analizy CWT, udało się zbudować klasyfikatory neuronowe diagnozujące rodzaj i stopień uszkodzenia zęba koła przekładni z błędem walidacji poniżej 5%.

Niezależnie od sposobu budowy wzorców, błąd testowania na danych pochodzących z rzeczywistej przekładni, wynosił około 60%

W kolejnym etapie, oprócz danych pochodzących z modelu dynamicznego przekładni, do zbioru uczącego, dołączono część danych pochodzących z badań rzeczywistej przekładni.

Uzyskana w tym przypadku wartość błędu testowania wyniosła około 20% zarówno w przypadku wykorzystania do budowy warstw ukrytych neuronów typu sigmoidalnego, jak również tangensoidalnego [3].

Przeprowadzone badania pokazały, że możliwe jest zbudowanie klasyfikatora neuronowego dwóch rodzajów uszkodzeń zębów kół w różnych stanach zaawansowania dla przekładni pracującej z różnymi prędkościami obrotowymi wałów oraz pod różnym momentem obciążenia.

- It was assumed that the following classes would be recognized: - a crack at the tooth bottom in the form of percentage reduc-
- tion of rigidity of a couple of teeth in case of such fault: - class $1 \Rightarrow 0 \Rightarrow 9\%$,
- class $2 \Rightarrow 10 \Rightarrow 19\%$,
- $\operatorname{Cluss} 2 \rightarrow 10 \rightarrow 1)$
- class 3 ⇒ 20 ⇒ 29%,
- class 4 ⇒ 30 ⇒ 40%,
- chipping of tooth crest, in the form of per cent length of pitch, by which the tooth contact section shortens as a result of such fault:
 - class $5 \Rightarrow 0 \Rightarrow 9\%$,
 - class 6 ⇒ 10 ⇒ 19%,
 - class 7 \Rightarrow 20 \Rightarrow 29%,
 - class $8 \Rightarrow 30 \Rightarrow 40\%$,





- Rys. 7. Schemat przyjętej metodologii pracy z klasyfikatorami neuronowymi
- Fig. 7. Chart of the adopted methodology of working with neuron classifiers

The training process and the testing validation process are presented in fig. 7.

When using both, the models obtained from FFT analysis and CWT analysis, the authors managed to build neuron classifiers which can diagnose the type and degree of fault of a gear wheel tooth with a validation error below 5%.

Irrespective of the model building method, the testing error for data taken from a real gear was ca. 60%.

In the successive stage, apart from data taken from a dynamic model of a gear, part of data coming from tests of a real gear were added to the training set.

The testing error value obtained in that case was ca. 20% in the case where for the construction, layers of both sigmoidal and tangensoidal hidden neurons were used [3].

The research has shown that it is possible to build a neuron classifier of two fault types of wheel teeth in different stages of advancement for a gear working at different rotational speeds of shaft and with different load torques.

6. Wnioski

Głównymi problemami w dziedzinie eksploatacji układów napędowych jest zapewnienie ich wysokiej niezawodności i gotowości [6]. Rosnące wymagania, co do trwałości i niezawodności układów napędowych maszyn i urządzeń powodują, że istnieje konieczność pozyskiwania informacji o ich stanie podczas eksploatacji [1]. W procesie eksploatacji współczesnych układów napędowych, wykorzystuje się szereg różnych metod i technik, służących do wykrywania wczesnych stadiów uszkodzeń oraz zwiększenia ich sprawności i niezawodności. Niewykryte w porę uszkodzenia rozwijają się, stając się przyczyną powstawania uszkodzeń przekładni zębatych, zagrażających niezawodności układów napędowych.

Na podstawie badań własnych można sformułować następujące wnioski:

- Zastosowane metody przetwarzania sygnału prędkości drgań poprzecznych wałów, mierzonego w kierunku działania siły międzyzębnej oraz wykorzystanie analiz jednocześnie w dziedzinach czasu i częstotliwości lub czasu i skali (CWT) umożliwia efektywne wykrywanie różnych uszkodzeń kół zębatych.
- Użycie rozbudowanego, zidentyfikowanego modelu dynamicznego przekładni zębatej, pracującej w układzie napędowym, do symulacji uszkodzeń jej elementów, umożliwia pozyskanie wiarygodnych relacji diagnostycznych.
- Równoczesne wykorzystanie metod doświadczalnych i symulacji komputerowych, umożliwiło stworzenie danych wejściowych do systemu diagnozującego lokalne uszkodzenia kół, działającego w oparciu o metody sztucznej inteligencji.
- Najwyższą poprawnością klasyfikacji rodzaju i stopnia uszkodzenia zębów kół przekładni charakteryzują się sztuczne sieci neuronowe, uczone na danych otrzymanych z modelu oraz z rzeczywistej przekładni.

6. Conclusions

The main issues connected with operation of the power transmission systems is ensuring their high reliability and readiness for operation [6]. Increasing requirements regarding durability and reliability of the power transmission systems, make it necessary to acquire information on the condition of the engine during its operation [1]. Power transmission systems maintenance programmes incorporate various methods and techniques for early fault detection to maintain efficiency and high reliability. The faults did not detect in due time, they would develop becoming the reason of the gearbox failures, which are dangerous for the power transmission systems.

On the basis of the authors' own studies, the following conclusions can be formulated:

- The methods applied to process the signal of transverse vibration speed of shafts, measured in the direction of the force acting between the teeth, and the use of analyses in, simultaneously, time and frequency or time and scale domains (CWT), facilitate effective detection of various faults of toothed wheels.
- Application of an expanded and identified dynamic model of a gearbox working in a power transmission system for simulating the faults of its components enables the acquisition of credible diagnostic relations.
- The simultaneous application of experimental methods and computer simulations has facilitated the creation of input data to the system diagnosing local damage of wheels, working based on artificial intelligence methods.
- The artificial neuron networks, taught using data obtained from the model and from a real gearbox, offer the highest correctness of classification of the type and degree of fault in gears.

