

Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn

AI-METH 2017
ZASTOSOWANIA
METOD
SZTUCZNEJ
INTELIGENCJI

Gliwice 2017

Redaktor zeszytów

Wojciech Moczulski

Redaktor techniczny

Marek Wyleżoł

Projekt okładki

Wojciech Cholewa, Marek Wyleżoł

Zeszyt Naukowy Instytutu Podstaw Konstrukcji Maszyn

BibTeX

```
@BOOK{, title = {AI-METH 2017. Zastosowania metod sztucznej
inteligencji}, publisher = {Politechnika Śląska, Instytut Podstaw
Konstrukcji Maszyn}, year = {2017}, author = {}, volume = {149},
series = {Zeszyty Naukowe}, address = {Gliwice}}
```

ISBN 978-83-60759-24-0

Wydawca

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn

Wydział Mechaniczny Technologiczny

Politechnika Śląska

ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice

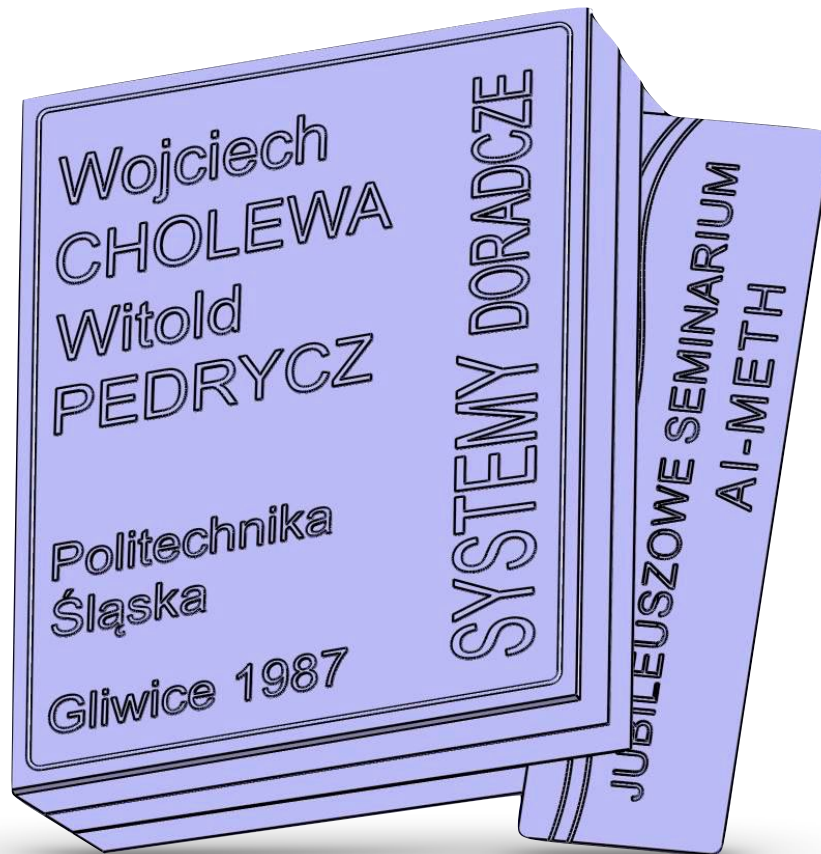
Tel. (32) 237-14-67, fax (32) 237-13-60

<https://ipkm.polsl.pl>

Druk i oprawa (z dostarczonych materiałów)

Repromedia ul. Łużycka 6, 44-100 Gliwice

*Profesorowi Wojciechowi Cholewie, naszemu
Mistrzowi, Przyjacielowi
i niezawodnemu Koledze, z okazji jubileuszu
30-lecia wydania „Systemów Doradczych”
oraz Jego urodzin*



Koncepcja: Anna Bzymek, Wojciech Moczulski
Projekt: Maciej Bojanowski (dobryarchitektwnetrz.pl)
Model wirtualny: Marek Wyleżoł
Wykonanie: Katedra Odlewnictwa Politechniki Śląskiej

Spis treści:

Moczulski W.: Wstęp.....	11
Referaty plenarne	
Batko W.: Niepewność rozpoznań w procesach monitoringu diagnostycznego.....	15
Burczyński T., Kuś W., Maździarz M., Mrozek A.: How design new graphene-like materials using AI methods.....	16
Cholewa W.: Równowaga faktów.....	17
Dąbrowski Z.: Czy można zmierzyć nieliniowe zaburzenie?.....	23
Kiciński J.: Diagnostyka według modelu i zagadnienia odwrotne w dynamice maszyn wirnikowych.....	24
Korbicz J.: Metody obliczeń inteligentnych w diagnostyce procesów dynamicznych.....	25
Kościelny J.M.: Rozmyte wnioskowanie diagnostyczne uwzględniające prawdopodobieństwa <i>a priori</i> uszkodzeń.....	26
Pedrycz W.: Association analysis in data analytics: development of associative memories-architectural, design and interpretation considerations.....	27
Radkowski St.: Problemy degradacji systemów technicznych w gospodarce zrównoważonego rozwoju.....	28
Timofiejczuk A.: Internet rzeczy - nowe możliwości diagnostyki technicznej?.....	29
Referaty problemowe	
Banach M., Moczulski W.: Metody skanowania przestrzeni zamkniętych..	33
Bzymek A.: Zastosowanie wybranych metod statystycznych do detekcji anomalii w sygnałach diagnostycznych.....	41
Cholewa A.: Zagadnienia energochłonności aplikacji napędowych na przykładzie robota przemysłowego.....	45
Ciupke K.: Ocena zdolności procesów wielowymiarowych z zastosowaniem modeli jednostronnych.....	49

Fidali M., Jamrozik W., Pawlak S., Gruszczak A.: Detekcja wad połączeń klejonych z zastosowaniem ultradźwiękowej techniki EMAT.....	55
Fidali M., Roczek K.: Zastosowanie transformacji Parka i Clarka w ocenie stanu silników elektrycznych.....	63
Jałowiecki A.: Wykorzystanie technik modelowania autogenerującego w kontekście wariantowania produktu.....	71
Jamrozik W., Janecki K.: Metody oceny jakości termogramów o poszerzonej głębi ostrości.....	77
Januszka M., Moczulski W.: Zastosowanie technik poszerzonej rzeczywistości w projektowaniu i eksploatacji maszyn.....	81
John M.: Numeryczne testowanie struktur typu plaster miodu.....	89
Katunin A.: Organiczny wielofunkcyjny kompozyt konstrukcyjny do zastosowań w lotnictwie.....	97
Kontny M.: Metody kontroli parametrów jakościowych urobku stosowane w górnictwie.....	105
Krol A., Fidali M.: Metody diagnozowania łożysk tocznych.....	111
Moczulski W.: Zrobotyzowane systemy diagnostyczne.....	119
Mura G.: Metoda optymalizacji postaci konstrukcyjnej struktury energochłonnej pojazdu specjalnego.....	127
Muzalewska M., Moczulski W.: Metodyka wielokryterialnej optymalizacji cech geometrycznych implantu ortopedycznego do rekonstrukcji więzadła krzyżowego przedniego.....	135
Oleszek S., Wyleżoł M.: Podstawy metody konfiguracji naczyń szklanych.....	145
Panfil W., Moczulski W.: Wielokryterialne metody alokacji zadań w inspekcyjnych systemach wielorobotowych.....	151
Przystałka P., Wachla D.: Metodyka stosowania systemu ekspertowego DISESOR.DIAG w zakresie wnioskowania bazującego na danych pomiarowych.....	161
Psiuk K.: Zastosowanie architektury sterowanej zdarzeniami w procesie wnioskowania.....	169

Rogala T.: Analiza wrażliwości i estymacja wag instytucjonalnych sieci stwierzeń.....	175
Rzydzik S.: Zastosowanie modeli autogenerujących w optymalizacji genetycznej konstrukcji	185
Skarka W., Skoberla R., Tyczka M., Wąsik M.: Smart Power - historia rozwoju projektu studenckiego w kontekście realizacji prac konstrukcyjnych i naukowo-badawczych.....	193
Skupnik D.: Zastosowanie algorytmu Kukułki do wielokryterialnej optymalizacji konstrukcji obiektu technicznego.....	201
Szmajduch M., Wyleżoł M.: Alternatywna metoda pozyskiwania danych antropometrycznych w modelowaniu obiektów ergonomicznych.....	207
Szumowski M., Fidali M.: Metody diagnozowania napędów zwrotnicowych.....	211
Tyczka M.: Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji w algorytmach zarządzania energią w pojazdach hybrydowych.....	217
Wronkowicz A., Dragan K. Timofiejczuk A.: Zastosowanie metod analizy obrazu w badaniach ultradźwiękowych struktur kompozytowych.....	223

Wstęp

Zainteresowanie metodami sztucznej inteligencji spowodowało, że w roku 2000 narodził się pomysł zorganizowania sympozjum naukowego poświęconego tej tematyce. Z inicjatywy Prof. Wojciecha Cholewy i Prof. Tadeusza Burczyńskiego ówczesne dwie katedry: Podstaw Konstrukcji Maszyn oraz Wytrzymałości Materiałów i Metod Komputerowych Mechaniki rozpoczęły organizowanie sympozjów „Methods of Artificial Intelligence in Mechanics and Mechanical Engineering” (AI-MECH). Konferencja ta od 2002 r. nosi nazwę AI-METH od „Artificial Intelligence Methods” i stała się konferencją międzynarodową. Wtedy też wypracowaliśmy jej formułę: zawsze w Gliwicach, w listopadzie, z udziałem najznamienitszych uczonych polskich, a później także z zagranicy, prowadzących badania w zakresie podstaw teoretycznych i zastosowań metod sztucznej inteligencji, stanowiąca forum prezentacji wyników naukowych zarówno przez wybitnych, doświadczonych Profesorów, jak i przez doktorantów i studentów, dopiero zaczynających swoją naukową przygodę ze Sztuczną Inteligencją. Aktywność naukowa obu współdziałających katedr oraz stały rozwój sympozjów AI-METH zyskały uznanie w kraju i zagranicą. Widowym znakiem uznania wiodącej roli obu jednostek w badaniach teoretycznych i stosowanych z zakresu Sztucznej Inteligencji było utworzenie w r. 2004 Centrum Doskonałości AI-METH.

W roku 2005 na Sympozjum AI-METH gościliśmy twórcę teorii zbiorów rozmytych Prof. Lotfi A. Zadeha, doktora honoris causa wielu uczelni na całym świecie, ale, co dla nas nade wszystko ważne, doktora h.c. Politechniki Śląskiej. Mieliśmy wówczas zaszczyt wręczenia Prof. Zadehowi specjalnej pamiątkowej plakiety z okazji 40-lecia opublikowania fundamentalnego artykułu „Fuzzy Sets”^{*}. Na specjalnym, zamawianym wykładzie Profesora duża aula B w Centrum Edukacyjno-Kongresowym Politechniki Śląskiej pękała w szwach. Dziś, kiedy Profesora Zadeha z nami już nie ma, ze szczególnym sentymentem wspominamy Jego wizytę w Gliwicach i udział w Sympozjum AI-METH’2005 w charakterze Honorowego Przewodniczącego Komitetu Naukowego sympozjum.

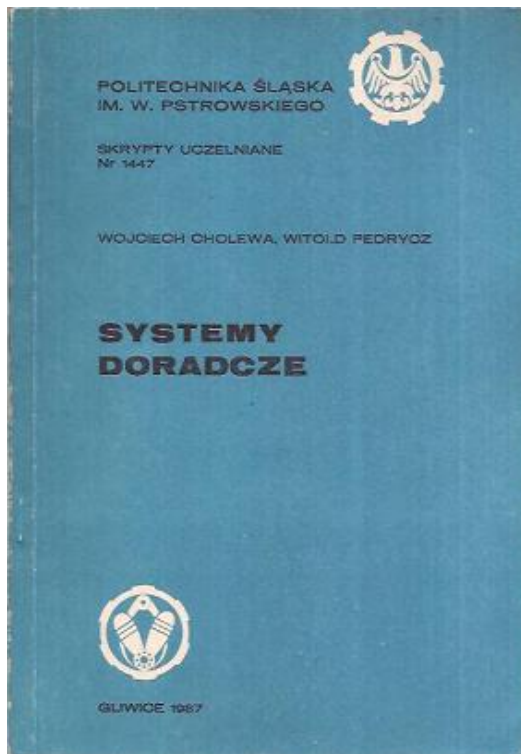
Począwszy od roku 2007 Sympozjum organizowane było w cyklu 2-letnim. Ostatnie Sympozjum odbyło się w 2011 roku.

Nazwę AI-METH godnie nosi obecnie Studenckie Koło Naukowe Zastosowań Metod Sztucznej Inteligencji przy Instytucie Podstaw Konstrukcji Maszyn na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej, które powstało w roku 2006 i odniosło wiele sukcesów na arenie krajowej i międzynarodowej w zawodach autonomicznych robotów mobilnych różnych kategorii. Od wielu lat jest jednym z najliczniejszych kół naukowych na wydziale, stale licząc ponad pięćdziesięciu członków.

Niniejsze seminarium ma charakter jubileuszowy, ponieważ zorganizowane zostało z okazji 30. rocznicy wydania pierwszej w języku polskim pozycji zwartej dotyczącej systemów doradczych - skryptu Politechniki Śląskiej pod tytułem „Systemy doradcze”[†]. Skrypt ten stał się podstawowym źródłem wiedzy o systemach doradczych, a dla wielu wzorem i inspiracją do podjęcia badań naukowych i stosowanych związanych z tą tematyką. Czując się kontynuatorami tradycji Sympozjów AI-METH, postanowiliśmy zaproponować nazwę „Seminarium AI-METH”.

^{*} *Information and Control*, Vol. 8, Issue 3, June 1965, pp. 338-353.

[†] Cholewa W., Pedrycz W.: *Systemy doradcze*. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1447. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1987.



Warto na chwilę zatrzymać się przy tytule skryptu, zaproponowanym przez Profesora Cholewę. W polskim piśmiennictwie bardziej popularna jest nazwa „system ekspertowy” lub nawet „system ekspercki”, będąca bezpośrednim tłumaczeniem nazwy angielskiej, która jednak niewiele mówi. Nazwa „system doradczy” ma dużo głębsze znaczenie, dotyka bowiem kardynalnego problemu odpowiedzialności za decyzje podjęte w wyniku posługiwania się takim systemem. System doradczy jedynie DORADZA osobie, która się nim posługuje. Całkowitą odpowiedzialność za podjęte decyzje ponosi użytkownik. Aby ułatwić podjęcie decyzji, system doradczy może dostarczyć objaśnień: dlaczego pyta o fakty (reprezentowane w formie stwierdzeń będących orzeczeniami o faktach), a także w jaki sposób doszedł do określonych konkluzji. W naszym środowisku, skupionym wokół Profesora Cholewy, nazwę „system ekspertowy” pozostawiamy

dla aplikacji działających BEZ UDZIAŁU OSOBY KONSULTOWANEJ, jak to się odbywa np. w przypadku systemów bazujących na wiedzy wykorzystywanych w przemyśle do sterowania procesami, lub systemów o zastosowaniach militarnych.

Szczególną okazją, dla której zorganizowaliśmy Seminarium AI-METH, jest Jubileusz Profesora Wojciecha Cholewy, Współautora „Systemów doradczych”, a jednocześnie wybitnego badacza i twórcy wielu metod i zastosowań Sztucznej Inteligencji. W Seminarium biorą udział wybitni Profesorowie – Przyjaciele Profesora Cholewy, prowadzący badania w dziedzinach nauki i techniki, w których szczególnie aktywny jest Profesor: w Teorii i Zastosowaniach Sztucznej Inteligencji, Obliczeniach Miękkich, Diagnostyce Technicznej, Diagnostyce Procesów, Mechatronice i wielu innych. Bierze w nim także udział liczne grono pracowników Wydziału Mechanicznego Technologicznego, a zwłaszcza macierzystego instytutu Profesora, który reaktywował – Instytutu Podstaw Konstrukcji Maszyn.

W niniejszym Zeszytzie Naukowym, dedykowanym Profesorowi Wojciechowi Cholewie z okazji Jubileuszu 30-lecia wydania skryptu „Systemy doradcze”, a także z okazji Jego osobistego Jubileuszu, zamieszczono streszczenia referatów plenarnych, które zostaną wygłoszone na seminarium. Ponadto zeszyt zawiera referaty problemowe współpracowników Profesora, w znakomitej większości Jego wychowanków, dotyczące zagadnień naukowych będących przedmiotem badań teoretycznych i stosowanych prowadzonych w Instytucie Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej. Referaty te zostaną zaprezentowane na specjalnej sesji plakatowej.

Wojciech Moczulski
Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn
Politechnika Śląska
wojciech.moczulski@polsl.pl

Referaty plenarne

Wojciech BATKO*

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

*batko@agh.edu.pl



NIEPEWNOŚĆ ROZPOZNAŃ W PROCESACH MONITORINGU DIAGNOSTYCZNEGO

W artykule przedstawiono reguły oceny niepewności rozpoznania zmian stanu w procesach monitorujących. Wybraną bazą odniesień realizacyjnych - kwestii estymacji niepewności wyniku kontroli stanu przez system monitorujący – są realizacje oceny zagrożeń akustycznych środowiska.

Omówiono powiązane z nimi procedury monitoringu akustycznego środowiska i wynikające z nich potrzeby poszukiwania nowych rozwiązań estymacyjnych, dla oceny niepewności realizowanych rozpoznania diagnostycznych. Omówiono budżet niepewności związany z opracowaniami wyników pomiarowych akustycznych, uwarunkowany koniecznością operowania na wynikach pomiarów akustycznych określonych liczbami decybelowymi i odmienną algebra rządząca ich przetworzeniami.

Zwrócono uwagę na problem nieadekwatności aplikacji rozwiązań oceny niepewności danych pomiarowych, według powszechnie stosowanego podejścia GUM (Guide Uncertainty Measurement), przedstawionego w przewodniku Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement BIPM,1993,1995 i jego kolejnych uzupełnień JCGM 101:2008, JCGM 104 :2009, JCGM 102:2011.

Nakreślono możliwe drogi rozwiązania problemu i powiązane z nimi metody. Wskazano na potrzebę związania przynależnych im ich algorytmów z nieklasycznymi metodami statystyki oraz algebrą przedziałową, które umożliwiają uwzględnienie odstępstw od powszechnie przyjmowanych założeń, jakie występują w obecnie stosowanych rozwiązaniach estymacji niepewności wyników badań akustycznych. Nakreślono nowe poszukiwania badawcze i powiązane z nimi rozwiązania dla estymacji niepewności kontroli stanu zagrożeń akustycznych środowiska.

Przedstawione rozważania i analizy zilustrowano odniesieniami do przykładów i wyników uzyskiwanych w monitoringu akustycznym środowiska i powiązanych z nim rozpoznania diagnostycznych stanu zagrożeń akustycznych.

Zwrócono uwagę na uniwersalność omówionej metodyki oceny niepewności wyników monitoringu stanu, która daje możliwość spójnej oceny różnych kategorii błędów. Uzupełnia ona lukę formalną z jaką mamy do czynienia w praktycznym stosowaniu zaleceń konwencji realizacyjnej ocen niepewności wyników przedstawionej w przewodniku niepewności i czyni ją perspektywiczną dla szerszych aplikacji.

How design new graphene-like materials using AI methods

Tadeusz BURCZYŃSKI¹, Waław KUŚ², Marcin MAŻDZIARZ¹, Adam MROZEK³

¹ Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, Pawińskiego 5B, 02-106 Warsaw, Poland, e-mail: tburczynski@ippt.pan.pl

² Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

³ AGH University of Sciences and Technology, Kraków, Poland



Two potentially new, 2D-graphene-like materials have been generated by the two-stage intelligent searching strategy combining molecular and *ab initio* approach. The two candidates X and Y obtained from the one of the AI methods – the hybrid evolutionary based algorithm and molecular calculations using the semi-empirical potential AIREBO were proposed [1].

The extensive analysis of two new polymorphs of graphene X and Y within the framework of the Density Functional Theory from the mechanical, structural, electronic and phonon properties point of view was carried out [2].

As the final result for eight carbon atoms placed in the 4 Å×7 Å rectangular unit cell a stable flat network named X was obtained (Figure 1a) and for the same number of carbon atoms placed in the rectangular unit cell 4 Å×6 Å a stable flat network named Y was proposed (Figure 1b).

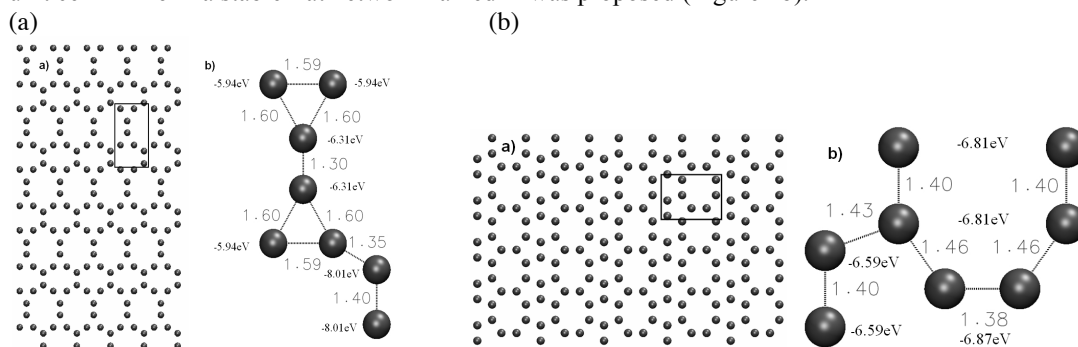


Fig. 1. Layout of new stable carbon networks X (a) and Y (b) found by the two-stage strategy

The following conclusions can be stated:

- the AI method – the hybrid evolutionary algorithm applied to minimize the semi-empirical potential (AIREBO) seems to be surprisingly reliable for carbon structures,
- both proposed polymorphs of graphene are mechanically and dynamically stable,
- X-graphene and Y-graphene can be metallic-like,

Some results in this paper, especially regarding to the X and Y-graphene, are first reported and we hope will be verified by other studies. The examination of new carbon-based 2D materials with predefined mechanical properties are also realized [3].

Keywords: AI method – hybrid evolutionary algorithm; Semi-empirical potential AIREBO; Density Function Theory.

Acknowledgements

This work was supported by the National Science (NCN) Research.

Reference

- [1] Mrozek A., Kuś W., Burczyński T.: Computational Materials Science, 2015, 15(1), 103.
- [2] Maździarz M., Mrozek A., Kuś W., Burczyński T.: Materials Chemistry and Physics, 2017, 202, 7.
- [3] Mrozek A., Kuś W., Burczyński T.: International Journal for Multiscale Computational Engineering, 2017, 15(5), 379.

Wojciech CHOLEWA

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny
Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

wojciech.cholewa@polsl.pl



RÓWNOWAGA FAKTÓW

1. Wstęp

Systemy doradcze (ekspertowe) przeznaczone są do wspomagania procesów podejmowania decyzji. Istotą ich działania jest próba naśladowania procesów myślowych realizowanych przez człowieka, polegających na przechodzeniu od przesłanek do wniosków. Historia takich systemów rozpoczęła się w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Jednym z pierwszych był opracowany na Uniwersytecie Stanford system MYCIN [8], przeznaczony do zastosowań medycznych. Cechą charakterystyczną systemów doradczych, odróżniającą je od innych klas oprogramowania jest wyraźne rozdzielanie dwóch podstawowych elementów tych systemów, czyli podsystemu wnioskującego (nazywanego często silnikiem wnioskującym) i bazy wiedzy.

Sposób działania podsystemu wnioskującego i postać bazy wiedzy zależą od przyjętego sposobu reprezentowania wiedzy. Z licznego zbioru różnych sposobów reprezentowania wiedzy należy wskazać reguły

$$R_i : \text{jeżeli } A_i \text{ to } B_i , \quad (1)$$

w których A_i jest przesłanką, a B_i jest konkluzją. Można rozpatrywać reguły dokładne i przybliżone oraz pewne i niepewne. Przesłankom i konkluzjom mogą być przyporządkowane wartości logiczne (prawda, fałsz), stopnie prawdziwości, stopnie przekonania, prawdopodobieństwa itp. Działania na przesłankach i konkluzjach mogą być realizowane między innymi z zastosowaniem logiki rozmytej. Do wnioskowania z zastosowaniem stopni przekonania lub prawdopodobieństw subiektywnych stosowane są często sieci bayesowskie. Wspomnieć należy o możliwości reprezentowania wiedzy w postaci predykatów i reguł języka Prolog.

Treść bazy wiedzy systemu doradczego powstaje w wyniku procesu pozyskiwania wiedzy. Pozyskując wiedzę, która ma być reprezentowana w postaci reguł, zakłada się wyraźnie iż reguły nie reprezentują relacji przyczynowo-skutkowych. Oznacza to, że zapisanie reguły w postaci (1) nie może lub nie powinno prowadzić do wniosku iż przesłanka A_i jest przyczyną konkluzji B_i , ponieważ pozyskanie reguły R_i może wynikać na przykład z zaobserwowanego współwystępowania A_i i B_i lub z istnienia jakiejś, niekoniecznie znanej, wspólnej przyczyny dla A_i i B_i . Algorytmy wnioskowania stosowane w systemach stosujących reguły są często wzorowane na niezawodnych schematach wnioskowania *modus ponens* i *modus tollens*.

2. Zbiór faktów

W literaturze dotyczącej inżynierii wiedzy często występuje pojęcie *fakt*. Jest ono niestety używane w różnym znaczeniu, co prowadzić może do nieporozumień i nieuprawnionych wniosków. Istnieje potrzeba ustalenia (uściślenia) zakresu znaczeniowego tego pojęcia. Opisując fragment istniejącego lub fikcyjnego świata możemy wskazać występujące w nim rzeczywiste lub abstrakcyjne obiekty, własności tych obiektów oraz istniejące między nimi relacje. Obiektami mogą być między innymi występujące zdarzenia i zachodzące procesy. Każdy taki opis przedstawia jakiś *stan rzeczy*, gdzie stany rzeczy mogą być rozpatrywane z różnym stopniem szczegółowości, ponieważ kompleks stanów rzeczy jest również stanem rzeczy. Zakładamy, że

stan rzeczy, który zaistniał w określonym miejscu i czasie nazywany jest *faktem*. Należy zauważyć, że z założenia tego wynika iż faktem nie może być nazywane wydarzenie, które jeszcze nie wystąpiło.

W każdej dziedzinie zastosowań można rozpatrywać wiele różnych stanów rzeczy u . Niech U będzie zbiorem rozpatrywanych stanów rzeczy. Nie wprowadza się żadnych ograniczeń dotyczących elementów $u \in U$. W szczególności nie zakłada się niezależności i rozłączności tych elementów oraz dopuszcza się aby elementy te mogły być określane z różnym stopniem szczegółowości (złożoności). Przyjęte założenie o tym, że stan rzeczy, który zaistniał w określonym miejscu i czasie, nazywany jest faktem upoważnia do definiowania zbioru faktów jako zbioru rozmytego F określonego na zbiorze stanów rzeczy U

$$F = \{(u, b(u)) | u \in U\} \quad (2)$$

gdzie funkcja charakterystyczna tego zbioru (funkcja przynależności) $b(u)$ określa stopień w jakim stan rzeczy u zaistniał. Możliwe są różne sposoby interpretowania znaczenia tego stopnia (np. stopień przekonania, stopień prawdziwości, prawdopodobieństwo itp).

W zastosowaniach dotyczących zmieniających się w czasie obiektów rzeczywistych omawiany zbiór faktów (2) jest zbiorem dynamicznym, tzn. takim dla którego funkcja charakterystyczna $b(u)$ może się zmieniać, przechodząc dla wybranego stanu rzeczy u od wartości $b(u)|_{t_1}$ w chwili t_1 do wartości $b(u)|_{t_2}$ w chwili t_2 .

Z wielu badań wynika, że zbiory faktów (2), dotyczące różnych dziedzin zastosowań, należy rozpatrywać jako zbiory elementów powiązanych ze sobą. Objawia się to tym, że zmiana jednego faktu, tzn. zmiana wartości funkcji przynależności $b(u_i)$, może pociągać za sobą zmianę wartości innego faktu, czyli może powodować zmianę wartości funkcji $b(u_j)$. Relacje zachodzące między faktami można opisywać wskazując dla każdego faktu zbiory faktów będących warunkami koniecznymi/dostatecznymi jego uznania.

Wynikiem obserwacji działającego obiektu rzeczywistego w określonej chwili czasu może być uznawanie nowych faktów oraz rezygnacja z dalszego uznawania części aktualnych faktów. Po wprowadzeniu zmian w zbiorze faktów (2), zbiór ten będzie dążył do nowego stanu równowagi.

3. Zbiór stwierdzeń

Wykorzystanie zbioru faktów w postaci (2) wymaga wskazywania stanów rzeczy u . Można to realizować za pomocą symbolicznych identyfikatorów tych elementów, ale postępowanie takie utrudnia pozyskiwanie wiedzy o relacjach między faktami i może być przyczyną trudnych do wykrycia błędów. Postępowaniem dogodniejszym jest reprezentowanie zbioru stanów rzeczy U przez zbiór C ich opisów $c(u)$

$$C(U) = \{c(u) | u \in U\}. \quad (3)$$

gdzie opis $c(u)$ jest wystarczającym zbiorem informacji identyfikującym stan rzeczy u i umożliwiającym rozróżnianie stanów rzeczy. Pozwala to na zastąpienie w (2) stanów rzeczy $u \in U$ przez ich opisy $c \in C(U)$, prowadząc do następującego zbioru faktów

$$F = \{(c, b(c)) | c \in C(U)\} \quad (4)$$

W [4] zwrócono uwagę na możliwość stosowania w bazach wiedzy systemów doradczych, stwierdzeń ułatwiających komunikację z użytkownikiem systemu. Stwierdzenia mogą być interpretowane jako obiekty pełniące rolę zdań logicznych, związanych jednocześnie z opisem ich interpretacji, występującym w postaci dowolnie rozbudowanej wypowiedzi lub opinii na określony temat. Stosowanie stwierdzeń jest postępowaniem szczególnie dogodnym dla systemów przeznaczonych do wspomaganie diagnostyki technicznej, wymagającej między innymi rozwiązywania zadań związanych z odpowiednim interpretowaniem danych i ich zmian.

W języku potocznym rzeczownik *stwierdzenie* posiada wiele znaczeń. Definiując pojęcie *stwierdzenie* można przyjąć, że stwierdzenie jest informacją o uznaniu wypowiedzi orzekającej o obserwowanych faktach lub reprezentującej określoną opinię. Stwierdzenie s może być zapisywane w postaci następującej pary:

$$s = \langle c(s), b(s) \rangle, \quad (5)$$

gdzie c jest treścią stwierdzenia, czyli np. wypowiedzią o tym, że wskazanemu obiektowi przysługuje określony atrybut o ustalonej wartości oraz b jest wartością stwierdzenia przyjmowaną np. jako stopień prawdziwości lub stopień przekonania o prawdziwości wypowiedzi będącej treścią stwierdzenia. Z treści stwierdzenia $c(s)$ nie wynika bezpośrednio czy jest ono uznane. Informacja o uznaniu stwierdzenia zapisywana jest jako wartość stwierdzenia, niezależnie od jego treści. Omawiane stwierdzenia mogą być stwierdzeniami przybliżonymi, gdzie zbiór dopuszczalnych wartości stwierdzeń nie jest ograniczany do dwóch elementów {prawda, fałsz}.

Porównując (4) i (5) widzimy, że treścią $c(s)$ stwierdzenia s w (5) może być opis c stanu rzeczy w (4). Oznacza to, że fakt może być reprezentowany przez stwierdzenie, a zbiór faktów przez zbiór stwierdzeń.

4. Intuicjonistyczna wartość stwierdzenia

W praktycznych zastosowaniach systemów doradczych występuje potrzeba wyznaczenia wartości stwierdzeń, w sposób umożliwiającą rozróżnianie następujących grup stwierdzeń:

- stwierdzenia o których nie wiemy czy są prawdziwe czy fałszywe,
- stwierdzenia dla których przekonanie o ich prawdziwości i przekonanie o ich fałszywości równoważą się.

W systemach tych występuje również potrzeba niezależnego wyciągania wniosków zarówno na podstawie przekonania o prawdziwości określonych stwierdzeń jak i na podstawie przekonania o fałszywości innych stwierdzeń.

Potrzeb tych nie można zrealizować w systemach, w których wartość stwierdzenia jest pojedynczą liczbą. Niezbędne jest rozpatrywanie w tym celu wartości stwierdzeń określanych w postaci pary liczb. Przykładem takiej wartości może być para złożona ze stopnia konieczności i stopnia możliwości, wywodzących się z logiki modalnej. Inną koncepcją jest ciekawe pojęcie przedziałowych zbiorów rozmytych.

Kolejną bardzo ciekawą koncepcją wartości stwierdzeń jest definicja tej wartości (6) wzorowana częściowo na teorii intuicjonistycznych zbiorów rozmytych (IFS) [2]. Intuicjonistyczna wartość $b(s)$ stwierdzenia s jest reprezentowana przez parę uporządkowaną:

$$b(s) = \langle p(s), n(s) \rangle \quad \text{dla} \quad p(s), n(s) \in [0, 1], \quad (6)$$

gdzie:

$p(s)$ jest stopniem przekonania o słuszności (uzasadnieniu, prawdziwości, poprawności) treści $c(s)$ stwierdzenia s , nazywanym dalej *stopniem słuszności stwierdzenia*,

$n(s)$ jest stopniem przekonania o braku słuszności treści $c(s)$ stwierdzenia s , nazywanym dalej *stopniem braku słuszności stwierdzenia*.

Wartości $p(s)$ i $n(s)$ w (6) nazywane są również ocenami informacji pozytywnej i informacji negatywnej. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na ciekawą dyskusję autorów kwestionujących prawo do stosowania określenia *intuicjonistyczny* [7] i odpowiedź autora IFS [3].

W IFS zakłada się, że:

$$p(s) + n(s) \in [0, 1]. \quad (7)$$

Zgodnie z (6) wartość $b(s)$ stwierdzenia s o „nieznanej wartości”, czyli takiego o którym nie wiadomo czy jest prawdziwe czy fałszywe, należy zapisywać jako $\langle 0, 0 \rangle$. Wartości $p(s)$ i $n(s)$ pozwalają na wyznaczenie stopnia wątpliwości $h(s)$ dla stwierdzenia s , nazywanego również stopniem nieokreśloności:

$$h(s) = 1 - p(s) - n(s), \quad (8)$$

gdzie z (6) i (7) wynika, że:

$$h(s) \in [0, 1]. \quad (9)$$

Dla każdych dwóch stwierdzeń x i y o wartościach $b(x)$ i $b(y)$ wg (6) można definiować operatory sumy i iloczynu, na przykład w postaci:

$$b(x \vee y) = \langle \max(p(x), p(y)), \min(n(x), n(y)) \rangle, \quad (10)$$

$$b(x \wedge y) = \langle \min(p(x), p(y)), \max(n(x), n(y)) \rangle. \quad (11)$$

Z licznego zbioru operatorów intuicjonistycznej negacji [1] wybieramy najprostszy operator:

$$b(\neg s) = \langle n(s), p(s) \rangle, \quad (12)$$

dla którego wartość podwójnej negacji stwierdzenia jest równa wartości stwierdzenia:

$$b(\neg\neg s) = b(s). \quad (13)$$

Wartości boolowskie prawda i fałsz można zapisywać jako intuicjonistyczne wartości stwierdzeń (6) odpowiednio w postaci $\langle 1, 0 \rangle$ i $\langle 0, 1 \rangle$. Dla tak zapisywanych wartości definicje operatorów (10), (11), (12) są zgodne z definicjami klasycznego rachunku zdań.

Wartości stwierdzeń (6) mogą być wyznaczone bezpośrednio, z zachowaniem założenia (7). Mogą być one również wynikiem procesu wnioskowania na podstawie innych stwierdzeń, zgodnie z przyjętym modelem wiedzy. Ewentualna niedoskonałość stosowanego modelu wiedzy oraz niespójność zadanego zbioru wartości stwierdzeń prowadzić mogą do błędów w procesie wnioskowania, objawiających się sprzecznościami w zbiorze wyznaczanych wartości stwierdzeń. Wyznaczone wartości stwierdzeń mogą nie spełniać ograniczeń (7). Fakt ten skłonił do rezygnacji z ograniczenia (7) i modyfikacji definicji stopnia wątpliwości (8):

$$h(s) = \begin{cases} 1 - p(s) - n(s) & \text{dla } p(s) + n(s) \leq 1, \\ 0 & \text{dla } p(s) + n(s) > 1. \end{cases} \quad (14)$$

Wprowadzamy również stopień niezgodności $d(s)$ dla wartości $p(s)$ i $n(s)$ stwierdzenia s nie spełniających ograniczenia (7):

$$d(s) = \begin{cases} 0 & \text{dla } p(s) + n(s) \leq 1, \\ p(s) + n(s) - 1 & \text{dla } p(s) + n(s) > 1, \end{cases} \quad (15)$$

przyjmujący wartości:

$$d(s) \in [0, 1]. \quad (16)$$

Występowanie dodatnich wartości $d(s)$ jest symptomem sprzeczności w stosowanym modelu wiedzy lub w zadanym zbiorze wartości stwierdzeń.

5. Sieć stwierdzeń

Zbiór stwierdzeń reprezentujących fakty i zbiór relacji między nimi pozwalają na zbudowanie sieci stwierdzeń. Intuicjonistyczna sieć stwierdzeń jest siecią zawierającą stwierdzenia, które posiadają wartości intuicjonistyczne.

Wiedza pozyskiwana jest, dla potrzeb sieci stwierdzeń, w postaci implikacji $s_1 \rightarrow s_2$ pomiędzy stwierdzeniami s_1 i s_2 . Relacja ta informuje, że przesłanka czyli stwierdzenie s_1 , jest warunkiem wystarczającym (dostatecznym) dla konkluzji, czyli stwierdzenia s_2 . Warunek wystarczający oznacza, że uznaniu słuszności przesłanki s_1 będzie zawsze towarzyszyć uznanie słuszności konkluzji s_2 . Warunek wystarczający jest dualny z warunkiem koniecznym. Jeżeli s_1 jest warunkiem wystarczającym dla stwierdzenia s_2 , czyli $s_1 \rightarrow s_2$, to jednocześnie s_2 jest warunkiem koniecznym dla s_1 , czyli $s_2 \leftarrow s_1$. Warunek konieczny oznacza, że brak uznania słuszności konkluzji s_2 pociąga za sobą zawsze brak uznania przesłanki s_1 . O tym który warunek (dostateczny, konieczny) wynikający z implikacji $s_1 \rightarrow s_2$ jest wykorzystywany w procesie wnioskowania, decyduje to czy znana jest wartość przesłanki s_1 czy konkluzji s_2 .

Warunki konieczne i dostateczne mogą być modelowane za pomocą nierówności [4]. Dla rozpatrywanych intuicjonistycznych wartości stwierdzeń s_1 i s_2 połączonych relacją $s_1 \rightarrow s_2$ oraz dla znanej wartości $b(s_1) = \langle p(s_1), n(s_1) \rangle$ otrzymujemy warunek dostateczny w postaci następującej nierówności:

$$(s_1 \rightarrow s_2, b(s_1) = \langle p(s_1), n(s_1) \rangle) \Rightarrow (p(s_2) \geq p(s_1)). \quad (17)$$

Z kolei dla znanej wartości $b(s_2) = \langle p(s_2), n(s_2) \rangle$ otrzymujemy warunek konieczny w postaci następującej nierówności:

$$(s_1 \rightarrow s_2, b(s_2) = \langle p(s_2), n(s_2) \rangle) \Rightarrow (n(s_1) \geq n(s_2)). \quad (18)$$

W podobny sposób definiujemy warunek wystarczający dla jednej konkluzji s i alternatywy przesłanek s_1, s_2, \dots :

$$((\bigvee_i s_i) \rightarrow s) \Rightarrow p(s) \geq \max_i p(s_i), \quad (19)$$

oraz dla jednej konkluzji s i koniunkcji przesłanek s_1, s_2, \dots :

$$((\bigwedge_i s_i) \rightarrow s) \Rightarrow p(s) \geq \min_i p(s_i). \quad (20)$$

Stosowanie intuicjonistycznej sieci stwierdzeń wymaga jej cyklicznego rozwiązywania, którego istotą jest iteracyjne poszukiwanie stanu równowagi sieci. Prosty algorytm rozwiązywania sieci stwierdzeń składa się z następujących kroków:

1. dla tzw. *stwierdzeń pierwotnych*, czyli dla stwierdzeń uznanych na podstawie dostępnych danych, przyjmowane są ich odpowiednie wartości początkowe stopni słuszności $p(s)$ i stopni braku słuszności $n(s)$,
2. dla tzw. *stwierdzeń wtórnych*, czyli dla wszystkich pozostałych stwierdzeń, przyjmowane są zerowe wartości początkowe stopni słuszności $p(s)$ i stopni braku słuszności $n(s)$,
3. dla wszystkich stwierdzeń, których wartości wymagają wyznaczenia, iteracyjnie zwiększane są ich wartości $p(s)$ i $n(s)$ w celu spełnienia odpowiednich nierówności (17), (18), (19) i (20) ustalonych w ramach procesu pozyskiwania wiedzy.

Wprowadzony stopień niezgodności (15) pozwala na dynamiczne wykrywanie ewentualnych sprzeczności w rozwiązywanej sieci [5].

Realizowany proces wnioskowania, w którym wartości $p(s)$ i $n(s)$ mogą być wyłącznie zwiększane, jest procesem monotonicznym. Cechą charakterystyczną monotonicznego procesu wnioskującego jest to, że raz uznana konkluzja nie może ulec zmianie, nawet wtedy gdy poznane zostaną nowe fakty. Sieć stwierdzeń powinna być jednak przystosowana do działania w zmiennym otoczeniu, w wyniku którego wartości wybranych stwierdzeń pierwotnych mogą ulegać zmianie, gdzie aktualizacje wartości tych stwierdzeń mogą być przeprowadzane asynchronicznie. Oznacza to, że proces wnioskowania nie powinien być procesem monotonicznym.

W celu ograniczenia monotoniczności tego procesu można wprowadzić proces zapominania wartości stopni słuszności i braku słuszności. Dotyczy to zarówno wartości stwierdzeń pierwotnych jak i wtórnych. Rozpatrując wartości tych stopni jako wartości zależne od dyskretnego czasu t , czyli:

$$b(s)|_t, b(s)|_{t+1}, \dots \quad (21)$$

można na przykład wprowadzić proces zapominania, realizowany przed każdym cyklem aktualizacji wartości stwierdzeń, w następujący sposób [6]:

$$b(s)|_{t+1} := q(s) \cdot b(s)|_t \text{ dla } 0 < q(s) \leq 1, \quad (22)$$

gdzie zależne od stwierdzenia stałe $q(s)$ pozwalają na strojenie dynamicznych własności sieci i wskazywanie stwierdzeń, których wartości będą zapominane szybciej/wolniej.

6. Podsumowanie

Pokazano, że zbiór faktów może być definiowany jako zbiór rozmyty określony na zbiorze stanów rzeczy. Dla potrzeb związanych z budowaniem baz wiedzy systemów doradczych wprowadzono pojęcie zbioru stwierdzeń, pozwalającego na reprezentowanie zbioru faktów. Wprowadzono również intuicjonistyczne wartości stwierdzeń i pokazano, że wynikiem pozyskiwania wiedzy mogą być zbiory warunków koniecznych i dostatecznych występujących pomiędzy stwierdzeniami. Omówiono prosty algorytm rozwiązywania sieci stwierdzeń polegający na poszukiwaniu jej stanu równowagi, odpowiadającego stanowi równowagi zmieniających się faktów. Algorytm ten umożliwia monitorowanie ewentualnych sprzeczności występujących warunkowo w procesie wnioskowania.

Literatura

- [1] K. T. Atanassov: On the intuitionistic fuzzy implications and negations. *Studies in Computational Intelligence*, 109:381–394, 2008.
- [2] K.T. Atanassov: Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20:87–96, 1986.
- [3] K.T. Atanassov: Answer to D. Dubois, S. Gottwald, P. Hajek, J. Kacprzyk and H. Prade. *Fuzzy Sets and Systems*, 156(3):496–499, 2005.
- [4] W. Cholewa: Systemy doradcze w diagnostyce technicznej. J. Korbicz, J. M. Kościelny, Z. Kowalczyk, W. Cholewa, redaktorzy, *Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*, strony 543–580. WNT, Warszawa, 2002.
- [5] W. Cholewa, redaktor: *Diagnostyczne systemy doradcze*, wolumen 1. Wydawnictwa IMP PAN, Gdańsk, 2015.
- [6] W. Cholewa: Gradual forgetting operator in intuitionistic networks. P. Angelov, [et al], redaktorzy, *Proceedings of the 7th IEEE International Conference Intelligent Systems IS'2014*, wolumen 322 serii *Advances in Intelligent Systems and Computing*, strony 613–620. Springer, 2015.
- [7] D. Dubois, S. Gottwald, P. Hajek, J. Kacprzyk, H. Prade: Terminological difficulties in fuzzy set theory - The case of intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 156(3):485–491, 2005.
- [8] E. H. Shortliffe: *Computer-Based Medical Consultation MYCIN*. American Elsevier, New York, 1976.

Zbigniew DĄBROWSKI*

Politechnika Warszawska, Instytut Podstaw
Budowy Maszyn

*dabrozbig@gmail.com



CZY MOŻNA ZMIERZYĆ NIELINIOWE ZABURZENIE?

Jak wiadomo model dynamiczny układu nieliniowego może być identyfikowalny z wystarczającą dokładnością, lecz jak pokazano w wielu pracach (w tym autora) zagadnienie jest stosunkowo trudne. Z drugiej strony z technicznego punktu widzenia interesujący jest przypadek, gdy układ mechaniczny dobrze opisywalny na etapie projektowania modelem liniowym w trakcie eksploatacji podlega destrukcji objawiającej się nieliniowym zaburzeniem. Zaburzenie to wzrasta na ogół w trakcie postępującego zużycia. Nie ulega wątpliwości, że pomiar jakkolwiek rozumianej nieliniowej części odpowiedzi dynamicznej może stanowić nader istotne uproszczenie procesu identyfikacji lub być kluczem do rozwiązania zadania diagnostycznego.

Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu jest wykorzystanie analizy koherencyjnej przy dokonaniu pewnych uogólnień. Jak wiadomo funkcja koherencji zwyczajnie jest relacją pomiędzy wejściem i wyjściem układu. Dla idealnego modelu liniowego funkcja ta równa się 1 a mniejsza wartość świadczy o zakłóceniach na wejściu lub wyjściu bądź o nieliniowym przetwarzaniu sygnałów. Aby wykorzystać analizę koherencyjną do obserwacji ewolucji nieliniowego zaburzenia należy dokonać pewnych założeń i uogólnień:

1. Założmy, że poza badanym przez nas procesem żadne zakłócenia nie występuje.
2. Wykorzystując fakt, że analizowany w diagnostyce proces jest wielowymiarowy (oprócz czasu dynamicznego „ t ” argumentem jest czas obserwacji „ θ ”, współrzędna punktu obserwacji „ r ”, wyróżnik egzemplarza maszyny „ n ” i inne) zdefiniujemy funkcję koherencji pomiędzy „wejściem” a „wyjściem” dla różnych czasów θ (lub odpowiadających im zmiennych stanu).
3. Ponieważ pojęcie „wejścia” jest pojęciem względnym przyjmijmy, że tę rolę pełni pewien zdefiniowany sygnał wzorcowy (na ogół uzyskany przez liniową transformację obserwacji procesu wibroakustycznego w dostępnym miejscu).

Przy takich założeniach można niekoherentną część obserwowanego sygnału diagnostycznego (symptomu) w wyselekcjonowanym paśmie (lub pasmach) potraktować jako miarę narastającego nieliniowego zaburzenia. Oczywiście należy spełnić wiele warunków formalnych jak na przykład synchronizacja prędkości obrotowej, czy identyczność punktu obserwacji, ale zadanie jest możliwe do realizacji. Słuszność takiego podejścia potwierdzają zrealizowane liczne aplikacje techniczne, np. diagnozowanie uszkodzenia zęba przekładni, uszkodzenia zaworu silnika spalinowego czy identyfikacja struktury wibroakustycznej maszyny roboczej.

Podsumowując, nieliniowe zaburzenie daje się zmierzyć (przynajmniej pod względem energetycznym) a pomiar taki może być użytecznym narzędziem w diagnostyce wibroakustycznej i zadaniu identyfikacji modeli dynamicznych.

Jan KICIŃSKI*

Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku

* kic@imp.gda.pl



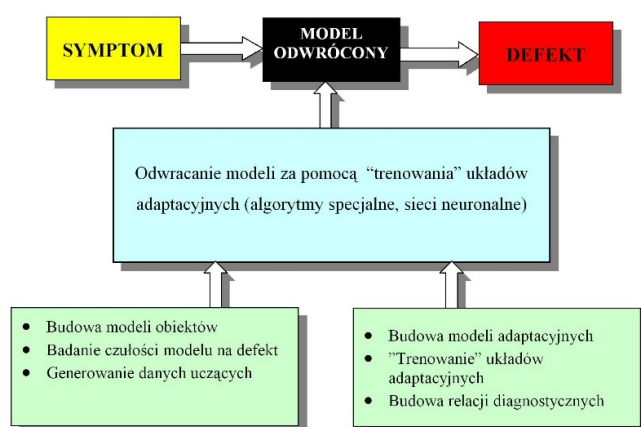
DIAGNOSTYKA WEDŁUG MODELU I ZAGADNIENIA ODWROTNE W DYNAMICE MASZYN WIRNIKOWYCH

Maszyny wirnikowe, a zwłaszcza duże obiekty energetyczne, określane są często jako „maszyny krytyczne”, tzn. maszyny, których awarie są niezwykle groźne dla życia człowieka i środowiska. Stąd też szczególną rolę przypisuje się nowoczesnym systemom nadzoru i diagnostyki, a w ostatnich latach systemom bazującym na rozbudowanych bazach wiedzy i sztucznej inteligencji. W tym kontekście opracowanie zaawansowanych narzędzi do opisu stanu dynamicznego tych maszyn stało się wyzwaniem dla wielu zespołów badawczych z całego świata. Prace takie zostały również podjęte w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku oraz na Politechnice Śląskiej w zespole prof. W. Cholewy.

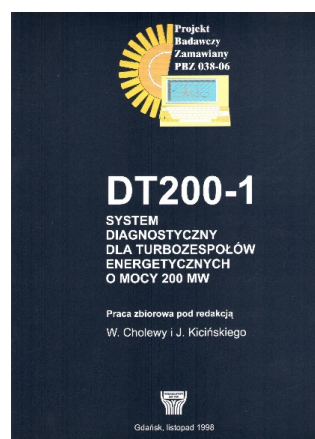
Oba te ośrodki ściśle z sobą współpracowały przez wiele lat w ramach największych projektów badawczych w kraju. Pilną potrzebą było opracowanie narzędzi do jednolitego i ciągłego opisu pracy układu w całym zakresie prędkości obrotowych maszyny wirnikowej, również po przekroczeniu granicy stabilności.

Kolejne wielkie zadanie jakie wyłoniło się w trakcie prac obu ośrodków związane było z budową relacji diagnostycznych typu defekt – symptom na przykładzie obiektów rzeczywistych takich jak turbosespoły dużej mocy. Po identyfikacji i zamodelowaniu defektów koniecznym stało się określenie symptomów tych defektów drogą obszernych i zaawansowanych obliczeń komputerowych.

Szybko okazało się, że użyteczne są tak naprawdę relacje odwrócone, czyli znajomość defektów dla znanych symptomów. Oznaczało to konieczność „odwrócenia” opracowanych modeli. Zespół prof. Cholewy opracował w tym celu unikalne algorytmy do trenowania układów adaptacyjnych. Współpraca obu zespołów zaowocowała opracowaniem pierwszego systemu doradczego K015 oraz pierwszego inteligentnego systemu diagnostycznego dla turbosespołów o nazwie DT-200.



Koncepcja odwracania modeli diagnostycznych

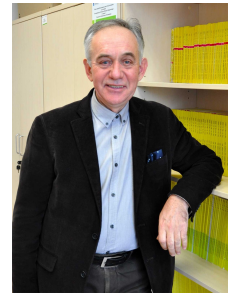


System DT200 – pierwszy polski inteligentny system dla turbosespołów dużej mocy

Józef KORBICZ*

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych

* j.korbicz@issi.uz.zgora.pl



METODY OBLICZEŃ INTELIGENTNYCH W DIAGNOSTYCE PROCESÓW DYNAMICZNYCH

Rozwój nowych metod i technik diagnostyki procesów dynamicznych w znacznym stopniu jest inspirowany złożonością oraz rosnącymi wymaganiami niezawodnościowymi nowoczesnych obiektów i instalacji przemysłowych. Uwzględniając liczne ograniczenia znanych atrakcyjnych metod analitycznych opartych na znajomości modelu matematycznego diagnozowanych obiektów i procesów takich jak np. obserwatorów o nieznanym wejściu [1,2], w danym referacie przedstawiono alternatywne rozwiązania z zastosowaniem metod obliczeń inteligentnych [1,3]. Podobnie jak w przypadku stosowania metod analitycznych rozpatruje się strukturę układu diagnostyki z modelem, tylko tym razem będą to modele neuronowe [4], rozmyte oraz neuronowo-rozmyte [1,2]. Szczególną uwagę poświęcono wybranym strukturom metod obliczeń inteligentnych takim jak sztuczne sieci neuronowe typu GMDH (ang. *Group Method of Data Handling*) czy sieci neuronowo-rozmyte typu Takagi-Sugeno. Atrakcyjność takich modeli w diagnostyce procesów wynika z faktu, że ich stosowanie pozwala na projektowanie układów diagnostyki w przypadku braku modeli analitycznych lub gdy są one zbyt skomplikowane i złożone z punktu widzenia możliwości ich wykorzystania.

Mając na uwadze niedokładności zarówno modeli analitycznych jak i obliczeń inteligentnych przedstawiono problem wyznaczania niepewności modeli neuronowych typu GMDH z wykorzystaniem metody ograniczonego błędu (ang. *Bounded-Error Approach, BEA*). Wyznaczenie niepewności takich modeli pozwala na zaprojektowanie tzw. adaptacyjnego progu detekcji uszkodzeń, który w znaczny sposób pozwala na zwiększenie odporności układu detekcji na zakłócenia oraz zmniejsza liczbę fałszywych alarmów. W końcowej części referatu pokazano przykład zastosowania sieci neuronowej typu GMDH w układzie diagnostyki zespołu siłownik, ustawnik i zawór regulacyjny [1,2].

Literatura

- [1] Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (Red.): Diagnostyka procesów. Modele, Metody sztucznej inteligencji, Zastosowania. – Warszawa: WNT, Monografie Komitetu Automatyki i Robotyki PAN, tom 3, 2002
- [2] Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z. and Cholewa W. (Eds.). Fault Diagnosis. Models, Artificial intelligence, Applications. Springer-Verlag, Berlin, 2004
- [3] Witczak M. Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Strategies for Non-Linear Systems. Analytical and Soft Computing Approaches. Springer-Verlag, Berlin, 2014.
- [4] Mrugalski M. Advanced Neural network-based Computational schemes for Robust Fault Diagnosis. Springer-Verlag, Berlin, 2014

Jan Maciej KOŚCIELNY*

Politechnika Warszawska, Instytut Automatyki
i Robotyki

* jmk@mchtr.pw.edu.pl



ROZMYTE WNIOSKOWANIE DIAGNOSTYCZNE UWZGLĘDNIAJĄCE PRAWDOPODOBIEŃSTWA A PRIORI USZKODZEŃ

Metody wnioskowania automatycznego są najbardziej przydatne do lokalizacji uszkodzeń w zaawansowanej diagnostyce procesów przemysłowych. Niezbędna wiedza o relacji uszkodzenia – symptomy pochodzi w tym przypadku od ekspertów i przyjmuje postać reguł. Alternatywne podejście polegające na zastosowaniu metod klasyfikacji napotyka na istotne ograniczenia związane z trudnością lub brakiem możliwości zgromadzenia danych uczących, reprezentujących stany awaryjne procesu. Wnioskowanie automatyczne powinno uwzględniać niepewności sygnałów diagnostycznych, będących wyjściami poszczególnych testów diagnostycznych, realizowanych z wykorzystaniem modeli cząstkowych procesów. Przyczyną niepewności są błędy modelowania, zakłócenia i szumy pomiarowe, a także trudności określenia wartości progowych wykorzystywanych w części decyzyjnej algorytmów testów.

W przypadku niepewnych objawów podejście probabilistyczne jest naturalnym rozwiązaniem. Jednak w praktyce przemysłowej pojawia się praktyczny problem określenia warunkowych prawdopodobieństw wartości sygnałów diagnostycznych w stanach z uszkodzeniami. Z drugiej strony, logika rozmyta jest popularnym narzędziem do radzenia sobie z niedokładnymi wartościami sygnałów diagnostycznych. Wnioskowanie rozmyte nie bierze jednak pod uwagę prawdopodobieństw a priori uszkodzeń, co może niekorzystnie wpływać na diagnozy, szczególnie w przypadku stanów z uszkodzeniami wielokrotnymi.

W referacie zaproponowano nową metodę wnioskowania diagnostycznego, łączącą podejście bayesowskie z logiką rozmytą.

Witold PEDRYCZ*

University of Alberta, Department of Electrical and Computer Engineering, Edmonton, Canada

*wpedrycz@ualberta.ca



ASSOCIATION ANALYSIS IN DATA ANALYTICS: DEVELOPMENT OF ASSOCIATIVE MEMORIES -ARCHITECTURAL, DESIGN, AND INTERPRETATION CONSIDERATIONS

Association (linkage) analysis arises as one of the pivotal pursuits in data science—identifying relationships among variables, building concepts, and recalling associated entities are central to knowledge discovery.

Associative memories have been studied in the past. In light of the agenda of data analytics, the underlying idea, architectures, and algorithmic developments call for the essential revisiting of the well-established paradigm.

In this study, we elaborate on the key topologies of associative memories and stress ideas of bidirectional and multi-directional recalls. The architecture of the associative mappings dwells upon a collection of landmarks (prototypes) whose formation is realized with the aid of advanced techniques of collaborative clustering. The detailed clustering algorithm with optimized collaboration coefficients and the ensuing recall mechanisms are discussed. It is shown that the proposed design retains privacy of individual sources of data for which associations are established. We demonstrate how the advanced design facets embrace (i) the usage of Granular Computing leading to granular associative memories, and (ii) the design of interfaces of deep learning implying further augmentations of association mechanisms. Furthermore, we expand the generic topology of the associative memory by bringing concepts of auxiliary sources of knowledge that are actively engaged in the formation of the mechanisms of bidirectional and multi-directional recall.

Stanisław **RADKOWSKI***

Instytut Pojazdów Politechniki Warszawskiej

*Stanislaw.Radkowski@simr.pw.edu.pl



PROBLEMY DEGRADACJI SYSTEMÓW TECHNICZNYCH W GOSPODARCE ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU

W pracy przedstawiono zakres zmian jakim powinna być poddana inżynieria mechaniczna w związku z wyzwaniem jakie niesie ze sobą problematyka zrównoważonego rozwoju.

W klasycznym ujęciu studiów na kierunku inżynieria mechaniczna obejmuje zagadnienia z zakresu termodynamiki, mechaniki, projektowania i technologii wytwarzania. Dyscyplina w naturalny sposób została rozszerzona o nanotechnologie i biotechnologie.

Problematyka zrównoważonego rozwoju, w praktyce dotyczy zarówno minimalizacji zanieczyszczeń środowiska jak i zachowania zasobów naturalnych, obejmuje swoim zakresem tak tradycyjne dziedziny inżynierii mechanicznej jak i wchodzące nowe obszary nauki. Omawiane relacje dotyczące idei zrównoważonego wzrostu oraz inżynierii mechanicznej, szczególnie w zakresie zrównoważonego transportu drogowego, są omawiane, dotyczą przede wszystkim przyszłości i niezbędnego zakresu badań naukowców.

Przechodząc do zagadnień zrównoważonego transportu zwrócono uwagę na aspekty gospodarcze, szczególnie rozwój infrastruktury z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych; społeczne, szczególnie ze względu na bezpieczeństwo i możliwość wyboru z powodu realizacji potrzeby mobilności oraz środowiskowe, stawiające w centrum uwagi naturalne środowisko, redukcję emisji zanieczyszczeń oraz zmniejszenie zużycia materiałów wykorzystywanych w systemie transportu.

Szczególną uwagę zwrócono na zagadnienia ponownego użycia maszyn i środków transportu przy zachowaniu wymagań i kryteriów związanych z realizacją zasady zrównoważonego rozwoju. Z tego punktu widzenia przedstawiono szereg szczególnych zagadnień. W tym problematykę modernizacji pojazdów, określania pozostałego czasu użytkowania maszyn i urządzeń oraz konieczność odpowiedniego zdefiniowania nowego paradygmatu podstaw projektowania.

Anna TIMOFIEJCZUK*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny
Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

*anna.timofiejczuk@polsl.pl



INTERNET RZECZY – NOWE MOŻLIWOŚCI DIAGNOSTYKI TECHNICZNEJ?

Pierwsze izolowane systemy komputerowe, które uważane są za pierwszą fazę rozwoju Internetu, powstały w latach 60-tych ubiegłego stulecia. Także w tym czasie, w połowie lat 60-tych, zaczęły powstawać pierwsze systemy, nazywane systemami doradczymi, których celem było wspomaganie człowieka w podejmowaniu decyzji. Jako początek sieci Internet podaje się przełom lat 60-tych i 70-tych. Wtedy też powstała pierwsza wersja, jednego z najważniejszych systemów doradczych, systemu MYCIN. Do najwcześniejszych prac z zakresu systemów doradczych, realizowanych w Polsce, zalicza się prace prowadzone przez profesorów Wojciecha Cholewę i Witolda Pedrycza, w wyniku których opracowano i wydano w roku 1987, pierwszą w Polsce książkę dotyczącą tej tematyki. Opisano w niej podstawy, budowę i zastosowania systemów doradczych opracowanych dla celów diagnostyki technicznej.

Podstawowym zadaniem Internetu jest komunikacja i transmisja danych. Ze względu na to, że działanie systemu doradczego opiera się na analizie danych i wnioskowaniu na podstawie uzyskanych wyników, historia rozwoju systemów doradczych jest ściśle związana z historią ewolucji Internetu. Kolejne fazy rozwoju Internetu związane były z utworzeniem sieci www, włączeniem do sieci urządzeń mobilnych poprzez łącza bezprzewodowe oraz uruchomieniem portali społecznościowych. Każdy z obiektów obecnych w sieci Internet, człowiek, urządzenie lub system informatyczny, generuje dane, może je pobierać, analizować i udostępniać.

Obserwowana od kilku lat, piąta faza rozwoju Internetu, polega na włączeniu do sieci różnych obiektów (ang. things), które mogą komunikować się ze sobą bez udziału człowieka. Faza ta nosi nazwę Internetu Rzeczy (ang. Internet of Things), a jej nazwa, która została po raz pierwszy użyta w 1999 r. przez Kevina Ashtona jako tytułu prezentacji dla Procter&Gamble, dzisiaj oznacza już znacznie więcej. Internet Rzeczy jest obecnie traktowany jako pewien ekosystem, w którym współdziałają użytkownicy i obiekty techniczne. Internet Rzeczy stał się rzeczywistością na przełomie 2008 i 2009 r., kiedy liczba włączonych urządzeń przekroczyła liczbę mieszkańców ziemi. Prognozuje się, że liczba obiektów przyłączonych do Internetu wzrośnie z 13 mln w 2016 r. do 30 mln w 2020 r. Spektrum tych urządzeń jest bardzo szerokie, począwszy od komputerów i smartfonów oraz różnych urządzeń monitorujących funkcje człowieka, często wykorzystywanych także w celach rozrywkowych, poprzez urządzenia AGD i wyposażenie domów, a skończywszy na odpowiedzialnych maszynach i systemach krytycznych, których działanie służy dużym grupom społeczeństwa. Przykładem są turbosespoły, generatory, sieci energetyczne czy sieci wodociągowe. Zastosowanie Internetu Rzeczy do obsługi urządzeń wykorzystywanych w przemyśle, nazywane jest Przemysłowym Internetem Rzeczy (ang. Industrial Internet of Things). Algorytmy stosowane w tym przypadku powinny spełniać specyficzne wymagania. W wielu opracowaniach, dotyczących przemian przemysłowych, Przemysłowy Internet Rzeczy opisuje się jako ekosystem, którego pojawienie się jest wynikiem zaistnienia Internetu Rzeczy, a który prowadzi do kolejnej rewolucji przemysłowej i w efekcie do Przemysłu 4.0.

Celem zastosowania Przemysłowego Internetu Rzeczy jest przede wszystkim podniesienie efektywności działania obiektów technicznych, także poprzez odpowiednio prowadzoną diagnostykę tych obiektów, bazującą na ciągłej obserwacji i analizie da-

nych. Biorąc pod uwagę coraz większą złożoność maszyn i procesów, generujących ogromne zbiory danych, zastosowanie odpowiednio opracowanych diagnostycznych systemów doradczych, ma bardzo duże znaczenie. Do podstawowych modułów systemu doradczego zalicza się: bazy danych (stałych i zmiennych), bazę wiedzy i układ wnioskujący. Ważnymi modułami są układ sterowania dialogiem z użytkownikiem i układ objaśniający. Gromadzenie dużych zbiorów danych spowodowało rozwój algorytmów stosowanych do ich analizy, a później formułowania decyzji. Są to algorytmy bazujące na zastosowaniu różnych podejść, w tym przetwarzania dużych zbiorów danych (ang. big data), danych przechowywanych i przetwarzanych w chmurach (ang. cloud computing) oraz uczenia maszynowego (ang. machine learning).

Istotą zastosowania Przemysłowego Internetu Rzeczy jest włączenie w ekosystem urządzeń i procesów w taki sposób, aby mogły się komunikować ze sobą i podejmować decyzje dotyczące swojej eksploatacji, w czasie rzeczywistym. Komunikacja w takich systemach polega na zastosowaniu podejścia wypracowanego w sterowaniu urządzeń automatyki. To komunikacja między obiektami technicznymi nazywana M2M (ang. machine to machine). Decyzje podejmowane są nie tylko na poziomie zarządzania obiektami, ale także przez same obiekty, które są obiektami inteligentnymi (ang. smart object). Głównym celem takiego podejścia jest nie tylko wykrywanie stanów awaryjnych i uszkodzeń, ale także ich przewidywanie z jednoczesną optymalizacją przestojów na remonty i konserwacje, które przeprowadzane są wtedy, kiedy są konieczne. Pozwala to na optymalizację eksploatacji takich obiektów oraz inteligentne planowanie zasobów. W utrzymaniu ruchu, bez udziału lub przy minimalnym udziale człowieka, obiekty techniczne współdziałające w ramach Przemysłowego Internetu Rzeczy powinny odznaczać się autonomią, a prowadzona obsługa, określana jest jako samodiagnostyka. Trend zastosowań Internetu Rzeczy w przemyśle jest związany z koniecznością innego podejścia do projektowania obiektów technicznych, jako obiektów mechatronicznych. Nie jest to podejście nowe, ale wymaga przewidzenia tego, że obiekt będzie działał autonomicznie, decydując o swoim stanie, obsługując sam siebie i obsługując inne obiekty. Aby to było możliwe, obiekty inteligentne wyposażane są obecnie w znacznie większą liczbę czujników, niż wymaga tego ich diagnostyka przy udziale człowieka. Obecny stan rozwoju urządzeń rejestrujących różne dane, powoduje, że wąskie gardło, jakim były te urządzenia, ze względu np. na możliwość częstotliwości rejestracji, transmisji i gromadzenia danych, przesunęło się do kolejnego etapu, jakim jest analiza danych.

Zastosowanie Internetu Rzeczy do obsługi obiektów technicznych, związane jest z kilkoma bardzo ważnymi zagadnieniami, które przy diagnostyce prowadzonej z udziałem człowieka, nie występowały. Konieczność przetwarzania i analizy ogromnych zbiorów danych, wymaga zastosowania odpowiednich algorytmów, pozwalających na ich selekcję, ze względu na określony kontekst. Wszystkie podejścia, dzięki którym możliwe jest pozyskanie danych kontekstowych, na etapie rejestracji i przetwarzania, znacznie podnoszą efektywność procesu analizy i wnioskowania. Dane kontekstowe to dane opisujących nie tylko działanie samego obiektu, ale także ekosystem i zmiany w nim zachodzące. Ponadto, autonomiczne działanie obiektów wymaga, aby możliwa była identyfikacja tego kontekstu na podstawie rejestrowanych danych. Powoduje to, że stosowane metody, to tzw. nienadzorowane metody uczenia maszynowego. Ich zastosowanie związane jest z jednym z ważniejszych problemów, jakim jest ponoszenie odpowiedzialności za podejmowane decyzje. Jest to szczególnie istotne w przypadku kiedy zastosowano algorytmy niepozwalające na określenie wyjaśnienia dojścia do określonego rozwiązania, typu „czarna skrzynka”. Innym problemem jest dostęp do danych oraz ich zabezpieczenie, związane są z cyberbezpieczeństwem (ang. cybersecurity), który staje się bardzo istotny w przypadku obiektów autonomicznych, transmisji danych i chmur obliczeniowych.

Referat jest przeglądem stosowanych obecnie podejść, będących wynikiem rozwoju nowych technologii, które są lub mogą być zastosowane w diagnostyce technicznej.

Referaty problemowe

Maciej BANACH¹, Wojciech MOCZULSKI²

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

- 1) maciej.banach@polsl.pl
- 2) wojciech.moczulski@polsl.pl

METODY SKANOWANIA PRZESTRZENI ZAMKNIĘTYCH

1. Wstęp

Artykuł ma za zadanie przybliżyć tematykę skanowania przestrzeni zamkniętych, stosowanych w tym celu urządzeń oraz metod. Przestrzenie zamknięte to obszary, do których jest utrudnione wejście i wyjście z nich. Do takich obszarów możemy zaliczyć chodniki kopalniane, tunele, rurociągi, sieci kanalizacyjne. Skanowanie takich obszarów umożliwia tworzenie dokumentacji o wysokiej dokładności, wykorzystywanej w celach inwentaryzacji oraz okresowej weryfikacji ich stanu.

2. Skanowanie przestrzeni zamkniętych

Skanowanie przestrzeni zamkniętych polega na uzyskaniu dokumentacji w postaci chmury punktów. Związany ze skanowaniem jest problem rejestracji chmur punktów. Rejestracja polega na wyznaczeniu transformacji niezbędnej do ustalenia dwóch nakładających się chmur punktów we wspólnym układzie współrzędnych. W przypadku, gdy jednocześnie budowana jest mapa badanego obszaru, względem której wyznaczana jest pozycja urządzenia skanującego (problem typu SLAM), korzystnym zjawiskiem jest powrót do punktu początkowego, tzw. zamknięcie pętli. Umożliwia to określenie błędu wynikającego z estymacji pozycji oraz zwiększenie dokładności wyznaczonej mapy. Dokładny opis algorytmów rejestracji można znaleźć w [1].

3. Czujniki przeznaczone do skanowania przestrzeni zamkniętych

Naziemne skanery laserowe



Rys.1. Z lewej skaner Z+F Imager 5006i wraz z wskaźnikiem pomiarowym w kształcie tarczy [2], z prawej wskaźnik pomiarowy w kształcie kuli [3]

Naziemne skanery laserowe stanowią grupę urządzeń cechujących się największą precyzją pomiaru oraz umożliwiają uzyskanie rozdzielczości niedostępnej w innych metodach obrazowania przestrzeni zamkniętych. Okupione jest to wysoką ceną urządzeń oraz niską tolerancją na niesprzyjające warunki pracy. Pomiar dokonywany jest poprzez zmierzenie odległości przez wiązkę laserową. System wirujących lusterek wykorzystywany jest do odchylenia wiązki, umożliwiając omiatanie otoczenia i uzyskanie skanu 3D. Chmura punktów, zawierająca współrzędne XYZ punktów odbicia wiązki lasera, zostaje wyznaczona na podstawie zmierzonej odległości oraz kątów obrotu osi (pionowej i poziomej) skanera. Można wyróżnić dwie główne metody dokonywania pomiaru: fazową oraz czasu przelotu (ang. *Time of Flight*). W metodzie fazowej następuje ciągła emisja wiązki, która odbija się od skanowanych obiektów. Odległość zostaje określona poprzez pomiar przesunięcia fazowego światła powracającego. Skanery w metodzie czasu przelotu emitują krótki impuls, którego czas odbicia pozwala wyznaczyć odległość do obrazowanego obiektu. Przewagą skanerów fazowych jest większa dokładność pomiaru, umożliwiającą zobrazowanie większej liczby detali, jednak obarczone jest to krótszym efektywnym zasięgiem [4]. Część urządzeń umożliwia instalację dodatkowej kamery, umożliwiającej zebranie informacji na temat koloru poszczególnych punktów.

Skanery laserowe 3D

Do celów skanowania przestrzeni zamkniętych stosuje się również urządzenia 3D które nie zaliczają się do klasy naziemnych skanerów laserowych. Cechują się one odmienną zasadą działania – do pomiaru wykorzystywana jest grupa laserów umieszczonych na obrotowej platformie, dokonujących pomiaru jednocześnie. Rozdzielczość pionowa urządzenia jest stała i zależna od rozmieszczenia poszczególnych diod. Przykładowo skaner *Velodyne VLP-16* posiada 16 diod laserowych. Zakres pomiarowy dla płaszczyzny pionowej wynosi $\pm 15^\circ$ z rozdzielczością 2° .

Inne skanery laserowe



Rys.2. Prototyp urządzenia skanującego stosowanego w projekcie TeleRescuer, zbudowanego ze skanera 2D LMS111 zamontowanego na obrotowej platformie [5]

Do celów skanowania przestrzeni zamkniętych stosowane są również zestawy zbudowane z jednego lub wielu skanerów, 3D lub 2D, stosowanych w innych gałęziach przemysłu. Koszt takich urządzeń jest również znacznie niższy niż naziemnych skanerów laserowych. Rozwiązaniem często występującym w literaturze są zestawy ze skanerem

2D umieszczonym na obrotowej platformie. Chmura punktów uzyskana jest poprzez obrót platformy o określony kąt i połączenie poszczególnych skanów 2D. Jest to popularne rozwiązanie, stosowane często w zadaniach skanowania tuneli kopalnianych przez roboty mobilne [5][6][7].

Innym przykładem urządzenia wykorzystującego skaner 2D jest *Zebedee* [8]. Skaner wraz z jednostką nawigacji inercyjnej (IMU) został umieszczony na platformie połączonej sprężyną z uchwytem trzymanym przez operatora. Reprezentacja 3D otoczenia jest uzyskana poprzez nieregularny ruch platformy, wynikający z przyspieszeń i wibracji działających na ten układ.



Rys.4. Urządzenie *Zebedee* opracowane przez badaczy z CSIRO [8]

W pracy Bosse i Zlot [9] przedstawiają skaner zbudowany na podstawie urządzenia 2D oraz platformy obracającej się ze stałą prędkością. Ruch obrotowy platformy umożliwia określenie pozycji przemieszczającego się pojazdu, co z kolei umożliwia poprawną rejestrację kolejnych skanów. [10] rozwija wcześniejsze prace, poprzez dodanie dwóch dodatkowych skanerów 2D (rys. 5). System w tej postaci wykorzystuje skaner umieszczony na obrotowej platformie do ustalenia pozycji podczas ruchu systemu. Pozostałe dwa urządzenia dostarczają informacje umożliwiające zbudowanie chmury punktów o większej rozdzielczości.



Rys.5. System skanujący przeznaczony do skanowania tuneli kopalnianych, górny skaner jest umieszczony na platformie obrotowej [10]

Prace [11][12] przedstawiają przenośne urządzenia zbudowane na podstawie skanera 3D, przyjmujące postać urządzeń ręcznych lub plecaków. Urządzenia często

posiadają dodatkowe kamery, umożliwiające zebranie informacji o kolorze skanowanych obszarów.



Rys.6. Przenośne urządzenie skanujące w formie plecaka Heron AC-1, wykorzystujące skaner 3D Velodyne HDL-32E [12]

Kamery stereowizyjne

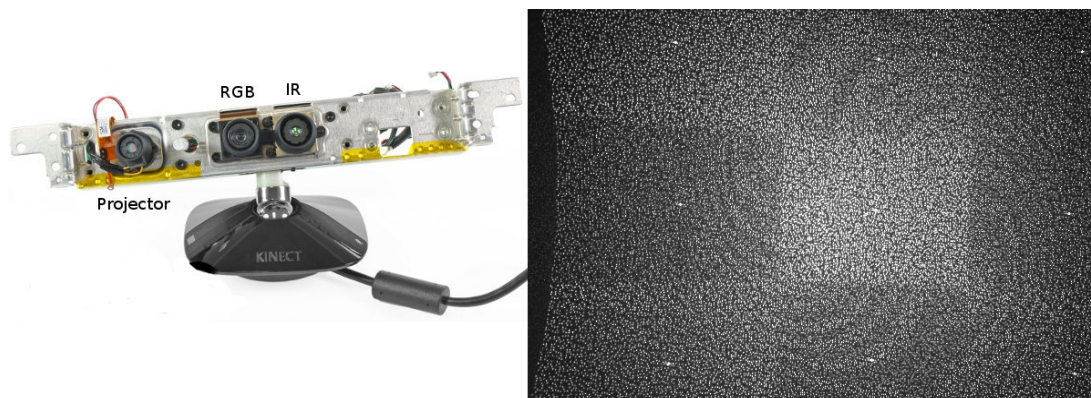
Działanie systemów stereowizyjnych opiera się na analizie obrazów pochodzących z wielu kamer (najczęściej dwóch). Głębina zostaje obliczona poprzez wyznaczenie względnej odległości między obrazami tego samego punktu w różnych kamerach. Ważnym aspektem jest dobór odpowiedniego rozstawu kamer – kamery rozmieszczone blisko dają dobrą rozdzielczość głębi dla obiektów znajdujących się blisko. Kamery rozmieszczone szeroko uzyskują lepszą aproksymację głębi dla obiektów znajdujących się dalej, jednak wiąże się to z brakiem lub częściową utratą detekcji obiektów bliskich. Wymagane jest również poprawne zamocowanie kamer, ponieważ niewielka zmiana ich orientacji będzie skutkowało wymogiem ponownej kalibracji systemu. [13] W przypadku zastosowania systemu kamer dla celów skanowania przestrzeni zamkniętych niezbędne będzie zastosowanie odpowiedniego systemu oświetlenia.

Światło strukturalne

Systemy wykorzystujące światło strukturalne umożliwiają uzyskanie informacji na temat odległości poprzez pomiar zniekształceń znanego wzorca. Urządzenie składa się z rzutnika oświetlającego obiekt wzorcem oraz kamery umieszczonej w sposób, umożliwiający obserwację sceny pod innym kątem niż orientacja rzutnika. Wykorzystując metody bazujące na triangulacji, mierzące odkształcenia wzorca, można wyznaczyć współrzędne punktów znajdujących się w obrazie. Główną wadą tej metody jest ograniczony zasięg pomiaru odległości – wynika to z konieczności dokładnego wykrycia wzorca przez kamerę czujnika. [13] Popularnym czujnikiem wykorzystującym światło strukturalne jest sensor *Kinect* przeznaczony do konsoli *Xbox 360* firmy *Microsoft*, mapa głębi może zostać wyznaczona dla odległości z przedziału 0,6 – 4 m.

Kamery pomiaru czasu przelotu sygnału

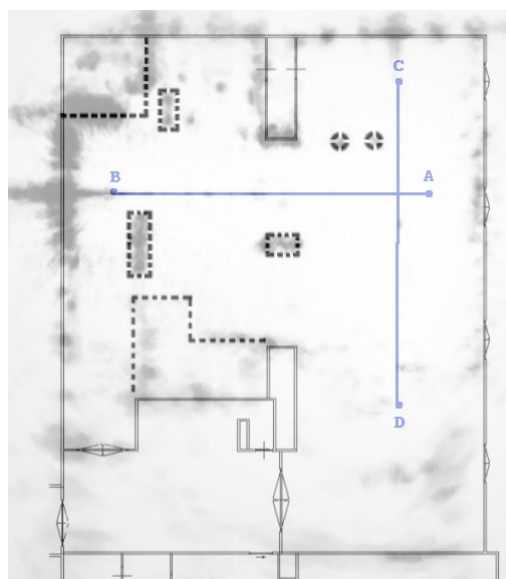
Kamery wykorzystujące pomiar czasu przelotu sygnału działają na podobnej zasadzie jak skanery laserowe tego typu, jednak zamiast obrotowej głowicy skanującej, posiadają czujnik w postaci matrycy, uzyskując informację o odległości dla poszczególnych pikseli. Zaletą kamer jest wysoka częstotliwość pomiaru, często powyżej 100 FPS, jednak posiadają one niską rozdzielczość maksymalną (320 x 240px lub mniej) [13].



Rys.7. Z lewej czujnik *Kinect*, z prawej wzorec rzucany przez rzutnik czujnika [14]

Inne czujniki

Prowadzone są również badania nad innymi metodami obrazowania przestrzeni zamkniętych, ponieważ wymienione wcześniej systemy cechują się dużym błędem przy pracy w warunkach takich jak zamglenie, zapylenie, obecność pary wodnej. Prace [15][16][17] przedstawiają wykorzystanie radarów do obrazowania pomieszczeń. Uzyskane mapy umożliwiają nawigację w pomieszczeniu, jednak brakuje im detali i szczególności osiąganą przez systemy laserowe.



Rys.8. Mapa otoczenia wykonana przez system radarowy, z nałożonymi liniami, przedstawiającymi rozkład pomieszczeń [16]

4. Metody skanowania przestrzeni zamkniętych

Naziemny skaning laserowy

Naziemny skaning laserowy wykorzystuje naziemne skanery laserowe do uzyskania precyzyjnej dokumentacji pomieszczeń, obiektów oraz obszarów. Wykorzystywany jest do inwentaryzacji m.in. obiektów architektonicznych [4], miejsc zdarzeń kryminalnych [18], obiektów przemysłowych [19]. Naziemny skaning laserowy jest metodą pozwalającą uzyskać najdokładniejszą reprezentację obrazowanej przestrzeni, jednak jest to okupione większą pracochłonnością procesu skanowania. Zostaje on przeprowadzony w następujący sposób. Wpierw zostają rozmieszczone wskaźniki pomiarowe – umożliwiają one połączenie skanów z kolejnych stanowisk oraz zorientowanie w wybranych układach współrzędnych. Następnie urządzenie skanujące zostaje ustawione na

stanowisku i zostaje określony obszar objęty skanowaniem. Po wykonaniu tych czynności przygotowawczych można rozpocząć proces skanowania. Czynności te są powtarzane dla kolejnych stanowisk. Poszczególne skany są ze sobą łączone w celu uzyskania jednolitej chmury punktów przedstawiającej skanowany obiekt. Następnie zostają one poddane procesowi pre-processingu, który polega na czyszczeniu, usuwaniu szumów pomiarowych oraz nieciągłości. Tak przygotowane dane mogą zostać wykorzystane do wygenerowania modeli 3D skanowanych obiektów. [19].



Rys.9. Chmura punktów przedstawiająca wyrobisko górnicze, uzyskana metodą naziemnego skaningu laserowego [19]

Skanowanie metodą *stop and go*

Skanowanie metodą *stop and go* polega na okresowym zatrzymywaniu się systemu pomiarowego w celu dokonania skanowania. Metoda cechuje się prostszą rejestracją, mniejszymi błędami pomiarowymi niż w skanowaniu ciągłym oraz prostszą konstrukcją systemów skanujących niż w metodzie skanowania ciągłego [20][21]. Skanowanie metodą *stop and go* wykorzystywane jest najczęściej przy zastosowaniu skanerów 2D zamontowanych na obrotowej platformie [6][22].

Skanowanie metodą ciągłą

W przypadku mobilnych urządzeń, dokonujących pomiaru ciągle, skanowanie wykonywane jest podczas pokonywania obszaru przeznaczonego do zobrazowania. Obróbka danych może zostać przeprowadzona online lub offline. Algorytmy SLAM na podstawie uzyskanych danych (chmury punktów, dane z IMU) umożliwiają określenie pozycji skanera w przestrzeni i połączenie pojedynczych skanów w chmurę przedstawiającą cały skanowany obszar. Przewagą tej metody jest szybkość skanowania badanych obszarów oraz mniejsze straty energii – ruch jest ciągły, brak zatrzymań (aspekt ważny w przypadku pojazdów zasilanych akumulatorowo).

Interesującym przykładem wykorzystania tej metody są prace przeprowadzone przez australijskich badaczy z CSIRO [10]. System złożony z trzech skanerów 2D został przytworzony do samochodu i umożliwił zeskanowanie 17 km tuneli kopalnianych w czasie niecałych dwóch godzin. System był w stanie pracować w sposób prawidłowy przy przejeździe z prędkościami rzędu 20-30km/h. Uzyskana dokumentacja posiada wystarczającą dokładność do planowania operacji związanych z przemieszczaniem ciężkiego sprzętu po terenie kopalni.

5. Podsumowanie

W artykule zostały opisane metody oraz urządzenia stosowane do skanowania przestrzeni zamkniętych. Systemy oparte o czujniki laserowe stanowią najliczniejszą

grupę urządzeń wykorzystywaną do skanowania przestrzeni zamkniętych. Związane jest to z ich wysoką dokładnością oraz możliwością uzyskania gęstych chmur punktów. Naziemne skanery laserowe umożliwiają uzyskanie dokumentacji o najwyższej jakości, jednak ich bardzo wysoki koszt ogranicza ich zastosowanie. Prostsze systemy, zbudowane z przemysłowych urządzeń 2D, są z tego powodu często stosowane. Najczęściej stosowaną metodą przeprowadzania skanowania takimi urządzeniami jest *stop and go*. Związane jest to z ich prostą konstrukcją oraz łatwiejszą procedurą rejestracji kolejnych skanów. Wykorzystanie skanerów 2D do skanowania ciągłego wymaga zastosowania specjalnych konstrukcji umożliwiających dokonanie poprawnej rejestracji, jednak umożliwia uzyskanie skanu dużego obszaru w krótszym czasie. Rewolucja w laserowych skanerach 3D w ostatnich latach, pozwoliła upowszechnić przenośne urządzenia laserowe przeznaczone do mapowania przestrzeni zamkniętych, umożliwiając dokonywanie skanowania w ruchu.

Literatura

- [1] Pomerleau, F., Colas, F., Siegwart, R.: A review of point cloud registration algorithms for mobile robotics. *Foundations and Trends® in Robotics*, 4(1), 1-104, 2015
- [2] <http://www.zf-laser.com> [Dostęp na dzień: 18.10.2017]
- [3] <http://www.koppatargets.com> [Dostęp na dzień: 18.10.2017]
- [4] San Jose Alonso, J. I., Martínez Rubio, J., Fernández Martín, J. J., García Fernández, J.: Comparing time-of-flight and phase-shift. The survey of the royal pantheon in the basilica of San Isidoro (Leon). *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(5), 2011
- [5] Olivka, P., Mihola, M., Novák, P., Kot, T., Babjak, J.: The 3D laser range finder design for the navigation and mapping for the coal mine robot. In *Carpathian Control Conference (ICCC), 2016 17th International* (pp. 533-538). IEEE, 2016
- [6] Ferguson, D., Morris, A., Haehnel, D., Baker, C., Omohundro, Z., Reverte, C., ... Thrun, S.: An autonomous robotic system for mapping abandoned mines. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (pp. 587-594), 2004
- [7] Magnusson, M., Nüchter, A., Lörken, C., Lilienthal, A. J., Hertzberg, J.: 3D mapping the Kvarntorp Mine—A field experiment for evaluation of 3D scan matching algorithms. In *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, 2009
- [8] Bosse, M., Zlot, R., Flick, P.: Zebedee: Design of a spring-mounted 3-d range sensor with application to mobile mapping. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(5), 1104-1119, 2012
- [9] Bosse, M., Zlot, R. Continuous 3D scan-matching with a spinning 2D laser. In *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on* (pp. 4312-4319). IEEE, 2009
- [10] Zlot, R., Bosse, M. Efficient large-scale 3D mobile mapping and surface reconstruction of an underground mine. In *Field and service robotics* (pp. 479-493). Springer Berlin Heidelberg, 2014
- [11] <http://www.kaartta.com> [Dostęp na dzień: 18.10.2017]
- [12] <http://www.gexcel.it/en/solutions/heron-mobile-mapping/heron-ac1> [Dostęp na dzień: 18.10.2017]
- [13] Stefańczyk, M., Kornuta, T.: Akwizycja obrazów RGB-D: metody. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 18, 2014
- [14] http://wiki.ros.org/kinect_calibration/technical [Dostęp na dzień: 18.10.2017]
- [15] Moallem, M., Sarabandi, K.: Polarimetric study of MMW imaging radars for indoor navigation and mapping. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(1), 500-504, 2014
- [16] Marck, J. W., Mohamoud, A., vd Houwen, E., van Heijster, R.: Indoor radar SLAM A radar application for vision and GPS denied environments. In *Radar Conference (EuRAD), 2013 European* (pp. 471-474). IEEE, 2013

- [17] Foessel-Bunting, A., Bares, J., Whittaker, W. L.: *Three-dimensional map building with MMW RADAR*. In Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics, RCA Halme and E. Prassler, Eds., Helsinki, Finland, 2001
- [18] Petryńska, M., Przyborski, M., Stankiewicz, P., Szulwic, J.: *Inwentaryzacja miejsc zdarzeń kryminalnych przy wykorzystaniu naziemnego skaningu laserowego*. Logistyka, (6), 8548-8558, 2014
- [19] Janus, J.: *Ocena możliwości wykorzystania skaningu laserowego do budowy modeli numerycznych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 17(1-2), 21-26, 2015
- [20] Al-Nuaimi, A.: *Methods of Point Cloud Alignment with Applications to 3D Indoor Mapping and Localization*. (Doctoral dissertation, Technische Universität München), 2017
- [21] Lin, Y., Hyypä, J., Kukko, A.: *Stop-and-go mode: Sensor manipulation as essential as sensor development in terrestrial laser scanning*. Sensors, 13(7), 8140-8154, 2013
- [22] Novak, P., Babjak, J., Kot, T., Bobovsky, Z., Olivka, P., Moczulski, W., Timofiejczuk, A., Adamczyk, M., Guzman, B., Armad, A., Rodriguez, A.: *Telerescuer - reconnaissance mobile robot for underground coal mines*, Proceedings of the 17th Coal Operators' Conference, Mining Engineering, University of Wollongong, 332-340, 2017

Anna BZYMEK*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

*anna.bzymek@polsl.pl

ZASTOSOWANIE WYBRANYCH METOD STATYSTYCZNYCH DO DETEKCJI ANOMALII W SYGNAŁACH DIAGNOSTYCZNYCH

1. Wstęp

Celem badań diagnostycznych jest m.in. monitorowanie pracy maszyny, wnioskowanie o jej stanie oraz jak najwcześniejsze wykrywanie symptomów pogarszającego się stanu technicznego. Symptomy świadczące o poprawnym lub pogarszającym się stanie technicznym są różne w zależności od badanej maszyny oraz mierzonych wielkości, niemniej jednak stwierdzenie faktu, że przebieg danej wielkości odbiega od przebiegu uważanego za poprawny może być informacją o zmianie warunków pracy maszyny lub o pojawieniu się pierwszych symptomów zmiany jej stanu technicznego. W dziedzinie diagnostyki technicznej zauważalny jest aktualnie rozwój i zastosowania praktyczne metod analizy sygnałów np. wibroakustycznych lub innych sygnałów diagnostycznych, które ukierunkowane są na detekcję anomalii w tych sygnałach.

Anomalia rozumiana może być jako odchylenie od normy lub nieoczekiwana, nagła lub narastająca zmiana w sygnale. Dzięki wczesnemu wykryciu zachodzących w sygnałach zmian, mogących być symptomami uszkodzenia, możliwe jest znaczne wydłużenie czasu pracy obiektu technicznego. W niektórych przypadkach wczesne wykrycie uszkodzenia pozwala odpowiednim służbom na kontrolę propagacji uszkodzenia oraz dobranie odpowiedniego terminu i częstości napraw bieżących, w taki sposób by dana maszyna zatrzymywana była jak najrzadziej. Podejście to jest podstawą PdM (ang. Predictive Maintenance), czyli strategii eksploatacji uwzględniającej śledzenie zmian stanu technicznego maszyny podczas jej pracy i odpowiednie planowanie ewentualnych napraw. Wczesna detekcja symptomów nieprawidłowości pracy lub uszkodzeń, pozwala na śledzenie zmian zachodzących w obiekcie technicznym, a co za tym idzie zaplanowanie czynności konserwacyjnych lub napraw przed wystąpieniem znaczących zmian stanu lub nawet awarii.

2. Metody detekcji anomalii

Analiza sygnałów ukierunkowana na detekcję anomalii w nich występujących prowadzona może być z zastosowaniem wielu metod, m. in.: odległościowych (najbliższego sąsiada), opartych na klasyfikacji, grupowaniu oraz metod statystycznych [1]. Podejmowane są również próby klasyfikacji metod w zależności od typu analizowanych danych [2].

Wśród metod statystycznych wyróżnia się dwie główne grupy metod analizy sygnałów ukierunkowanych na detekcję anomalii – parametryczne oraz nieparametryczne. Metody nieparametryczne to m.in. metody korelacyjne bazujące na wyznaczaniu m.in.: korelacji, kowariancji, autokowariancji, autokorelacji oraz analiza odchyłeń standardowych. Do grupy metod parametrycznych zaliczane są metody, w których stosowane są modele AR, MA i ARMA (w przypadku analizy sygnałów stacjonarnych) oraz ARIMA (w przypadku analizy sygnałów niestacjonarnych) [3] [4].

W niniejszym referacie przedstawiono wyniki zastosowania dwóch wybranych metod detekcji anomalii (metody korelacyjnej oraz modelu ARIMA) w celu analizy sygnałów testowych oraz sygnałów rzeczywistych zarejestrowanych podczas procesu spawania. Przedstawione badania były pierwszymi związanymi z detekcją anomalii i są

rozwijane w kierunku detekcji zmian występujących w sygnałach oraz propagacji tych zmian.

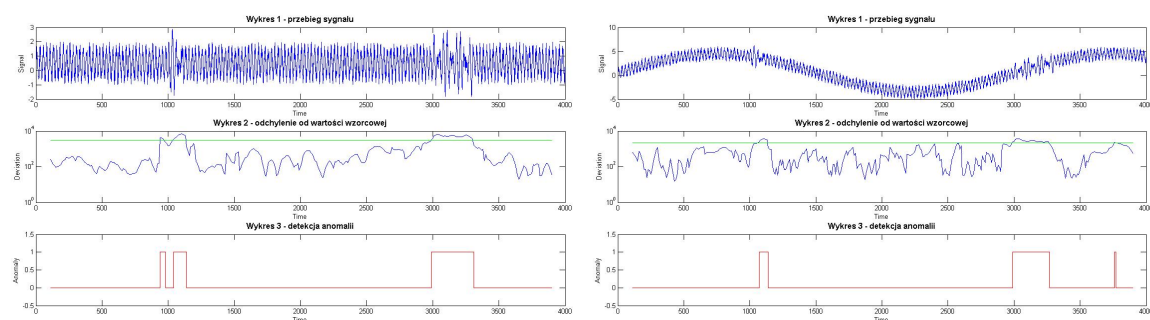
3. Opis analizowanych sygnałów

Podczas badań, w pierwszej kolejności przeprowadzono wstępne analizy dla sztucznie wygenerowanych sygnałów testowych. Wygenerowano m.in. sygnały harmoniczne zakłócone szumem białym, w których zostały wprowadzone dodatkowe zakłócenia w postaci sygnału o innej amplitudzie, częstotliwości i mnożniku szumu. Dwa przykładowe sygnały zostały przedstawione na Rys.1. Dla tak przygotowanych sygnałów została przeprowadzona analiza z zastosowaniem funkcji autokorelacji i analiza z zastosowaniem modelu ARIMA (Rys.1 i Rys.2).

Wspomniane metody zostały zastosowane również do analizy sygnałów rzeczywistych pochodzących z obserwacji procesu spawania metodą MIG/MAG (Rys.3 i Rys4). W lewej kolumnie przedstawiono analizowany sygnał zmiany natężenia prądu podczas spawania drutem elektrodowym ze śladami korozji na jego powierzchni. W prawej kolumnie, przedstawiono sygnał rejestrowany przy destabilizowanej wartości natężenia prądu spawania w zakresie $\pm 20\%$ wartości nominalnej. Pomiary były przeprowadzone w ramach projektu N N504 281937 pt. „Metodologia diagnozowania procesu spawania z wykorzystaniem fuzji obrazów” realizowanego w IPKM. Przykładowe wyniki detekcji anomalii w analizowanych sygnałach przedstawiono w kolejnym rozdziale.

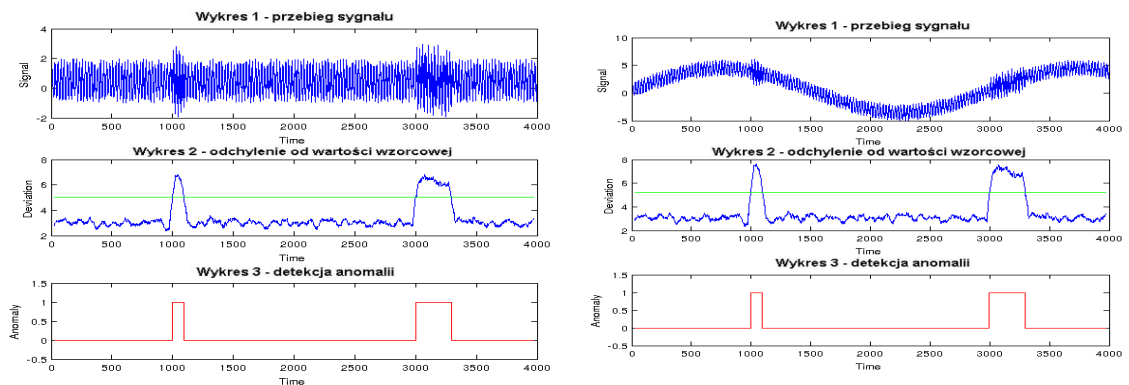
4. Wyniki zastosowania wybranych metod analizy dla sygnałów testowych i rzeczywistych

Na podstawie analiz z zastosowaniem funkcji autokorelacji, przeprowadzonych dla sygnałów testowych można zauważyć, że zakłócenia wprowadzone do sygnałów zostały wykryte w obu prezentowanych przypadkach (Rys.1). Na Rys1 przedstawiono w kolumnie trzy wykresy, pierwszy to wykres analizowanego sygnału, drugi to wykres wskaźnika odchylenia od autokorelacji wzorcowej. Próg detekcji anomalii został zaznaczony linią poziomą. Wykres trzeci to przebieg przyjmujący wartości 1 lub 0 w zależności od tego, czy został przekroczony próg detekcji anomalii, czy nie.



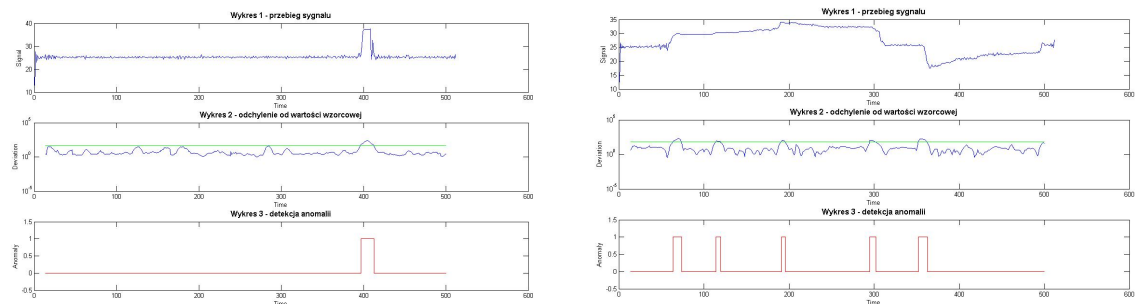
Rys.1 Zastosowanie funkcji autokorelacji - sygnały testowe

Na Rys.2 przedstawiono wyniki analizy z zastosowaniem modelu ARIMA tych samych sygnałów testowych. Działanie algorytmu przebiega następująco: na pierwszym etapie estymowany jest model ARIMA o zadanych parametrach p, d, q . Następnie obliczane są reszty dopasowania modelu do sygnału analizowanego. W kolejnym kroku obliczane są odchylenia standardowe reszt, których wykres przedstawiony jest w środkowym wierszu. Próg detekcji został zaznaczony linią poziomą. ostatni wykres w kolumnie przedstawia fakt wykrycia anomalii (lub jej brak) w analizowanym przebiegu odchyleń reszt.



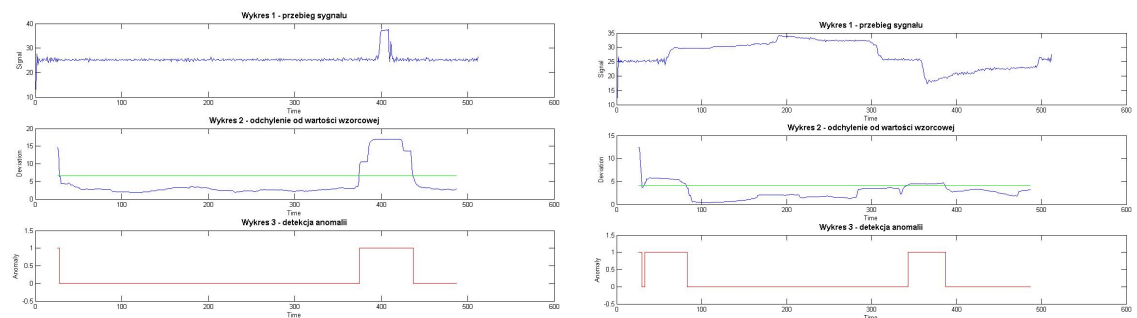
Rys.2 Zastosowanie modelu ARIMA - sygnały testowe

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie analizy sygnałów rzeczywistych. Na Rys. 3 i Rys 4 zaprezentowano wyniki w analogiczny sposób jak dla sygnałów testowych. W pierwszym wierszu – przedstawiono przebieg sygnału, w drugim wskaźnik odchylenia od autokorelacji wzorcowej (Rys3) i przebieg wartości odchyleń standardowych reszt (Rys.4), a w trzecim – wynik wykrycia anomalii w sygnale.



Rys.3 Zastosowanie funkcji autokorelacji - sygnały rzeczywiste

Porównując oba zestawy wyników, można stwierdzić, że metody autokorelacyjne dają lepsze wyniki zarówno w przypadku sygnałów, w których występuje znaczna zmiana wartości amplitudy sygnału w stosunku do jej poprzedniej wartości (Rys. 3 lewa kolumna), jak i w przypadku, gdy zmiana wartości sygnału nie jest znaczna (Rys. 3 prawa kolumna). Niemniej jednak, należy zauważyć, że zastosowanie modelu ARIMA umożliwia wcześniejsze wykrycie zmiany (Rys. 4 lewa kolumna), ale wykryty czas trwania zmiany w sygnale jest kilkukrotnie dłuższy niż w sygnale rzeczywistym.



Rys.4 Zastosowanie modelu ARIMA - sygnały rzeczywiste

Na podstawie wyników przedstawionych na Rys. 4, można stwierdzić, że metoda z zastosowaniem modelu ARIMA nie jest skuteczna w przypadku nieznacznych, ale długotrwałych zmian w sygnale. Z pewnością konieczne byłoby przetestowanie modelu z innymi wartościami parametrów oraz weryfikacja sposobu ustalania progu detekcji anomalii. Podczas przeprowadzonych badań, z których przykładowe wyniki przedsta-

wiono w niniejszym referacie została wyznaczona skuteczność obu testowanych metod. Dla przyjętych założeń dotyczących analizy sygnałów i ustalenia wartości progów detekcji, wykazano, że zastosowanie metody autokorelacji skutkowało 90% skutecznością wykrycia anomalii, w porównaniu z 70% skutecznością wykrycia anomalii przy zastosowaniu metody z modelem ARIMA.

5. Podsumowanie

Zastosowanie metod umożliwiających detekcję anomalii w sygnałach diagnostycznych może stanowić podstawę dla optymalnego planowania prac utrzymania ruchu oraz zapobiegania awariom. Istnieje bardzo wiele metod ukierunkowanych na detekcję anomalii, przy czym nie ma metody uniwersalnej. Konieczne jest prowadzenie dalszych badań związanych nie tylko z udoskonalaniem sposobu wykrywania zmian w sygnałach, ale także metod umożliwiających analizę zmian w obrębie samych anomalii.

W niniejszym referacie przedstawiono wyniki analizy sygnałów testowych oraz rzeczywistych z zastosowaniem dwóch metod parametrycznej i nieparametrycznej. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że mniej skuteczną metodą wykrywania anomalii w analizowanych sygnałach jest metoda bazująca na modelu ARIMA (70%). Większą skuteczność wykrywania anomalii uzyskano z zastosowaniem funkcji autokorelacji. W przeprowadzonych badaniach skuteczność tej metody wyniosła 90 %. Metody nieparametryczne i parametryczne analizy sygnałów mogą być stosowane do detekcji anomalii. Należy zwrócić szczególną uwagę na rodzaj sygnału, przyjmowane przez niego wartości i jeśli to możliwe wziąć pod uwagę jakiego rodzaju zmiany w sygnale mogą wystąpić, ponieważ metody te mają ograniczenia związane z ustaleniem parametrów analizy (m.in. długość okna analizy, wartości parametrów modelu, sposób wyznaczenia wartości progów detekcji anomalii). Należy jednak podkreślić, że metody korelacyjne są stosunkowo proste w implementacji i mogą być zastosowane do analizy różnego rodzaju sygnałów.

Literatura

- [1] Chandola V., Banerjee A., Kumar V.: Anomaly Detection: A survey , ACM Computer Surveys, 2009
- [2] Kalinichenko L., Shanin I., Taraban I.: Methods for Anomaly Detection: a survey, J.: Proceedings of the 16th All-Russian Conference "Digital Libraries: Advanced Methods and Technologies, Digital Collections" — RCDL-2014, Dubna, Russia, October 13–16, 2014.
- [3] Pena E., Assis M., Proenca M.: Anomaly detection using forecasting methods ARIMA and HWDS, Proceedings Jornadas Chilenas de Computación (JCC), Chile, 2013
- [4] Timofiejczuk A.: Analiza sygnałów niestacjonarnych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2014

Adam CHOLEWA¹, Jerzy ŚWIDER²

1) Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

2) Instytut Automatyzacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytworzenia, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) adam.cholewa@polsl.pl

2) jerzy.swider@polsl.pl

ZAGADNIENIA ENERGOCHŁONNOŚCI APLIKACJI NAPĘDOWYCH NA PRZYKŁADZIE ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO

1. Wstęp

W ostatnich latach termin Przemysł 4.0 jest pojęciem określającym zmiany zachodzące w sektorze przemysłowym. Zadaniem Przemysłu 4.0, nazywanego czasami czwartą rewolucją przemysłową, jest integracja Internetu rzeczy (IoT) i przetwarzania w chmurze obliczeniowej a także zwiększenie efektywności energetycznej oraz robotyzacja.

Robotyzacja jest jednym z głównych kierunków rozwoju gospodarki w krajach uprzemysłowionych. Zwiększenie powtarzalności produkcji przy jednoczesnym wzroście jakości, poprzez wykorzystanie robotów przemysłowych, pozwala na uzyskanie wysokiej precyzji, stabilnych parametrów pracy oraz sprawia, że urządzenia te są chętnie stosowane w różnych aplikacjach przemysłowych. Wysoka wydajność stanowisk zrobotyzowanych zapewnia wzrost niezawodności i efektywności produkcji, co w konsekwencji zapewnia wzrost wydajności wytwarzania. Niezawodna i precyzyjna praca robotów jest ściśle związana ze znacznym zużyciem energii elektrycznej. Potrzeba redukcji kosztów, przy jednoczesnym zachowaniu jakości oraz podniesieniu wydajności produkcji, wymogła konieczność wdrażania nowoczesnych rozwiązań związanych z ograniczeniem zużycia energii elektrycznej. Roboty przemysłowe, tak jak wszystkie maszyny, potrzebują energii do pracy, stąd zagadnienie efektywności energetycznej w odniesieniu do robotów przemysłowych jest w ostatnich latach przedmiotem rozważań w wielu ośrodkach zarówno naukowych, jak i przemysłowych szczególnie w kontekście Przemysłu 4.0. Badania nad efektywnością energetyczną wynikają z faktu powstawania nowych możliwości w podejmowaniu strategicznych decyzji, dotyczących procesów produkcyjnych. Racjonalne wykorzystanie energii elektrycznej, w szczególności w sektorze przemysłowym, w znaczny sposób wpływa na obniżenie kosztów produkcji, a w konsekwencji na zysk przedsiębiorstwa i jego konkurencyjność.

Przedmiotem rozważań jest ocena energochłonności napędów sześcioośiowego robota przemysłowego Fanuc ArcMate 100iB. W opracowaniu zaprezentowana została metodologia oceny energochłonności poszczególnych osi robota. Przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych, odnoszące się do monitorowania zużycia energii przez poszczególne jednostki napędowe obiektu rzeczywistego. Zarówno badania symulacyjne, jak i doświadczalne pokazały, że parametry pracy robota bardzo silnie wpływają na zużycie energii przez tego typu obiekty.

2. Stanowisko badawcze

W celu opracowania modelu numerycznego robota, który jest w korelacji z obiektem rzeczywistym (rys. 1) należało przeprowadzić identyfikację jego parametrów dynamicznych. Do tego celu została użyta standardowa procedura identyfikacyjna, stosowana w obszarze robotyki. Danymi wejściowymi do eksperymentu identyfikacyjnego były wyniki wielu pomiarów wartości momentów napędowych i parametrów kinematycznych, rozwijanych na wałach silników robota. Dodatkowo dokonano pomiaru wartości napięć

i natężeń prądów, doprowadzanych i odprowadzanych do sterownika robota, oraz wartości napięć i natężeń prądów doprowadzanych do jego silników. Na podstawie tak pozyskanych danych zostały wyznaczone wartości mocy chwilowych oraz pobranej energii elektrycznej, a także sprawności elektrotechniczne wszystkich badanych jednostek.



Rys.1. Robot Fanuc ArcMate 100iB ze stacją diagnostyczną [1]

Konstrukcja obiektu badań, który stanowi robot przemysłowy Fanuc Arc Mate 100iB, nie jest przystosowana do wykonania pomiarów wymienionych wielkości, niezbędnych do przeprowadzenia analiz, w tym położenia kątowych wałów enkoderów silników w poszczególnych osiach robota oraz wartości napięć i natężeń prądów elektrycznych w trzech fazach każdego z tych silników. Realizacja pomiarów wymaganych wielkości (rys. 2) była możliwa dzięki zbudowanej specjalnie w tym celu stacji diagnostycznej, umożliwiającej wykonanie badań w sposób bezinwazyjny. Bezinwazyjną metodę pomiaru należy w tym miejscu rozumieć jako konieczność przeprowadzenia pomiaru bez możliwości zdjęcia osłon poszczególnych silników, co oznacza jednocześnie brak bezpośredniego, fizycznego dostępu do samego silnika, jak również do jego enkodera. Procesy transmisji danych były realizowane przy użyciu aplikacji typu SCADA (rys. 3, rys. 4) opracowanej specjalnie na potrzeby realizacji tego typu badań, uruchomionej na przenośnej stacji roboczej. Karty pomiarowe oraz karty do komunikacji współpracowały z tego typu komputerem, poprzez zewnętrzne stacje integrujące, przystosowane do wykonywania obliczeń w czasie rzeczywistym.

3. Kalibracja modelu numerycznego

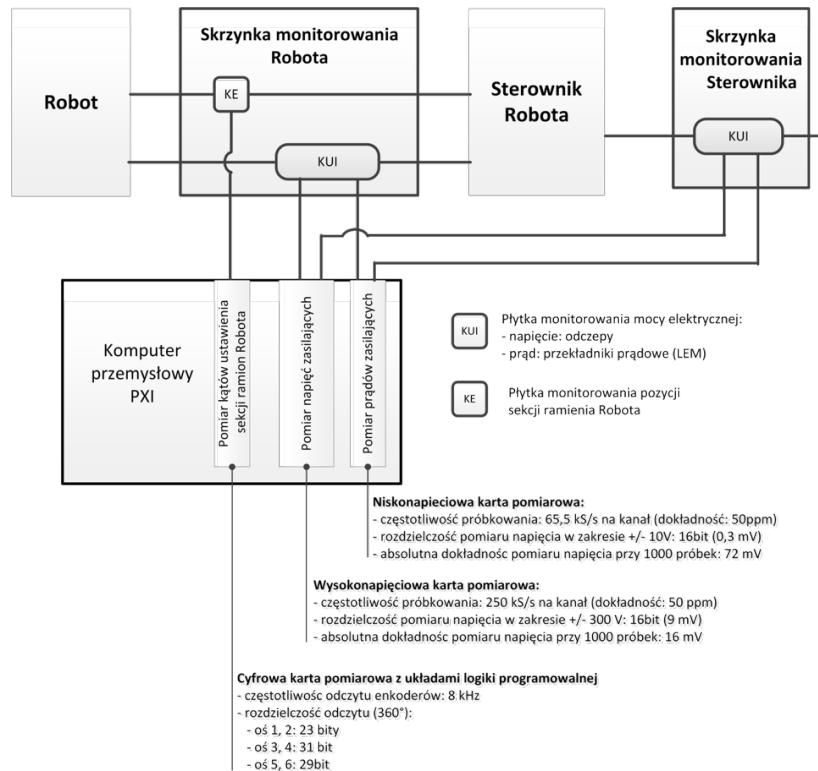
Zostały przeprowadzone badania, mające na celu potwierdzenie spójności opracowanego wcześniej modelu matematycznego, z obiektem rzeczywistym. W tym celu przemieszczano poszczególne osie robota, w pewnych fragmentach zakresów kątowych ich ruchu. Przeprowadzony test pozwolił na dokonanie korekty wartości parametrów modelu matematycznego.

4. Badania energochłonności

W ramach badań energochłonności robotów przemysłowych przeprowadzono analizę energochłonności procesu technologicznego transportu i manipulacji. Analiza polegała na wyznaczeniu ilości wydatkowanej energii mechanicznej przez każdy z czynników, mający wpływ na pobór energii elektrycznej w systemach napędowych badanej maszyny.

Przyjęto, że analiza energochłonności będzie realizowana w sposób, umożliwiający śledzenie wpływu chwilowych wartości wszystkich wymaganych parametrów, na całkowity pobór energii elektrycznej. W tym celu opracowano system do obliczania wartości mocy i energii mechanicznej, wydatkowanej w celu pokonania wszystkich rodzajów obciążeń oraz do obliczania wartości strat mocy i energii pobieranej z sieci elektrycznej, i jednocześnie pracujący w czasie rzeczywistym. System składa się z sześciu identycznych podsystemów, przypisanych sześciu przegubom robota. Każdy podsystem pobiera

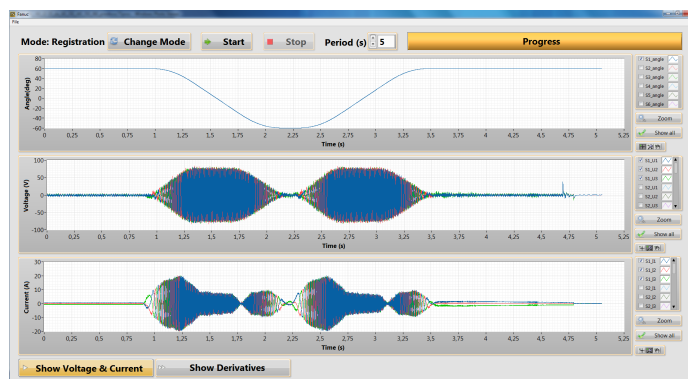
sygnały z wartościami zrealizowanych momentów napędowych i wartościami zrealizowanych parametrów kinematycznych, oraz sygnały z wartościami obliczonych całkowitych i cząstkowych momentów, obciążających wał silnika.



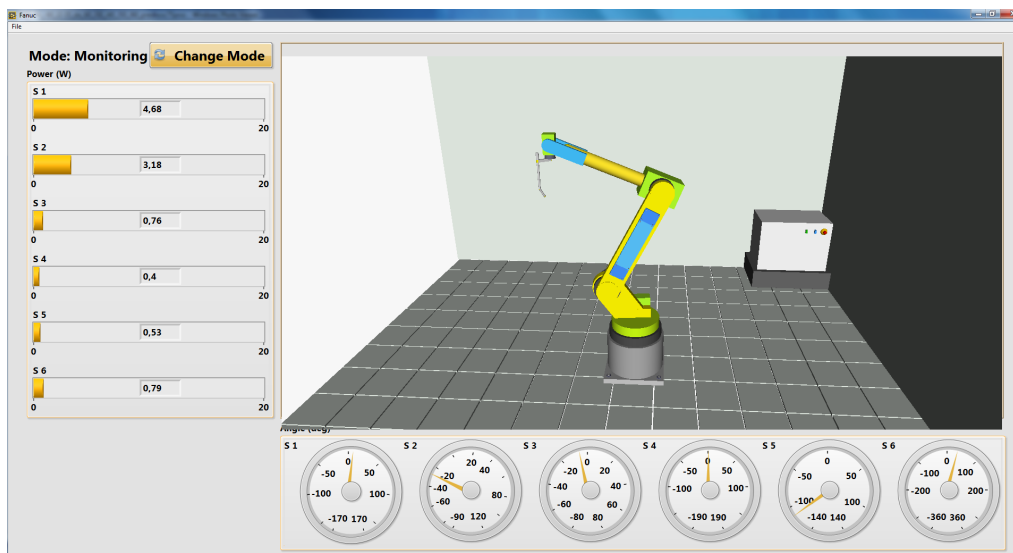
Rys.2. Schemat zrealizowanego toru pomiarowego [3]

Na wejściu, każdy podsystem pobiera również mapy strat mocy, odpowiednie do silnika zastosowanego w analizowanym przegubie. Na podstawie danych wejściowych podsystem oblicza wartości całkowitych i cząstkowych mocy oraz energii mechanicznych, mocy oraz energii strat i całkowitą wartość pobranej energii elektrycznej przez badany przegub, a także koszt tej energii. Do obliczeń wartości strat mocy zastosowano bloki, przechowujące mapy strat mocy pasywnych oraz aktywnych. W modelu zastosowano znormalizowane mapy strat mocy, które dostosowano do badanego silnika za pomocą normalizacji oraz ograniczenia maksymalnych wartości rozwijanych prędkości obrotowych i momentów napędowych.

Badanie energochłonności przeprowadzono dla przykładowego procesu transportu i manipulacji, którym był proces paletyzacji. Badanie polegało na dokonaniu akwizycji wartości położeń kątowych wałów enkoderów robota oraz wartości napięć i natężeń prądów elektrycznych w trzech fazach każdego z silników.



Rys.3. Okno aplikacji SCADA z wizualizacją przebiegów położeń kątowych, napięć i natężeń prądów w poszczególnych fazach



Rys.4. Okno aplikacji SCADA z wizualizacją robota

Położenia kątowe wałów enkoderów były przeliczane na wartości położeń kątowych członów robota, natomiast na podstawie wartości napięć i natężeń prądów elektrycznych obliczano wartości chwilowych mocy pobieranego prądu elektrycznego.

Pozyskane w ten sposób wartości parametrów kinematycznych wprowadzono do numerycznego modelu robota, w postaci sygnału położenia kąтового wałów enkoderów, zapisanych w dziedzinie czasu. Układy automatycznej regulacji położenia modelu CAE robota obliczały wartości prędkości kątovej oraz wartości sygnałów momentów napędowych na wałach wszystkich silników maszyny. Zmierzone, w sposób pośredni, prędkości kątovej wałów silników oraz członów robota oraz obliczone wartości momentów napędowych, zastosowano do obliczenia energochłonności wszystkich, wymaganych czynników.

5. Podsumowanie

Walidacja energochłonności procesu paletyzacji wykazała satysfakcjonującą zbieżność między całkowitą zmierzoną mocą chwilową i obliczoną całkowitą mocą chwilową oraz między całkowitą zmierzoną energią wejściową i obliczoną całkowitą energią wejściową, doprowadzaną do silników robota. Natomiast duże rozbieżności występują między cząstkowymi wartościami energii, pobieranymi przez napędy robota. Wyjaśnienie takiej rozbieżności wymaga dalszego badania napędów maszyny oraz uszczegółowienia jej modelu numerycznego.

Literatura

- [1] Cholewa A, Świder J, Zbilski A: Numerical model of Fanuc AM100iB robot; IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 145 [052002](#); 2016
- [2] Cholewa A, Świder J, Zbilski A: Verification of forward kinematics of the numerical and analytical model of Fanuc AM100iB robot; IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 145 [052001](#); 2016
- [3] Świder J, Cholewa A, Zbilski A: Komputerowo wspomaganą analizą energochłonności napędów elektrycznych maszyn w procesach transportu i manipulacji (in Polish); Gliwice, 2015; ISBN 978-83-62652-76-1

Krzysztof CIUPKE*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny,
Politechnika Śląska, Gliwice

*krzysztof.ciupke@polsl.pl

OCENA ZDOLNOŚCI PROCESÓW WIELOWYMIAROWYCH Z ZASTOSOWANIEM MODELI JEDNOSTRONNYCH

1. Wstęp

W większości procesów (szczególnie produkcyjnych) dąży się do tego, aby zmniejszyć występującą w nich wariancję i tym samym osiągnąć jak najlepszy poziom tzw. zdolności procesu, rozumianej jako stopień spełnienia stawianych wymagań. W tym celu stosuje się różne techniki, głównie bazujące na statystyce. Do oceny stopnia, w jakim proces spełnia wymagania stosuje się wskaźniki zdolności procesu PCI (ang. *process capability indices*). Wartości takich wskaźników ogólnie określane są jako stosunek wielkości zakładanego pola (obszaru) tolerancji oraz wielkości rzeczywistej wariancji uzyskiwanej w procesie.

Najprostszymi wskaźnikami są wskaźniki procesów jednowymiarowych (patrz np. [5]), tzn. takich, które opisywane są wartościami tylko jednej cechy. Wiele procesów przemysłowych musi być jednak opisywana w przestrzeni wielowymiarowej, dlatego też stosowane są odpowiednie wskaźniki wielowymiarowe MPCV (ang. *multivariate process capability indices*) [1,6-11]. Większość proponowanych w literaturze wielowymiarowych wskaźników oceny zdolności procesu jest definiowana przy założeniu rozkładu normalnego każdej analizowanej cechy procesu. W związku z tym, tzw. obszar procesu, czyli obszar, w którym znajdują się analizowane dane procesowe, ma kształt (hier)eliptyczny. Dodatkowo wartości cech procesu mogą być ze sobą skorelowane, co również wpływa na sposób obliczania takich wskaźników. Spotykane w literaturze wskaźniki MPCV bardzo często są definiowane za pomocą pojedynczej wartości [1,6,7,9,10], rzadko za pomocą kilku wartości [3,8].

W [3] zaproponowano wskaźnik oceny zdolności procesu, który można stosować niezależnie od rozkładu wartości cech a także niezależnie od występujących pomiędzy nimi korelacji. Niezależność od rozkładu a także korelacji jest możliwa do osiągnięcia dzięki zastosowaniu, do określenia obszaru procesu, modeli jednostronnych zaproponowanych przez profesora W. Cholewę w [2]. W niniejszym artykule przedstawiono modyfikację tego wskaźnika, uwzględniającą występujące w niektórych przypadkach przeszacowanie wielkości obszaru procesu.

2. Trójwartościowy wskaźnik oceny procesu wielowymiarowego

Jak wspomniano we wstępie, w [3] do oceny zdolności procesów jednowymiarowych zaproponowano zastosowanie wskaźnika, będącego uporządkowaną trójką:

$$MPCV = \{C_{pV}, PS, PD\},$$

gdzie składowa C_{pV} reprezentuje stosunek wielkości obszaru procesu do wielkości obszaru tolerancji, PS odpowiada za określenie względnej wielkości przesunięcia wartości przeciętnej procesu względem założonego celu (punktu w przestrzeni wielowymiarowej wynikającego np. z wartości nominalnych analizowanych cech), natomiast PD jest wielkością charakteryzującą względną odległość obszaru procesu od założonego celu. W [4] wykazano, że zastosowanie takiego podejścia pozwala na uzyskanie zna-

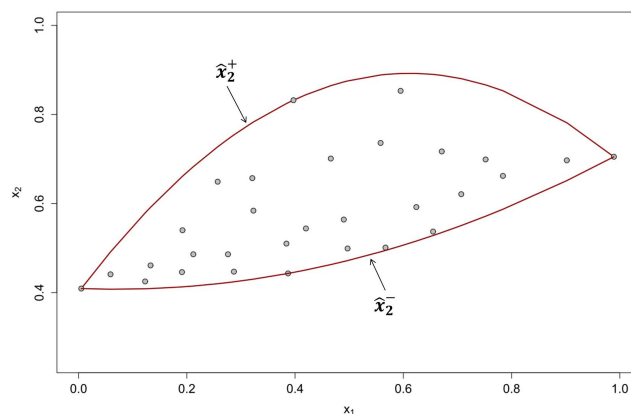
czenie większej informacji na temat analizowanego procesu niż w przypadku stosowania innych wskaźników, w szczególności wskaźników jednoczłonowych.

2.1. Składowa C_{pV}

Jeden z powszechnie stosowanych sposobów wyznaczania wartości wskaźników oceny zdolności procesów wielowymiarowych polega na określeniu stosunku wielkości obszaru tolerancji do wielkości obszaru określonego przez dane procesowe (tzw. obszar procesu) [5, 12].

Przy określeniu kształtu obszaru procesu przyjmuje się w zdecydowanej większości założenie, że wartości każdej analizowanej cechy mają rozkład normalny. Powoduje to, że obszar procesu ma kształt (hiper)eliptyczny. Założenie to jest jednak dość restrykcyjne i w praktyce nie zawsze jest spełnione.

Zaproponowano zatem, aby do określenia kształtu obszaru procesu zastosować jednostronne modele danych zaproponowane przez profesora W. Cholewę [2]. Założono przy tym, że stosowane będą modele co najwyżej stopnia drugiego, co pozwala w prosty sposób na uzyskanie wypukłości badanego obszaru. Przykład pary jednostronnych modeli stopnia drugiego pokazano na rys. 1. Przyjęto oznaczenie pary modeli jako $\{\hat{x}_2^-(x_1), \hat{x}_2^+(x_1)\}$, gdzie $\hat{x}_2^-(x_1)$, lub w skrócie \hat{x}_2^- , oznacza model ograniczający dane od dołu, natomiast $\hat{x}_2^+(x_1)$ (lub krócej \hat{x}_2^+) – model ograniczający dane od góry.



Rys.1. Przykład pary jednostronnych modeli danych

Wartość C_{pV} jest iloczynem wielkości obszaru procesu R_p oraz obszaru R_T wyznaczonego przez tolerancje każdej z v analizowanych cech (por. rys. 2) i wyrażana jest w procentach:

$$C_{pV} = \left(\frac{vol(R_p)}{vol(R_T)} \right)^{1/v} \times 100\% .$$

Wielkości obszaru procesu R_p można wyznaczyć np. całkując ten obszar:

$$vol(R_p) = \sum_{i=1}^{l+1} \prod_{j=1}^v \left((\hat{x}_j^+)(x_{ki}) - (\hat{x}_j^-)(x_{ki}) \right),$$

natomiast wielkości obszaru procesu R_T jest określona jako:

$$vol(R_T) = \prod_{i=1}^v (USL_i - LSL_i),$$

gdzie USL_i oraz LSL_i oznaczają górne i dolne wartości tolerancji poszczególnych cech.

Zmienna (cecha) x_k jest traktowana jako zmienna niezależna, dla której wyznaczonych jest l punktów całkowania w sposób następujący:

$$x_{ki} = \min(x_k) + (i - 1)h, \quad i = 1, \dots, l + 1,$$

gdzie krok całkowania wynosi:

$$h = \frac{\max(x_k) - \min(x_k)}{l}.$$

Ostatecznie, para jednostronnych modeli jest wyznaczana jako:

$$\hat{\mathbf{x}} = \bigcup_{i \in I} \{(\hat{x}_i^-), (\hat{x}_i^+)\},$$

gdzie $I = \{1, \dots, v\} \setminus \{k\}$, a modele jednostronne wszystkich zmiennych wyznaczane są w postaci wielomianu drugiego stopnia:

$$(\hat{x}_i^\pm) = a_2 x_k^2 + a_1 x_k + a_0, \quad i \in I,$$

przy czym $a_2 \leq 0$ dla \hat{x}_i^+ oraz $a_2 \geq 0$ dla \hat{x}_i^- .

2.2. Składowa PS

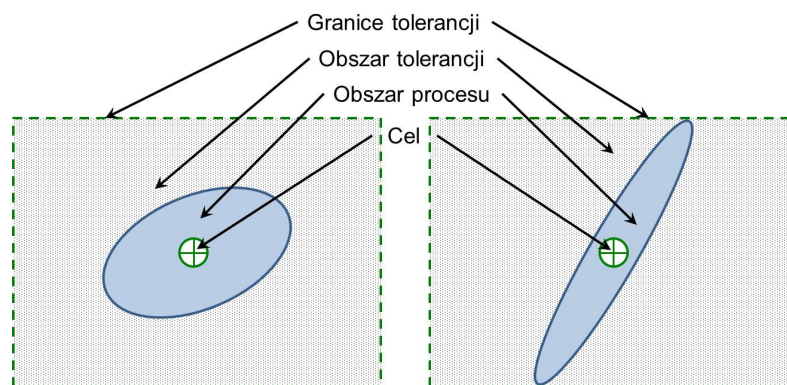
Przesunięcie procesu względem celu (np. wartości nominalnych) zdefiniowano jako względną odległość pomiędzy medianą $\mathbf{m} = \{m_i\}$ obliczoną na podstawie danych procesowych oraz celem (np. punktem określonym przez wartości nominalne) $\mathbf{T} = \{T_i\}$ ($i = 1, \dots, v$):

$$PS = \max_{i=1, \dots, v} \left(\frac{|T_i - m_i|}{D_i} \right) \times 100\%,$$

gdzie:

$$D_i = \begin{cases} USL_i - T_i & \text{jeżeli } m_i \geq T_i \\ T_i - LSL_i & \text{w przeciwnym wypadku} \end{cases}, \quad i = 1, \dots, v.$$

Należy zwrócić uwagę na fakt, że dwa procesy mogą mieć takie same wartości składowych C_{pV} oraz PS , a pomimo to różnić się znacznie od siebie, co pokazano na rys. 2. Wycelowane procesy różnią się kształtem obszaru, konieczne jest zatem wprowadzenie trzeciego składnika oceny procesu. Przyjęto, że będzie nim względna odległość procesu od celu, określona przez trzecią wartość wskaźnika - PD .



Rys.2. Przykład dwóch procesów o podobnych wielkościach obszarów

2.3. Składowa PD

W [3] zaproponowano, aby składnik PD reprezentował maksymalną, względną odległość pomiędzy modelami jednostronnymi a założonym celem. Okazuje się jednak, że w pewnych przypadkach może to prowadzić do niepoprawnych wyników. Stąd też opracowano zmodyfikowaną wersję, w której obliczana jest maksymalna względna odległość pomiędzy danymi procesowymi a celem. Wartość tę można obliczyć jako:

$$PD = \max_{i=1, \dots, v} [(\max(x_i) - T)/(USL - T), (T - \min(x_i))/(T - LSL)] \times 100\% .$$

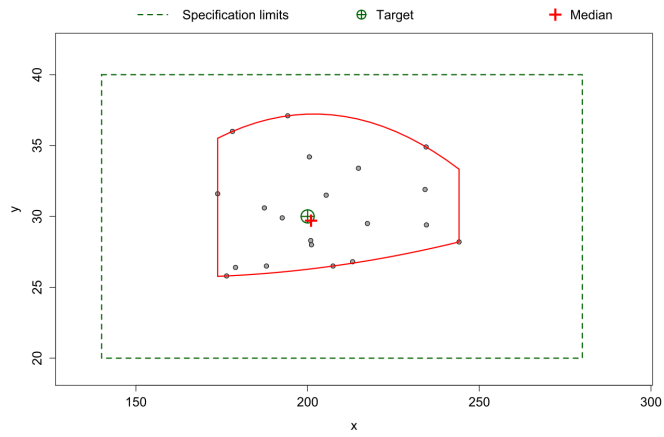
Porównanie wyników uzyskiwanych dla różnych procesów przed i po modyfikacji przedstawiono w kolejnym rozdziale.

3. Weryfikacja zaproponowanego wskaźnika oceny procesów

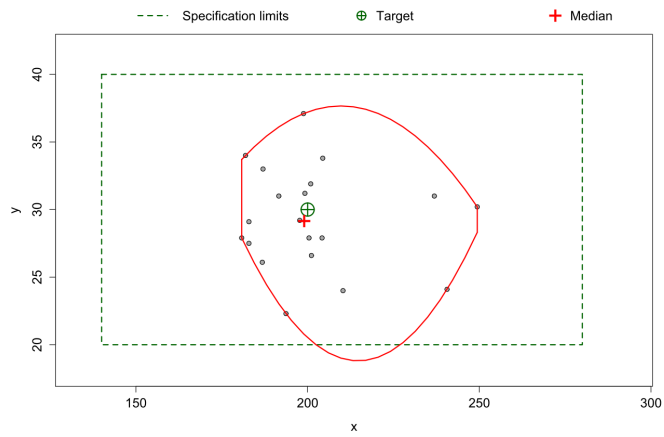
Do weryfikacji zaproponowanego wskaźnika, a w szczególności modyfikacji jego składnika PD zastosowano trzy dwuwymiarowe zbiory danych (oznaczone jako A, B i C), wygenerowane losowo z tego samego rozkładu prawdopodobieństwa. Graficznie zestawy danych wraz z otrzymanymi dla nich modelami jednostronnymi przedstawiono na rys. 3-5. W przypadku zbioru A (rys. 3) odległość pomiędzy modelami jednostronnymi a celem przedstawia rzeczywistą sytuację. Pary jednostronnych modeli określone dla kolejnych dwóch zbiorów danych przedstawione na rys. 4 i 5 nie obrazują rzeczywistego obrazu obszaru procesu. Pomimo tego, że w przykładzie B oba jednostronne modele są wielomianami drugiego stopnia, model "dolny" określa obszar procesu ze sporym nadmiarem. W niektórych przypadkach uzyskane modele mogą być reprezentowane przez funkcje liniowe, tak jak w przypadku zbioru danych C. Może to również doprowadzić do przeszacowania wielkości obszaru procesu. Aby uniknąć takich sytuacji zaproponowano modyfikację obliczania wartości składnika PD opisaną w p. 2.3. Uzyskane wartości składowych zaproponowanego wskaźnika przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości wskaźników oceny procesów wielowymiarowych dla danych testowych

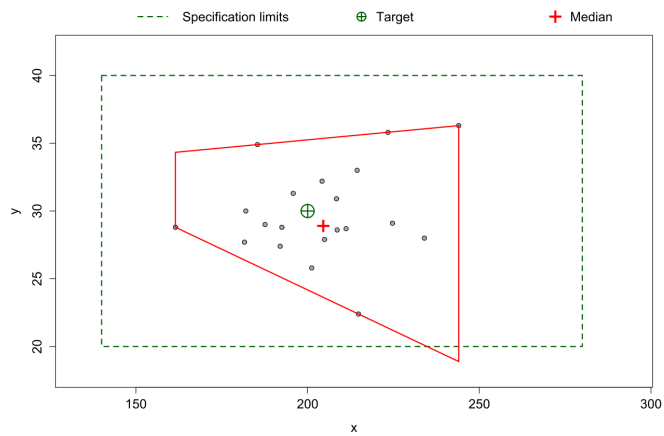
Zbiór danych	C_{pV} [%]	PS [%]	PD [%] przed modyfikacją	PD [%] po modyfikacji
A	48	3	72	71
B	56	9	112	77
C	55	11	111	76



Rys.3. Zbiór testowy A i uzyskane modele jednostronne



Rys.4. Zbiór testowy B i uzyskane modele jednostronne



Rys.5. Zbiór testowy C i uzyskane modele jednostronne

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wskazują, że zastosowanie modeli jednostronnych do określania obszaru procesu jest możliwe i celowe, szczególnie dla danych, które nie mają rozkładu normalnego. Do oceny zdolności procesu wielowymiarowego celowe jest zastosowanie wskaźnika więcej niż jednolicebowego, gdyż wskaźniki jednolicebowe nie dają właściwej informacji o procesie, co wykazano m.in. w [9]. Zaproponowany sposób określania wskaźnika oceny procesów wielowymiarowych daje znacznie więcej informacji o procesie, a dodatkowo modyfikacja składnika określającego względną odległość procesu od granic tolerancji pozwala na uzyskanie wyników bardziej odzwierciedlających rzeczywistą sytuację.

Niemniej jednak konieczne są dalsze badania, szczególnie w zakresie polepszenia obliczania wartości składnika C_{pv} , gdyż w przedstawianych przykładach B i C jest on obliczany z pewnym nadmiarem.

Literatura

- [1] Chen H.: A multivariate process capability index over a rectangular solid tolerance zone, *Statistica Sinica* 4 (2), ss. 749–758, 1993
- [2] Cholewa W., Kiciński J. (ed.): *Diagnostyka techniczna. Odwrotne modele diagnostyczne*, Politechnika Śląska, Gliwice, 1997
- [3] Ciupke K.: Multivariate process capability vector based on one-sided model, *Quality and Reliability Engineering International* 31 (2), ss. 313-327, 2015
- [4] Ciupke K.: Multivariate Process Capability Index Based on Data Depth Concept, *Quality and Reliability Engineering International* 32 (7), ss. 2443-2453, 2016
- [5] Kotz S., Johnson N.: *Process capability indices*, Chapman & Hall, 1993
- [6] Pan J., Lee C.: New capability indices for evaluating the performance of multivariate manufacturing processes, *Quality and Reliability Engineering International* 26 (1), ss. 3–15, 2010
- [7] Perakis M., Kekalakim E.: On the implementation of the principal component analysis-based approach in measuring process capability, *Quality and Reliability Engineering International* 28 (4), ss. 467-480, 2012
- [8] Shahriari H., Abdollahzadeh M.: A new multivariate process capability vector, *Quality Engineering* 21 (3), ss. 290–299, 2009
- [9] Taam W., Subbaiah P., Liddy J.W.: A note on multivariate capability indices, *Journal of Applied Statistics* 20 (3), ss. 339–351, 1993
- [10] Tano I., Vännman K.: A multivariate process capability index based on the first principal component only, *Quality and Reliability Engineering International* 29 (7), ss. 987-1003, 2012
- [11] Wang F., Du T.: Using principal component analysis in process performance for multivariate data, *Omega* 28 (2), ss. 185–194, 2000
- [12] Wang F.: Quality evaluation of a manufactured product with multiple characteristics. *Quality and Reliability Engineering International* 22 (2), ss. 225-236, 2006

**Marek FIDALI¹, Wojciech JAMROZIK², Sebastian PAWLAK,
Andrzej GRUSZCZYK**

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) marek.fidali@polsl.pl

2) wojciech.jamrozik@polsl.pl

DETEKCJA WAD POŁĄCZEŃ KLEJONYCH Z ZASTOSOWANIEM ULTRADŹWIĘKOWEJ TECHNIKI EMAT

1. Wstęp

Połączenia klejone odgrywają znaczącą rolę we współczesnym przemyśle motoryzacyjnym [1, 2]. Za pomocą klejów łączy się stalowe elementy karoserii pojazdów. Ponadto połączenia klejone stosowane są do mocowania szyb, spojlerów, emblematów, listew ozdobnych, wewnętrznych wykładzin, a także, jako materiał uszczelniający lub tłumiący drgania [3]. Z punktu widzenia wytwórców samochodów istnieje potrzeba skutecznej detekcji wad technologicznych połączeń klejonych. Aktualnie w większości przypadków wykrywanie wad technologicznych realizowane jest w ramach programu statystycznej kontroli procesu [6] poprzez stosowanie inwazyjnych i nieniszczących metod badawczych. Metody inwazyjne są dobrze scharakteryzowane w monografiach, normach europejskich, normach krajowych i zakładowych (np. PN-EN 15274:2009, PN-EN 15190:2009) [7, 8] i umożliwiają skuteczną ocenę stanu połączenia. Ich główną wadą są wysokie koszty m.in. wynikające z konieczności całkowitego zniszczenia podzespołu. Z tego powodu, by ograniczyć potrzebę częstego ich stosowania, połączenia klejone dodatkowo bada się metodami nieniszczącymi. Istnieje wiele nieniszczących metod badawczych dedykowanych do detekcji różnych wad materiałowych i nieciągłości strukturalnych [9]. Wśród nich do oceny stanu połączeń klejonych stosuje się metody wibroakustyczne [5], spektroskopowe [10], termograficzne [11, 12], holografii optycznej [13, 14], emisji akustycznej [15], radiograficzne [16] oraz ultradźwiękowe [17]. W praktyce przemysłowej jak dotąd najczęściej stosuje się klasyczne metody badań ultradźwiękowych. Alternatywną do klasycznych metod ultradźwiękowych jest technologia badań nieniszczących bazująca na przetworniku elektromagnetyczno - akustycznym EMAT (ang. Electro Magnetic Acoustic Transducer, EMAT). W artykule przedstawiono wyniki badań złącz klejonych z zastosowaniem technologii EMAT. Prace zrealizowano w ramach projektu UOD-DEM-1-495/001, Modułowe zautomatyzowane stanowisko produkcyjne wraz z oprzyrządowaniem do bezinwazyjnego potwierdzania jakości produktu w ramach Przedsięwzięcia pilotażowego Narodowego Centrum Badań i Rozwoju: Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej Demonstrator+.

2. Połączenia klejone i ich wady

Złącze klejone powstaje w wyniku wprowadzenia substancji klejącej (kleju) najczęściej między dwa elementy łączone i zapewnienie warunków pozwalających na powstanie połączenia adhezyjnego między warstwą kleju a powierzchniami łączonych elementów. Prawidłowo wykonane złącze klejone ma wiele zalet takich jak np. [2]:

- możliwość wykorzystania pełnej wytrzymałości materiałów łączonych (warstwa kleju nie wywołuje naprężeń w materiale i nie osłabia części łączonych);
- możliwość uzyskania złącza bez konieczności wykonywania otworów lub innych dodatkowych operacji technologicznych;

- równomierne rozłożenie naprężeń na całej powierzchni złącza;
- zdolność tłumienia drgań;
- zdolności uszczelniające;
- możliwość łączenia dowolnych materiałów bez niebezpieczeństwa powstawania degradacji powierzchni styku np. korozji elektrochemicznej.

Zalety te powodują, że w przemyśle motoryzacyjnym kleje stosowane są bardzo chętnie do połączeń strukturalnych podzespołów karoserii, połączeń elastycznych w tym połączeń zawijanych (gdzie pełnią rolę uszczelniającą) i innych. Do tego celu stosuje się różne kleje epoksydowe (EP) oraz poliuretanowe (PUR) [2]. Aplikacja połączeń klejonych przekłada się m.in. na usprawnienie i uproszczenie a zatem i obniżenie kosztów procesu montażu, ograniczenie czynności technologicznych wymagających obróbki skrawaniem, zmniejszenie hałasu na stanowisku pracy, podniesienie trwałości poprzez zwiększenie trwałości zmęczeniowej, wydłużenie czasu bezpiecznej eksploatacji, obniżenie kosztów produkcji np. poprzez zmniejszenie liczby spoin punktowych, obniżenie masy pojazdu poprzez optymalizację zużycia stali karoseryjnej i inne [3].

Poza licznymi zaletami połączeń klejonych, istnieją również czynniki mogące skutkować powstawaniem defektów i negatywnie wpływać na wytrzymałość oraz szczelność złącza klejonego. Można tutaj ogólnie wskazać czynniki technologiczne, powstałe w wyniku wystąpienia błędów produkcyjnych i eksploatacyjne, pojawiające się w trakcie użytkowania. Za typowe błędy technologiczne (produkcyjne) można uznać niewłaściwe przygotowanie powierzchni elementów klejonych, nierównomierne naniesienie warstwy kleju lub jego niewłaściwe zestalenie na skutek nieprawidłowych parametrów procesu. Czynniki eksploatacyjne to głównie zbyt długi czas eksploatacji, podczas którego zachodzi starzenie złącza i/lub negatywne oddziaływanie na połączenie klejone substancji chemicznych, wilgoci, zbyt wysokiej temperatury czy też długotrwałych przeciążeń [1].

Typowymi defektami mogącymi powstać w złączu klejonym w wyniku oddziaływania wyżej wymienionych czynników są [11]:

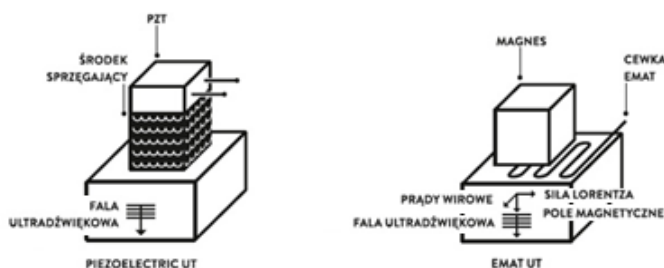
- rozwarstwienie,
- niedostateczne usieciowanie,
- pęknięcia,
- porowatość,
- pęcherze gazowe,
- brak adhezji („kissing bond”),
- brak lub niewystarczająca ilość kleju.

3. Technologia EMAT

Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat opracowano wiele różnorodnych metod badawczych pozwalających w sposób nieinwazyjny potwierdzić poprawność wykonanego produktu, zweryfikować nowo wdrażany proces itp. Metody te klasyfikuje się, jako metody nieniszczące (NDT – ang. Non Destructive Testing). Wśród metod nieniszczących nadających się do inspekcji połączeń klejonych wykonywanych między elementami ferromagnetycznymi jak np. blachami w przemyśle motoryzacyjnym może być technologia badań ultradźwiękowych wykorzystujących przetwornik elektromagnetyczno-akustyczny (EMAT). Technologia EMAT jest alternatywną metodą badań ultradźwiękowych, która różni się od klasycznej metody ultradźwiękowej (UT), sposobem wzbudzania fali ultradźwiękowej. W technologii EMAT wykorzystywana jest specjalna głowica zbudowana z cewki zasilanej prądem impulsowym o wysokiej częstotliwości i magnesu (elektromagnesu) będącego źródłem statycznego pola magnetycznego. Gdy głowica znajduje się w pobliżu metalowej próbki w materiale wzbudzone są prądy wirowe J_e . W wyniku wzajemnego oddziaływania prądów wirowych i statycznego pola

magnetycznego o natężeniu B powstaje siła Lorentza $f = J_e \times B$. Siła Lorentza obok zjawiska magnetostrykcji i magnetyzacji bierze udział w generowaniu fal sprężystych w materiale (Rys.). Obecność fal sprężystych w materiale, w którym wzbudzone zostały prądy wirowe powoduje, wytwarzanie w cewce prądu którego wartość jest proporcjonalna do zaburzeń sprężystych w materiale. Odpowiedni pomiar, przetwarzanie i analiza sygnałów prądowych powstających w cewce pozwala na opis sposobu rozchodzenia się fal sprężystych w materiale w okolicy cewki w związku z tym również identyfikację cech struktury materiałowej jak np. grubość materiału, obecność defektów strukturalnych itp. Opisana istota funkcjonowania głowicy EMAT umożliwia badania materiałów w sposób bezkontaktowy, co należy uznać za bardzo istotną zaletę tej technologii.

Odpowiednia konstrukcja głowicy uwzględniająca różne cechy cewki i konfigurację biegunów magnetycznych magnesu pozwalają na generowanie różnego rodzaju fal sprężystych (poprzecznych, wzdłużnych, powierzchniowych) w materiale, dzięki czemu technologia EMAT znajduje zastosowanie w inspekcji różnych konstrukcji mechanicznych wykonanych z metali.



Rys. 1. Sposób funkcjonowania technologii EMAT i jej porównanie z klasycznym sposobem badań ultradźwiękowych

4. Przykład zastosowaniem technologii EMAT do detekcji wad połączeń klejonych

W celu detekcji wad połączeń klejonych z zastosowaniem technologii EMAT przeprowadzono badania w warunkach laboratoryjnych na specjalnie do tego celu przygotowanych próbkach.

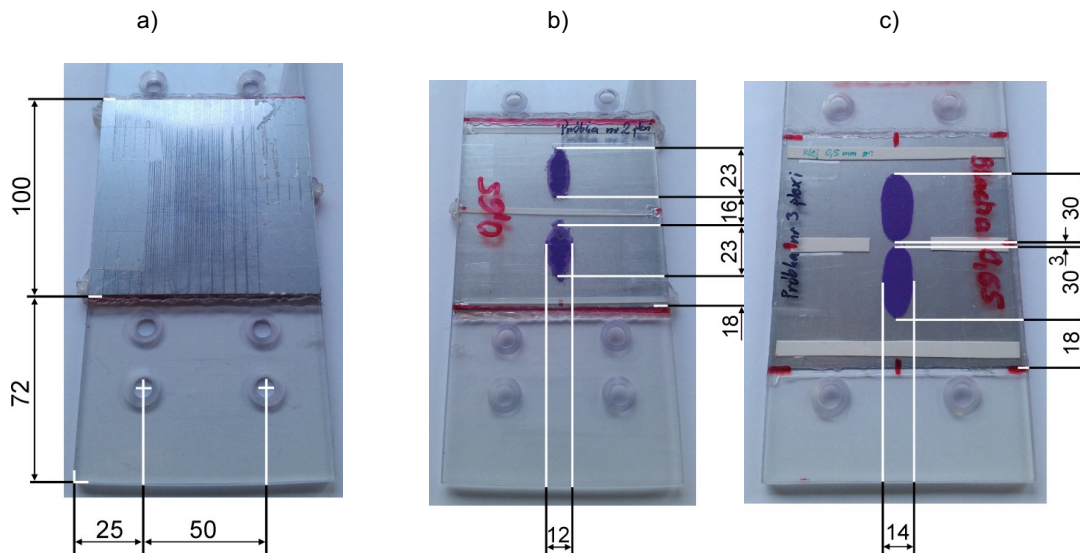
4.1. Próbki połączeń klejonych poddane badaniom

Dla potrzeb badań zaprojektowano dwie próbki składające się z blachy karoseryjnej (górną część próbki) oraz przezroczystej płyty z polimetakrylanumetylu (dolna część próbki), której zadaniem było umożliwienie obserwacji rzeczywistego kształtu warstwy kleju, jej położenia i celowo wytworzonych nieciągłości. Zastosowanie dolnej płyty z polimetakrylanumetylu (zamiast blachy stalowej) było dopuszczalne (bez wpływu na uzyskiwane wyniki badań), gdyż badania wstępne metodą EMAT wykazały, że ultradźwiękowa fala mechaniczna, ze względu na wysokie właściwości tłumiące kleju, zostaje całkowicie stłumiona w obszarach, pod którymi znajduje się klej. Próbki (Rys. 2) różniły się szerokością i grubością warstwy kleju oraz długością przerwy w ścieżce kleju. W obu przypadkach zastosowano blachę karoseryjną poszyciową o grubości 0,65 mm oraz płytę z polimetakrylanumetylu o grubości 5 mm. Z kolei, grubość warstwy kleju była różna w obu próbkach (1,0 mm dla próbki nr 1, 0,5 mm dla próbki nr 2).

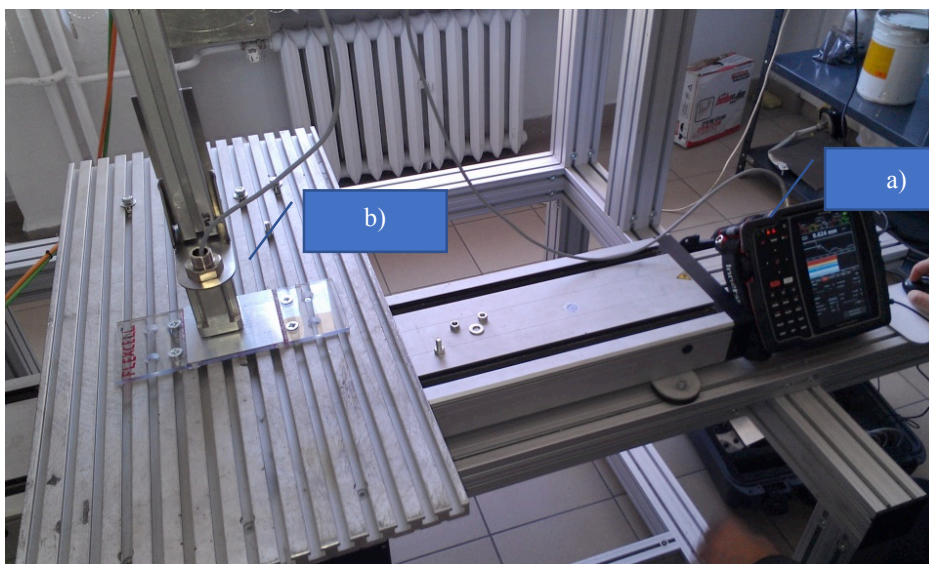
4.2. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym (Rys. 3) zlokalizowanym w laboratorium Katedry Spawalnictwa Politechniki Śląskiej. Stanowisko składało się z:

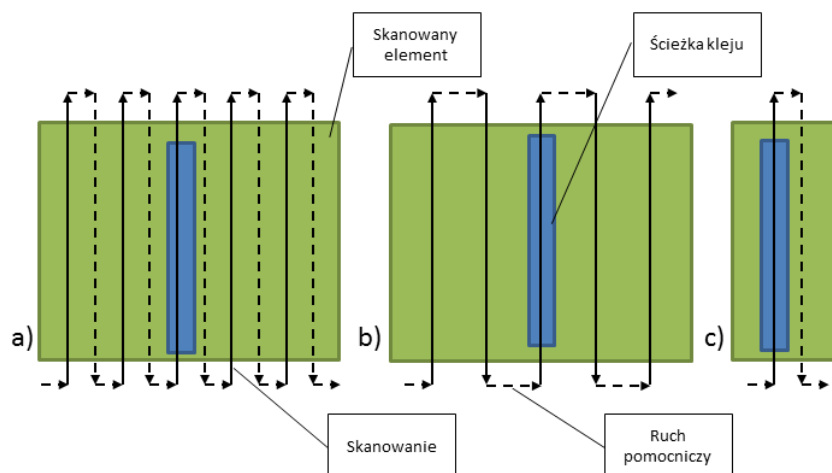
- a) Defektoskopu EMAT PowerBox H i głowicy spiralnej nr 274A0272 o średnicy 25.4mm i wysokość 57mm.
- b) Manipulatora portalowego TechnoSEL pozwalającego na pozycjonowanie głowicy badawczej w trzech osiach z dokładnością do 0,01 mm w każdej z osi.



Rys. 2. Ogólny widok i rozmiary jednej z próbek a) oraz widok ułożenia ścieżki kleju i rozmiarów symulowanych defektów w próbkach nr 1 a) i nr 2 c)



Rys. 3. Widok stanowiska do badań próbek w układzie X-Y głowicą elektromagnetyczno-akustyczną EMAT z widocznym defektoskopem PowerBox®-H



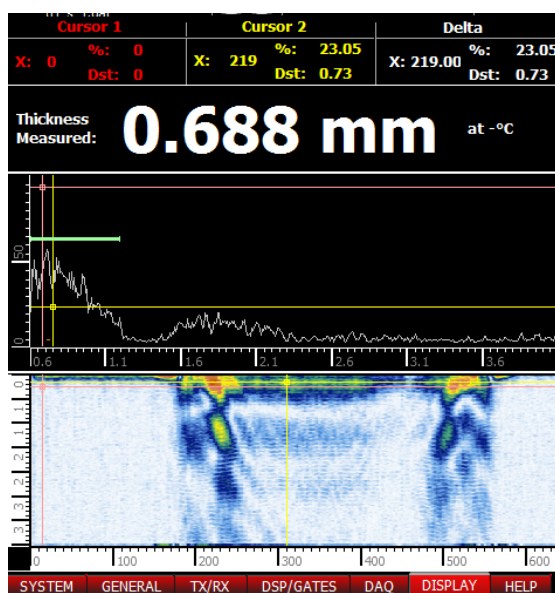
Rys. 4. Zaimplementowane ścieżki skanowania w manipulatorze

Głowicę z mocowano za pomocą specjalnego uchwytu do manipulatora. Głowica umożliwiała generowanie w badanej próbce poprzecznych fal powierzchniowych typu SH (Shear Horizontal). Przygotowane próbki poddano skanowaniu wzdłuż osi X, natomiast przesuw pomiędzy kolejnymi skanami wzdłuż osi Y.

Opracowano oprogramowanie pozwalające na skanowanie próbki, zgodnie ze schematami pokazanymi na Rys. .

Przed każdorazowym badaniem dokonywano konfiguracji ustawień parametrów czasowych i częstotliwościowych związanych z nadawaniem i odbiorem impulsów pomiarowych oraz przetwarzaniem sygnałów pomiarowych.

W trakcie badań obserwowano i rejestrowano przebiegi chwilowe sygnału na wykresie typu A (A-scan) i wykresie typu B (B-scan). Przykładowy ekran defektoskopu po przeprowadzeniu pojedynczego skanu próbki przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5. Przykładowy ekran defektoskopu po procesie skanowania

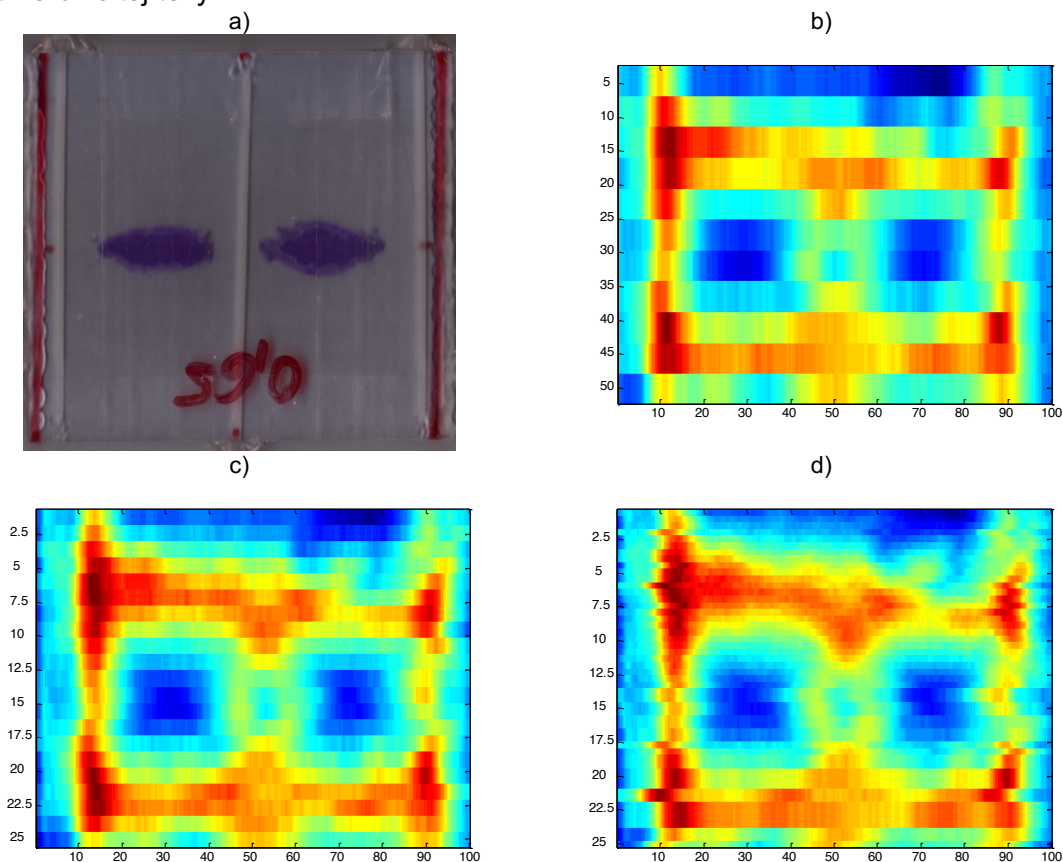
Badania na przygotowanym stanowisku prowadzono wg. następującej procedury:

1. montaż próbki,
2. korekta parametrów skanowania: pozycja początkowa, gęstość skanowania, prędkość,
3. ustawienie odległości głowicy badawczej od czoła badanej próbki,
4. ustawienie parametrów defektoskopu,

5. zbieranie danych. Dla każdego skanu rejestrowano pojedynczy plik z wartościami przebiegów sygnału odpowiedzi na impuls pomiarowy,
6. przetwarzanie i analiza zebranych danych,
7. prezentacja wyników.

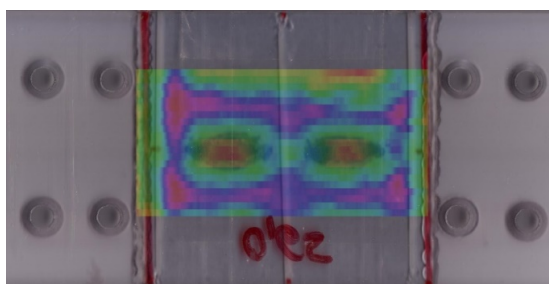
4.3. Wyniki przeprowadzonych badań

Przygotowane próbki poddano procesowi skanowania w celu uzyskania mapy tłumienia fal ultradźwiękowych na całej powierzchni próbki. Skanowanie przeprowadzono z prędkością 25 mm/s i różnym dystansem pomiędzy przebiegiem każdej ścieżki skanowania. Odległości między ścieżkami skanowania wynosiły 5, 2,5 i 1 mm. Na Rys. 6. zaprezentowano rozkład kleju w próbce nr 1 i mapy (skany typu C) uzyskane w wyniku skanowania z różnymi odległościami między ścieżkami poszczególnych skanów (różną rozdzielczością). Bez względu na odległość między ścieżkami we wszystkich przypadkach uzyskane mapy tłumienia odwzorowują położenie kleju w badanej próbce. W celu porównania uzyskanych map tłumienia z rzeczywistym obrazem rozkładu kleju w próbce, możliwym do uzyskania dzięki zastosowaniu przezroczystego tworzywa sztucznego, obrazy nałożono na siebie, czego efekt pokazano na Rys. 7. Złożone obrazy wyraźnie potwierdzają zgodność położenia kleju widocznego na rzeczywistej próbce i mapie tłumienia uzyskanej w wyniku skanowania. Porównując mapy tłumienia próbek uzyskane w wyniku skanowania z różnymi rozdzielczościami zaobserwowano, że zwiększenie rozdzielczości poprawia, jakość obrazu mapy tłumienia jednak nie wpływa w znaczący sposób na poprawę widoczności szczegółów odnoszących się do krawędzi obszarów, w których występuje i nie występuje klej. Czynnikiem wpływającym na odwzorowanie krawędzi obszarów zdaniem autorów jest konstrukcja głowicy EMAT. W badaniach stosowano jeden rodzaj głowicy, dlatego na tym etapie badań nie można potwierdzić tej tezy.

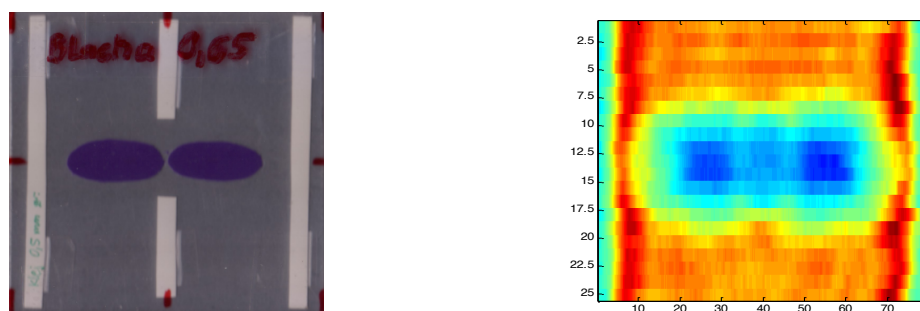


Rys. 1. Rozkład kleju w skanowanej próbce nr 8 (a) i wyniki skanowania dla rozdzielczości (b) 5mm, (c) 2,5mm d) 1mm

W przypadku próbki nr 2, w której symulowano niewielką nieciągłość w ścieżce kleju, zastosowano rozdzielczość skanowania 2,5mm a wygląd próbki z rozkładem kleju i obraz mapy tłumienia uzyskanej w wyniku skanowania przedstawiono na Rys. 8. W tym przypadku również można w jednoznaczny sposób zlokalizować położenie kleju pomimo różnicy w grubości warstwy kleju. Ze względu na niewielką przerwę w ścieżce kleju nie może ona być w sposób jednoznaczny zidentyfikowana. Porównując wyniki uzyskane dla badanych próbek można stwierdzić, że dla określonej głowicy EMAT istnieje graniczny rozmiar przerwy w ścieżce kleju, która może być jednoznacznie wykryta za pomocą skanowania. Można również stwierdzić, że istnieje wpływ grubości warstwy kleju na uzyskiwane wyniki. W przypadku zastosowanej głowicy EMAT istnieje graniczna czułość, przy której wykrywana jest skutecznie obecność kleju o odpowiedniej grubości, w badanym przypadku jest to grubość 0,5 mm. Ponieważ na krawędziach warstwy kleju grubość kleju w naturalny sposób spada, dlatego nie było możliwe jednoznaczne zidentyfikowanie krawędzi kleju co przełożyło się na brak jednoznacznego odwzorowania na mapie tłumienia dokładnego kształtu obszarów z klejem. Niewielkie niedokładności w obrazie mapy tłumienia wynikają również z braku synchronizacji między chwilą, w której rozpoczęto zbieranie sygnałów a konkretnym położeniem głowicy.



Rys. 2. Obraz powstały w wyniku nałożenia na siebie obrazu przedstawiającego rzeczywiste położenie kleju i obrazu mapy tłumienia uzyskanego w wyniku skanowania próbki z dokładnością 2,5mm



Rys. 3. Wygląd próbki nr 2 i obraz mapy tłumienia powstały w wyniku skanowania próbki z rozdzielczością 2,5mm

5. Podsumowanie

Badania próbek klejonych potwierdziły przydatność technologii EMAT w detekcji wad połączeń klejonych a w szczególności wykrywaniu nieciągłości ścieżki kleju i potwierdzaniu obecności warstwy kleju we wskazanych miejscach. W zależności od przyjętego sposobu skanowania możliwe jest stosunkowo dokładne i szybkie lokalizowanie miejsca występowania nieprawidłowości w złączach klejonych. Należy przypuszczać, że dobór odpowiedniej głowicy EMAT i takich parametrów skanowania jak prędkość i rozdzielczość, pozwoli na dokładne odwzorowanie geometrii kleju i identyfikację małych defektów połączenia klejonego. Należy jednak pamiętać, że dokładne odwzorowanie cech połączenia klejonego będzie procesem czasochłonnym i w przypadku rzeczywistych warunków kontroli na linii produkcyjnej może powodować wydłużenie czasu operacyjnego dedykowanego dla pojedynczego detalu. Niemniej jednak technologia

EMAT pozwala w zdecydowanie szybszy sposób wykrywać defekty połączeń klejonych niż np. klasyczne metody ultradźwiękowe i po odpowiedniej adaptacji może należeć zastosowanie w zautomatyzowanym gnieździe produkcyjnym do weryfikacji poprawności połączeń klejonych w obszarach detali produkcyjnych, w których może wystąpić potencjalna wada.