7. References

- 1. Batko W., Borkowski B., Głocki K. Application of database systems in machine diagnostic monitoring. Eksploatacja i Niezawodnosc Maintenance and Reliability 2008; 1(37): 7-10.
- 2. Belsak A., Flasker J. Wavelet analysis for gear crack identification. Engineering Failure Analysis 2009; 16(6): 1983-1990.
- Czech P., Łazarz B., Wojnar G. Wykrywanie lokalnych uszkodzeń zębów kół przekładni z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i algorytmów genetycznych. Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2007.
- 4. Dąbrowski Z. Różne metody diagnozowania przekładni zębatych na podstawie pomiaru drgań i hałasu. XXII Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 1995: 35-44.
- Dąbrowski Z., Radkowski S., Wilk A. Dynamika przekładni zębatych Badania i symulacja w projektowaniu eksploatacyjnie zorientowanym. Warszawa-Katowice-Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2000.
- 6. Droździel P. The influence of the vehicle work organization conditions on the engine start-up parameters. Eksploatacja i Niezawodnosc Maintenance and Reliability 2008; 1(37): 72-74.
- 7. Inalpolat M., Kahraman A. A dynamic model to predict modulation sidebands of a planetary gear set having manufacturing errors. Journal of Sound and Vibration 2010; 329(4): 371-393.
- 8. Lebold M., McClintic K., Campbell R., Byington C., Maynard K. Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics. 54th Meeting of Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach 2000: 623-634.
- 9. Łazarz B. Zidentyfikowany model dynamiczny przekładni zębatej w układzie napędowym jako podstawa projektowania. Katowice-Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2001.
- 10. Łazarz B., Madej H., Wilk A., Figlus T., Wojnar G. Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych. Katowice-Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2006.
- 11. Łazarz B., Wojnar G. Detection of Early Stages of Pinion Tooth Chipping in Transmission Gear. Machine Dynamics Problems 2003; 27(3): 23-34.

- 12. Łazarz B., Wojnar G. Model dynamiczny układu napędowego z przekładnią zębatą. XVII Ogólnopolska Konferencja PRZEKŁADNIE ZĘBATE, Węgierska Górka 2000: 101-108.
- 13. Łazarz B., Wojnar G., Czech P. Wibrometria laserowa i modelowanie-narzędzia współczesnej diagnostyki przekładni zębatych. Katowice-Radom: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2007.
- 14. Madej H. Wykorzystanie sygnału resztkowego drgań w diagnostyce przekładni zębatych. Diagnostyka 2002; 26: 46-52.
- 15. Müller L. Przekładnie zębate dynamika. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1986.
- Sawalhi N., Randall R. B. Simulating gear and bearing interactions in the presence of faults: Part I. The combined gear bearing dynamic model and the simulation of localised bearing faults. Mechanical Systems and Signal Processing 2008; 22(8): 1924-1951.
- 17. Shao Y., Li X., Mechefske K. C., Chen Z. Rear axle gear damage prediction using vibration signal preprocessing coupled with RBF neural networks. Eksploatacja i Niezawodnosc Maintenance and Reliability 2009; 4(44): 57-64.
- 18. Stewart R. M. Some useful data analysis techniques for gearbox diagnostics. Report MHM/R/10/77. Machine Health Monitoring Group. Institute of Sound and Vibration Research. University of Southampton 1977.
- 19. Wang X., Makis V. Autoregressive model-based gear shaft fault diagnosis using the Kolmogorov–Smirnov test. Journal of Sound and Vibration 2009; 327(3-5): 413-423.
- 20. Wang W., Kanneg D. An integrated classifier for gear system monitoring. Mechanical Systems and Signal Processing 2009; 23(4): 1298-1312.
- 21. Wilk A., Łazarz B., Madej H. Metody wczesnego wykrywania uszkodzeń w przekładniach zębatych. Przegląd Mechaniczny 2002, 3: 14-18.
- Wilk A., Łazarz B., Madej H., Wojnar G. Analiza zmian wibroakustycznych symptomów diagnostycznych w procesach zużyciowych kół zębatych. XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2003.
- 23. Wu J. D., Chan, J. J. Faulted gear identification of a rotating machinery based on wavelet transform and artificial neural network. Expert Systems with Applications: An International Journal 2009; 36(5): 8862-8875.

Dr hab. inż. Bogusław ŁAZARZ, Prof. nzw. w Pol. Śl. Dr inż. Grzegorz WOJNAR Dr inż. Piotr CZECH Wydział Transportu Politechnika Śląska Ul. Krasińskiego nr 8, 40-019 Katowice, Polska e-mail: boguslaw.lazarz@polsl.pl, grzegorz.wojnar@polsl.pl, piotr.czech@polsl.pl

ANALIZA STANÓW NIERÓWNOWAGOWYCH W PROCESIE SEPARACJI SITOWEJ

ANALYSIS OF NONEQUILIBRIUM STATES IN THE SIEVE SEPARATION PROCESS

Proces separacji sitowej można potraktować jako pewnego rodzaju doświadczenie losowe, w którym to czy cząstka (o wielkości mniejszej od wielkości separacyjnej sita) w danym miejscu na sicie przejdzie przez jego szczelinę określamy za pomocą prawdopodobieństwa. Inaczej można powiedzieć, że podczas klasycznej separacji sitowej istnieją obszary na sicie, dla których prawdopodobieństwo separacji jest większe, no i obszary z mniejszą miarą prawdopodobieństwa. Jeśli założymy, że proces separacji przebiega stabilnie w aspekcie czynników zewnętrznych, to można powiedzieć, że wartości wspomnianych prawdopodobieństw w danych obszarach nie ulegają zasadniczym zmianom. Niewielkie odchylenia od wartości średnich nazywamy fluktuacjami i są one zjawiskiem zupełnie normalnym. Jednakże, jeśli warunki zewnętrzne (np. zmiana składu granulometrycznego nadawy, zmiana kąta nachylenia powierzchni sita itp.) ulegną zmianie, to zmienić się powinna również konfiguracja opisanych wyżej prawdopodobieństw.

Słowa kluczowe: proces separacji, sito żaluzjowe, materia granulowana.

The process of sieve separation might be treated as some kind of random experience, in which the fact that a particle (of a size smaller than the sieve separation size) will pass through its slot in a given place, is to be determined by probability. It could be alternatively said that during classic sieve separation, there are areas at the sieve for which the probability of separation is higher and, in consequence, areas with the lower probability measure. If we assume that the separation process runs stable in regard of the external conditions, then we could say that values of the mentioned probabilities in given areas are not varying significantly. Relatively small deviations from average values are called fluctuations, and are considered to be perfectly normal. However, when the external conditions (e.g. a change in the granulometric composition of a mechanically fed material, a change in the sieve inclination, etc.) are changing, then the configuration of the above mentioned probabilities should also change.

Keywords: process of separation, slotted sieve, granulated matter.

1. Wprowadzenie

Separacja materiałów granulowanych jest jednym z podstawowych procesów występujących w przemyśle: górniczym, farmaceutycznym, chemicznym, rolno-spożywczym i wielu innych. Proces separacji dotyczy materii granulowanej składającej się z co najmniej dwóch zbiorów cząstek zróżnicowanych geometrycznie. Procesy separacji możemy generalnie podzielić na proste i złożone. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z rozdziałem mieszaniny na dwie frakcje na jednaj płaszczyźnie sitowej. W separacji złożonej liczba płaszczyzn separacyjnych jest większa, a proces separacyjny może być realizowany w układzie szeregowym, równoległym lub mieszanym [2].

W literaturze przedmiotu podejmowano wiele prób ujęcia procesu separacyjnego w ramy matematyczne [5, 6, 7, 8]. Najczęściej stosowany jest deterministyczny opis układu sitocząstka, gdzie analizuje się współzależność częstości drgań sita i jego amplitudy na ruch cząstki na powierzchni sita. Ten stosunkowo prosty sposób odwzorowania procesu został niezwykle mocno rozwinięty i szeroko stosowany w podczas konstruowania ustrojów separacyjnych [13, 14]. Niedostatek wiedzy dla takiego modelu uzupełniano w kolejnych pozycjach książkowych danymi empirycznymi w postaci różnego rodzaju nomogramów, które w praktyce inżynierskiej są niezwykle użyteczne.

Można sobie w tym momencie zadać proste pytanie: czy możliwy jest inny sposób opisu materii granulowanej poddanej separacji na sicie? Jeśli wyjdziemy od natury procesu separa-

1. Introduction

Separation of granulated materials is one of the basic processes performed in industries such as: mining, pharmaceutical, chemical, food and agriculture, and many others. The process of separation concerns granulated matter composed of at least two particle sets varying geometrically. In general, the separation processes could be divided to simple and complex ones. In the first case we are dealing with dividing a mixture into two fractions at one sieve plane. In complex separation the number of separation planes is higher and the process of separation may be conducted in the series, parallel or mixed arrangements [2].

Numerous attempts of defining the separation process mathematically have been undertaken in the subject bibliography [5,6,7,8]. Most frequently a deterministic description of the sieve-particle system is applied, where the correlation of sieve vibration frequency and its amplitude at the move of a particle at the sieve surface is analysed. That relatively simple method of a process representation has been extensively developed and widely used in designing of separation structures [13,14]. Lack of knowledge for such a model was supplemented in the subsequent publications with empiric data in the form of various nomograms, extremely useful in the engineering practice.

A simple question could be asked at that time: is another description of granulated matter being separated at sieve possible? If we consider the nature of a separation process, then we easily state that attempts of deterministic generalization will cyjnego, to łatwo stwierdzimy, że próby deterministycznego uogólnienia nigdy nie dadzą możliwie dokładnego opisu. Separacja, podobnie jak rzut kostką do gry, jest klasycznym przykładem doświadczenia losowego, a jego wynik możemy uznać za realizację zmiennej losowej. Losowość analizowanego procesu powinna nas skłonić do poszukiwania opisu, który odejdzie od determinizmu, co słusznie podkreśla D. Dudek w pracy [1].

Proces separacyjny w danej chwili czasu t możemy w sposób makroskopowy scharakteryzować poprzez podanie kilku parametrów, wśród których najważniejszymi są czystość oraz straty frakcji podsitowej. Wartość tych parametrów jest ściśle skorelowana z warunkami zewnętrznymi procesu. Jeśli spojrzymy na proces poprzez pryzmat statystyczny, to stan procesu w danej chwili czasu t jest odwzorowany poprzez konfigurację zdarzeń na sicie polegających na separacji cząstek. Probabilistyczna interpretacja takiego stanu rzeczy w odniesieniu do pojedynczej cząstki znajdującej się na sicie pozwala nam dostrzec proces w skali "mikro". Można tu dostrzec analogie do gazu, dla którego stan makroskopowy opisany za pomocą pewnych parametrów (ciśnienie, objętość) można odwzorować poprzez mikroskopową analizę ruchu pojedynczych cząstek. W niniejszym artykule podjęto próbę przeanalizowania stanu procesu separacyjnego w układzie nierównowagowym, gdy przynajmniej jeden z istotnych czynników zewnętrznych ulega zmianie. Do analizy wykorzystano entropię statystyczną, jako funkcję stanu procesu.

2. Wprowadzenie do teorii pól losowych

W klasycznej teorii rachunku prawdopodobieństwa zajmujemy się badaniem zmiennych losowych X, to znaczy taki kich funkcji, które przyporządkowują zdarzeniom elementarnym $\omega \in \Omega$ układ *n* liczb $(x_p x_2,...,x_n) \in \mathbb{R}^n$. Inaczej można powiedzieć, że realizacjami zmiennej losowej X są układy *n* liczb.

Często rozważa się zmienną losową X(t), gdzie t jest pewnym parametrem jedno lub wielowymiarowym. Rozważa się więc pewnego rodzaju funkcje losowe X(t), $t \in T$, gdzie T jest zbiorem wartości parametru t. Opisuje się w ten sposób przebieg pewnego procesu losowego (docelowo separacyjnego) przyjmującego wartości w R^n . Funkcja X(t) będzie w dalszym toku określana mianem funkcji losowej. W przypadku szczególnym, jeśli X(t) przyjmuje wartości z R^1 i $t \in R^1$, to taka funkcja opisuje proces stochastyczny. Jeśli zaś X(t) przyjmuje wartości z R^1 , a $t \in R^n$, to funkcja losowa nosi nazwę pola losowego *n*-wymiarowego [16, 17].

Proces stochastyczny (pole losowe) możemy również zdefiniować jako funkcję określoną na przestrzeni zdarzeń elementarnych, której wartościami są funkcje rzeczywiste zmiennej rzeczywistej, to znaczy $X(t) = X(\omega, t)$. Dla ustalonej wartości t_0 wartość procesu (pola losowego) $X(\omega, t_0)$ jest zmienną losową. Realizacją procesu stochastycznego (pola losowego) nazywamy wartość $X(\omega_0, t)$ procesu dla ustalonego zdarzenia elementarnego $\omega_0 \in \Omega$.

Wartości parametru t mogą mieć charakter ciągły lub dyskretny. W przypadku wartości dyskretnych proces X(t) nazywany bywa w literaturze łańcuchem stochastycznym.

3. Pojęcie wektora losowego

Niech będzie dana przestrzeń probabilistyczna (Ω ,A,P). Wektorem losowym lub *n*-wymiarową zmienną losową nazywamy funkcję:

never give a possibly exact description. Separation, similarly as a cube throw, is a classic example of a random experience, and its result may be considered as realisation of a random variable. Randomness of the analyzed process should direct us for seeking a description, which will depart from determinism, as justly stressed by D. Dudek in work [1].

In a given moment in time t the separation process may be characterised macroscopically by providing several parameters, where the most important among them are purity and loss in the sub-sieve fraction. Value of these parameters is tightly correlated with external conditions of the process. If we look at the process statistically, then the state of the process at a given instant t is represented by configuration of events at a sieve consisting in particle separation. Probabilistic interpretation of such a status in relation to a single particle at a sieve enables us to see the process in the "micro" scale. An analogy to gas can be seen here, for which the macroscopic state described using certain parameters (pressure, volume) may be represented through microscopic analysis of single particles move. In the article, an attempt of analyzing the separation process in the nonequilibrium state was undertaken, when at least one of the essential external conditions is changing. Statistical entropy as a function of the process state has been used for analysis.