Literatura

- [1] Kowalczyk J.: Nieniszczące metody oceny połączeń klejonych. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, 2008, nr 63, s. 45-50.
- [2] Vedula S.: Infrared thermography and ultrasonic inspection of adhesive bonded structures, Overview and validity. Clemson University, 2010.
- [3] Adams R. D.: Adhesive bonding: science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited, England 2005.
- [4] Rams B.: Zastosowanie klejenia w połączeniach zgrzewanych metodą FSW. Przegląd Spawalnictwa, 2009, nr 3, s. 33-38.
- [5] Maeva E. Yu., Seviaryna I., Chapman G. B., Severin F. M.: Monitoring of adhesive cure process and following evaluation of adhesive joint structure by acoustic techniques. University of Windsor, Windsor, Canada 2006.
- [6] Sałaciński T.: SPC statystyczne sterowanie procesami produkcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- [7] PN-EN 15274:2009 Kleje ogólnego przeznaczenia do połączeń konstrukcyjnych, wymagania i metody badań.
- [8] PN-EN 15190:2009 Metody badań do oceny długookresowej trwałości klejowych połączeń konstrukcyjnych metali.
- [9] Onoszko K.: Metody stosowane w badaniach nieniszczących. Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 2012, nr 41, s. 11-14.
- [10] Allin J. M.: Disbond detection in adhesive joints using low-frequency ultrasound. University of London, 2002.
- [11] Srajbr C., Dillenz A.: Active thermography – NDT method for structural adhesive and mechanical joints. Automotive Circle International, 2012.
- [12] Shin P. H.: Non-destructive inspection in adhesively bonded joints using pulsed phase thermography. Raleigh, North Carolina 2013.
- [13] Shull P. J. (ed.) Nondestructive Evaluation. Theory, Techniques and Applications. Marcel Dekker, Inc. 2001.
- [13] Huke P., Focke O., Falldorf C., Von Kopylow C., Bergmann R.: Contactless defect detection using optical methods for non destructive testing. BIAS Bremen Institute of Applied Beam Technology, Bremen, Germany 2011.
- [14] Heida J.H., Platenkamp D. J.: Evaluation of in-service non-destructive inspection methods for composite aerospace structures. National Aerospace Laboratory NLR, 2011.
- [15] Multimode adhesive bond testing application guide. Olympus, http://www.olympus-ims.com/pl/downloads/download/?file=285213057&fl=en_US (stan na dzień: 14.10.2014).
- [16] Vontobel P., Lehmann E., Frei G.: Neutrons for the study of adhesive connections. Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland 2004.
- [17] Stachurski M.: Nowoczesne metody ultradźwiękowego badania materiałów oraz nowoczesne przetworniki ultradźwiękowe. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2007, nr 4, s. 45-51.
- [18] Więcek B., May G. D.: Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania. Wydawnictwo PAK, 2011.
- [19] Minkina W.: Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [20] Maldague X. P. V.: Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. John Wiley & Sons, INC., 2001.

Marek FIDALI¹, Krzysztof ROCZEK²,

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) marek.fidali@polsl.pl

2) krzysztof.roczek@opel.com

ZASTOSOWANIE TRANSFORMAT PARKA I CLARKA W OCENIE STANU SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH

1. Wstęp

Współczesny przemysł wykorzystuje silniki elektryczne na ogromną skalę. Najczęściej są to indukcyjne asynchroniczne silniki elektryczne prądu przemiennego głównie trójfazowe o małej i średniej mocy, z czego większość stanowią silniki klatkowe, zazwyczaj o dwóch parach biegunów. Znajdują one najczęściej zastosowanie w maszynach pomocniczych (wentylatory, pompy, przekładnie). W przypadku dużych maszyn, głównie w przemyśle ciężkim spotyka się silniki synchroniczne dużej mocy. W przypadku maszyn wieloosiowych i w systemach automatyki chętniej stosuje się serwonapędy i serwo-silniki. Silniki elektryczne należą do maszyn, których poziom awaryjności uzależniony jest od szeregu czynników mogących występować w warunkach przemysłowych. Główne z nich to [3]:

- niska jakość energii elektrycznej np.: asymetria napięcia, zniekształcenia harmoniczne, stany nieustalone;
- zakłócenia elektryczne generowane np. przez przemienniki częstotliwości;
- przeciążenia elektryczne i mechaniczne, niekontrolowane rozruchy;
- czynniki mechaniczne wynikające z eksploatacji i/lub nieprawidłowej obsługi np.: niewspółosiowość, niewyrównoważenie wirnika, nadmierne luzy, zużycie łożysk, miękka podstawa, itp.; nieprawidłowe lub niedostateczne smarowanie łożysk,
- czynniki środowiskowe np. zapylenie powietrza, substancje chemiczne, duża wilgotność, wysoka temperatura lub duża zmienność temperatury otoczenia (np. w przypadku silników eksploatowanych na zewnątrz).

Jak pokazują raporty firm ubezpieczeniowych np. Allianz w przypadku silników indukcyjnych niskiej i średniej mocy najczęściej bo w około 51% wstępują uszkodzenia łożysk, uszkodzenia stojana stanowią ok. 25%, a wirnika - ok. 6%. Inne uszkodzenia to ok. 16%. Natomiast w przypadku silników dużej mocy dominują uszkodzenia stojana (ok. 68%). Problemy z wirnikiem i łożyskami występują w ok. 13%. Inne uszkodzenia to tylko 6%. Dominacja uszkodzeń stojana wynikać może z nieprawidłowej eksploatacji silników, które bardzo często są łożyskowane ślizgowo, co często jest przyczyną powstawania nadmiernych luzów i ocierania wirnika o stojan.

W diagnostyce napędów elektrycznych wykorzystywane są różnorodne parametry diagnostyczne, które ze względu na mierzone wielkości fizyczne można podzielić na elektryczne, wibroakustyczne, cieplne, trybologiczne (badania środków smarnych) i chemiczne. Do najczęściej stosowanych należą metody bazujące na pomiarach parametrów elektrycznych, pomiarach drgań i pomiarach temperatury.

W artykule omówiono metody oceny stanu silników na podstawie parametrów elektrycznych, przy czym głównie skoncentrowano się na możliwościach praktycznego zastosowania transformatorów Parka i Clarka sygnałów prądu stojana do diagnostyki silników elektrycznych. Rezultaty stosowania tego typu transformatorów mogą być wykorzystane w układach diagnozujących stosujących sieci neuronowe. Koncepcję takiego układu do diagnostyki napędów linii pras zaprezentowano w końcowej części artykułu.

2. Diagnostyka silników na podstawie parametrów elektrycznych

Uwzględnianie parametrów elektrycznych stanowi nowoczesne i często niedooceniiane podejście w diagnozowaniu maszyn elektrycznych. Diagnostyka na podstawie parametrów elektrycznych obejmuje zagadnienia pomiaru i analizy takich wielkości elektrycznych jak: prądy fazowe, napięcia fazowe i międzyfazowe, moc, rezystancja obwodów elektrycznych i izolacji, natężenie pola magnetycznego itp. Parametry te pozwalają wykrywać większość uszkodzeń elektrycznych i mechanicznych silników takich jak: przerwa w uzwojeniu stojana, brak styku na zaciskach, uszkodzenia klatki wirnika, uszkodzenie elementów łożyska, ekscentryczność, asymetria zasilania, występowanie wyładowań niepełnych w układzie izolacyjnym, wyładowań elektrycznych w łożyskach.

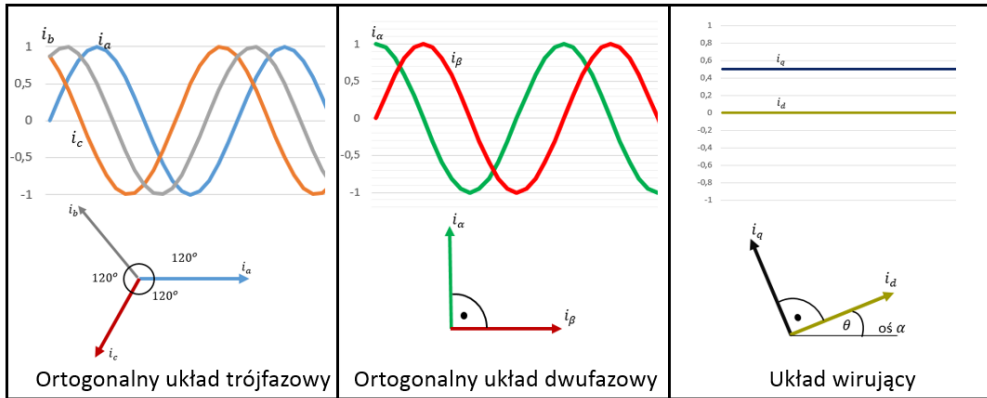
Diagnostyka parametrów elektrycznych może być zrealizowana przy stosunkowo niskich nakładach finansowych ze względu na powszechnie dostępny i przystępny cenowo sprzęt pomiarowy jak woltomierze, amperomierze cęgowy, specjalizowane analizatory parametrów elektrycznych i jakości energii itp. Do pomiaru prądu można wykorzystać klasyczne przetworniki prądowe lub rozwiązania bazujące na czujnikach Halla lub cewkach Rogowskiego co wpływa na niskie koszty implementacji metody a także bezpieczeństwo montażu i obsługi.

Do nowoczesnych metod diagnozowania napędów elektrycznych w czasie pracy ustalonej pod stałym obciążeniem można zaliczyć analizę widmową prądu stojana (MCSA – Motor Current Signature Analysis). Genezą stosowania analizy widmowej prądu stojana było odkrycie w 1994 relacji między składowymi drganiowymi i prądowymi. W metodzie MCSA wykorzystuje się widmo prądu fazowego stojana, w którym w zależności od stanu technicznego maszyny (rodzaju uszkodzenia) można zidentyfikować charakterystyczne wzorce składowych widmowych. Liczne badania prowadzone z stosowaniem metody MCSA pozwoliły powiązać odpowiednie składowe częstotliwościowe widma prądu z wieloma bardzo dobrze znanymi uszkodzeniami napędów elektrycznych np. przerwy klatek wirników, ekscentryczność statyczną i dynamiczną czy uszkodzenia łożysk.

Niewątpliwą zaletą metody MCSA jest łatwy i stosunkowo prosty dostęp do źródła informacji, jakim jest sygnał prądu, co czyni, że metoda może być stosowana zarówno do nadzoru ciągłego jak i doraźnego. Jako wadę metody MCSA szczególnie w przypadku diagnozowania uszkodzeń łożysk tocznych jest duży poziom zakłóceń w widmie sygnału prądowego często uniemożliwiający detekcję składowych związanych z defektem łożyska. Alternatywnym rozwiązaniem rzadko stosowanym w praktyce przemysłowej, ale mającą duży potencjał diagnostyczny może być zastosowanie przekształceń Clarka i Parka [2].

3. Przekształcenia Clarka i Parka

Prekursorem stosowania analizy modułu wektora przestrzennego (wektora Parka) do wykrywania uszkodzeń w silnikach elektrycznych stał się prof. Jafar Zarei. Celem transformaty Clarka jest przedstawienie wypadkowego wektora prądu na którego wpływ mają trzy trójfazowe prądy wygenerowane z uzwojeń rozmieszczonych względem siebie o 120 stopni (i_a, i_b, i_c) do ortogonalnego układu dwufazowego (i_α, i_β). W przypadku transformaty Parka ortogonalny układ dwufazowy przekształcany jest do układu współrzędnych wirujących (i_d, i_q). Przekształcenie to jest bardzo często stosowane do sterowania układami, które charakteryzują się dużą zawartością harmonicznej podstawowej oraz nie wykazują znaczących zmian skokowych. Rysunek 1 prezentuje wymienione układy dla poszczególnych transformat.



Rys. 1 Przekształcenia Clarka i Parka

Załóżmy, że prądy fazowe można zdefiniować w następujący sposób:

$$i_a(t) = i_f \cos(2\pi f_e t - \alpha_0) \quad (3)$$

$$i_b(t) = i_f \cos\left(2\pi f_e t - \frac{2\pi}{3} - \alpha_0\right) \quad (4)$$

$$i_c(t) = i_f \cos\left(2\pi f_e t + \frac{2\pi}{3} - \alpha_0\right), \quad (5)$$

gdzie i_f jest prądem fazowym, a α_0 - kątem fazowym.

Transformata Clarka może być zdefiniowana w następujący sposób:

$$i_\alpha = \frac{2}{3}i_a - \frac{1}{3}(i_b - i_c) \quad (6)$$

$$i_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \quad (7)$$

W sytuacji, gdy i_a pokrywa się z i_α , a suma $i_a + i_b + i_c$ wynosi 0, wówczas transformata będzie wyrażona:

$$i_\alpha = i_a \quad (8)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + 2i_b), \quad \text{gdzie } i_a + i_b + i_c = 0 \quad (9)$$

Jak pokazuje rysunek 1 transformata Parka przekształca dwufazowy układ prostokątny w układ wirującego prądu wirnika:

$$i_d = i_\alpha \cos(\theta) + i_\beta \sin(\theta) \quad (10)$$

$$i_q = i_\beta \cos(\theta) - i_\alpha \sin(\theta), \quad (11)$$

gdzie:

i_d, i_q - układ wirujących prądów

i_α, i_β - referencyjny, prostokątny układ współrzędnych

θ - kąt obrotu wirnika

Biorąc pod uwagę pierwszą i drugą harmoniczną, prądy fazowe można wyrazić za pomocą wyrażeń:

$$i_a(t) = i_f \cos(2\pi f_e - \alpha_0) + i_{dl} \cos[(2\pi(f_e - f_v)t - \beta_l] + i_{dr} \cos[(2\pi(f_e - f_v)t - \beta_r] \quad (12)$$

$$i_b(t) = i_f \cos\left(2\pi f_e - \alpha_0 - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{dl} \cos\left[(2\pi(f_e - f_v)t - \beta_l - \frac{2\pi}{3}]\right] + i_{dr} \cos\left[(2\pi(f_e - f_v)t - \beta_r - \frac{2\pi}{3}]\right] \quad (13)$$

$$i_c(t) = i_f \cos\left(2\pi f_e - \alpha_0 + \frac{2\pi}{3}\right) + i_{dl} \cos\left[(2\pi(f_e - f_v)t - \beta_l + \frac{2\pi}{3}]\right] + i_{dr} \cos\left[(2\pi(f_e - f_v)t - \beta_r + \frac{2\pi}{3}]\right] \quad (14)$$

Zakładamy, że przy częstotliwości $(f_e - f_v)$ i $(f_e + f_v)$ dolna i górna składowa wstęgi bocznej wynosi odpowiednio: i_{dl} oraz i_{dr} . β_l i β_r są kątami fazowymi wstęgi bocznej dolnej i górnej. Dla uszkodzonego rotora moduł wektorów Parka można wyrazić w taki sam sposób jak przy założeniu, że $f_e > f_v$:

$$|i_d + ji_q|^2 = \frac{2}{3}(i_f^2 + i_{dl}^2 + i_{dr}^2) + 3i_f i_{dl} \cos(2\pi f_v t - \alpha + \beta_l) + 3i_f i_{dr} \cos(2\pi f_v t + \alpha - \beta_r) + 3i_{dl} i_{dr} \cos(4\pi f_v t + \beta_l + \beta_r) \quad (15)$$

Moduł wektora Parka jest generowany, jako suma składowych stałych oraz składowych o częstotliwościach f_v i $2f_v$. W przypadku, gdy $f_e < f_v$ moduł Parka wynosi:

$$|i_d + ji_q|^2 = \frac{2}{3}(i_f^2 + i_{dl}^2 + i_{dr}^2) + 3i_f i_{dl} \cos(2\pi|2f_v - f_e|t - \alpha + \beta_l) + 3i_f i_{dr} \cos(2\pi f_v t + \alpha - \beta_r) + 3i_{dl} i_{dr} \cos(4\pi f_v t + \beta_l + \beta_r) \quad (16)$$

W tym przypadku w moduł wektora Parka jest wyrażony za pomocą składowej stałej oraz składowych o częstotliwościach: f_v , $2f_v$ i $|2f_v - f_e|$. Elementy związane z uszkodzeniami mnożone są w powyższych wzorach przez $3i_f$, dzięki czemu defekty mogą być wykryte w bardzo wczesnej fazie.

4. Symulacja wektorów Parka

Wektory Parka i Clarka mogą posłużyć do sporządzenia figur Lissajou, które pokazą w przejrzysty sposób odchyłki prądów poszczególnych faz od wartości referencyjnych spowodowane np. przez uszkodzenia łożyska. W celu uwypuklenia uszkodzeń warto na sygnale prądu przeprowadzić również transformatę Hilberta, która ujawnia modulację sygnały wywołaną defektem oraz redukuje nośnik, który może utrudniać identyfikację uszkodzenia.

Transformata Hilberta jest zdefiniowana jako:

$$H(x(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \frac{1}{1-\tau} d\tau \quad (17)$$

Amplitudę można policzyć ze wzoru:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + H^2(x(t))} \quad (18)$$

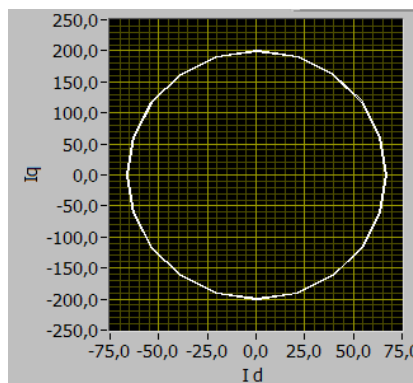
Modulację kąta fazowego można wyrazić za pomocą wyrażenia:

$$\phi(t) = \tan^{-1} \left(\frac{H(x(t))}{x(t)} \right) \quad (19)$$

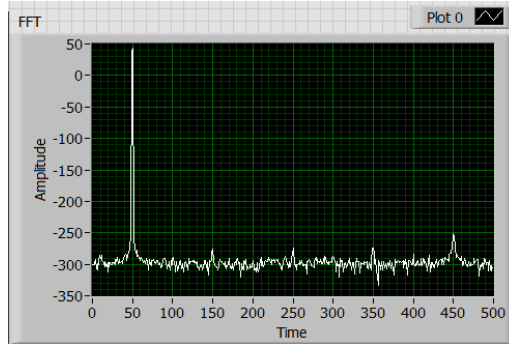
Chwilowa pulsacja wynosi:

$$\omega(t) = \omega + \frac{d}{dt} (\phi(t)) \quad (20)$$

Powyższe parametry również mogą posłużyć do detekcji uszkodzeń w silnikach indukcyjnych, jednak w symulacji wykorzystane zostały wektor przestrzeni oraz transformata Hilberta. W trakcie analizy zasymulowano w środowisku LabView sygnały pozwalające na sprawdzenie działania metody wektorów Parka.

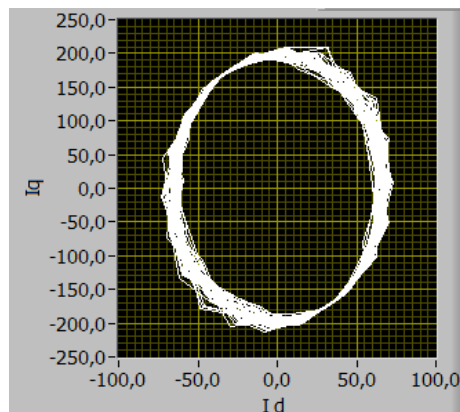


Rys. 2. Figura Lissajou prezentująca wzorec utworzony z wektorów Parka dla symulowanych przebiegów prądów stojana w trójfazowym silniku elektrycznym. ($I=200$ A, $f=50$ Hz)

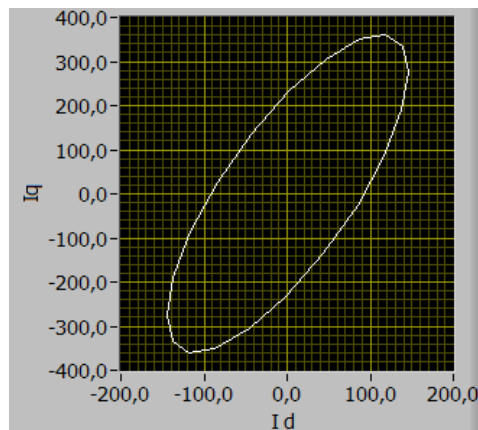


Rys. 3. Widmo symulowanego sygnału prądu trójfazowego (faza b, $I_b=200$ A, $f=50$ Hz)

Rys. 2 oraz 3 pokazują wektory Parka oraz transformatę Fouriera dla sygnału prądowego dla parametrów: $I=200$ A, $f=50$ Hz, przesunięcia międzyfazowe wynoszą 120° . Widzimy, że wektory Parka generują figurę Lissajou o kształcie okręgu. Rysunek 4 pokazuje figurę o zdecydowanie zmienionym kształcie. Jest to sygnał symulujący uszkodzenie bieżni łożyska. Widać, że rysunku 2 oraz 4 znacznie różnią się od siebie, co sprawia, że tego typu uszkodzenie jest łatwe do wykrycia. Uzasadnia to sens implementacji tej metody do analiz prądów trójfazowych.

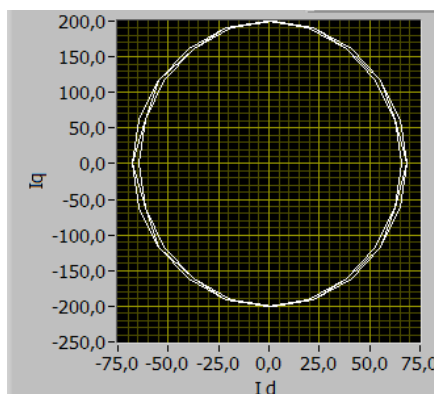


Rys. 4. Zakłócony sygnał faz a i c- dodanie sygnały symulującego uszkodzenie bieżni łożyska ($f=250$ Hz)



Rys. 5. Zwiększony pobór prądu na jednej z faz (c) do 350 A; pozostałe fazy I_b oraz $I_a=200$ A

Rysunek 5 prezentuje figurę Lissajou dla zwiększonego prądu jednej z faz. Nietrudno zauważyć, że przybrała ona w tym przypadku kształt elipsy, co w analizie obrazu również może zostać wykryte i odpowiednio zinterpretowane.



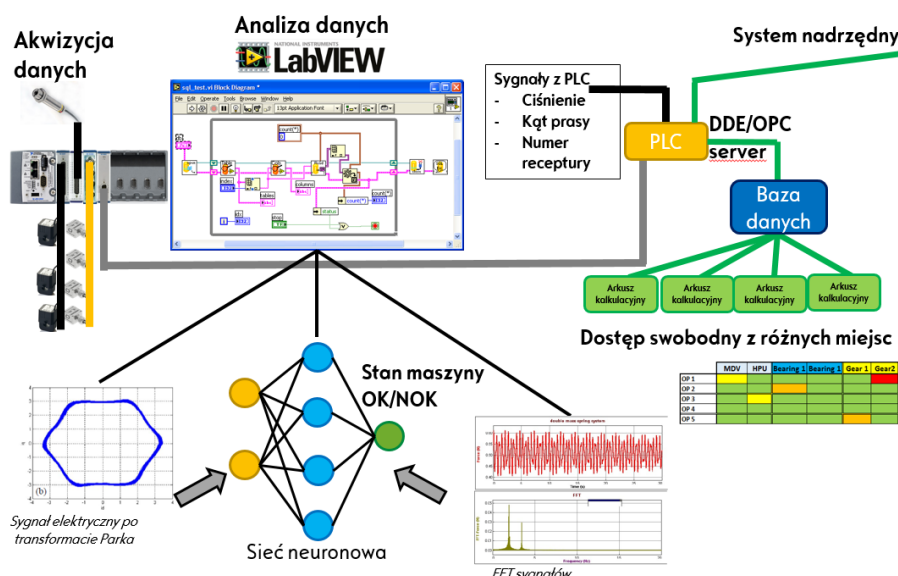
Rys. 6. Zakłócone sygnały trzech faz

Rysunek 6 pokazuje zdeformowany obraz spowodowany zakłóconym sygnałem wszystkich trzech faz. Widać, że zmienił się obwód figury, co podobnie jak poprzednie zakłócenia, może być bez trudu wykryte w analizie obrazu.

5. Koncepcja wykorzystania parametrów elektrycznych w systemie diagnostycznym linii pras

Line pras stosowane w przemyśle są bardzo złożonymi maszynami posiadającymi szereg różnorodnych napędów elektrycznych. W ramach badań wstępnych opracowano koncepcję układu diagnozującego napędy krytyczne linii pras. Układ będzie stanowił część bardziej złożonego systemu monitorowania i diagnostyki linii pras. Układ diagnozujący może wykorzystywać zaprezentowane transformaty Parka i Clarka do detekcji i identyfikacji potencjalnych niesprawności silników. Zakłada się, że układ diagnozujący będzie wykonywać pomiary ciągłe oraz przekazywać dane do systemu nadrzędnego, udostępniając tym samym zinterpretowane dane służbom utrzymania ruchu.

Na Rys. 7 przedstawiono koncepcję układu diagnozującego. Zakłada się, że układ zostanie opracowany na bazie środowiska LabView i modułów pomiarowych RIO wraz z jednostką centralną, która działa jako niezależne urządzenie. Układ ten w prosty sposób komunikuje się z sterownikiem maszyny wymieniając z nim dane diagnostyczne. Sterownik również przekazuje informacje statusowe do systemu nadrzędnego, z którego korzystają służby utrzymania ruchu. Dodatkowo, wyniki szczegółowe przekazywane są do bazy danych, która łączy się z arkuszem kalkulacyjnym za pomocą protokołu Ethernet. Arkusz kalkulacyjny pobiera z bazy danych detaliczne informacje na temat stanu poszczególnych elementów maszyny, które podlegają diagnozie. Najważniejszym elementem całego układu jest program do analizy danych diagnostycznych. Jego głównym zadaniem jest akwizycja, przetwarzanie i analiza sygnałów, która w głównej mierze opiera się na generowaniu wzorców z zastosowaniem transformat Parka i Clarka. Identyfikacja uszkodzeń na podstawie wyznaczanych wzorców może być realizowana np. za pomocą sztucznych sieci neuronowych. Do celów diagnozowania napędów wykorzystane zostaną również inne cechy sygnałów prądowych. Diagnozy wypracowane przez układ bazujący na parametrach elektrycznych korelowane będą z pozostałymi układami diagnozującymi systemu np. układem diagnozującym stan łożysk na podstawie sygnałów drganiowych.



Rys. 7. Koncepcja układu diagnozującego napędy krytyczne linii pras

6. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano zagadnienia związane z diagnozowaniem silników na bazie parametrów elektrycznych, a w szczególności wzorców powstałych w wyniku zastosowania transformat Parka i Clarka do przebiegów prądowych stojana silnika trójfazowego. Przeprowadzone analizy potwierdzają możliwość wykorzystania tych metod w diagnozowaniu stanu napędów elektrycznych i zostaną wykorzystane w projektowanym układzie diagnozującym napędy krytyczne linii pras. Wykorzystane sieci neuronowe dodatkowo będą wspomagać cały system w poprawnej interpretacji danych wejściowych. Komercyjne systemy diagnostyczne instalowane na liniach pras bardzo często bazują jedynie na prostej analizie podstawowych parametrów, jak na przykład natężenie prądu elektrycznego lub też stosują niezaawansowane metody analizy drgań (np. progów ostrzegawczych). Stąd też pomysł stworzenia systemu diagnostycznego, który będzie w stanie dokonać bardziej zaawansowanej analizy sygnałów i przekaże odpowiednie informacje o stanie maszyny służbom utrzymania ruchu z należyтым wyprzedzeniem.

Literatura

- [1] Fluke: 13 częstych przyczyn usterek silnika. <http://en-us.fluke.com/products/contests-and-promotions/preventive-maintenance-program.html>
- [2] Sobolewski A.: Zastosowanie klasyfikatorów neuronowych w diagnostyce uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego. Rozprawa doktorska, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Białystok 2008
- [3] Schoen RR, Habetler TG, Kamran F, Bartheld RG.: Motor bearing damage detection using stator current monitoring. IEEE Trans Ind Appl 1995;32(6): 1274–9.
- [4] Jafar Zarei, Javad Poshtan: Bearing fault detection using wavelet packet transform of induction motor stator current 20 September 2006: 763-766
- [5] Ralph Kennel: Power electronics, 2012
- [6] Jarosław Starczyński, Maciej Sułowicz: Wykrywanie uszkodzeń łożysk tocznych i klatek wirników silników indukcyjnych w oparciu o sygnały akustyczne, Napędy i sterowanie, Maj 2016
- [7] Jean-Claude Trigeassou, Electrical Machines Diagnosis, Sep.2011, Wiley-ISTE

Andrzej JAŁOWIECKI*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

*andrzej.jalowiecki@polsl.pl

WYKORZYSTANIE TECHNIK MODELOWANIA AUTOGENERUJĄCEGO W KONTEKŚCIE WARIANTOWANIA PRODUKTU

1. Wstęp

Sposób projektowania nowych obiektów technicznych znacznie zmienił się na przestrzeni lat. Wszechobecność systemów CAD pozwala na szybkie tworzenie wirtualnych modeli projektowanego obiektu i dokonywanie wymaganych zmian w przestrzeni wirtualnej, bez konieczności tworzenia kosztownych prototypów.

Projektowanie elementów między innymi na potrzeby uczestnictwa w międzynarodowych zawodach takich jak Shell Eco-Marathon wymaga wprowadzania ciągłych zmian do istniejącego projektu. Zmiany te mogą wynikać z konieczności dostosowania bolidu do nowego regulaminu czy też są wynikiem optymalizacji poszczególnych elementów projektu. Zazwyczaj konieczność wprowadzania zmian wiąże się z przejściem licznych procedur doboru elementów, mogących przyjmować różne warianty zarówno wymiarowe jak i postaciowe, w zależności od zadanych wymagań. Każdorazowe ręczne przepracowanie często dziesiątek modeli jest nieefektywne i czasochłonne.

Tu z pomocą inżynierom przychodzą nowoczesne techniki modelowania będące połączeniem osiągnięć w dziedzinach takich jak: inżynieria wiedzy, programowanie czy projektowanie w systemach klasy CAD[1][2]. Jednym z przykładów takich technik jest modelowanie autogenerujące, w ramach którego tworzone są pewne specyficzne modele CAD[2][4].

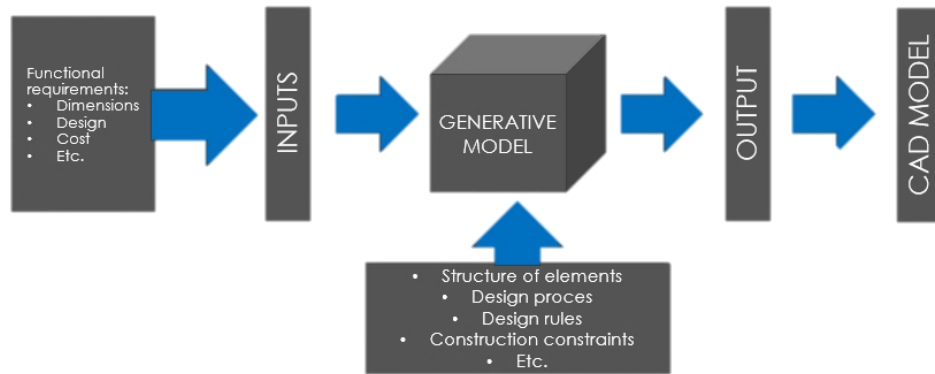
Model autogenerujący (ang. Generative Model) jest to rodzaj aplikacji KBE (ang. Knowledge Based Engineering) w postaci wirtualnego modelu opracowanego w środowisku CAD[5][6][7]. Model taki poprzez wykorzystanie odpowiednio przygotowanego modelu wiedzy jest w stanie automatycznie lub półautomatycznie generować modele zarówno poszczególnych części jak również modele całych elementów czy zespołów. Proces generowania oparty jest na wcześniej zdefiniowanych elementach wejściowych, mogących przyjmować postać zarówno parametrów jak i elementów geometrycznych takich jak krzywe, punkty czy płaszczyzny[2][5][7].

Niniejszy artykuł jest próbą zaprezentowania możliwości modelowania autogenerującego w sytuacjach, gdy mamy do czynienia z koniecznością tworzenia modeli wielu wariantów projektowanych obiektów. Zaprezentowane zostało wykorzystanie modeli autogenerujących w kontekście projektowania elementów układu napędowego bolidu wyścigowego startującego w ramach zawodów Shell Eco-Marathon.

2. Model autogenerujący jako model wielowariantowy

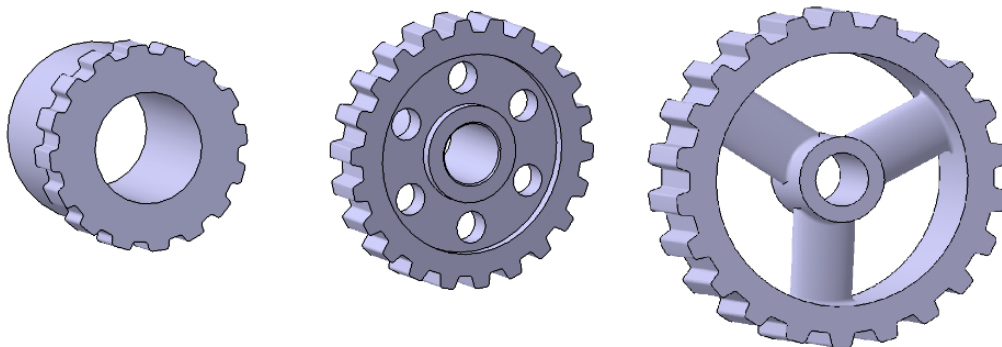
Modelowanie autogenerujące stanowi stosunkowo nowe podejście do kwestii związanych z modelowaniem obiektów w systemach CAD. Pierwsze modele autogenerujące służyły głównie do generowania prymitywów geometrycznych takich jak sześciany, kule, itp. Wraz z rozwojem języków programowania obiektowego oraz samych systemów CAD zaczęto tworzyć coraz to bardziej złożone aplikacje umożliwiające generowanie gotowych modeli na podstawie szczątkowych informacji wejściowych[2][4][7].

Schemat działania typowego modelu autogenerującego zaprezentowano na Rys. 1. Istotą działania tego typu modelu jest wykorzystanie przygotowanego modelu wiedzy do automatyzacji procesu tworzenia modeli CAD. Poprawnie przygotowany model wiedzy powinien zwracać wszystkie wymagane informacje na temat generowanego obiektu takie jak struktura obiektu, parametry charakterystyczne czy relacje pomiędzy poszczególnymi parametrami[6][7][8]. Bazując na modelu wiedzy oraz informacjach wejściowych system jest w stanie samodzielnie dobrać, zamodelować i zweryfikować poszczególne składowe danego modelu tak aby spełniały on wszystkie stawiane wymagania[5][7][9].



Rys. 1 Schemat działania modelu autogenerującego

Model wiedzy opisujący strukturę danego obiektu nie musi ograniczać się do jednej konkretnej struktury lecz istnieje możliwość implementacji większej ilości struktur odpowiadających różnym wariantom danego obiektu[4][5]. Na Rys. 2 przedstawiono przykładowe postacie koła pasowego zębatego generowanego za pomocą jednego modelu autogenerującego. O tym która wersja koła zostanie wygenerowana decydują określone parametry powiązane z odpowiednimi funkcjami warunkowymi. Tak więc na podstawie wartości parametrów takich jak średnica podziałowa czy średnica wału, model za pośrednictwem funkcji warunkowych zdecyduje, która postać koła powinna zostać użyta w danym przypadku[6][7].

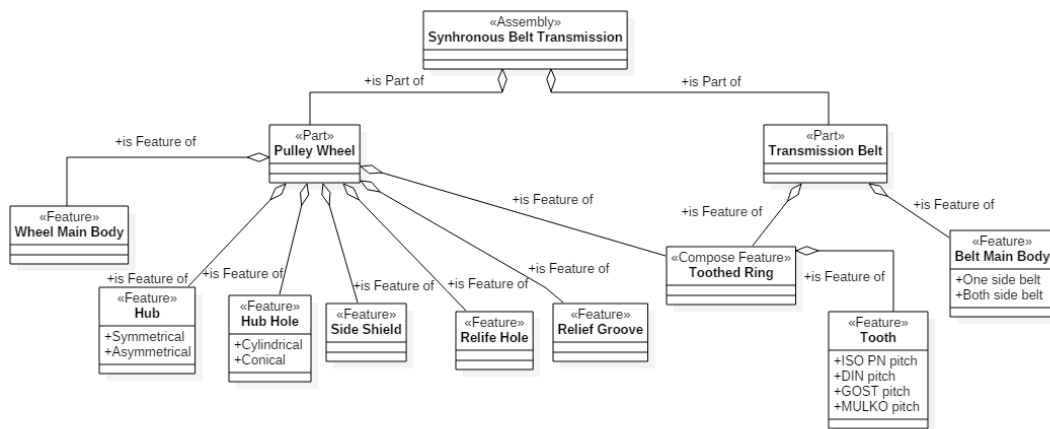


Rys. 2 Przykładowe postacie koła pasowego zębatego generowanego za pomocą modelu autogenerującego

3. Wykorzystanie modelowania autogenerującego w projektowaniu elementów układu napędowego

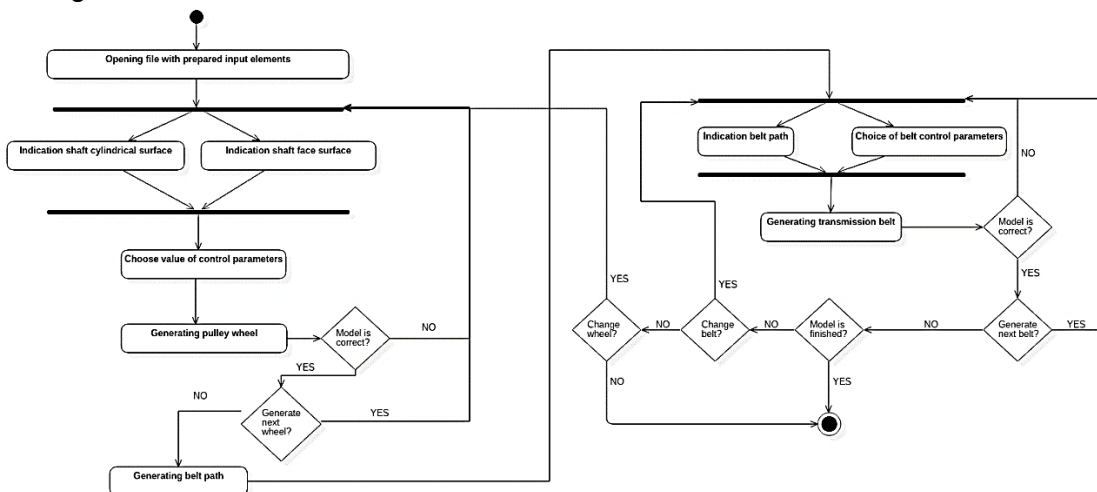
Tworząc model autogenerujący pierwszym krokiem, który należy wykonać jest opracowanie modelu wiedzy stanowiącego swego rodzaju szkielet, na którym można budować kolejne warstwy modelu autogenerującego. Model wiedzy może być opracowany w formie między innymi diagramów, tablic czy też opisów. Na Rys. 3 zaprezentowano diagram klas opracowany dla przekładni pasowej zębatej.

Jak można zauważyć diagram ten stanowi swojego rodzaju dekompozycje układu na kolejne mniejsze elementy, zgodnie z hierarchią zespół-element-część. Taki podział pozwala na odpowiednie rozplanowanie prac związanych z modelowaniem danych elementów w środowisku CAD. Dodatkowo diagram klas pozwala w prosty sposób na określenie relacji pomiędzy poszczególnymi obiektami oraz zdefiniować listę parametrów indywidualnych oraz wspólnych dla kilku modeli, a także przewidzieć ilość możliwych wariantów danego obiektu.



Rys. 3 Diagram klas opracowany dla przekładni pasowej zębatej

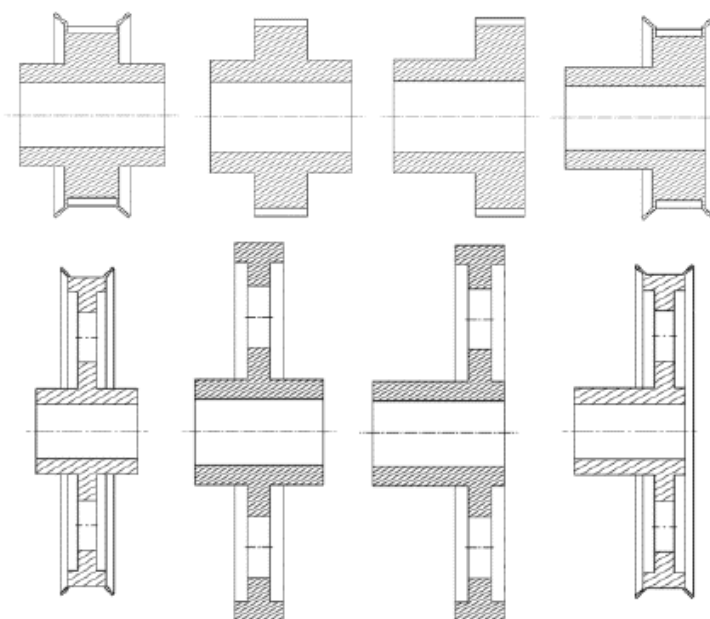
Dodatkowo w ramach modelu wiedzy opracowane są diagramy czynności, w ramach których zapisuje się przebieg procedury generowania danego elementu przekładni pasowej zębatej. Na Rys. 4 przedstawiono diagram czynności dla generowania przekładni. Cała procedura sprowadza się do uruchomienia odpowiednich modeli i wskazywania wymaganych elementów geometrycznych takich jak np. ścieżka przebiegu pasa napędowego.



Rys. 4 Diagram czynności dla generowania modelu przekładni pasowej zębatej

Kolejnym etapem opracowywania modelu autogenerującego jest przeniesienie wiedzy z modelu wiedzy do środowiska CAD. Opisany model został opracowany w środowisku CATIA, które dzięki modułowi Knowledgeware pozwala na bezpośrednie integrowanie wiedzy z modelem CAD.

W ramach modelu autogenerującego koła pasowego zębatego postanowiono „zamknąć” wiele wariantów generowanego koła pasowego w obrębie jednego kompleksowego, inteligentnego modelu. Warianty te dotyczą zarówno różnych podziałek (podziałka metryczna, calowa, znormalizowana ISO, znormalizowana DIN, itp.) jak również różnych wariantów postaci koła pasowego. Na Rys. 5 przedstawiono przykładowe postacie generowanych kół pasowych.



Rys. 5 Przykładowe postacie generowanego koła pasowego zębatego

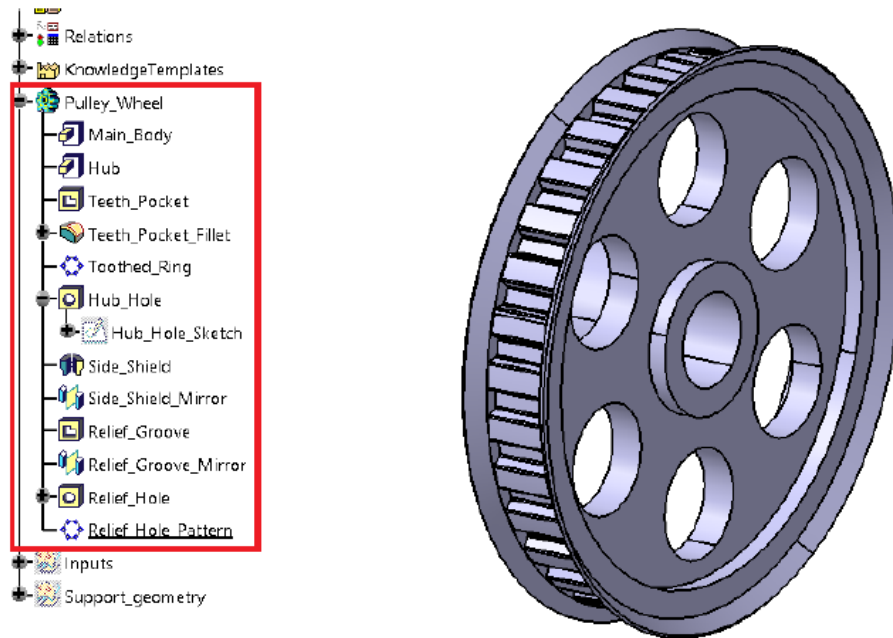
O tym, która wersja koła pasowego zostanie wygenerowana decydują kolejne funkcje warunkowe. Funkcje te decydują nie tylko o wersji generowanego elementu, ale również o wartościach poszczególnych parametrów sterujących modelem. Przykładowy fragment reguły decydującej o rozmiarze podziałki zaprezentowano poniżej.

```

/*Rule created by Jalowiecki 28.04.2016*/
/*T belt pitch selection*/
if(n >100 rpm and n <=200 rpm and P <= 0.02 kW)
{
pitch = 2
}
else if(n>100 rpm and n<=200 rpm and P> 0.02 kW and P<=0.2 kW)
{
pitch = 3
}
else if(n>100 rpm and n<=200 rpm and P> 0.2 kW and P<=2 kW)
{
pitch = 4
}
...

```

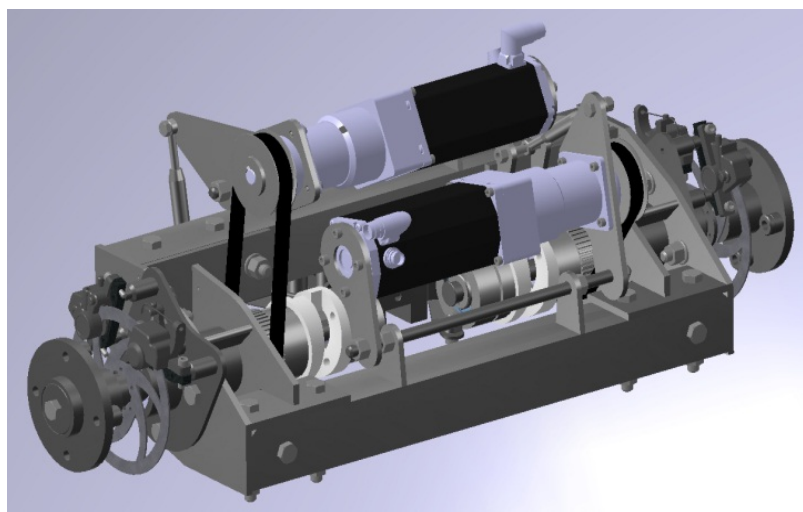

Na Rys. 6 z kolei przedstawiono opracowany model autogenerujący koła pasowego zębatego wraz z drzewem struktury. Jak można zauważyć elementy znajdujące się w drzewie struktury są tożsame z elementami opisanymi w ramach diagramu klas. Właśnie dla tego opracowanie modelu wiedzy jest istotną częścią procesu opracowywania modelu autogenerującego.



Rys. 6 Opracowany model wraz z drzewem struktury

Przedstawiony model wraz z innymi modelami elementów układu napędowego posłużył do zaprojektowania i optymalizacji układu napędowego bolidu zespołu Smart Power Politechnika Śląska startującego w zawodach Shell Eco-Marathon.

Zastosowanie modeli autogenerujących w ramach, których możliwe było uwzględnienie wielu różnych wersji elementów pozwoliło na znaczne przyspieszenie procesu projektowo-konstrukcyjnego. Jedną z cech modeli autogenerujących jest automatyczna adaptacja do wprowadzanych zmian w projekcie co pozwala na uniknięcie konieczności przechodzenia wielokrotnie przez żmudne procedury doboru elementów. Na Rys. 7 przedstawiono postać opracowanego układu napędowego[6][8].



Rys. 7 Model opracowanego układu napędowego[8]

4. Podsumowanie

Wykorzystanie nowoczesnych technik modelowania w systemach CAD pozwala w znaczny sposób przyspieszyć i poprawić jakość procesu projektowo-konstrukcyjnego. W przypadku, gdy zachodzi konieczność wprowadzania częstych zmian w projekcie, które wiążą się z zmianą wariantu wybranych elementów, modelownie autogenerujące stają się niezwykle użytecznym narzędziem. Sytuacja, w której konstruktor posiada bibliotekę modeli autogenerujących jest w stanie w krótkim czasie wygenerować dziesiątki wersji projektowanego obiektu. Ponadto konieczność wprowadzenia zmian nie nastrocza problemów ponieważ modele autogenerujące zapewniają adopcynność pomiędzy poszczególnymi modelami, co sprawia że zmiana w jednym modelu automatycznie powoduje uaktualnienie pozostałych modeli.

Pomimo licznych zalet płynących z wykorzystania technik modelowania autogenerującego, nie jest to często spotykane podejście do kwestii projektowania w systemach klasy CAD. Mała „popularność” tego typu modeli wiąże się z koniecznością opracowania modelu wiedzy, co wymaga posiadania odpowiedniej wiedzy i umiejętności z zakresu inżynierii wiedzy. Kolejnym czynnikiem odstrasającym jest czas potrzebny na opracowanie modelu autogenerującego, który jest znacznie dłuższy, niż w przypadku klasycznego procesu tworzenia modeli CAD. Stąd też większość konstruktorów nie widzi daleko idących korzyści z wykonania dodatkowej ilości pracy, która jest w stanie znacznie uprościć przyszłe działania projektowo-konstrukcyjne.

Literatura

- [1] Kendal S.L., Creen M.: *An introduction to knowledge engineering*, Springer London, 2007, pp. 1-25
- [2] Verhagen W.J., Curran R.: *Knowledge-based engineering review: conceptual foundations and research issues*, In *New World Situation: New Directions in Concurrent Engineering*, Springer London, 2010, pp. 267-276
- [3] Stjepandić J., Verhagen W.J., Liese H., Bermell-Garcia P.: *Knowledge-Based Engineering*, In *Concurrent Engineering in the 21st Century*, Springer International Publishing, 2015, pp. 255-286
- [4] La Rocca G.: *Knowledge based engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design*, *Advanced engineering informatics*, 26(2), 159-179.
- [5] Skarka W.: *Using Knowledge-based Engineering Methods in Designing with Modular Components of Assembly Systems*, In *DS 60: Proceedings of DESIGN 2010, the 11th International Design Conference*, Dubrovnik, Croatia, 2010
- [6] Jałowiecki A., Skarka W.: *Generative modelling in ultra-efficient vehicle design*, In: *Transdisciplinary engineering: crossing boundaries. Proceedings of the 23rd ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering*, October 3-7, 2016. Eds. by M. Borsato, N. Wognum, M. Peruzzini, J. Stjepandić, W.J.C. Verhagen. Amsterdam: IOS Press, 2016, s. 999-1008
- [7] Jałowiecki A., Klusek P., Skarka W.: *Development of Generative Models of plastic parts: use case of plastic channel parts*, *TMCE 2016 Conference*, France, 2016
- [8] Skoberla R., Skarka W.: *Drive system of lightweight electric vehicle competing in Shell Eco-marathon*, (in Polish) *Mechanik* 4/2016 pp. 324-325
- [9] M. Tyczka, W. Skarka: *Optymisation of Operational Parameters Based on Simulation Numerical Model of Hydrogen Fuel Cell Stack Used for Electric Car Drive*. In: *Transdisciplinary engineering: crossing boundaries. Proceedings of the 23rd ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering*, October 3-7, 2016. Eds. by M. Borsato, N. Wognum, M. Peruzzini, J. Stjepandić, W.J.C. Verhagen. Amsterdam: IOS Press, 2016, pp. 622-631

Wojciech JAMROZIK¹, Kamil JANECKI²

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) wojciech.jamrozik@polsl.pl

2) kamil.janecki91@gmail.com

METODY OCENY JAKOŚCI TERMOGRAMÓW O POSZERZONEJ GŁĘBI OSTROŚCI

1. Wstęp

Termografia, będąca coraz powszechniejszą metodą bezkontaktowego pomiaru temperatury, pozwala na jednoczesną obserwację wielu obiektów. Praktyczne zastosowanie termogramów, w celu np. detekcji obszarów o podwyższonej temperaturze, a co za tym idzie detekcji uszkodzeń, wymaga otrzymywania termogramów, na których wszystkie obiekty są poprawnie reprezentowane. W przypadku monitoringu obiektów, które znajdują się różnej odległości od matrycy kamery, poważnym problemem jest zapewnienie odpowiedniej głębi ostrości. Rozmywanie krawędzi lub całych obiektów, może powodować niemożność precyzyjnego zlokalizowania obszaru o podwyższonej temperaturze, a co za tym idzie brak wykrycia potencjalnego uszkodzenia. W przypadku niewielkiej dynamiki zmian temperatury, rozwiązaniem problemu braku ostrości może być zastosowanie programowej agregacji wielu obrazów, przedstawiających tą samą scenę, ale wykonanych z różnymi ustawieniami ostrości. Obrazy o rozszerzonej głębi ostrości powinny zapewniać taką jakość, aby wszystkie obiekty na obrazie, niezależnie od ich odległości od kamery, były ostre. Dynamika zmian temperatury, jaka może być zarejestrowana tą metodą uzależniona jest jedynie od parametrów kamery, głównie szybkości przestrajania ostrości.

Sekwencję obrazów o różnej ostrości, będącą zbiorem danych wejściowych do procesu agregacji należy wykonać, rejestrując taką liczbę obrazów, aby zapewniały odpowiednio ostrą reprezentację wszystkich interesujących obiektów sceny. W przypadku znajomości odległości obiektów od kamery, można zastosować model odległość-ostrość, pozwalający na precyzyjne ustawienie ostrości na poszczególne obiekty. W przypadku nieznanego odległości obiektów od kamery, istotny jest właściwy podział zakresu ostrości tak by pokryć wymagany zakres z jak największym prawdopodobieństwem. Drugą kluczową kwestią jest wybór algorytmu pozwalającego na agregację sekwencji obrazów wejściowych, tak by zachować całą relewantną informację o ostrych obiektach, przy jednoczesnym ograniczeniu redundantnej informacji o obiektach reprezentowanych na obrazach w sposób rozmyty. W artykule przedstawiono wpływ algorytmów agregacji na jakość obrazów wyjściowych, a także sposób oceny jakości obrazów.

2. Metody agregacji obrazów

Mnogość algorytmów agregacji obrazów [1-3], a także fakt, że są one opracowywane głównie dla obrazów zarejestrowanych w zakresie światła widzialnego, utrudnia wybór najwłaściwszych, które sprawdzą się w przypadku obrazów termograficznych. Z tego powodu analizy prowadzono na relatywnie prostych metodach, które mogą być zaimplementowane sprzętowo lub bezpośrednio w kamerach termograficznych:

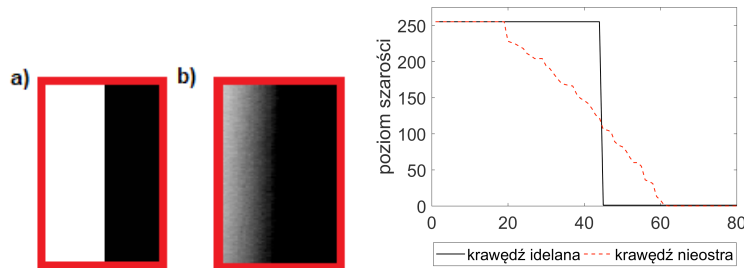
- proste algorytmy agregacji, w których zastosowano operatory punktowe,
- analizę głównych składowych (ang. Principal Component Analysis, PCA),

- metodę hierarchiczną, w której użyto przekształcenie Laplace'a,
- dwuwymiarowy rozkład na mody empiryczne (ang. Bidimensional Empirical Mode Decomposition, BEMD).

W przypadku prostych algorytmów agregacji wybór piksela wyjściowego odbywa się za pomocą operatorów punktowych, takich jak wartość maksymalna, minimalna lub średnia. W przypadku metody PCA najistotniejsze regiony obrazu wyodrębniane są przez analizę macierzy kowariancji budowanej dla wartości pikseli. W przypadku metody hierarchicznej, z zastosowaniem piramidy Laplace'a, obraz jest dzielony na zbiór podobrazów, w którym każdy z podobrazów jest wynikiem przeprowadzonej filtracji dolnoprzepustowej na poprzednim obrazie. Rozdzielczość obrazów na kolejnych poziomach piramidy jest zmniejszona czterokrotnie. Kluczowym parametrem jest liczba poziomów dekompozycji (często 3 lub 4). Metoda BEMD, złożonością obliczeniową znacznie odbiega od pozostałych, została jednak przebadana, jako metoda referencyjna. Idea metody BEMD jest rozkład sygnału wejściowego na składowe zwane modami zewnętrznymi IMF (ang. Intrinsic Mode Functions), uzyskiwane przez zastosowanie algorytmu przesiewowego (sifting). Agregacja poszczególnych obrazów IMF może odbywać się przez zastosowanie operatorów punktowych (min, max, avg).

3. Metody oceny obrazów zagregowanych

W przypadku oceny jakości obrazów o poszerzonej głębi ostrości, możliwe jest zastosowanie wielu miar, które umożliwiają globalną ocenę ostrości obrazu [4]. Inne podejście polega na ocenie stopnia podobieństwa między idealną ostrą krawędzią (Rys. 1a), a krawędzią rzeczywistą (Rys.1b) wybraną z obrazu wygenerowanego w wyniku agregacji obrazów wejściowych. Podobieństwo to jest obliczane jako wartość współczynnika korelacji między profilami wyznaczonymi dla obu krawędzi (Rys.1).



Rys.1. Przykładowe obrazy prezentujące krawędź idealną (a) i rzeczywistą, nieostrą (b) oraz linie profilu dla obu krawędzi

Druga metoda oceny jakości polega na wyznaczaniu wartości kąta nachylenia pomiędzy osią x a styczną do krzywej wyrażającej zmianę wartości poziomu szarości na krawędzi obiektu. Dla krawędzi wzorcowej wartość tego kąta będzie równa kątowi prostemu. Dla krawędzi rzeczywistej, kąt nachylenia będzie kątem ostrym, przy czym im mniejsza wartość kąta, tym gorsza jakość obrazu – jest bardziej rozmyty.

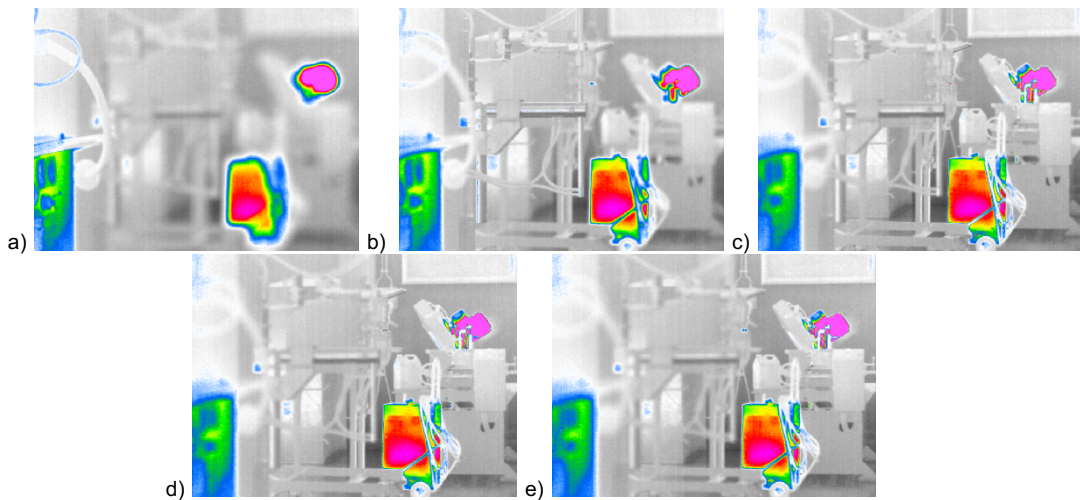
4. Studium przypadku

Metody generowania obrazów o poszerzonej głębi ostrości zastosowano do sekwencji termogramów, przedstawiających grupę maszyn znajdujących się w różnej odległości od kamery (Rys.2.). Termogramy zostały zarejestrowane w laboratorium Katedry Spawalnictwa Politechniki Śląskiej. Termogramy wejściowe zarejestrowano ustawiając ostrość na pięć kluczowych obiektów znajdujących się obrazie (oznaczone 1-5 na Rys.2.). Ograniczona wartość głębi ostrości jest widoczna na zarejestrowanych termogramach (Rys.3). Oceny jakości obrazów wyjściowych dokonano analizując jedną z krawędzi obiektu nr 4 (Rys. 3). Krawędź tą wybraną ze względu na regularny kształt oraz duży gradient zmian wartości jasności pikseli, kiedy rozkład temperatur przedstawiono w skali odcieni szarości.

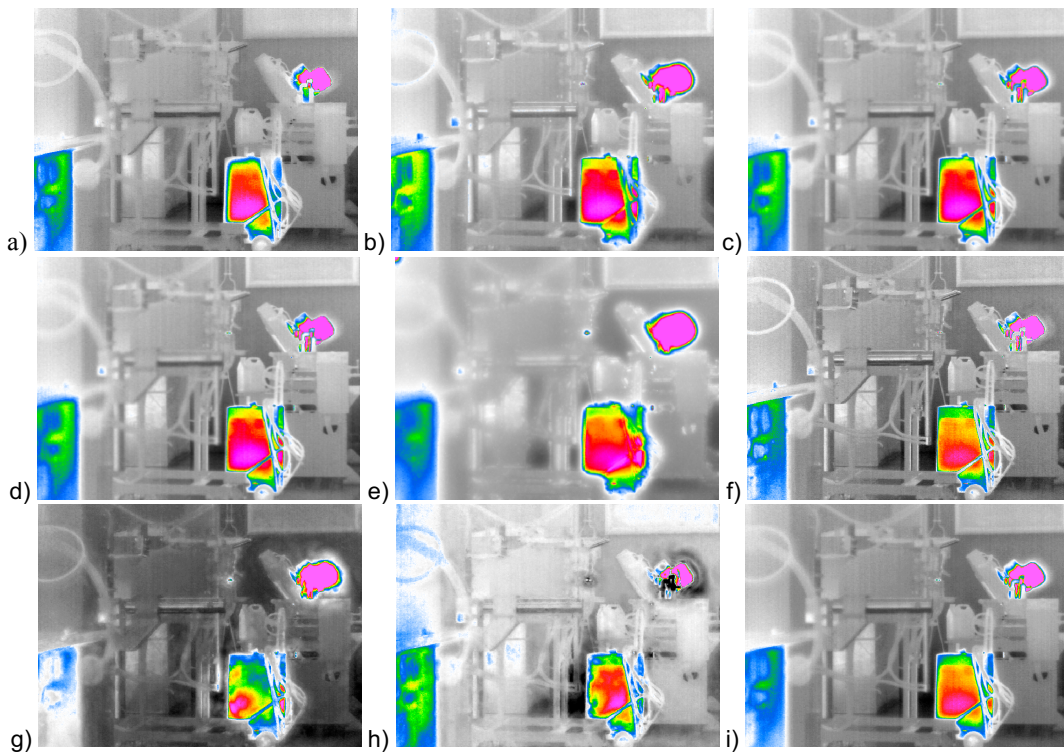
Obrazy wynikowe uzyskane dla dziewięciu różnych metod agregacji zebrano na Rys.4. Subiektywna ocena zarówno geometrii obiektów, jak i rozkładu temperatur wskazuje jasno na metodę piramida Laplace'a jako najlepszą z badanych (Rys. 4f).



Rys.2. Widok obserwowanych obiektów, z zaznaczonymi obiektami kluczowymi (1-5)



Rys.3. Termogramy wejściowe, ustawienie ostrości na obiekty kluczowe (a-e)



Rys.4. Termogramy o poszerzonej głębi ostrości: a – min, b – max, c – avg, d – PCA, e - Piramida Laplace'a 3, f - Piramida Laplace'a 4, g – BMED max, h – BMED min, i – BMED avg

Wszystkie termogramy zostały zarejestrowane kamerą termowizyjną Infratec VarioCam hr head 600, działającą pod kontrolą oprogramowania napisanego w środowisku NI LabView. Korzystając z SDK kamery, możliwa była programowa zmiana wartości ustawienia ostrości. Wartości te zostały na etapie badań wstępnych dobrane empirycznie, tak by poszczególne obiekty były reprezentowane właściwie (odpowiednia ostrość).

Obiektywna analiza otrzymanych wyników potwierdza wyniki oceny subiektywnej (Tabela.1.). Najlepszą okazała się metoda piramidy Laplace'a. Widoczna jest znaczna różnica w wartościach współczynnika korelacji, jak i kąta nachylenia, dla różnej liczby poziomów dekompozycji. Analiza kąta nachylenia stycznej, pozwala na lepsze jakościowe rozróżnienie uzyskanych wyników.

Tabela.1. Oceny jakości obrazów o poszerzonej głębi ostrości

	Metoda agregacji	Współczynnik korelacji	Kąt nachylenia stycznej do profilu
1	Operator punktowy – min	0,9653	75,3°
2	Operator punktowy – max	0,9825	81,3°
3	Operator punktowy – avg	0,9910	78,4°
4	PCA	0,9953	80,0°
5	Piramida Laplace'a 3	0,8708	58,2°
6	Piramida Laplace'a 4	0,9981	85,2°
7	BEMD – operator max	0,9776	75,5°
8	BMED – operator min	0,9907	78,8°
9	BMED – operator avg	0,9901	80,0°

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania dotyczyły zastosowania popularnych metod agregacji obrazów dla potrzeb generowania termogramów o poszerzonej głębi ostrości. Otrzymane wyniki oceniono w sposób subiektywny oraz obiektywny. Obiektywne metody oceny, współczynnik korelacji oraz kąt nachylenia stycznej do profilu, pozwoliły na otrzymanie wyników zbliżonych z subiektywnymi. Z badanych metod najlepsza okazała się metoda piramidy Laplace'a o czterech poziomach dekompozycji. Dobrych wyników uzyskano też dla metody BEMD. W przypadku tej metody kluczowy jest jednak czas obliczeń. Obraz wynikowy z posiadanego zbioru pięciu obrazów wejściowych był generowany po 24 minutach. Dla porównania czas działania algorytmu Laplace'a wynosił 14 sekund.

Dalsze badania będą miały na celu implementację oraz dopasowania do potrzeb obrazów termograficznych bardziej zaawansowanych algorytmów agregacji obrazów. Istotne będzie też zweryfikowanie stopnia odchylenia wartości rozkładu temperatury na obrazie wynikowym w stosunku do poprawnie zarejestrowanych regionów obrazów wejściowych.

Literatura

- [1] Garg R., Gupta P., and Kaur H.: Survey on multi-focus image fusion algorithms. Engineering and Computational Sciences (RAECS), 2014 Recent Advances in. IEEE, 2014
- [2] Li M., Dong Y.: Review on technology of pixel-level image fusion. Measurement, Information and Control (ICMIC), 2013 International Conference on. Vol. 1. IEEE, 2013
- [4] Li Q., i in.: Region-based multi-focus image fusion using the local spatial frequency. Control and Decision Conference (CCDC), 2013 25th Chinese. IEEE, 2013
- [2] Mir H., Xu P., van Beek P.: An extensive empirical evaluation of focus measures for digital photography", Proc. SPIE 9023, Digital Photography X, 2014

Marcin JANUSZKA¹, Wojciech MOCZULSKI²

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) marcin.januszka@polsl.pl

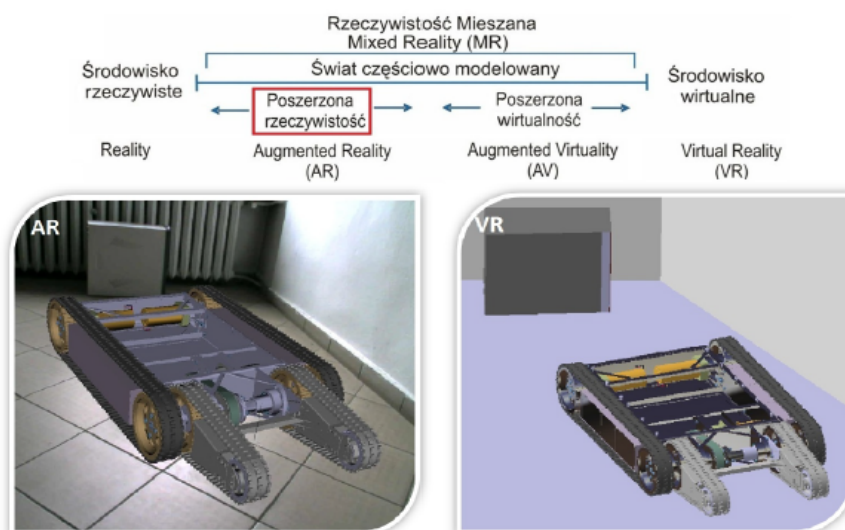
2) wojciech.moczulski@polsl.pl

ZASTOSOWANIE TECHNIK POSZERZONEJ RZECZYWISTOŚCI W PROJEKTOWANIU I EKSPLOATACJI MASZYN

1. Wstęp

Procesy opracowania środka technicznego (ang. product development proces, PDP), a także procesy związane z jego późniejszą eksploatacją są procesami złożonym, który zwykle wymagają użycia wielu metod i środków przez długi czas. Proces PDP obejmuje najczęściej wiele etapów, począwszy od początkowych badań i faz rozwojowych, poprzez projekt koncepcyjny i projekt techniczny, aż po technologiczno-organizacyjne przygotowanie procesu wytwarzania. Różnorodne i skomplikowane czynniki, takie jak wpływ na bezpieczeństwo, zdrowie i środowisko, czynniki ekonomiczne i techniczne, muszą być uwzględnione zanim proces opracowania środka technicznego zostanie ostatecznie zakończony. We wczesnych fazach projektowania należy brać pod uwagę aspekty produkcji, montażu, eksploatacji i utylizacji projektowanego układu maszynowego. Na każdym etapie procesu opracowania środka technicznego istotne jest, aby zaangażowany personel posiadał odpowiednią wiedzę i dane, kompetencje techniczne oraz doświadczenie, aby zapewnić, że wszystkie aspekty tego procesu zostały odpowiednio uwzględnione. Wiedza ta powinna być we właściwy sposób (szybki, intuicyjny) przekazywana projektantom i konstruktorom oraz później służbom związanym z eksploatacją maszyn i urządzeń. W tym celu zastosowanie znajdują zaawansowane techniki komputerowe.

W ostatnich latach podejmowane są próby wspomagania różnych etapów procesu opracowania środka technicznego, a wręcz jego całego cyklu życia (ang. product life-cycle), poprzez zastosowanie technik tzw. poszerzonej rzeczywistości (ang. augmented reality, AR). Poszerzona rzeczywistość pozwala łączyć interaktywny, komputerowo generowany świat ze światem rzeczywistym w taki sposób, aby stanowiły one jedno zsyntezowane środowisko (rys. 1) [1].



Rys.1. Poszerzona rzeczywistość w kontinuum rzeczywistość-wirtualna rzeczywistość [2]

Systemy AR pozwalają na łączenie informacji o świecie rzeczywistym otaczającym człowieka i informacji dodatkowych (wirtualnych) w jednej przestrzeni. Informacje dodatkowe dostarczane są najczęściej w formie wirtualnych modeli 3D oraz/lub tekstu, dźwięku, grafik wzbogacających obraz świata rzeczywistego odbierany zmysłami przez człowieka.

Potencjał technik AR tkwi w następujących aspektach [11]:

- a. przeniesieniu komunikacji z płaszczyzny tekstowej na obrazową,
- b. interakcji z wirtualnymi obiektami,
- c. nałożeniu informacji na aktualny obraz lub stan rzeczywistości, w odpowiednim momencie zaistnienia potrzeby ich przekazania.

Pierwsze próby zastosowania systemów bazujących na technikach AR w projektowaniu, także obsłudze i diagnozowaniu układów maszynowych w ramach badań w Instytucie Podstaw Konstrukcji Maszyn podjęte zostały kilka lat temu (m.in. [6] i [9]). Analizując wyniki prowadzonych prac oraz obecnie realizowanych badań, można zauważyć spore korzyści płynące z zastosowania poszerzonej rzeczywistości w procesie projektowo-konstrukcyjnym oraz eksploatacji maszyn lub urządzeń [5]. W dalszej części artykułu zaprezentowane zostaną wyniki badań nad zastosowaniem technik AR w obu tych obszarach.

2. Prezentacja danych przy użyciu technik AR

Zasadniczym celem badań dotychczas prowadzonych przez autorów było opracowanie efektywnego narzędzia prezentacji danych użytkownikowi. Prace te obejmowały w szczególności opracowanie interfejsu interakcji komputer-człowiek. Prowadzone liczne analizy narzędzi służących do prezentacji danych bezpośrednio użytkownikowi wykazały, iż zastosowanie technik AR pozwala stworzyć niezwykle efektywny interfejs. Interfejs bazujący na technice AR powinien umożliwiać:

- wizualizację efektów pracy zespołu projektowego (np. modele 3D, złożenia 3D składające się z bardzo dużej liczby elementów, symulacje), a także innych danych pomocniczych podczas procesu projektowego i eksploatacji (rysunki, wykresy, tabele, wyniki badań, schematy, symulacje) w sposób efektywny i intuicyjny: w przestrzeni bezpośrednio otaczającej użytkownika lub grupę użytkowników, z możliwością przeglądania z dowolnej perspektywy oraz w dowolnej skali (w tym 1:1);
- wizualizację kolejnych kroków realizowanych w ramach czynności obsługowych dla maszyn i urządzeń;
- interakcję z danymi (w szczególności modelami 3D) poprzez manipulowanie ich położeniem w przestrzeni otaczającej użytkownika.

W przypadku systemów bazujących na technikach AR istotny jest wybór optymalnych rozwiązań sprzętowych, w zależności od przeznaczenia danego systemu. W systemach AR warunkiem prawidłowego przestrzennego powiązania świata rzeczywistego ze światem wirtualnym jest precyzyjne śledzenie pozycji oraz ułożenia głowy (lub lepiej oczu) obserwatora. Wśród interfejsów śledzących dla systemów AR wyróżniamy m.in. interfejsy: mechaniczne, bezwładnościowe, magnetyczne, akustyczne, optyczne, elektryczne, elektromagnetyczne lub hybrydowe (będące połączeniem co najmniej dwóch podstawowych układów śledzących) [1].

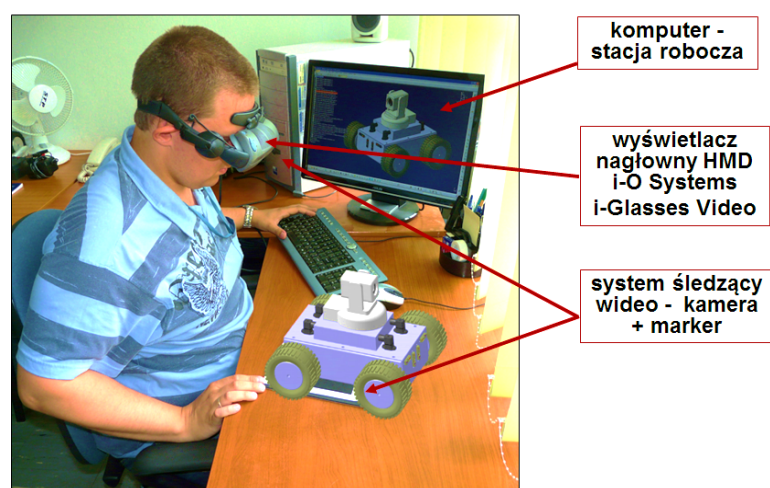
Drugim istotnym aspektem poza śledzeniem położenia i orientacji użytkownika jest efektywna wizualizacja danych. Gdy wzbogacanie rzeczywistości wiąże się ze zmysłem wzroku, działanie systemu AR polega na dodaniu do tego, co obserwujemy za pomocą oczu, pewnych dodatkowych, generowanych komputerowo elementów. Dostępnych jest wiele sposobów prezentowania użytkownikowi systemów AR komputerowo generowanych, wirtualnych danych. Najpopularniejszymi rozwiązaniami dla systemów AR są: wyświetlacze montowane na głowie (ang. Head-Mounted Display, HMD), wyświetlacze

trzymane w rękach (ang. Hand-Held Display, HHD) – w tej grupie również tablety, wyświetlacze montowane na wysięgnikach (ang. Binocular Omni-Orientation Monitor, BOOM) [1].

Na potrzeby systemu AR wspomagającego projektowanie i konstruowanie oraz eksploatację maszyn i urządzeń, wytypowane zostały następujące komponenty sprzętowe (rys. 2):

- komputer - stacja robocza CAD,
- wyświetlacz nagłowny wideo (opcjonalnie możliwe jest zastosowanie tabletu PC),
- optyczny system śledzący (bazujący na komputerowej analizie obrazu), w skład którego wchodzi kamera HD oraz zestaw drukowanych markerów.

Do wyświetlacza HMD przymocowana jest kamera, która rejestruje obrazy świata otaczającego użytkownika systemu i przesyłają zarejestrowane obrazy do komputera. Za pomocą wyświetlacza możliwe jest dostarczenie użytkownikowi zszyntezowanego obrazu – obrazu środowiska rzeczywistego pochodzącego z kamery, wzbogaconego o komputerowo wygenerowane obiekty wirtualne.



Rys.2. Podstawowe komponenty systemu AR oraz wirtualny model robota widziany przez wyświetlacz HMD

W prezentowanych w niniejszym artykule systemach wspomagania projektowania oraz eksploatacji maszyn i urządzeń istotną rolę odgrywa specjalistyczne oprogramowanie z bibliotekami implementującymi funkcje śledzenia. Stosowane są biblioteki AR-ToolKit [12], oprogramowanie BuildAR Pro [14] lub oprogramowanie Metaio (obecnie już wycofane z rynku [13]). Wszystkie trzy typy oprogramowania bazują na technice komputerowej analizie obrazu, która wykorzystywana jest w procesie precyzyjnego nakładania modeli w czasie rzeczywistym na obrazy świata rzeczywistego (z kamery). Do prawidłowego nakładania komputerowo generowanych obiektów na obraz świata rzeczywistego oprogramowanie wykorzystuje się drukowane markery i wyświetlacz HMD. Każdy z markerów przedstawia cyfrowo zakodowany wzór, dlatego możliwa jest identyfikacja danego markera. Optyczny system śledzący korzystający z kamery, bazujący na technice komputerowej analizie obrazu śledzi w czasie rzeczywistym położenie i orientację markera względem kamery oraz rozpoznaje jego symbol, dzięki czemu możliwe jest wyświetlanie odpowiedniego wirtualnego obiektu dokładnie w miejscu markera, zgodnie z jego położeniem i orientacją. Położenie i orientacja markera pozwalają zidentyfikować kierunek, w którym skierowany jest wzrok użytkownika (położenie głowy względem markera), w rezultacie czego świat realny oglądany przez wyświetlacz HMD wzbogacony jest w prawidłowy sposób o komputerowo generowane obiekty. Szczegółowo proces nakładania obiektów wirtualnych na obraz świata rzeczywistego autorzy przedstawiają m.in. w [4] i [7].

3. Obszary zastosowania

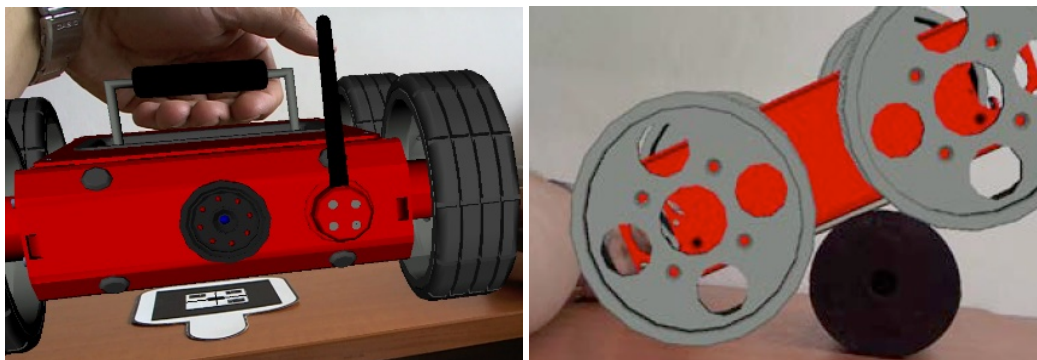
Dotychczas opracowane w Instytucie Podstaw Konstrukcji Maszyn systemy AR implementowane były na potrzeby wspomaganie projektowania i eksploatacji dla różnych środków technicznych, głównie robotów mobilnych oraz naczepek dla ciągników siodłowych [3]. Wspomaganie projektowania obejmowało także aspekty projektowania przestrzeni pracy [8]. Ponadto najnowsze implementacje związane są z eksploatacją obiektów technicznych, takich jak mosty [10].

3.1 Wspomaganie projektowania i konstruowania

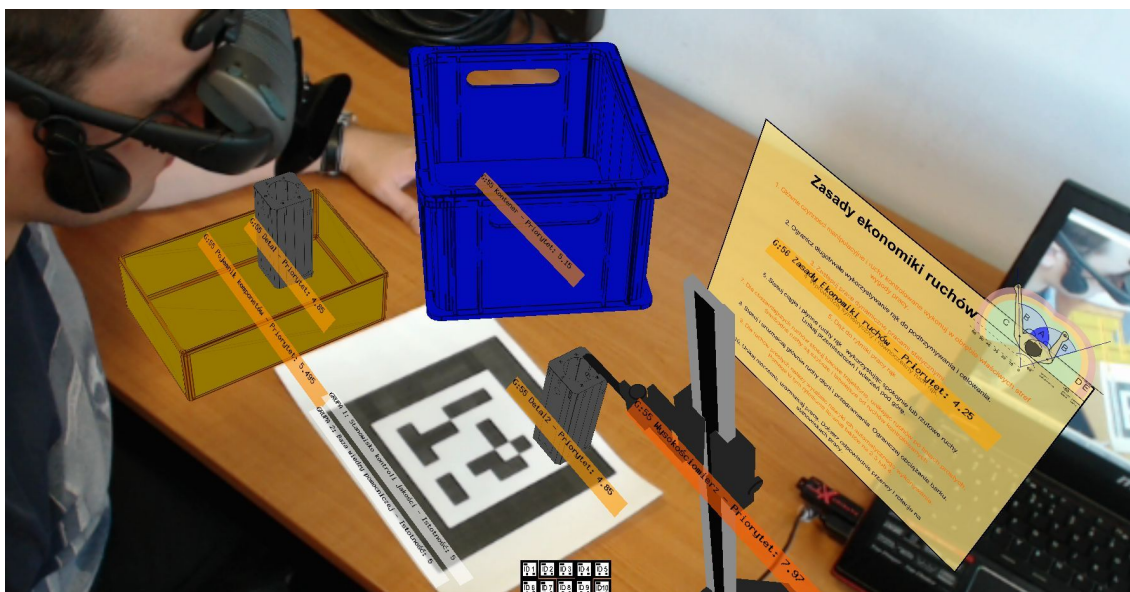
Opracowany przez autorów prototypowy system AR pozwala wspomagać użytkowników w realizacji zadań w ramach procesu projektowego, w tym przeprowadzania różnego rodzaju analiz. Szczególnie istotna jest możliwość efektywnej prezentacji opracowywanych w systemach CAx modeli 3D. Modele takie mogą być prezentowane nawet w skali 1:1, w sposób niezwykle fotorealistyczny, często zastępując tym samym potrzebę budowy fizycznych prototypów.

W zakresie projektowania opracowany system umożliwia wspomaganie użytkowników w realizacji następujących prac:

- przeprowadzanie analiz ergonomicznych (empiryczna weryfikacja ergonomicznych rozwiązań konstrukcyjnych), koncentrujących uwagę na dostosowaniu produktu do fizycznych i psychicznych predyspozycji człowieka i/lub warunków użytkownika produktu (analiza pola widzenia, optymalizacja kształtu, analizy wygody montażu) (rys. 3),
- opracowania projektu i przeprowadzania analiz rozmieszczenia elementów (także w ramach projektowania przestrzeni pracy), w tym: urządzeń sygnalizacyjnych i sterowniczych dla pulpitu operatora, czy komponentów (np. wiązek przewodów) (rys. 4),
- dopasowania projektowanych maszyn i urządzeń do otoczenia i ich prezentacja w tym otoczeniu,
- określenia typu, struktury przestrzennej i właściwości (np. rozmiaru) poszczególnych elementów składowych maszyny i urządzenia,
- opracowania projektu i przeprowadzania analiz pod kątem wyglądu (zgodności z zasadami estetyki i wzornictwa) i kształtu (ang. shape design),
- analizy wyników analiz wytrzymałościowych (np. odkształceń, naprężeń, przepływów),
- doboru elementów standardowych (katalogowych, znormalizowanych) lub adaptacji istniejących rozwiązań do nowo projektowanych maszyn i urządzeń,
- weryfikacji poprawności wirtualnej makiety przyszłego środka technicznego lub jego komponentów (w tym przy współudziale klientów),
- wykrywania i analizowania kolizji geometrycznych.