2. Introduction into the random field theory

In the classical theory of probability we study random variables X, i.e. such functions, which assign the elementary event $\omega \in \Omega$ with a system of n numbers $(x_r, x_2, ..., x_n) \in \mathbb{R}^n$. In other words, we can say that the realizations of random variable X are systems of n numbers.

Frequently a random variable X(t) is being considered, where *t* is a certain one- or multidimensional parameter. Thus, random functions of a certain type X(t), $t \in T$ are considered, where *T* is a set of the *t* parameter values. That way a course of certain random process (separation) assuming values within R^n is being described. The X(t) function will be called further a random function. In the particular case, if X(t) assumes values from R^1 and $t \in R^1$, then such function defines a stochastic process. However, if X(t) assumes values from R^1 , and $t \in R^n$, then the random function is called a random *n*-dimension field [16, 17].

Stochastic process (random field) may also be defined as a function determined at the elementary event space, the values of which are real-valued functions of the real variable, that means $X(t) = X(\omega, t)$. For the fixed value t_0 the value of process (random field) $X(\omega, t_0)$ is a random variable. Realization of a stochastic process (random field) is the value $X(\omega_0, t)$ of a process for the fixed elementary event $\omega_0 \in \Omega$.

Values of the *t* parameter may be continuous or discrete in character. In case of discrete values the process X(t) is frequently being called in publications a stochastic chain.

3. A concept of random vector

Let be given the probabilistic space (Ω, A, P) . A random vector, or the *n*-dimensional random variable is a function:

$$X: \Omega \to \mathbb{R}^n, \quad n \ge 2 \tag{1}$$

Tak zdefiniowany wektor losowy można również zapisać w postaci ciągu *n* jednowymiarowych zmiennych losowych:

$$X_i: \Omega \to R, \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

które spełniają dla każdego zdarzenia elementarnego $\omega \in \Omega$ warunek:

$$X_{i}(\omega) = x_{i}, \quad i = 1, 2, ..., n$$
 (3)

Zmienne losowe X_i (i = 1,2,...,n) nazywa się składowymi wektora losowego. Rozkład wektora losowego jest łącznym rozkładem jego zmiennych losowych X_i , natomiast rozkłady poszczególnych jego składowych są określane mianem rozkładów brzegowych [4].

4. Entropia

Przyjmijmy, że mamy do czynienia z dyskretnym i skończonym układem prawdopodobieństw p_i , gdzie indeks i = 1, 2, ..., n. Miarę niepewności rozkładu oznaczmy przez $S_n(p_1, p_2, ..., p_n)$. Załóżmy przede wszystkim, że jest to funkcja ciągła. Jeżeli wszystkie wielkości p_i , z wyjątkiem jednej, są równe zeru, wtedy nie mamy żadnej niepewności i wówczas:

$$S_n(1,0,...,0) = S_n(0,1,...,0) = ... = S_n(0,0,...,1) = 0$$
 (4)

W szczególności, w warunkach najmniej określonych, gdy wszystkie prawdopodobieństwa są identyczne, niepewność jest maksymalna:

$$S_n(p_1, p_2, \dots, p_n) \le S_n\left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right) \equiv S_{\max}(n)$$
(5)

Opisane wyżej niektóre własności pozwalają jednoznacznie określić postać funkcji niepewności rozkładu:

$$S_n(p_1, p_2, ..., p_n) = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$
(6)

z dokładnością do ogólnej multiplikatywnej stałej, którą możemy ukryć pod postacią podstawy logarytmu. Wielkość S_n (6) zapisana jest w literaturze pod nazwą twierdzenia Shannona i nosi nazwę entropii informacyjnej [12,15]. Wyraża ona ilościowo niepewność jaka zawarta jest w rozkładzie prawdopodobieństwa p_i .

5. Stan procesu separacyjnego

Proces separacji możemy potraktować jako doświadczenie losowe, którego celem jest "wylosowanie" cząstek mniejszych od wielkości podziałowej sita (wielkość oczka sitowego, szczeliny sita w sitach żaluzjowych) z mieszaniny ziarnistej. Na powierzchni sita możemy zdefiniować dwuwymiarową zmienną losową, która będzie związana z ilością "wylosowanych" cząstek w danym miejscu na sicie. Tak określoną zmienną losową możemy przedstawić w postaci wektora losowego:

$$(X,Y): \Omega \to R^2 \tag{7}$$

gdzie: (X, Y) wektor losowy związany z realizacją procesu separacyjnego odpowiednio na długości sita (X) i jego szerokości (Y). Graficznie postać takiego wektora losowego przedstawiono na rys. 1.

$$X: \Omega \to \mathbb{R}^n, \quad n \ge 2 \tag{1}$$

A random vector defined that way may also be written in a form of a sequence of *n* one-dimensional random variables:

$$X_i: \Omega \to R, \quad i = 1, 2, \dots, n$$
 (2)

fulfilling for each elementary event $\omega \in \Omega$ the condition:

$$X_i(\omega) = x_i, \quad i = 1, 2, ..., n$$
 (3)

Random variables X_i (i = 1, 2, ..., n) are called components of a random vector. Decomposition of a random vector is a joint decomposition of its random variables X_i , and decompositions of its particular components are called the marginal distributions [4].

4. Entropy

Let's assume that we deal with discrete and finite system of probabilities p_i , where the index i = 1, 2, ..., n. Let's mark the measure of decomposition uncertainty by $S_n(p_1, p_2, ..., p_n)$. But first of all, let's assume that this is a continuous function. If all quantities p_i , except for the one, are equal zero, then we have no uncertainty and then:

$$S_n(1,0,...,0) = S_n(0,1,...,0) = ... = S_n(0,0,...,1) = 0$$
 (4)

In particular, in the least determined conditions, when all probabilities are identical, the uncertainty assumes the maximum value:

$$S_n(p_1, p_2, ..., p_n) \le S_n\left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, ..., \frac{1}{n}\right) \equiv S_{\max}(n)$$
 (5)

Some of the properties described above enable unequivocal determination of the distribution uncertainty function form:

$$S_n(p_1, p_2, ..., p_n) = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$
(6)

with the accuracy to the general multiplicative constant, which could be hidden under the form of a radix. The quantity S_n (6) has been recorded in the literature as the Shannon theorem, and is named the information entropy [12,15]. It expresses quantitatively the uncertainty contained in the probability distribution p_r .

5. Separation process state

A separation process might be treated as random experience, the aim of which is "sampling" of particles smaller than the sieve scale (size of a sieve mesh, a gap in the blade sieves) from a grained mixture. At a sieve surface we can define a two-dimensional random variable, to be related to the number of "sampled" particles in a given sieve location. A random variable determined that way may be presented in the form of a random vector:

$$(X,Y): \Omega \to R^2 \tag{7}$$

where: (X, Y) a random vector related to accomplishing the separation process at the sieve length (X) and its width (Y). Graphic form of such random vector is presented in fig. 1.



Rys. 1. Wektor losowy na sicie związany z prawdopodobieństwem $P(x_p y_j) = p_{ij}$ separacji cząstek na powierzchni opisanej współrzędnymi $(x_p y_j)$ *Fig. 1. Random vector at sieve related to probability* $P(x_p y_j) = p_{ij}$ of separating particles at surface defined by co-ordinates $(x_p y_j)$

Stan procesu separacyjnego w danej chwili czasu *t* możemy opisać za pomocą rozkładu wektora losowego zmiennej losowej (X,Y). Pojawia się jednak pewna trudność. Jeśli dwuwymiarowa zmienna losowa ma charakter dyskretny, to taki opis sprowadza się do tablicy wartości p_{ij} o wymiarze $X \times Y$. W przypadku dwuwymiarowej zmiennej losowej ciągłej sprawa komplikuje się jeszcze bardziej, ponieważ łączną wartość prawdopodobieństwa możemy opisać za pomocą dwuwymiarowej funkcji gęstości prawdopodobieństwa f(x,y). Z uwagi na zmieniające się warunki realizacji procesu parametry takiej funkcji są wartościami chwilowymi (zmieniającymi się w czasie).

Stan procesu separacyjnego możemy wyrazić w prostszy sposób poprzez wyznaczenie miary entropii informacyjnej Shannona, która agreguje wartości łącznego prawdopodobieństwa dwuwymiarowej zmiennej losowej. W przypadku procesu separacji wygodnie jest przyjąć, że mamy do czynienia ze zmienną losową dwuwymiarową dyskretną. Ma to też uzasadnienie fizyczne – separowane cząstki mają skończone wielkości ziaren, stąd nie ma potrzeby przechodzenia w granicy do przedziału separacyjnego o szerokości nieskończonej. Entropia dla tak określonej dwuwymiarowej zmiennej losowej (7) może być zapisana w postaci formuły:

$$S = -\sum_{i} \sum_{j} p_{ij} \log p_{ij} \tag{8}$$

Maksymalna wartość entropii odpowiada stanowi, w którym wartość prawdopodobieństwa separacji cząstek w każdym miejscu na powierzchni sita jest jednakowa. Zróżnicowanie prawdopodobieństw skutkuje zmniejszeniem wartości entropii i w granicy S = 0 jeśli tylko w jednym miejscu na sicie $p_{ij} = 1$. Oczywiście i jeden i drugi z opisanych przypadków w praktyce nie mają miejsca z uwagi na mnogość czynników, które mają wpływ na rozkład prawdopodobieństwa separacyjnego.

W mechanice statystycznej z procesami równowagowymi mamy do czynienia wówczas gdy spełnione jest równanie różniczkowe:

$$\frac{dS}{dt} = 0 \tag{9}$$

Inaczej mówiąc zmiana wartości entropii (8) w odniesieniu do zmiany czasu określa zmianę stanu procesu separacyjnego. Procesy o charakterze równowagowym są tylko i wyłącznie treścią niniejszej teorii, w praktyce czynniki zewnętrzne State of a separation process in the instant *t* may be described by random vector decomposition of the random variable (X, Y). However, a difficulty arises here. If a two-dimension random variable is discrete in its character, then such description is brought to a table of p_{ij} values of the $X \times Y$ size. In case of a continuous random variable the issue is even more complicated, as the total value of probability may be described by a two-dimensional probability density function f(x,y). Considering the changing conditions of the process the parameters of such function are the instantaneous values (changing in time).

A state of separation process may be expressed in a simpler way by determining the measure of the Shannon information entropy, aggregating the values of total probability of a two-dimensional random variable. In case of a separation process it is comfortable to assume that we deal with a discrete two-dimensional random variable. It has also physical justification – the separated particles have finite grain sizes, thus there is no need to pass in the limit to a separation range of unlimited width. Entropy for such defined two-dimension random variable (7) may be written in the form of:

$$S = -\sum_{i} \sum_{j} p_{ij} \log p_{ij} \tag{8}$$

Maximum entropy value correspond to a state, in which the value of particles separation probability is equal for each location of the sieve surface. Differentiation in probabilities results in drop in the entropy value, and at the limit S = 0, if only in one sieve location $p_{ij} = 1$. Of course, the first and the second of the discussed cases have no place in practice, as there is a set of factors influencing the separation probability distribution.

In the statistical mechanics we encounter the equilibrium processes when the differential equation is fulfilled:

$$\frac{dS}{dt} = 0 \tag{9}$$

In other words, entropy value change (8) in relation to time change determines a state change in the separation process. That theory deals exclusively with equilibrium type processes,

wpływają na przebieg procesu separacji i zaburzają wspomnianą równowagę.

6. Analiza stanów nierównowagowych w warunkach zmiany kąta nachylenia sita

Kąty nachylenia powierzchni (wzdłużny i poprzeczny do kierunku ruchu separowanych czastek) sita sa jednym z tych czynników, które decydują o przebiegu procesu separacji i o jego jakości. Zmiany wartości tych kątów wpływają na stan procesu, który możemy określić za pomocą miary entropii statystycznej.

Do analizy doświadczalnej przebiegu procesu rozdziału mieszaniny ziarnowej wykorzystano stanowisko pomiarowe (rys. 2). Główną częścią składową wymienionego stanowiska jest sito żaluzjowe. Sito wyposażone jest w mechanizm regulacyjny ustawienie kąta pochylenia żaluzji, dzięki czemu uzyskuje się szczelinę roboczą sita w zakresie od 0 do 8 mm. Konstrukcja kosza sitowego umożliwia ustawienie kąta nachylenia poprzecznego i wzdłużnego powierzchni sita w granicach 0 - 15°.

Stanowisko badawcze umożliwiało symulację pracy sita w różnych warunkach (oznaczenia katów roboczych: α - kat nachylenia poprzecznego sita, β - kąt nachylenia wzdłużnego sita): - $\alpha = 0^{\circ}$, $\beta = 0^{\circ}$ - sito w poziomie,

- $\alpha = 5^{\circ}, 10^{\circ}$ i $15^{\circ}, \beta = 0^{\circ}$ nachylenie poprzeczne $5^{\circ}, 10^{\circ}$ i $15^{\circ}, 10^{\circ}, 10^{\circ}$ i $15^{\circ}, 10^{\circ}, 10^{\circ}$ i $15^{\circ}, 10^{\circ}, 10^{\circ}, 10^{\circ}, 10^{\circ}$ i $15^{\circ}, 10^{\circ}, 10^{\circ}$
- $\alpha = 0^{\circ}$, $\beta = 5^{\circ} 10^{\circ}$ i 15° nachylenie wzdłużne 5°, 10° i 15°.

as in practice the external factors influence the separation process course and disturb the mentioned equilibrium.