Rys. 3. Zastosowanie technik AR do prowadzenia analiz: weryfikacja dostosowania produktu do fizycznych cech użytkownika (po lewej) oraz otoczenia (po prawej)



Rys. 4. Wspomaganie prac projektowo-konstrukcyjnych w zakresie planowania przestrzeni pracy [8]

3.2 Wspomaganie eksploatacji

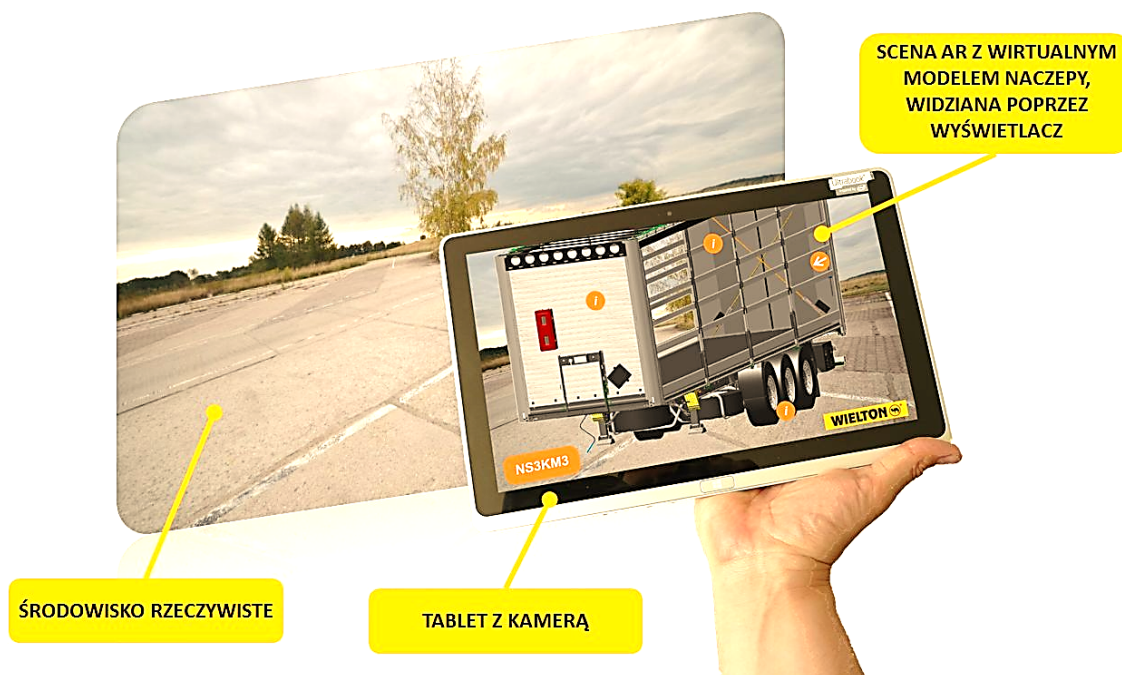
Równie ważne zastosowanie opracowanych w Instytucie Podstaw Konstrukcji Maszyn systemów AR wiąże się z ostatnimi etapami cyklu życia środka technicznego, tj. eksploatacją. Możliwe są co najmniej trzy scenariusze zastosowania systemu AR:

- zapoznanie się z budową środka technicznego bazując na jego wirtualnej instancji lub rzeczywistym obiekcie wraz z wizualizowanymi wirtualnymi danymi w trybie AR,
- symulacja działania wirtualnej maszyny lub urządzenia w warunkach rzeczywistych,
- wspomaganie czynności obsługowych na podstawie interaktywnych instrukcji związanych z obsługą urządzenia lub maszyny.

System AR w zakresie wspomaganie eksploatacji zapewni wizualizację w trybie AR następujących elementów:

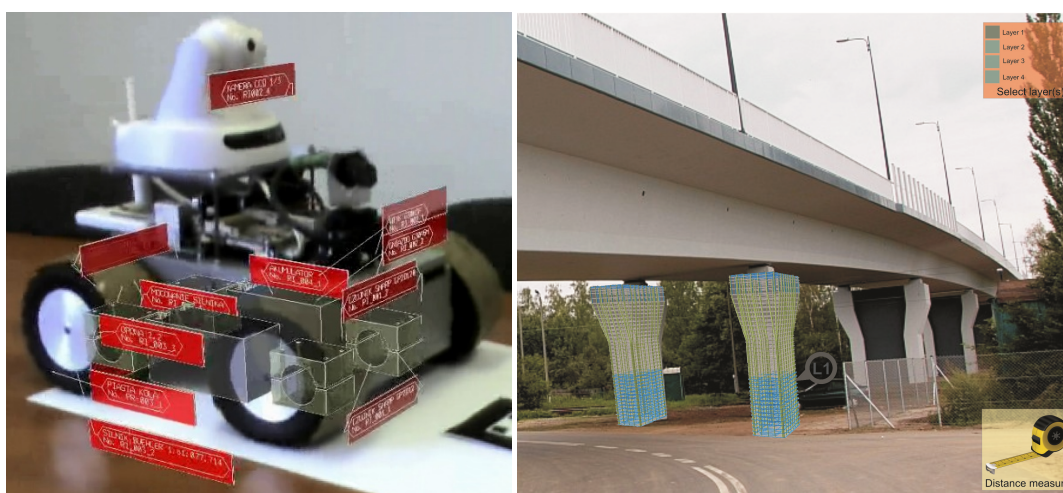
- tekstowego i/lub schematycznego opisu komponentu składowego środka technicznego lub sposobu realizacji danej czynności z możliwością wzbogacenia o filmy,
- informacji o rodzaju używanego narzędzia, niezbędnego w trakcie realizacji czynności (np. typ i rozmiar klucza niezbędnego do demontażu pokrywy korpusu robota), w tym jego wizualizacji i symulacji sposobu użycia w trakcie realizacji danej czynności,
- wizualnej symulacji dowolnej czynności obsługowej (np. sposób demontażu koła w robocie mobilnym, czy montażu układu wykonawczego).

Zastosowanie systemu AR w zakresie wspomaganie obsługi maszyn i urządzeń w pierwszym i drugim z przypadków użycia polegać może na wykorzystaniu interaktywnego wirtualnego modelu trójwymiarowego tego urządzenia (tzw. wirtualnej makiety), wyświetlanego w trybie AR. W takim przypadku system umożliwi użytkownikowi zapoznać się przede wszystkim z budową i symulacją działania prezentowanego wirtualnego urządzenia/maszyny. Możliwa jest także wizualizacja prezentowanego obiektu w typowych warunkach zastosowania (np. maszyna na hali produkcyjnej, pojazd na drodze, itp.) (rys. 5).



Rys. 5. Przykładowe zastosowanie systemu AR do wizualizacji wirtualnego modelu naczepy WIELTON w warunkach rzeczywistych w skali 1:1 [3]

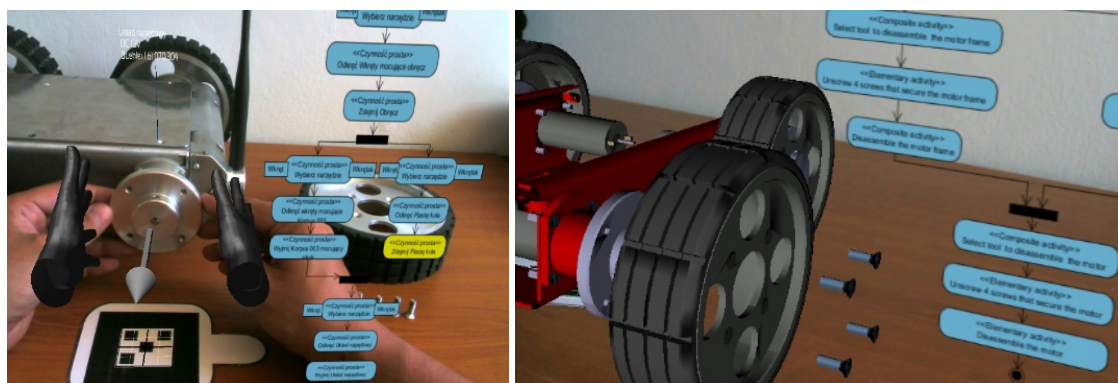
Przykładowo możemy więc dokonać wizualizacji działania mobilnego robota do inspekcji kanałów wentylacyjnych w miejscu, gdzie będzie on działał, czyli w rzeczywistych kanałach wentylacyjnych. Dodatkowo użytkownik ma możliwość zapoznać się z budową danego urządzenia, wyświetlając szczegółowe informacje techniczne o jego komponentach składowych. Informacje o położeniu, nazwie, numerze katalogowym (identyfikacyjnym) poszczególnych komponentów środka technicznego wyświetlane są bezpośrednio na rzeczywistym obiekcie. Możliwa jest wizualizacja rozmieszczenia poszczególnych komponentów, które nie są normalnie widoczne z zewnątrz i są na przykład ukryte wewnątrz maszyny/urządzenia/obiektu (rys. 6).



Rys. 6. Przykładowe zastosowanie systemu AR do wizualizacji: niewidocznych komponentów składowych robota (po lewej) oraz niewidocznych elementów strukturalnych obiektu mostowego (po prawej) [10]

Informacja taka stanowi podpowiedź dla niedoświadczonego użytkownika, jaka jest dokładna lokalizacja danego elementu. Informacja ta może być przydatna np. w przy-

padku potrzeby jej wymiany lub naprawy. Opracowany system pozwala poprawnie przeprowadzić proces obsługi (np. naprawę lub wymianę zużytej części) rzeczywistego środka technicznego. Osoba bez odpowiedniej wiedzy może być krok po kroku prowadzona przez system udzielający instrukcji w jakiej kolejności oraz w jaki sposób należy realizować daną czynność obsługową (rys. 7). System wspomaga użytkownika w taki sposób, że nawet bez wcześniejszego przeszkolenia jest on w stanie skutecznie realizować proces obsługowy. Instrukcje obsługi, z wizualizacją czynności w czasie rzeczywistym, powinny umożliwić sprawne, krok po kroku, przeprowadzenie czynności obsługowych także osobom bez wcześniejszego przeszkolenia. Taki sposób prezentacji instrukcji jest niezwykle intuicyjny, szczególnie w porównaniu do prezentacji instrukcji w klasycznej postaci (instrukcje drukowane).



Rys. 7. Przykładowe zastosowania systemu AR do wspomagania obsługi maszyn i urządzeń: wizualizacja instrukcji obsługowych na rzeczywistym robocie mobilnym (po prawej) oraz wizualizacja instrukcji obsługowych przy użyciu wirtualnego robota (o prawej)

4. Podsumowanie

Naturalną konsekwencją rozwoju wynikającą z zastosowania technologii komputerowych we wspomaganiu projektowania i eksploatacji systemów maszynowych zastępowanie tekstowych, semantycznych ziaren informacji ziarnami wizualnymi i interaktywnymi. Doskonałym rozwiązaniem są interaktywne modele geometryczne. Kolejnym krokiem jest integracja ziaren tekstowych i interaktywnych modeli we wspólnym interfejsie. Szczególnie korzystne i przydatne w procesie projektowania i eksploatacji systemów technicznych jest zastosowanie technik interaktywnych tj. poszerzonej rzeczywistości. Jest to odpowiedź na aktualną potrzebę. Możliwości zastosowania technik poszerzonej rzeczywistości w obszarach projektowania i eksploatacji zostały przedstawione w niniejszym artykule.

Tryb poszerzonej rzeczywistości służący do wizualizacji wiedzy i danych może być bardziej intuicyjny niż tradycyjne sposoby wizualizacji z wykorzystaniem drukowanych instrukcji, rysunków czy nawet trójwymiarowych modeli wyświetlanych na płaskim ekranie komputerowym. Wykorzystanie technik AR powinno ponadto skrócić czas zaangażowania personelu w przygotowanie różnego rodzaju projektów, w stosunku do czasu opracowania projektów w modelu tradycyjnym (z wykorzystaniem tradycyjnych narzędzi). Wynikać to powinno głównie z komputerowego wspomaganie procesu projektowo-konstrukcyjnego i eksploatacji. Dodatkowa korzyść płynąca z zastosowania AR to, że taki sposób prezentacji wiedzy i danych może spowodować lepszą czytelność dla osób z niej korzystających. Wiedza reprezentowana w formie modeli 3D przekazywana może dokładnie w chwili występowania zapotrzebowania na nią (ang. just-in-time) oraz w miejscu zapotrzebowania (ang. just-in-place) i w taki sposób aby nie odwracać uwagi użytkownika od realizowanych w tym czasie przez niego naturalnych czynności.

Techniki poszerzonej rzeczywistości stwarzają nowe możliwości w dziedzinie wspomaganie procesów projektowania i eksploatacji. Prezentowane możliwości pozwalają mieć nadzieję, że pewnego dnia systemy tego typu staną się powszechnie stosowane i przyczynią się do racjonalizacji procesów w różnych dziedzinach – nie tylko w projektowaniu i eksploatacji.

Literatura

- [1] Azuma R.T.: A Survey of Augmented Reality. In Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6 (4), s. 355-385, 1997
- [2] Milgram P., Takemura H., Utsumi A., Kishino F.: Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. SPIE Telemanipulator and Telepresence Technologies, s. 2351, 1994.
- [3] Januszka M., Kaczor M., Zastosowanie modeli 3D do wizualizacji oferty produkcyjnej. Techniki rzeczywistości wirtualnej i poszerzonej, Projektowanie i konstrukcje inżynierskie, Nr. 12 (111), 2016
- [4] Januszka M., Moczulski W.: Augmented reality for machinery systems design and development. Pokojski J., Fukuda S., Salwiński J. (Eds.): New World Situation – New Directions in Concurrent Engineering, Springer, Berlin Heidelberg, s. 79-86, 2010
- [5] Januszka M.: Augmented reality techniques for computer-aided design of durable and reliable machinery systems, T. Burczyński, W. Cholewa, W. Moczulski (Eds.): Recent Developments of Artificial Intelligence Methods, Gliwice, s. 139-147, 2009
- [6] Januszka M., Moczulski W.: Machinery design aided by augmented reality technology. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, vol. 14, s. 621-630, 2007
- [7] Januszka M., Moczulski W.: Machinery design aided by augmented reality technology. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, No. 14, s. 621-630, 2007
- [8] Krysta W., System wspomaganie projektowania przestrzeni pracy z zastosowaniem technik poszerzonej rzeczywistości. Praca dyplomowa magisterska; Promotor: dr inż. Marcin Januszka, 2015
- [9] Moczulski W., Panfil W., Januszka M., Mikulski G.: Applications of augmented reality in machinery design, maintenance and diagnostics. In: R. Jablonski, M. Turkowski, R. Szewczyk, eds., Recent Advantages in Mechatronics, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, s. 52-56, 2007
- [10] Salamak M., Januszka M.: Technologie BIM i poszerzonej rzeczywistości w inspekcji obiektów mostowych, Mosty 5/2016, s. 28-35, 2016
- [11] Skarka W., Moczulski W., Januszka M.: Interaktywne technologie w procesie kształcenia, SPG, 29(1), s. 105-114, 2012
- [12] ARToolKit [online] - HITLab. Data dostępu: 2017-10-20. Dostępne pod adresem: <https://artoolkit.org/>
- [13] METAIO [online]. Data dostępu: 2017-10-20. Dostępne pod adresem: <https://en.wikipedia.org/wiki/Metaio>
- [14] BuildAR Pro 2 [online]. Data dostępu: 2017-10-20. Dostępne pod adresem: <http://www.buildar.org/>

Małgorzata JOHN*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

*malgorzata.john@polsl.pl

NUMERYCZNE TESTOWANIE STRUKTUR TYPU PLASTER MIODU

1. Wstęp

Technologie addytywne poszerzają swój zakres, dotychczas wykorzystywano głównie do prezentacji nowo rozwiniętych elementów i weryfikacji geometrycznej, zwiększając wykorzystanie elementów wytwarzanych w tych technologiach, jako docelowej konstrukcji małych serii, stawia nowe wyzwania co do ich kształtu i wewnętrznych cech konstrukcyjnych. Znaczące są ich cechy kształtujące wytrzymałość i trwałość. Jednocześnie należy zaznaczyć, że obecne technologie produkcji nie są przystosowane do modyfikacji formy komponentów w trakcie produkcji jako powszechnie stosowane dodatki technologiczne. Istniejące systemy kształtowania struktury wewnętrznej opartej głównie na geometrycznym kształcie przestrzeni wewnętrznej realizującej tylko funkcję podporową dla kształtów zewnętrznych opartych na kryterium wypełnienia materiału, co pozwala zmniejszyć ilość materiału używanego. W przypadku zastosowań strukturalnych konieczne jest przyjęcie innych kryteriów kształtujących strukturę np. kryterium siły. Stanowi to zupełnie nowe wymagania w zakresie rozwoju wewnętrznej formy elementów wykonanych w technologii przyrostowej [1].

Struktura homogeniczna na bazie patogenu o strukturze plastra miodu, wykorzystywana podczas kształtowania wnętrza elementów wykonanych w technologiach przyrostowej, może być zastąpiona strukturą heterogeniczną, która ostatecznie zapewni optymalne właściwości wytrzymałościowe i odpowiednią masę. Badania zostały przeprowadzone w kilku etapach.

W pierwszym etapie zdecydowano się zbadać struktury, które są podobne do tych, które można zobaczyć w kości jako wzorzec struktury końcowej. Tego typu struktury zostały przetestowane na tym etapie, a także wybrano optymalne parametry obliczeniowe, które są wykorzystywane w tych przypadkach.

Badania porównawcze wyników numerycznych i eksperymentalnych zostały przeprowadzone w następnym etapie. Przedmiotem badań były typowe, ortogonalne próbki stosowane w testach zginania. Badania porównawcze obejmowały próbki przygotowane z kości korowej.

Trzeci etap obejmował opracowanie i testowanie próbek numerycznych o tym samym kształcie, ale z zastosowaniem wypełnienia w postaci plastra miodu o różnych rozmiarach umożliwiającym tworzenie heterogenicznych struktur podobnych do struktury kości.

W kolejnym etapie opracowano strukturę próbek, która miała zupełnie nową formę wewnętrzną ukształtowaną jako superpozycja wcześniej rozwiniętych struktur wraz z nowo opracowaną heterogeniczną strukturą o zmiennym rozmiarze komórek o strukturze plastra miodu. Wytworzona w ten sposób próbka do próby trójpunktowego zginania została poddana testom numerycznym. Wyniki testów zostały porównane z wstępnymi strukturami próbek ortogonalnych w oparciu o wypełnienie typowego, niezmodyfikowanego plastra miodu.

Możemy powiedzieć, że początkowe struktury składają się z komórek sześciokątnych połączonych ze sobą (w przestrzeni, warstwach) i nowej strukturze, które są otoczone materiałem przez puste przestrzenie o strukturze plastra miodu (o różnych rozmiarach i położeniu).

Praca koncentrowała się przede wszystkim na prezentacji zadań i wyników z trzeciego i czwartego etapu oraz sprawdzeniu, w jaki sposób geometria proponowanej nowej struktury wpływa na właściwości mechaniczne konstrukcji.

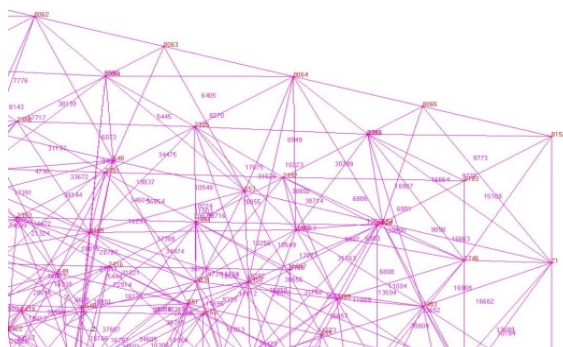
2. Badania eksperymentalne i numeryczne kości człowieka

Kość udowa w swej środkowej części ma przekrój rurowy, co daje jej, przy tak niewielkim przekroju, duże własności wytrzymałościowe. W górnej części znajduje się głowa kości udowej, która zbudowana jest z kości zbitej, podobnie jak szyjka [2]. Kości, jako materiały kompozytowe, zawierają różnego rodzaju wtrącenia, które, z technicznego punktu widzenia, można sklasyfikować jako rozproszone wtrącenia, włókna, warstwy lub nawet trójwymiarowe kratownice. Zapewniają one wytrzymałość na działanie naprężeń stycznych i normalnych, a szczególnie sposób zapobiega propagacji pęknięć.

Większość badań właściwości tych struktur przeprowadzono na małych próbkach przygotowanych z całych kości lub więzadeł, ścięgien itp. Testy na próbkach utrzymywane są w specyficznych warunkach obciążenia, gdy są znane kierunki naprężeń i przemieszczeń. Najczęściej badania właściwości materiału tkankowego są określane podczas rozciągania, zginania i skręcania [3]. Należy zwrócić uwagę na miejsce pobrania, czy to była świeża tkanka, przechowywana w płynie czy suszona, opis dawcy (wiek, waga, płeć itp.), a także warunki przeprowadzania pomiarów [2,4,5].

Badania koncentrowały się zwłaszcza na kości korowej i beleczkowej. Dobrze wiadomo, że kość korowa przenosi większość obciążeń. Można to zaobserwować szczególnie w obrębie miednicy, gdzie zewnętrzna warstwa składa się z kości korowej i wewnętrznej warstwy kości beleczkowej [5]. Wyjątkami są nasady kości długich zbudowanych z kości beleczkowej i przenoszących obciążenia stawów. Struktura ta zdawała się być bardzo interesująca jako struktura wsparcia. Dlatego też przeprowadzono badania eksperymentalne na próbkach przygotowanych z kości udowej człowieka. Celem pracy było określenie właściwości mechanicznych przygotowanych próbek. Na podstawie prób trójstronnego testu zginania przyjęto wartość modułu Younga 15 GPa. Zbadano wpływ elementów 4-węzłowych (rys.1) o kwadratowej lub liniowej funkcji kształtu oraz elementów 8-węzłowych o kwadratowej lub liniowej funkcji kształtu, na dokładność naprężeń i odkształceń. W trakcie symulacji zmieniano rozmiar elementów (gęstość siatki).

Na podstawie analizy wyników symulacji numerycznej wybrano optymalny model składający się z elementów 8-węzłowych o liniowej funkcji kształtu i wymiarze 0,4 mm [6-9]. W trakcie opracowywania modelu zauważono, że gęstość i rozkład typu użytych elementów wpływają na otrzymane rozłożenia naprężeń i przemieszczeń.



Rys.1. Model siatki elementów skończonych próbki

Zwiększenie stopni swobody elementów poprzez zastosowanie kwadratowej funkcji kształtu (elementy typu Tet10 i Hex20) nie wpłynęło istotnie na poprawę uzyskanych wyników, a jednocześnie znacznie zwiększyło czas obliczeniowy. W następnym kroku zbadano także wpływ zmian wielkości elementów (gęstość oczek sieci) na uzyskane wyniki.

Kość, w swojej wewnętrznej strukturze, jest heterogenna w odniesieniu do umieszczenia komórek i ich typu. W przypadku modelu numerycznego skupiono się na beczkowej (w mniejszym sensie korowej) części ludzkiej kości udowej. Stąd zaproponowano strukturę tkanki kostnej jako wewnętrzną strukturę elementów wspomagających egzoszkielet. Rozmieszczenie komórek kości w obrębie struktury zależy od obciążeń przenoszonych w danym miejscu kości. W tym podejściu przyjęto homogeniczny model izotropowy materiału kostnego. Podczas symulacji, w trakcie opracowywania modelu numerycznego, można wykorzystać dane uzyskane w badaniach CT i MIMIC, aby uwzględnić niejednorodność tkanki kostnej. Prowadzone badania nie musiały mieć tak dokładnych wyników w tym zakresie [9].

3. Struktura typu plaster miodu

Na przykładzie analogii biologicznych zaproponowano również strukturę opartą na budowie plastra miodu. Przemysł stale poszukuje nowych materiałów i nowych konstrukcji w celu zmniejszenia masy, zwiększenia wytrzymałości i lepszej oceny innych parametrów mechanicznych. Struktura typu sandwich składająca się z rdzenia i okładziny jest stosowana w różnych gałęziach przemysłu, takich jak przemysł lotniczy, stoczniowy, motoryzacyjny. Warstwa rdzenia w większości przypadków jest grubsza niż zewnętrzna warstwa [10-13]. Taka struktura znacznie zmienia swoje właściwości w stosunku do konwencjonalnej konstrukcji, między innymi ze względu na anizotropię sztywności. Obydwa materiały są same w sobie mocne i sztywne, ale utworzony z nich zespół ma jeszcze lepszą sztywność i wytrzymałość. Ma ona kilka ważnych funkcji, które są istotne w projektowaniu i rozwoju tych gałęzi przemysłu. Struktura ta charakteryzuje się relatywnie małym ciężarem w stosunku do właściwości mechanicznych [14]. Modyfikacja rdzenia i okładziny może mieć wpływ na te właściwości. Ciekawą cechą jest zdolność pochłaniania w szerokim zakresie częstotliwości od infradźwięków, wibracji lub fal mechanicznych [15]. Struktura wykazała również odporność na korozję w środowisku morskim i odporność cieplną. W przemyśle lotniczym i przemyśle stoczniowym ma to istotną wagę. Przemysł motoryzacyjny skoncentrował się głównie na właściwościach pochłaniania energii przez strukturę. Okazuje się, że jest ona użyteczna przy budowaniu systemów bezpieczeństwa. Zaproponowano zbadanie, czy struktura ta jest odpowiednia dla elementów nośnych. Przygotowano kilka numerycznych modeli jednorodnej struktury. Bazowano na komórce sześciokątnej i zmieniano m.in. takie parametry jak grubość ścianki, wymiary komórek.

W następnym etapie zdecydowano się na zmianę i zaproponowano strukturę heterogeniczną. W literaturze możemy znaleźć wiele artykułów dotyczących problematyki optymalizacji topologii w konstrukcjach 2D i 3D, takich jak belki, dźwigary, wsporniki lub inne wielkogabarytowe struktury podporowe [16-22]. Niektóre z nich oparte są również na podobieństwie struktur biomechanicznych [23-25]. Chociaż początkowy kształt (objętość) jest pełny i ciągły, ostateczna postać jest bardzo podobna do kratownicy.

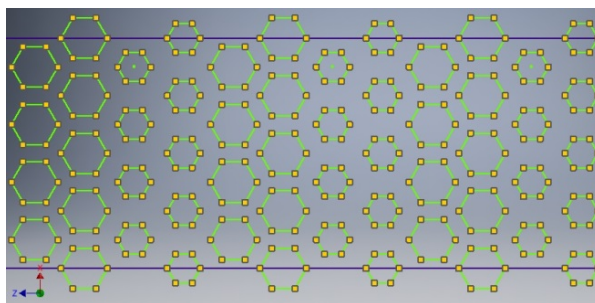
Wyniki uzyskane w optymalizacji topologicznej pozwalają zaproponować strukturę, która jest przestrzenną kratownicą, której elementy mają różne przekroje, różne długości i różne rozmieszczenie.

Na podstawie przeglądu literatury zaproponowano zmiany w komórkach nałożone na kontur kratownicy. W miejscu, gdzie przestrzeń powinna być wypełniona komórkami, ma grubszą ścianę. Ze względu na ograniczenia narzucone przez model dodatków technologicznych może składać się z stosunkowo dużej pustej przestrzeni. Dlatego też proponuje się wypełnienie ich komórkami mającymi np. cieńszą ścianę.

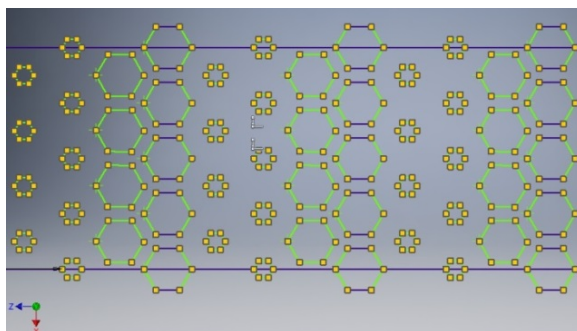
Zaproponowano, żeby zmienianymi parametrami były grubość ścianki i wielkość komórki. W pierwszym etapie zdecydowano o zbadaniu wpływu grubości ścianki na otrzymane wyniki. Wymiary modelu były przybliżone do wymiarów badanych próbek kości i wyniosły 4x4x40 mm. Przyjęto to założenie w celu ułatwienia porównania otrzymanych wyników. Odległość od podstawy do przeciwnej strony sześcianu wynosiła

1 mm. Jest to zewnętrzny wymiar komórki. Na tym etapie dostosowano je do zewnętrznych wymiarów modelu. Zmiany wymiarów wewnętrznych - grubość ścianki - powodują zmniejszenie lub zwiększenie wolnej przestrzeni wewnątrz komórki. Wszystko to korelowało do wartości 1 mm.

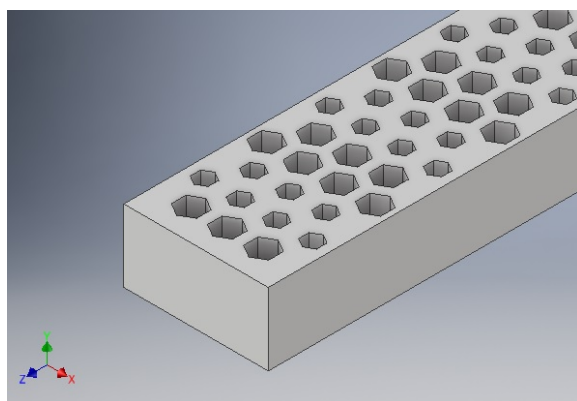
Grubość ścianki wynosiła 0,4 mm i minimalnie 0,05 mm. Postanowiono zmieniać geometrię na różne sposoby. Podstawowa grubość ścianki była 0,25 mm. Pierwszy model był jednorodny, a grubość każdej ścianki była taka sama. Początkowo zwiększona grubość ścianki usytuowanej na zarysie siatki i równocześnie zmniejszono grubość ścianek komórek na zewnątrz konturu. W następnym kroku ustalono, że różnica nie jest zbyt wysoka. Na przykład, gdy kontur ściany komórkowej w siatce ma grubość ścianki 0,25 mm, ściana komórki poza obwodem wynosi 0,2 mm (rys.2-4).



Rys.2. Przykład geometrii próbki



Rys.3. Przykład geometrii ekstremalnych wymiarów pustych przestrzeni w próbce

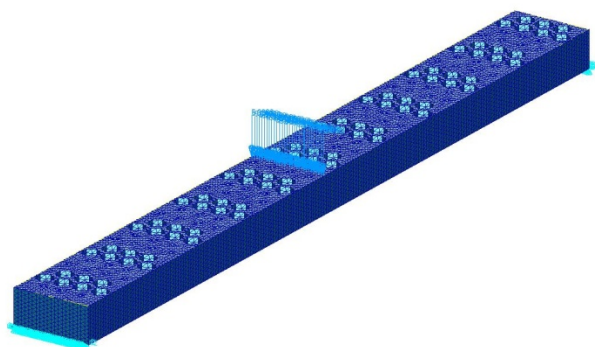


Rys. 4. Geometryczny model próbki jednowarstwowej

W kolejnym etapie zaproponowano zmianę wymiarów komórek, a grubość ścianki w każdym przypadku była podobna. Maksymalna odległość między ścianami przeciwnymi wynosiła 2 mm, a minimum 0,5 mm. Zmieniało grubość ściany, ale zawsze wszystkie komórki były takie same.

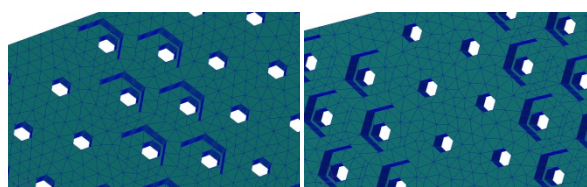
4. Wyniki symulacji numerycznej

Kiedy mówimy o „optymalnych wynikach” mamy na myśli wartość naprężeń i przemieszczeń w modelu uzyskanych podczas symulacji próby trójpunktowego zginania. Wszystkie badane numerycznie próbki mają te same wymiary, co wcześniejsze testowane próbki przygotowane z kości korowej. Próbkę o długości 40 mm, wysokości 4 mm i szerokości 4 mm modelowano dla konstrukcji dwuwarstwowej i próbki o wysokości 2 mm dla struktury jednowarstwowej. Warunki brzegowe (podparcie i obciążenie) przyjęto jak w typowej próbie trójpunktowego zginania (rys. 5). Działająca siła wynosiła 5 N. Rysunek 6 pokazuje odpowiednio dolny i górny widok struktury w tym samym miejscu.



Rys.5. Model jednowarstwowy z warunkami brzegowymi

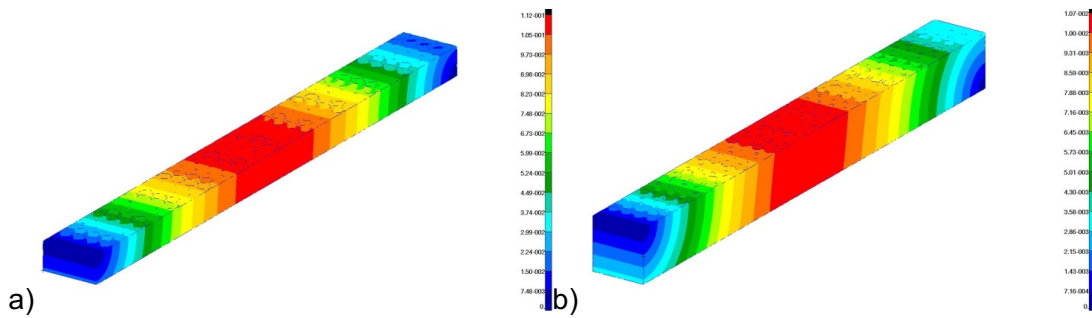
Rozkład przemieszczeń dla obu rodzajów modeli, jedno- i dwuwarstwowych, jest typowym zjawiskiem w zginaniu (rys. 7), jednak w rozkładzie naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa widać spadek wartości maksymalnych (rys. 8), podobnie jak w przypadku naprężeń zginających (rys. 9) - są zakłócone w sekcjach, w których występują puste przestrzenie. Można zaobserwować, że im większy jest rozmiar pustych przestrzeni to występuje większe spiętrzenie naprężeń.



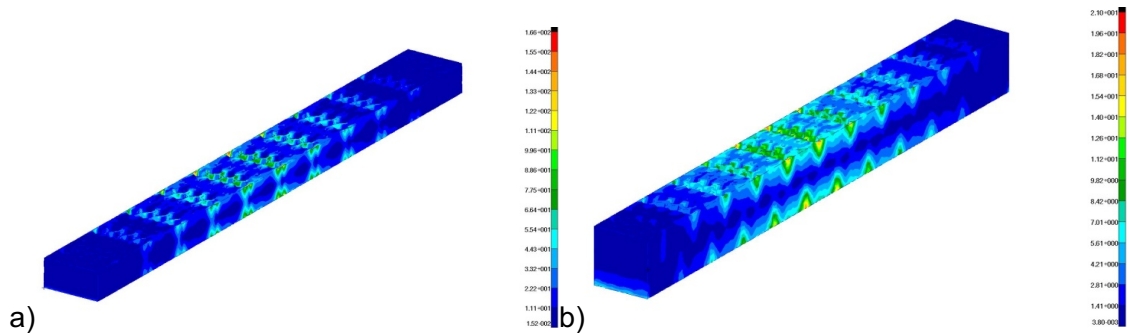
Rys.6. Widok z dołu (lewy rysunek) i z góry (prawy rysunek) struktury dwuwarstwowej

Zmiany wprowadzone w strukturze próbki wpływają na zmniejszenie maksymalnej wartości przemieszczeń i naprężeń w modelu dwuwarstwowym, a także w modelu jednowarstwowym. W modelu jednowarstwowym można zauważyć, że maksymalne przemieszczenie równe 0,115 mm w początkowej konfiguracji pustych przestrzeni zmniejszyło się do 0,098 mm w końcowej konfiguracji. Te same tendencje obserwowano w modelach dwuwarstwowych. W tym przypadku przemieszczenie równe 0,11 mm we wstępnej konfiguracji pustych przestrzeni zmniejszyło się do 0,0091 mm w kolejnej konfiguracji.

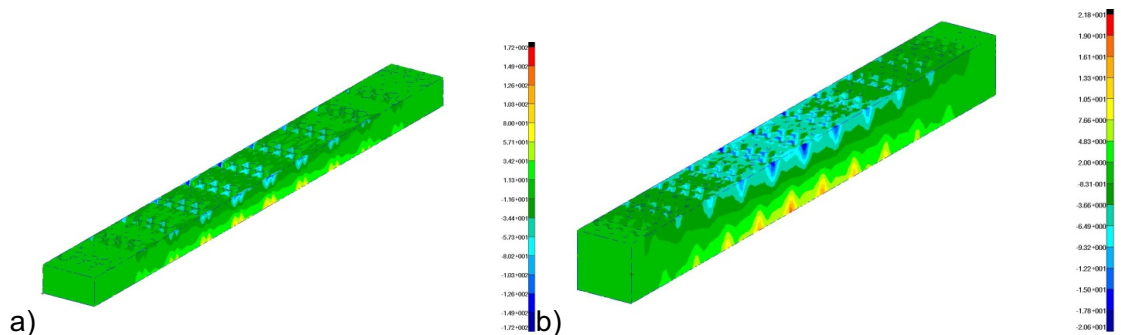
Wraz z redukcją pustej przestrzeni nastąpiła poprawa wyników. Wprowadzenie zbyt dużo wolnej przestrzeni powodowało znaczne pogorszenie wyników. W niektórych przypadkach okazały się one krytyczne. Każdy model niejednorodny nie był lepszy niż model jednorodny. W niektórych przypadkach uzyskane wyniki były gorsze od modelu podstawowego. Podobne zjawisko zaobserwowano przy porównywaniu wyników pomiędzy modelami wytwarzanymi przez zmianę grubości ścianek, a gdzie modele miały podstawowe wymiary komórek. Można powiedzieć, że niektóre zmiany mają lepszy wpływ na uzyskane wyniki, a inne gorsze.



Rys.7. Rozkład przemieszczeń w modelu jednowarstwowym (a) i dwuwarstwowym (b) w mm



Rys.8. Rozkład naprężeń redukowanych (Hubera-Misesa) w modelu jednowarstwowym (a) i dwuwarstwowym (b), w MPa.



Rys.9. Rozkład naprężeń normalnych w modelu jednowarstwowym (a) i dwuwarstwowym (b), w MPa

W dalszych badaniach proponuje się przeprowadzenie analizy wrażliwości w celu zbadania, które czynniki (wymiary) są najważniejsze.

5. Podsumowanie

Zaobserwowano, że wraz ze zmniejszeniem wolnej przestrzeni w modelu, a tym samym zwiększeniem masy, zwiększa się wytrzymałość. Jednocześnie wzrasta sztywność próbki. Czasem zjawisko to jest dobre, ale nie w każdym przypadku. Zaletą struktur komórkowych podobnych do plastra miodu jest wysoka wytrzymałość w stosunku do relatywnie małej wagi. Kiedy ścianki komórkowe są zbyt grube lub struktura składa się z gęstej siatki komórek, to zaczyna tracić najważniejsze zalety tej konstrukcji. Pomimo uzyskania lepszych wyników wytrzymałościowych, nie muszą być to preferowane wyniki dla modeli.

Można zauważyć, że bardzo interesującym rozwiązaniem są materiały, struktury, które we wnętrzu mają wolne przestrzenie zawierające powietrze, inny gaz lub ciecz. Zaobserwowano w nich względnie dobre właściwości mechaniczne przy proporcjonalnie małej masie. Takie rozwiązania można znaleźć w naturze. W przypadku struktury plastra miodu jest jednorodna. Ludzką kość można zaliczyć do struktur niejednorodnych.

Wewnętrzna struktura kości jest dostosowana do przenoszenia obciążeń, które występują w normalnym funkcjonowaniu człowieka. Tkanki kości, zarówno kość beleczkowa, jak i korowa, są bardzo dobrymi przykładami struktur heterogenicznych, wysoce przenoszących zadane obciążenie.

Uzyskane wyniki potwierdzają istotny wpływ wymiarów i rozkładu pustych przestrzeni w strukturze plastra miodu na właściwości mechaniczne konstrukcji, ale dalsza kontrola procesu wymaga dalszej analizy z wykorzystaniem analizy wrażliwości lub optymalizacji topologicznej.

Literatura

- [1] John M., John A., Skarka W.: The influence of the geometrical parameters on the mechanical properties of honeycomb structure, *Mechanika*, vol. 23 nr 3, s. 359-364, 2017.
- [2] Będziński R.: *Biomechanika inżynierska. Zagadnienia wybrane*, Oficyna Wydawnicza Pol. Wrocławska, Wrocław 1997.
- [3] Jakubowicz, A.: Orłoś, Z. *Wytrzymałość materiałów*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- [4] Kokot G.: Wyznaczanie własności mechanicznych tkanek kostnych z zastosowaniem cyfrowej korelacji obrazu, nanoindentacji oraz symulacji numerycznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [5] Keaveny T.M.Z, Morgan E.F., O.C. Yeh: *Bone Mechanics*. w: M. Kutz (Ed.): *Standard handbook of biomedical engineering and design*. McGraw-Hill, 2004.
- [6] John M.; John A.: 2015. The influence of the model parameters of "honeycomb" structure on mechanical properties. *Proc. of the 20th Int. Conf. Mechanika 2015*, Kaunas: 116-119.
- [7] John M.; John A.: Modeling and numerical analysis of honeycomb structures for application in sandwich structures. *Proc. of the 21th Int. Conf. Mechanika 2016*, Kaunas: 92-95.
- [8] John A.; John M.: Foam metal and honeycomb structures in numerical simulation. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, T. XIV, No. 4 [Nov.], 27-32.
- [9] John, M.; Skarka, W.: Application to biological analogy development of the form of structural bearing components exoskeleton, *Aktual. Probl. Biomech.*, 63-68 (in Polish).
- [10] Abbadi, A.; Koutsawa, Y.; Carmasol, A.; Belouettar, S.; Azari, Z.: Experimental and numerical characterization of honeycomb sandwich composite panels. *Simulation Modelling Practice and Theory* 17: 1533–1547, 2009.
- [11] Fengnian J.; Hailong C.; Long Z.; et al.: Failure mechanisms of sandwich composites with orthotropic integrated woven corrugated cores. *Experiments, Composite Structures* 98: 53-58, 2013.
- [12] Sadowski T.; Bęc J.: Effective properties for sandwich plates with aluminium foil honeycomb core and polymer foam filling – Static and dynamic response. *Comp. Materials Science* 50: 1269–1275, 2011.
- [13] Wahl, L., Maas, S., Waldman, D., Zurbes, A.; Freres, P. 2011, *Shear Stresses In Honeycomb Sandwich Plates: Analytical Solution, FEM, and Experimental Verification*; University of Luxembourg.
- [14] He M.; Hu W.: A study on composite honey-comb sandwich panel structure. *Materials and Design* 29: 709-713, 2008.
- [15] Roy, R.; Park, S.J.; Kweon, J.H.; Choi, J.H.: Characterization of Nomex honeycomb core constituent material mechanical properties. *Composite Structures*: 1-45, 2014.

- [16] Cea J.; Garreau S.; Guillaume Ph.; Masmoudi M.: The shape and topology optimization connection. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 188 (4), 713-726, 2000.
- [17] Amstutz S.; Novotny A.A.: Topological optimization of structures subject to stress constraints. *Proc. of 18th Int. Conf. CMM 2009, Zielona Góra, Short Papers*, 51-52, 2009.
- [18] Mrzygłód M.: Using layer expansion algorithm in topology optimization with stress constraints. *Proc. of 18th Int. Conf. CMM 2009, Zielona Góra, Short Papers*, 319-320, 2009.
- [19] Bendsoe M.; Sigmund O.: *Topology Optimization. Theory, Methods and Applications*. Sptinger Sci-ences&Bussines Media, pp. 370, 2003.
- [20] Szczepanik M.; Burczyński T.: Swarm optimization of stiffeners locations in 2-D structures. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, Vol. 60, No. 2, 241-246, 2012.
- [21] Burczyński, T.; Poteralski, A.; Szczepanik, M.: Topological evolutionary computing in the optimal de-sign of 2D and 3D structures. *Engineering Optimization*, Vol. 39, No. 7, Taylor & Francis, 811 – 830, 2007.
- [22] Poteralski A.: *Optimization of Mechanical Structures Using Artificial Immune Algorithm, Beyond Databases, Architectures, and Structures (BDAS)*. *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 424, Springer, 280-289, 2014.
- [23] Makowski P., Kuś W.: Optimization of bone scaffold structures using experimental and numerical data. *Acta Mechanica*, vol. 227, No. 1, 139-149, doi:10.1007/s00707-015-1421-4, 2016.
- [24] Nowak M.: Structural optimization system based on trabecular bone surface adaptation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 32, No. 3, 241–249, 2006.
- [25] Nowak M.: Topology optimization with different material parameters using a biomimetic approach. *Proc. of 18th Int. Conf. CMM 2009, Zielona Góra, Short Papers*, 337-338, 2009.

Andrzej KATUNIN*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

*andrzej.katunin@polsl.pl

ORGANICZNY WIELOFUNKCYJNY KOMPOZYT KONSTRUKCYJNY DO ZASTOSOWAŃ W LOTNICTWIE

1. Wstęp

Konstruktorzy współczesnych samolotów coraz częściej sięgają po kompozyty z polimerową osnową. W branży lotniczej materiały te sukcesywnie wypierają metale już od kilkudziesięciu lat, czego wynikiem są najnowsze samoloty pasażerskie, w których kompozyty polimerowe stanowią niemal 50% zawartości wagowej. Zastosowanie tych materiałów niewątpliwie istotnie zwiększyło współczynnik stosunku wytrzymałości do masy, co pociągnęło za sobą znaczące korzyści ekonomiczne. Jednak, pomimo oczywistych zalet, struktury kompozytowe wykorzystywane w lotnictwie nieraz przysparzają wielu problemów, zarówno na etapie projektowania takich struktur, jak i podczas ich eksploatacji. Wśród trudności napotykanych przy wykorzystaniu kompozytów polimerowych można wymienić anizotropię materiałową, która sprawia, że opis zjawisk fizycznych zachodzących podczas eksploatacji jest trudny. Z tego względu, pomimo szerokiego zastosowania kompozytów polimerowych w lotnictwie, nie istnieją uniwersalne modele pozwalające na precyzyjny opis procesów zmęczeniowych, a co za tym idzie, trudno jest prognozować żywotność takich elementów, zwłaszcza w warunkach występowania uszkodzeń.

Istotnym problemem, który pojawił się wraz z rozpoczęciem stosowania kompozytów polimerowych do wytwarzania elementów zewnętrznych poszycia samolotów, jest ich brak odporności na wyładowania atmosferyczne. Problem jest stosunkowo nowy, gdyż samoloty starszej generacji, zawierające metalowe poszycie, potrafiły przewodzić prądy piorunowe o dużej wartości szczytowej natężenia prądu (zazwyczaj kilkadziesiąt kiloamperów), które mogą występować podczas wyładowania atmosferycznego – bez żadnych szkód zarówno dla pasażerów jak i dla samej struktury, przez którą przepływał prąd. Problem zmienił się diametralnie, gdy zaczęto stosować kompozyty polimerowe, gdyż cechują się one właściwościami dielektrycznymi, a ich przewodność elektryczna różni się nawet o 20 rzędów w stosunku do metali. Ze względu na szereg zjawisk zachodzących przy uderzeniu pioruna w taką strukturę, struktura kompozytowa ulegała degradacji w postaci wypaleń w epicentrum uderzenia, rozerwaniem włókien bądź tkanin umacniających w miejscu uderzenia oraz rozległych rozwarstwień w jego okolicy wskutek oddziaływania mechanicznego powstającej fali akustycznej podczas takiego wyładowania.

Jak wskazują przedstawiciele czołowych koncernów lotniczych, jak i przedstawiciele ich podwykonawców zajmujących się projektowaniem struktury oraz konstruowaniem elementów kompozytowych dla lotnictwa, branża ta potrzebuje nowych rozwiązań materiałowych, szczególnie w zakresie materiałów wielofunkcyjnych, które oprócz swoich właściwości wytrzymałościowych powinny spełniać dodatkowe role, jak np. ochrona odgromowa, ochrona przed interferencją elektromagnetyczną, odlodzenie elementów samolotów itd., zachowując przy tym niską masę.

Biorąc pod uwagę zapotrzebowanie rynkowe na takie materiały od kilku lat interdyscyplinarny zespół z Politechniki Śląskiej pracuje nad nowymi rozwiązaniami materiałowymi dla lotnictwa. Niniejszy rozdział opisuje główne osiągnięcia zespołu na przestrzeni trzech ostatnich lat.

2. Ochrona odgromowa w lotnictwie

Jednym z kierunków rozwoju mechaniki, chemii i inżynierii materiałowej do zastosowań w zewnętrznych strukturach lotniczych jest opracowanie materiałów wielofunkcyjnych, które zapewnią zarówno dobre właściwości mechaniczne, jak i przewodność elektryczną. Przewodność elektryczna jest właściwością kluczową dla takich zastosowań z kilku względów: w przypadku, gdy zewnętrzne poszycie kadłuba będzie przewodnikiem, pozwoli to na zwiększenie obszaru dyssypacji ładunku elektrycznego i tym samym zniweluje koncentrację ładunku (natężenia prądu) w miejscu uderzenia, a także obniży temperaturę w tymże miejscu. Pozwoli to na minimalizację uszkodzenia spowodowanego uderzeniem pioruna. Poza tym, wysoka przewodność elektryczna kadłuba zapewnia uziemienie dla całego statku powietrznego, ochroni pasażerów i urządzenia elektroniczne znajdujące się wewnątrz poprzez utworzenie swojego rodzaju klatki Faradaya oraz posłuży jako ekran chroniący przed zakłóceniami elektromagnetycznymi.

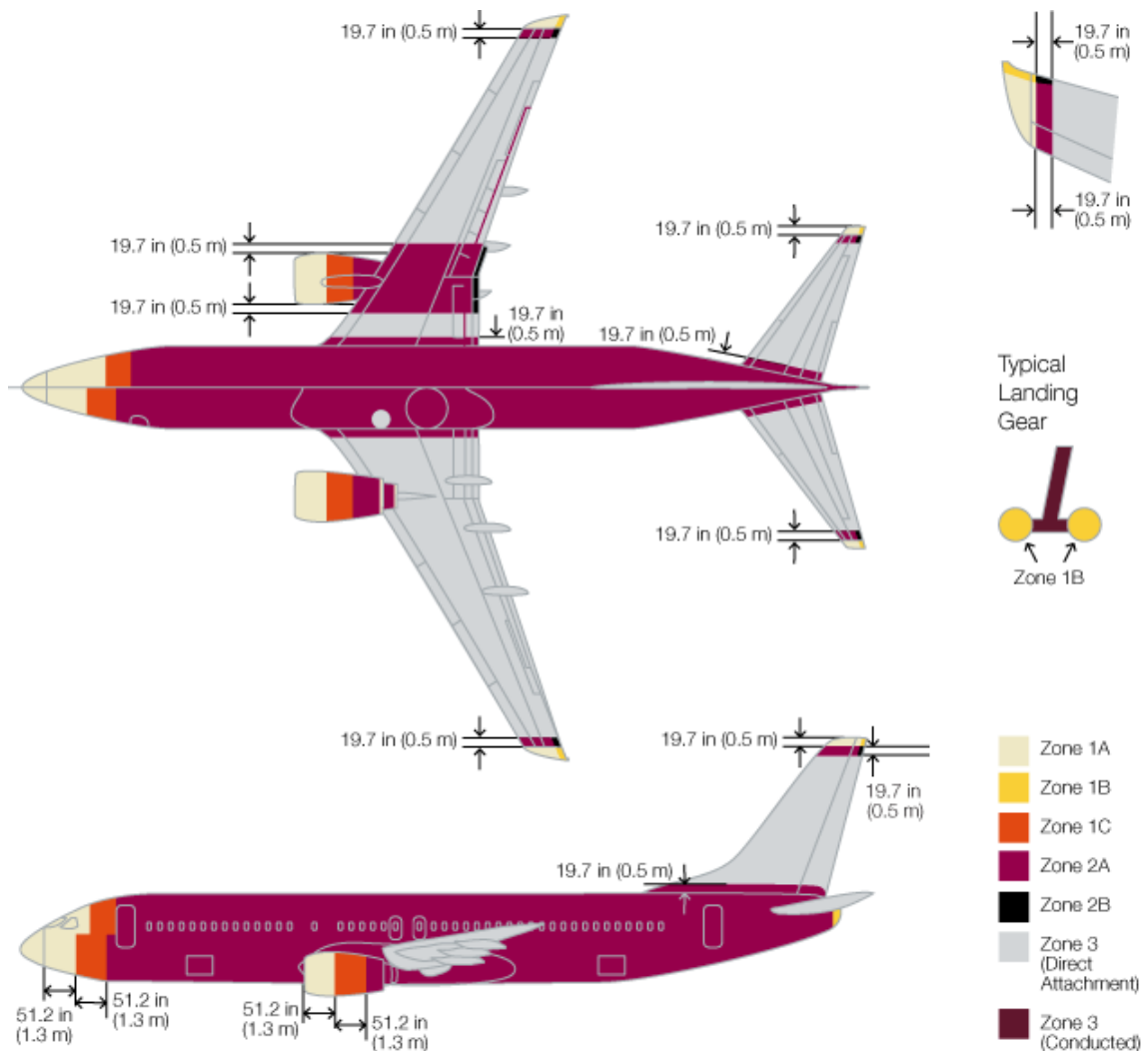
Konieczność stosowania ochrony odgromowej dla zewnętrznych elementów kadłubów samolotów wynika również z analizy tzw. stref uderzenia piorunów (patrz Rys. 1), które określają strefy zewnętrznej powierzchni samolotów najbardziej narażonych na takie oddziaływania. Te strefy, razem z rodzajami prądów piorunowych, opisane są w zaleceniach wydanych przez Society of Automotive Engineers (SAE) Aerospace Recommended Practices (ARP): SAE ARP 5412A [2] oraz SAE ARP 5414A [3]. Strefy najbardziej narażone na uderzenia pioruna pokrywają się ze strefami elementów wykonanych z kompozytów polimerowych, zwłaszcza kompozytów umacnianych włóknem węglowym (CFRP), co sprawia, że istnieje konieczność zastosowania ochrony odgromowej w tych elementach. Badania takich struktur, zarówno numeryczne, jak i eksperymenty symulujące uderzenia pioruna [4-7], udowodniły, że pomimo niewielkiej przewodności elektrycznej włókna węglowego uderzenie pioruna wciąż powoduje poważne uszkodzenia strukturalne.

Aby zapobiec takim uszkodzeniom lub przynajmniej zminimalizować ich skutki stosuje się szereg rozwiązań technologicznych w zakresie ochrony odgromowej statków powietrznych. Takie rozwiązania można podzielić na dwie grupy: instalacja taśm lub prętów odgromowych na zewnętrznej powierzchni (takie rozwiązania są zwykle stosowane dla ochrony odgromowej kopuł anten radiolokatorów i w osłonach anteny) oraz zastosowanie materiału przewodzącego prąd elektryczny nanoszonego na zewnętrzną powierzchnię kompozytu konstrukcji lotniczych. Ze względu na zainteresowanie ochroną odgromową struktur, w niniejszej pracy analiza została ograniczona do drugiej grupy wyszczególnionej w powyższej klasyfikacji.

Powszechnym rozwiązaniem w zakresie ochrony odgromowej kompozytowych struktur lotniczych jest technologia wtapienia cienkich siatek lub folii wykonanych z metali o wysokiej przewodności elektrycznej, najczęściej z miedzi lub aluminium. Takie rozwiązania są stosowane przez czołowe koncerny lotnicze ze względu na ich wysoką skuteczność i stosunkowo niskie koszty [8]. Wyniki badań eksperymentalnych [9] wykazały, że zastosowanie metalowych siatek w celu ochrony odgromowej znacznie polepsza właściwości przewodzące struktury i minimalizuje rozpiętość uszkodzeń. Z tego też względu, takie rozwiązania znalazły również zastosowanie w najnowszych samolotach pasażerskich: metalowe folie zostały zastosowane jako ochrona odgromowa w samolotach Airbus A350 XWB, natomiast metalowe siatki użyto jako ochrony w samolotach Boeing 787.

Jednak stosowanie takich rozwiązań wiąże się z szeregiem problemów natury technologicznej. Siatki i folie nie układają się gładko na dużych promieniach krzywizny, co może powodować powstawanie zmarszczek i zagniecień, a w konsekwencji – występowanie procesów delaminacji, które mogą prowadzić do obniżenia wytrzymałości struktury, zawilgocenia i inicjacji procesów korozyjnych siatek lub folii. W celu ominięcia tych trudności opracowano rozprężające się folie metalowe, które wykonywane są w procesie frezowania, podczas którego folia jest perforowana i rozciągana, co pozwala na polepszenie jej przylegania do powierzchni nierozwijalnych podczas klejenia do

struktury kompozytowej. Pomimo to, impregnacja metalowych siatek w struktury kompozytowe prowadzi do skomplikowania procesu wytwarzania takich elementów, powoduje problemy adhezji na granicy faz metal-polimer oraz zwiększa masę samolotu, co rzutuje na zwiększenie kosztów wytwarzania i eksploatacji statku powietrznego.



Rys.1. Strefy piorunowe zgodnie z SAE 5414 [1]

Kolejna grupa rozwiązań technologicznych w zakresie ochrony odgromowej kompozytowych struktur lotniczych obejmuje różnego rodzaju powłoki przewodzące, nanoszone na powierzchnię takich elementów. Pierwsze rozwiązania tego typu przewidywały nanoszenie powłok metalicznych z wykorzystaniem aerozoli i farb zawierających cząsteczki metali dobrze przewodzących prąd elektryczny. Zastosowanie takich rozwiązań opisano np. w pracach [10,11]. Takie rozwiązania skutecznie eliminują problemy stosowania siatek i folii z dopasowaniem do powierzchni rozwijalnych, jednak wykorzystuje się je bardzo rzadko przy ochronie odgromowej struktur, ze względu na brak kontroli kontaktu pomiędzy cząstkami przewodzącymi w aerozolu lub farbie, nawet w przypadku ich dużej zawartości. Zazwyczaj takie powłoki mają znacznie niższą przewodność elektryczną w stosunku do materiałów z wtapianymi siatkami bądź foliami metalowymi. W związku z tym, takie rozwiązania znajdują głównie zastosowanie przy ekranowaniu samolotów przed polami elektromagnetycznymi, mogącymi zakłócać pracę elektronicznych urządzeń pokładowych.

Wśród bardziej zaawansowanych rozwiązań ochrony odgromowej kompozytów należy wymienić metody oparte na metalizacji włókien wzmacniających, tj. ich pokrywanie

cienną warstwą metali przewodzących. Włókna umacniające pokrywa się zazwyczaj aluminium, niklem lub miedzią. Rozwiązania oparte na tej technologii są już dostępne komercyjnie, jednak ze względu na dużą rezystywność znajdują one zastosowania przede wszystkim przy ekranowaniu elektromagnetycznym samolotów na wewnętrznych panelach kompozytowych w kabinach [8]. Podobnym rozwiązaniem jest rozpraszanie cząstek metali przewodzących w dielektrycznej osnowie polimerowej, jednak w tym przypadku rezystywność również jest zbyt duża, aby możliwe było skuteczne niwelowanie skutków uderzeń piorunów. Ponadto, podobnie jak w przypadku impregnowanych siatek i folii metalowych w strukturę kompozytu, dochodzą problemy z adhezją na granicy faz metal-polimer, zawilgoceniem oraz procesami korozyjnymi, dlatego takie rozwiązania na ogół nie są stosowane przy ochronie odgromowej.

Najnowsze trendy w rozwoju materiałów lotniczych zapewniających ochronę odgromową zmierzają w kierunku zastosowania nanostruktur przewodzących prąd elektryczny, dyspergowanych w dielektrycznej osnowie. Priorytetowo stosowane są różnego rodzaju nanostruktury węglowe [12-15], które, dzięki dobrej przewodności elektrycznej, stanowią korzystną alternatywę w stosunku do metalowych siatek i folii pod względem właściwości fizycznych, ale koszty produkcji takich nanostruktur nadal są zbyt wysokie, aby takie rozwiązania mogły wejść do produkcji seryjnej struktur lotniczych. Ponadto, badania doświadczalne opisane w pracach [17,19] wskazują na znaczną rozległość uszkodzeń spowodowanych wyładowaniami atmosferycznymi, porównywalnymi do uszkodzeń uzyskiwanych dla struktur z impregnowanymi metalowymi siatkami i foliami.

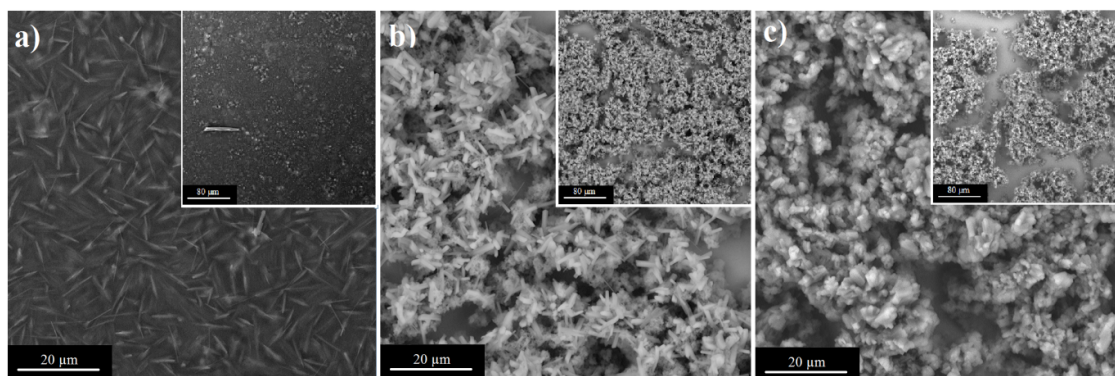
3. Synteza i badania organicznego kompozytu przewodzącego

Analizując rozwiązania technologiczne ochrony odgromowej przedstawione powyżej, można zauważyć, że w każdym przypadku istnieją wady opisywanych rozwiązań: w niektórych z nich stosowane rozwiązania znacznie komplikują proces technologiczny, inne zaś znacznie zwiększają koszty wytwarzania takich elementów. Jednak należy również zwrócić uwagę na zalety tych rozwiązań, które mogą być wykorzystane przy projektowaniu nowego materiału w celu zapewnienia skutecznej ochrony odgromowej.

Rozwiązanie, które zostało opracowane przez zespół naukowców z Politechniki Śląskiej, przewiduje wykorzystanie polianiliny, polimeru posiadającego zdolność do przewodzenia prądu elektrycznego, jako wypełniacza dielektrycznej osnowy kompozytu, np. z żywic polimerowych. Takie rozwiązanie pozwoli uzyskać przewodność elektryczną materiału wynikowego na poziomie przewodności półprzewodników, a ponadto umożliwi dyssypację ładunku na dużej powierzchni, co pozwoli na zmniejszenie skutków uderzenia pioruna [16]. Proponowane rozwiązanie niesie za sobą szereg innych zalet: zastosowanie polimerów przewodzących nie komplikuje procesów wytwarzania, a wynikową mieszaninę polimerów można uznać za makroskopowo jednorodną pod względem mechanicznym, elektrycznym i cieplnym. Problem, który ogranicza przedstawione rozwiązanie, wiąże się ze słabymi właściwościami mechanicznymi polimerów przewodzących, to znaczy z brakiem możliwości ich wykorzystania jako samodzielnego materiału konstrukcyjnego. Aby zapewnić odpowiednią wytrzymałość i sztywność, a jednocześnie dobrą przewodność elektryczną wynikowego polimeru, wykorzystano teorię perkolacji, na podstawie wyników której możliwe jest uzyskanie wartości udziału objętościowego polimeru przewodzącego w materiale wynikowym tak, aby spełniał on swoje funkcje eksploatacyjne [17]. Wyniki przeprowadzonych wstępnych symulacji numerycznych [18] potwierdziły efektywność zaproponowanej koncepcji takiego materiału, wskazując na obniżenie strumienia cieplnego o 3 rzędy wielkości dzięki większej przewodności elektrycznej, co wiąże się z możliwością rozpraszania energii na większej powierzchni. Przeprowadzone analizy numeryczne [19, 20] wskazały, że zawartość polimerów przewodzących o gorszych właściwościach mechanicznych nie powinna być duża, aby wynikowy materiał w postaci mieszaniny polimerów przewodzącego i dielektrycznego skutecznie przewodził prąd elektryczny. Wyniki przeprowadzonych

analiz porównawczych [21] wymienionych powyżej rozwiązań materiałowych w zakresie ochrony odgromowej statków powietrznych wskazują również na fakt, że opracowane rozwiązanie jest również rozwiązaniem znacznie tańszym w stosunku do struktur na bazie wtapianych siatek lub nanostruktur węglowych.

Mieszanka polianiliny z żywicą epoksydową (wraz z odpowiednimi dodatkami [22,23]) została wykorzystana do wytworzenia pierwszej partii próbek do badań mechanicznych, cieplnych oraz prądowych [23]. Zdjęcia mieszanki polimerów z różnymi dodatkami modyfikującymi przedstawiono na Rys.2.



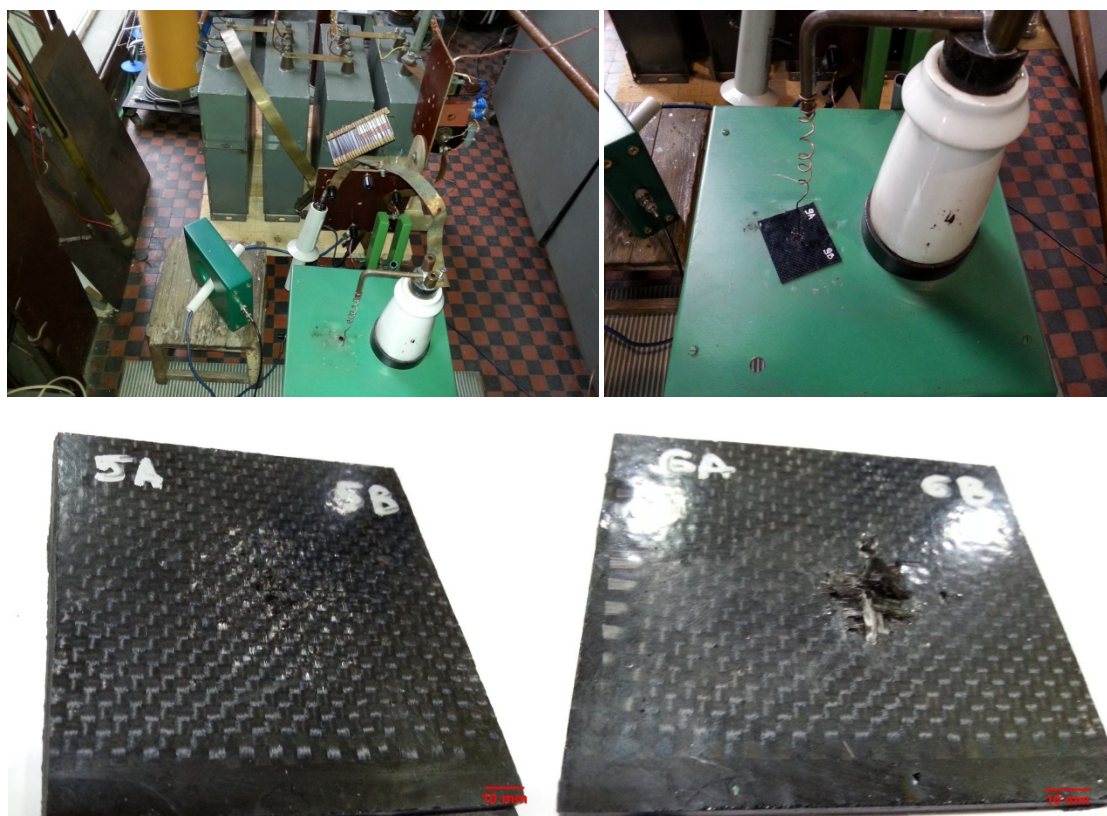
Rys.2. Mikrofotografie polianiliny z kwasem kamforosulfonowym z dodatkiem a) m-krezolu, b) N-metylo-2-pirolidonu, c) dimetylosulfotlenku [22]

Wyniki tych badań wskazały na zdolność przewodzenia prądów udarowych o wartości szczytowej na poziomie 8 kA (wartość szczytowa prądu – typowego wyładowania wynosi ok. 20-30 kA, natomiast wartości szczytowe najczęściej występujących wyładowań sięgają zazwyczaj od kilku do kilkunastu kiloamperów). Układ pomiarowy oraz proces i wyniki badań przedstawia Rys.3.



Rys.3. Układ pomiarowy podczas badań wysokonapięciowych, moment wyładowania elektrycznego oraz uszkodzenia spowodowane tymi wyładowaniami [23]

Na podstawie tych wyników prace kontynuowano pod kątem opracowania kompozytu, umacniając otrzymaną mieszaninę polimerów tkaniną węglową. Tkanina węglowa, oprócz ulepszenia właściwości mechanicznych wynikowego kompozytu, spełnia w danym przypadku dodatkową rolę: ze względu na większą przewodność elektryczną włókien węglowych stanowi ona dodatkowy łącznik pomiędzy dyspergowanymi cząstkami przewodzącymi, polepszając tym samym strukturę ścieżek przewodnictwa elektrycznego. W wyniku tych badań opracowano kompozyt cechujący się właściwościami mechanicznymi porównywalnymi do kompozytów konstrukcyjnych stosowanych w lotnictwie, a jednocześnie posiadający zdolność przewodzenia prądu elektrycznego na poziomie półprzewodników [24]. Opracowany kompozyt z nieco zmodyfikowanym składem chemicznym w zakresie dodatków do polimeru przewodzącego zgłoszony został do ochrony patentowej w UPRP [25]. Przeprowadzone badania wysokonapięciowe i wieloprądowe [26] potwierdziły skuteczność zaproponowanego rozwiązania ochrony odgromowej struktur kompozytowych – podczas badań wysokonapięciowych i wieloprądowych (napięcie ładowania 25 kV, charakterystyka impulsowa wyładowania piorunowego 1.2/50 μ s oraz natężenie prądu przy wyładowaniu do 9 kA) zaobserwowane uszkodzenia były nieznaczne. Stanowisko badawcze oraz wyniki tych prób przedstawiono na Rys.4.



Rys.4. Stanowisko badawcze oraz postać uszkodzeń spowodowanych wyładowaniami wieloprądowymi rzędu 8.5-9 kA podczas badań opracowanego kompozytu [24]

Skuteczność opracowanych rozwiązań potwierdzają także badania mające na celu określenie stanu struktury przy wyładowaniu piorunowym poprzez aluminiowy nit lotniczy. Wyniki analizy porównawczej uszkodzeń powstałych w wyniku wyładowania prądów udarowych przy maksymalnym natężeniu do 12 kA w próbkach z klasycznego kompozytu epoksydowo-węglowego oraz opracowanego kompozytu przewodzącego jednoznacznie wskazują na skuteczność opracowanego rozwiązania [27]. W wyniku udarów wieloprądowych w opracowanym kompozycie przewodzącym nie powstają uszkodzenia w postaci pęknięć i rozwarstwień.

4. Podsumowanie

Niniejszy rozdział przedstawia obecny postęp prac w zakresie opracowania i badań laboratoryjnych wielofunkcyjnego organicznego kompozytu do zastosowań w rozwiązaniach ochrony przed wyładowaniami atmosferycznymi i interferencją elektromagnetyczną elementów statków powietrznych. Wyniki przeprowadzonych prac analitycznych, symulacji numerycznych i badań eksperymentalnych wskazują na obiecujący charakter opracowanego materiału w zastosowaniach lotniczych. Obecnie prowadzone prace skupiają się na zwiększeniu efektywności opracowanego materiału w wymienionych zastosowaniach poprzez modyfikację morfologii i składu chemicznego kompozytu, a także skupiają się na zwiększeniu poziomu gotowości technologicznej opracowanego wynalazku.

Literatura

- [1] Sweers G., Birch B., Gokcen J.: *Lightning strikes: protection, inspection, and repair*, Aero Magazine, Vol. 4, 19-28, 2012
- [2] Society of Automotive Engineers: Aerospace recommended practice – 5412 Rev A, *Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms*, SAE International Edition, 2005
- [3] Society of Automotive Engineers. Aerospace recommended practice – 5414 Rev A, *Aircraft Lightning Zoning*, SAE International Edition, 2005
- [4] Feraboli P., Miller M.: *Damage resistance and tolerance of carbon/epoxy composite coupons subjected to simulated lightning strike*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 40, 954-967, 2009
- [5] Hirano Y., Katsumata S., Iwahori Y., Todoroki A.: *Artificial lightning testing on graphite/epoxy composite laminate*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 41, 1461-1470, 2010
- [6] Muñoz R., Delgado S., González C., López-Romano B., Wang D.-Y., LLorca J.: *Modeling lightning impact thermo-mechanical damage on composite materials*, Applied Composite Materials, Vol. 21, 149-164, 2014
- [7] Dong Q., Guo Y., Sun X., Jia Y.: *Coupled electrical-thermal-pyrolytic analysis of carbon fiber/epoxy composites subjected to lightning strike*, Polymer, Vol. 56, 385-394, 2015
- [8] Gardner G.: *Lightning strike protection for composite structures*, High-Performance Composites, Vol. 14, 44, 2006
- [9] Kawakami H., Feraboli P.: *Lightning strike damage resistance and tolerance of scarf-repaired mesh-protected carbon fiber composites*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 42, 1247-1262, 2011
- [10] Pochiraju K.V., Tandon G.P., Schoeppner G.A.: *Long-term durability of polymeric matrix composites*, Springer, New York, 2012
- [11] Liu Z.Q., Yue Z.F., Wang F.S., Ji Y.Y.: *Optimizations of flame spraying aluminium thickness and laminate plies for composite lightning protection*, Advanced Materials Research, Vol. 915-916, 698-703, 2014
- [12] Gagné M., Therriault D.: *Lightning strike protection of composites*, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 64, 1-16, 2014
- [13] Gou J., Tang Y., Liang F., Zhao Z., Firsich D., Fielding J.: *Carbon nanofiber paper for lightning strike protection of composite materials*, Composites Part B: Engineering, Vol. 41, 192-198, 2010
- [14] Chakravarthi D.K., Khabashesku V.N., Vaidyanathan R., Blaine J., Yarlagadda S., Roseman D., Zeng Q., Barrera E.V.: *Carbon fiber-bismaleimide composites filled with nickel-coated single-walled carbon nanotubes for lightning-strike protection*, Advanced Functional Materials, Vol. 21, 2527-2533, 2011
- [15] Han J., Zhang H., Chen M., Wang D., Liu Q., Wu Q., Zhang Z.: *The combination of carbon nanotube buckypaper and insulating adhesive for lightning strike protection of the carbon fiber/epoxy laminates*, Carbon, Vol. 94, 101-113, 2015

- [16] Katunin A., Krukiewicz K., Herega A., Catalanotti G.: *Concept of a conducting composite material for lightning strike protection*, *Advances in Materials Science*, Vol. 16(2), 32-46, 2016
- [17] Katunin A.: *Percolation thresholds of 3D all-sided percolation clusters in non-cubic domains*, *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, Vol. 15(4), 63-69, 2016
- [18] Katunin A., Krukiewicz K.: *Preliminary analysis of thermal response of dielectric and conducting composite structures during lightning strike*, *Composites Theory and Practice*, Vol. 16(1), 8-14, 2016
- [19] Katunin A., Krukiewicz K.: *Electrical percolation in composites of conducting polymers and dielectrics*, *Journal of Polymer Engineering*, Vol. 35(8), 731-741, 2015
- [20] Catalanotti G., Katunin A.: *Modelling the electro-mechanical properties of PPy/epoxy conductive composites*, *Computational Materials Science*, Vol. 113, 88-97, 2016
- [21] Katunin A.: *Lightning strike protection of aircraft composite structures: analysis and comparative study*, *Fatigue of Aircraft Structures*, Vol. 8, 49-54, 2016
- [22] Krukiewicz K., Katunin A.: *The effect of reaction medium on the conductivity and morphology of polyaniline doped with camphorsulphonic acid*, *Synthetic Metals*, 214, 45-49, 2016
- [23] Katunin A., Krukiewicz K., Turczyn R., Sul P., Łasica A., Bilewicz M.: *Synthesis and characterization of the electrically conductive polymeric composite for lightning strike protection of aircraft structures*, *Composite Structures*, 159, 773-783, 2017
- [24] Katunin A., Krukiewicz K., Turczyn R., Sul P., Bilewicz M.: *Electrically conductive carbon fibre-reinforced composite for aircraft lightning strike protection*, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 201, 012008, 2017
- [25] Katunin A., Krukiewicz K., Turczyn R.: *Organiczny kompozyt przewodzący, zwłaszcza do ochrony odgromowej elementów statków powietrznych, sposób jego wytwarzania i zastosowanie*, Zgłoszenie patentowe UPRP nr P.420282 z dn. 23.01.2017
- [26] Katunin A., Krukiewicz K., Turczyn R., Sul P., Dragan K.: *Lightning strike resistance of an electrically conductive CFRP with a CSA-doped PANI/epoxy matrix*, *Composite Structures*, Vol. 181, 203-213, 2017
- [27] Katunin A., Sul P., Łasica A., Dragan K., Krukiewicz K., Turczyn R.: *Damage resistance of CSA-doped PANI/epoxy CFRP composite during passing the artificial lightning through the aircraft rivet*, *Engineering Failure Analysis*, w druku, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.09.002.

Michał KONTNY*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

*michal.kontny@polsl.pl

METODY KONTROLI PARAMETRÓW JAKOŚCIOWYCH UROBKU STOSOWANE W GÓRNICTWIE

1. Wstęp

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie aktualnie stosowanych w przemyśle oraz proponowanych metod kontroli ilości oraz parametrów jakościowych urobku węglowego. Szczególna uwaga została poświęcona metodom, które mogą znaleźć bezpośrednie zastosowanie w dziedzinie transportu przemośnikowego.

W pierwszej części referatu scharakteryzowano podstawowe parametry stosowane w opisie węgla kamiennego, następnie przeprowadzono przegląd wybranych metod kontroli w/w parametrów.

W dalszej części referatu zawarte są rozważania dotyczące możliwości zastosowania systemów wizyjnych do pomiaru wspomnianych parametrów.

2. Przemysł górniczy w Polsce

Polska jest jednym z czołowych producentów węgla kamiennego na świecie. W roku 2016 na terenie Polski wyprodukowano 70,6 mln ton węgla kamiennego oraz 63,1 mln ton węgla brunatnego. Oprócz eksportu, pozostała część produkcji wykorzystywana jest w przemyśle energetycznym oraz koksowniczym.

Transport wewnątrzzakładowy realizowany jest dużej części z zastosowaniem przemośników taśmowych. Łączna długość tras przemośników taśmowych stosowanych w Polskim górnictwie szacowana jest na 2000 km.

Kontrola parametrów jakościowych węgla przeprowadzana jest na różnych etapach produkcji, począwszy od wydobycia i przeróbki, kończąc na załadunku gotowego produktu.

3 Definicja jakości węgla

W Polsce, do opisu cech jakościowych węgla kamiennego, stosowane są zapisy norm zarówno polskich, jak i międzynarodowych.

Norma PN-82G-97002 określająca typ technologiczny węgla zawiera definicje 6 parametrów urobku węglowego, tj.: zawartość części lotnych, zdolność spiekania, dylatacja, wskaźnik wolnego wydymania, ciepło spalania oraz zawartość inertynitu.

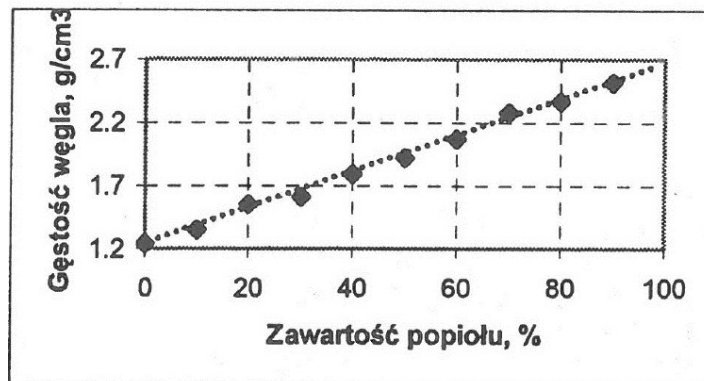
Stosowana jest również klasyfikacja wydana przez Europejską Komisję Gospodarczą pod tytułem "International codification system for medium and high rank coals" [1]. W wymienionym dokumencie podano następujące parametry: średnia refleksyjność witrzynitu, typ reflektogramu witrzynitu, skład petrograficzny według zawartości macerałów, wskaźnik wolnego wydymania, zawartość części lotnych, zawartość popiołu, zawartość siarki całkowitej oraz wartość kaloryczna.

Jednym z najbardziej istotnych parametrów jest średnia refleksyjność witrzynitu, będąca w silnej korelacji ze stopniem uwęglenia kopaliny.

Popiół definiowany jest przez normę PN-80/G-04512 jako pozostałość po wyprężeniu paliwa w warunkach przyjętych w normie, natomiast zawartość popiołu definiowana jest jako stosunek procentowy popiołu do masy paliwa.

Pierwiastki chemiczne znajdujące się w popiele to: krzem, glin, wapń, magnez, mangan, żelazo. Masa atomowa tych pierwiastków jest znacznie wyższa od masy

atomowej węgla. Wynikiem wspomnianej różnicy jest obserwowalna korelacja pomiędzy gęstością węgla oraz zawartością popiołu (Rys.1.). Wspomniana zależność może być wykorzystana do pośredniej oceny zawartości popiołu na podstawie pomiarów objętości oraz masy węgla.



Rys.1. Wykres zależności zawartości popiołu w węglu od jego gęstości [2]

4. Metody kontroli ilości oraz jakości urobku

W zależności od rodzaju wybranego parametru jakościowego opisującego węgiel, jego pomiar odbywa się w sposób ciągły lub okresowy. W przypadku niektórych parametrów, pomiary mogą być dokonywane przez wyspecjalizowane urządzenia zainstalowane w ciągu produkcyjnym (pomiar masy, zawartości popiołu, wartości kalorycznej), podczas gdy pomiar innych wielkości wymaga pobrania próbek materiału, które w dalszej kolejności poddawane są badaniom laboratoryjnym (są to m.in: rozkład ziarnowy, refleksyjność wityrytu).

Stosowane w praktyce produkcyjnej urządzenia umożliwiają pomiar w czasie rzeczywistym m.in następujących wielkości: masy, wilgotności oraz zawartości popiołu.

4.1. Pomiar masy urobku

Powszechnie stosowane w praktyce produkcyjnej są wagi przenośnikowe (Rys.2.), które ze względu na sposób pomiaru można podzielić na wagi sumujące lub całkowite. Dokładność tego typu pomiaru mieści się z reguły w granicach $\pm 0,5-1\%$, z kolei możliwe do uzyskania wydajności dochodzą do 7500 [t/h].



Rys.2. Waga przenośnikowa Siemens Multitronics MUS [3]

Wymienić można następujące części składowe wag grawimetrycznych: pomost, przetwornik ruchu taśmy, przetwornik obciążenia taśmy oraz układ elektroniczny.

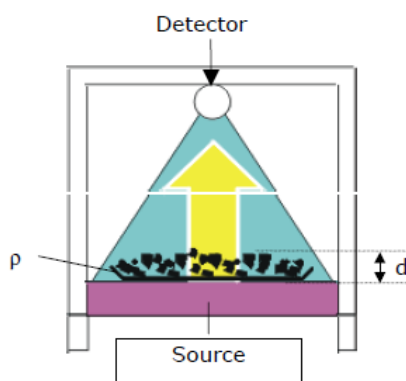
4.2. Pomiar zawartości popiołu

Działanie urządzeń stosowanych do pomiaru zawartości popiołu w urobku oparte jest o pomiar oddziaływania węgla z promieniowaniem jądrowym. Promieniowanie może być generowane przez urządzenie lub wykorzystywany jest pomiar naturalnego

promieniowania węgla. Stosowane w praktyce urządzenia wykorzystują następujące zjawiska [2]:

- rozproszenie promieniowania X lub gamma,
- absorpcja promieniowania gamma,
- promieniowanie naturalne,
- wzbudzenie promieniowania węgla przy użyciu strumienia neutronowego.

W przypadku urządzenia przedstawionego na Rys.3. wykorzystywane jest zjawisko tłumienia promieniowania gamma przepuszczanego przez mierzony obiekt.



Rys.3. Zasada pomiaru przy użyciu promieniowania gamma [4]

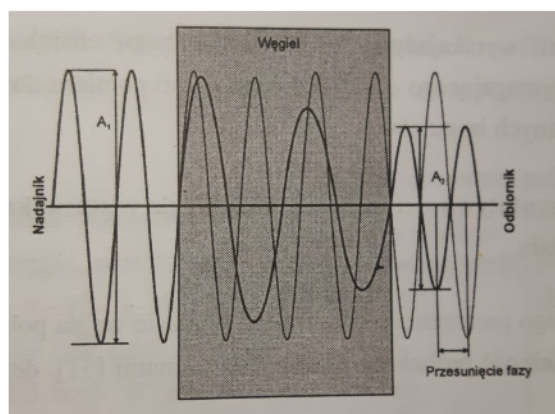
Źródło promieniowania umieszczone jest pod przenośnikiem taśmowym, wytworzone promieniowanie przepuszczone jest przez taśmę przenośnika oraz transportowaną nadawę. Intensywność promieniowania zmierzona przez detektor jest uzależniona od wysokości urobku, jego gęstości oraz współczynnika absorpcji. Pomiar promieniowania realizowany jest za pomocą licznika scyntylicyjnego.

Pomiar zawartości popiołu może być zrealizowany przy wykorzystaniu dwóch źródeł promieniowania gamma o różnej energii [5]. Różnice w pochłanianiu promieniowania przez węgiel oraz składniki niepalne pozwalają na ocenę zawartości popiołu.

4.3. Pomiar wartości kalorycznej węgla

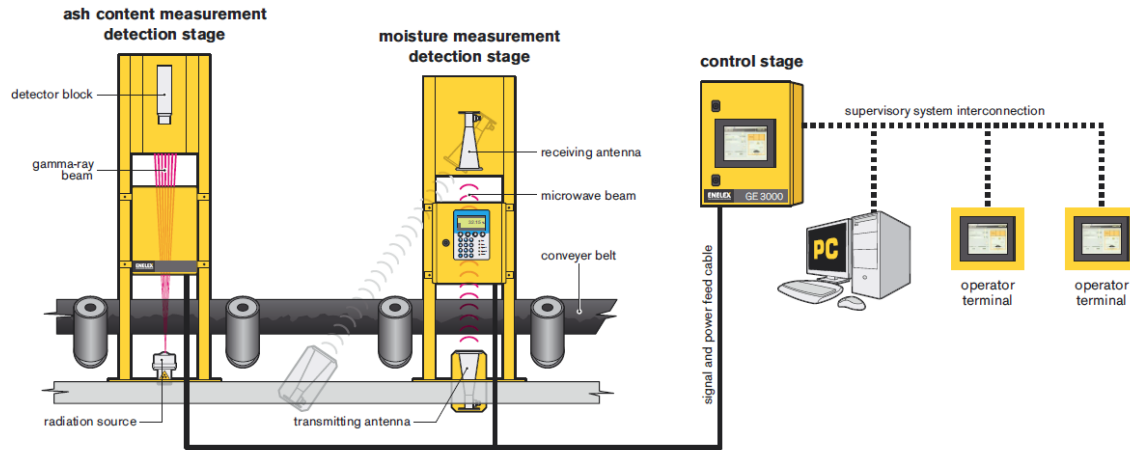
Określenie wartości kalorycznej wymaga pomiaru zawartości popiołu oraz wilgotności węgla. W stosowanych systemach, pomiar wilgotności realizowany jest poprzez pomiar pojemności elektrycznej materiału lub pomiar absorpcji promieniowania mikrofalowego [2].

Urządzenia pierwszego typu wykorzystują różnicę pomiędzy stałymi dielektrycznymi wody oraz innych substancji występujących w węglu. Stała dielektryczna dla wody wynosi $\epsilon=80$, podczas gdy dla węgla $\epsilon=5,5$.



Rys.4. Zjawisko absorpcji i przesunięcia fazy mikrofalowej [2]

W urządzeniach wykorzystujących promieniowanie mikrofalowe, wykorzystywana jest zależność poziomu absorpcji promieniowania przez badany materiał od zawartości wody. Obserwowany jest również efekt przesunięcia fazy mikrofalowej, proporcjonalnie do zawartości wilgoci (Rys.4.).



Rys.5. System do pomiaru kaloryczności urobku GE 3000.CM [5]

Na Rys.5. przedstawiono schemat urządzenia do pomiaru wartości kalorycznej węgla [5]. Pomiar odbywa się dwuetapowo: przeprowadzane są dwa pomiary: zawartości popiołu oraz wilgotności. Na podstawie wyników tych pomiarów i uzyskanych danych, wyznaczana jest wartość kaloryczna. Pomiar wilgotności przeprowadzany jest przy wykorzystaniu promieniowania mikrofalowego, natomiast do pomiaru zawartości popiołu wykorzystywana jest metoda radiometryczna.

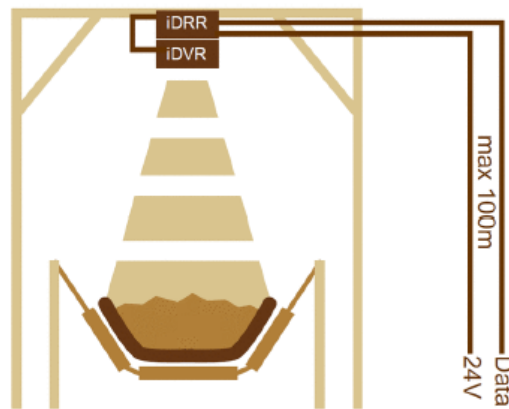
4.4. Inne metody pomiaru ilości urobku

W przemyśle wydobywczym wykorzystywane są również metody pomiarów ultradźwiękowych, radarowych oraz techniki wizyjne. Na Rys.6. przedstawiono urządzenie do pomiaru objętości kruszywa. Część z zastosowanych czujników ultradźwiękowych dokonuje pomiaru wysokości pryzmy kruszywa na taśmie przenośnika, natomiast kolejne czujniki śledzą odległość jaką kruszywo pokonuje w danym przedziale czasowym.



Rys.6. USMS System do pomiaru wolumenu kruszywa przy użyciu czujników ultradźwiękowych [6]

Innym podejściem do zadania pomiaru objętości jest zastosowanie radaru (Rys.7.). Użycie radaru pozwala na uniezależnienie pracy urządzenia od niekorzystnych warunków otoczenia, takich jak zapylenie czy mgła. Urządzenie wyposażone jest w moduł radaru dopplerowskiego, umożliwiającą pomiar prędkości nosiwa.

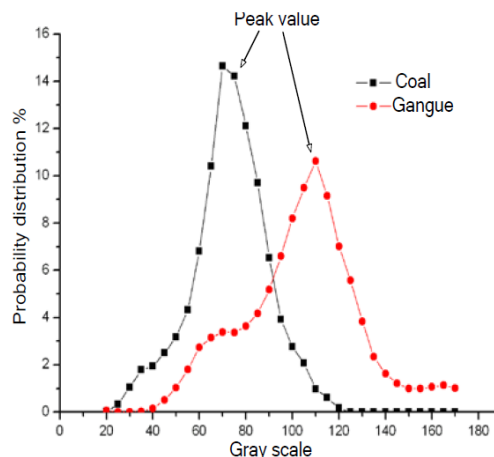


Rys.7. System iBelt, iDDR - moduł radaru, iDVR - moduł radaru dopplerowskiego [7]

Zostały podjęte próby wykorzystania metod wizji komputerowej w obszarze badania objętości nosiwa transportowanego na przenośnikach taśmowych. Zastosowanie metod wizji trójwymiarowej, z wykorzystaniem triangulacji laserowej, pozwala na ocenę ilości transportowanej nadawy. Prowadzone są również badania nad metodami pozwalającymi na wyznaczenie rozkładu ziarnowego próby przy użyciu technik wizyjnych [8], [9].

4.5. Wykorzystanie metod wizji komputerowej do odróżnienia skały płonnej od węgla

W pracy [10] zaproponowano wykorzystanie metod wizji komputerowej do odróżnienia skały płonnej od węgla. Możliwość zastosowania w tym celu metod analizy obrazu bazuje na zaobserwowanej różnicy w rozkładzie jasności obrazów (dla barwy czerwonej), przedstawiających węgiel oraz skałę płonną (Rys.8.).



Rys.8. Histogram skali szarości dla barwy czerwonej [10]

Wspomniana różnica zwiększa się dla fal o większych długościach, co można zauważyć na reflektogramach dla zakresu wykraczającego poza światło widzialne. W [10] Autor zaproponował wykorzystanie tej właściwości do identyfikacji skały płonnej w urobku [11].

5. Podsumowanie

Węgiel wciąż pozostaje jednym z podstawowych surowców wydobywanych przez człowieka. Skala produkcji węgla kamiennego oraz jego znaczenie ekonomiczne pozostają wysokie. Parametry opisujące jakość węgla zostały szczegółowo zdefiniowane przez szereg norm. Powszechnie stosowane metody kontroli pozwalają na pomiar wybranych parametrów ilościowych i jakościowych w czasie rzeczywistym, do tych parametrów można zaliczyć masę, zawartość popiołu oraz kaloryczność węgla.

Rozwój technik wizyjnych pozwala na pomiar rozkładu ziarnowego urobku oraz objętości nosiwa. Przedmiotem badań jest również możliwość odróżnienia skały płonnej od węgla. Techniki wizyjne mają również pewne ograniczenia, do których można zaliczyć m.in. wrażliwość na zapylenie środowiska pracy oraz (dla technik wykorzystujących oświetlenie w postaci lasera) niekorzystne i zmienne warunki oświetlenia.

Literatura

- [1] Economic Commission for Europe: *International codification system for medium and high rank coals*, United Nations.
- [2] Cierpisz Stanisław: *Parametry jakości węgla - pomiary i sterowanie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
- [3] *Weighing and feeding guide*, Dokumentacja techniczna urządzeń pomiarowych stosowanych w transporcie przenośnikowym, oferowanych przez firmę Siemens, [Online]
- [4] Radiometric Bulk Flow Meter LB 442 Manual 2001.
- [5] ENELEX: *Systemy kontroli jakości węgla*, [Online] <http://www.enelex.cz/en/>.
- [6] USMS: Usms. Usms the volume rate measuring system. [Online] <http://www.ultrasonic-measuring.com/>.
- [7] INDURAD GmbH, The industrial radar company. [Online] <http://indurad.com/>.
- [8] Kontny Michał: *Machine vision methods for estimation of size distribution of aggregate transported on conveyor belts*, Materiały konferencji "Vibroengineering", Katowice, wrzesień 2017.
- [9] Thurley Mathew: *Automated online measurement of limestone particle size distributions*, Journal of Process Control. 21, 2011.
- [10] Haoxiang Wang, Shibo Zhang Kuidong, Gao Changlong Du.: *An efficient of coal and gangue*, International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern. 6, 2013.
- [11] Kontny Michał: *Przegląd rozwiązań kontroli ilości urobku na taśmach transportowych stosowanych w górnictwie*, Praca przejściowa, Gliwice 2016.

Adrian KROL¹, Marek FIDALI²

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny,
Politechnika Śląska, Gliwice

1) adrian.krol@polsl.pl

2) marek.fidali@polsl.pl

METODY DIAGNOZOWANIA ŁOŻYSK TOCZNYCH

1. Wstęp

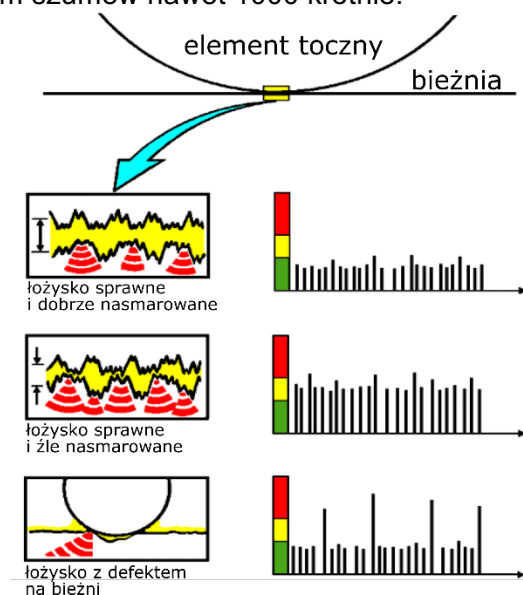
Łożyska toczne znajdują bardzo szerokie zastosowanie praktycznie we wszystkich rodzajach maszyn i urządzeń posiadających elementy wirujące. Prawidłowe funkcjonowanie łożysk maszyny rzutuje na stan techniczny całego zespołu maszynowego. Brak dostatecznej wiedzy o stanie technicznym węzłów łożyskowych może być przyczyną poważnej awarii maszyny skutkującej całym łańcuchem zdarzeń prowadzącym do zatrzymania produkcji i znaczących strat produkcyjnych. Najczęstszymi przyczynami uszkodzeń łożysk jest nieprawidłowe smarowanie, zużycie zmęczeniowe a także błędy montażowe i zanieczyszczenia. Niektóre z przyczyn uszkodzeń można uniknąć stosując się do zaleceń konstrukcyjnych, montażowych i eksploatacyjnych wytwórcy łożyska. Jednak niesprawności łożysk wywołanych naturalnymi procesami zużycia i zmęczenia materiału nie da się uniknąć w związku z tym konieczna staje się ich detekcja i identyfikacja. Do oceny stanu technicznego łożysk wykorzystuje się różne metody, przy czym do najbardziej popularnych zalicza się pomiary i analizę sygnałów wibroakustycznych, pomiary temperatury łożysk, czy analizę produktów zużycia w środkach smarnych łożyska. Do metod wibroakustycznych można zaliczyć klasyczne metody drganiowe w większości dobrze opisane w literaturze i niektórych normach [1], metody ultradźwiękowe i bazujące na emisji akustycznej oraz metody specjalizowane w większości skomercjalizowane i zaimplementowane w dedykowanych do diagnostyki łożysk tocznych przyrządach diagnostycznych [6, 7].

W artykule zaprezentowano wybrane metody diagnozowania łożysk tocznych mające duży potencjał w skutecznym wykrywaniu niesprawności węzłów łożyskowych pras. Przedstawiono również wyniki wstępnych badań polegających na wyznaczaniu kurtozy widmowej sygnałów drganiowych łożyska tocznego. Wybrane metody oceny stanu łożysk zostaną wykorzystane w projektowanym układzie monitorowania i diagnostyki linii pras w fabryce samochodów osobowych.

2. Istota generowania zjawisk wibroakustycznych w łożyskach tocznych

Łożysko składa się z elementów tocznych zamocowanych w koszyku i obtaczających się po bieżni wewnętrznej i zewnętrznej. Jeśli przyjrzymy się dokładniej obszarowi styku między elementem tocznym a bieżnią (Rys. 1.), to w sprawnym i dobrze nasmarowanym łożysku elementy toczne odseparowane są od powierzchni bieżni warstwą smaru, zatem w trakcie obtaczania się tylko najwyższe szczyty chropowatości powierzchni będą kolidowały ze sobą generując setki krótkich impulsów o małej amplitudzie. Ze względu na losowy rozkład chropowatości generowane impulsy będą miały charakter szumu losowego. Można, zatem stwierdzić, że sprawne łożysko jest generatorem szumu losowego. Wraz z pogarszaniem się warunków smarowania i stopniowej redukcji grubości filmu smarnego generowane impulsy będą bardziej intensywne, zatem poziom odbieranego szumu będzie wyższy. W działającym łożysku w wyniku różnych mechanizmów zużycia w tym m.in. zużycia zmęczeniowego może powstać na

powierzchni jednej z bieżni drobny ubytek materiału, co spowoduje, że każdy z obrotujących się elementów tocznych będzie systematycznie wchodził w kolizję z uszkodzeniem generując jednocześnie cykliczne impulsy o amplitudzie przewyższającej poziom szumów nawet 1000 krotnie.



Rys. 1. Wpływ stanu powierzchni współpracujących elementów łożyska na liczbę i intensywność generowanych impulsów udarowych [8]

Częstotliwość i intensywność impulsów będą mocno zależały od geometrii łożyska (liczby i średnicy elementów tocznych oraz średnic bieżni łożyska) i prędkości obrotowej wału. Charakterystyczne częstotliwości impulsów powstających od różnych zdarzeń w łożysku można obliczyć z zależności analitycznych przedstawionych poniżej:

Częstotliwość przejścia elementu tocznego po bieżni zewnętrznej

$$BPFO = \frac{nf_r}{2} \left\{ 1 - \frac{d}{D} \cos \phi \right\} \quad (1)$$

Częstotliwość przejścia elementu tocznego po bieżni wewnętrznej

$$BPFI = \frac{nf_r}{2} \left\{ 1 + \frac{d}{D} \cos \phi \right\} \quad (2)$$

Częstotliwość związana z koszykiem na elementy toczne

$$FTF = \frac{f_r}{2} \left\{ 1 - \frac{d}{D} \cos \phi \right\} \quad (3)$$

Częstotliwość związana z obrotem elementów tocznych

$$BSF(RSF) = \frac{D}{2a} \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D} \cos \phi \right)^2 \right\} \quad (4)$$

Przy wyznaczaniu częstotliwości charakterystycznych można również korzystać z gotowych kalkulatorów oferowanych przez większość renomowanych producentów łożysk.

Impulsy powstające w trakcie kolizji elementów tocznych z uszkodzeniem na jednej z bieżni nazywane są impulsami uderzeniowymi lub udarowymi i ze względu na dużą sztywność elementów biorących udział w ich generowaniu charakteryzują się bardzo krótkim czasem trwania wynoszącym od kilku do kilkudziesięciu mikrosekund. Impulsy powodują powstawanie w materiale fal sprężystych, które w stali propagują z prędkością około 5000m/s. Ponadto, ze względu na krótki czas trwania impulsu, w widmie energia impulsu rozkłada się w bardzo szerokim paśmie częstotliwości wykraczającym powyżej 40 kHz.

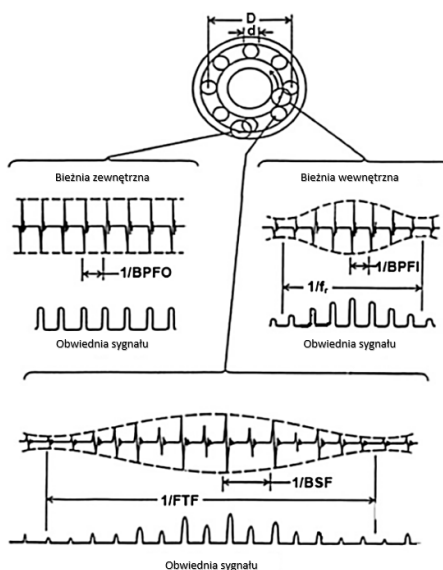
Łożysko nie jest podzespołem odosobnionym, lecz współpracuje z wałem i przenosi dodatkowo reakcje pochodzące od m.in. od sił generowanych przez szcążkowe niewyrównoważenie łożyskowanego wirnika i/lub niewspółosiowość wałów. W związku z tym impulsy udarowe powstające w początkowym stadium degradacji łożyska są bardzo słabe w stosunku do składowych sygnału generowanych przez siły bezwładności. Wynika z tego, że wczesne wykrycie uszkodzenia wymaga zastosowania odpowiednich metod przetwarzania i analizy sygnałów drganiowych.

2. Metody drganiowej diagnostyki łożysk tocznych

Metody drganiowej diagnostyki łożysk tocznych pozwalają wykryć uszkodzenie na tyle wcześnie, aby można było zaplanować i przeprowadzić wymianę łożyska w najbardziej dogodnym z punktu widzenia procesu produkcyjnego momencie. Istniejące metody z reguły bazują na filtracji pasmowej i demodulacji w celu wyznaczenia i oceny obwiedni sygnału lub wzmocnienia składowych sygnałów pochodzących od uszkodzeń wykorzystując do tego obszar rezonansowy czujnika. Opisane sposoby przetwarzania sygnałów wykorzystywane są w komercyjnych metodach diagnostycznych takich jak np.: SPM (Shock Pulse Method) i SPM HD (Shock Pulse Method Higher Definition) firmy SPM Instrument AB, Spike Energy Spectrum (gSE) firmy Rockwell Automation/ENTEK i PeakVue firmy CSI/Emerson, SEE (Spectral Emitted Energy) i AEE (Acoustic Emission Enveloping), ENV Acc i HFD firmy SKF oraz BCU (Bearing Condition Unit) firmy Schenck.

2.3. Metoda bazująca na wyznaczaniu i analizie obwiedni przyspieszeń drgań

Metoda obwiedni przyspieszeń drgań jest dobrze znaną i skuteczną metodą stosowaną w diagnostyce łożysk tocznych. Polega ona na demodulacji sygnału przyspieszeń drgań (rys. 1) poprzez stosowanie filtracji górnoprzepustowej lub pasmowej a następnie wyznaczeniu obwiedni tego sygnału. Do tego celu można zastosować transformatę Hilberta, która na podstawie próbek sygnału rzeczywistego oblicza jego część urojoną, przesuniętą o 90 stopni w stosunku do sygnału rzeczywistego. Moduł tak uzyskanego sygnału zespolonego stanowi obwiednię pierwotnego sygnału zmodulowanego. Na rysunku 2 zaprezentowano przykłady przebiegów obwiedni w zależności od występowania różnych uszkodzeń w łożysku.



Rys.2. Przykłady przebiegów obwiedni w zależności od rodzaju uszkodzenia w łożysku

Analiza widma sygnału obwiedni pozwala uzyskać informację o częstotliwościach modulujących a w przypadku łożysk tocznych informacje o składowych charakterystycznych dla uszkodzeń elementów łożyska. Widmo obwiedni może dostarczyć znacznie większą ilość informacji diagnostycznych niż widmo surowego sygnału drganiowego.

Metoda obwiedni jest dość odporna na wszelkiego rodzaju zakłócenia oraz zniekształcenia sygnału pochodzące od np. poślizgu pomiędzy elementami łożyska,

Stosowanie metody obwiedni obarczone może być ryzykiem nieprawidłowego doboru filtra, nieprawidłowych parametrów wyznaczania widma (pasmo i liczba linii widma), nieprawidłowym uśrednianiem sygnałów i widm obwiedni, użyciem akcelerometrów niskoczęstotliwościowych dla łożysk niskoobrotowych itp.

Metoda obwiedni znajduje zastosowanie w komercyjnych rozwiązaniach różnych firm oferujących urządzenia do diagnostyki łożysk tocznych.

2.1. Metody bazujące na emisji akustycznej

Diagnozowanie łożysk tocznych w zakresie emisji akustycznej pokrywającej zakres częstotliwości od 100kHz do 1MHz daje możliwość wykrycia bardzo małych (rzędu 0,25 mikrona) uszkodzeń łożyska powstających na bardzo wczesnym etapie a będących efektem występowania wewnętrznych naprężeń wynikających z początkowego stadium uszkodzenia zmęczeniowego, nieprawidłowego smarowania oraz zjawisk trybologicznych prowadzących do przyspieszonego zużywania się łożyska. Sygnały emisji akustycznej wykorzystywane są np. w komercyjnej metodzie SEE (Spectral Emitted Energy) opatentowanej przez firmę SKF [9]. W metodzie SEE realizowane jest przetwarzanie sygnału drgań polegające na odfiltrowaniu składowych wysokoczęstotliwościowych we wcześniej wskazanym paśmie ultradźwiękowym a następnie wyznaczenie obwiedni sygnału i filtracji dolnoprzepustowej w celu usunięcia zakłóceń. Takie postępowanie poprawia widoczność składowych częstotliwościowych związanych z uszkodzeniami poszczególnych elementów składowych łożyska. Metoda SEE dzięki wykorzystaniu składowych ultradźwiękowych w paśmie emisji akustycznej pozwala na ocenę stanu nasmarowania łożyska oraz wykrywanie uszkodzeń w łożyskach nisko i wysoko obrotowych.

Innym przykładem wykorzystania emisji akustycznej do badania stanu wolnoobrotowych łożysk tocznych jest opatentowana metoda zaproponowana przez firmę Holroyd bazująca na stosowaniu specjalizowanych czujników z zaimplementowanym algorytmem przetwarzania sygnałów pozwalającym wyznaczyć obiektywne parametry Extent i Distress umożliwiające jednoznaczną ocenę stanu łożysk [10]

2.2. Metoda impulsów uderzeniowych SPM (Shock Pulse Method)

Metoda SPM (ang. Shock Puls Method) bazująca na pomiarze impulsów uderzeniowych została opracowana w końcu lat 60-tych w Szwecji na potrzeby diagnostyki łożysk w firmie SKF. Jako komercyjne rozwiązanie została zaimplementowana w szeregu przyrządów pomiarowych a jej obecna ulepszana wersja nazywana SPM HD wydaje się być bardzo skutecznym narzędziem w ocenie stanu technicznego zarówno nisko- jak i szybkoobrotowych łożysk tocznych.

Klasyczna jak i ulepszona metoda SPM bazują na zjawisku powstawania fal sprężystych wywołanych uderzeniami udarowymi powstającymi w wyniku kontaktu elementu tocznego z bieżnią w trakcie działania łożyska.

W metodzie SPM do pomiaru impulsów uderzeniowych stosowany jest specjalnie zaprojektowany przetwornik piezoelektryczny charakteryzujący się częstotliwością rezonansową wynoszącą 36kHz. Impuls uderzeniowy docierający do czujnika wywołuje jego rezonans, który wraz z drganiami o niskiej częstotliwości pochodzącymi z maszyny a związanymi np. z niewyważeniem, rozosiowaniem itp., przekształcany jest przez

piezoelektryk na szerokopasmowy sygnał, który następnie w urządzeniu zwanym TMU (Transducer Matching Unit) współpracującym z czujnikiem, poddawany jest filtracji pasmowej. Filtracja pasmowa ma na celu separację składowych sygnału związanych z występowaniem impulsów uderzeniowych w łożysku. Sygnał po filtracji poddawany jest przetwarzaniu polegającym na wyznaczeniu wartości bezwzględnej amplitudy, wyznaczeniu obwiedni a następnie wyznaczeniu wartości poziomów amplitud impulsów uderzeniowych dBsv. Ze względu na dużą dynamikę wartości sygnałów impulsów uderzeniowych w metodzie SPM wartości reprezentowane są w skali logarytmicznej (dBsv). Natomiast dla potrzeb prezentacji wyników wartości poziomów impulsów uderzeniowych poddawane są normalizacji co pozwala na prezentację wyników na skali wartości poziomów od 0 do 60 dBn (rys. 3). Skala wartości znormalizowanych podzielona została na 3 podzakresy pozwalające na prostą klasyfikację stanu technicznego łożyska.

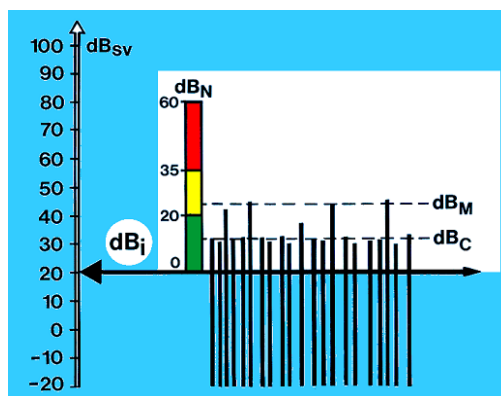
Wyznaczanie wartości znormalizowanych polega na odejmowaniu od pierwotnych wartości poziomów impulsów (dBsv) współczynnika normalizującego dBi (lub iHDI w przypadku metody SPM HD) zgodnie ze wzorem:

$$dBn = dBsv - dBi \quad (5)$$

gdzie: dBsv – wartości poziomów impulsów uderzeniowych przed normalizacją

Współczynnik normalizujący dBi stanowi wartość odniesienia i wyznaczany jest na podstawie znajomości wartości prędkości obrotowej wału n, średnicy wewnętrznej łożyska oraz eksperymentalnie dobranych współczynników skalujących.

W metodzie SPM (SPM HD) wyznaczane są dodatkowo wartości dBm i dBc. Wartość dBm jest znormalizowaną wartością maksymalną poziomu impulsu zarejestrowaną w trakcie pomiaru. Wartość dBc jest znormalizowanym poziomem wyznaczanym na podstawie 200 impulsów w ciągu 1 sekundy i opisującym stan warunków smarowania łożyska. Wartość dBc stanowi najniższą wartość spośród wartości maksymalnych impulsów rejestrowanych w oknach czasowych o długości 5ms, na które dzielony jest jednosekundowy odcinek mierzonego sygnału.



Rys. 3. Sposób skalowania i interpretacji wartości poziomów impulsów uderzeniowych (na podstawie [11, 12])

W metodzie SPM duże znaczenie mają poziomy dBm i dBc gdyż na podstawie ich stosunku dBm/dBc możliwa jest skuteczna ocena zarówno stanu warunków smarowania łożyska jak i wykrywanie uszkodzeń. Duży poziom wartości dBc w stosunku do wartości dBm jest symptomem niedostatecznego smarowania. Duży poziom wartości dBm w stosunku do dBc świadczy o występowaniu uszkodzenia mechanicznego łożyska

Ulepszona metoda SPM (SPM HD) w stosunku do klasycznego rozwiązania posiada zaimplementowane algorytmy filtracji przypadkowych uderzeniowych oraz funkcję śledzenia rzędów na podstawie bieżącego pomiaru prędkości obrotowej.

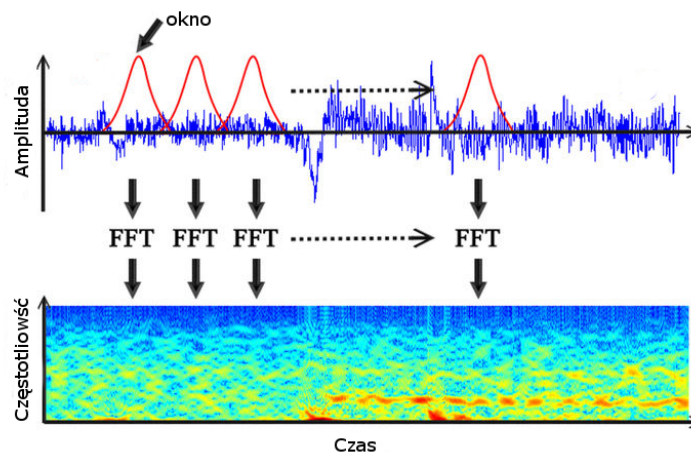
Dodatkowo wprowadzono możliwość wizualizacji przebiegu czasowego i widma sygnału w celu powiązania uszkodzenia z konkretnym elementem łożyska.

Dzięki udoskonaleniu metoda SPM pozwala skutecznie oceniać zarówno szybkoobrotowe jak i wolnoobrotowe łożyska działające w zmiennych warunkach pod kątem jakości ich smarowania oraz występowania uszkodzeń. Do wad metody należą konieczność pomiaru rzeczywistej prędkości obrotowej wału i znajomość typu i producenta łożyska w celu określenia geometrycznych cech konstrukcyjnych łożyska.

2.4. Metoda wyznaczania i analizy kurtozy widmowej

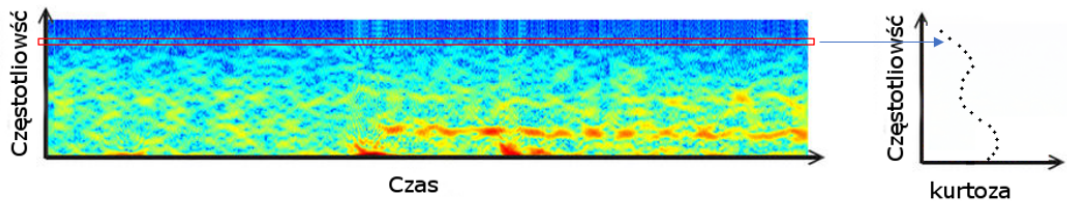
Wraz z upowszechnieniem się metody analizy obwiedni zrodziło się pytanie: jak dobrać pasmo demodulacji. Optymalne dobranie pasma pozwala uzyskać sygnał o możliwie najwyższej impulsywności. Kurtoza widmowa umożliwia wyznaczenie pasma częstotliwości, w którym wspomniana impulsywność sygnału jest największa. Kurtoza widmowa rozwija pojęcie kurtozy, która jest parametrem globalnym dla sygnału, do funkcji określającej zawartość impulsów w sygnale zależnie od częstotliwości.

Pierwszy raz metoda została użyta w 1980 roku do detekcji zdarzeń impulsowych w sygnałach radarowych. Bazowała ona na wykorzystaniu krótkoczasowej transformaty Fouriera STFT (Short Time Fourier Transform). Samo działanie STFT polega na wykonaniu transformaty Fouriera dla fragmentu sygnału określonego jako okno. Przeprowadzając STFT dla całego sygnału otrzymujemy zestaw widm przesuniętych między sobą w czasie. Podstawę działania metody przedstawiono na rysunku 4. Dla każdej częstotliwości obliczana jest kurtoza. Daje to funkcję kurtozy zależną dla częstotliwość określoną dla konkretnej długości okna użytego w analizie STFT.

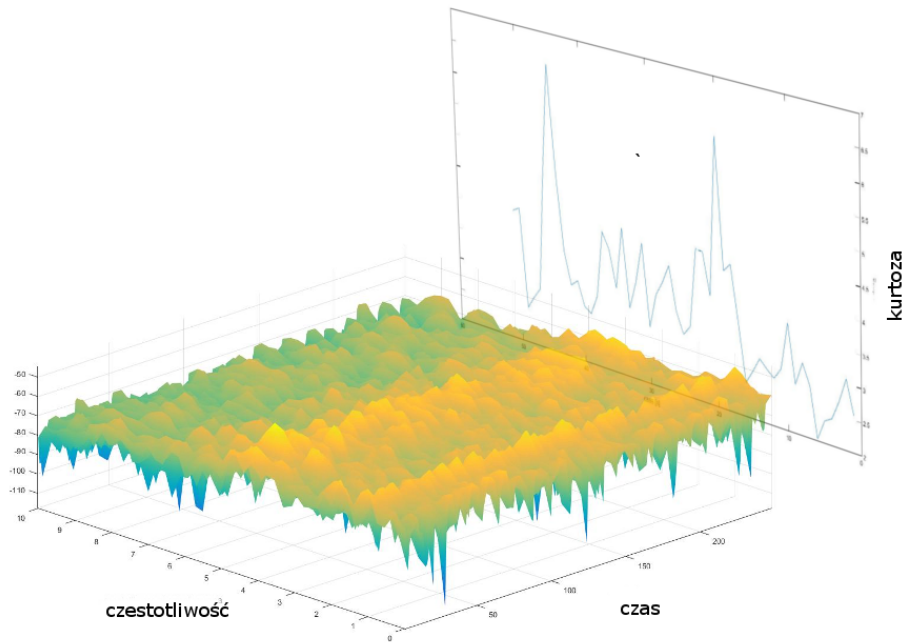


Rys.4. Istota krótkoczasowej analizy Fouriera STFT

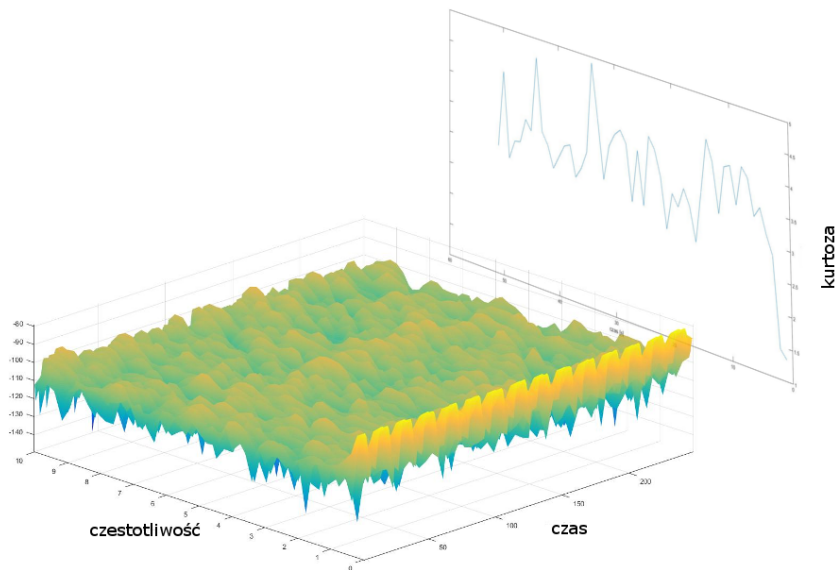
Jak można zauważyć kształt funkcji kurtozy będzie zależał od szerokości okna zastosowanego podczas analizy STFT. Z tego też powodu częstą praktyką jest wykonanie tzw. kurtogramu. Jest to dwuwymiarowa reprezentacja kurtozy widma zależnej również od szerokości okna w analizie STFT. Na rysunku 5 przedstawiono kurtozę dla wybranych szerokości okna. Na rysunkach 6 oraz 7 przedstawiono wynik wyznaczenia kurtozy widmowej na podstawie sygnałów pochodzących z nowego łożyska znajdującego się na początku eksploatacji oraz zaraz przed jego uszkodzeniem. Jak można zauważyć obserwowane są znaczne zmiany wartości kurtozy dla poszczególnych częstotliwości. Dzięki temu w łatwy sposób można stwierdzić, na jakim etapie zużycia jest badane łożysko.



Rys.5. Obliczenie kurtozy z widma



Rys.6. Kurtoza widmowa dla sygnału drganiowego nowego łożyska



Rys.7. Kurtoza widmowa dla sygnału drganiowego łożyska ze znacznym uszkodzeniem

4. Podsumowanie

Nowoczesne metody diagnostyki pozwalają na coraz skuteczniejsze określanie stanu łożysk. Dzięki stosowaniu różnych technik możliwe jest wykrycie nawet bardzo drobnych uszkodzeń. Zależnie od charakteru diagnozowanego obiektu należy wybrać jak najlepszą metodę która, w dostateczny sposób zminimalizuje wpływ czynników zewnętrznych na uzyskiwane wyniki. Stosowanie kilku metod równolegle pozwoli określić stan łożysk z jeszcze większą dokładnością. Pozwoli to na uniknięcie niepotrzebnych i bardzo kosztownych przestojów maszyn produkcyjnych a służby utrzymania ruchu będą mogły się odpowiednio przygotować do ewentualnej wymiany uszkodzonych łożysk. W przypadku systemu monitorowania linii pras warto rozważyć zastosowanie szczególnie metod pozwalających na odpowiednio dokładną diagnostykę przy dużych drganiach powodowanych charakterem pracy urządzenia. Szczególnie obiecujące wydaje się metoda analizy obwiedni, której działanie może prowadzić do odfiltrowania sygnałów o niskiej częstotliwości pochodzących od działania prasy. Również metoda SPM jest warta uwagi ze względu na to, że prasa wykonuje cykl pracy kilka razy na minutę a ta metoda operuje w zakresie częstotliwości, który nie powinien być zakłócany przez dodatkowe drgania nie pochodzące z diagnozowanych łożysk.

Literatura

- [1] Gagnon F.: *Spike Energy Diagnostics (and Similar Techniques) History, Usefulness & Future Outlook*, Vibra-K Consultants Ltd., October 2006
- [2] Bechhoefer E.: *A QUICK INTRODUCTION TO BEARING ENVELOPE ANALYSIS*, Green Power Monitoring Systems
- [3] Tandon N.: Choudhury A.: *A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings*, Tribology International 32, str. 469–480, 1999
- [4] Randall R., Antoni J.: *Rolling element bearing diagnostics—A tutorial*, Mechanical Systems and Signal Processing 25, str. 485–520, 2011
- [5] *Acoustics and Vibration Database*, dostęp 19.10.2017
adres: <http://data-acoustics.com/measurements/bearing-faults/bearing-4/>,
- [6] Fidali M.: *Specjalizowane metody diagnozowania łożysk tocznych – część I*, Utrzymanie Ruchu 2/2015.
- [7] Fidali M.: *Specjalizowane metody diagnozowania łożysk tocznych – cz. II*, Utrzymanie Ruchu, 3/2015
- [8] Strona internetowa firmy SPM <http://www.spmhd.com/>
- [9] Materiały firmy SKF. *Extend warning time and reduce the risk of bearing failure using SKF Acoustic Emission Enveloping*. www.skf.com
- [10] Holroyd T.: *CONDITION MONITORING OF VERY SLOWLY ROTATING MACHINERY USING AE TECHNIQUES COMADEM*, University of Manchester, 4-6 September 2001
- [11] Strona internetowa firmy AS Instruments <http://www.asinstrument.pl/>
- [12] Sundstrom T.: *An Introduction to the SPM HD Method. An SPM Instrument White Paper*, 2010

Wojciech MOCZULSKI*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

*wojciech.moczulski@polsl.pl

ZROBOTYZOWANE SYSTEMY DIAGNOSTYCZNE

1. Wstęp

W Instytucie Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej od wielu lat prowadzone są zaawansowane badania podstawowe i stosowane dotyczące rozwoju metod i środków diagnozowania maszyn, urządzeń i procesów. Obejmują one metody pomiaru i analizy sygnałów [1], przetwarzania cech sygnałów [2], metody prognozowania zmian stanu maszyn [3], metod i środków akwizycji wiedzy diagnostycznej [4], wreszcie metodyki konstruowania diagnostycznych systemów doradczych [5, 6], metod sztucznej inteligencji stosowanych w diagnostyce maszyn, obiektów i procesów [7] oraz dedykowanych systemów komputerowych przeznaczonych do budowy inteligentnych systemów diagnostycznych [8, 9]. Niezależnie od tych prac stanowiących podstawy ogólnie rozumianej metodyki *inteligentnej diagnostyki technicznej*, opracowano wiele szczegółowych metod i środków przeznaczonych do monitorowania i diagnozowania różnych środków technicznych, jak np.: łożyska toczne, przekładnie zębate, maszyny wirnikowe i wiele innych.

Drugi nurt prac dotyczy rozwoju robotów mobilnych. Działania w tym zakresie podjęto po roku 2000, zaczynając od prac dyplomowych, których przedmiotem było konstruowanie robotów mobilnych przede wszystkim przeznaczonych do inspekcji nieznanymi obiektów i obszarów [10]. Prace te obejmowały coraz bardziej ambitne tematy, w wyniku których opracowano projekty i konstrukcje, a następnie zrealizowano i uruchomiono: robota do inspekcji kanałów wentylacyjnych [11], grupy robotów mobilnych do inspekcji obszarów rozległych [12, 13], i wreszcie robota mobilnego do inspekcji obszarów kopalń węgla kamiennego, dotkniętych katastrofą górniczą [14].

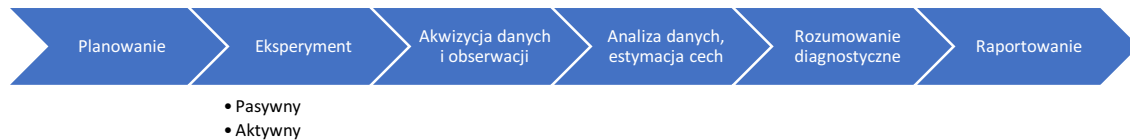
Doświadczenia i wiedza nagromadzone podczas realizacji skrótowo opisanych wyżej prac stały się podstawą sformułowania przez autora koncepcji „zrobotyzowanej inspekcji i diagnostyki”, przedstawionej na międzynarodowej konferencji ICTD-CMMNO [15] oraz na konferencji DPS'2017 [16]. Referat przedstawia najważniejsze elementy tej koncepcji i jest skomponowany jak następuje. Punkt 2. zawiera opis modelu procesu diagnozowania. W punkcie 3. przedstawiono koncepcję „inteligentnego agenta diagnostycznego” (IAD). W punkcie 4. omówiono najważniejsze podsystemy składowe IAD. W punkcie 5. opisano koncepcje zrobotyzowanego systemu diagnostycznego. Wreszcie w punkcie 6. opisano przykład zastosowania. Referat kończy podsumowanie zawierające wnioski i kierunki dalszych badań.

2. Proces diagnozowania

Wychodząc z założenia, że *diagnosis* to w języku greckim rozpoznawanie, inspekcję można uznać za specyficzne działanie diagnostyczne. Dlatego w dalszym ciągu referatu będziemy prowadzić rozważania jedynie w kontekście diagnostycznym.

Diagnozowanie jest złożonym procesem bazującym na wiedzy, do którego przeprowadzenia wymagane są odpowiednie metody i środki techniczne. Danymi wejściowymi do procesu są: rozpoznanie potrzeby i szczegółowa identyfikacja badanego obiektu (maszyny, urządzenia lub procesu). Poszczególne stadia procesu (rys. 1) scharakteryzowano poniżej, bazując na [17].

Planowanie jest czynnością intensywnie wykorzystującą wiedzę i dotyczy określenia: jakie sygnały będą mierzone, gdzie zostaną zlokalizowane czujniki, jakie będą parametry procesu akwizycji sygnałów, jakie cechy sygnałów będą wyznaczane i z wykorzystaniem jakich metod i sprzętu. Innym aspektem jest określenie planu eksperymentu, w tym: liczby obiektów objętych eksperymentem, liczby powtórzeń i ew. odstępu czasowego pomiędzy powtórzeniami i innymi. Przy planowaniu niejednokrotnie konieczne jest korzystanie z danych dotyczących poprzednich badań diagnostycznych, takich jak: szczegółowy przebieg, zgromadzone dane, ich oceny i wyniki analizy zgromadzonych danych i informacji.



Rys.1. Ogólny model procesu diagnozowania (na podstawie [16])

Przeprowadzenie eksperymentu diagnostycznego będzie mieć najczęściej charakter pasywny (tzw. bierny eksperyment diagnostyczny [18]). Jednak w kontekście zrobotyzowanej diagnostyki szczególnego znaczenia nabiera eksperyment czynny, w którym w sposób celowy pobudza się diagnozowany obiekt i obserwuje jego odpowiedź. W wielu wypadkach wykorzystywana jest tutaj wiedza, reprezentowana zwykle w formie proceduralnej.

Akwizycja danych i obserwacji jest kolejnym stadium, które przebiega jednocześnie z realizacją eksperymentu. Zwykle tzw. surowe dane (ang. *raw data*) zapisywane są w bazie danych systemu diagnostycznego.

Analiza danych i estymacja cech to stadium, które występować bądź równolegle z dwoma poprzednimi (podczas obserwacji diagnostycznej obiektu diagnozowania), bądź po zakończeniu eksperymentu - w laboratorium. Jest to działanie intensywnie oparte na wiedzy. W wielu zastosowaniach wykorzystuje się także dane i wyniki analiz zgromadzone podczas uprzednio prowadzonych badań diagnostycznych, a także wyniki badań dotyczące innych obiektów podobnej konstrukcji (w celu porównania).

Rozumowanie diagnostyczne, najczęściej sprowadzane do wnioskovania, wykorzystuje bazę wiedzy diagnostycznej o procesach, relacjach pomiędzy cechami warunków działania i cechami sygnałów diagnostycznych a cechami (parametrami) stanu technicznego, wartościach krytycznych i wielu innych.

Raportowanie jest ostatnim stadium procesu diagnozowania, którego rola zwykle nie jest doceniana. Często jest to czynność niezwykle pracochłonna, a jednocześnie rutynowa.

W dalszym ciągu referatu poddamy analizie możliwość wsparcia (lub nawet zastąpienia) inżyniera-diagnosty przez sztuczne systemy wykorzystujące koncepcję inteligentnego agenta diagnostycznego.

3. Inteligentny agent diagnostyczny

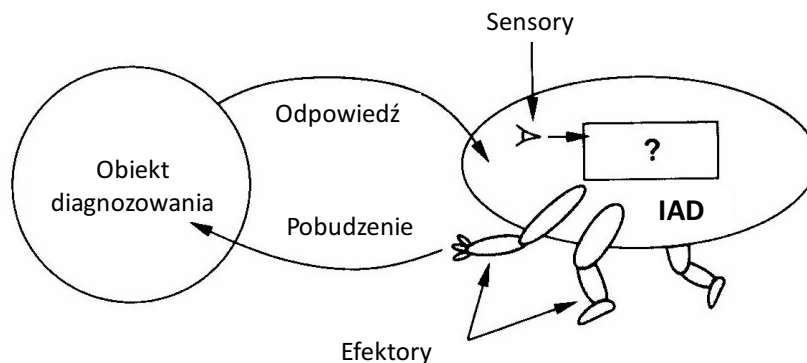
Koncepcja inteligentnego agenta diagnostycznego (IAD) została wprowadzona w [15]. Bazuje ona na pojęciu inteligentnego agenta wprowadzonym w [19].

IAD jest wyodrębnionym z otoczenia układem (bytem wirtualnym lub rzeczywistym). Oczywiście jest sens rozważania i tworzenia wirtualnych IAD, które mogą być w szczególności stosowane do diagnostyki programów komputerowych, wirtualnie istniejących (w formie modeli komputerowych lub dokumentacji projektowo-konstrukcyjnej w formie elektronicznej) obiektów diagnozowania. Jednak ze względu na zakres niniejszego referatu w dalszym ciągu tego rodzaju wirtualne IAD nie będą rozpatrywane.

Materiały (istniejący fizycznie) IAD jest w takim razie obiektem, wyposażonym co najmniej (por. rys. 2) w sensory, umożliwiające percepcję obiektu diagnozowania, oraz

element umożliwiający gromadzenie i/lub przesyłanie zgromadzonych percepcji (sygnałów, obrazów, danych i innych nośników informacji o stanie obiektu diagnozowania).

Opcjonalnie IAD może być wyposażony w specjalne efektory, umożliwiające oddziaływanie na obiekt diagnozowania w formie celowego pobudzenia tego obiektu w celu obserwacji jego odpowiedzi (eksperyment aktywny).



Rys.2. Inteligentny agent diagnostyczny IAD (na podstawie [19])

Szczególnym rodzajem efektorów mogą być takie, które zapewniają IAD mobilność, obejmującą możliwość przemieszczenia się do miejsca przeprowadzania eksperymentu diagnostycznego, a w przypadku obiektu diagnostycznego o dużych rozmiarach przekraczających np. zasięg obserwacji sensorów w które jest wyposażony IAD – przemieszczanie się w stosunku do obiektu diagnozowania.

4. Podstawowe elementy składowe IAD

W dalszym ciągu rozważań zajmiemy się szczególnym, ale najbardziej zaawansowanym przypadkiem IAD, jakim jest autonomiczny mobilny IAD. Można w nim wyróżnić następujące podstawowe elementy i systemy:

Układ mobilny (ruchu) IAD musi umożliwić przemieszczanie się wymagane ze względu na realizowaną misję. W szczególnych wypadkach stosowane są specjalizowane układy, np. wytwarzające siłę nośną, która umożliwi przemieszczanie się IAD w wymaganej odległości od obiektu badań. W niektórych przypadkach układ ten musi także zapewnić przemieszczenie się IAD z miejsca jego postoju do obszaru misji.

Układy wykonawcze umożliwiają oddziaływanie IAD na diagnozowany obiekt. Mogą nimi być: specjalne stukacze do pobudzenia impulsowego, miniaturowe wzbudniki drgań, przetworniki ultradźwiękowe (po stronie nadajnika), lampy ksenonowe stosowane do termowizji aktywnej i wiele innych.

Układy sensoryczne umożliwiają pomiar odpowiedzi diagnozowanego obiektu (w przypadku eksperymentu czynnego), a także pomiar sygnałów w przypadku eksperymentu biernego. Specjalnym rodzajem sensorów są kamery video i kamery działające w paśmie podczerwieni (termowizyjne). Układ sensoryczny może być wyposażony w odpowiednie procesory sygnałów i/lub obrazów, układy kompresji danych, a także pamięć o odpowiedniej pojemności. Obecnie standardowo sygnały i dane przetwarzane są do postaci cyfrowej. Procesory sygnałów przetwarzają sygnały i w celu estymacji cech tych sygnałów. Procesory obrazu przetwarzają obrazy w celu wydobywania z nich istotnych informacji. Pamięć umożliwia składowanie wartości tzw. surowych sygnałów, a także wartości cech tych sygnałów, co pozwala na blokowe przesyłanie tych wartości, lub też na realizację dalszych stadiów procesu diagnozowania *off-line*.

Układ komunikacyjny - kolejny układ krytyczny dla realizacji misji - ma do spełnienia dwa zadania: umożliwienie zdalnego sterowania IAD oraz przesyłanie w trybie on-line zmierzonych wartości sygnałów, cech tych sygnałów i obrazów z kamer. Ze względu na konieczność przesyłania strumieni video układ ten musi być szerokopasmowy. W przy-

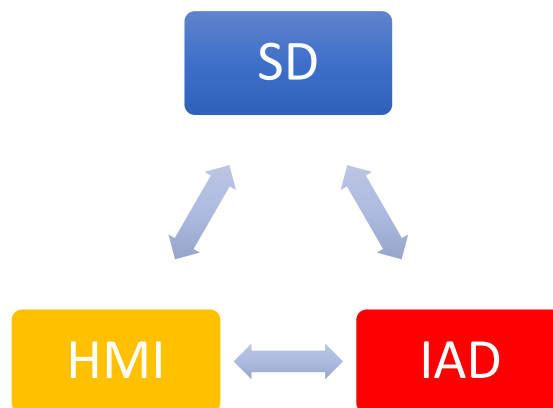
padku autonomicznych IAD wykorzystywana jest komunikacja bezprzewodowa. Ważnymi problemami do rozwiązania w tym zakresie jest zapewnienie jak najmniejszego opóźnienia (zwłaszcza w odniesieniu do sygnałów i obrazów wykorzystywanych do zdalnego sterowania), zasięgu oraz cyberbezpieczeństwa.

Układ sterowania – także niezwykle krytyczny dla powodzenia misji – może mieć kilka trybów działania. W zaawansowanych zastosowaniach, jeśli wiedza udostępniona systemowi sterowania jest wystarczająca, możliwe jest działanie autonomiczne w środowisku misji. Wymaga ono od IAD akwizycji i interpretowania w rzeczywistej skali czasu danych i informacji koniecznych do planowania trajektorii ruchu IAD w skali lokalnej i globalnej oraz następnie do realizacji tego planu z uwzględnieniem zmieniającego się otoczenia. W rzadkich przypadkach, np. kiedy układ sterowania nie jest w stanie samodzielnie rozwiązać problemu, IAD powinien niezwłocznie rozpoznać i ocenić tę sytuację oraz przesłać odpowiedni komunikat do stacji operatora, będący żądaniem przejęcia kontroli w trybie sterowania zdalnego. W najbardziej zaawansowanych zastosowaniach układ sterowania powinien mieć funkcjonalność odporności na uszkodzenia.

Układ zasilania jest jednym z krytycznych układów, od którego cech zależy długość działania IAD. Ze względu na wymaganą autonomię działania w większości przypadków wykluczone jest stosowanie zasilania sieciowego. Układy zasilania bazują na zespołach akumulatorów, które mogą być doładowywane poprzez ogniwa paliwowe oraz ogniwa fotowoltaiczne (co wymaga światła słonecznego). Należy podkreślić, że ciężar akumulatorów stanowi znaczącą część ciężaru kompletnego IAD. Wymagania innych układów i systemów rzutują oczywiście na wielkość i ciężar układu zasilania, a to z kolei wpływa na moce i momenty napędowe układów mobilnych, które w sprzężeniu zwrotnym rzutują na wymaganą pojemność akumulatorów w układzie zasilania.

5. Zrobotyzowany system diagnostyczny

Opisany powyżej inteligentny agent diagnostyczny jest istotnym elementem większego systemu – Zrobotyzowanego Systemu Diagnostycznego (ZSD). IAD spełnia rolę specjalistycznego układu sensorycznego, który zastępuje człowieka przy przeprowadzaniu eksperymentów diagnostycznych. W typowym ZSD występuje zwykle stacja operatora, wyposażona w odpowiedni interfejs (HMI). Stacja ta umożliwia przekazywanie operatorowi danych i komunikatów generowanych przez system sterowania IAD.



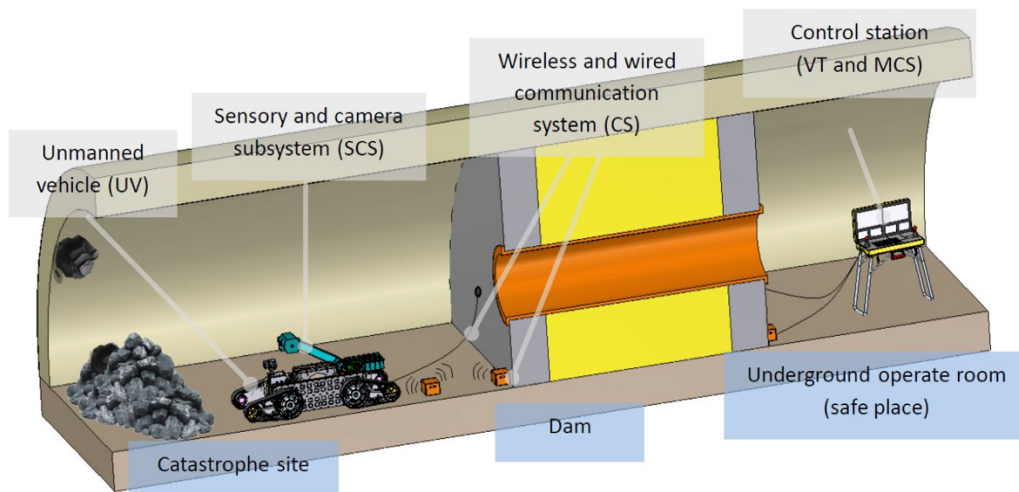
Rys.3. Zrobotyzowany system diagnostyczny

Analizując model procesu diagnozowania (rys. 1) można stwierdzić, że wszystkie pozostałe stadia tego procesu, tj. planowanie badania diagnostycznego, rozumowanie diagnostyczne i raportowanie, są działaniami podatnymi na wspomaganie za pomocą aplikacji bazujących na wiedzy, takich jak systemy doradcze. Systemy takie rozwijane były w ramach prac, w których autor uczestniczył wraz z zespołem [7, 8]. Umożliwiają one reprezentację wiedzy deklaratywnej i proceduralnej, wykorzystywanej we wspomagananiu realizacji wspomnianych uprzednio stadiów procesu diagnozowania.

Dodatkowa funkcjonalność, udostępniana przez system doradczy SD będący elementem ZSD, może dotyczyć inteligentnego interfejsu operatora (HMI). System doradczy, podobnie jak to jest obecnie realizowane w systemach sterowania w samolotach, może dokonywać selekcji danych i informacji w celu przekazania operatorowi domyślnych zestawów danych mających szczególne znaczenie dla danego kontekstu działania IAD. Wiedza służąca do selekcji relewantnych danych i informacji może być pozyskana od specjalistów dziedzinowych.

6. Przykład realizacji zrobotyzowanego systemu inspekcji

W zespole autora opracowano koncepcję zrobotyzowanego systemu inspekcji wyrobisk kopalnianych, która następnie stała się podstawą wniosku na projekt badawczo rozwojowy *TeleRescuer* współfinansowany ze środków Funduszu Badawczego Węgla i Stali Unii Europejskiej. Projekt realizowany jest przez międzynarodowe konsorcjum, w którego skład wchodzi: Politechnika Śląska w Gliwicach (lider konsorcjum), Vysoka Skola Banska – TU Ostrava (Republika Czeska), Universidad Carlos 3. de Madrid (Hiszpania), SkyTech Research sp. z o.o. w Gliwicach, i3D S.A. w Gliwicach oraz KOPEX S.A. w Katowicach. Koordynatorem projektu jest prof. Anna Timofiejczuk (Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej).



Rys.4. Ogólna koncepcja systemu *TeleRescuer* [14]

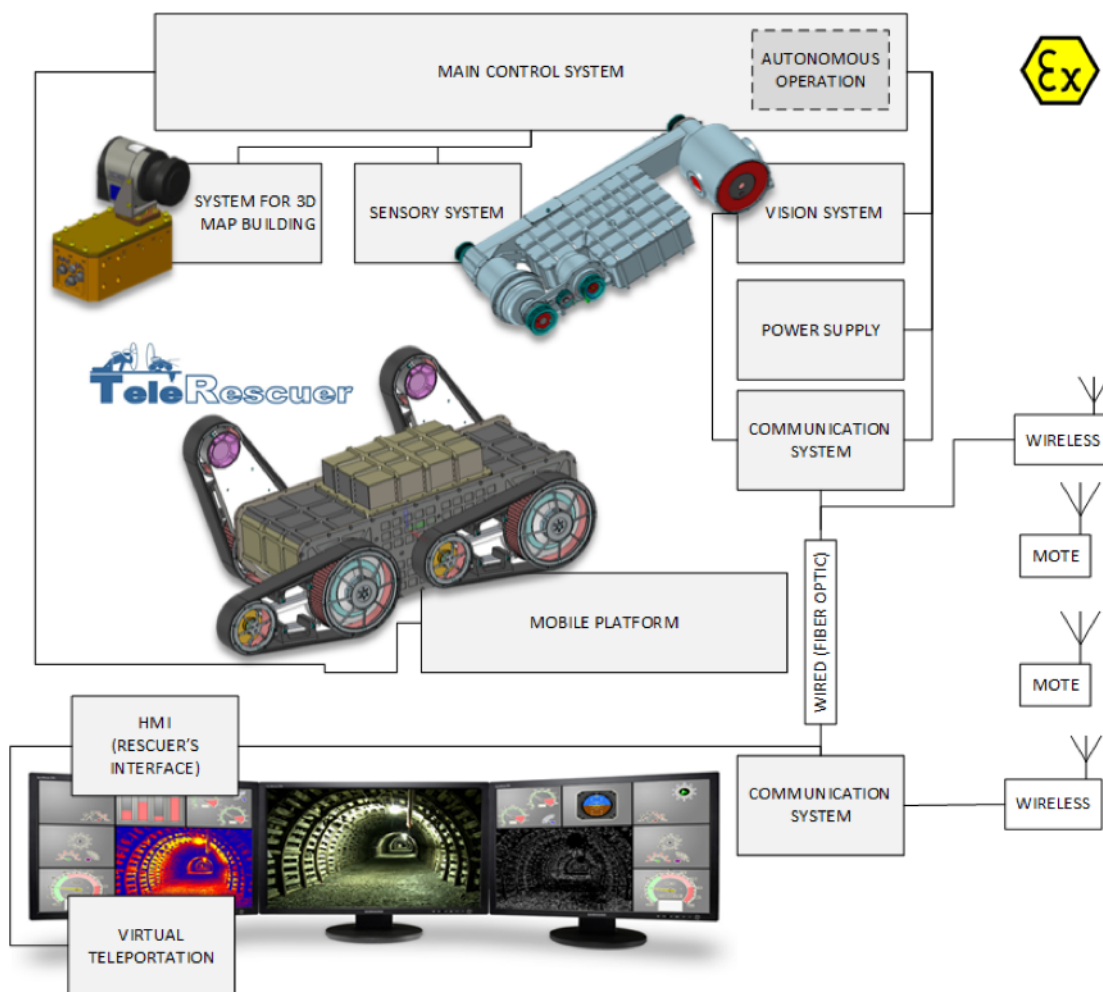
System wspomaga działania ratowników górniczych w obszarze kopalni węgla kamiennego dotkniętym katastrofą górniczą, taką jak pożar, wybuch metanu lub pyłu węglowego itp. (rys. 4). Obszar taki odcinany jest od pozostałej części kopalni za pomocą tamy wyposażonej w śluzę o średnicy otworu 800 mm. Obszar kopalni zamknięty śluzą nie jest wentylowany, w składzie atmosfery może być nadmierny poziom metanu lub np. nadmierny poziom tlenu węgla. Ponadto w tym obszarze może panować podwyższona temperatura. Wszystkie te czynniki uniemożliwiają wejście do tego obszaru ratowników górniczych, wskutek czego konieczne jest jego wyłączenie z eksploatacji na długi czas.

System *TeleRescuer* składa się z następujących elementów składowych (rys. 5):

- inteligentny agent diagnostyczny – robot mobilny o dużych możliwościach mobilnych, który po przejechaniu przez śluzę tamy może poruszać się w obszarze kopalni dotkniętym katastrofą, pokonując w razie potrzeby różnego rodzaju przeszkody spowodowane tą katastrofą;
- układ sensoryczny zamocowany na robocie, umożliwiający akwizycję sygnałów i obrazów video oraz termowizyjnych;
- skaner laserowy zamocowany na robocie, umożliwiający doraźnie identyfikację przeszkód, a także budowę mapy 3D wyrobiska górniczego poddanego inspekcji;

- stacja operatora, zlokalizowana w miejscu dowodzenia akcją ratowniczą, stosowana do zdalnego sterowania robotem oraz do prezentacji danych i obrazów zgromadzonych przez system sensoryczny i skaner laserowy zainstalowane na robocie;
- zdwojony system komunikacyjny: światłowodowy i bezprzewodowy, przy czym drugi z nich jest systemem zapasowym wykorzystującym zestaw repeaterów rozmieszczanych w wyrobisku przez robota w trakcie jego przemieszczania się w głąb wyrobiska;
- system sterowania umożliwiający zdalne sterowanie robotem mobilnym, a także posiadający ograniczoną zdolność działania autonomicznego w przypadku, kiedy utraczona zostanie komunikacja ze stacją operatora.

Ze względu na fakt, że niektóre elementy systemu (robot mobilny, system komunikacyjny) muszą operować w obszarze odcięty tamą przeciwpożarową, konieczne jest spełnienie przez nie wymagań certyfikatu ATEX M1. Skaner laserowy, jedyny zespół robota niespełniający tych wymagań, jest w przypadku podwyższonej zawartości metanu wyłączany z użytkowania.



Rys.5. System sterowania i główne elementy systemu TeleRescuer [20]

Projekt *TeleRescuer* znajduje się obecnie w końcowym stadium realizacji (rys. 6). W najbliższym czasie przewiduje się zakończenie testów kompletnego systemu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych (sztolnie ćwiczebne Centralnej Stacji Ratownictwa Górniczego S.A. w Bytomiu) oraz w rzeczywistych warunkach górniczych – w Kopalni Zabytkowej *Guido* w Zabrze.



Rys.6. Elementy systemu TeleRescuer: robot mobilny wraz z wyposażeniem oraz stacja operatora (fot. Marcin Januszka)

7. Podsumowanie

W referacie rozwinięto koncepcję zrobotyzowanej inspekcji i diagnostyki. Wprowadzono pojęcie inteligentnego agenta diagnostycznego oraz opisano jego najważniejsze elementy składowe. Szczególnym przypadkiem IAD jest autonomiczny robot mobilny, wyposażony w odpowiednie systemy sensoryczne i ew. specjalistyczne efektory. Wprowadzono także pojęcie zrobotyzowanego systemu diagnostycznego jako systemu bazującego na wiedzy, którego działania obejmują wszystkie stadia procesu diagnozowania.

W zespole badawczym współpracującym z autorem systemu takie są rozwijane od pewnego czasu. Mogą one spełnić istotną rolę w wyłączeniu inżynierów-inspektorów lub diagnostów w prowadzeniu badań diagnostycznych obiektów rozległych, trudno dostępnych, lub też stwarzających zagrożenie dla życia i zdrowia człowieka. Ponadto zrobotyzowane systemy diagnostyczne pozwolą na znaczne skrócenie czasu prowadzenia tych badań oraz na zmniejszenie ich kosztów.

Rozwój zrobotyzowanych systemów diagnostycznych wymaga wiedzy z wielu dziedzin: mechatroniki, informatyki, inżynierii wiedzy, diagnostyki technicznej, a także ogólnej wiedzy technicznej o budowie maszyn i urządzeń oraz realizowanych przez nie procesów. Wielość problemów technicznych, które należy rozwiązać podczas budowy takiego systemu, daje możliwość aktywnego działania osobom o różnych umiejętnościach, wiedzy i doświadczeniu. Projekty tego typu będą preferowane w dalszej działalności naukowo-badawczej i wdrożeniowej Instytutu Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej.

Część prac opisanych w niniejszym referacie była współfinansowana ze środków Funduszu Badawczego Węgla i Stali w ramach projektu badawczego RFCR-CT-2014-00002 „System for virtual TELEportation of RESCUER for inspecting coal mine areas affected by catastrophic events (TeleRescuer)” oraz ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu międzynarodowego współfinansowanego (PMW) Nr 3137/C&S/2014/2.

Literatura

- [1] Cholewa W., Moczulski W.: Diagnostyka techniczna maszyn. Pomiary i analiza sygnałów. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1758, Gliwice 1993.

- [2] Cholewa W., Kaźmierczak J.: Diagnostyka techniczna maszyn. Przetwarzanie cech sygnałów. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1905, Gliwice 1995.
- [3] Kaźmierczak J.: Zastosowanie liniowych modeli procesów losowych do prognozowania w diagnostyce maszyn. Zeszyty Naukowe, Politechnika Śląska nr 1037 Mechanika; z. 95, Gliwice 1989.
- [4] Moczulski W.: Metody pozyskiwania wiedzy dla potrzeb diagnostyki maszyn. Zeszyty Naukowe; Politechnika Śląska nr 1382 Mechanika; z. 130, Gliwice 1997.
- [5] Cholewa W., Pedrycz W.: Systemy doradcze. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1447, Gliwice 1987.
- [6] Cholewa W. (red.): Diagnostyczne systemy doradcze. Tom I. Wyd. IMP PAN, Gdańsk 2015.
- [7] Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W. (red.): Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania. WNT, Warszawa 2002.
- [8] Kościelny J.M., Korbicz J. (red.): Korbicz J., Kościelny J.M. (Red.): Modelowanie, diagnostyka i sterowanie nadrzędne procesami. Implementacja w systemie DiaSter. WNT, Warszawa 2009.
- [9] Przystałka P., Sikora M. (red.): Zintegrowany, szkieletowy system wspomaganie decyzji dla systemów monitorowania procesów, urządzeń i zagrożeń. Centrum Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa EMAG, Katowice 2017.
- [10] Moczulski W., Adamczyk M., Bąchór G.: Intelligent walking minirobot operating autonomously in unknown environment. MECHATRONICS 2004. 5th Int. Conference, Warsaw, Poland, September 23-25, 2004. Wyd. SIGMA-NOT, 2004, s. 44-46.
- [11] Adamczyk M., Moczulski W.: Platforma mobilna robota inspekcyjnego AMIGO. W: Tchoń K., Zieliński C. (red.) Problemy robotyki. T. 1. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, s. 133-142 Warszawa 2008.
- [12] Moczulski W., Adamczyk M., Januszka M., Panfil W., Przystałka P., Wyleżoł M.: Autonomous mobile robots for inspecting industrial objects. Technological innovations for sustainable development, Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji - PIB, s. 215-230, Radom 2009.
- [13] Moczulski W., Januszka M., Panfil W., Przystałka P., Targosz M., Skarka W.: Tele-operated multi-robot group for technical inspections. Pomiary Autom. Rob. 18(5), s. 134-139, 2014.
- [14] Moczulski W., Cyran K., Januszka M., Novak P., Timofiejczuk A.: TeleRescuer - An Innovative Robotized System for Supporting Mining Rescuers by Inspecting Roadways Affected by Catastrophes. In: Proceedings of 24th World Mining Congress, Track: Automatics and Robotics, pp. 93-104. IBRAM, Rio de Janeiro, Brasil, 2016.
- [15] Moczulski W.: Robotized inspection and diagnostics. 6th International Congress on Technical Diagnostic 2016, 5th International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations 2016, Gliwice, 12-16 September 2016. Abstracts. Publishing Institute of Fundamentals of Machinery Design Silesian University of Technology, 2016, s. 94, Gliwice 2016.
- [16] Moczulski W.: Robotized Inspection and Diagnostics - Basic Issues. W: Kościelny J.M., Syfert M., Szyber A. (red.): Advanced Solutions in Diagnostics and Fault-Tolerant Control. Advances in Intelligent Systems and Computing No. 635, Springer, 2017.
- [17] Moczulski W.: Diagnostyka techniczna. Metody pozyskiwania wiedzy. Monografia nr 36, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- [18] Żółtowski B., Cempel Cz. (red.): Inżynieria diagnostyki maszyn. Biblioteka Problemów Eksploatacji, PTDT - ITE PIB, Radom 2004.
- [19] Russel S., Norvig P.: Artificial Intelligence – A Modern Approach. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [20] Babjak J., Novak P., Kot T., Moczulski W., Adamczyk M., Panfil W.: Control system of a mobile robot for coal mines. In: Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference, ICC 2016, pp. 17-20, 2016.

Gabriel MURA*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

*gabriel.mura@polsl.pl

METODA OPTIMALIZACJI POSTACI KONSTRUKCYJNEJ STRUKTURY ENERGOCHŁONEJ POJAZDU SPECJALNEGO

1. Wstęp

Zwiększenie odporności pojazdów militarnych i cywilnych na oddziaływanie fali uderzeniowej pochodzącej od eksplozji ładunku wybuchowego jest jednym z ważniejszych współczesnych problemów badawczych dla wielu wojskowych centrów badawczych, a wzrost zagrożenia atakami terrorystycznymi jest dodatkowym impulsem w drodze do jego rozwiązania [1, 2, 9]. Przemysł zbrojeniowy rozwija dwa podejścia: opracowywanie ciężkich, bardzo wytrzymałych panczerzy [1, 6] oraz opracowywanie lekkich energochłonnych paneli ochronnych [1, 13].

Struktury te służą do absorpcji energii fali uderzeniowej, spowodowanej wybuchem lub energii kinetycznej ciała uderzającego [1, 16]. Ze względu na wojskowy charakter badań nad zagadnieniami energochłonności wyniki są zazwyczaj utajniane. Dostępna literatura [1, 3] dostarcza wyłącznie wskazówek odnośnie do modyfikacji istniejących rozwiązań konstrukcyjnych zwiększających energochłonność paneli.

Ilość rozproszonej energii przez panele energochłonne jest równa pracy siły wywołującej odkształcenia trwałe okładzin oraz zniszczenie rdzenia [1]. Na zdolność struktur do pochłaniania energii wpływa przede wszystkim [14]:

- rodzaj materiału,
- geometria rdzenia,
- sposób jego niszczenia.

Dlatego celem pracy było zamodelowanie oddziaływania fali uderzeniowej, powstałej w wyniku eksplozji ładunku wybuchowego na konstrukcję pojazdu specjalnego oraz opracowanie algorytmu optymalnego doboru cech konstrukcyjnych wybranych rdzeni energochłonnych paneli ochronnych, wykonanych z różnych materiałów, minimalizujących oddziaływania eksplozji ładunku wybuchowego na strukturę pojazdu.

W przypadku pojazdów bojowych dąży się również do zminimalizowania masy opancerzenia. Mała masa pozwala na zaoszczędzenie paliwa podczas przemieszczania się na polu walki, umożliwia spełnienie kryterium pływalności pojazdu oraz transportu pojazdu drogą lotniczą. Dlatego tak ogromne znaczenie ma rozwijanie struktur energochłonnych, wspomagających panczerze pojazdów bojowych. Badania te mogą w znacznym stopniu przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa załogi i sprzętu pojazdów bojowych.

2. Optymalizacja geometrii rdzenia

Do optymalizacji wykorzystano algorytm genetyczny opracowany w oprogramowaniu Matlab, który został wzbogacony o funkcje umożliwiające komunikację z modelem numerycznym oddziaływania wybuchu na konstrukcję pojazdu, wraz z panelami w oprogramowaniu LS-Dyna. Ponadto przeprowadzono optymalizację z wykorzystaniem opracowanego algorytmu dla dwóch wybranych rdzeni w kształcie ściętego stożka i zaokrąglonego profilu kwadratowego, wykonanych ze stali i aluminium.

Po inicjacji początkowej populacji chromosomów generowany jest plik wsadowy z komendami dla środowiska LS Pre-Post, dzięki któremu generowany jest sparametryzowany plik wsadowy do oprogramowania LS-Dyna. Uproszczony model rdzeni panelu ochronnego jest przygotowany do analizy wybuchu z wykorzystaniem metody

ALE. Po przeprowadzeniu symulacji numerycznej wybuchu generowany jest plik wyników, na podstawie którego dokonywana jest ocena przystosowania chromosomów w populacji. Jeżeli wynik jest zadawalający lub zostaje spełniony warunek zatrzymania, algorytm zostaje zatrzymany. W przeciwnym razie populacja chromosomów ulega modyfikacji poprzez operatory genetyczne a algorytm wraca do kroku drugiego. Blokowy schemat tej metody został przedstawiony na rysunku 1.

W celu sprawdzenia działania opracowanego algorytmu przeprowadzono optymalizację dla dwóch parametrów geometrycznych rdzenia w kształcie ściętego stożka o średnicy podstawy 60 mm oraz zaokrąglonego profilu kwadratowego o wymiarach 60x60 mm.

Jako funkcję celu w programie optymalizacji rdzeni przyjęto energię wewnętrzną odkształcenia, czyli energię absorbowaną (EA) przez rdzenie paneli energochłonnych. Dla rdzenia w kształcie ściętego stożka można ją zapisać za pomocą równania:

$$\psi_1 = EA(a, b) \quad (1)$$

natomiast dla rdzenia w kształcie profile kwadratowego:

$$\psi_2 = EA(a, R) \quad (2)$$

gdzie (a) to grubość ścianki, (b) kąt pochylenia stożka a (R) jako promień gięcia profile. Wspomniane parametry zostały przyjęte jako zmienne decyzyjne. Dlatego zadanie optymalizacji zostało sformułowane jako maksymalizacja energii zaabsorbowanej przez rdzenie, co dla rdzeni w kształcie stożka można zapisać w sposób następujący:

$$\max [\psi_1(a, b)] = \max [EA(a, b)] \quad (3)$$

przy ograniczeniach:

$$\begin{aligned} 2[\text{mm}] &\leq a \leq 11 [\text{mm}] \\ 0^\circ &\leq b \leq 26^\circ \end{aligned}$$

Natomiast dla rdzenia w kształcie profilu kwadratowego:

$$\max [\psi_2(a, R)] = \max [EA(a, R)] \quad (4)$$

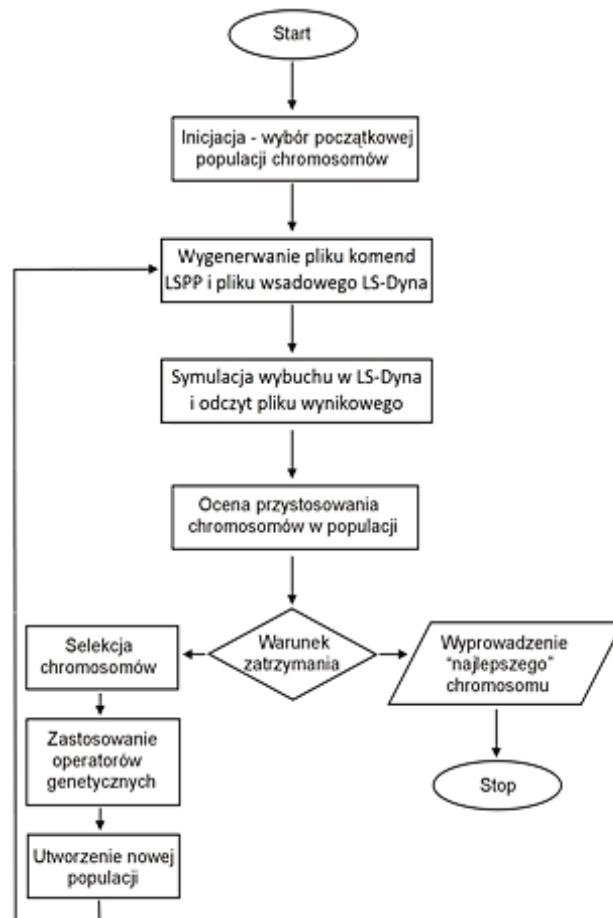
przy ograniczeniach:

$$\begin{aligned} 2[\text{mm}] &\leq a \leq 11 [\text{mm}] \\ 3 [\text{mm}] &\leq R \leq 27 [\text{mm}] \end{aligned}$$

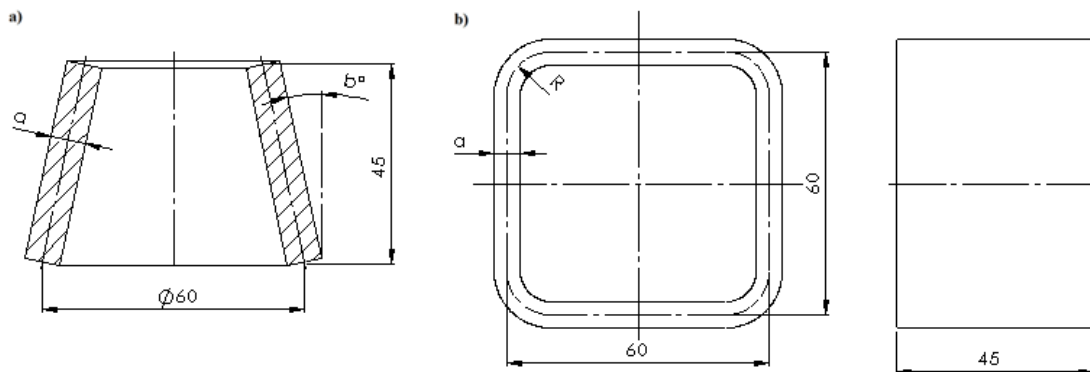
Pierwszym parametrem dla obu przypadków jest grubość materiału (a), a warunkiem brzegowym dla stożka jest wykonanie rdzenia z blachy stalowej i aluminiowej o grubości od 2 do 11 mm. Ograniczenia te wynikają z geometrii, gdyż dla większych kątów pochylenia oraz przy większych grubościach materiału zachodziłoby przenikanie ścianek modelu rdzenia przy górnej krawędzi stożka, co negatywnie wpływałoby na wyniki optymalizacji, gdyż rozwiązanie nie ma sensu fizycznego. Jako drugie ograniczenie przyjęto kąt pochylenia stożka (b) od 0° do 26° dla obu analizowanych materiałów. W przypadku rdzenia w kształcie profilu kwadratowego jako drugą zmienną przyjęto promień gięcia profilu (R) od 3 mm do 27 mm. Dodatkowo przyjęto, że wartość funkcji celu (energia wewnętrzna odkształcenia) będzie odczytywana w czasie 0,002 s. Na rysunku 3.2a i 3.2b przedstawiono interpretację graficzną przyjętych zmiennych w programie optymalizacji dla wybranych kształtów rdzeni paneli energochłonnych.

Ponadto w programie optymalizacji przyjęto populację początkową w postaci 8 chromosomów, natomiast optymalne rozwiązanie będzie poszukiwane wśród 100 populacji. Dodatkowo przyjęto w algorytmie genetycznym prawdopodobieństwo krzyżowania na poziomie 0,5 z jednym punktem krzyżowania w środku chromosomu. Prawdopodobieństwo mutacji przyjęto na poziomie 0,01. Powyższe parametry zostały

dobrane na podstawie zaleceń literatury [12] oraz na podstawie własnych prób oszacowania wpływu tych parametrów na wynik optymalizacji.