6. Analysis of nonequilibrium states in the variable sieve inclination angle conditions

Sieve surface inclination angles (longitudinal and transverse to the separated particles move direction) are one of those factors, which decide on the separation process run and on its quality. Changes in the angle value influence the process state, which can be determined by the measure of statistical entropy.

For the experimental analysis of grain mixture separation process a measurement stand was used (fig. 2). Main part of the mentioned stand is a blade sieve. It is equipped with adjustment mechanism for blade inclination angle change, due to which a working slot width within 0 to 8 mm range is achieved. Structure of the sieve basket enables adjustment of the longitudinal and transverse sieve surface inclination angle within the range of $0 - 15^{\circ}$.

Research stand enabled simulation of the sieve operation in various conditions (working angle markings: α - transverse sieve inclination angle, β - longitudinal sieve inclination angle):

- $\alpha = 0^{\circ}$, $\beta = 0^{\circ}$ sieve levelled,
- α =5°,10° i 15°, β =0° transverse inclination 5°,10° and 15° .
- $\alpha = 0^{\circ}$, $\beta = 5^{\circ} 10^{\circ}$ i 15° longitudinal inclination 5° , 10° and 15° .



- *Rys.* 2. Schemat kinematyczny stanowiska badawczego: 1 układ zawieszenia, 2 sito, 3 – przeciwwaga, 4 – wał napędowy, 5 – silnik elektryczny, 6 – słupek ustalający kąt ustawienia ramy [5]
- Fig. 2. Kinematic diagram of the test stand: 1 suspension system, 2 sieve, 3 counterbalance, 4 - drive shaft, 5 - electrical motor, 6 - a post fixing the frame inclination angle [5]



- Rys. 3. Sposób podziału (i oznaczeń) sekcyjnego elementu dyskretnego na strefy pomiarowe
- Fig. 3. Partition (and markings) of the sectional discrete element into measurement zones

Do napędu zespołu wykorzystano silnik elektryczny, którego prędkość obrotowa była sterowana bezstopniowo za pomocą przemiennika częstotliwości. Dało to możliwość precyzyjnego doboru parametrów kinematycznych elementów czynnych zespołu.

Podczas wykonywania prób zmieniano ustawienia kątów nachylenia powierzchni sita α , β oraz dokonywano pomiaru masy przesianej w określonych strefach pomiarowych (3) oraz prowadzono pomiar czasu trwania procesu *t*. Podstawowy przyrząd pomiarowy stanowiła waga laboratoryjna o wysokiej klasie dokładności. Wszystkie pomiary wykonano przy stałym (optymalnym dla danego materiału) otwarciu żaluzji sitowych oraz ustalonych kinematycznych warunkach pracy całego zespołu czyszczącego [3, 5, 9, 10, 11].

Aby uniezależnić się od czynników niekontrolowanych (zmienna wilgotność materiału czyszczonego w czasie trwania badań, różny stopień zanieczyszczeń zmieniający się zgodnie z pewnym gradientem) przyjęto układ eksperymentu całkowicie stochastyczny, w którym o kolejności pomiarów (dla poszczególnych ustawień kątów) zadecydował generator liczb losowych.

7. Wyniki badań. Dyskusja

Badania przeprowadzono na materiale biologicznym (ziarno zbóż), w każdym przypadku zmiany nachylenia zespołu czyszczącego mierzono masę separowanych cząstek w 50 punktach pomiarowych pod sitem (rys. 3). Uzyskane wyniki posłużyły do estymacji prawdopodobieństwa realizacji procesu w punktach pomiarowych (estymacja w oparciu o wartość częstości). Obliczone wartości prawdopodobieństw dla poszczególnych kątów nachylenia zespołu czyszczącego wykorzystano do wyznaczenia parametru stanu procesu – entropii (wg zależności 8). Wyniki badań zestawiono w tabeli 1.

Graficzną ilustrację otrzymanych wartości entropii przedstawiono na rys. 4. Łatwo zauważyć, że wartość entropii ściśle koresponduje ze zmianami kąta nachylenia kosza sitowego. Największy spadek wartości entropii następuje dla nachyleń powyżej 10°. W takim przypadku mamy również do czynienia z dużymi stratami cząstek, których wymiary są mniejsze niż wymiar separacyjny sita.

Dla kątów nachylenia poprzecznego 0° oraz 2,5° widoczny jest wzrost wartości entropii przy wzroście kąta nachylenia wzdłużnego do 5°. Taki wynik potwierdza wzrost skuteczności zespołu czyszczącego przy takich wartościach kątów nachylenia poprzecznego (są to zazwyczaj wartości kątów przyjętych podczas konstruowania zespołu czyszczącego). An electrical motor was used for the assembly driving, the rotational speed of which was controlled step-less, using the frequency converter. It enabled precise selection of kinematic parameters for the active parts of the system.

During tests the α , β sieve surface inclination angles were changed, measurements of sieved mass in the defined measurement zones were performed (3), and the process duration time *t* was measured. Basic measuring instrument was a laboratory weight of a high accuracy class. All measurements were made at the constant (optimal for a given material) blade opening and fixed kinematic operation conditions for the whole purifying assembly [3, 5, 9, 10, 11].

In order to eliminate the influence of uncontrolled factors (variable humidity of the cleaned material during tests, various degree of impurities changing according to a certain gradient), a fully stochastic experiment arrangement was adopted, in which a random number generator determined the sequence of measurements (for particular inclination angles).

7. Test results. Discussion

The tests were performed at biological material (corn grains), where in each case of the purifying assembly inclination a mass of the separated particles was measured in 50 measuring locations under the sieve (fig. 3). The results obtained were used for estimating probability of the process accomplishment in the measurement locations (estimation based at the frequency value). The calculated probability values for various inclination angles of the purifying system were used for determining the process state parameter – the entropy (according to relationship 8). The test results have been presented in table 1.

Graphic illustration of the obtained entropy values is presented in fig. 4. It is easy to observe that entropy is tightly related to changes in inclination angles of the sieve basket. The highest drop in entropy value takes place for inclinations above 10° . In such a case we also encounter high particle loses, the size of which is smaller than the sieve separation size.

For the transverse inclination angles equal to 0° and 2,5° an increase in entropy value is visible at an increase of the longitudinal inclination angle to 5°. Such result confirms an increase in effectiveness of the purifying assembly at these transverse inclination angles (usualy they are angles assumed at the stage of designing the purifying assembly).