Rys.1. Schemat blokowy działania zaproponowanego algorytmu optymalizacji



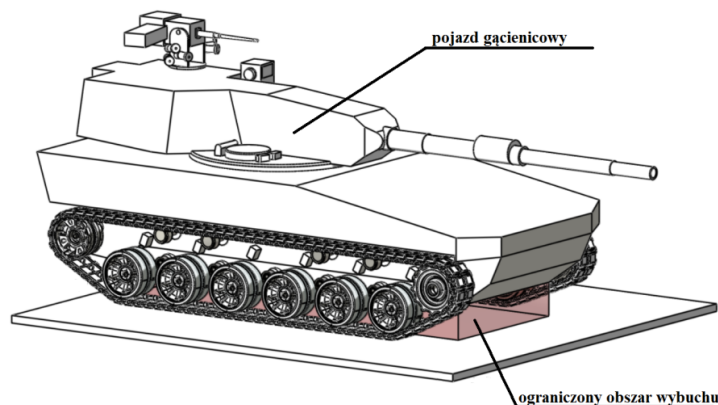
Rys.2. Schemat graficzny zmiennych w programie optymalizacji dla rdzeni w kształcie: a) ściętego stożka, b) zaokrąglonego profilu kwadratowego (a – grubość materiału, b – kąt pochylenia stożka, R - promień zaokrąglenia)

3. Model numeryczny wybuchu

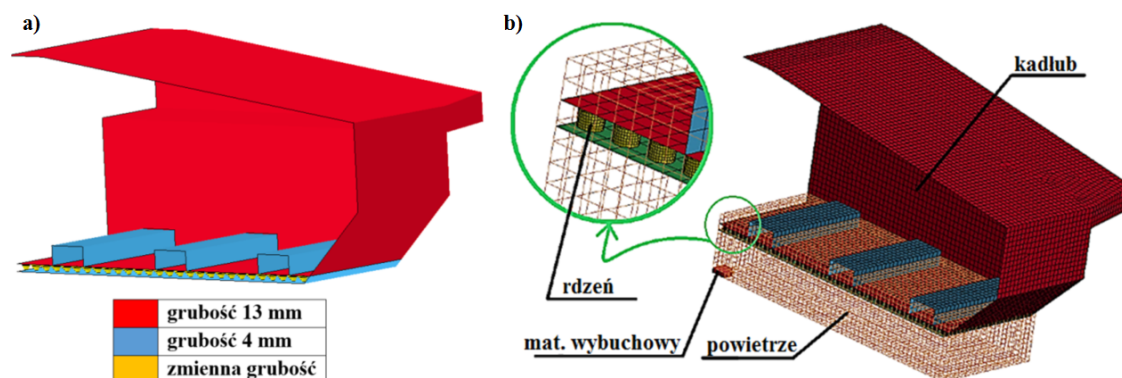
Analizę numeryczną przeprowadzono w środowisku LS-Dyna dla modelu numerycznego kadłuba pojazdu gaśnicowego (typu lekki czołg) obciążonego oddziaływaniem fali ciśnienia. Fala ta pochodzi od detonacji ładunku materiału wybuchowego o masie 6 kg, umieszczonego na podłożu pod środkiem dna pojazdu, zgodnie z poziomem zabezpieczeń 2b aneksu B normy STANAG 4569 dotyczącej minoodporności.

Fala ciśnienia wywołana detonacją (zasymulowana w przybliżeniu detonacją punktową) rozchodziła się w obszarze o kształcie sześciangu z nadanymi odpowiednimi warunkami brzegowymi. Pozwala to na komputerową symulację procesu propagacji fali uderzeniowej poprzez nadanie odpowiednich warunków początkowych (gęstość, energia, ciśnienie) pewnym, wybranym elementom z domeny Eulera, a następnie rozwiązanie równań praw zachowania masy, pędu i energii [7].

Pomimo tego, że kadłub nie jest symetryczny wydzielono ¼ modelu powłokowego, który następnie wykorzystano do budowy modelu dyskretnego. Jest to znaczne uproszczenie zastosowane przez autora pracy w modelowaniu zjawiska oddziaływania wybuchu na kadłub, jednakże konieczne ze względu na duże zapotrzebowanie na moc obliczeniową. Zwłaszcza biorąc pod uwagę to, że symulacja wybuchu jest przeprowadzana w każdej iteracji procesu optymalizacji. Ponadto wybuch w głównej mierze oddziałuje na dno pojazdu, gdzie są obszary symetryczne (rys.3 i rys.4).



Rys.3. Model pojazdu gąsienicowego z zaznaczonym uproszczonym obszarem wybuchu



Rys.4. 1/4 modelu kadłuba jako: a) model powłokowy, b) model dyskretny (po prawej) z ładunkiem wybuchowym i otaczającym dno ośrodkiem (powietrzem) w środowisku LS-Dyna

Do opisu wszystkich elementów metalowych tj. kadłub (ARMOX 500T), rdzeni stalowych (S355) i aluminiowe (6061 T651) wykorzystano uproszczony model materiałowy Johnsona–Cooka [1]. W tabeli 1 przedstawiono wartości parametrów dla zastosowanego modelu konstytutywnego.

Ponadto pomiędzy krawędziami rdzeni a dnem kadłuba i płytą dolną, przyjęto model kontaktowy z połączeniem klejowym *CONTACT_TIEBREAK z kryterium zniszczenia połączenia w postaci naprężeń dla rozciągania 34 MPa i ścinających 24 MPa.

Ponadto przyjęto typowe wartości dla substancji wybuchowych tj. gęstość 1630 kg/m³ i energia wewnętrzna właściwa - 4,2 MJ/kg [5]. W obliczeniach uwzględniano zmiany wywołane deformacją kadłuba pojazdu. Warstwa, w której rozprzestrzeniała się fala uderzeniowa, została zamodelowana przy pomocy eulerowskich elementów typu Hexahedron z własnościami gazu idealnego - $\gamma = 1,4$ i gęstości odpowiadającej gęstości powietrza atmosferycznego w warunkach normalnych $\rho = 1,29$ kg/m³, zdefiniowa-

nej w modelu *MAT_NULL. W modelu numerycznym wybuchu wykorzystano również funkcję dotyczącą równania stanu *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL, która opisuje zależność ciśnienia od energii wewnętrznej, która przypada na jednostkę objętości gazu. Jeżeli przyjmiemy, że powietrze jest gazem idealnym, parametry C1, C2, C3 oraz C6 przyjmują wartość zero, a C4=C5=0,4. W tabeli 2.3 przedstawiono wartości parametrów przyjętych do modelowania ośrodka (materiału wybuchowego i powietrza).

Tab.1. Wartości parametrów metalowych części kadłuba [8,10,11].

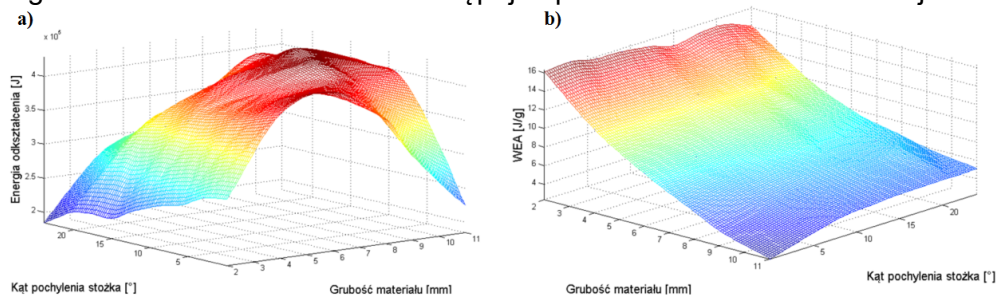
Parametr		ARMOX 500T	S355	Al 6061 T651
Gęstość,	RO [kg/m ³]	7850	7850	2720
Moduł Younga,	E [Pa]	2,1e11	2,1e11	6,9e10
Wspł. Poissona,	PR	0,3	0,3	0,33
Stałe:	A [Pa]	8,49e8	4,57e8	2,3e8
	B [Pa]	1,34e9	4,17e8	1,9e8
	N	9,23e-2	5e-2	0,24
	C	5,41e-3	7,4e-3	1e-3

Tab.2. Parametry modelu numerycznego ośrodka [4].

*MAT_NULL (Powietrze)								
RO [ka/m ³]	PC	MU	TEROD	CEROD	YM	PR		
1,29	0	0	0	0	0	0		
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL (Powietrze)								
C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	E ₀	V ₀
0	0	0	0	0,4	0,4	0	0	0
*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN (TNT)								
RO [kg/m ³]	D [m/s]	PCJ [Pa]	BETA	K	G	SIGY		
1630	6930	2,1e10	0	0	0	0		
*EOS_JWL (TNT)								
A [Pa]	B [Pa]	R ₁	R ₂	ω	E ₀ [J/kg]	V ₀		
3,71e11	3,2e9	4,15	0,95	0,3	3,7e6	1		

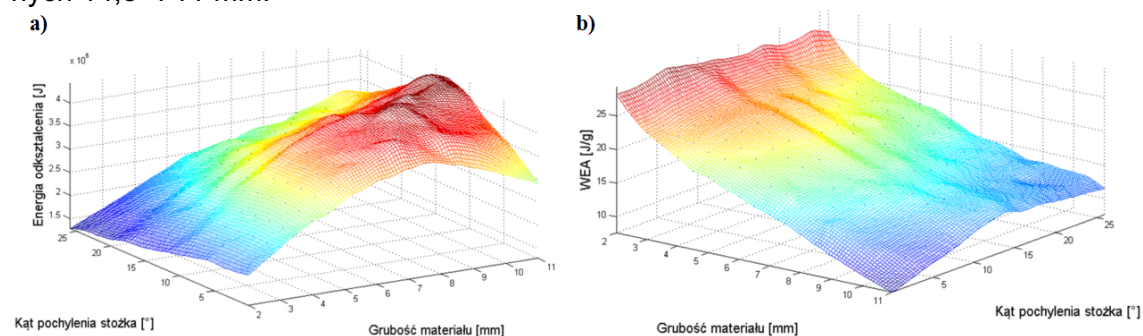
3. Wyniki optymalizacji

W przypadku rdzeni wykonanych z blachy stalowej optymalnym rozwiązaniem okazał się stożek o grubości materiału 9,8 mm i kącie pochylenia 10,1°. Na rysunku 5 przedstawiono przebieg funkcji celu w zależności od zmiennych w przyjętych zakresach. Możemy zaobserwować, że dla większości wartości kąta pochylenia energia absorbowana (AE) rośnie wraz z grubością materiału, co zostało już udowodnione w pracach innych autorów [15,17]. Jednakże przy małym kącie pochylenia 0°-9° po przekroczeniu grubości materiału ok. 8 mm następuje spadek zdolności do absorpcji energii.



Rys.5. Wyniki dla stalowego rdzenia w kształcie stożka: a) przebieg absorbowanej energii w funkcji kąta pochylenia i grubości materiału, b) przebieg względnej energii absorbowanej w funkcji kąta pochylenia i grubości

Podobne zjawisko można zaobserwować na przebiegu funkcji celu w optymalizacji stożków aluminiowych (rys. 6). Zdolność do absorpcji energii w tym przypadku rośnie dla kątów 0° - 9° rośnie wraz ze wzrostem grubości aluminium do momentu osiągnięcia ok. 8 mm, po czym następuje jej spadek. Można to uzasadnić wzrostem sztywności rdzeni przez co zwiększyła się ich odporność na odkształcenia. W analizie rdzeni aluminiowych maksymalne wartości energii absorbowanej otrzymano dla wartości zmiennej 14,3° i 11 mm.



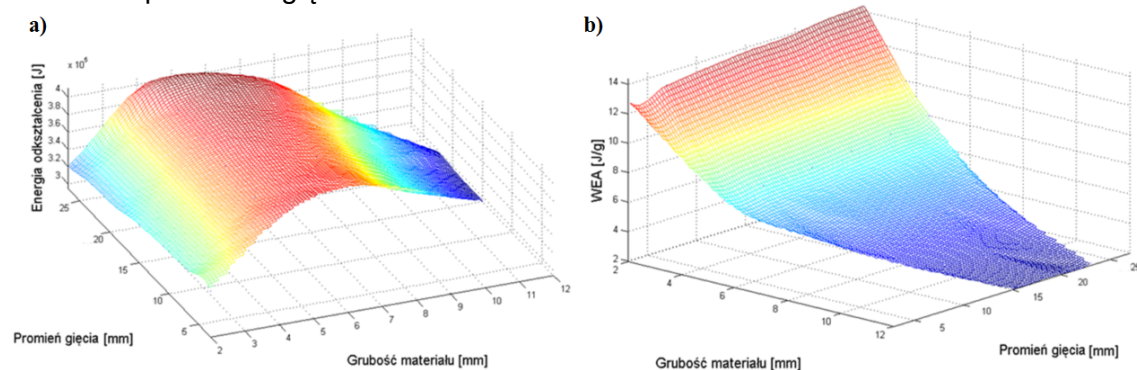
Rys.6. Wyniki dla aluminiowego rdzenia w kształcie stożka: a) przebieg absorbowanej energii w funkcji kąta pochylenia i grubości materiału, b) przebieg względnej energii absorbowanej w funkcji kąta pochylenia i grubości.

W tabeli 3 przedstawiono podsumowanie wyników optymalizacji dla rdzenia w kształcie ściętego stożka.

Tab.3. Podsumowanie wyników optymalizacji dla rdzenia w kształcie stożka.

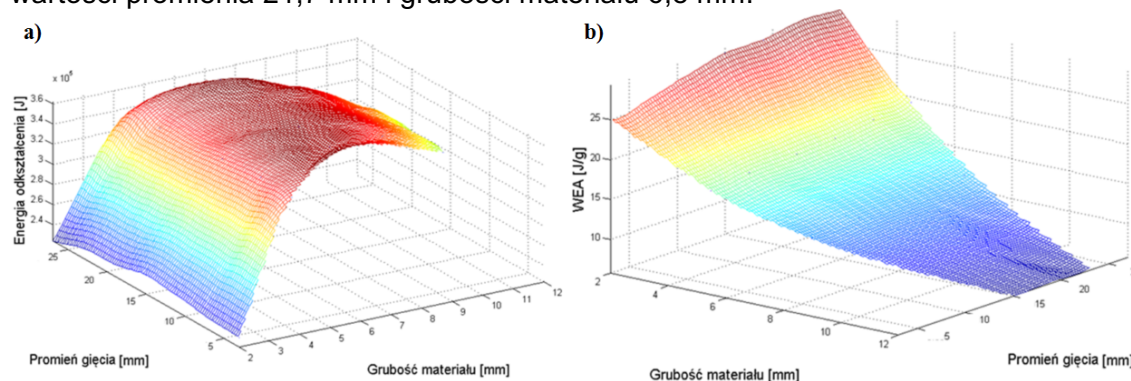
Typ rdzenia	Optymalny kąt [°]	Optymalna grubość [mm]	EA wszystkich rdzeni [J]	WEA zniszczonych rdzeni [J/g]	WEA całego panelu [J/g]
Stal	10,1	9,8	4,1e5	5,4	0,61
Aluminium	14,3	11	4,3e5	12,6	1,43

W kolejnej optymalizacji rdzeni wykonanych z blachy stalowej najlepszym rozwiązaniem okazał się profil kwadratowy o grubości materiału 6,2 mm i promieniu gięcia 24 mm. Na rysunku 7 przedstawiono przebieg funkcji celu w zależności od zmiennych w przyjętych zakresach. Możemy na nim zaobserwować, że (EA) rośnie wraz z grubością materiału do momentu osiągnięcia grubości ok. 6-7 mm, po czym zaczyna spadać. Niestety promień zaokrąglenia nie ma takiego znaczenia jak grubość materiału w procesie optymalizacji. Można jedynie zauważyć, że wartość EA delikatnie rośnie wraz ze wzrostem promienia gięcia.



Rys.7. Wyniki dla stalowego rdzenia w kształcie zaokrąglonego profilu kwadratowego: a) przebieg absorbowanej energii w funkcji kąta pochylenia i grubości materiału, b) przebieg względnej energii absorbowanej w funkcji kąta pochylenia i grubości.

Ponownie zbieżne zjawisko można zaobserwować na przebiegu funkcji celu w optymalizacji rdzenia w kształcie profilu aluminiowego (Rys. 8). Zdolność do absorpcji energii w tym przypadku rośnie wraz ze wzrostem grubości materiału do momentu osiągnięcia ok. 7 mm po czym następuje jej spadek. Można to uzasadnić wzrostem sztywności rdzeni przez co zwiększyła się ich odporność na odkształcenia. W optymalizacji rdzeni aluminiowych maksymalne wartości energii absorbowanej otrzymano dla wartości promienia 21,7 mm i grubości materiału 6,8 mm.



Rys.8. Wyniki dla stalowego rdzenia w kształcie zaokrąglonego profilu kwadratowego: a) przebieg absorbowanej energii w funkcji kąta pochylenia i grubości materiału, b) przebieg względnej energii absorbowanej w funkcji kąta pochylenia i grubości.

W tabeli 4 przedstawiono podsumowanie otrzymanych wyników optymalizacji dla rdzeni w kształcie profilu kwadratowego.

Tab.4. Podsumowanie wyników optymalizacji dla rdzenia w kształcie profilu kwadratowego.

Typ rdzenia	Optymalny promień [mm]	Optymalna grubość [mm]	EA wszystkich rdzeni [J]	WEA zniszczonych rdzeni [J/g]	WEA całego panelu [J/g]
Stal	24	6,2	4,1e5	5,2	0,59
Aluminium	21,7	6,8	3,6e5	12,1	1,37

4. Podsumowanie

Przedstawiona przez autora metodyka optymalizacji geometrii rdzeni paneli energochłonnych może być wykorzystana w doborze cech konstrukcyjnych rdzeni energochłonnych. W artykule przedstawiono optymalizację rdzeni w kształcie ściętego stożka i zaokrąglonego profilu kwadratowego, lecz po odpowiedniej modyfikacji pliku komend do aplikacji LS PrePost, można przeprowadzić optymalizację dla dowolnie wybranego kształtu struktur energochłonnych.

W artykule poddano analizie rdzenie wykonane ze stali S355 i z aluminium Al. 6061-T651. Podobnie jak w pracach innych autorów udowodniono wzrost wartości energii absorbowanej wraz ze zwiększaniem grubości materiału. Jednakże jej procentowy przyrost w stosunku do przyrostu masy dla przeanalizowanych materiałów metalowych jest mniejszy. Dlatego funkcja celu w postaci EA faworyzuje rdzenie o większej grubości materiału, natomiast w przypadku, gdyby zastosowano jako funkcję celu WEA, ta faworyzowałaby w programie optymalizacji rdzenie o mniejszej grubości.

W pierwszym zadaniu optymalizacji, za zmienne decyzyjne przyjęto kąt pochylenia stożka i grubość ścianki. Wynika z niej, że rdzenie w kształcie stożka wykonane z metali posiadają optymalny kąt pochylenia w zakresie od 10-15°. Zauważono również, że po przekroczeniu grubości ścianki rdzenia ok. 8 mm struktura energochłonna usztywnia się na tyle, że pomimo wzrostu absorbowanej energii, odkształcenia zwiększają się w stosunku do tych, które wyznaczono dla dna kadłuba bez paneli. Jest to wynikiem zmniejszania się prześwietu pojazdu o ok. 50 mm po założeniu paneli. W

związku z tym płyta osłonowa jest bliżej miejsca wybuchu, a więc musi przenieść większe obciążenia. W sytuacji, gdy struktura energochłonna jest sztywna, większość tego obciążenia jest przekazywana na dno pojazdu. W analizowanym obszarze każdy wzrost grubości materiału zmniejsza odkształcenia dna pojazdu.

W drugim zadaniu optymalizacji zaobserwowano, że promień zaokrąglenia w profilu kwadratowym ma niewielkie znaczenie, aczkolwiek większe wartości WEA odnotowano dla większych promieni. Po raz kolejny kluczowe znaczenie miała grubość zastosowanego materiału.

Literatura

- [1] Barnat W.: Wybrane problemy energochłonności nowych typów paneli ochronnych obciążonych falą wybuchu. Warszawa: BEL Studio, 2010.
- [2] Borkowski W., Rybak P.: Badania odporności kadłubów wozów bojowych na obciążenia impulsowe, II Konferencja Naukowo –Techniczna Odporność Udarowa Konstrukcji, Rynia 1993.
- [3] Chen W.: Experimental and numerical study on bending collapse of aluminum foam-filled hat profiles, *Int. J. Solids and Structures*, No. 38, 2001.
- [4] Cheng D., Hung C., Pi S.: Numerical simulation of near-field explosion. *Journal of Applied Science and Engineering*, 2013, 16.1: 61-67.
- [5] Chung, W-J., Lee M.: Modeling high-speed impacts and explosions with ExLO code. *Journal of mechanical science and technology*, 2009, 23.8: 2244-2252.
- [6] Dacko M., Nowak J., Cieśla P.: Analiza numeryczna pakietu elementów cylindrycznych obciążonych falą uderzeniową wybuchu, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, vol. 14, No. 1 2007.
- [7] <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=56d972eae3945d369da11&assetKey=AS%3A335879454380041%401457091310569>, 2016.
- [8] <http://www.varmintal.net/aengr.htm>, 2016.
- [9] Kim K. H., Shin K. C., Lee J. J.: Axial crush and energy absorption characteristics of aluminum/GFRP hybrid square tube, *Key Engineering Materials*, 2000.
- [10] Klasztorny, M.: Numerical modelling and design of ALFC shield loaded by 20 MM FSP fragment. *Journal of KONES*, 2012, 19: 301-313.
- [11] Mespoulet J., Lachaud A., Hereil P.: Parameters determination of constitutive models for low alloy structural steel S355K2G3. *DYMAT 2009*, 1375–1381
- [12] Murawski, K.: Obliczenia ewolucyjne: geneza i zastosowanie. *Biuletyn Instytutu Automatyki i Robotyki*, 7 (2001), 55-104.
- [13] Niezgoda T., Barnat W.: Numerical Analysis of progressive failure of composite energy absorbing structures, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 15/2008.
- [14] Niezgoda T., Ochelski S., Barnat W.: Wpływ kąta uderzenia na pochłanianie energii poprzez wybrane struktury kompozytowe, IX Konferencja Naukowo–Techniczna, Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania, Giżycko 2005.
- [15] Ochelski S., Niezgoda T.: Parameter selection rules for elements of energy-absorbing structures. *Engineering Transactions*, 2009, 57.1: 17–34.
- [16] Wade B., Deleo F., Feraboli P., Byar A., Rucki M., Rassaian M., Works B. P.: Toward the development of a standard for characterizing the energy absorption of composite materials. In: *Proceeding of the 17 th Int. Conf. on Composites*. 2009.
- [17] Zhang, X., Wen, Z., Zhang, H.: Axial crushing and optimal design of square tubes with graded thickness. *Thin-Walled Structures*, 2014, 84: 263-274.

Małgorzata MUZALEWSKA¹, Wojciech MOCZULSKI²

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) muzalewska.malgosia@gmail.com

2) wojciech.moczulski@polsl.pl

METODYKA WIELOKRYTERIALNEJ OPTYMALIZACJI CECH GEOMETRYCZNYCH IMPLANTU ORTOPEDYCZNEGO DO REKONSTRUKCJI WIĘZADŁA KRZYŻOWEGO PRZEDNIEGO

1. Wstęp

W artykule opisano metodykę wielokryterialnej optymalizacji cech geometrycznych (tj. postaci geometrycznej i układu wymiarów) implantu ortopedycznego do rekonstrukcji więzadła krzyżowego przedniego znajdującego się w stawie kolanowym. Genezą podjęcia badań była nawiązana współpraca z Prof. K. Fickiem, autorem patentu PL217967 B1: Implant medyczny do wzmacniania wgajania przeszczepów w rekonstrukcji więzadeł w tunelach kostnych, co zainicjowało rozważania dotyczące optymalnej postaci konstrukcyjnej implantu. Artykuł stanowi obszernie omówienie wyników zawartych w rozprawie doktorskiej M. Muzalewskiej [14].

2. Przegląd literatury

Więzadło krzyżowe przednie (ACL - *anterior cruciate ligament*) pełni bardzo ważną funkcję w organizmie człowieka. Przede wszystkim odpowiada za stabilizację stawu kolanowego oraz połączenie kości udowej i piszczelowej [10][15].

Rekonstrukcja zerwanego więzadła przedniego krzyżowego jest współcześnie bardzo częstym i popularnym zabiegiem w ortopedii. Zabieg ten najczęściej przeprowadza się małoinwazyjną techniką artroskopową [8][10][12][19]. Polega on na przeprowadzeniu przeszczepu przez dwa przeciwległe kanały kostne, utworzone – jeden w kości udowej, drugi w kości piszczelowej tak, aby przeszczep znalazł się na miejscu zerwanego więzadła przedniego krzyżowego w stawie kolanowym.

Kość składa się z kilku warstw, głównie z kości korowej oraz gąbczastej, które bardzo różnią się własnościami tworzywowymi oraz regeneracyjnymi [3]. Aby zabieg rekonstrukcji więzadła przedniego krzyżowego powiódł się, musi nastąpić wrośnięcie tkanki kostnej we wstawiony przeszczep w kanałach kostnych, przez które został przeprowadzony. Tylko wtedy zostanie zachowana odpowiednia stabilizacja przeszczepu i będzie mógł on przejąć rolę więzadła przedniego krzyżowego stabilizując staw kolanowy.

2.1. Optymalizacja wielokryterialna

Optymalizacja wielokryterialna polega na poszukiwaniu optymalnego rozwiązania ze względu na kilka kryteriów. Rozwiązaniem optymalizacji wielokryterialnej może być jeden osobnik lub pula osobników spełniająca dane kryteria. Wybór optymalnego rozwiązania może odbywać się w różnoraki sposób, np.:

- kryteria mogą być sprowadzone do jednej **funkcji celu** za pomocą np. metody sumy ważonej. Optymalnym rozwiązaniem jest minimum lub maksimum globalne funkcji celu. Ograniczeniem tej metody jest przede wszystkim narzucenie na początku wag dla każdego kryterium, które mogą okazać się niewłaściwie dobrane.

$$F(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i(x), \text{ gdzie } w_i \in [0,1] \text{ oraz } \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

- wyznaczane jest pole rozwiązań zdominowanych i niezdominowanych, czyli **Pareto- optymalnych** [18]. Rozwiązania *Pareto*-optymalne to takie, dla których nie istnieje inne rozwiązanie polepszające wartość ze względu na jedno kryterium, nie pogarszając jednocześnie wartości pod względem innego kryterium. Rozwiązań *Pareto*-optymalnych najczęściej występuje wiele, tworząc tak zwany front *Pareto*, przez co pojawia się na końcu problem wyboru jednego najlepszego rozwiązania [18][8]

$$F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)),$$

Rozwiązanie x jest zdominowane, jeśli istnieje dopuszczalne rozwiązanie y nie gorsze od x , czyli dla każdej funkcji celu f_i :

$$f_1(y) \geq f_i(x); (i = 1, \dots, n).$$

W pracy tej zastosowano i porównano obydwie podejścia

2.2. Algorytmy immunologiczne

Z wielu metod heurystycznych wybrano algorytmy immunologiczne [5][20]. Z badań literaturowych wynika, że algorytmy te powinny najszybciej zbiegać się do rozwiązania przy wielu sprzecznych kryteriach [1][6][17].

Sztuczne systemy immunologiczne (SSI, *ang. Artificial Immune System - AIS*) ściśle opierają się na zasadzie działania systemów odpornościowych działających w organizmach żywych. Ich głównymi zaletami są umiejętności:

- uczenia się,
- zapamiętywania (i zapominania),
- podtrzymywania różnorodności populacji,
- dostosowywania się do nowych sytuacji.

Sztuczne systemy immunologiczne były inspiracją dla wielu matematyków i informatyków zajmujących się optymalizacją i klasyfikacją danych [2][4][9][13][16].

W wyżej wymienionej literaturze można zaobserwować wykorzystanie algorytmów opierających się na selekcji klonalnej, na selekcji negatywnej lub połączeniu tych dwóch metod.

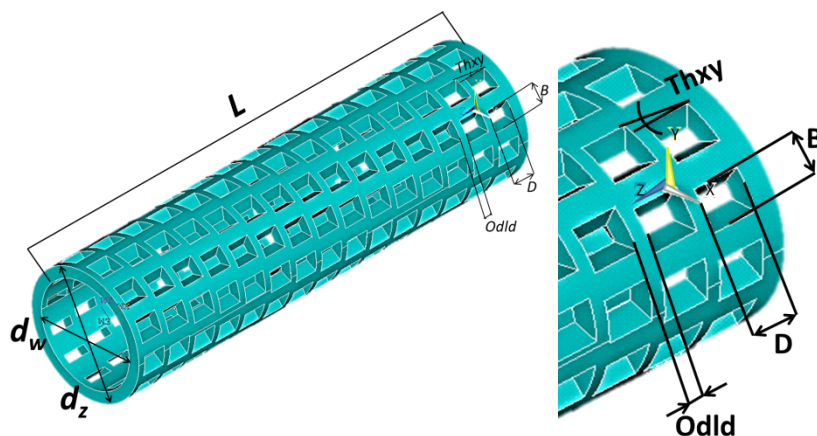
Różnorodne algorytmy zostały dokładnie omówione w książce Profesora S.T. Wierchonia [20].

3. Metodyka określania cech geometrycznych implantu ortopedycznego

Zastosowana w pracy metodyka określania cech geometrycznych implantu ortopedycznego obejmuje:

- Metodę wielokryterialnej optymalizacji cech geometrycznych implantu ortopedycznego z wykorzystaniem algorytmów immunologicznych:
 - z zastosowaniem funkcji celu,
 - z zastosowaniem metody *Pareto*.
- Metodę opracowania modelu kości stawu kolanowego.
- Metodę oceny wyników przez ekspertów bazującą na formularzach.

Zastosowany implant ortopedyczny ma być wykonany z tworzywa resorbowalnego np. polilaktydu LATI Latigea B01 F1 Bio-Polymer [14]. Postać implantu to wydrążony walec z otworami bocznymi w kształcie części wspólnej ostrosłupa i płaszcza walca rys. 1.



Rys. 1. Przykładowa postać geometryczna implantu [14]

Wymiary gabarytowe implantu to:

- $L = 40$ mm
- $d_z = 11$ mm
- $d_w = 9$ mm

Wektor zmiennych decyzyjnych:

$$x = [D \ B \ Odld \ Thxy]$$

D – długość otworu przelotowego na powierzchni implantu wzdłuż osi z.

B – szerokość otworu przelotowego

Odld – odległość między otworami

Thxy – kąt, o jaki otwory przelotowe w kolejnym rzędzie są przesunięte względem rzędu poprzedniego

Zadane ograniczenia:

$$D \in [0,5; 3] \text{ mm,}$$

$$B \in [1; 1,7] \text{ mm,}$$

$$Odld \in [0,1; 10] \text{ mm,}$$

$$Thxy \in [0; 30]^\circ.$$

Funkcję celu zdefiniowano w następujący sposób:

$$\min F(x) = w_1(f_1(x)) + w_2(f_2(x))$$

1 - parametry związane z własnościami wytrzymałościowymi;

2 - parametry związane z perfuzją krwi

Kryteria oceny koncepcji to:

Optymalne wykorzystanie tworzywa - dobór takiej konstrukcji implantu, aby naprężenia kryterialne były jak najbardziej zbliżone do naprężeń dopuszczalnych:

$$f_1 = \left(\frac{\text{Naprężenia dopuszczalne}}{\text{Naprężenia kryterialne}} \right)^2$$

Naprężenia według hipotezy Hubera-Misesa.

Optymalne nasączenie przeszczepu krwią.

Jeżeli wartość prędkości obliczonej jest mniejsza od określonej średniej prędkości cieczy, to:

$$f_2 = \left(\frac{\text{Ciśnienie zadane}}{\text{Ciśnienie obliczone}} \right)^2$$

W przeciwnym przypadku:

$$f_2 = \left(\frac{\text{Ciśnienie obliczone}}{\text{Ciśnienie zadane}} \right)^2$$

3.1. Metoda opracowania modelu kości udowej i piszczelowej

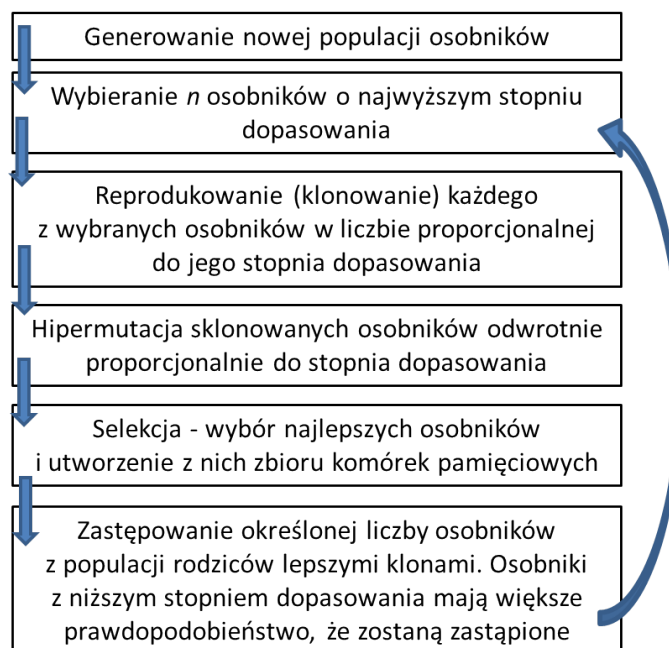
Metodę uzyskania modelu kości udowej przedstawiono na poniższym rysunku.



Rys. 2. Metoda uzyskania modelu kości udowej [14]

3.2. Metoda optymalizacji wielokryterialnej z użyciem algorytmu immunologicznego

W niniejszej pracy wykorzystano algorytm selekcji klonalnej. Zastosowano również dwa różne podejścia, jeśli chodzi o krok selekcji. W jednym przypadku określono funkcję celu - jako sumę ważoną składników wyznaczonych dla kryterium wytrzymałościowego i przepływu, w drugim określono rozwiązania *Pareto*-optymalne.



Rys. 3. Ogólny algorytm zastosowanego systemu immunologicznego [14]

3.3. Metoda oceny wyników przez ekspertów bazująca na formularzach

W celu weryfikacji metody optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu immunologicznego opracowano bazującą na formularzach metodę oceny wyników przez ekspertów. Specjalistom przekazano ankiety, w których znajdowały się trzy różne modele uzyskane na drodze optymalizacji cech geometrycznych implantu.

Przygotowano dwie różniące się ankiety. Pierwsza z nich została przeznaczona dla inżynierów, druga dla lekarzy.

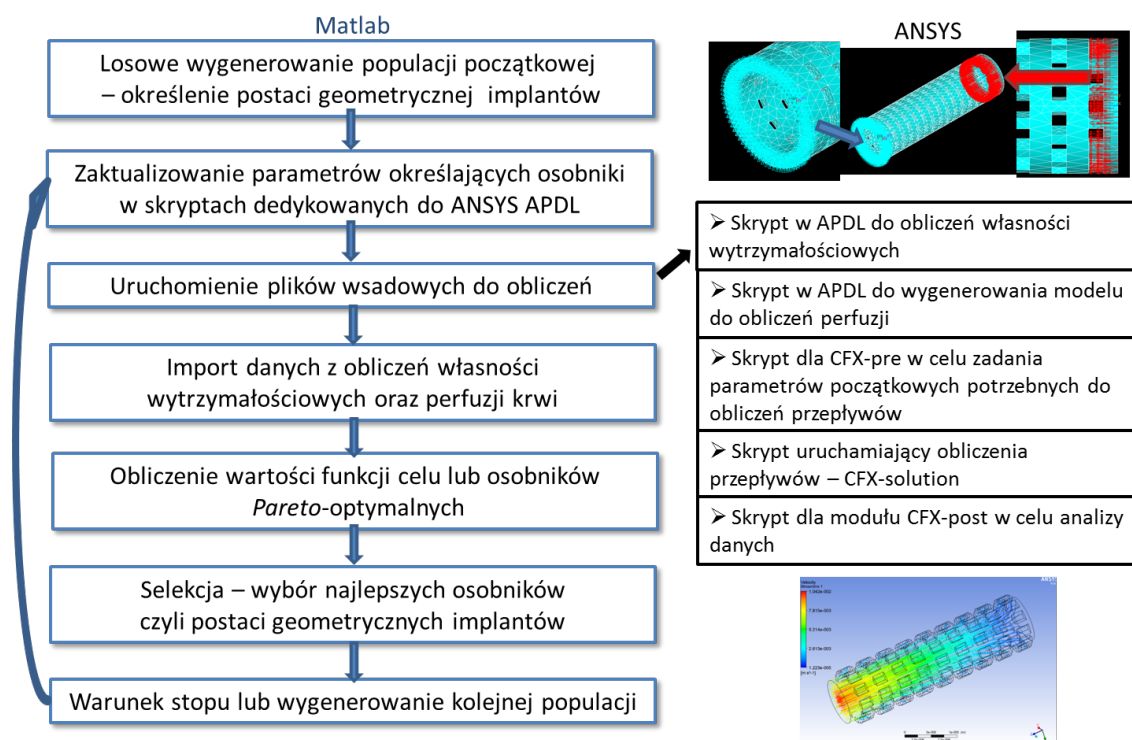
Ankieta skierowana do inżynierów miała na celu przede wszystkim poznanie opinii specjalistów pod względem wytworzenia implantu, trudności skonstruowania formy, ceny oraz czasu jego wykonania.

Ankieta skierowana do lekarzy miała na celu głównie poznanie opinii pod względem praktycznego zastosowania opisanych implantów. W ankiecie tej zwrócono przede wszystkim uwagę na zastosowanie implantów w ciele człowieka, na ich implantację oraz funkcjonalność.

4. Budowa środowiska badawczego

W celu zbudowania środowiska obliczeniowego do przeprowadzenia optymalizacji wielokryterialnej badanego rozwiązania wykorzystano dwa pakiety oprogramowania.

Środowisko programowe składa się z programu nadrzędnego w MATLABie® realizującego algorytm immunologiczny, z modułu obliczającego naprężenia w implantach (w oprogramowaniu Ansys Mechanical APDL) i z modułu obliczającego przepływy (CFX).



Rys.4. Ogólny algorytm zastosowanego systemu immunologicznego [14]

5. Weryfikacja i walidacja opracowanej metodyki

Weryfikacja metodyki polegała na wykonaniu obliczeń w środowisku badawczym, z wykorzystaniem funkcji celu i metody *Pareto* oraz porównanie wyników uzyskanych z zastosowaniem obydwu metod.

Natomiast walidacja metodyki została wykonana w dwóch krokach:

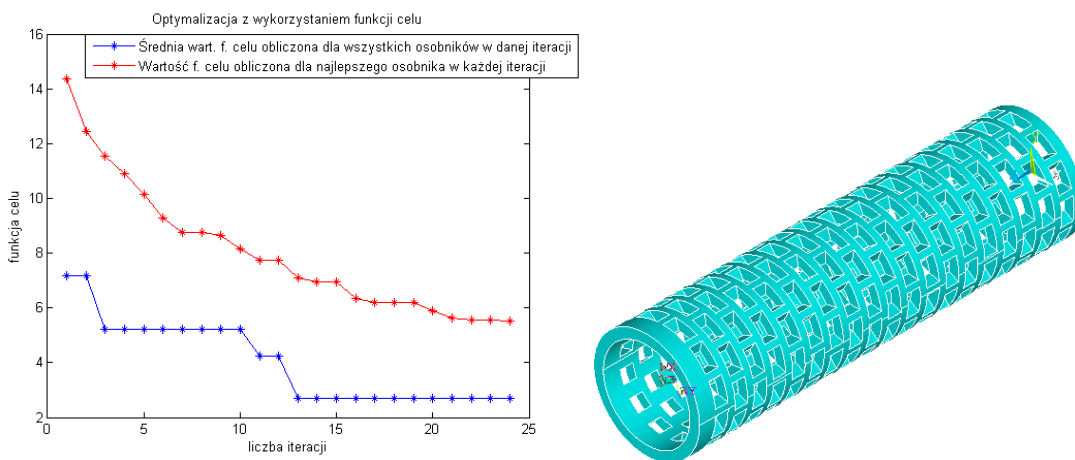
- Wykonanie obliczeń wytrzymałościowych implantu:
 - weryfikacja wytrzymałości implantu podczas normalnego funkcjonowania pacjenta po zabiegu,
 - weryfikacja wytrzymałości implantu podczas operacji rekonstrukcji więzadła krzyżowego przedniego.
- Ocena wyników rozwiązań postaci geometrycznych implantów bazująca na formularzach.

Dane wejściowe przeprowadzonego eksperymentu:

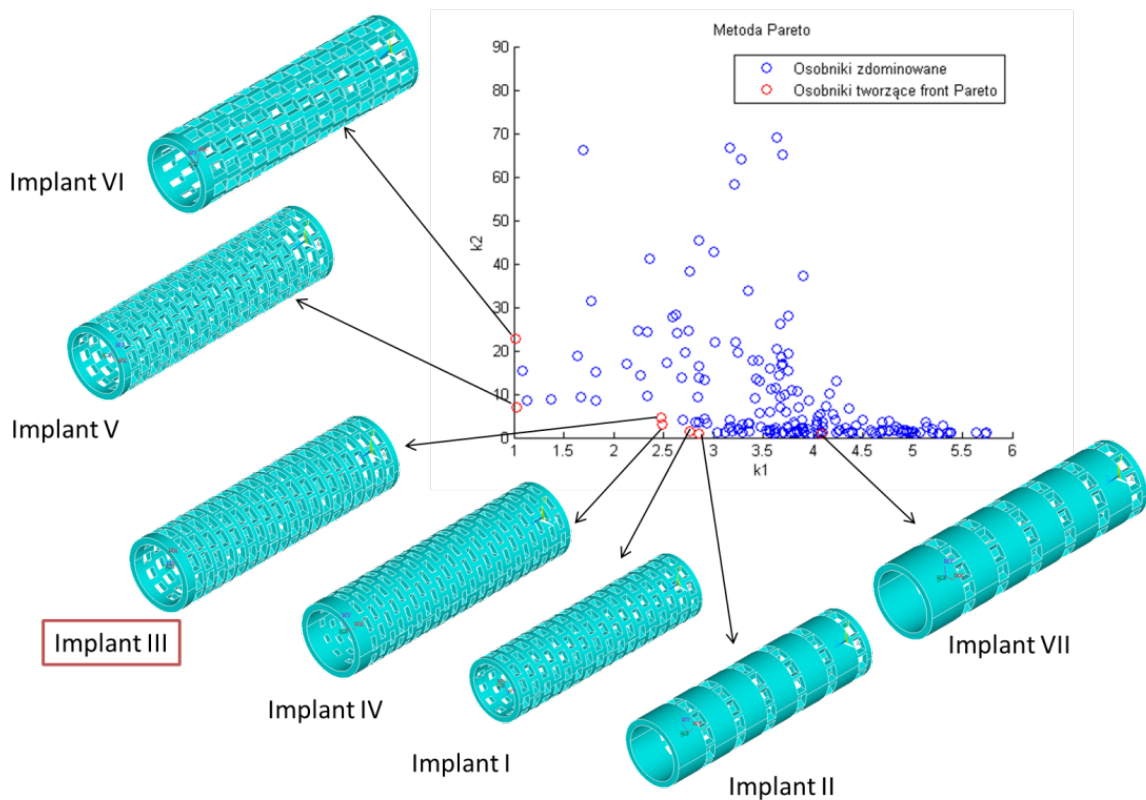
- Wielkość populacji wejściowej - 15 osobników generowanych losowo;
- Prawdopodobieństwo mutacji - 0,7;
- Warunek zatrzymania:
 - maksymalna liczba iteracji – 100,
 - przypadek, gdy wynik funkcji celu w danej iteracji jest większy od średniej bieżącej z ostatnich 10 iteracji;
- Liczba klonów (jeżeli występuje mutacja): 8 dla najlepszego osobnika i 5 dla pozostałych.

5.1. Wyniki optymalizacji

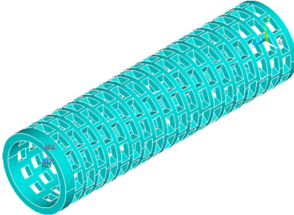
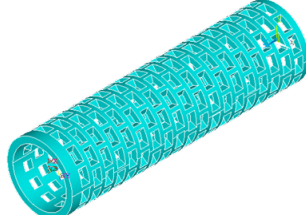
Wyniki optymalizacji z wykorzystaniem funkcji celu (rys. 5.) i metody *Pareto* (rys. 6.) oraz ich porównanie (rys. 7.) przedstawiono na poniższych rysunkach.



Rys. 5. Wyniki optymalizacji z wykorzystaniem funkcji celu [14]



Rys.6. Wyniki optymalizacji z wykorzystaniem metody *Pareto* [14]

Metoda	Pareto (FPIII)	F. Celu (FC)
<i>D</i> - długość otworu w pł. implantu po osi <i>z</i>	1,3	1,3
<i>B</i> - wielkość otworu w pł. implantu	1,7	1,6
<i>O_dl_d</i> - odległość między otworami	0,7	0,7
<i>Th_{xy}</i> - kąt, o jaki kolejny rząd otworów ma być przesunięty względem poprzedniego	7	11
Postać geometryczna implantu		
Czas obliczeń	~ 520 h	~ 140 h

Rys. 7. Porównanie wyników uzyskanych z zastosowaniem obydwu metod [14]

Obydwe opisane metody pozwoliły na uzyskanie bardzo podobnych wyników optymalizacji. Powyższe przykłady obrazują, że pomimo wyłonienia różnych zestawów cech geometrycznych przez algorytmy immunologiczne, modele implantów są bardzo do siebie zbliżone pod względem wizualnym. Oznacza to, że z wyłonionych osobników można wybrać implant najlepszy pod względem innych kryteriów.

5.3. Weryfikacja wytrzymałościowa rozwiązania optymalnego

Implant otrzymany z procesu optymalizacji z wykorzystaniem funkcji celu poddano kolejnym testom w postaci badań wytrzymałościowych [14].

Pierwsza weryfikacja miała na celu ocenienie czy implant nie ulegnie złamaniu lub znacznej deformacji podczas przeciągania przez niego przeszczepu w czasie operacji rekonstrukcji więzadła krzyżowego przedniego.

Druga weryfikacja polegała na umocowaniu modelu implantu w kości udowej i obciążeniu jej siłą odpowiadającą obciążeniu kończyny dolnej człowieka w pozycji stojącej na jednej nodze.

5.4. Ankietyzacja wśród specjalistów

Analizując powyższe przykłady, można zaobserwować, że otrzymano satysfakcjonujące wyniki pod względem wybranych przez autorkę kryteriów.

Jednak wyniki te powinny być zweryfikowane pod kątem sposobu i kosztu wytwarzania oraz skonsultowane z lekarzami chirurgami i ortopedami.

W tym celu utworzono dwie ankiety skierowane do dwóch grup specjalistów - inżynierów oraz lekarzy.

Ankiety wypełniło niewielu specjalistów, dlatego ten fragment badań weryfikacyjnych metodyki ma jedynie charakter ilustracji możliwego sposobu postępowania, który może być wykorzystany w przyszłości.

Analizując ankiety wypełnione przez inżynierów, można wyciągnąć wnioski, że pod względem technologii wytworzenia implanty te nie różnią się znacząco. Wszystkie będą wymagać bardzo skomplikowanej formy, której demontaż nie będzie prosty, a czas wykonania implantu będzie długi. Natomiast implanty nie będą wymagające pod względem postaci systemu kanałów doprowadzania tworzywa, liczby miejsc wtrysku czy rozmieszczenia kanałów chłodzących.

W opinii lekarzy, najlepsza postać geometryczna została ujęta na implancie uzyskanym z optymalizacji wielokryterialnej przy użyciu funkcji celu. Dodatkowo w uwagach w ankiecie dodano, że w implancie wybranym z osobników zdominowanych, w metodzie *Pareto*, na pewno nie zostanie zachowana stosowna równowaga pomiędzy narastaniem nowej tkanki kostnej, a resorpcją implantu, co go dyskwalifikuje.

Wniosek ten potwierdził poprawność wyników optymalizacji, ponieważ to rozwiązanie zostało również odrzucone przez zastosowane algorytmy [14].

6. Podsumowanie

Przedmiotem badań opisanych w artykule było opracowanie metodyki wielokryterialnej optymalizacji cech geometrycznych implantów ortopedycznych, z uwzględnieniem dwóch odrębnych kryteriów. Pierwszym kryterium było maksymalne wykorzystanie materiału ze względu na jego własności wytrzymałościowe. Drugim kryterium było odpowiednie nasączenie przeszczepu umiejscowionego w resorbowalnym implancie, tak aby wspomóc jego wgajanie.

W pracy porównano dwie metody optymalizacji wielokryterialnej. Pierwsza metoda wykorzystywała zadaną funkcję celu do wyłonienia optymalnego rozwiązania, druga metoda bazowała na wygenerowaniu *Pareto*-optymalnych rozwiązań tworzących tzw. front *Pareto*, a następnie wyborze optymalnego rozwiązania.

Po przeprowadzeniu badań można sformułować następujące wnioski:

- Opracowano metodykę optymalizacji wielokryterialnej cech geometrycznych wraz ze zbudowaniem w pełni automatycznego środowiska do jej wykonania.
- Proces optymalizacji wielokryterialnej powiódł się i zostały wyłonione optymalne (według zadanych kryteriów) cechy geometryczne implantu ortopedycznego do rekonstrukcji więzadła krzyżowo przedniego w stawie kolanowym.

- Implementacja algorytmu optymalizacji wielokryterialnej w środowisku MATLAB® znacznie ułatwiła przebieg procesu optymalizacji.
- Zastosowanie plików wsadowych przeznaczonych dla obliczeń wytrzymałościowych i perfuzji krwi pozwoliło na zautomatyzowanie procesu optymalizacji.
- Zastosowanie metody *Pareto* pozwala na większy wybór *Pareto*-optymalnych rozwiązań, które można zastosować, jednak nie daje zdecydowanie lepszego wyniku, pomimo przeszukania znacznie większej liczby rozwiązań.
- Optymalizacja z wykorzystaniem funkcji celu pozwala na uzyskanie porównywalnych wyników z optymalizacją z zastosowaniem metody *Pareto*, jednakże czas obliczeń w pierwszym z tych przypadków jest znacznie krótszy.
- Bardzo ważnym krokiem w optymalizacji jest odpowiedni dobór kryteriów i nadanie im wag.
- Weryfikacja cech geometrycznych implantu po zaimplementowaniu go w modelu kości udowej potwierdziła możliwość zastosowania takiego rozwiązania.
- Weryfikacja modelu implantu wykazała, że nie ulegnie on zniszczeniu podczas implantacji przeszczepu.

Podstawowym wnioskiem płynącym z wykonanych badań jest potwierdzenie założonej tezy mówiącej, że optymalizacja wielokryterialna z wykorzystaniem: algorytmu immunologicznego, funkcji celu i metody *Pareto*, pozwala na wybór cech geometrycznych implantu, która umożliwi optymalną perfuzję krwi przy jednoczesnym zapewnieniu optymalnych własności wytrzymałościowych implantu.

Literatura

- [1] Al-Anzi F. S. i Allahverdi A.: An artificial immune system heuristic for twostage multi-machine assembly scheduling problem to minimize total completion time. *Journal of Manufacturing Systems* 32: pp. 825-830, 2013.
- [2] Bereta M. i Burczyński T.: Evolving ensembles of linear classifiers by means of clonal selection algorithm. *Control And Cybernetics* 39: pp. 325–342, 2010.
- [3] Bochenek A. i Reicher M.: *Anatomia człowieka tom I*. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2010.
- [4] Burnet F. M.: *The Clonal Selection Theory of Acquired Immunity*. Vanderbilt University, Nashville, TN, 1959.
- [5] de Castro L. i Zuben F. V.: Immune and neural network models: Theoretical and empirical comparisons. *International Journal on Computational Intelligence and Applications* 1(3): pp. 239–257, 2001.
- [6] de Castro L. i Zuben F. V.: Learning and optimization using the clonal selection principle. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Special Issue on Artificial Immune Systems* 6: pp. 239–251, 2002.
- [7] Długosz A.: *Optymalizacja wielokryterialna w problemach pól sprzężonych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
- [8] Górecki A.: *Rozwój chirurgii kolana w Polsce*. Ortopedia Traumatologia Rehabilitacja© MEDSPORTPRESS, PTOiTR, 2013.
- [9] Kuchta M. i Sokołowski A.: *Sztuczne systemy immunologiczne: Wybrane zastosowania w zagadnieniach diagnostycznych*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
- [10] Kuś W. M.: *Urazowe uszkodzenia kolana*. Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, 1984.

- [11] MatWeb: Matweb material property data. <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4a4781f0791445a5aff417ed6f778737&ckck=1>, 2016.
- [12] Miyata K., Yasuda K., Kondo E., Nakano H., Kimura S. i Hara N.: Biomechanical comparisons of anterior cruciate ligament: reconstruction procedures with flexor tendon graft. *Journal of Orthopaedic Science* 5: pp. 585–592, 2000.
- [13] Mrówczyńska B.: Multicriteria vehicle routing problem solved by artificial immune system. *Transport Problems* 10: pp. 141–152, 2015.
- [14] Muzalewska M.: Metodyka wielokryterialnej optymalizacji cech geometrycznych implantu ortopedycznego do rekonstrukcji więzadła krzyżowego przedniego. Rozprawa doktorska. Promotor: prof. dr hab. W. Moczulski, 2017.
- [15] Pasierbiński A. i Jarzabek A.: Biomechanika więzadeł krzyżowych. *Acta Clinica* 1/4: pp. 284–293, 2001.
- [16] Perelson A. S.: Applications of optimal control theory to immunology. *Recent Developments in Variable Structure Systems, Economics and Biology. The series Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* 162: pp. 272–287, 1978.
- [17] Poteralski A.: Optymalizacja immunologiczna układów mechanicznych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2015.
- [18] Tarnowski W.: Optymalizacja i polioptymalizacja w technice. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2011.
- [19] Tiffert M. i Barszcz J.: Rehabilitacja stawu kolanowego po rekonstrukcji więzadła krzyżowego przedniego w okresie powrotu funkcji - doświadczenia własne. Centrum-Synergia, 2011.
- [20] Wierzchoń S. T.: *Sztuczne systemy immunologiczne. Teoria i zastosowania*. EXIT, 2001.

Sylwester OLESZEK¹, Marek WYLEŻOŁ²

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) sylwester.oleszek@gmail.com

2) marek.wylezol@polsl.pl

PODSTAWY METODY KONFIGURACJI NACZYŃ SZKLANYCH

1. Wstęp

Współcześnie naczynia szklane są konstruowane, podobnie jak i inne obiekty techniczne, z użyciem zaawansowanych systemów kasy CAx [1] i ich narzędzi programowych. Zapis ich konstrukcji dokonywany jest głównie za pomocą trójwymiarowych modeli wirtualnych [5].

Jedną z cech charakterystycznych naczyń szklanych jest ich ogromna popularność w wielu gałęziach gospodarki. Powoduje to, że często odbiorca naczyń, który zwykle jest równocześnie producentem jego zawartości, bardzo zależy na odpowiednim wyeksponowaniu swego produktu (naczynia z zawartością).

Podczas realizacji procesu modelowania naczyń, inżynierowie nadają modelom odpowiednie cechy konstrukcyjne, uzyskując pożądany kształt naczyń. To postępowanie posiada pewien brak: na tym etapie inżynier nie jest w stanie ocenić wszystkich pożądanych cech modelowanego naczyń, których świadomość i potrzebę odczuwa głównie sam zamawiający. Zamawiający chce też, aby m.in. jego docelowy produkt odpowiednio prezentował się w otoczeniu innych naczyń, np. na wspólnej witrynie sklepowej. Tak więc na etapie wizualnego porównywania własnego produktu z produktami konkurencyjnymi nie zawsze jest konieczna duża dokładność postaciowo-wymiarowa modelu.

Często też zachodzi potrzeba porównania modelowanego naczyń z naczyniami już istniejącymi oraz w ich „naturalnym” otoczeniu. Wiąże się to też często z potrzebą szybkiego wygenerowania modelu 3D naczyń szklanych (niekoniecznie z docelową dokładnością) przez osoby, niebędące konstruktorami (a więc poza biurem konstrukcyjnym); np. podczas rozmów pomiędzy zamawiającym a docelowym producentem.

Klasyczny proces konstrukcyjny [2], wspomagany za pomocą współczesnych systemów klasy CAx nie umożliwia tego typu działań.

Zachodzi więc potrzeba realizacji takiego procesu modelowania naczyń szklanych, aby móc dokonać porównania modelu wirtualnego z obiektami rzeczywistymi oraz aby realizacja tego procesu nie musiała odbywać się w miejscu pracy projektanta.

Z pomocą przychodzą tu metody i techniki poszerzonej rzeczywistości [3,4] oraz urządzenia mobilne wraz z ich systemami operacyjnymi.

Kierując się takimi przesłankami opracowano metodę wspomagania projektowania naczyń szklanych z zastosowaniem ich konfiguracji w środowisku poszerzonej rzeczywistości. Podstawy obmyślanej metody przedstawiono w dalszej części artykułu.

2. Założenia metody

Opracowanie proponowanej metody konfiguracji naczyń szklanych związane jest z potrzebą przedefiniowania istniejącego procesu konstrukcyjnego i rozwiązania wielu problemów, które w tym procesie istnieją.

Tak więc proponowana metoda została oparta na czterech postulatach:

1. konfigurowanie produktu (naczynia szklanego) musi być możliwe w odseparowaniu od rutynowych konstrukcyjnych działań inżynierskich,
2. proces projektowania musi być realizowany partycypacyjnie i musi być skoncentrowany na końcowym użytkowniku,
3. proces uzyskiwania modeli wirtualnych naczyń należy realizować z użyciem tzw. konfiguratorów produktowych, ale powiązanych programowo z systemami CAx (konfigurowany model powstaje równolegle w środowisku danego systemu klasy CAx, jako model w pełni parametryczny i możliwy do dalszej edycji)
4. musi być możliwa weryfikacja modelu wirtualnego na tle świata realnego, np. w otoczeniu istniejących naczyń (z użyciem urządzeń przenośnych, jak smartfon czy tablet).

W kontekście implementacji opracowanej metody w jej utylitarnym zastosowaniu wszystkie te cztery postulaty są ze sobą mocno powiązane i niezbędne do jej realizacji (za pomocą osobnego systemu informatycznego).

U podstaw opracowanej metody znajduje się założenie, że w ogólnym ujęciu proces opracowywania nowego projektu naczynia szklanego mogą być zaangażowane dwie grupy uczestników:

- eksperci z dziedziny konstrukcji, czyli osoby, które bezpośrednio zaangażowane są w proces konstrukcyjny - są to głównie konstruktorzy,
- specjaliści do spraw rozwoju produktu, specjaliści z dziedziny marketingu itp. - osoby, które nie są bezpośrednio zaangażowane w proces konstrukcyjny, lecz opiniują i akceptują wyniki tego procesu.

2.1 Konfiguracja produktu w odseparowaniu od rutynowych konstrukcyjnych działań inżynierskich

Konstruktorów cechuje biegłe posługiwanie się zaawansowanymi narzędziami systemów klasy CAx. Narzędzia te mają bogate możliwości z zakresu modelowania 3D, opracowywania szczegółowych analiz, symulacji oraz wizualizacji, a finalnie również sporządzania dokumentacji 2D. Dzięki możliwości używania takich zaawansowanych narzędzi, konstruktorzy posiadają niezwykle szczegółową i specjalistyczną wiedzę na temat opracowywanego projektu - na temat struktury jego postaci geometrycznej oraz szczegółów związanych z wymiarami gabarytowymi, jak również ich wpływem na proces produkcyjny lub nawet na docelowe użytkowanie. Sprawia to jednak, że najczęściej posługują się pomiędzy sobą terminami oraz językiem, które związane są przedmiotowo z oprogramowaniem, które stosują w swojej codziennej pracy oraz często również z konkretną branżą.

Najczęściej przywiązanie do codziennego środowiska jest tak wielkie, że eksperci tworzą swój własny żargon będący wynikiem m.in. używanego oprogramowania oraz branży. Z punktu widzenia ich codziennej pracy jest to ogromna zaleta, gdyż mówią językiem konstruowania, który bogaty jest w techniczne sformułowania, przeplatany np. niuansami związanymi z drzewem topologicznym systemu CAx, jego narzędziami, funkcjami, wzorami itd., lecz wszystko to sprawia, że dla ludzi spoza ich środowiska jest to spore utrudnienie w zrozumieniu i tak często niełatwych zagadnień.

Dla uczestników procesu opracowywania projektu nowego produktu, którzy nie są bezpośrednio związani z konstruowaniem oraz o wykształceniu innym, niż techniczne - niuanse związane z analizami, symulacjami, strukturą postaci geometrycznej, czy też szczegółowymi wartościami wymiarów gabarytowych, mimo iż czasami ciekawe, finalnie są zupełnie nieistotne. Co więcej, otrzymując dużą ilość szczegółowych danych, bez wskazania istotnych dla nich elementów, nie są w stanie poprawnie ocenić i zweryfikować, a finalnie walidować projektu.

Podczas procesu konfiguracji przyszłego produktu z użyciem systemu będącego implementacją proponowanej metody, dzięki odseparowaniu wspomnianej części działań

inżynierskich, zamawiający będzie miał możliwość lepszego skoncentrowania się na istotnych dla niego elementach związanych z powstaniem modelu wirtualnego. Mimo iż wszystkie złożone elementy tego procesu będą obecne i ich rola jest równie ważna, nie będą one prezentowane na warstwie interfejsu urządzenia mobilnego, którego będzie używał zamawiający, wykonując konfigurację modelu naczynia.

2.2 Projektowanie partycypacyjne oraz skoncentrowane na użytkowniku

Współpraca w zespołach projektowych składających się zarówno z ekspertów z dziedziny konstrukcji oraz ze specjalistów z dziedziny rozwoju oraz wprowadzania nowych produktów na rynek jest konieczna. Niestety, często odbywa się ona w bardzo ograniczonym zakresie lub za pośrednictwem osób pośrednich. W wielu firmach, żeby usprawnić komunikację pierwszy kontakt zamawiającego nowy wzór naczynia odbywa się z pracownikiem działu sprzedaży lub marketingu dostawcy. Następuje wtedy przekazanie wstępnych wymagań do projektu.

Następnie dane te są przekazywane do oceny przez ekspertów z dziedziny konstrukcji i jeżeli zostaną zaakceptowane, stają się podstawą do rozpoczęcia działań konstrukcyjnych.

Niemniej jednak pośrednia forma komunikacji sprawdza się tylko i wyłącznie w przypadku niezbyt skomplikowanych projektów lub niezbyt wymagających klientów.

Najbardziej krytycznymi momentami w procesie konstrukcyjnym z punktu widzenia współpracy pomiędzy zamawiającym oraz wykonawcą są:

- przekazanie danych wejściowych do projektu,
- przekazywanie uwag dotyczących opracowanych propozycji.

Na obydwa te elementy ogromny wpływ ma jakość komunikacji pomiędzy zamawiającym nowy wzór naczynia oraz wykonawcą, w tej sytuacji reprezentowanym przez konstruktora (lub reprezentującego go innego pracownika wykonawcy). Poprawne zebranie i przekazanie do konstruktora właściwych danych wejściowych do projektu sprawia, że będzie on w stanie znacząco zbliżyć się do oczekiwań zamawiającego (a w idealnym przypadku - uzyskać jego akceptację). Jeżeli pierwsza propozycja wymaga wprowadzenia korekt lub zmian (wynikających np. ze zmiany wymagań), to - podobnie jak w przypadku danych wejściowych - poprawne ich przekazanie przez zamawiającego i poprawne zrozumienie ich przez konstruktora będzie miało ogromny wpływ na liczbę kolejnych wersji, które doprowadzą do uzyskania finalnej akceptacji.

Projektowanie partycypacyjne oraz skoncentrowane na użytkowniku zakłada aktywny udział oraz pełne zaangażowanie zamawiającego produkt (lub nawet odbiorcy końcowego) w proces jego projektowania (tu: konfiguracji). Umożliwia to bezpośrednie zastosowanie oraz sprawdzenie danych wejściowych, a z uwagi na fakt, że zamawiający własnoręcznie będzie tworzył nowy model 3D naczynia, ma większą pewność, że jego potrzeby zostały zaspokojone.

Dodatkowo, w trakcie pracy nad modelem ma możliwość uczenia się produktu (który nie posiada jeszcze swojej fizycznej reprezentacji) oraz procesu jego projektowania. Z racji tego, że projektowanie partycypacyjne odbywa się najczęściej z udziałem przedstawiciela dostawcy, ma on możliwość - poprzez rozmowę i obserwację - w większym stopniu zrozumieć potrzeby zamawiającego.

2.3 Konfigurator produktu

W przypadku trudnych projektów oraz wymagających klientów, aby uzyskać finalną akceptację i wdrożyć nowy wzór naczynia (które w pełni zaspokoili potrzeby zamawiającego) do produkcji, najczęściej konieczne jest opracowanie wielu wersji modeli 3D (liczba ta może dochodzić nawet do kilkudziesięciu), często konieczne jest również

omówienie propozycji w multidyscyplinarnym zespole projektowym oraz utworzenie fizycznych prototypów.

Wszystkie te działania znacząco wydłużają czas wdrożenia nowego naczynia do produkcji oraz wprowadzenia go na rynek, jak również sprawiają, że proces ten jest znacząco droższy.

Stosując proponowaną metodę konfiguracji produktów możliwe stanie się szybkie wygenerowanie wielu, znacząco różniących się od siebie wersji modelowych, które mogą być użyte jako pełnoprawne projekty i mogą zostać wdrożone do produkcji w dużo krótszym czasie. Natomiast z uwagi na fakt, że w procesie automatyzacji procesu modelowania zostały uwzględnione (ale dla użytkownika ukryte) elementy wiedzy inżynierskiej reprezentowanej za pomocą reguł (dotyczące np. możliwości i ograniczeń procesu produkcyjnego), przewiduje się, że ryzyko wystąpienia poważnych pomyłek w konstrukcji naczynia szklanego zostanie poważnie zminimalizowane.

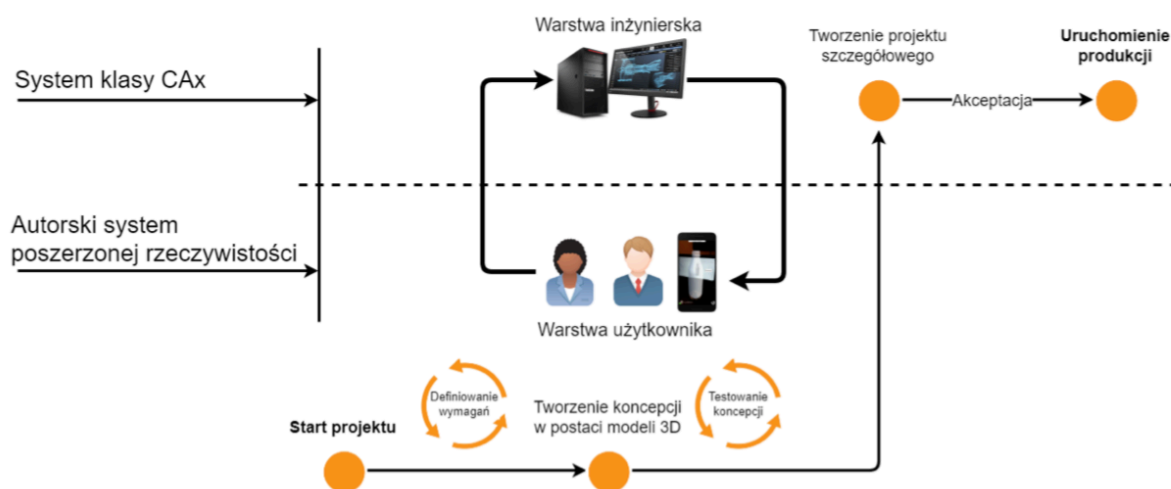
2.4 Możliwość sprawdzenia modelu 3D w realnym świecie

Bardzo ważnym aspektem jest również sposób oceny projektu - dla osób zajmujących się wprowadzeniem nowego wzoru naczynia na rynek istotne są zupełnie inne kryteria jego oceny, niż dla osoby, która wdraża ten sam wzór naczynia do produkcji.

Może zaistnieć nawet taka sytuacja (i często tak jest), że wzór naczynia, który z marketingowego punktu widzenia spotkałby się z idealnym przyjęciem na rynku, jest bardzo trudny lub wręcz niemożliwy do wyprodukowania. Istotne jest więc wtedy wspólne wypracowanie kompromisu pomiędzy tym co „się sprzeda”, a tym co można wytworzyć racjonalnymi środkami przy obecnych możliwościach produkcyjnych.

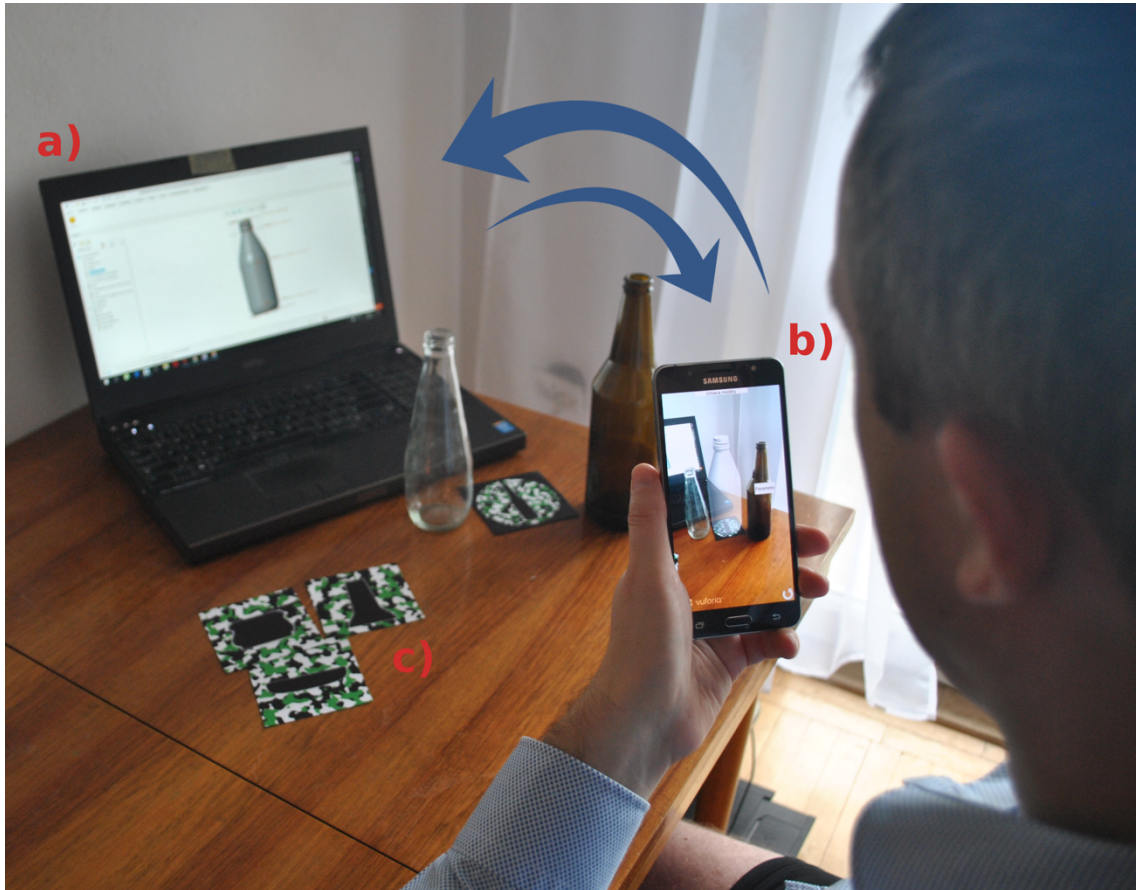
Stosując techniki i metody rzeczywistości poszerzonej, zamawiający może wykonywać działania projektowe związane z utworzeniem modelu 3D naczynia w jego docelowym kontekście, a więc np. na półce sklepowej lub w otoczeniu innych, istniejących naczyń. Ważny jest tutaj również fakt, że aby działania te mogły być wykonane, muszą być realizowane na urządzeniu mobilnym, którym może być np. smartfon lub tablet. Pozwala to przenieść działania konstrukcyjne z biura projektanta do dowolnej innej lokalizacji.

Schemat przedstawiający ideę opisaną metodą został pokazany na rys. 1.



Rys. 1 Schemat przedstawiający ideę metody konfiguracji naczyń szklanych z użyciem proponowanego systemu poszerzonej rzeczywistości

Natomiast rys. 2 przedstawia wybraną „chwilę” procesu konfiguracji modelu naczynia szklanego z użyciem smartfonu i zaimplementowanego na nim systemu poszerzonej rzeczywistości (tematyka związana z omówieniem systemu konfigurowania naczyń szklanych z użyciem poszerzonej rzeczywistości stanowi odrębne zagadnienie, nieporuszane w niniejszym artykule).



Rys. 2 Przykład realizacji metody konfiguracji naczyń szklanych z użyciem systemu poszerzonej rzeczywistości zaimplementowanym na urządzeniu przenośnym, a) komputer, b) smartfon, c) znaczniki umożliwiające pozycjonowanie modelu wirtualnego

3. Uwagi końcowe

Reasumując, za pomocą proponowanej metody zamawiający ma możliwość własnoręcznego utworzenia nowego modelu 3D w środowisku poszerzonej rzeczywistości, co daje możliwość jego reprezentowania w docelowym kontekście, w jakim będzie znajdował się finalny produkt.

W trakcie procesu konstrukcyjnego zamawiający może dokonywać oceny powstającego modelu 3D oraz wprowadzać korekty, jak również generować kolejne jego wersje. Zaś dzięki mobilności systemu konfiguracyjnego, wspomniane działania mogą być wykonywane w dowolnym miejscu.

Wprowadzone mechanizmy konfiguracji umożliwiają równoległe generowanie dokładnych danych konstrukcyjnych (w środowisku systemu klasy CAx), co sprawia, że projektowany przez zamawiającego model 3D nie musi być odtwarzany od podstaw przez konstruktora, lecz po zakończeniu działań zamawiającego i jego akceptacji, może zostać bezpośrednio wdrożony do produkcji (jego szczegółowy parametryczny model 3D powstanie automatycznie w środowisku systemu CAx).

Reguły sprawdzające zaimplementowane w konfiguratorze oraz dane prezentowane w interfejsie użytkownika ułatwiają utworzenie modelu 3D, który będzie poprawny technologicznie, a więc nie będzie wymagał zbyt dużych korekt przed wdrożeniem do produkcji.

Proponowana metoda została zaprezentowana w zastosowaniu do modelowania (konfiguracji) naczyń z uwagi na zainteresowania i doświadczenie autorów, z którym związana jest świadomość problematyki branży, ale może mieć również zastosowanie w innych branżach (np. w meblarstwie).

Literatura

- [1] Chlebus, E.: Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji. Wyd. Naukowo-Techniczne, 2000.
- [2] Dietrych J.: *System i konstrukcja*, WNT, Warszawa, 1978
- [3] Grubert, J. and R. Grasset: *Augmented Reality for Android Application Development*. Packt Publishing, 2013
- [4] Januszka, M.: Zastosowanie technik poszerzonej rzeczywistości w cyfrowym prototypowaniu. *Mechanik* 83(8-9), str. 634-637, 2010.
- [5] Oleszek, S.: Parametryzacja wirtualnych modeli opakowań szklanych. *Mechanik* 88(5-6), str. 474-476, 2015.

Wawrzyniec PANFIL¹, Wojciech MOCZULSKI²

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) wawrzyniec.panfil@polsl.pl

2) wojciech.moczulski@polsl.pl

WIELOKRYTERIALNE METODY ALOKACJI ZADAŃ W INSPEKCYJNYCH SYSTEMACH WIELOROBOTOWYCH

1. Wstęp

Obecnie wiele obiektów użyteczności publicznej, zarówno zamkniętych jak i otwartych, wymaga ciągłego monitorowania lub szeroko zakrojonej kontroli. Sytuacja ta jest wynikiem głównie z coraz ostrzejszych wymogów dotyczących szeroko rozumianego bezpieczeństwa, które są konsekwencją rosnących zagrożeń przyjmujących coraz to nowsze formy. Źródła takich zagrożeń są zróżnicowane, jak wycieki instalacji chemicznych, niepożądane elementy na pasie startowym lotniska, pola minowe, niepożądane, a nawet wrogo nastawione osoby i wiele innych.

Prowadzenie wspomnianych działań przez ludzi jest zazwyczaj niebezpieczne, naraża bezpośrednio ich zdrowie, a nawet życie, ponadto wymaga znacznego czasu. Dlatego od wielu lat stosuje się roboty oraz ich grupy do realizacji takich zadań. Jako przykłady mogą służyć roboty używane do patrolowania granic [14], mapowania oraz rozbrajania pól minowych [9], prowadzenia inspekcji obszarów górniczych [18], monitorowania środowiska [3,25], inspekcji rurociągów używanych do transportu różnego rodzaju mediów (w tym zagrażających zdrowiu) [15,21], inspekcji zakładów przemysłowych [13], monitorowania znacznych obszarów otwartych [16,17,20], inteligentnego zapewnienia bezpieczeństwa obiektów zamkniętych [12], eksploracji powierzchni planet [1] lub w zastosowaniach wojskowych [2,27]. We wspomnianych zastosowaniach niejednokrotnie systemy wielorobotowe są bardziej wydajne w porównaniu z jednym robotem. Istotną rzeczą jest współpraca pomiędzy wieloma robotami, która pozwala na skuteczną realizację misji, co w praktyce oznacza wykonanie zadań w jak najkrótszym czasie i/lub zużywając przy tym jak najmniej energii.

2. Problem alokacji zadań w systemach wielorobotowych

W celu alokacji zadań w systemach wielorobotowych stosuje się wiele rozwiązań, z których można wyróżnić trzy główne podejścia [11,6,10,24]:

- Oparte o metody programowania liniowego [19],
- Stosujące behawioralne systemy sterowania, np. ALLIANCE [22], BLE [28],
- Bazujące na modelach ekonomicznych [7], np. aukcje [4,5,23] i negocjacje [8].

W powszechnie stosowanych aukcyjnych metodach alokacji zadań stosuje się mechanizm aukcjonowania oparty o Contract-Net Protocol [26], w którym zadania rozważane są wg kolejności pojawienia się w systemie i dla każdego kolejnego zadania poszukuje się najlepiej przystosowanego robota. Wydaje się, że w systemach wielorobotowych korzystne byłoby zastosowanie podejścia, w którym aukcjonuje się roboty - dla każdego kolejnego robota w kolejce robotów znajduje się najbardziej atrakcyjne dla niego zadanie. Pozwoliłoby to przede wszystkim na uniknięcie sytuacji, w których na skutek przydziału zadania wynikającego z jego pozycji w kolejce zadań robot musi

wykonać zadanie, które dla niego jest mniej korzystne (robot zużyje więcej energii, pokona większy dystans) niż inne zadanie, którego miejsce wykonania znajduje się bliżej robota, ale będące na dalszej pozycji w kolejce zadań.

Innym problemem zauważonym w działaniu metod aukcyjnych jest jednostronna ocena przystosowania robota do zadania - dla danego zadania poszukiwany jest robot mogący najlepiej (ze względu na czas wykonania, zużytą energię) te zadanie wykonać. Wydaje się, że jednoczesna dwustronna ocena przystosowania robota do zadania (dla zadania poszukuje się najlepiej przystosowanego robota, a dla robota najbardziej atrakcyjne dla niego zadanie) pozwoli na efektywniejsze (skróci się czas realizacji misji, zmniejszy się sumaryczne zużycie energii robotów, czy też sumaryczny przebieg przez nie dystans) realizowanie misji przez grupę robotów. Inspiracją propozycji jest lektura dotycząca portfelowych metod analizy rynku, a w szczególności metody stosującej macierz General Electric (macierz McKinseya) [29].

3. Założenia systemu

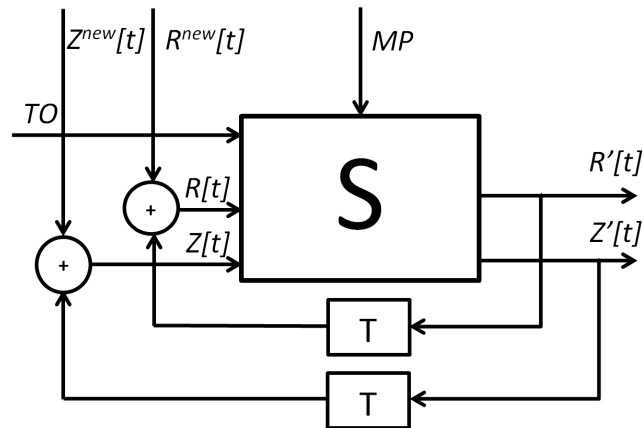
Niemożliwe jest zbudowanie uniwersalnego systemu, który pozwalałby na sterowanie wszystkimi znanymi rodzajami robotów wykonującymi dowolne zadania w dowolnym środowisku. Dlatego, przed zdefiniowaniem modelu systemu sterowania, należy przyjąć założenia, które w głównej mierze wynikają z funkcjonalności systemu, a także uwzględniają ograniczenia podsystemów robotów. Do najważniejszych założeń należą:

- Rozważa się zadania inspekcyjne typu monitorowanie terenu, detekcja szkodliwych gazów, usuwanie niebezpiecznych substancji, poszukiwanie osoby rannej, zbieranie niebezpiecznych ładunków,
- Grupa składa się z robotów heterogenicznych - różnicowanie robotów wynika z ich mobilności (napęd gąsienicowy/kołowy, różne prędkości maksymalne ruchu), posiadanych zasobów energetycznych, zużycia zasobów energetycznych. Ponadto zakłada się, że każdy z robotów wyposażony jest w urządzenia (zasoby inspekcyjne) umożliwiające wykonywanie zadań inspekcyjnych. Liczba i rodzaj tych zasobów określone są indywidualnie dla każdego robota,
- Roboty i zadania mogą pojawić się w systemie w dowolnej chwili, w dowolnej liczbie i dowolnego typu,
- System jest systemem scentralizowanym - istnieje jednostka centralna zarządzająca zbiorami robotów i zadań, która ma dostęp do wszystkich informacji zawartych w modelach robotów i zadań,
- Podstawą systemu alokacji zadań jest mechanizm aukcyjny,
- Środowisko działania robotów jest znane (znana jest mapa środowiska) i trójwymiarowe,
- Istnieje jeden zbiór zadań dla całej grupy robotów,
- Zadanie jest określone przez parametry: miejsce wystąpienia, szacowany czas wykonywania, potrzebne zasoby robotów (energetyczne, sprzętowe),
- Nie są rozważane problemy realizacji zadań - zakłada się, że zadanie jest zrealizowane, jeśli robot je wykonujący znajduje się w miejscu występowania zadania przez czas równy szacowanemu czasowi wykonywania zadania,
- Każde zadanie może być wykonane tylko przez jednego robota - nie zakłada się wykonywania zadań przez kilka robotów, których suma zasobów inspekcyjnych pozwala na wykonanie zadania.

4. Model systemu

W każdej chwili działania wejścia systemu (Rys.1) reprezentowane są za pomocą zależności:

$$C = (TO, R, Z, MP) \quad (1)$$



Rys. 1. Model systemu sterowania grupy robotów

Zależność ta jest zapisem formalnym aktualnej w każdej chwili konfiguracji misji. Ograniczona topografia przestrzeni TO zawiera informacje o węzłach, w których mogą znajdować się zadania oraz pomiędzy którymi przemieszczają się roboty. Zbiory robotów R i zadań Z podlegają zmianom wynikającym ze zdarzeń zachodzących w systemie. Parametry misji MP przechowują dane wykorzystywane przez metody aukcjonowania i przydziału zadań.