Angle <i>α</i> [°] Angle β [°]	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
0,0	3,350	3,284	3,241	3,211	3,172	3,053	3,038
2,5	3,389	3,297	3,230	3,208	3,165	3,031	3,025
5,0	3,421	3,292	3,200	3,187	3,163	3,026	3,020
7,5	3,287	3,192	3,154	3,151	3,148	2,974	2,932
10,0	3,176	3,183	3,143	3,141	3,137	2,911	2,883
12,5	3,087	3,065	3,041	3,034	3,031	2,865	2,745
15,0	2,972	2,963	2,943	2,928	2,922	2,711	2,679

 Tab. 1.
 Wartości entropii Shannona dla procesu separacji zdeterminowanego kątami nachylenia zespołu czyszczącego

 Tab. 1.
 The Shannon entropy values for separation processs determined by the purifying assembly inclination angles



Rys. 4. Wartości entropii Shannona dla różnych wartości kątów nachylenia wzdłużnego (oś pozioma) i kątów nachylenia poprzecznego (legenda) kosza sitowego

8. Podsumowanie

Wartość entropii może być uznana jako parametr stanu w procesie separacyjnym. Jest ona ściśle związana ze skutecznością separacji cząstek na powierzchni sita. Entropia może być obliczona tylko wówczas jeśli potraktujemy proces separacji na równi z doświadczeniem losowym, w którym na sicie losujemy cząstki o wymiarze mniejszym niż wymiar separacyjny sita. Wektor losowy w określonym miejscu na powierzchni sita można estymować w oparciu o wartość wskaźnika częstości.

Entropia, jako parametr stanu jest funkcją czasu, w aspekcie zmiennych warunków separacyjnych. Jeśli warunki realizacji procesu byłyby ustalone to wartość opisywanego parametru entropii powinna być stała ($S(t) = const \Rightarrow \frac{dS}{dt} = 0$). Rozkład

powinna być stała (
$$S(t) = const \Rightarrow \frac{ds}{dt} = 0$$
). Rozkłać

prawdopodobieństwa dla dowolnego stanu nierównowagowego różni się od rozkładu w równowadze podaniem pewnych parametrów dodatkowych, tzn. dokładniejszą znajomością odpowiednich wielkości fizycznych. Dzięki temu można powiedzieć, że niezrównoważone zespoły statystyczne zawierają więcej informacji o układzie (procesie) niż równowagowe i na tym polega główna różnica między nimi. Jednakże zespołom nierównowagowym zawsze odpowiada mniejsza entropia niż równowagowym.

Przedstawiona w artykule zmiana warunków nachylenia kosza sitowego zmienia stan procesu, a co za tym idzie wpływa na wartość entropii. W szczególności:

- zmiana kąta nachylenia wzdłużnego sita do wartości ok. 5° wpływa korzystnie na wartość entropii oraz (co potwierdzono empirycznie) na skuteczność separacji cząstek;
- zmiana kąta nachylenia poprzecznego (względem kierunku ruchu separowanych cząstek) w sposób niekorzystny zmienia wartość entropii;
- wysokie wartości kątów nachylenia w sposób drastyczny powodują obniżenie wartości entropii oraz skuteczności procesu separacyjnego.

Obserwowana podczas eksperymentu zmiana skuteczności procesu separacyjnego determinuje wzrost strat cząstek, a co za tym idzie wzrost zanieczyszczenia frakcji nadsitowej.

8. Summary

Value of entropy may be considered as a state parameter in the separationprocess. It is closely related with the particles separation effectiveness at the sieve surface. Entropy may be calculated only when we treat the separation process equally to the random experience, in which particles of a size smaler than the sieve separation size are being sampled. A random vector at a determined location of a sieve surface may be estimated basing at the frequency factor value.

Entropy, as a parameter of the state is a function of time, when the changing separation conditions are considered. If the process conditions could be fixed, then the value of that entropy

parameter should be constant (
$$S(t) = const \Rightarrow \frac{dS}{dt} = 0$$
). Distri-

bution of probability for any nonequilibrium state differs from the distribution in equilibrium state by providing certain additional parameters, i.e. better aquaintance of the proper physical quantities. Due to that, it can be said that the unequilibrium (unbalanced) statistic assemblies contain more information on the system (process) than the equilibrium ones, and that constitutes the main difference between them. Howwever, always the less entropy corresponds to the unequilibrium ones.

The change in the sieve basket inclination conditions presented in the article changes the process state, thus influencing the entropy value. In particular:

- a change in the longitudinal inclination angle of the sieve to about 5° positively influences the entropy value, and (what was confirmed empirically) the effectiveness of particles separation;
- a change in the transverse inclination angle (in relation to the move direction of the separated particles) negatively influences the entropy value;
- high values of inclination angles drastically reduce the entropy value and the separation process effectiveness.

A change in separation process effectiveness observed in the experiment determines the increase in particle loses, and in consequence, an increase in the impurity of the over-sieve fraction.

Fig. 4. The Shannon entropy values for various longitudinal inclination angles (horisontal axis) and transverse inclination angles (legend) of the sieve basket

9. References

- 1. Augustynowicz J., Dudek D., Rezonans threats in basic maschine structures. III International Congres "Brown coal mining", Bełchatów, 2002.
- 2. Bieniek J., Banasiak J., Lewandowski B., Detyna J. 2001: Analysis of a sectional blade sieve capacity in the variable inclination conditions. Agricultural Engineering 2001; 1: 27-32.
- Bieniek J., Banasiak J., Lewandowski B., Detyna J. 2001: Wheat grain purifying results in the simulated conditions of sectional sieve inclination. Agricultural Engineering 2001; 12: 39-43.
- 4. Bobrowski D., Probabilistics in engineering applications. Warszawa: WNT, 1986.
- 5. Detyna J., Analysis of Influence of the Geometry of Blade Sieve on the Course of the Grain Cleaning Process in Combine Harvester. PhD Thesis, Wrocław 2000.
- Detyna J., Bieniek J., Methods of Statistical Modeling in the Process of Sieve Separation of Heterogeneous Particles. Applied Mathematical Modeling 2008; 6 (32): 992-1002; Elsevier.
- Detyna J., Bieniek J., Banasiak J., Selected Constructional Aspects of Sectional Sieves with Variable Geometry, Destined for Combines-Harvesters. Systems 2004; 2(8): 141-152.
- 8. Detyna J., Bieniek J., Banasiak J., Lewandowski B., Clearing the Grain on Adjustable Section Sieve under Changeable Inclination Conditions. Operation and Reliability 2002; 3(15): 43-48.
- 9. Detyna J., Bieniek J., Banasiak J., Current issues relating to the use of agricultural machinery. Eksploatacja i Niezawodnosc Maintenance and Reliability 2002; 2(14): 63-72.
- Detyna J., Bieniek J., Banasiak J., The influence of the slope on the process sieve separation in the combine harvester to the class of grain. Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability 2004; 3(23): 33-39.
- 11. Detyna J., Bieniek J., Banasiak J., The state of tension and internal friction of material being sieved as the determinants of forceful sieve separation process. Eksploatacja i Niezawodnosc Maintenance and Reliability 2003; 4(20): 71-78.
- 12. Nowak R., Statystyka dla fizyków. Warszawa: Wyd. Naukowe PWN, 2002.
- 13. Rusiński E., Czmochowski J., Kowalczyk M., Construction of diagnostic models of the states of developing fault for working parts of the multi-bucket excavator. Eksploatacja i Niezawodnosc Maintenance and Reliability 2009; 2(42): 17-24.
- Rusiński E., Harnatkiewicz P., Bobyr M., Yakhno B., Caterpillar drive shaft damage causes analysis. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2008; 3(8): 117-130.
- 15. Shannon C. E., A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal 1948; 27.
- 16. Szczepankiewicz E., Zastosowania pól losowych. Warszawa: PWN, 1985.
- 17. Zubrzycki S., Remarks on Random, Stratified and Systematic Sampling in a Plane. Colloquium. Mathematicum 1958; 6: 251-264.

Prof. dr hab. inż. Jerzy DETYNA

Wrocław University of Technology Institute of Materials Science and Mechanical Engineering Smoluchowskiego 25, 50-379 Wrocław, Poland e-mail: jerzy.detyna@pwr.wroc.pl **Uwaga:** Poprawne cytowanie publikacji ukazujących się w naszym Kwartalniku ze względu na wymogi baz bibliograficznych powinno zawierać pełną dwujęzyczną nazwę bez polskich znaków diakrytycznych, tj.

Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability.

In accordance with the requirements of citation databases, proper citation of publications appearing in our Quarterly should include the full name of the journal in Polish and English without Polish diacritical marks, i.e., **Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability.**

Kwartalnik Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability - ukazuje się od roku 1999. Idea czasopisma powstała w środowisku Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego, a patronat naukowy nad nim w 2000 roku objęła Polska Akademia Nauk Oddział w Lublinie. Publikowane w Kwartalniku artykuły, zarówno przez naukowców polskich, jak i zagranicznych, prezentują między innymi najnowsze wyniki prac naukowych realizowanych w ramach projektów badawczych finansowanych przez MNiSzW, jak i Unię Europejską. Od początku istnienia czasopisma przyjęto dwujęzyczny charakter prezentacji artykułów (język polski / język angielski), co pozwala na zaprezentowanie wyników badań czytelnikom w kraju, jak i za granicą. Zamieszczane w Kwartalniku prace są recenzowane przez dwóch niezależnych recenzentów – ekspertów w danej dziedzinie naukowej. Długoletnie i regularne ukazywanie się czasopisma, dobra ocena poziomu naukowego oraz spełnienie wymagań formalnych, umożliwiło Wydawcy umieszczenie Kwartalnika na liście czasopism punktowanych przez MNiSzW oraz jego indeksowanie przez czołowe światowe bazy bibliograficzno-abstraktowe. W tym zwłaszcza przez Thomson Reuters Journal Citation Reports (JCR Science Edition) oraz Science Citation Index Expanded (SciSearch®), tworzących tzw. listę filadelfijską. Zakres zagadnień publikowanych w Kwartalniku artykułów obejmuje aspekty naukowe związane z eksploatacją i niezawodnością maszyn, urządzeń i obiektów technicznych, dlatego też zapraszamy do publikacji wyników swoich badań naukowych na łamach naszego czasopisma.

Note:

The Quarterly Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability - has been pu- blished since 1999. The idea of this journal was conceived within the milieu of the Polish Maintenance Society, and, in 2000 the journal was granted scientific patronage by the Polish Academy of Sciences Branch in Lublin. The articles appearing in the Quarterly, authored by both Polish and foreign scientists, report the most recent results of scientific research carried out within the framework of research projects financed by the Polish Ministry of Science and Higher Education and the European Union. Since its early days, the articles in the journal have been printed in Polish and in English, which has made the presented results accessible to national and international readers. The studies published in the Quarterly are reviewed by two independent reviewers, experts in a given scientific field. Due to its long-term and regular appearance, good evaluation of its scientific standard, and fulfillment of formal requirements, the Quarterly has been entered into the list of journals credited with a high impact factor by the Polish Ministry of Science and Higher Education and indexed in leading international citation and abstract databases, including Thomson Reuters Journal Citation Reports (JCR Science Edition) and Science Citation Index Expanded (SciSearch®), which make up the ISI Master Journal List. The range of topics covered by the articles published in the Quarterly includes scientific aspects of maintenance and reliability of machines, devices, and technical objects. We invite authors to publish the results of their research in our journal.

INFORMATION FOR AUTHORS

Terms and Conditions of Publication:

- The quarterly "Maintenance and Reliability" publishes original papers written in Polish with an English translation.
- Translation into English is done by the Authors after they have received information from the Editorial Office about the outcome of the review process and have introduced the necessary modifications in accordance with the suggestions of the referees!
- Acceptance of papers for publication is based on two independent reviews commissioned by the Editor.

Fees:

- Pursuant to a resolution of the Board of PNTTE, as of 2009 the publication fee for one text is 600 zloty + VAT.
- Coloured graphical elements in the submitted text require agreement from the Editor and are charged extra.

Technical requirements:

- After receiving positive reviews and after acceptance of the paper for publication, the text must be submitted in a Microsoft Word document format.
- Drawings and photos should be additionally submitted in the form of graphical files in the *.tif, *.jpg or *.cdr (v. X3) formats.
- A manuscript should include (in accordance with the enclosed correct manuscript format: *.pdf, *.doc):
- names of authors, title, abstract, and key words that should complement the title and abstract (in Polish and in English)
- the text in Polish and in English with a clear division into sections (please, do not divide words in the text);
- tables, drawings, graphs, and photos included in the text should have descriptive two-language captions,
- if this can be avoided, no formulae and symbols should be inserted into text paragraphs by means of a formula editor
- references (written in accordance with the required reference format)
- author data first names and surnames along with scientific titles, affiliation, address, phone number, fax, and e-mail address
- The Editor reserves the right to abridge and adjust the manuscripts.
- All submissions should be accompanied by a submission form.

Editor contact info: (Submissions should be sent to the Editor's address)

Editorial Office of "Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability"

Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, Poland

e-mail: office@ein.org.pl

INFORMATION FOR SUBSCRIBERS

Fees

Yearly subscription fee (four issues) is 100 zloty and includes delivery costs.

Subscribers receive any additional special issues published during their year of subscription free of charge.

Orders

Subscription orders along with authorization to issue a VAT invoice without receiver's signature should be sent to the Editor's address.

Note

In accordance with the requirements of citation databases, proper citation of publications appearing in our Quarterly should include the full name of the journal in Polish and English without Polish diacritical marks, i.e.,

Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability.

No text or photograph published in "Maintenance and Reliability" can be reproduced without the Editor's written consent.

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



Polska Akademia Nauk Oddział Lublin



scientific supervision: Polish Academy of Sciences Branch in Lublin