Działanie systemu polega na obsłudze zdarzeń, które mogą nastąpić:

1. Na zewnątrz systemu:
 - Uruchomienie systemu,
 - Aktywowanie zadania i/lub robota (*aktywacja*),
 - Zatrzymanie systemu,
2. Wewnątrz systemu:
 - Przydzielenie zadania (*przydział*),
 - Wykonanie zadania (*wykonanie*),
 - Porzucenie zadania (*porzucenie*),
 - Deaktywacja robota (*deaktywacja*).

Wymienione zdarzenia – poza uruchomieniem i zatrzymaniem systemu – są źródłem operacji na zbiorach robotów R i zadań Z . Zdarzenia *aktywacja*, *wykonanie* oraz *porzucenie* powodują uruchomienie procesów:

- aukcjonowania zadań,
a następnie
- alokacji zadań.

Proces alokacji może przebiegać na trzy sposoby, tj.:

1. Zgodnie z kolejką zadań – dla każdego kolejnego zadania przydzielany jest najlepiej dopasowany (względem kryterium energii lub czasu potrzebnych na wykonanie zadania) robot niezajęty,

2. Zgodnie z kolejką robotów – dla każdego niezajętego robota przydzielane jest najlepiej dopasowane (względem kryterium energii lub czasu potrzebnych na wykonanie zadania) zadanie,
3. Zgodnie z jedną z trzech metod stosujących wielokryterialną ocenę przystosowania robotów do zadań (ang. *Multi-Criteria Fitness Value*, MCFV):
 - a. Według kolejki robotów niezajętych
 - b. Według największej średniej wartości $mcfv^{r \rightarrow z}$ obliczonej dla każdego robota
 - c. Według największej wartości $mcfv^{r \rightarrow z}$ obliczonej dla każdego robota

5. Wielokryterialna ocena przystosowania robota do zadania

Dla każdej pary (r, z) , dla której na zadanie z złożona została oferta b przez robota r , wartość wielokryterialnej oceny przystosowania robota r do zadania z wyznaczona zostaje na podstawie:

- Pozycji konkurencyjnej robota dla zadania $rcp^{r \rightarrow z}$,
- Atrakcyjności zadania dla robota $za^{z \rightarrow r}$,

zgodnie z zależnością:

$$mcfv^{r \rightarrow z} = \sqrt{(rcp^{r \rightarrow z})^2 + (za^{z \rightarrow r})^2} \quad (2)$$

Pozycja konkurencyjna robota r dla zadania z pozwala na ocenę przystosowania robota do zadania w odniesieniu do wszystkich robotów, które złożyły oferty na wykonanie zadania z . Na pozycję konkurencyjną robota składają się:

- czas realizacji zadania,
- energia potrzebna na wykonanie zadania,
- liczba nadmiarowych (niewykorzystywanych) zasobów inspekcyjnych robota.

Atrakcyjność zadania z dla robota r pozwala na ocenę przystosowania robota do zadania względem wszystkich zadań, na które robot złożył ofertę. Na atrakcyjność zadania składają się:

- czas realizacji zadania,
- energia potrzebna na wykonanie zadania,
- liczba nadmiarowych (niewykorzystywanych) zasobów inspekcyjnych robota,
- zmiana koncentracji zadań,
- zysk z wykonania zadania.

Jako koncentrację zadań dla wybranego robota przyjmuje się średnią odległość pomiędzy tym robotem a wszystkimi zadaniami, które ten robot może zrealizować. Wartość zmiany koncentracji zadań pozwala stwierdzić, czy wykonanie jednego zadania zbliża robota do pozostałych zadań. Kryterium to faworyzuje zadania, które są skupione, a obniża atrakcyjność zadań występujących pojedynczo.

Dla każdego zadania w momencie wprowadzenia go do systemu określony jest czas potrzebny na jego wykonanie. Zysk z wykonania zadania faworyzuje zadania o większym czasie potrzebnym ich wykonanie. Zastosowanie tego kryterium powoduje, że z podobnie oddalonych od robota zadań najbardziej atrakcyjne będzie to o najdłuższym czasie potrzebnym na jego wykonanie, a więc wzrośnie stosunek czasu lub energii potrzebnych na wykonanie do czasu lub energii potrzebnych na dojazd, co jest skutkiem pożądanym.

6. Weryfikacja działania systemu

6.1. Miary oceny działania systemu

Podczas budowy systemów sterowania robotów mobilnych celem jest zminimalizowanie zużycia energii robotów, przebytej drogi, czy też czasu potrzebnych do wykonania zadania, a także maksymalizowanie, na przykład, liczby wykonywanych zadań. Wprowadzono kilka miar służących ocenie opracowanego systemu, tj.:

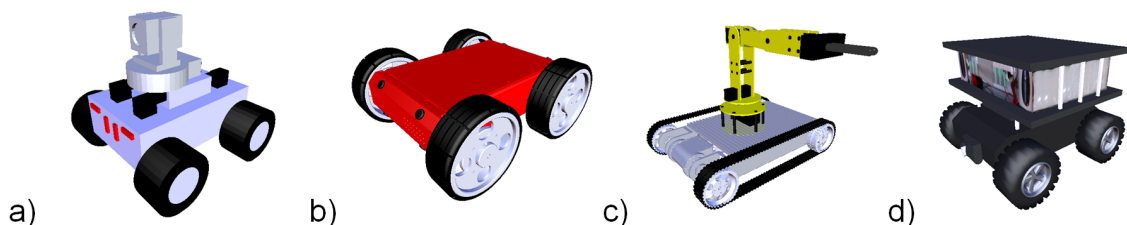
- Całkowity czas realizacji misji MT ,
- Sumaryczny czas potrzebny na dojazd robotów do miejsca realizacji zadań $TravT$,
- Sumaryczny czas blokowania nieużywanych zasobów inspekcyjnych robotów $UnnResT$,
- Sumaryczną energię zużytą na dojazd robotów do miejsca wykonywania zadań $TravE$,
- Sumaryczny przebyty dystans przez roboty $TravD$.

Ostatnia wymieniona miara jest bardzo reprezentatywną miarą oceny działania systemu, dlatego wyniki eksperymentów przedstawiono również w postaci wykresów przedstawiających ścieżki ruchu robotów podczas misji (zob. Rys.3). Na podstawie szybkiego przeanalizowania tych wykresów (porównania długości ścieżek) można łatwo ocenić sposoby alokacji zadań i ogólną wydajność systemu.

6.2. Obiekt badań

Weryfikacja działania systemu przeprowadzona została w oparciu o eksperyment numeryczny. Do tego celu zastosowano 3-wymiarowe środowisko symulacyjne pakietu Microsoft Robotics Developer Studio (MRDS). W eksperymencie wykorzystano wirtualne roboty, których własności odpowiadają realnie istniejącym robotom inspekcyjnym. Trzy pierwsze (Rys. 2) spośród tych robotów opracowano w Instytucie Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej w ramach wykonywanych projektów badawczych i rozwojowych. Roboty te to:

- *Inspector* (oznaczenie na wykresach ●)
- *Pathfinder* (oznaczenie na wykresach ●)
- *Explorer* (oznaczenie na wykresach ●)
- *Cleaner* (oznaczenie na wykresach ○)



Rys. 2. Roboty inspekcyjne : a) Inspector, b) Pathfinder, c) Explorer, d) Cleaner

Wymienione roboty różnią się między sobą posiadanymi zasobami energetycznymi, maksymalnymi prędkościami ruchu oraz – co najważniejsze – posiadami zasobami inspekcyjnymi warunkującymi to, czy dany robot może podjąć się jakiegoś zadania. Niewystarczające zasoby inspekcyjne uniemożliwiają robotowi udział w procesie aukcjonowania, a tym samym alokacji zadania.

6.3. Zadania inspekcyjne

Misje prowadzone podczas eksperymentów symulacyjnych składały się z następujących zadań (Tab.1):

- Poszukiwanie osoby rannej (oznaczenie na wykresach ■),
- Detekcja zagrożenia pożarowego (oznaczenie na wykresach ■),
- Detekcja szkodliwych gazów (oznaczenie na wykresach ■),
- Usuwanie szkodliwej substancji (oznaczenie na wykresach □),
- Patrolowanie zadanego obszaru (oznaczenie na wykresach ■),
- Poszukiwanie ładunków niebezpiecznych (oznaczenie na wykresach ■).

W Tab.1. zastosowano oznaczenia dla zasobów inspekcyjnych: W (webcam), P (presence sensor), T (temperature sensor), C (cleaner), G1, G2, G3 (gas sensors), M (manipulator), a także dla robotów: I (Inspector), P (Pathfinder), E (Explorer), C (Cleaner).

Tab. 1. Zadania inspekcyjne

Zadanie inspekcyjne	Oznaczenie	Wymagane zasoby inspekcyjne	Robot mogący podjąć się zadania
Poszukiwanie rannego	FH - Find Human	W, P	I, P
Detekcja pożaru	DF - Detect Fire	T, G1	I, E
Detekcja gazów	DG - Detect Gases	G1, G2, G3	I, E
Usuwanie szkodliwej substancji	HC - Hazardous CleanUp	C	C
Patrolowanie	WA - Watch Area	W	I, P, E, C
Zbieranie niebezpiecznych ładunków	TB - Take Bomb	W, M	E

6.4. Przykładowe wyniki

Poniżej przedstawiono wyniki przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych dla przykładowej konfiguracji składającej się z ośmiu robotów oraz osiemnastu zadań. Wszystkie roboty zostały wprowadzone do systemu z chwilą jego uruchomienia, natomiast wszystkie zadania wprowadzono do systemu w chwili $t = 2$. Szczegóły dotyczące tej konfiguracji zamieszczone zostały w Tab. 2. oraz Tab. 3., w których podano identyfikatory, typy, miejsca oraz czasy wprowadzenia robotów oraz zadań do systemu. Należy zauważyć, że dla kolejnych zadań zostały ustalone różne wartości czasów koniecznych na ich wykonywanie t_{ex} .

Tab. 2. Konfiguracja robotów

Identyfikator robota	Robot	x	y	t^{in}
0	C	-12	-21	0
1	E	6	24	0
2	P	-21	18	0
3	I	-15	15	0
4	I	-3	-6	0
5	C	9	-15	0
6	E	-3	12	0
7	P	-3	-18	0

Tab. 3. Konfiguracja zadań

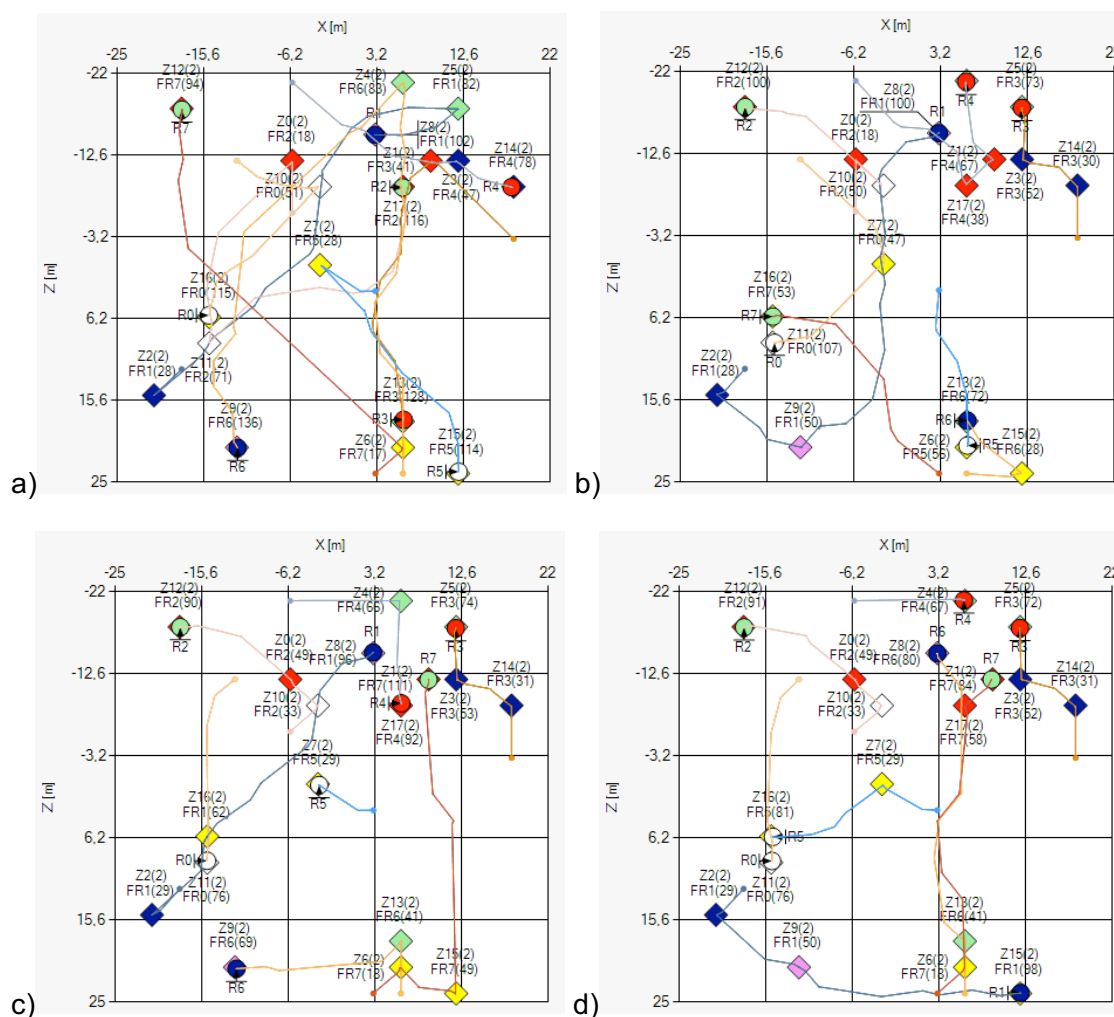
Identyfikator zadania	Zadanie	x	y	t^{in}	t^{ex}
0	FH	-21	-12	2	10
1	FH	-6	-15	2	20
2	DF	-3	6	2	20
3	DF	12	18	2	10
4	DG	-21	24	2	45
5	DG	-18	-6	2	10
6	WA	-12	9	2	10
7	WA	18	-21	2	10
8	TB	18	6	2	10
9	TB	-9	0	2	10
10	HC	-3	0	2	25
11	HC	-9	-21	2	25
12	FH	-3	-9	2	25
13	DG	-6	-6	2	35
14	DF	15	9	2	20
15	WA	-21	9	2	20
16	WA	3	6	2	20
17	FH	9	21	2	5

Tab.4. zawiera przykładowe wyniki dla czterech wariantów eksperymentów, tj. dla przypadku alokacji zadań zgodnie z kolejką zadań, następnie zgodnie z kolejką robotów oraz dwa warianty dla alokacji zadań stosującej MCFV, z tym że warianty te różni to, że w ostatnim w procesie aukcjonowania brały również udział roboty zajęte. Z Tab.4. skojarzone są wykresy z Rys. 3. przedstawiające kolejno ścieżki ruchu robotów dla kolejnych wariantów eksperymentów. Na podstawie uzyskanych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- Przydział zadań zgodnie z kolejką robotów daje lepsze wyniki w stosunku do alokacji według kolejki zadań. Czasy realizacji misji MT dla eksperymentów 1 i 2 są zbliżone, jednak pozostałe miary, a w szczególności $TravD$, wskazują na przewagę metody stosującej metodę przydzielania zadań zgodnie z kolejką robotów,
- Przydział zadań dla metod stosujących podczas aukcjonowania MCFV (warianty 3 i 4) daje korzystniejsze wyniki w stosunku do metod stosujących ocenę jednokryterialną (warianty 1 i 2),
- Wariant metody MCFV pozwalający robotom zajęтым na udział w procesie aukcjonowania i alokacji zadań (wariant 4) przyczynił się do skrócenia czasu realizacji misji MT w stosunku do wariantu 3. Pozostałe miary są zbliżone. Wynika z tego, że czasami korzystniej jest, aby robot zajęty brał udział w aukcji, ukończył aktualnie wykonywane zadanie, a następnie podjął się zadania, na które wcześniej złożył ofertę, aniżeli od razu po procesie aukcjonowania zadania podjął się robot niezajęty.

Tab. 4. Przykładowe wyniki eksperymentów

Wariant testu	Metoda alokacji zadań	Udział robotów zajętych w aukcjonowaniu	Miary oceny działania systemu				
			MT	TravT	TravD	TravE	UnnResT
1	zadania		136	538	415,5	1439,1	2214
2	roboty		130	344	234,9	864	1979
3	mcfv	nie	111	285	210,8	764	1734
4	mcfv	tak	98	289	217,6	776,2	1629



Rys. 3 Przykładowe wyniki eksperymentów – ścieżki ruchu robotów dla wariantów z Tab.4. : a) wariant 1., b) wariant 2., c) wariant 3., d) wariant 4.

7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono system sterowania grupą inspekcyjnych robotów mobilnych. Głównym problemem badawczym było zdefiniowanie systemu sterowania w taki sposób, aby była możliwa współpraca robotów celem realizacji powierzonych zadań inspekcyjnych. Zaproponowana metoda przydziału zadań zgodnie z kolejką robotów pozwala już na uzyskanie lepszych wyników w stosunku do powszechnie stosowanej metody stosującej alokację zadań zgodnie z kolejką zadań. Obie metody jako kryterium oceny stosują energię lub czas potrzebne na wykonanie zadania przez robota. Są to więc metody jednokryterialne. Zaproponowano ponadto metody przydziału zadań stosujące podczas aukcjonowania wielokryterialną ocenę przystosowania robota do zadania (MCFV), na którą składają się pozycja konkurencyjna robota dla zadania pośród innych robotów, jak i atrakcyjność zadania dla robota pośród innych zadań. W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że metody MCFV zazwyczaj pozwalają na uzyskanie najkorzystniejszych wyników, tj. skraca się czas misji, zmniejszają się sumaryczna przebyta droga, spędzony czas, bądź zużyta energia robotów podczas realizacji misji. Co ciekawe, niejednokrotnie korzystniej jest, jeśli robot niezajęty nie będzie się podejmował zadania, a zamiast tego robot zajęty ukończy aktualnie wykonywane zadanie, a następnie podejmie się nowego zadania.

Literatura

- [1] Aylett, R., Barnes, D.: A multi-robot architecture for planetary rovers, Materiały Konferencji 5th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, 1998.
- [2] Balch, T., Arkin, R. C.: Behavior-based formation control for multi-robot teams, IEEE Transactions on Robotics and Automation 14(6), 926–939, 1998.
- [3] Espina, M., Grech, R., De Jager, D., Remagnino, P., Iocchi, L., Marchetti, L., King, C., Multi-robot teams for environmental monitoring, Innovations Defence Support Syst. 336, 183–209, 2011.
- [4] Gerkey, B. P., Mataric, M. J.: Sold!: Auction methods for multi-robot coordination, IEEE Transactions on Robotics and Automation 18(5), 758–768, 2002.
- [5] Gerkey, B. P., Mataric, M. J.: A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems, The International Journal of Robotics Research 23, 939–954, 2004.
- [6] Horling, B., Lesser, V.: A survey of multi-agent organizational paradigms, Knowl. Eng. Rev. 19, 281–316, 2004.
- [7] Hussein, A., Khamis, A.: Market-based approach to multi-robot task allocation, Materiały Konferencji International Conference on Individual and Collective Behaviors in Robotics (ICBR), 2013.
- [8] Kalra, N., Ferguson, D., Stentz, A.: Hoplitest: A market-based framework for planned tight coordination in multirobot teams, Materiały Konferencji IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2005), 1170–1177, 2005.
- [9] Khamis, A., ElGindy, A.: Minefield mapping using cooperative multi-robot systems, Journal of Robotics 2012, 17, 2012.
- [10] Korsah, G., Stentz, A., Dias, M.: A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation, Int. J. Robot. Res. 32, 1495–1513, 2013.
- [11] Lerman, K., Jones, C., Galstyan, A., Mataric, M.: Analysis of dynamic task allocation in multi-robot systems, Int. J. Robot. Res. 25, 225–241, 2006.
- [12] Liao, Y., Su, K.: Multi-robot-based intelligent security system, Artif. Life Robotics 16:137, 2011.

- [13] Liu, C., Kroll, A.: A centralized multi-robot task allocation for industrial plant inspection by using A* and genetic algorithms, *Artif. Intell. Soft Comput.* 32, 466–474, 2012.
- [14] Marino, A., Parker, L., Antonelli, G., Caccavale, F.: A decentralized architecture for multi-robot systems based on the null-space-behavioral control with application to multi-robot border patrolling, *Intell. Robot. Syst.* 71, 423–444, 2013.
- [15] Moczulski, W., Adamczyk, M., Przystałka, P., Timofiejczuk, A.: Mobile robot for inspecting ventilation ducts, W: *Recent Advances in Mechatronics*, Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [16] Moczulski, W., Skarka, W., Adamczyk, M., Januszka, M., Giesko, T., Mężyk, J., Mizak, W., Pająk, D., Panfil, W., Przystałka, P., Targosz, M., Wiglenda, R., Wyleżoł, M.: Rozwiązania konstrukcyjne wielozadaniowych robotów mobilnych wykorzystujących zaawansowane technologie, *Problemy Eksploatacji* 3, 123–129, 2011.
- [17] Moczulski, W., Skarka, W., Adamczyk, M., Januszka, M., Pająk, D., Panfil, W., Przystałka, P., Targosz, M., Wiglenda, R., Wyleżoł, M.: Projekt grupy wielozadaniowych robotów mobilnych wykorzystujących zaawansowane technologie, *Problemy Eksploatacji* 3, 131–137, 2011.
- [18] Novak, P., Babjak, J., Kot, T., Moczulski, W.: Control system of the mobile robot telerescuer, *Materiały Konferencji "Optirob"*, 2015.
- [19] Nuzhet, A., Burchan, B.: Mixed-integer linear programming solution to multi-robot task allocation, *Tech. rep.*, Department of Computer Science and Engineering, Washington University, 2006.
- [20] Panfil, W., Moczulski, W.: Incorporating deliberative and reactive components into the control system of the inspection robots group," *Materiały Konferencji The 12th Mechatronics Forum Biennial International Conference*, Zurich, 2010.
- [21] Panfil, W., Przystałka, P., Adamczyk, M.: Behavior-based control system of a mobile robot for the visual inspection of ventilation ducts, W: *Recent Advances in Mechatronics*, 62–66, Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [22] Parker, L. E.: Alliance: An architecture for fault tolerant multi-robot cooperation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 14(2), 220–240, 1998.
- [23] Pu-Cheng, Z., Yu-Sheng, H., Mo-Gen, X.: Extended contract net protocol for multi-robot dynamic task allocation, *Information Technology Journal*, 6, 733–738, 2007.
- [24] Sariel, S., Balch, T., Erdogan, N.: Incremental multi-robot task selection for resource constrained and interrelated tasks, *Materiały Konferencji IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2314–2319, 2007.
- [25] Shkurti, F., Xu, A., Meghjani, M., Gamboa Higuera, J., Girdhar, Y., Giguere, P., Dudek, G.: Multi-domain monitoring of marine environments using a heterogeneous robot team, *Intell. Robots Syst. (IROS)*, 1747–1753, 2012.
- [26] Smith, R. G.: The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver, *IEEE Transactions on Computers* 29(12), 1104–1113, 1980.
- [27] Szykarczyk, P.: Adaptive behavior of autonomous mobile systems with new action selection problem solution, *Control and cybernetics* 33, 387–420, 2004.
- [28] Werger, B. B., Mataric, M. J.: From insect to internet: Situated control for networked robot teams, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* 31(1-4), 173–197, 2001.
- [29] McKinsey and Company, "Enduring Ideas: The GE–McKinsey nine-box matrix." http://www.mckinsey.com/insights/strategy/enduring_ideas_the_ge_and_mckinsey_nine-box_matrix. (Ostatni dostęp: 10 Sierpnia 2017).

Piotr PRZYSTAŁKA¹, Dominik WACHLA²

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) piotr.przystalka@polsl.pl

2) dominik.wachla@polsl.pl

Mateusz KALISCH³

Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice

3) mateusz.kalisch@ibemag.com

METODYKA STOSOWANIA SYSTEMU EKSPERTOWEGO DISESOR.DIAG W ZAKRESIE WNIOSKOWANIA BAZUJĄCEGO NA DANYCH POMIAROWYCH

1. Wstęp

System ekspertowy (ang. expert system) jest programem komputerowym, który na podstawie specjalistycznej wiedzy z danej dziedziny zgromadzonej w bazie wiedzy może wyciągać wnioski podobnie do sposobu rozumowania człowieka [2],[3]. Można podać kilka ważnych cech odróżniających te systemy od tradycyjnych programów komputerowych. W systemach ekspertowych wiedza zapisywana jest w bazie wiedzy w sposób jawny umożliwiając jej interpretację i oddzielenie jej od procedur przetwarzania komputerowego. Wiedza używana jest do rozwiązywania określonych problemów z zastosowaniem różnych metod wnioskowania. Systemy ekspertowe umożliwiają również wyjaśnianie konkluzji wyznaczonych przez system. Największą popularność w aplikacjach teoretycznych i praktycznych zdobyły systemy ekspertowe, w których przetwarzanie wiedzy bazuje głównie na metodach przetwarzania symboli. Bardzo ważną rolę w tym obszarze odgrywają szkieletowe systemy ekspertowe (ang. expert system shells), które zawierają gotowy podsystem przetwarzania wiedzy, dzięki czemu zmniejszają pracochłonność podczas realizacji takiego systemu oraz ograniczają wymagania stawiane programistą, którzy zatrudniani są podczas prac rozwojowych i wdrożeniowych.

W niniejszej pracy używane jest pojęcie systemu ekspertowego w szerszym sensie [4], gdzie system ten stosowany jest do rozwiązania problemu wymagającego wnioskowania diagnostycznego lub/i dotyczącego nadzorowania przebiegu procesów oraz wspomaganie użytkownika w podejmowaniu decyzji w sytuacjach kryzysowych. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że proponowany system ekspertowy realizuje wnioskowanie na podstawie danych pomiarowych. Do poprawnej pracy systemu wybrano takie środki reprezentacji i przetwarzania wiedzy, które umożliwią uwzględnienie niejednorodnej reprezentacji wiedzy pochodzącej z różnych źródeł [4] oraz kontekst zdarzenia, którego dotyczy wiedza [5].

Opisany w tej pracy moduł ekspercki powstał w ramach projektu, który finansowany był przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju - projekt nr PBS2/B9/20/2013 pt. „Zintegrowany, szkieletowy system wspomaganie decyzji dla systemów monitorowania procesów, urządzeń i zagrożeń” o akronimie DISESOR. Szczegółowy opis całego systemu, w tym modułu DISESOR.DIAG, przedstawiono w monografii [1]. Moduł szkieletowego systemu ekspertowego był przedmiotem rozważań w wielu pracach. Podczas wstępnych

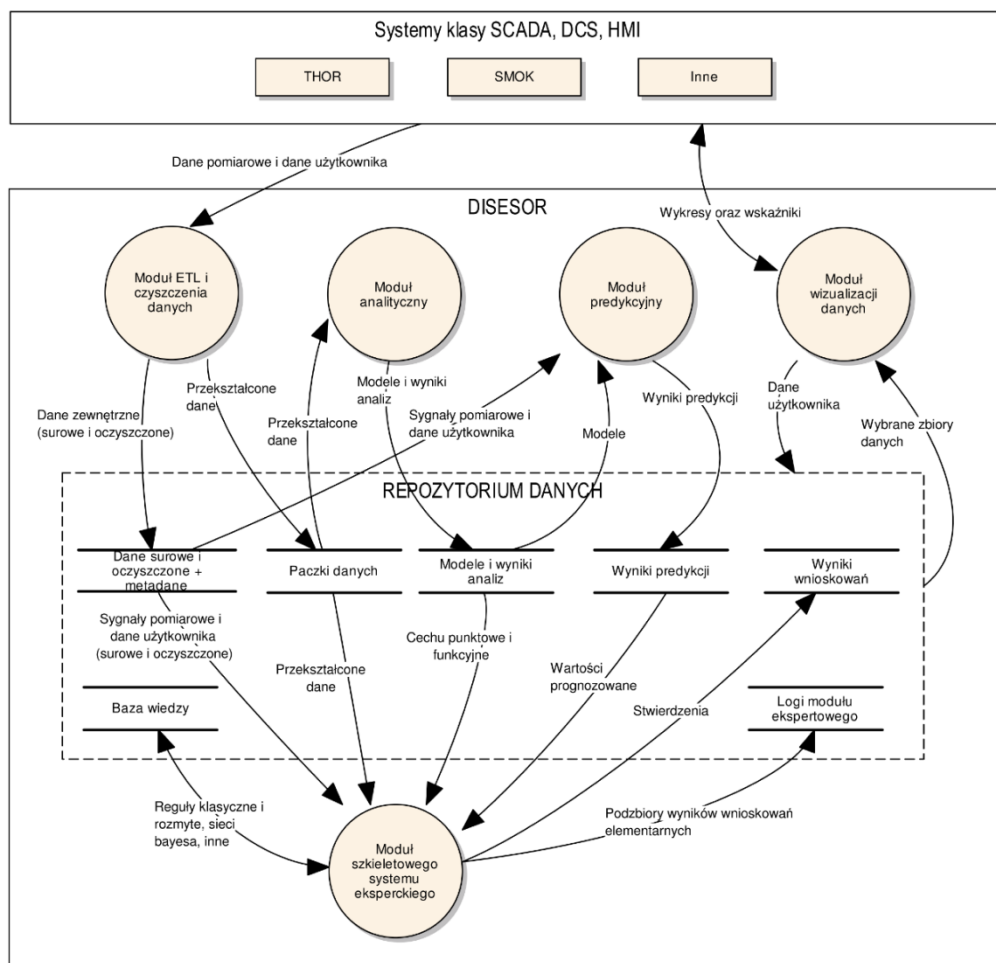
badania wykazano jego dużą użyteczność w zastosowaniach praktycznych związanych z przemysłem górniczym [6], [7], [8], [9] (zarówno w kontekście diagnozowania maszyn i urządzeń oraz monitorowania procesów). Ponadto przeprowadzono kilka prób w zakresie badań stosowanych i przemysłowych z użyciem jądra opracowanego systemu, które dotyczyły takich zagadnień jak np. detekcja wycieków w sieciach wodociągowych [10], detekcja i lokalizacja uszkodzeń turbin wiatrowych [11] oraz detekcja i lokalizacja uszkodzeń układów wykonawczych stosowanych w systemach automatyki przemysłowej [12], [13].

2. Szkieletowy system doradczy DISESOR.DIAG

Szkieletowy system ekspertowy DISESOR.DIAG został zrealizowany w postaci modułu, który posiada architekturę dwuwarstwową. Warstwa nadrzędna pełni rolę i funkcję koordynacyjną w celu zarządzania pracą modułu ekspertowego. Możliwa jest praca modułu w trybie online i offline oraz w trybie edycji. Niezależnie od trybu pracy zawsze niezbędne jest odpowiednie przygotowanie schematu/scenariusza wnioskowania. Ponadto wybór trybu pracy pozwala na uruchomienie wątków wnioskowań zgodnie z przygotowanym scenariuszem/schematem. Podczas wykonywania wątków w warstwie wykonawczej inżynier wiedzy ma możliwość monitorowania postępów wnioskowania za pomocą funkcji warstwy nadrzędnej. Działania w warstwie wykonawczej uzależnione są od wybranego trybu pracy. Użytkownik modułu ma możliwość edycji zasobów bazy wiedzy reprezentowanej w różnorodny sposób. W systemie dostępne są trzy podstawowe sposoby wnioskowania tzn. wnioskowanie klasyczne z zastosowaniem logiki dwuwartościowej (w oparciu o edytowalne drzewa decyzyjne), wnioskowanie posybilistyczne z zastosowaniem logiki rozmytej (w oparciu o systemy rozmyte) oraz wnioskowanie probabilistyczne z zastosowaniem rachunku prawdopodobieństwa (w oparciu o sieci Bayesa). Ponadto dla każdego elementarnego mechanizmu wnioskowania możliwe jest uwzględnienie kontekstu. Warstwa wykonawcza umożliwia edycję baz wiedzy za pomocą zbioru funkcji do edycji drzewa decyzyjnego, edycji systemu rozmytego oraz edycji sieci Bayesa.

Moduł DISESOR.DIAG posiada funkcjonalność, która pozwala na jego dalszą rozbudowę o inne sposoby wnioskowania i niezbędne dla nich sposoby reprezentacji wiedzy. Główny proces wnioskowania umożliwia również łączenie wyników wnioskowań elementarnych. Z tego względu zbiór funkcji do edycji bazy wiedzy jest rozszerzony o funkcjonalność pozwalającą na zarządzanie globalnym modelem wnioskowania. W tym miejscu należy również zaznaczyć, że w zbiorze funkcji do edycji bazy wiedzy przewidziano również możliwość zarządzania słownikiem stwierdzeń. Proces wnioskowania zwraca konkluzje (elementarne i/lub będące wynikiem syntezy) w postaci stwierdzeń, które archiwizowane są w repozytorium danych. Warstwa wykonawcza odpowiedzialna jest również za pobieranie i przetwarzanie danych, na podstawie których realizowany jest proces wnioskowania.

Centralnym elementem integrującym i synchronizującym prace całego systemu DISESOR jest repozytorium danych. Rolę repozytorium danych pokazano szczegółowo na Rys. 1 z wykorzystaniem diagramu przepływu danych/informacji. Zadaniem repozytorium jest integracja danych pochodzących z różnych systemów monitorowania. Ten element systemu wyposażony jest w moduł z interfejsami niezbędnymi dla walidacji, czyszczenia i przetwarzania danych wejściowych oraz komunikatów dostarczanych przez inne komponenty systemu. Struktura repozytorium została zaprojektowana w taki sposób, aby możliwe było zasilenie go szerokim spectrum danych pomiarowych. Poprzez zdefiniowanie warstwy metadanych opisujących strukturę przedmiotu monitorowania możliwa jest jednoznaczna (niezależna od opisu w poszczególnych systemach pomiarowych) lokalizacja urządzeń i czujników, a przez to powiązanie mierzonych wielkości fizycznych. Repozytorium jest również źródłem danych/informacji dla pozostałych komponentów systemu.



Rys. 1. Diagram przepływu danych/informacji w systemie DISESOR

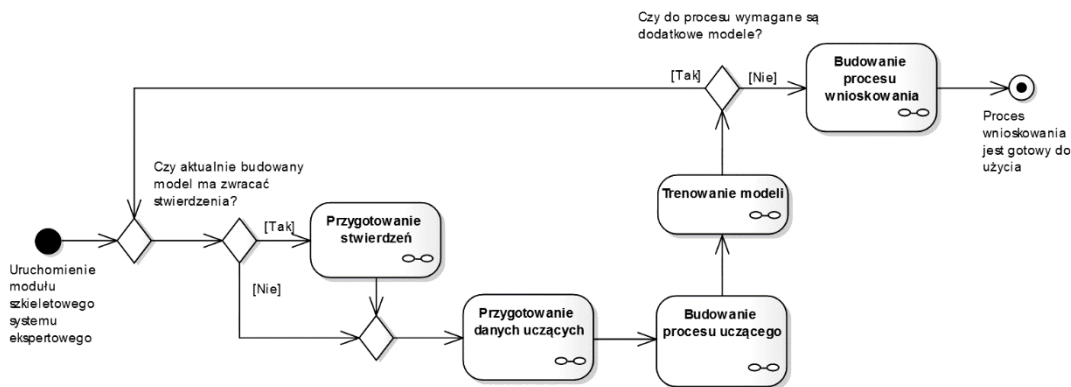
Na analizowanym diagramie bardzo dobrze widoczna jest rola modułu szkieletowego systemu eksperckiego oraz sposób współdziałania tego modułu z innymi elementami systemu DISESOR. Jak już wspomniano wymiana danych, informacji i wiedzy następuje poprzez repozytorium. Wejście modułu eksperckiego stanowią wyniki działania pozostałych modułów a w szczególności dane surowe i oczyszczone, dane pozyskane w wyniku interakcji z użytkownikiem, metadane, przekształcone dane (np. w formie strumieniowej), wyniki analiz (np. cechy liczbowe i funkcyjne), wyniki predykcji. Moduł systemu eksperckiego przetwarza te dane z zastosowaniem różnych mechanizmów wnioskowania w oparciu o bazę wiedzy, która również przechowywana jest w repozytorium. Moduł ten zwraca wyniki wnioskowania w postaci stwierdzeń zapisanych w języku, który jest zbliżony do języka naturalnego. Stwierdzenia zapisane są w słowniku stwierdzeń, który przechowywany jest w bazie wiedzy w repozytorium. Moduł eksperckowy zwraca również wyniki wnioskowań elementarnych, które stanowią podstawę działania mechanizmu objaśniającego.

3. Metodyka budowy procesu wnioskowania bazującego na danych pomiarowych

W początkowej fazie tworzenia procesu wnioskowania inżynier wiedzy musi przygotować niezbędne modele, które będą brały udział w procesie klasyfikowania nowych zbiorów danych.

Na Rys. 2 przedstawiono schemat postępowania dotyczący przygotowania w systemie DISESOR.DIAG modeli klasyfikujących dane wraz z docelowym procesem wnioskowania.

wania bazującym na tych modelach. Na schemacie można zauważyć, że przed przygotowaniem danych uczących, inżynier wiedzy musi określić czy wynikiem działania aktualnie przygotowywanego modelu będą stwierdzenia. Jeżeli tak, konieczne jest przygotowanie stwierdzenia oraz jego wariantów i zapisanie ich w słowniku stwierdzeń. W dalszym etapie etykiety stwierdzenia oraz wariantów stwierdzenia stanowią będą nazwy odpowiedniej cechy decyzyjnej i/lub kontekstowej oraz wartości przyjmowanych przez cechę.



Rys. 2 Główny schemat postępowania dotyczący procesu trenującego klasyfikatory oraz procesu wnioskowania

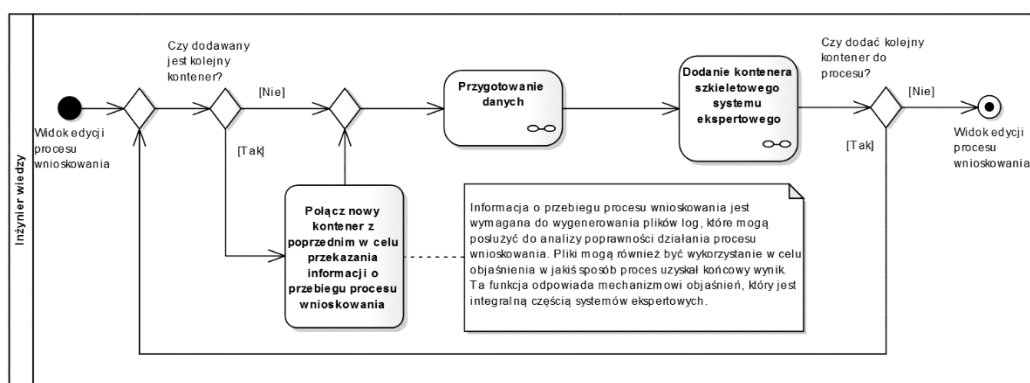
W kolejnym kroku należy przygotować dane uczące, aby za ich pomocą możliwe było utworzenie klasyfikatorów. Przede wszystkim należy określić źródło danych, może to być plik lub baza danych. Jeżeli w trakcie realizacji procesu uczenia klasyfikatora, trenowany model zwraca decyzję opisaną w słowniku stwierdzeń, konieczne jest uzgodnienie nazwy cechy decyzyjnej w danych oraz jej etykiet z etykietami stwierdzenia i jego wariantów. Ten krok można zrealizować poprzez wcześniejsze przygotowanie danych trenujących lub dodanie do procesu trenującego operatorów, które zmodyfikują nazwę odpowiedniego atrybutu oraz jego wartości. Na etapie przygotowania danych realizowane jest również zadanie obliczenia cech liczbowych. System DISESOR.DIAG jest wyposażony w narzędzia pozwalające wyznaczać dowolne cech w oparciu o przesuwne okno o stałej szerokości lub szerokości zależnej od cechy kontekstowej. Jeżeli jest taka konieczność, możliwe jest zastosowanie metod czyszczenia danych, których zadaniem jest usuwanie wartości odstających i uzupełnianie wartości brakujących. Przed wykorzystaniem danych w celu wytrenowania klasyfikatora, należy zastosować algorytm normalizacji. Ostatnim krokiem przygotowania danych jest usunięcie z listy tych atrybutów, które nie są istotne. W tym celu należy zastosować jeden z operatorów selekcji atrybutów.

Tworzenie procesu uczonego jest kolejnym wymaganym etapem przygotowania klasyfikatorów. W pierwszej kolejności należy zdecydować, czy na etapie trenowania klasyfikatorów konieczna jest estymacja miar oceniających jego sprawność. Jeżeli tak, możliwe jest wykorzystanie jednej z dostępnych metod estymacji dokładności trenowanego klasyfikatora jako np. sprawdzian krzyżowy lub jednorazowy podział danych na trenujące i testujące. Metoda pozwala na oszacowanie sprawności działania klasyfikatora poprzez wyznaczenie macierzy pomyłek i wyznaczenia na jej podstawie wybranych miary opisujących jakość klasyfikatora. Najważniejszym etapem w tej sekcji jest wybranie typu klasyfikatora i wytrenowanie go za pomocą danych. Jeżeli w przygotowywanym procesie klasyfikator ma uwzględniać kontekst, konieczne jest użycie operatora klasyfikacji z wykorzystaniem kontekstu. Jest to operator realizujący zadanie meta-uczenia z wykorzystaniem cechy kontekstowej. Podejście to pozwala na zbudowanie komitetu klasyfikatorów, których uruchomienie jest zależne od wariantów kontekstu.

Etap trenowania modeli jest realizowany po przygotowaniu procesu uczonego klasyfikatora. W tym kroku inżynier wiedzy uruchamia uprzednio przygotowany proces. Wykonywanie procesu odbywa się poprzez realizację następujących operacji: wczytanie

danych, przygotowanie danych, trenowanie modeli i zapis modeli. Wynikiem działania tego etapu są modele zapisane w repozytorium w formie plików, które zostaną użyte w procesie klasyfikowania nowych danych.

Jeżeli wszystkie wymagane modele klasyfikatorów zostały już utworzone, należy rozpocząć etap przygotowania docelowego procesu wnioskowania, którego zadaniem będzie klasyfikowanie nowych danych (Rys. 3). Podobnie jak w przypadku procesu trenowania klasyfikatorów, integralną częścią procesu wnioskowania jest etap przygotowania danych, który realizowany jest analogicznie do procesu trenowania klasyfikatorów. Różnica polega na wskazaniu danych źródłowych, które mogą pochodzić z pliku lub repozytorium bazy danych lub w tym celu mogą być wykorzystane dane uzyskane w wyniku działania poprzednich elementów procesu. W celu znormalizowania nowych danych konieczne jest zastosowanie parametrów modelu normalizacji uzyskanych na etapie trenowania klasyfikatora. Istotnym elementem procesu wnioskowania jest stosowanie kontenerów szkieletowego systemu ekspertowego.



Rys. 3. Schemat przygotowania docelowego procesu wnioskowania

Kontener pozwala na przechwytywanie dodatkowych danych stanowiących informację o sposobie realizacji procesu. Dane te są zapisywane w postaci plików log i mogą posłużyć jako mechanizm objaśniający uzyskane wyniki (konkluzje) procesu wnioskowania. Wewnątrz kontenera należy wczytać modele wytrenowanych klasyfikatorów i zastosować je za pomocą odpowiedniego operatora. Dane wejściowe kontenera przekazywane są do jego wnętrza i przetwarzane przez użyte modele. Nie ma konieczności zastosowania wszystkich modeli w pojedynczym kontenerze. Możliwe jest utworzenie w procesie większej liczby kontenerów i połączenie ich, dzięki czemu informacje zebrane w poprzednim kontenerze są przekazywane do kolejnego i w dalszym ciągu uzupełniane. Dane na wyjściu z ostatniego kontenera mogą zostać przekonwertowane do standardowej tabeli danych i np. zapisane do pliku. Możliwe jest też przekazanie danych wyjściowych kontenera na wyjście procesu.

4. Studium przypadku zastosowania metodyki

Przedstawiona w poprzednim rozdziale metodyka stosowania systemu ekspertowego DISESOR.DIAG została zweryfikowana dla różnych przypadków budowy procesów wnioskowania bazujących na danych pomiarowych. Jednym z rozpatrywanych przypadków był przypadek diagnozowania układu urabiania górniczego kombajnu ścianowego. Dane niezbędne do przeprowadzenia badań weryfikacyjnych dla ww. przypadku pozyskano z użyciem komputerowego modelu układu urabiania górniczego kombajnu ścianowego JOY 4LS20 [1]. Wspomniany model pozwala prowadzić czynne eksperymenty diagnostyczne tj. eksperymenty polegające na obserwacji odpowiedzi modelu ze względu na zmianę wartości określonych parametrów. W przypadku ww. są to m.in. sztywność skrętna wałka przeciążeniowego, sztywność zazębienia dwóch współpracujących kół zębatych i inne. W ramach badań symulacyjnych pozyskano dane dla następujących stanów elementarnych: F0 – brak uszkodzeń, F1 – wyłamanie noża na głowicy

urabiającej, F2 – wyłamanie zęba na pierwszym kole zębatym zespołu przeniesienia napędu, F3 – pęknięcie wałka przeciążeniowego.

W ramach pierwszego etapu budowy procesu wnioskowania dot. diagnostyki stanu układu urabiania kombajnu ścianowego JOY 4LS20 zdefiniowano stwierdzenia, a następnie zapisano je w słowniku stwierdzeń systemu DISESOR.DIAG [1],[10]. W rozważanym zadaniu przyjęto, że rozpatrywane stany elementarne będą opisane za pomocą jednego stwierdzenia wielowariantowego:

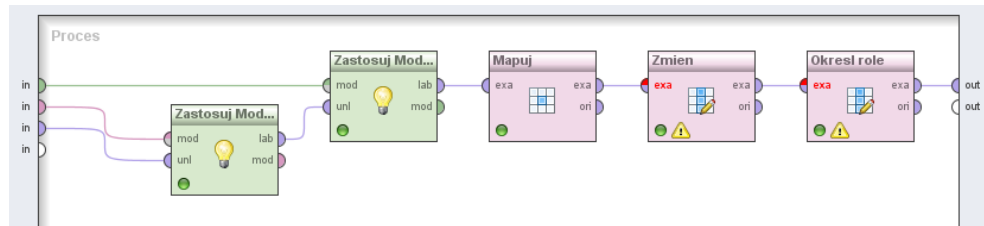
- wariant 1 (stan F0): „*W układzie urabiania kombajnu ścianowego nie wykryto żadnych uszkodzeń.*”
- wariant 2 (stan F1): „*W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto wyłamanie noża stycznno-obrotowego na głowicy skrawającej.*”
- wariant 3 (stan F2): „*W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto wyłamanie zęba na pierwszym stopniu zazębienia zespołu przeniesienia napędu.*”
- wariant 4 (stan F3): „*W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto pęknięcie wałka przeciążeniowego.*”

Na podstawie analizy treści poszczególnych wariantów stwierdzenia został zidentyfikowany schemat dekompozycji oraz elementy formalnego opisu tego stwierdzenia tj. obiekt, atrybut opisujący obiekt oraz wartości tego atrybutu, co w konsekwencji pozwoliło zapisać to stwierdzenie w słowniku stwierdzeń systemu DISESOR.DIAG [1],[10].

Drugi etap budowy procesów wnioskowania w systemie zakłada pozyskanie niezbędnej wiedzy dziedzinowej poprzez indukcję klasyfikatorów na podstawie odpowiednio przygotowanych zbiorów danych z użyciem dostępnych w systemie DISESOR.DIAG narzędzi uczenia maszynowego i drażenia danych. W celu pozyskania wiedzy niezbędnej do zbudowania procesu wnioskowania w zakresie diagnozowania rozpatrywanych stanów elementarnych układu urabiania kombajnu JOY 4LS20, wyznaczono określone cechy liczbowe sygnałów zarejestrowanych podczas prowadzonych symulacji. Cechy te przyjęto jako wejścia wyznaczanych klasyfikatorów (atrybuty opisowe), natomiast jako wyjście (atrybut decyzyjny) przyjęto stan elementarny, którego klasy opisano za pomocą etykiet F0, F1, F2 i F3. W oparciu o przyjęte założenia i przygotowane na ich podstawie dane uczące wyznaczono dwa klasyfikatory rozpatrywanych stanów elementarnych, jeden w postaci drzewa decyzyjnego i drugi w formie sieci Bayesa [1].

W ostatnim etapie został utworzony docelowy proces wnioskowania składający się z trzech faz. Pierwsza faza tego procesu obejmowała proces ładowania do systemu DISESOR.DIAG wcześniej utworzonego klasyfikatora stanu układu urabiania kombajnu ścianowego JOY 4LS20, danych pomiarowych które miały podlegać klasyfikacji oraz modelu normalizacji tych danych. Dane pomiarowe przygotowano w formie pliku CSV, który został umieszczony w lokalnym repozytorium systemu DISESOR.DIAG.

W drugiej fazie, za pomocą superoperatora „*Kontener systemu ekspertowego*” (Rys. 4) utworzono podproces normalizacji i klasyfikowania danych oraz łączenia wyników klasyfikacji z odpowiednim stwierdzeniem wielowariantowym zapisanym w słowniku stwierdzeń. Podproces normalizacji i klasyfikowania danych został zrealizowany za pomocą operatora „*Zastosuj model*”. Z kolei, w celu połączenia wyników klasyfikacji z adekwatnymi wariantami stwierdzenia ze słownika stwierdzeń, zastosowano trzy operatory: „*Mapuj*”, „*Zmień*” i „*Określ*”. Ich zadaniem była zmiana etykiety atrybutu decyzyjnego oraz etykiet przyporządkowanych mu klas na etykiety stwierdzenia zapisanego w słowniku stwierdzeń i powiązaniego z budowanym procesem wnioskowania. Należy podkreślić, że przedstawione rozwiązanie kojarzenia wyników klasyfikacji ze stwierdzeniem zapisanym w słowniku stwierdzeń jest rozwiązaniem alternatywnym w stosunku do podstawowej funkcjonalności operatora „*Kontener systemu ekspertowego*”, która pozwala na bezpośrednie łączenie wyjścia bloku „*Zastosuj model*” z wyjściem „out” (Rys. 4) tego operatora. Funkcjonalność tą można jednak stosować pod warunkiem, że na etapie pozyskania wiedzy i uzupełnienia słownika stwierdzeń zadbane o odpowiednie nazewnictwo etykiet atrybutów i klas w danych uczących.



Rys. 4. Operator „Kontener systemu ekspertowego” z definicją podprocesu klasyfikowania danych oraz łączenia wyników klasyfikacji z adekwatnym stwierdzeniem wielowariantowym

Trzecią fazę stanowiło połączenie wyjścia operatora „Kontener systemu ekspertowego” z wejściem operatora „Komunikat systemu ekspertowego”, którego funkcjonalność pozwoliła wyświetlić wyniki wnioskowania w postaci treści adekwatnych wariantów stwierdzenia (Rys. 5) z użyciem tabeli danych w formacie zgodnym z modelem danych aplikacji RapidMiner.

Row No.	Id próbki w oknie	Treść stwierdzenia	Pewność	Etykieta wariantu
1	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego nie wykryto żadnych uszkodzeń	0.936	DWKS0UU0S0V0
2	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego nie wykryto żadnych uszkodzeń	0.936	DWKS0UU0S0V0
3	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego nie wykryto żadnych uszkodzeń	0.936	DWKS0UU0S0V0
4	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego nie wykryto żadnych uszkodzeń	0.936	DWKS0UU0S0V0
5	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego nie wykryto żadnych uszkodzeń	0.592	DWKS0UU0S0V0
6	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego nie wykryto żadnych uszkodzeń	0.592	DWKS0UU0S0V0
7	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto wyłamanie zęba na pierwszym stopniu zazęбления zespołu przeniesienia napędu	0.999	DWKS0UU0S0V1
8	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto wyłamanie zęba na pierwszym stopniu zazęбования zespołu przeniesienia napędu	0.999	DWKS0UU0S0V1
9	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto wyłamanie noża stycznno-obrotowego na głowicy skrawającej	0.999	DWKS0UU0S0V2
10	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto wyłamanie noża stycznno-obrotowego na głowicy skrawającej	0.997	DWKS0UU0S0V2
11	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto wyłamanie noża stycznno-obrotowego na głowicy skrawającej	0.997	DWKS0UU0S0V2
12	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto wyłamanie noża stycznno-obrotowego na głowicy skrawającej	0.999	DWKS0UU0S0V2
13	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto pęknięcie wałka przeciążeniowego	0.970	DWKS0UU0S0V3
14	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto pęknięcie wałka przeciążeniowego	0.999	DWKS0UU0S0V3
15	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto pęknięcie wałka przeciążeniowego	0.999	DWKS0UU0S0V3
16	0	W układzie urabiania kombajnu ścianowego wykryto pęknięcie wałka przeciążeniowego	0.999	DWKS0UU0S0V3

Rys. 5. Tablica z wynikami działania procesu wnioskowania dla zadania diagnozowania układu urabiania kombajnu ścianowego wyświetlana użytkownikowi przez system DISESOR.DIAG

4. Podsumowanie

W ramach artykułu opisano metodykę stosowania szkieletowego systemu ekspertowego DISESOR.DIAG w zakresie budowy procesów wnioskowania opartych na przetwarzaniu danych pomiarowych. W szczególności proponowana metodyka wymaga realizacji szeregu uporządkowanych działań obejmujących: analizę problemu i opracowanie koncepcji struktury procesu wnioskowania, przygotowanie stwierdzeń i zapisanie ich w słowniku stwierdzeń, przygotowanie danych uczących, indukcję klasyfikatorów z wykorzystaniem dostępnych metod uczenia maszynowego i drążenia danych, zbudowanie docelowego procesu wnioskowania. Metodykę zweryfikowano w sposób praktyczny dla różnych przypadków, w tym m.in. przypadku zadania dotyczącego diagnozowania stanu układu urabiania górniczego kombajnu ścianowego JOY 4LS20. Przeprowadzone testy pozwoliły zweryfikować założenia oraz rozwiązania przyjęte i wypracowane podczas tworzenia system DISESOR.DIAG.

Literatura

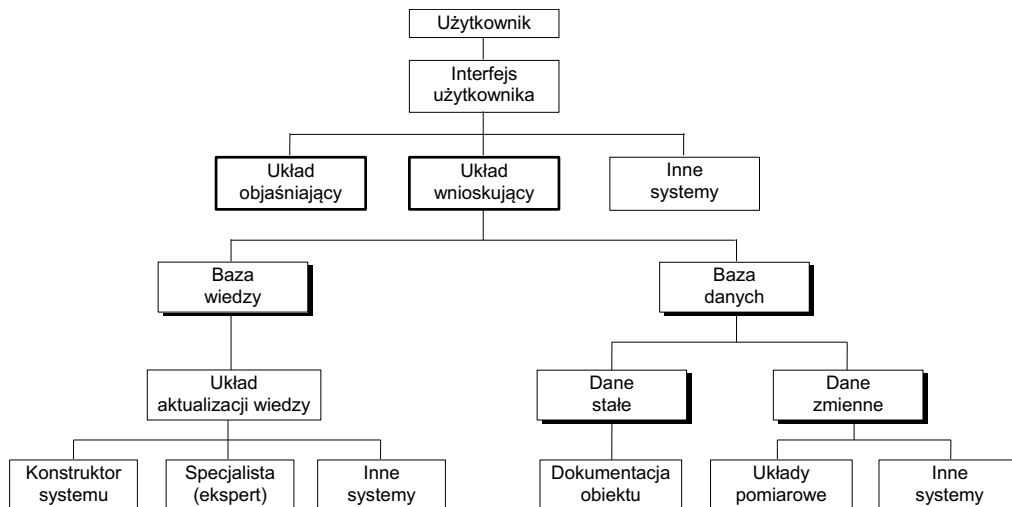
- [1] Przystałka P., Sikora M. (red.): Zintegrowany, szkieletowy system wspomaganie decyzji dla systemów monitorowania procesów, urządzeń i zagrożeń, Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice, 2017
- [2] W. Cholewa: Expert systems in technical diagnostics. J. Korbicz, Z. Kowalczyk, J. Koscielny, W. Cholewa, redaktorzy, Fault Diagnosis. Models, Artificial Intelligence, Applications, s. 591–631. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [3] J. Liebowitz: The Handbook of Applied Expert Systems. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, wyd. 1st, 1997.
- [4] W. Moczulski: Diagnostyka techniczna. Metody pozyskiwania wiedzy. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002.
- [5] A. Timofiejczuk: Metodyka wnioskowania z uwzględnieniem kontekstu w diagnostyce maszyn. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2011.
- [6] Kalisch M.: Supervised context classification methods for industrial machinery. W: Abstracts of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. FedCSIS, September 13-16, 2015, Łódź, Poland. [B.m.] : [b.w.], 2015, s. 114.
- [7] Przystałka P., Moczulski W., Timofiejczuk A., Kalisch M., Sikora M.: Development of expert system shell for coal mining industry. W: Advances in condition monitoring of machinery in non-stationary operations. Proceedings of the Fourth International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, CMMNO'2014, Lyon, France, December 15-17. Pt. 2. Eds. F. Chaari [et al.]. Springer International Publishing, 2016, s. 335-348.
- [8] Sikora M., Moczulski M., Przystałka P., Ślęzak D., Timofiejczuk A.: Disesor - szkieletowy system wspomaganie decyzji dotyczących procesów przemysłowych. W: III Polski Kongres Górniczy 2015, Wrocław, 14-16.09.2015. Rozszerzone abstrakty. Wrocław: Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, 2015, s. 208-210.
- [9] Sikora M., Moczulski W., Timofiejczuk A., Przystałka P., Ślęzak D.: Disesor: zintegrowany, szkieletowy system wspomaganie decyzji dla systemów monitorowania procesów, urządzeń i zagrożeń. W: Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja w górnictwie. II Międzynarodowa konferencja, Ustroń, 17-19 czerwca 2015. Streszczenia referatów. [B.m.] : [b.w.], 2015, s. 36-37.
- [10] Wachla D., Przystałka P., Kalisch M., Moczulski M., Timofiejczuk T.: Development of expert system shell with context-based reasoning. W: Advanced and intelligent computations in diagnosis and control. Ed. Zdzisław Kowalczyk. Cham : Springer, 2016, s. 369-382.
- [11] Kalisch M., Przystałka P., Katunin A., Timofiejczuk A.: Model-free fault detection and isolation method for wind turbine systems. W: XIV International Technical Systems Degradation Conference, Liptovsky Mikulas, 8-11 April 2015. Ed. Jędrzej Mączak. Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering. Warsaw University of Technology [et al.]. Warszawa : Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, 2015, s. 101-104.
- [12] Kalisch M.: Modelowanie testów diagnostycznych za pomocą metod uczenia maszynowego -Model. Inż. 2014 t. 22 nr 53, s. 70-77.
- [13] Kalisch M., Przystałka P., Timofiejczuk A.: Application of selected classification schemes for fault diagnosis of actuator systems. W: Federated Conference on Computer Science and Information Systems. FedCSIS, Warsaw, Poland, 7-10 September 2014. Piscataway : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014, s. 1381-1390, (Annals of Computer Science and Information Systems ; vol. 2 2300-5963).

ZASTOSOWANIE ARCHITEKTURY STEROWANEJ ZDARZENIAMI W PROCESIE WNIOSKOWANIA

1. Wstęp

Jednym z głównych celów diagnostyki technicznej jest ocena stanu technicznego urządzeń i maszyn. Dzięki rozwojowi metod obejmujących zarówno możliwość przeprowadzania pomiarów, jak i przetwarzania istniejących danych ocena stanu technicznego może być przeprowadzona na podstawie dużej liczby bardzo zróżnicowanych danych. Taka duża liczba danych wejściowych prowadzi do dużej liczby badanych objawów diagnostycznych. W takich przypadkach zaleca się stosowanie systemów doradczych. Każdy system doradczy składa się z wielu typowych modułów (Rys. 1). Między innymi są to:

- interfejs użytkownika,
- baza wiedzy
- baza danych,
- układ wnioskujący.



Rys.1. Główne elementy systemu doradczego [3]

Biorąc pod uwagę sposób funkcjonowania systemów doradczych, możemy wyróżnić dwie grupy takich systemów [3]. Pierwsza grupa obejmuje systemy statyczne. Systemy tego typu to systemy pracujące w tzw. trybie off-line. W takich systemach poszukiwanie rozwiązania odbywa się w stałym środowisku. Proces wnioskowania jest realizowany przy użyciu stałych danych zebranych z obiektu technicznego. Druga grupa systemów doradczych obejmuje systemy dynamiczne. Systemy dynamiczne to systemy działające w trybie on-line. W przypadku takich systemów poszukiwanie rozwiązania jest utrudnione, gdyż środowisko pracy zmienia się w sposób dynamiczny, a proces wnioskowania w tego typu systemach jest realizowany w ograniczonym czasie i przy ograniczonych zasobach. Ze względu na dynamikę tych zmian, proces wnioskowania w tego typu systemach realizuje się przy użyciu różnych metod. Jedna

z metod zakłada, że dane pozyskane z obiektu technicznego są zamrażane przez pewien przedział czasowy, a proces wnioskowania w takim przypadku jest realizowany tak jak w systemach statycznych.

Ciekawym przykładem dynamicznych systemów wspomagających proces monitorowania maszyn są systemy oparte na tablicach ogłoszeń. Specjalną klasą tego rodzaju systemów doradczych są systemy oparte na intuicjonistycznych tablicach ogłoszeń [1]. W tego typu systemach na tablicy ogłoszeń umieszczane są ogłoszenia zawierające stwierdzenia. Stwierdzeniem nazywamy wyrażenie, wynikające z zaobserwowanych faktów lub wyrażające określoną opinię, która może być wyłącznie prawdziwa lub wyłącznie fałszywa [1][3]. Ogłoszenie składa się z treści stwierdzenia, którego zawartość służy jako treść ogłoszenia oraz wartości stwierdzenia. Wyniki działania takiego systemu mogą być przedstawiane w postaci kolorowych prostokątów na widoku tablicy ogłoszeń [4]. Ogłoszenie zaprezentowane na tablicy ogłoszeń składa się z dwóch elementów: treści stwierdzenia i wartości stwierdzenia. Treść stwierdzenia jest stałym elementem ogłoszenia, a jego wartość jest elementem zmiennym.

Ciekawym rozwiązaniem, które można zrealizować w dynamicznych systemach eksperckich może być wnioskowanie sterowane zdarzeniami. W tym rozwiązaniu proces wnioskowania mógłby być wywoływany przez różne zdarzenia umieszczone na tablicach ogłoszeń.

2. Architektura systemów sterowanych zdarzeniami

Systemy sterowane zdarzeniami to systemy oparte na architekturze zdarzeniowej (ang. Event Driven Architecture - EDA) [9]. Architektura zdarzeniowa jest paradygmatem programowania określającym sposób działania programu komputerowego opartego na zdarzeniach [8]. Zdarzenie jest zjawiskiem lub wydarzeniem, które powstało w określonym systemie lub poza nim, jest istotne dla tego systemu oraz zostało przetworzone przez elementy systemu [5]. Zdarzenia są klasyfikowane wg ich typu. Ich znaczenie jest zależne od czasu wystąpienia, liczby wystąpień, źródła które wywołało zdarzenie oraz innych czynników zawartych w specyfikacji zdarzenia. Możemy wyróżnić dwa typy zdarzeń [5]:

- zdarzenia proste,
- zdarzenia złożone.

Zdarzenia proste są zdarzeniami pierwotnymi występującymi w jednej chwili czasu. Zdarzenia złożone składają się z wielu zdarzeń prostych, które występują w określonym przedziale czasu i mają określony wzorzec. W zdarzeniu złożonym wyróżniamy dwa elementy charakterystyczne: zdarzenie początkowe (inicjator zdarzenia) oraz zdarzenie końcowe (terminator zdarzenia). Zdarzenie początkowe jest zdarzeniem prostym, które rozpoczyna wzorzec zdarzenia złożonego. Zdarzeniem końcowym nazywamy zdarzenie proste, które jest elementem końcowym wzorca zdarzenia złożonego. Czas wystąpienia zdarzenia złożonego można określić na dwa sposoby. Pierwszym sposobem jest przyjęcie za czas wystąpienia zdarzenia złożonego, czasu zdarzenia końcowego. Drugim sposobem jest przyjęcie reprezentacji czasu w postaci pary, w której jednym elementem jest czas wystąpienia zdarzenia początkowego, a drugim, czas wystąpienia zdarzenia końcowego [5].

Zdarzenie definiuje się jako parę:

$$e = \langle h, b \rangle \quad (1)$$

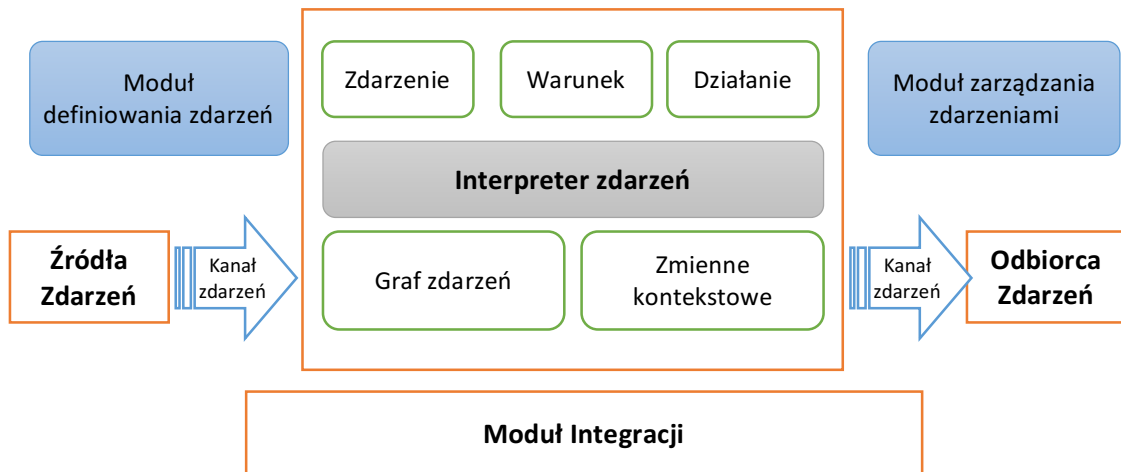
gdzie h jest identyfikatorem zdarzenia, natomiast b jest jego wartością.

Identyfikator zdarzenia definiujemy jako wektor opisujące dane zdarzenie. Wektor ten powinien zawierać takie dane jak:

- nazwę zdarzenia,
- czas wystąpienia zdarzenia,
- numer wystąpienia zdarzenia,

- źródło zdarzenia,
- możliwe inne elementy, które są zawarte w specyfikacji zdarzenia.

Wartość zdarzenia, również jest definiowana jako wektor, którego elementami są szczegółowe informacje dotyczące zmian stanu zdarzenia. W tym wektorze należy umieścić wszystkie dane, związane z danym zdarzeniem, zgodnie z przyjętą specyfikacją.



Rys.2. Elementy systemów sterowanych zdarzeniami [5]

Systemy bazujące na architekturze sterowanej zdarzeniami składają się z układów, które generują, przekazują, przetwarzają i reagują na powstałe w systemie zdarzenia (Rys. 2). Zdarzenia, które są tworzone przez różne źródła, są przetwarzane przez system i przekazywane do odbiorców, którzy reagują w odpowiedni sposób na przesłane zdarzenie. Pomiędzy źródłami zdarzeń, a ich odbiorcami znajduje się układ przetwarzania zdarzeń, który zajmuje się ich analizą i ustala kolejność oraz sposób ich obsługi. Odbiorcy nie muszą znać źródła powstania danego zdarzenia i nie są z tym źródłem bezpośrednio powiązani. Źródłem zdarzeń są elementami bardzo często zależnymi od konkretnej implementacji systemu. W systemach diagnostycznych, źródłami zdarzeń mogą być czujniki pomiarowe, sensory, układ sterowania, system wnioskujący, obsługa maszyny czy też nadzór techniczny. W innych tego typu systemach źródłami zdarzeń mogą być aplikacje, bazy danych, usługi, procesy przepływu danych i informacji, procesy biznesowe, sensory, transmitters, wyposażenie medyczne, komputery, tablety, telefony komórkowe, i wiele innych urządzeń powszechnie wykorzystywanych przez ludzi [5][9]. Wszystkie dane wygenerowane przez różne źródła muszą być wstępnie przetworzone do formatu akceptowalnego przez kanał zdarzeń, za pośrednictwem którego będą przekazywane do kolejnych elementów systemu. Celem działania systemu jest przekazanie zdarzeń do właściwych odbiorców, którzy będą w stanie odpowiednio na nie zareagować. Odbiorcami zdarzeń mogą być, podobnie jak w przypadku źródeł, układy i podukłady realizujące określone czynności. Mogą to być aplikacje, usługi, ludzie, systemy wnioskujące, pulpity, układy sterowania. Reakcją na dane zdarzenie może być wygenerowanie nowego zdarzenia, przez co odbiorcy zdarzeń stają się również ich źródłem. Głównym elementem całego układu jest moduł przetwarzania zdarzeń. Rolą tego modułu jest odebranie informacji o wystąpieniu danego zdarzenia za pomocą dostępnych kanałów, przetworzenie tego zdarzenia odpowiednio do zdefiniowanych reguł i przekazanie do właściwego odbiorcy [5]. Przetwarzanie zdarzeń może polegać np. na ich łączeniu w ciąg zdarzeń, odpowiadający określonemu wzorcowi, rozpoznawaniu zdarzeń pojawiających się okresowo, wydzielaniu zdarzeń z wzorca itp. Ponadto zdarzenia można monitorować, śledzić i wykrywać nowe, dzięki czemu możliwe jest prowadzenie zadań związanych z przewidywaniem kolejnych zdarzeń.

Rozwiązania oparte na architekturze zdarzeniowej są szeroko stosowane w wielu różnych dziedzinach. Wykorzystywane są tworzeniu systemów operacyjnych, aplikacji, systemach zarządzania procesem [6] oraz w systemach zarządzania i kontroli [9]. Jedną z możliwości zastosowania tego typu rozwiązań jest użycie ich w procesie wnioskowania w diagnostycznych systemach doradczych.

3. Proces wnioskowania sterowany zdarzeniami

Jednym z głównych elementów każdego systemu doradczego jest baza wiedzy. Wiedza zapisana w bazie wiedzy stanowi podstawę prowadzenia procesu wnioskowania. Wiedza w systemach doradczych może być zapisywana w różny sposób. Jednym z ciekawych sposobów reprezentacji wiedzy w systemach doradczych, użytecznym szczególnie w diagnostycznych systemach doradczych jest są multimodalne sieci stwierdzeń [2]. Wartości stwierdzeń, które są wykorzystywane w procesie wnioskowania w tego typu systemach są wyznaczane na podstawie danych pozyskiwanych przez układy zbierania danych lub w oparciu o wartości innych stwierdzeń.

W dynamicznych systemach doradczych proces wyznaczania wartości stwierdzeń jest realizowany w trybie on-line. Wyliczane wartości stwierdzeń stanowią podstawę procesu wnioskowania, który jest realizowany w ograniczonym czasie i przy ograniczonych zasobach. W przypadku tego typu systemów podejmowane są próby zniesienia tych ograniczeń za pomocą różnych metod. Jedną z możliwości może być zastosowanie w budowie takich systemów rozwiązań opartych o architekturę zdarzeniową. Z punktu widzenia działania systemu diagnostycznego, rozwiązanie takie wydaje się być adekwatne do realizowanych celów. W oparciu o dane pozyskiwane z różnych źródeł, system może w odpowiedni sposób reagować przeprowadzając odpowiednie kroki w celu określenia stanu technicznego danej maszyny. Naturalnym źródłem zdarzeń są wszelkie systemy pomiarowe oraz układy sterowania. Zdarzenia mogą być również generowane przez ludzi związanych zarówno z obsługą danej maszyny, jak również osoby związane z utrzymaniem ruchu, które nadzorują jej działanie.

W systemach doradczych bazujących na sieciach stwierdzeń, informacje o stwierdzeniach zapisywane są na tablicy ogłoszeń. Do działania takiego systemu, można wykorzystać stwierdzenia jako źródło zdarzeń. Z punktu widzenia działania takich systemów ważne są informacje o wartości stwierdzenia. Istotne są zarówno informacje o fakcie, że dane stwierdzenie zmieniło swoją wartość, jak i fakt, że nie zmieniło ono swojej wartości. Zgodnie z definicją zdarzenia zmiana wartości stwierdzenia lub jej brak, może być traktowana jako zdarzenie występujące w danym systemie.

Niech zmiana wartości stwierdzenia będzie zdarzeniem e_i . W takim przypadku możemy zdefiniować zbiór zdarzeń E , opisujących zdarzenia, które mogą wystąpić w danym systemie:

$$e_i \in E \quad (2)$$

Każde zdarzenie można opisać w postaci pary wektorów h oraz b , zgodnie z wzorem (1). W takim przypadku nagłówek zdarzenia można opisać następująco:

- typ zdarzenia,
- nazwa stwierdzenia,
- czas wystąpienia stwierdzenia,
- źródło powstania stwierdzenia,
- przedział wartości stwierdzenia, dla którego zdarzenie jest pomijane,

Wartość zdarzenia można w takim przypadku opisać przez podanie następujących elementów:

- poprzednia wartość stwierdzenia,
- nowa wartość stwierdzenia.

Wszystkie zdarzenia powinny być przetworzone przez system. Dlatego też w systemach dynamicznych konieczne jest zdefiniowanie specjalnej funkcji, która będzie

uruchamiana w momencie wystąpienia określonego zdarzenia. Funkcja taka mogłaby realizować jeden z następujących scenariuszy:

- jeśli różnica między starą wartością a nową wartością jest niewielka (mniej niż zakres wartości deklarowanej zdefiniowanej w nagłówku zdarzenia) zdarzenie powinno zostać pominięte,
- zdarzenie mogło zainicjować proces oceny innych wartości wypowiedzi, przy użyciu niektórych równań lub innych specjalnych procedur,
- zdarzenie mogło zainicjować proces wnioskowania.

Zastosowanie rozwiązania bazującego na sterowaniu zdarzeniami daje szansę na ograniczenie czasu działania procesu wnioskowania. Możemy sobie wyobrazić, że w celu określenia wartości stwierdzenia będzie konieczne wykorzystanie procesu wnioskowania. W takim przypadku można wyodrębnić małą sieć stwierdzeń, dla której będzie prowadzony proces wnioskowania, dzięki czemu wyznaczenie jego wartości będzie odpowiednio krótsze. Wynikiem działania takiego procesu może być wygenerowanie kolejnego zdarzenia, które w zależności od sytuacji, będzie odpowiednio zinterpretowane. Pozwoli to na lepsze wykorzystanie dostępnych zasobów i skrócenie czasu trwającego procesu wnioskowania.

Otwartym pozostaje pytanie w jaki sposób można zaimplementować rozwiązanie oparte o architekturę systemów sterowanych zdarzeniami. W przemyśle dosyć rozpowszechnione są systemy oparte o standard OPC (OLE for process control) [7]. Standard OPC jest przemysłowym standardem wymiany i udostępniania danych, wykorzystywanym przez różne urządzenia automatyki przemysłowej. Na szczególną uwagę zasługuje rozwijany aktualnie standard OPC UA (OPC Unified Architecture) [7]. W Instytucie PKM, Politechniki Śląskiej jest rozwijana autorska wersja serwera OPC, oparta o standard OPC UA [10][11]. Opracowany serwer OPC jest elementem systemu doradczego REx5 [12][13]. Dzięki temu, że serwer OPC jest oprogramowaniem autorskim, rozwijanym w tym Instytucie PKM, możliwe jest zaimplementowanie w takim serwerze specjalnych funkcji, które mogłyby wspomagać proces wnioskowania, a wykorzystanie ogólnie uznanego standardu, pozwoli na większe możliwości połączenia tego oprogramowania z już istniejącymi rozwiązaniami.

W ramach serwera OPC, przewiduje się zaimplementowanie odpowiednich procedur, umożliwiających zastosowanie architektury systemów sterowanych zdarzeniami do wspomagania procesu wnioskowania. Serwer OPC, na bieżąco otrzymuje informacje z różnych układów pomiarowych o zmianach wartości sygnałów. Można więc rozbudować możliwości tego serwera o dodatkowe funkcje związane z interpretacją zmian wartości sygnałów, które będą realizowały zadania modułu przetwarzania danych. Moduł ten będzie analizował otrzymane dane i w zależności od zdefiniowanych reguł uruchamiał odpowiednie procesy. Będą to procesy związane z ewentualną dalszą analizą danych, uruchomieniem procesu wnioskowania, czy też zmiany wartości określonego stwierdzenia lub grupy stwierdzeń.

4. Podsumowanie

Zastosowanie w dynamicznych systemach doradczych rozwiązania opartego o architekturę zdarzeniową stanowi rozbudowane rozwiązanie do obsługi takich systemów. Umożliwia to lepsze wykorzystanie dostępnych zasobów i skrócenie czasu potrzebnego do przeprowadzenia procesu wnioskowania. Jest to szczególnie przydatne w obecnie dostępnych wielozadaniowych systemach operacyjnych, gdzie dostępne są różne procesory i duże zasoby pamięci. Takie podejście umożliwia również integrację systemów doradczych z systemami gromadzenia danych. Zmiany wartości kondycjonowanych danych mogłyby wywołać odpowiednią automatyczną reakcję systemu doradczego i przeprowadzić proces wnioskowania dla określonego przypadku.

W chwili obecnej trwają dalsze prace nad rozwojem opracowanego serwera OPC, o możliwości obsługi zdarzeń.

Literatura

- [1] Cholewa W., *Intuitionistic notice boards for expert systems*. Gruca A., Czachórski T., Kozielski S. Redaktorzy, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 242, Berlin Springer, strony. 337-344, 2014
- [2] Cholewa, W.: *Multimodal statement networks for diagnostic applications*. Materiały konferencyjne *International Conference on Noise and Vibration Engineering (IS-MA 2010)*, strony 817–830, 2010
- [3] Cholewa, W.; *Systemy doradcze w diagnostyce technicznej*. Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W., Redaktorzy, *Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*, strony 543-580, WNT, Warszawa 2002.
- [4] Cholewa W. Psiuk K. *User interface of diagnostic systems*. Materiały konferencyjne Surveillance 7. International conference, Chartres, France, October 29-30, 2013. Chartres : Institute of Technology, strony 1-10, 2013
- [5] Cristea V., Pop F., Dobre C., and Costan A., *Distributed Architectures for Event-Based Systems*. Helmer S., Poulouvassilis A., Xhafa F. Redaktorzy, *Reasoning in Event-Based Distributed Systems*, Springer Berlin Heidelberg strony 11-45, 2011
- [6] Estruch A., Álvaro J., *Event-Driven Manufacturing Process Management Approach*, Barros A., Gal A., Kindler E. Redaktorzy, *Business Process Management*, Materiały konferencyjne 10th International Conference, BPM 2012, Tallinn, Estonia, September 3-6, strony 120-133, 2012
- [7] Mahnke W., Leitner S.H., Damm M.: *OPC Unified Architecture*, Springer, 2009
- [8] Mani Chandy K., Charpentier M., Capponi A., *Towards a Theory of Events*, Materiały konferencyjne *DEBS '07 Proceedings of the 2007 inaugural international conference on Distributed event-based systems* ACM New York, NY, USA, strony 180-187, 2007
- [9] Michelson B., *Event-driven architecture overview event-driven SOA is just part of the EDA story*, Patricia Seybold Group, Tech. Rep., 2006
- [10] Psiuk K. *Diagnostyczna baza danych*. Cholewa W., redakcja, *Diagnostyczne systemy doradcze tom. 1*, strony 283-295, Wydawnictwo IMP PAN, 2015.
- [11] Psiuk K. *Procedury komunikacyjne i bazy danych w systemie REx5*. Cholewa W., redakcja, *Diagnostyczne systemy doradcze tom. 1*, strony 137-150, Wydawnictwo IMP PAN, 2015.
- [12] Rzydzik S., Psiuk K, Amarowicz M., Rogala T.: *Application of the REx5 expert system to condition monitoring of the simple liquid flow process control trainer*. W: 6th ICTD, 5th CMMNO Gliwice 2016. 6th International Congress on Technical Diagnostic 2016, 5th International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations 2016, Gliwice, 12-16 September 2016. Abstracts. Gliwice: Publishing Institute of Fundamentals of Machinery Design Silesian University of Technology, 2016, strona. 56
- [13] Rzydzik S., Psiuk K, Amarowicz M., Rogala T.: *Diagnostic shell expert systems*. *Diagnostyka 2016* vol. 17 no. 1, s. 33-40

Tomasz ROGALA

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

Tomasz.Rogala@polsl.pl

ANALIZA WRAŻLIWOŚCI I ESTYMACJA WAG INTUICJONISTYCZNYCH SIECI STWIERDZEŃ

1. Wstęp

Reprezentacja wiedzy, wnioskowanie oraz uczenie maszynowe są kluczowymi elementami systemów inteligentnych. Wygodnym środkiem stanowiącym integrację tych kluczowych elementów są modele sieciowe [5][6][7]. Jednym z przykładów są intuicjonistyczne sieci stwierdzeń zaproponowane w [1][2][3], które pozwalają m.in. na modelowanie i reprezentowanie przybliżonej wiedzy diagnostycznej, są łatwe w interpretacji oraz umożliwiają budowanie wiedzy przez wielu niezależnych ekspertów dziedzinowych.

Modele sieciowe, w tym również intuicjonistyczne sieci stwierdzeń mogą być budowane przez inżynierów wiedzy jak również mogą być identyfikowane lub strojone na podstawie dostępnych danych pochodzących z eksperymentów diagnostycznych. Istotnym elementem, który musi zostać określony w trakcie budowy sieci intuicjonistycznej jest dziedzina określona poprzez zbiór stwierdzeń reprezentujących wybrane wyrażenia na temat stanu technicznego obiektu lub procesu oraz symptomów ich towarzyszących, zbiór zależności który określa zależności występujące pomiędzy stwierdzeniami oraz zbiór wag, który określa wielkość wpływu stwierdzeń o ustalonych wartościach na stwierdzenia, które w wyniku procesu wnioskowania są ustalane.

W artykule przedstawiono analizę wrażliwości na dane wejściowe oraz metodę identyfikacji wag sieci intuicjonistycznych w oparciu o odpowiednio przygotowane dane diagnostyczne stanowiące zbiór danych uczących. W kolejnym rozdziale przedstawiono zwięzły opis sieci intuicjonistycznych, w rozdziale 3 opisano metodę oceny wrażliwości na dane wejściowe, a w kolejnym rozdziale metodę pośredniej identyfikacji wag, która może być również stosowana w przypadku danych niepełnych. Rozdziały 3 i 4 zawierają również przykłady ilustrujące.

2. Intuicjonistyczne sieci stwierdzeń

Sieci stwierdzeń należą do grupy modeli sieciowych, które z uwagi na wygodny i sformalizowany sposób wymiany informacji pomiędzy użytkownikiem a systemem informacyjnym np. systemem doradczym zostały uzupełnione o opis związany ze stwierdzeniami. Sieci stwierdzeń zawierają tym samym zmienne reprezentowane w postaci węzłów grafu, które opisane są za pomocą stwierdzeń a one z kolei reprezentowane są co najmniej za pomocą treści stwierdzenia i wartości zmiennej. Stwierdzenia te ułatwiają m.in. wprowadzanie semantycznej poprawności budowanych baz wiedzy reprezentowanych w postaci modeli sieciowych jak również umożliwiają łączenie tych modeli ze zbiorem odpowiednich objaśnień. W zbiorze stwierdzeń można wyróżnić stwierdzenia pierwotne, które są związane z obserwacją źródeł danych zewnętrznych, oraz stwierdzenia wtórne, których wartości są ustalane w wyniku procesu wnioskowania w modelu sieciowym.

Intuicjonistyczne sieci stwierdzeń są m.in. formą graficznej reprezentacji wiedzy reprezentowanej w postaci grafu. Graf ten reprezentowany jest następującą czwórką zbiorów [1][3]:

$$G_{in} = \langle C, V, E, A \rangle$$

gdzie, C jest zbiorem węzłów reprezentujących treści stwierdzeń, V jest zbiorem węzłów reprezentujących wartości intuicjonistyczne stwierdzeń. Na zbiór ten składają się dwa podzbiory V_p i V_n , które reprezentują odpowiednio wartości intuicjonistyczne określające wartości stopnia słuszności o prawdziwości stwierdzenia oraz wartości stopnia słuszności o braku prawdziwości stwierdzenia. Dodatkowo elementy tego zbioru mogą reprezentować różne rodzaje węzłów reprezentujące koniunkcję oraz alternatywę zgodnie z implikacjami pokazanymi w dalszej części tego podrozdziału. Zbiór E zawiera zbiór krawędzi pomiędzy węzłami reprezentującymi treści stwierdzeń i ich wartości intuicjonistyczne. A jest zbiorem krawędzi skierowanych łączących poszczególne węzły z wartościami stwierdzeń. W niniejszej publikacji analiza intuicjonistycznych sieci stwierdzeń zostanie ograniczona jedynie do jej fragmentu odpowiadającego za opis zależności występujący pomiędzy wartościami stwierdzeń tj.

$$H_{IN} = \langle V, A \rangle$$

Działanie sieci H_{IN} polega na realizacji następujących warunków [3]:

$$s_i \rightarrow s_j, v(s_i) = \langle v_p(s_i), v_n(s_i) \rangle \Rightarrow v_p(s_j) \geq w_{i,j} v_p(s_i),$$

$$s_i \rightarrow s_j, v(s_j) = \langle v_p(s_j), v_n(s_j) \rangle \Rightarrow v_n(s_i) \geq w_{j,i} v_p(s_j),$$

$$\left(\bigvee_i s_i \right) \Rightarrow s_j, v(s_j) \geq \max_i \{ w_{i,j} v(s_i) \} ,$$

$$\left(\bigwedge_i s_i \right) \Rightarrow s_j, v(s_j) \geq \min_i \{ w_{j,i} v(s_i) \} ,$$

Zainteresowany czytelnik znajdzie szczegółowy opis intuicjonistycznych sieci stwierdzeń jak również sieci stwierdzeń m.in. w [1][2][3].

3. Analiza wrażliwości na dane wejściowe

Dla dostępnego kompletnego zbioru danych uczących zawierającego wartości dokładne o zdarzeniach związanych z wybranymi stwierdzeniami oraz częstością ich występowania możliwe jest zastosowanie następującej metody oceny wrażliwości na wartości stwierdzeń pierwotnych:

- Rozpatrując strukturę sieci intuicjonistycznej, dla każdej wartości stwierdzenia pierwotnego $v_i = \{v(s_i) : s_i \in S_{pri}\}$ zidentyfikuj stwierdzenia wtórne $v_j = \{v(s_j) : s_j \in S_{sec}\}$ takie, że $v_i \perp\!\!\!\perp v_j$,
- Dla każdego stwierdzenia v_j spełniającego warunek zależności $v_i \perp\!\!\!\perp v_j$ określ: znormalizowany współczynnik informacji wzajemnej [4]:

$$NI(v_i, v_j) = \frac{I(v_i, v_j)}{\sqrt{(h(v_i)h(v_j))}}$$

gdzie :

$$I(v_i, v_j) = h(v_j) + h(v_i) - h(v_i, v_j)$$

jest miarą informacji wzajemnej pomiędzy wartościami stwierżeń v_i, v_j , natomiast [4]:

$$h(v_j) = -\sum_K P(v_j) \log_2 P(v_j),$$

$$h(v_i) = -\sum_K P(v_i) \log_2 P(v_i),$$

$$h(v_i, v_j) = -\sum_K \sum_L P(v_i, v_j) \log_2 P(v_i, v_j),$$

gdzie, $h(v_j), h(v_i), h(v_i, v_j)$ są miarami entropii własnej i wzajemnej pomiędzy wartościami stwierżeń wyznaczanymi na podstawie prawdopodobieństwa P bezpośrednio poprzez zastosowanie marginalizacji łącznego dyskretnego rozkładu prawdopodobieństwa zmiennych opisanych kompletnym i dokładnym zbiorem danych uczących. W celu wyznaczenia wartości prawdopodobieństw $P(v_j), P(v_i), P(v_i, v_j)$, zakłada się, że wartości zbioru uczącego zawierają wartości dokładne punktowe odpowiadające logicznej prawdzie i fałszowi, którym odpowiadają następujące wartości intuicjonistyczne [3]:

$$\{1,0\} \text{ oraz } \{0,1\}.$$

Znormalizowana wartość współczynnika NI jest wartością z przedziału $[0,1]$ [4]. Współczynnik ten przyjmuje wartość 0 w przypadku całkowitej niezależności wartości (v_i, v_j) (sytuacja taka nie powinna mieć miejsca jeżeli poprawnie przeprowadzono analizę warunkowej niezależności pomiędzy stwierzzeniami sieci intuicjonistycznej w pierwszym korku opisywanej procedury) oraz 1 w przypadku, gdy zmiana wartości jednej zmiennej jest tożsama ze zmianą wartości drugiej zmiennej.

- c) w kolejnym kroku, dla każdego węzła $v(s_j)$ spełniającego warunek zależności $v(s_i) \perp\!\!\!\perp v(s_j)$, dla którego możliwe jest znalezienie więcej niż jednej implikacji $s_i \rightarrow s_j$ skierowanej od stwierdzenia pierwotnego do rozpatrywanego stwierdzenia s_j , wyznaczana jest wartość znormalizowanej wrażliwości $stv_{i,j}$:

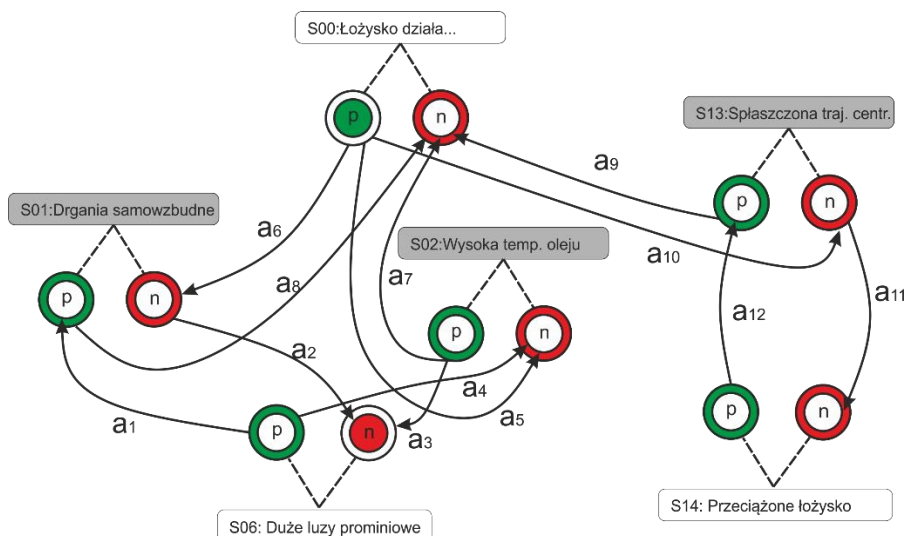
$$stv_{i,j} = \frac{NI(v_i, v_j)}{\sum_k NI(v_k, v_j)},$$

gdzie, $stv_{i,j}$ jest oceną wrażliwości określającą wpływ wartości stwierdzenia pierwotnego i na wartość stwierdzenia wtórnego j . Indeks k oznacza liczbę wszystkich krawędzi od stwierżeń pierwotnych do rozpatrywanego węzła.

Przykładem użycia opisanej metody może być następujący fragment opisu dziedziny dotyczącej diagnostyki łożysk hydrodynamicznych. Dziedzina ta opisana jest przez zbiór następujących stwierżeń:

- s_{00} – łożysko działa poprawnie,
- s_{01} – występują drgania samowzбудne o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości $\frac{1}{2}X$,
- s_{02} – temperatura oleju jest zbyt wysoka,
- s_{06} – występują duże luzy promieniowe,
- s_{13} – nadmiernie spłaszczona postać trajektorii drgań względnych, obszar spłaszczenia pokrywa się z kierunkiem działania głównych obciążeń,
- s_{14} – łożysko jest przeciążone.

Przykładowa struktura intuicjonistycznej sieci stwierdzeń może przyjąć następującą postać:



Rys. 1. Przykładowa struktura sieci intuicjonistycznej opisująca fragment wiedzy dziedzinowej dotyczącej diagnostyki łożyska hydrodynamicznego. Zaciemnionym obszarem zaznaczono stwierdzenia pierwotne. Węzły z literą p oznaczają wartość związaną z przekonaniem o słuszności stwierdzenia, natomiast węzły z literą n wartości związane z przekonaniem o braku słuszności stwierdzenia. Węzły zaciemnione wewnątrz dotyczą koniunkcji przesłanek. Pozostałe węzły dotyczą alternatywy przesłanek

Stwierdzeniami pierwotnymi w rozpatrywanym przykładzie są stwierdzenia $s_{01}, s_{02}, s_{13} \in S_{prim}$. Można w tym przypadku zapisać, że dla przedstawionej sieci występują następujące warunkowe niezależności pomiędzy stwierdzeniami (dokładnie między wartościami stwierdzeń):

$$v(s_{01}), v(s_{06}), v(s_{00}) \perp\!\!\!\perp v(s_{14}) | v(s_{13}),$$

$$v(s_{02}), v(s_{00}), v(s_{06}) \perp\!\!\!\perp v(s_{14}) | v(s_{13})$$

$$v(s_{14}) \perp\!\!\!\perp v(s_{00}), v(s_{01})v(s_{02})v(s_{06}) | v(s_{13})$$

Na podstawie tych informacji można odczytać, które z węzłów pierwotnych mają wpływ na pozostałe węzły wtórne. Na przykład stwierdzenie s_{01} ma wpływ jedynie na stwierdzenie s_{06} oraz s_{00} pod warunkiem, że stwierdzenie s_{13} jest stwierdzeniem pierwotnym.

W tabeli 1. przedstawiono fragment zbioru danych uczących reprezentujący licznosc zdarzeń dla rozpatrywanej dziedziny. Przedstawiony zbiór zdarzeń zawiera dane dokładne i kompletne. Łączna liczba rozpatrywanych zdarzeń wynosiła 8176.

Wyznaczone wartości prawdopodobieństw poszczególnych zmiennych oraz prawdopodobieństw łącznych pomiędzy zmiennymi zostały bezpośrednio wyznaczone w oparciu o zbiór danych uczących. W tabeli 2. zestawiono wartości wyznaczonych wrażliwości znormalizowanych. Poszczególne indeksy tych wartości określają kolejno wpływ wartości stwierdzenia pierwotnego na wartość stwierdzenia wtórnego.

Tab. 1 Przykładowy fragment danych uczących

Częstość	S00	S06	S01	S02	S13	S14
...
0	T	N	N	T	N	T
4	T	N	N	T	N	N
58	T	N	N	N	T	T
1	T	N	N	N	T	N
5106	T	N	N	N	N	N
...

Tab. 2 Wartości wyznaczonych współczynników wrażliwości

Waga	$w_{02,00}$	$w_{01,00}$	$w_{13,00}$	$w_{01,06}$	$w_{02,06}$	$w_{13,14}$
Wartość	0,36	0,5	0,22	0,38	0,62	0,86

4 Metoda pośredniej identyfikacji wag

Z uwagi na to, że intuicjonistyczne sieci stwierżeń nie są powszechnie znanym rodzajem modeli sieciowych nie były one przedmiotem intensywnych badań dotyczących metod estymacji ich parametrów. Analizując pole możliwych rozwiązań w zakresie metod estymacji wag przyporządkowanych do krawędzi tych sieci można wyróżnić [8][9]:

- Metody bezpośredniego wyznaczania wartości wag na podstawie znanego zbioru implikacji reprezentowanych w postaci układu nierówności oraz dostępnego zbioru danych uczących,
- Metody wyznaczania wag z zastosowaniem różnych metod wyznaczania zależności pomiędzy zmiennymi z zastosowaniem metod drażenia danych bez uwzględnienia predefiniowanej struktury sieci intuicjonistycznej,
- Metody wyznaczania z zastosowaniem modelu zastępczego z uwzględnieniem predefiniowanego modelu sieci intuicjonistycznej oraz zbioru danych uczących.

Estymacja wartości wag z zastosowaniem metody bezpośredniej uzależniona jest od sposobu reprezentacji danych uczących. Jeżeli dostępny jest zbiór danych uczących w postaci wartości intuicjonistycznych wtedy na podstawie układu nierówności możliwe jest wyznaczenie wag sieci intuicjonistycznych. Wadą takiego rozwiązania jest uzyskanie wartości wag w postaci wartości przedziałowych, jak również brak możliwości estymacji wag w oparciu o dane niekompletne. Jeżeli dostępny jest zbiór uczący w postaci zbioru zdarzeń i częstości ich występowania możliwe jest podejście alternatywne przedstawione w niniejszym rozdziale.

Istotną wadą metod identyfikacji wag z zastosowaniem metod drażenia danych jest brak uwzględnienia informacji nt. predefiniowanej struktury zależności występujących w sieciach intuicjonistycznych.

Ostatnią grupą metod wyznaczania wartości wag są metody pośrednie oparte na zastosowaniu modelu zastępczego, który jest równoważny w sensie występujących zależności i niezależności pomiędzy wybranymi stwierdzeniami modelu sieci intuicjoni-

stycznej. W sytuacji, gdy model zastępczy jest pełnym modelem statystycznym możliwa jest identyfikacja wag dla danych niekompletnych.

Metoda pośredniej identyfikacji wag polega na znalezieniu równoważnego modelu zastępczego w sensie warunkowych zależności pomiędzy stwierdzeniami pierwotnymi i stwierdzeniami wtórnymi występującymi w sieci intuicjonistycznej [8]. W celu wykorzystania możliwości identyfikacji wag dla niekompletnego zbioru danych zakłada się, że model ten powinien być pełnym modelem statystycznym. Szczególną uwagę podczas poszukiwania odpowiedniego modelu zastępczego zwrócona została na rozwiązania stosowane w modelach sieciowych, a w szczególności sieci przekonań [7][8]. Podstawowym ograniczeniem takiego podejścia jest jednak konieczność transformacji warunkowych niezależności i zależności modelu sieci intuicjonistycznej do modelu zastępczego.

Podstawowymi warunkami, które należy spełnić w celu transformacji grafu sieci intuicjonistycznej do sieci przekonań są:

- Model zastępczy G_{BN} powinien zawierać ten sam zbiór wartości stwierdzeń co model oryginalny G_{IN} , przy czym każda para wartości stwierdzeń sieci intuicjonistycznej $\langle v_p(s_i), v_n(s_i) \rangle$ jest reprezentowana przez jeden węzeł sieci G_{BN} z dyskretnymi wartościami stanów odpowiadającej logicznej prawdzie i fałszowi.
- Warunkowe zależności pomiędzy stwierdzeniami pierwotnymi oraz wtórnymi występujące w sieci G_{IN} muszą zostać odwzorowane w sieci zastępczej G_{BN} .
- Z uwagi na to, że w sieci zastępczej, w której rozpatrywane mogą być przybliżone wartości stwierdzeń pierwotnych istnieje możliwość wpływu jednych wartości stwierdzeń pierwotnych na inne wartości stwierdzeń pierwotnych (w klasycznych algorytmach wnioskowania w sieciach przekonań) konieczne jest zachowanie warunku [8]:

$$s_i \perp\!\!\!\perp s_j \text{ dla } i \neq j,$$

Jeżeli uzyskanie tego warunku nie jest możliwe ze względu na bezpośrednie sąsiedztwo stwierdzeń pierwotnych należy stosować dodatkowe węzły pomocnicze separujące lub stosować algorytm wnioskowania, który zakłada, że dowolne wartości stwierdzeń pierwotnych z przedziału $[0;1]$ są traktowane jako wartości dokładne.

Należy zwrócić uwagę, że przy odwzorowywanych zależnościach nie zwraca się uwagi na ich szczegółową interpretację, tzn. nie rozpatruje się ich znaczenia w sensie relacji przyczynowo skutkowych [5], implikacji bazujących na warunkach wystarczających i koniecznych [1][2][3] ale jedynie na ich zależność warunkową [8][9], którą można zidentyfikować w obydwu rozpatrywanych sieciach tj. sieci oryginalnej oraz sieci zastępczej. Szczegółowe informacje nt. sposobów identyfikacji warunkowych niezależności i zależności w sieciach intuicjonistycznych można znaleźć m.in. w [9]., natomiast metody identyfikacji takich niezależności w sieciach przekonań można znaleźć w obszernej literaturze np. [5][6][7]. Istotnym ograniczeniem w trakcie transformacji struktury grafu sieci G_{IN} do sieci G_{BN} , jest brak możliwości odwzorowania, w którym pomiędzy dwoma stwierdzeniami sieci intuicjonistycznej występuje jedynie jeden typ implikacji określający warunek konieczny lub wystarczający [8].

W celu zamiany struktury sieci intuicjonistycznej do sieci zastępczej, pomiędzy stwierdzeniami pierwotnymi a wtórnymi należy zastosować następujące reguły postępowania:

- a) każdą parę węzłów wartości stwierdzenia pierwotnego $s_i, \{v_p(s_i), v_n(s_i)\}$, sieci intuicjonistycznej G_{IN} z wartościami przybliżonymi pochodzącymi z niezależnego źródła danych zewnętrznych należy reprezentować z zastosowaniem jednego węzła będącego korzeniem sieci przekonań.

Dodatkowo dla pozostałych par wartości stwierdzeń wtórnych i par wartości stwierdzeń pierwotnych (o wartościach dokładnych), należy zastosować następujące reguły ustalania struktury w sieci zastępczej.

- b) każdą parę węzłów wartości stwierdzenia pierwotnego przyjmującego dokładne wartości należy reprezentować jako węzeł pośredni w rozbieżnej lub szeregowej strukturze połączeń w sieci zastępczej,
- c) każdą parę węzłów wartości stwierdzenia wtórnego sieci intuicjonistycznej należy reprezentować w grafie zastępczym poprzez umiejscowienie takiego węzła jako węzła pośredniego w strukturze zbieżnej.

Z uwagi na konieczność wyznaczania wartości wag dla każdej instancji zbioru wartości stwierdzeń pierwotnych istnieje konieczność określenia sposobu przyporządkowywania wartościom intuicjonistycznym odpowiednich wartości punktowych przyjmowanych przez węzły reprezentujące stwierdzenia pierwotne w sieci zastępczej:

$$P(s_i) = \{f(\{(v_p(s_i), v_n(s_i))\}): (\{v_p(s_i), v_n(s_i)\} \rightarrow [0,1])\}$$

gdzie: funkcja $f(\cdot)$ może przyjąć postać [8]:

$$f(\cdot) = -\frac{1}{4} \cos(3(v_n(s_i) - v_p(s_i))) + \frac{3}{4}$$

Wyżej pokazana funkcja określająca przyporządkowanie wartości intuicjonistycznych do wartości punktowych odpowiadających stopniom przekonania o prawdziwości lub braku prawdziwości poszczególnych stwierdzeń spełnia również warunki trywialne tj [8].

$$P(s_i = \text{prawda}) = 1.0 \text{ dla } v(s_i) = \langle 1,0; 0,0 \rangle$$

$$P(s_i = \text{fałsz}) = 1.0 \text{ dla } v(s_i) = \langle 0,0; 1,0 \rangle$$

$$P(s_i = \text{true}) = 0.5 \text{ dla } v(s_i) = \langle 0,5; 0,5 \rangle$$

gdzie ostatni warunek można rozszerzyć dla wartości intuicjonistycznych dla następującej nierówności:

$$v_p(s_i) - v_n(s_i) = 0 \text{ dla } LB \leq (v_n(s_i) + v_p(s_i)) \leq 1,0$$

gdzie LB jest dolnym ograniczeniem poniżej której wartość intuicjonistyczną można uznać za wartość nie mającą znaczenia.

Procedura wyznaczania wag składa się z następujących etapów:

- a) transformacja przestrzeni ciągłych wartości intuicjonistycznych wartości do jej dyskretnego odpowiednika,
 $(v_p(s_i), v_n(s_i)) \rightarrow (v_p(s_i), v_n(s_i))_d$ dla $LB \leq (v_n(s_i) + v_p(s_i)) \leq 1,0$
- b) zastosowanie przyporządkowania
 $P(s_i) = \{f(\{(v_p(s_i), v_n(s_i))_d\}): (\{v_p(s_i), v_n(s_i)\}_d \rightarrow [0,1])\}$
dla każdej wartości stwierdzeń pierwotnych,
- c) transformacja grafu przy zastosowaniu wcześniej wymienionych reguł
 $G_{IN} \rightarrow G_{BN}$,
- d) dla każdego stwierdzenia wtórnego $vb(s_i)$ sieci zastępczej należy obliczyć prawdopodobieństwo

$$P(s_j | s_i, \dots, s_{i+k}),$$

gdzie $v_{s_i, \dots, s_{i+k}}$ jest zbiorem wszystkich stwierdzeń pierwotnych. Obliczenia te należy przeprowadzić, dla wszystkich instancji wartości stwierdzeń pierwotnych $P(s_i = A), \dots, P(s_{i+k} = B)$, określonych iloczynem kartezjańskim $A \times \dots \times B$ w dyskretnej przestrzeni wartości.

e) dla otrzymanych wartości należy wyznaczyć:

$$\left[\frac{\partial P(s_j | s_i, \dots, s_{i+k})}{\partial s_i}, \dots, \frac{\partial P(s_j | s_i, \dots, s_{i+k})}{\partial s_{i+k}} \right]$$

Natomiast poszczególne wagi wyznaczane są jako znormalizowane wartości:

$$w_{i,j} = \frac{\frac{\partial P(s_j | s_i, \dots, s_{i+k})}{\partial s_i}}{\sum \left[\frac{\partial P(s_j | s_i, \dots, s_{i+k})}{\partial s_i}, \dots, \frac{\partial P(s_j | s_i, \dots, s_{i+k})}{\partial s_{i+k}} \right]}$$

gdzie waga $w_{i,j}$ jest wagą przypisaną do krawędzi od stwierdzenia pierwotnego i do stwierdzenia wtórnego j .

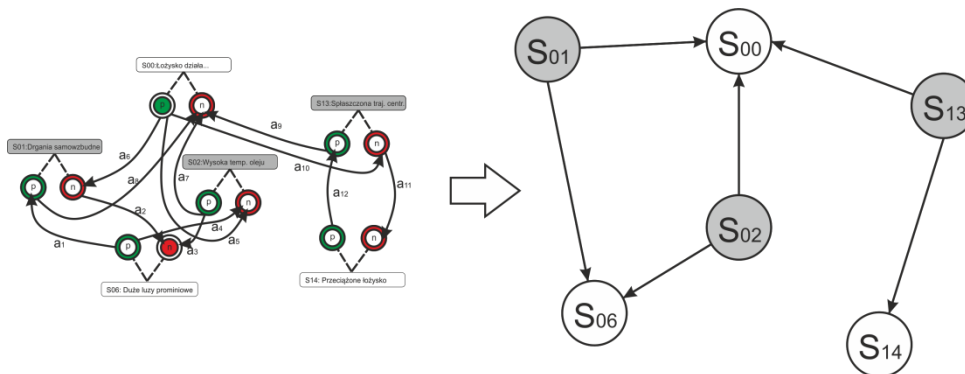
Z uwagi na to, że podczas stosowania modeli sieciowych zmieniają się głównie wartości stwierdzeń pierwotnych natomiast nie zmienia się konfiguracja podziału na stwierdzenia pierwotne i wtórne, powyższa procedura może być stosowana jeszcze przed rozpoczęciem procesu wnioskowania.

Uzyskane wyniki wag są dynamicznie zmieniane w trakcie stosowania wnioskowania w intuicjonistycznej sieci stwierdzeń zgodnie z następującymi warunkami:

$$w_{i,j}(t) = \begin{cases} 0 & LB < (v_p(s_i) + v_n(s_i)); \\ \in [0; 1] & LB \leq (v_p(s_i) + v_n(s_i)) \leq 1,0 \\ w_{i,j}(t-1) & v_p(s_i) + v_n(s_i) > 1,0 \end{cases}$$

gdzie wartości z przedziału $[0; 1]$ są przyjmowane na podstawie wyżej wymienionej procedury, natomiast $w_{i,j}(t-1)$ oznacza podtrzymanie wartości z poprzedniej chwili czasowej, gdyby w trakcie wnioskowania układu w stwierdzeniu pierwotnym pojawiły się wartości wskazujące na występowanie sprzeczności w danych.

Dla przykładu pokazanego w rozdziale 3. zastosowano powyżej pokazaną procedurę, przy użyciu tego samego zbioru danych uczących. Należy zauważyć, że zbiór ten w opisywanym przypadku nie musi być zbiorem kompletnym a procedura pokazana w rozdziale 3. dotycząca analizy wrażliwości może być również prowadzona przy zastosowaniu modelu zastępczego. Poniżej na rysunku pokazano model zastępczy odpowiadający modelowi sieciowemu pokazanemu na rysunku 1.



Rys.2 Transformacja struktury grafu $G_{IN} \rightarrow G_{BN}$. Kolorem szarym zaznaczono węzły reprezentujące stwierdzenia pierwotne, które mogą przyjmować wartości przybliżone

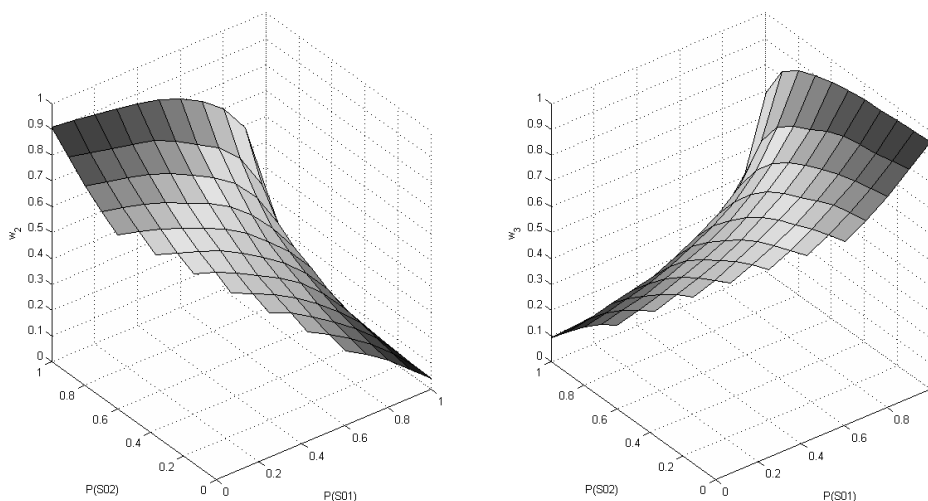
W pokazanej strukturze został zachowany ten sam zbiór zależności warunkowych pomiędzy stwierdzeniami pierwotnymi a wybranymi stwierdzeniami wtórnymi.

$$vb(s_{01}), vb(s_{06}), vb(s_{00}) \perp\!\!\!\perp vb(s_{14}) | vb(s_{13}),$$

$$vb(s_{02}), vb(s_{00}), vb(s_{06}) \perp\!\!\!\perp vb(s_{14}) | vb(s_{13})$$

$$vb(s_{14}) \perp\!\!\!\perp vb(s_{00}), vb(s_{01})vb(s_{02})vb(s_{06}) | vb(s_{13})$$

Dla uzyskanej struktury modelu zastępczego wykonano uczenie parametrów przy zastosowaniu algorytmu Największej Wiarygodności. W kolejnym kroku wykonano obliczenia zgodnie z etapem d) i e). Przykładowe wyniki dla wag krawędzi w_2 i w_3 pokazano na rysunku 3.



Rys.3 Wartości wag przypisanych do krawędzi w_2 (po lewej) oraz w_3 (po prawej) w zależności od wartości stwierżeń pierwotnych mających wpływ na wybrane stwierdzenie wtórne. Pokazana dziedzina przedstawia wartości stwierżeń pierwotnych po zastosowaniu funkcji przyporządkowującej wartościom intuicyjnym odpowiednie wartości punktowe.

4. Podsumowanie

Dodatkowe narzędzia wspomagające uczenie maszynowe modeli sieciowych jak również rozpoznawanie wpływu i zależności pomiędzy poszczególnymi wartościami stwierdzeń są ważnym elementem z punktu widzenia budowy modeli sieciowych w tym również intuicjonistycznych sieci stwierdzeń. Pokazane metody tj. metoda oceny wrażliwości poszczególnych stwierdzeń wtórnych na stwierdzenia pierwotne umożliwia dokładniejszą interpretację wpływu danych wejściowych na otrzymywane wyniki. Pozwala to również na ocenę istotności poszczególnych stwierdzeń pierwotnych i podjęcie na tej podstawie decyzji o modyfikacji struktury sieci stwierdzeń. Może być również wskazówką dla właściwego przypisania wag, w sytuacji, gdy są one określane przez eksperta a nie na podstawie danych.

Druga z przedstawionych metod umożliwia identyfikację wartości wag intuicjonistycznej sieci stwierdzeń na podstawie danych uczących. Pokazana metoda, mimo dużego nakładu obliczeniowego umożliwia w większym stopniu wydobycie informacji zawartych w danych i zawarcie tych informacji w modelu sieci intuicjonistycznej. Uzyskane wagi są zależne od zbioru wartości stwierdzeń pierwotnych jak również od konfiguracji podziału stwierdzeń na stwierdzenia pierwotne i wtórne. Pokazana metoda umożliwia estymację wartości wag również w przypadku danych niekompletnych.

Literatura

- [1] Cholewa W.: *Multimodal statement networks for diagnostic applications*, W: Sas, P., Bergen, B. (Red.) Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering ISMA 2010, wrzesień 20-22, ss.817-830 2007, Katholique Universiteit Lueven, 2010
- [2] Cholewa W.: *Gradual forgetting operator in intuitionistic statement networks*, W: Angelov, P., Attasov, K.T., Kacprzyk, J. (Red.) Materiały konferencyjne 7. IEEE International Conference Intelligent Systems IS 2014, wrzesień 24-26, ss. 613-620, Tom I, Intelligent Systems: Mathematical foundations, theory, analyses Katholique Warszawa, 2014
- [3] Cholewa W. (Red.): *Diagnostyczne systemy doradcze Tom I*, Instytut Maszyn Przepływowych, Gdańsk, 2015
- [4] Gomez-Villegas M.A., Main P., Viviani P.: *Sensitivity to evidence in Gaussian Bayesian networks using mutual information*. Information Sciences, Num 275, ss.115-126, Elsevier, 2014
- [5] Jensen, V.J.: *Bayesian networks and decision graphs*, Springer, Nowy York, 2002
- [6] Lauritzen, S.L., Spiegelhalter D.J.: *Local Computations with Probabilities on Graphical Structures and their Application to Expert Systems*, Journal of Royal Statistical Society, Num 50, Tom. 2, ss. 157-224, 1998
- [7] Pearl, J.: *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, Morgan Kaufmann, San Francisco, 1998
- [8] Rogala, T.: *Indirect method of learning weights parameters of Intuitionistic Statement Networks*. W: Intelligent systems and applications. Extended and selected results from the SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys) 2015. Red: Yaxin Bi, Supriya Kapoor, Rahul Bhatia. ss. 405-426, Berlin : Springer International Publishing, 2016
- [9] Rogala, T.: *Learning of parameters of intuitionistic statement networks*. W: IntelliSys 2015. Proceedings of 2015 SAI Intelligent Systems Conference (IntelliSys), Listopad 10-11, United Kingdom. Piscataway : IEEE, 2015, ss. 937-943, Londyn, 2015

Sebastian RYZDIK*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny,
Politechnika Śląska, Gliwice

*Sebastian.Ryzdzik@polsl.pl

ZASTOSOWANIE MODELI AUTOGENERUJĄCYCH W OPTYMALIZACJI GENETYCZNEJ KONSTRUKCJI

1. Wstęp

Proces projektowo-konstrukcyjny jest procesem twórczym, w którym wiedza odgrywa kluczową rolę [8][9]. Rezultatem podjętych działań twórczych jest dokumentacja przyszłego środka technicznego, będąca podstawą do wytworzenia i eksploataowania oferowanego odbiorcy końcowemu produktu [3]. Opracowana dokumentacja zawiera przede wszystkim postać geometryczną, obecnie zapisaną jako plik zawierający dane dla systemu CAD, pozwalające na odtworzenie geometrycznego modelu przestrzennego, oraz dodatkowe dane uszczegóławiające opracowany model, jak parametry zastosowanego tworzywa, wiązania określające wzajemne położenie elementów w złożeniu, czy dane dla procesów wytwórczych.

Jednym z elementów procesu projektowo-konstrukcyjnego jest optymalizacja cech konstrukcyjnych ze względu na przyjęte kryteria, jak: minimalna masa (objętość), maksymalna długość, maksymalny stosunek powierzchni do objętości, minimalne ugięcie, maksymalny moment, maksymalna moc itd. Bardzo często w tym procesie należy uwzględnić wiele kryteriów naraz, często sprzecznych ze sobą. Wówczas takie zadanie sprowadza się do tzw. *optymalizacji wielokryterialnej*. Jedną z metod pozwalających na znalezienie rozwiązań optymalnych jest *algorytm genetyczny*. Kryteria optymalizacyjne określają funkcję celu, której wartości mogą osiągać ekstrema lub mogą mieć wartości wyrównane w pewnych punktach lub odcinkach.

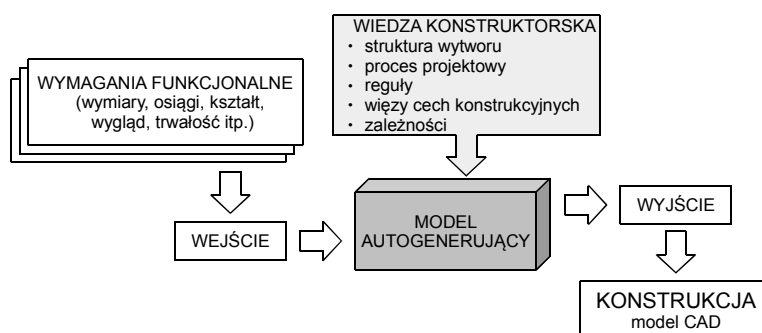
Algorytmy genetyczne są znane już od ponad 55 lat i niejednokrotnie udowodniły swoją przydatność w procesach optymalizacji [1]. Kluczowymi elementami tej metody są przyjęty sposób opisu genotypu osobników oraz postać funkcji przystosowania, której celem jest ocena osobników jako miara dopasowania do „środowiska”, czyli w istocie do kryteriów (ograniczeń), które to „środowisko” definiują. Zadaniem genotypu jest przechowywanie informacji o wartościach uwzględnianych kryteriów (ograniczeń). Oznacza to, że przyjęty sposób jego opisu ściśle zależy od typu i zakresu przyjmowanych wartości kryteriów. Algorytmy genetyczne pozwalają w akceptowalnym czasie przeszukać dużą przestrzeń potencjalnych rozwiązań, co w przypadku zadań związanych z optymalizacją wielokryterialną jest niewątpliwą zaletą. Otrzymywane rozwiązania są zwykle, co jest naturalną cechą *algorytmów heurystycznych*, rozwiązaniami globalnie optymalnymi, a poprawnie dobrane parametry algorytmu genetycznego pozwalają takie optimum znaleźć.

2. Modele autogenerujące

Wiele zadań podejmowanych przez konstruktorów jest zaliczanych do tzw. *zadań rutynowych*, czyli zadań często wykonywanych, o ustalonym przebiegu [6]. Dla tego typu zadań istnieją gotowe metody i algorytmy, które pozwalają wyznaczyć parametry konstruowanego układu. Przykładem zadania określanego mianem „rutynowe” może być zadanie wyznaczania parametrów układu napędowego, czyli np.: moc i prędkość obrotową silnika, przełożenie przekładni, rozmiary sprzęgła itd. Problem pojawia się, gdy konstruktor nie potrafi określić wartości wszystkich parametrów, które są potrzeb-

ne do rozwiązania danego zadania konstrukcyjnego lub dysponuje tylko wartościami jakościowymi tych parametrów. Jako przyczyny takiej sytuacji można wymienić:

- opracowano wstępne założenia projektowo-konstrukcyjne, w których parametry posiadają wartości o charakterze jakościowym, np.: „duża prędkość”,
- dane o zastosowanych podzespołach w projektowanym urządzeniu są niepełne lub ich brak, co jest częstym problemem w projektach realizowanych wspólnie,
- realizowany jest proces generowania pola możliwych rozwiązań różnych wariantów potencjalnych rozwiązań.



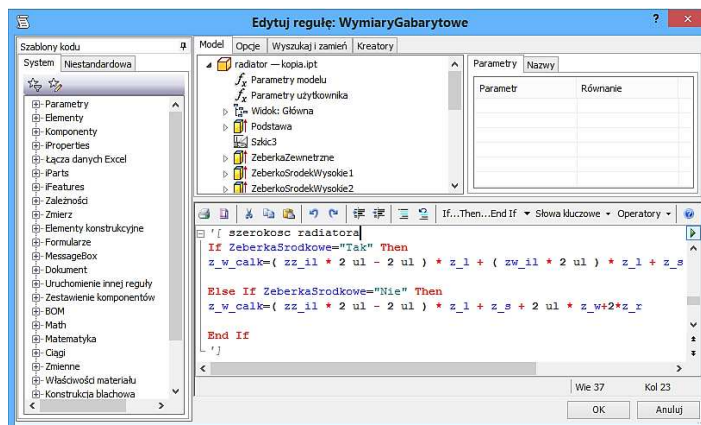
Rys. 1. Schemat działania modelu autogenerującego [10]

W celu usprawnienia realizacji zadań o charakterze rutynowym, można zastosować tzw. *modele autogenerujące*, inaczej nazywane *modelami zintegrowanymi* [4][5][8][10]. Modele autogenerujące są specyficznym typem modeli tworzonych w środowiskach CAx. Tego typu model jest tworzony na bazie *modelu parametrycznego*. W następnym kroku model parametryczny jest łączony z bazą wiedzy konstruktorskiej, zawierającej relacje pozwalające połączyć cechy tworzywowe i dynamiczne (montażowe) z cechami geometrycznymi (Rys. 1). W rezultacie otrzymany model autogenerujący pozwala na zastosowanie relacji pomiędzy cechami funkcjonalnymi i cechami konstrukcyjnymi, zapisanymi jako zestawy reguł i formuły obliczeniowe, a finalnie na automatyczne generowanie geometrycznej postaci konstrukcyjnej. Wynika z tego, że model autogenerujący może być uznawany za szablon danej klasy obiektów technicznych.

Tworzenie modeli autogenerujących jest trudne, ale ich zalety są doceniane w momencie wprowadzania zmian konstrukcyjnych. Wówczas konstruktor ma dostęp do wiedzy, która była podstawą opracowania pierwotnego rozwiązania konstrukcyjnego, co ułatwia implementację tych zmian.

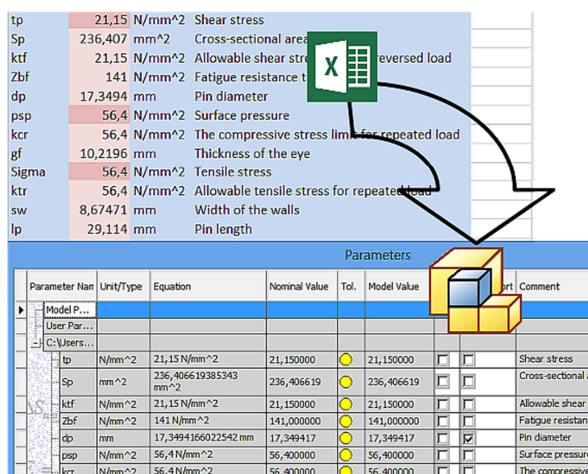
Jak już napisano, model autogenerujący powstaje na bazie modelu parametrycznego. Tworzenie modeli trójwymiarowych rozpoczyna się od utworzenia szkicu geometrycznej postaci konstrukcyjnej, a następnie nadania układu wymiarów na tę postać. Definiowane wymiary dzieli się na wymiary o stałej wartości (tzw. *wymiary stałe*) i wymiary o zmiennej wartości (tzw. *wymiary otwarte*). Taki sposób tworzenia geometrycznych cech konstrukcyjnych nazywa się *parametryzacją* [7][8].

Parametryzacja wiąże ze sobą jakościowe cechy konstrukcyjne – geometryczną postać konstrukcyjną wraz z układem wymiarów, oraz ilościowe cechy konstrukcyjne – wartości wymiarów. Najprostsze sposoby parametryzacji opierają się na relacjach geometrycznych (zapisywanych w postaci formuł matematycznych) pomiędzy wartościami wymiarów wybranych elementów geometrii, np. długościami odcinków. Parametryzacja relacyjna pozwala na zmianę postaci geometrycznej elementu przez zmianę wartości wymiarów wyznaczanych w sposób relacyjny, odnosząc się do określonych zmiennych niezależnych, np. średnica jednego otworu łącznika ma wpływ na średnicę drugiego otworu tego łącznika oraz na inne wartości wymiarów postaci konstrukcyjnej, co pokazano jako przykład na Rys. 2.



Rys. 4. Przykład zastosowania Edytora reguł

Innymi dostępnymi źródłami wiedzy mogą być arkusze kalkulacyjne, których wybrane komórki można powiązać referencyjnie z wybranymi parametrami modelu geometrycznego. Wówczas model obliczeniowy jest zapisany w arkuszu, a model geometryczny jest tworzony z użyciem końcowych wyników obliczeń reprezentowanych przez wyróżnione parametry (Rys. 5).



Rys. 5. Powiązanie arkusza kalkulacyjnego z parametrami modelu geometrycznego

Wydruk 1. Przykład programowej zmiany wartości wybranego parametru

```

1 'Get the Parameters object
2 Dim oParameters As Parameters
3 oParameters = InvApplication.ActiveDocument.ComponentDefinition.Parameters
4 'Get the parameter named "Length"
5 Dim oLengthParam As Parameter
6 oLengthParam = oParameters.Item("Length")
8 'Change the equation of the parameter
9 oLengthParam.Expression = "35 mm"
10 'Update the document
11 InvApplication.ActiveDocument.Update()

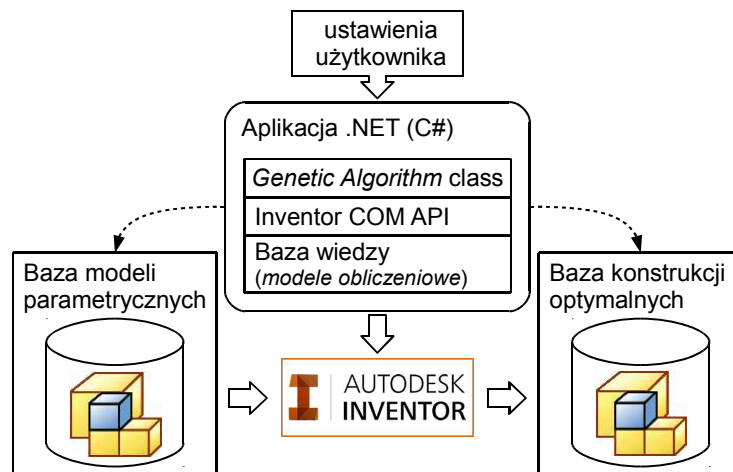
```

Bardziej zaawansowanym sposobem dostępu do wartości parametrów oraz innych właściwości modeli, utworzonych w danym systemie CAx, jest *Interfejs programowania aplikacji* (ang. *application programming interface*, API). Taki sposób wymaga od użytkownika znajomości technik programowania, ale jest najbardziej uniwersalną i wydajną metodą wprowadzania zmian w modelach geometrycznych. Poniżej pokazano frag-

ment kodu napisanego w języku programowania VisualBasic, w którym zmianie poddano parametr (wymiar) o nazwie „Length” (wiersze 5-9 na Wydruku 1).

3. Przykłady zadań optymalizacyjnych

Na potrzeby zadania optymalizacyjnego przyjęto, że będzie ono przeprowadzone na modelach autogenerujących z zastosowaniem algorytmu genetycznego. Optymalizowane będą model radiatora oraz wybrane dwa kształtowniki wchodzące w skład prostego wysięgnika promieniowego. Na Rys. 6 pokazano schemat środowiska obliczeniowego, w którym przeprowadzono procesy optymalizacyjne. Głównym elementem jest opracowana aplikacja komputerowa, której zadaniem jest sterowanie całym procesem. W skład tej aplikacji wchodzi: klasa Genetic Algorithm [11], interfejs programowania aplikacji programu Autodesk Inventor oraz baza wiedzy, która zawiera kryteria ograniczające, formalne definicje funkcji celu oraz matematyczne modele obliczeniowe. Pozostałe elementy środowiska, to: baza modeli parametrycznych, baza konstrukcji optymalnych oraz oprogramowanie Autodesk Inventor. Przebieg procesu optymalizacyjnego jest zależny od ustawień definiowanych przez użytkownika.



Rys. 6. Schemat opracowanego środowiska obliczeniowego

3.1. Optymalizacja pola powierzchni i objętości radiatora

W tym zadaniu procesowi optymalizacji poddany został radiator (Rys. 3). Dostępny model parametryczny miał zdefiniowanych 49 parametrów, w tym 3 parametry miały przypisane formuły obliczeniowe. W algorytmie genetycznym wprowadzono następujące kryteria ograniczające pole poszukiwanych rozwiązań:

- szerokość radiatora $\in [40; 140][mm]$
- wysokość żebra $\in [10; 40][mm]$
- wysokość żebra wewnętrznego $\in [10; \text{Wysokość żebra}/2][mm]$
- liczba żeber $\in [2; 10]$
- odległość pomiędzy żebrami $\in [10; 15][mm]$
- żebra wewnętrzne $\in [TAK; NIE]$
- liczba żeber wewnętrznych $\in [1; 5]$
- grubość żebra $\in [3; 5][mm]$
- minimalne pole powierzchni emisji ciepła $\in [0; 40000][mm^2]$

Funkcję celu zdefiniowano jako

$$F_t = \left(\frac{\text{powierzchnia}}{\text{objętość}} \right) \rightarrow MAX \quad (1)$$

Rozwiązanie A

Ocena: 99,58%

Powierzchnia: 40168[mm²]

Objętość: 76518[mm³]

Szerokość: 61.91[mm]

Wysokość zębra: 24.56[mm]

Grubość zębra: 3.29[mm]

Rozwiązanie B

Ocena: 99,57%

Powierzchnia: 40176[mm²]

Objętość: 77269[mm³]

Szerokość: 61.91[mm]

Wysokość zębra: 24.56[mm]

Grubość zębra: 3.33[mm]

Rozwiązanie C

Ocena: 96,03%

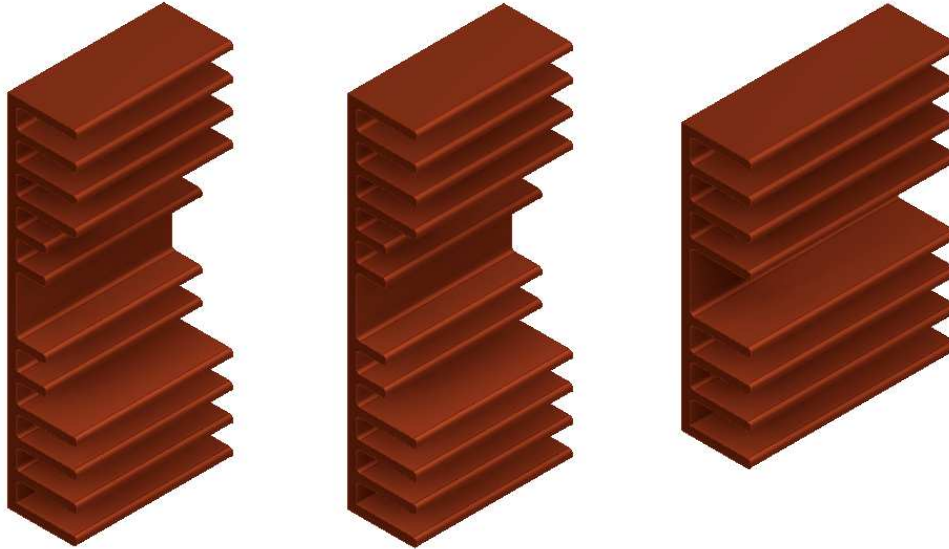
Powierzchnia: 41587[mm²]

Objętość: 77818[mm³]

Szerokość: 81.79[mm]

Wysokość zębra: 24.56[mm]

Grubość zębra: 3.29[mm]



Rys. 7. Przykłady wyników zadania optymalizacji radiatora

Przyjęto następujące parametry algorytmu genetycznego:

- Liczba osobników w populacji: 25
- Rozmiar genomu: 7 (*Szerokość radiatora, Wysokość zębra, Liczba zębów, Odległość pomiędzy zębami, Żebra wewnętrzne, Liczba zębów wewnętrznych, Grubość zębra*)
- Współczynnik krzyżowania: 0.80
- Współczynnik mutacji: 0.10

Po przeprowadzeniu obliczeń najlepsze rozwiązanie zostało ocenione na 99.58% i posiadało pole powierzchni emisji ciepła równe 40168[mm²] oraz objętość równą 76518[mm³]. Na Rys. 7A pokazano najlepsze rozwiązanie oraz dwa inne, które uzyskały nieznacznie niższe oceny, ale również te rozwiązania można uznać za rozwiązania, które mogłyby zostać ostatecznie zaakceptowane.

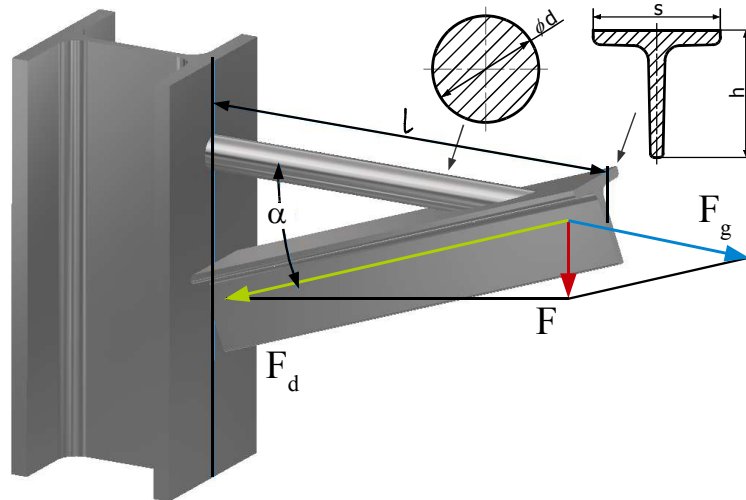
3.2. Optymalizacja wielkości przekrojów poprzecznych kształtowników

W tym zadaniu procesowi optymalizacji poddane zostały dwa kształtowniki (pręty o przekrojach teowym i okrągłym) wchodzące w skład wysięgnika promieniowego, którego ogólną postać pokazano na Rys. 8. Dostępny model parametryczny złożenia miał zdefiniowanych ponad 40 parametrów, w tym 8 parametrów miało przypisane formuły obliczeniowe. W algorytmie genetycznym wprowadzono następujące kryteria ograniczające pole poszukiwanych rozwiązań:

- *kąt* $\alpha \in [10; 80]^\circ$
- *średnica przekroju okrągłego* $d = f(F, \alpha, k_{rj}, x_w)[mm]$
- *wysokość przekroju teowego* $h = f(F, \alpha, E, \mu, l, x_w)[mm]$

W przypadku pręta o przekroju okrągłym jego średnica d jest wyznaczana na podstawie naprężeń rozciągających. Składowa F_g siły F wynosi

$$F_g = F \tan\left(\frac{\pi(90^\circ - \alpha)}{180}\right) [N]. \quad (2)$$



Rys. 8. Model geometryczny wysięgnika promieniowego z naniesionym układem sił

Minimalna siła krytyczna została określona wzorem

$$F_{kr1} = F_g x_w [N], \quad (3)$$

gdzie: x_w – współczynnik bezpieczeństwa (przyjęto $x_w = 1.5$).

Minimalna pole przekroju poprzecznego określono zależnością

$$S_g = \frac{F_{kr1}}{k_{rj}} [m^2], \quad (4)$$

gdzie: k_{rj} – naprężenia dopuszczalne dla rozciągania (przyjęto $k_{rj} = 44$ [MPa]).

Ostatecznie, wartość średnicy d przekroju poprzecznego pręta okrągłego wynosi

$$d = \sqrt{\frac{4S_g}{\pi}} [m]. \quad (5)$$

W przypadku teownika, jego wysokość h jest wyznaczana na podstawie naprężeń ściskających. Składowa wzdłużna F_d siły F wynosi

$$F_d = \frac{F}{\sin\left(\frac{\pi\alpha}{180}\right)} [N]. \quad (6)$$

Minimalna siła krytyczna została określona wzorem

$$F_{kr2} = F_d x_w [N], \quad (7)$$

gdzie: x_w – współczynnik bezpieczeństwa (przyjęto $x_w = 1.5$).

Rzeczywista długość pręta jest wyznaczana z zależności

$$l_d = \frac{l}{\cos\left(\frac{\pi\alpha}{180}\right)} [m], \quad (8)$$

gdzie: l – nominalny zasięg wysięgnika (przyjęto $l = 2.5$ [m]).

Minimalny promień bezwładności jest obliczany ze wzoru

$$J_x = \frac{F_{kr2}(\mu l_d)^2}{\pi^2 E} [m^4], \quad (9)$$

gdzie: E – moduł Younga nominalny [MPa], μ – współczynnik wyboczeniowy (przyjęto $\mu = 1$).

Ostatecznie, wysokość h przekroju teowego (Rys. 8) jest wyznaczana z zależności

$$h = \sqrt[4]{12J_x} [m]. \quad (10)$$

Funkcję celu zdefiniowano jako

$$F_t = masa \rightarrow MIN \quad (11)$$

Przyjęto następujące parametry algorytmu genetycznego:

- Liczba osobników w populacji: 100
- Rozmiar genomu: 1 (Kąt α)
- Współczynnik krzyżowania: 0.80
- Współczynnik mutacji: 0.10

Po przeprowadzeniu obliczeń (dla wartości siły F równej 8[kN]) najlepsze rozwiązanie zostało wyznaczone dla kąta α równego 43.05[°], a wartości pozostałych własności były następujące:

- masa całego wysięgnika = 51.08[kg],
- składowe siły $F = 8$ [kN]: $F_g = 8.56$ [kN], $F_d = 11.72$ [kN],
- średnica pręta okrągłego $d = 19.28$ [mm],
- wysokość teownika $h = 33.04$ [mm].

4. Podsumowanie

W artykule pokazano sposób optymalizacji konstrukcji reprezentowanej za pomocą modeli autogenerujących (zwanymi inaczej modelami zintegrowanymi). Jednym z elementów takich modeli jest formalnie zapisana wiedza konstrukcyjna, która ostatecznie ma wpływ na końcową postać i rozmiary produktu. Pomimo, że tworzenie modeli autogenerujących jest trudne, to ich zalety są doceniane w sytuacji wprowadzania zmian konstrukcyjnych. Wówczas konstruktor ma dostęp do zapisanej wiedzy, co ułatwia wprowadzanie zmian. W procesie optymalizacji wielokryterialnej użyto algorytmu genetycznego, jako znanej i sprawdzonej metody optymalizacji heurystycznej. Pokazany sposób może znaleźć zastosowanie w poszukiwaniu optymalnych rozwiązań pojedynczych elementów oraz ich złożzeń utworzonych w zaawansowanym systemie CAx.

Literatura

- [1] Arabas J.: *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*. Warszawa: WNT, 2001
- [2] Autodesk, Inc.: *Inventor - Oprogramowanie CAD 3D do rozwoju produktów*. [on-line] <http://www.autodesk.pl/inventor>, dostęp 2017-10-04
- [3] Dietrych J.: *System i konstrukcja*, WNT, Warszawa, 1978
- [4] Rzydzik S., Skarka W.: *Formal model for the purpose of generative modeling based on multi-agent system*, in: Symposium on Methods of Artificial Intelligence, Gliwice, November 2009
- [5] Rzydzik S., Skarka W.: *Multiagent system for aiding designing process*, in.: *New World Situation: New Directions In Concurrent Engineering*, Springer-Verlag, 2010, Proceedings of the 17th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, Kraków, September 6-10, 2010
- [6] Rzydzik S.: *Projekt systemu doradczego wspomagającego kompletację elementów i zespołów maszyn*. Zeszyt Naukowy Politechniki Śląskiej, Transport, z. 83, s. 235-242, 2014
- [7] Rzydzik S.: *Projekt systemu udostępniania modeli elementów dla potrzeb generowania ich złożzeń*. XI Forum Inżynierskie ProCAx, Sosnowiec, 2-4.X.2012. [CD-ROM], Mechanik 2013 R. 86, nr 2
- [8] Rzydzik S.: *Rozproszony system komputerowego wspomaganie procesu projektowo-konstrukcyjnego*. Monografia 475, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013
- [9] Rzydzik S.: *System gromadzenia wiedzy o komponentach*. XII Forum Inżynierskie ProCAx, Sosnowiec, 2-3.X.2013. [CD-ROM], Mechanik 2014 R. 87, nr 2
- [10] Skarka W.: *Metodologia procesu projektowo-konstrukcyjnego opartego na wiedzy*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007
- [11] Yet Another Chris: *Introduction to Genetic Algorithms in C#*. [on-line] <http://www.anotherchris.net/csharp/introduction-to-genetic-algorithms-in-csharp>, dostęp 2017-10-04

Wojciech SKARKA¹, Ryszard SKOBERLA², Mateusz TYCZKA³, Mateusz WĄSIK⁴

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) wojciech.skarka@polsl.pl

2) ryszard.skoberla@polsl.pl

3) mateusz.tyczka@polsl.pl

4) mateusz.wasik@polsl.pl

SMART POWER – HISTORIA ROZWOJU PROJEKTU STUDENCKIEGO W KONTEKŚCIE REALIZACJI PRAC KONSTRUKCYJNYCH I NAUKOWO-BADAWCZYCH

1. Wstęp

Ciągły rozwój techniki przedstawia coraz to nowe rozwiązania, jednocześnie dyktując nowe trendy rozwoju. Powszechnie stosowane od wielu lat rozwiązania zaczynają być rozwiązaniami niedostatecznie odpowiadającymi ewoluującym oraz nowopowstałym potrzebom. Rozwój pokrewnych dziedzin nauki niweluje wiele przeciwieństw w zastosowaniu danych technologii w motoryzacji oraz stwarza nowe możliwości dla konstruktorów. Potrzeby optymalizacji w celu zmniejszenia zużycia paliw i emisji szkodliwych związków chemicznych do atmosfery w połączeniu z kwestiami ekonomicznymi stają się poważnym czynnikiem napędowym konieczności opracowania i wprowadzenia nowatorskich rozwiązań w dziedzinie napędów samochodów miejskich. Po drugiej stronie zapotrzebowania znajdują się istniejące i dotychczas nierozwiązane problemy klasycznych metod realizowania napędu pojazdów mechanicznych. Przykładem takiego problemu może być, szczególnie zauważalna w ostatnich latach rosnąca popularność samochodów elektrycznych, wprowadzenie których na rynek konsumencki wyznaczyło nowe możliwości dla konstruktorów, jak również stało się źródłem nowych potrzeb. Zespół Smart Power, grupa studentów - pasjonatów ze Studenckiego Koła Naukowego Modelowania Konstrukcji Maszyn podążając za aktualnie panującymi trendami oraz rozwojem motoryzacji stara się odpowiedzieć na nowopowstałe potrzeby w dziedzinie miejskich wysokowydajnych elektrycznych pojazdów łącząc w swoich pojazdach budowanych na zawody Shell Eco-marathon dotychczasowe osiągnięcia techniki z nowoczesnymi technologiami konstruowania i napędzania pojazdów.

2. Opis zespołu

Zespół Smart Power jest grupą studentów - pasjonatów ze Studenckiego Koła Naukowego Modelowania Konstrukcji Maszyn (SKN MKM). Działające na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej koło naukowe skupia studentów różnych wydziałów Politechniki Śląskiej. Trzon grupy stanowią studenci wydziału Mechanicznego Technologicznego, ale w pracach uczestniczą także osoby z wydziału Automatyki Elektroniki i Informatyki, Elektrycznego i Inżynierii Środowiska i Energetyki. Wspólnie wykonują projekt mający na celu przygotowanie bolidów do startu w wyścigu Shell Eco-marathon. Zespół uczestniczy także w innych zawodach i konkursach związanych z innowacyjnymi rozwiązaniami w technice motoryzacyjnej, efektywnością energetyczną,

napędami elektrycznymi i ekologicznymi źródłami energii. Pomysł uczestnictwa w zawodach SEM zrodził się jeszcze w roku 2011. Rozpoczęto prace koncepcyjne nad pojazdem elektrycznym, któremu nadano nazwę MuSHELLka w nawiązaniu do nazwy koncernu paliwowego organizującego zawody. Od tego momentu rozpoczął się intensywny rozwój zespołu, który zaowocował zbudowaniem kilku bolidów i osiągnięciem rekordowych wyników.



Rys.1. Zespół Smart Power

Struktura zespołu

Zespół wypracował w ciągu kilku lat działalności strukturę organizacyjną umożliwiającą rozwój nowych konstrukcji i kształcenie studentów. Kierownikiem projektu i opiekunem studenckiego koła naukowego jest dr hab. inż. Wojciech Skarka prof. nzw w Pol. Śl. Opiekunami poszczególnych zespołów studentów są pracownicy i doktoranci, którzy sami uczestniczyli w poprzednich latach w projekcie jako studenci: dr inż. Mirosław Targosz, mgr inż. Mateusz Tyczka, mgr inż. Ryszard Skoberla, mgr inż. Mateusz Wąsik. Zespół jest podzielony na grupy realizujące odrębne specjalistyczne zadania dotyczące układów mechanicznych, układów automatyki, marketingu i logistyki. Mechanicy rozwijają kompozytową konstrukcję nośną, zawieszenie, układy kierowniczy, hamulcowy i napędowy. Automatycy doskonalą układy sterowania silników i ogniwa wodorowego, układ telemetrii oraz układy wspomaganie bezpieczeństwa kierowcy, a także mechatroniczne układy pojazdu. Dodatkowo zespół studentów realizuje zadania marketingowe i wizerunkowe poprzez edycję strony www.smartpower.polsl.pl, organizowanie wyjazdów na wydarzenia medialne, przygotowywanie materiału zdjęciowego i filmowego. Sporo wysiłku wymaga zorganizowanie samych wyjazdów na konkursy zagraniczne, transport sprzętu i aparatury oraz osób. W tych ostatnich zadaniach zespół wspomagany jest przez grupę kierowców pojazdów, którzy oprócz samego doskonalenia techniki prowadzenia pojazdu przygotowują sprzęt niezbędny do jazdy oraz zapewniający komunikację kierowcy. Jednym z istotniejszych zadań jest przygotowanie i nadzorowanie strategii wyścigu, zadania te są co roku realizowane przez specjalnie wyznaczone do tego celu osoby. Dotychczas zespół zaprojektował i zbudował następujące pojazdy: MuSHELLka (startująca w klasie Prototype Battery Electric), Bytel (UrbanConcept Battery Electric), Bytel hydrogen (UrbanConcept Hydrogen), hydroGENIUS (UrbanConcept Hydrogen).

3. Zrealizowane projekty pojazdów

Zespół w trakcie swojej pracy stworzył kilka pojazdów. Ich projekty ewoluowały wraz z kolejnymi startami w zawodach i nabieraniem doświadczenia w konstruowaniu tego typu obiektów.

Pierwszym pojazdem stworzonym na potrzeby zawodów Shell Eco-marathon był bolid MuSHELLka, który powstał w 2012. Jest to lekki pojazd z napędem elektrycznym startujący w klasie Prototype. Klasa ta charakteryzuje się małymi gabarytami oraz niewielką masą pojazdów. Charakterystyczne jest to, że kierowca podczas jazdy ma pozycję leżącą. Pojazd został wykonany jako nadwozie samonośne co pozwoliło na uzyskanie niskiej masy sięgającej 35 kg. Wykonane ono zostało z kompozytu epoksydowego z dyspersyjnymi wzmocnieniami włóknami aramidowo-karbonowymi. MuSHELLka napędzana jest wysoko sprawnym silnikiem BLDC o mocy nominalnej 500 W. Pojazd podlegał różnym modyfikacjom startując przez kolejne cztery lata. Najlepszym uzyskanym wynikiem był rezultat 504 km/kWh, który zapewnił nam wysokie 8 miejsce podczas zawodów.



Rys.2. Pojazd MuSHELLka na torze w Rotterdamie

Kolejnym zrealizowanym projektem był projekt pojazdu BYTEL. Jest to pojazd o znacznie większych gabarytach, startujący w kategorii UrbanConcept. Kategoria ta ma znacząco zwiększone wymagania względem pojazdów z kategorii Prototype. Kierowca zachowuje podczas jazdy pozycję siedzącą, zaś pojazd jest uproszczoną wersją małego samochodu miejskiego. BYTEL powstał jako pojazd o napędzie elektrycznym z dwoma silnikami BLDC w piastach, o mocy 500 W każdy. Zastosowano oddzielne nadwozie, które można zdemontować umożliwiając łatwy dostęp do wszystkich najważniejszych układów. Zapewnia ono niskie opory aerodynamiczne, zaś zastosowanie kompozytu karbonu w osnowie epoksydowej umożliwiło redukcję masy nadwozia. Po pierwszym starcie w klasie BatteryElectric i zajęciu 12 miejsca w 2014 roku, podjęto decyzję o zmianie źródła zasilania pojazdu z bateryjnego na ogniwo paliwowe zasilane wodorem. Wraz ze zmianą sposobu zasilania zmieniono także napęd pojazdu na dwa silniki BLDC wraz z zaawansowanym układem przeniesienia napędu. Po tych modyfikacjach podjęto decyzję o zmianie nazwy pojazdu na HydroGENIUS. Największym osiągnięciem pojazdu jest zajęcie 2 miejsca w klasie Hydrogen UrbanConcept w 2016 roku na zawodach Shell Eco-Marathon w Londynie.



Rys.3. Pojazd HydroGENIUS na torze w Londynie

4. Symulacje komputerowe jako podstawa procesu projektowo-konstrukcyjnego w projekcie

Większość prac, określanych mianem inżynierskich, prowadzonych w ramach działalności zespołu Smart Power, wpięra jest prowadzonymi równocześnie pracami naukowo-badawczymi. Jest to nieodzowny element realizowanych projektów, znacząco wpływający na podniesienie zarówno poziomu uzyskiwanych efektów jak i konkurencyjność na arenie międzynarodowej. Kluczową rolę w projekcie o profilu projektowo-konstrukcyjnym odgrywają szeroko pojęte symulacje.

Dla osiągnięcia celu, jakim jest powstanie prototypu spełniającego w jak największym stopniu przyjęte założenia, należy przeprowadzić szereg symulacji o różnej specyfice i dotyczących różnych obszarów. Ogólnie można podzielić je na trzy podstawowe grupy:

- symulacje geometryczne
- symulacje obliczeniowe FEM
- symulacje z wykorzystaniem modelu matematycznego.

Symulacje geometryczne mają na celu weryfikację cech przestrzennych opracowywanych obiektów, ich ergonomię, możliwość integracji z pozostałymi podzespołami oraz zdiagnozowanie ewentualnych kolizji. Bywają to symulacje bardzo proste, jednak są one niezbędne podczas projektowania współbieżnego, a przede wszystkim adaptacyjnego, gdzie istnieje konieczność np. wbudowania podzespołu w istniejącą strukturę.

Symulacje obliczeniowe FEM pozwalają zweryfikować poprawność doboru cech konstrukcyjnych elementów pojazdu jak również stanowią podstawę do optymalizacji tych cech pod kątem struktury, rozmieszczenia czy materiału.

Symulacje z wykorzystaniem modelu matematycznego mają największe znaczenie z punktu widzenia parametrów i osiągów pojazdu. Są symulacjami bardzo złożonymi, wymagającymi zaawansowanego aparatu matematycznego, odpowiedniego oprogramowania i nakładu pracy. W przypadku dobrego modelu matematycznego pozwalają na bardzo dobre odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy oraz zachowania się rozpatrywanego obiektu.

Głównymi symulacjami, będącymi integralną częścią procesu projektowo-konstrukcyjnego w projekcie Smart Power, były:

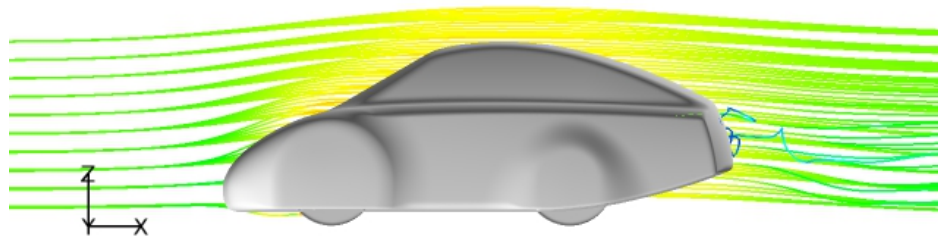
- w grupie symulacji geometrycznych:
 - ergonomiczne
 - geometryczne
 - kinematyczne
- w grupie symulacji obliczeniowych FEM:
 - aerodynamiczne

- wytrzymałościowe
- w grupie symulacji z wykorzystaniem modelu matematycznego
 - zapotrzebowania na energię
 - strategii jazdy (wyznaczenie oraz optymalizacja)

Poszczególne główne grupy symulacji zostaną pokrótce scharakteryzowane w dalszej części artykułu.

Symulacja aerodynamiczna

Symulacje aerodynamiczne są symulacjami mającymi największy wpływ na postać zewnętrzną projektowanych pojazdów. Waga, jaka została przyłożona do analiz aerodynamicznych wynika z rezultatu modelowania matematycznego pojazdu. Okazało się, że w specyficznych warunkach dla jakich projektowany jest pojazd, opory powietrza stanowią główny składnik sumy oporów.

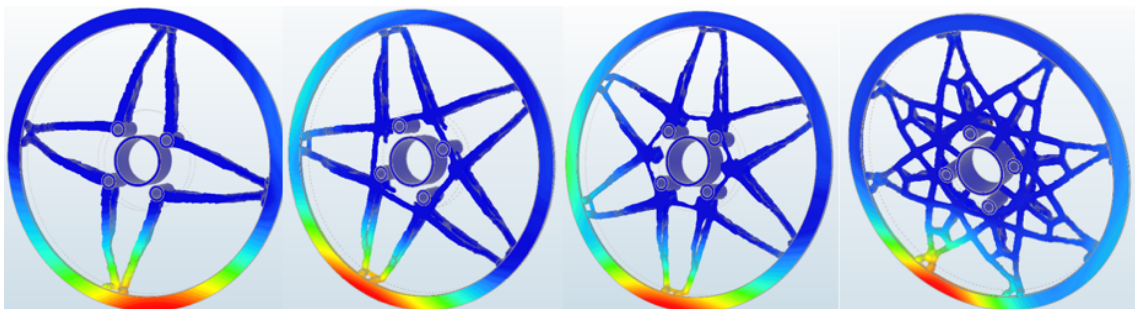


Rys.4. Symulacja CFD rozkładu strug powietrza wokół pojazdu HydroGERNIUS

Metodyka przeprowadzania analiz aerodynamicznych i powiązanej z nimi optymalizacji polegała na opracowaniu wstępnego modelu geometrycznego według opracowanej koncepcji a następnie iteracyjnym symulacjom przepływu w wirtualnym tunelu w programie HyperWorks oraz wprowadzaniu modyfikacji geometrii na podstawie otrzymywanych wyników [1, 2].

Symulacje wytrzymałościowe

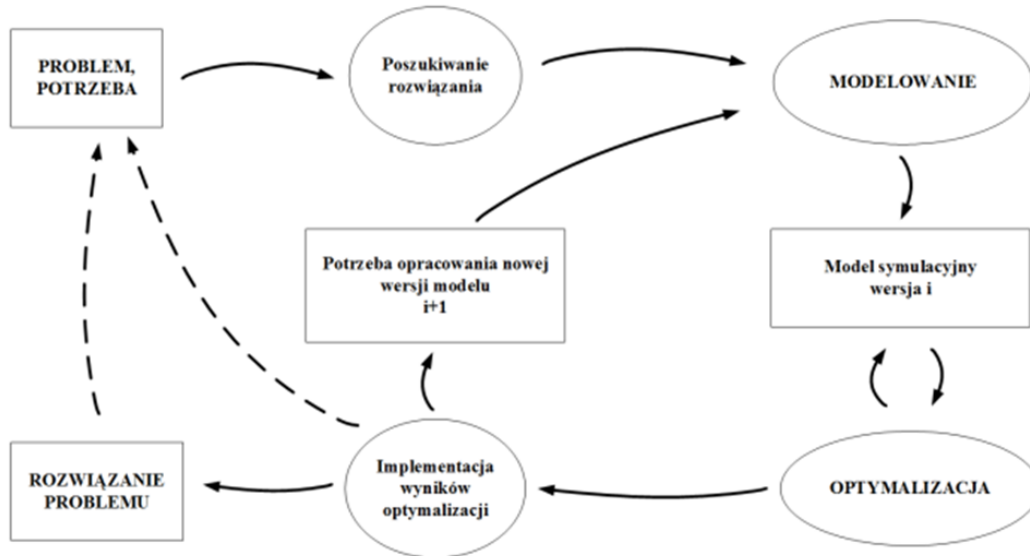
Pod ogólnym określeniem symulacji wytrzymałościowych rozumiane są wszelkie analizy rozkładu naprężeń i odkształceń, wywołanych obciążeniem statycznych jak również impulsami dynamicznymi. W początkowej fazie procesu projektowego analizy te pomagają w doborze wstępnej postaci elementów konstrukcyjnych, pozwalają przewidzieć obszary szczególnie narażone na wytężenie oraz planować strukturę obiektu. W dalszym etapie analizy wytrzymałościowe stają się podstawą zaawansowanych procesów optymalizacji prowadzących do osiągnięcia parametrów zgodnych z założeniami. Procesy te prowadzone są zarówno w kontekście struktury i geometrii obiektu, jak również w zakresie stosowanych materiałów. W pojazdach opracowywanych w ramach projektu Smart Power optymalizacja struktury prowadzona jest w głównej mierze w kierunku minimalizacji masy, w związku z czym symulacje wytrzymałościowe są niezbędnym składnikiem tego procesu.



Rys.5. Rozkład naprężeń w różnych postaciach konstrukcyjnych felgi uzyskanych w drodze optymalizacji topologicznej [3]

Symulacje bazujące na modelu matematycznym

Jest to grupa symulacji, które są najistotniejsze z punktu widzenia eksploatacji, zarządzania energią i optymalizacji wszelkich podzespołów pojazdu [4].



Rys.6. Metodologia modelowania i optymalizacji pojazdów elektrycznych

Dobry i poprawnie zbudowany model pojazdu jest nieodzownym elementem procesu projektowo-konstrukcyjnego obiektu tak specyficznego, jak pojazd wyścigowy. W tym przypadku istnieje konieczność zdefiniowania dwóch modeli: pojazdu oraz warunków zewnętrznych. Dzięki takiemu podejściu cały proces modyfikacji parametrów konstrukcyjnych zostaje przeniesiony do przestrzeni wirtualnej. Powstaje narzędzie, które daje możliwość zasymulowania dowolnego stanu obiektu w wybranych warunkach otoczenia i obserwacji pozwalającej na określanie kierunków zmian, diagnozowanie nieprawidłowości oraz przeprowadzenia szeroko pojętej optymalizacji. Dodatkowo model matematyczny pozwala na wyznaczenie strategii jazdy zorientowanej na określony cel, np. minimalizację zapotrzebowania na energię

Symulacje geometryczne i ergonomiczne

Symulacje geometryczne i ergonomiczne są niezbędne podczas opracowywania środka technicznego z kilku głównych powodów:

- możliwość integracji podzespołów na etapie projektowania
- możliwość dopasowania podzespołów na etapie modyfikacji
- konieczność spełnienia wymagań (np. regulaminowych)
- zapewnienie kierowcy odpowiedniego poziomu komfortu.

Dzięki nim istnieje możliwość wirtualnego testowania różnorodnych rozwiązań technicznych, wersji zmodyfikowanych i rozwojowych stosowanych podzespołów. W przypadku projektu Smart Power i uczestnictwa w zawodach Shell Eco-marathon symulacje geometryczne i kinematyczne nabierają szczególnej roli, ponieważ struktura pewnych obszarów pojazdu jest określona poprzez regulamin np. konieczność przełożenia przez otwór drzwiowy bryły o zadanej geometrii. Również symulacje ergonomiczne są bardzo istotne ze względu na specyficzny układ ciała kierowcy, odbiegający od standardów samochodów osobowych [5-9].

Biorąc pod uwagę ogół przeprowadzonych symulacji, bardzo trudno ustalić „hierarchię” ich ważności, a co za tym idzie, określić, które muszą być przeprowadzone dla zapewnienia oczekiwanego rezultatu, a które mogą zostać ewentualnie pominięte. Można jedynie wskazać pewien ogólny stopień istotności poszczególnych symulacji w odpowiadających im obszarach. Dla przykładu: można stwierdzić, że analiza aerodynamiczna ma największe znaczenie z punktu widzenia osiągnięć pojazdu, co zostało

ustalone na podstawie modelu matematycznego. Zaś analiza geometryczna jest niezbędna dla zapewnienia integralności całego projektu. Takie różnicowanie jest istotne i pomocne w przypadku określania poziomu istotności poszczególnych symulacji oraz kierunku uzależnienia poszczególnych, sprzężonych ze sobą, zagadnień, np. jaka powinna być kolejność symulacji. Jest to istotne dla płynności procesu projektowo-konstrukcyjnego, szczególnie w sytuacji, w której jest on prowadzony w sposób współbieżny, jak w przypadku projektu Smart Power.

3. Historia i osiągnięcia zespołu

Kamienie milowe w historii zespołu

- 2011 Pierwszy udział w zawodach Shell Eco-marathon w roli obserwatora na torze w Lausitz (Niemcy)
- 2012 Debiut w zawodach Shell Eco-marathon jako uczestnik, Rotterdam (Holandia)
- 2013 Zespół odbiera z rąk ówczesnego premiera nagrodę Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego- „Generacja przyszłości” w kwocie niespełna 500 tys. złotych na dalszą działalność.
- 2014 Debiut zespołu w kategorii Urban Battery Electric, po raz pierwszy start dwóch bolidów.
- 2015 Debiut zespołu w kategorii Urban Hydrogen jako pierwszy polski zespół z samochodem zasilanym ogniwem wodorowym

Najważniejsze osiągnięcia zespołu

- 2017 Największy światowy wyścig pojazdów energooszczędnych Shell Eco-marathon Londyn (Wielka Brytania)
 - 5 miejsce w światowych wyścigach Shell Eco-marathon w Londynie (Wielka Brytania) w klasie Urban Concept Hydrogen
- 2016 Największy światowy wyścig pojazdów energooszczędnych Shell Eco-marathon Londyn (Wielka Brytania)
 - 2 miejsce w światowych wyścigach Shell Eco-marathon w Londynie (Wielka Brytania) w klasie Urban Concept Hydrogen
 - Rekord Polski w energooszczędnej jeździe w klasie pojazdów Urban Concept Hydrogen
- 2015 Największy światowy wyścig pojazdów energooszczędnych Shell Eco-marathon Rotterdam (Holandia)
 - 7 miejsce w światowych wyścigach Shell Eco-marathon w Rotterdamie (Holandia) w klasie Urban Concept Hydrogen
 - Rekord Polski w energooszczędnej jeździe w klasie pojazdów Urban Concept Hydrogen – 118 km/m³
 - 8 miejsce w światowych wyścigach Shell Eco-marathon w Rotterdamie (Holandia) w klasie Prototype Battery Electric
 - Rekord Polski w energooszczędnej jeździe w klasie pojazdów Prototype Battery Electric – 503,7 km/kWh
- 2014 Największy światowy wyścig pojazdów energooszczędnych Shell Eco-marathon Rotterdam (Holandia)
 - 12 miejsce Urban Concept Battery Electric
 - Rekord Polski w energooszczędnej jeździe w klasie pojazdów Urban Concept Battery Electric – 59,7 km/kWh
 - 12 miejsce Prototype Battery Electric
- 2013 Największy światowy wyścig pojazdów energooszczędnych Shell Eco-marathon Rotterdam (Holandia)
 - 11 miejsce Prototype Battery Electric

- 2013 Nominacja do nagrody Marka Śląskie w kategorii Nauka przyznawane przez Regionalną Izbę Przemysłowo-Handlową w Gliwicach oraz Urząd Marszałkowski
- 2013 Nagroda Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przyznawana za wybitne osiągnięcia naukowe, organizacyjne i dydaktyczne - nagroda zespołowa dla opiekunów naukowych została przyznana za inspirowanie studentów do twórczej działalności inżynierskiej poprzez kierowanie i opiekę nad interdyscyplinarnymi zespołami studentów osiągającymi sukcesy w zawodach zagranicznych i światowych
- 2012 Największy światowy wyścig pojazdów energooszczędnych Shell Eco-marathon Rotterdam (Holandia)
 - 10 miejsce Prototype Battery Electric

7. Podsumowanie i nakreślenie kierunków dalszych działań

Projekt Smart Power jest konsekwentnie rozwijanym projektem. Dotychczasowe działania obejmują trzy sfery. Rozwój organizacji koła i poszerzanie zaplecza i bazy organizacyjnej. Rozwój metod naukowych oraz rozwój badań naukowych związanych z dziedziną projektu. Konsekwentne poszerzanie i rozwijanie działalności naukowej i projektowej w dziedzinie mobilnych zastosowań napędów elektrycznych. Dotychczasowe działania i osiągnięcia w wyścigach Greenpower oraz Shell Eco-marathon pozwoliły na rozszerzenie w tym roku działań na wyścigi zdalnie sterowanych pojazdów H2AC Hydrogen Horizon Automotive Challenge. Zaplecze naukowo badawcze i organizacyjne wypracowane w trakcie działania projektu dają potencjał dalszego rozszerzania jego zakresu poprzez budowę bolidu elektrycznego do udziału w wyścigach Formuła Student Electric a także budowę modelu samolotu klasy UAV z napędem elektrycznym oraz udział w zawodach SAE AeroDesign.

Literatura

- [1] Wąsik M., Skarka W.: Aerodynamic features optimization of front wheels surroundings for energy efficient car. *Transdisciplinary engineering: crossing boundaries*, 2016, 483-492.
- [2] Wąsik M., Skarka W.: Influence of the windscreens inclination angle on the aerodynamic drag coefficient of the cars designed for the race Shell Eco-marathon based on numerical simulations. *Zesz. Nauk. Inst. Pojaz. PWarsz.*, 2015, 3: 135-141.
- [3] Kolbe M., Skarka W., Skoberla R.: Design and construction of lightweight front suspension system. *XV International Technical Systems Degradation Conference, Liptovsky Mikulas, 30 March - 2 April 2016*, 2016, 117-119.
- [4] Skoberla R., Skarka W.: Design of braking system in the lightweight electric vehicle. *Zesz. Nauk. Inst. Pojaz. PWarsz.*, 2016, 2: 77-83.
- [5] Kolbe M., Skarka W., Skoberla R.: Design and construction of lightweight front suspension system. *XV International Technical Systems Degradation Conference, Liptovsky Mikulas, 30 March - 2 April 2016*, 2016, 117-119.
- [6] Skoberla R., Skarka W.: Design of braking system in the lightweight electric vehicle. *Zesz. Nauk. Inst. Pojaz. PWarsz.*, 2016, 2: 77-83.
- [7] Skoberla R., Skarka W.: Układ napędowy lekkiego pojazdu elektrycznego biorącego udział w zawodach Shell Eco-marathon. *Mechanik*, 2016, 89: 324-325.
- [8] Łach A., Wyleżoł M., Skarka W.: Główne aspekty modelowania nadwozia pojazdu konstruowanego na zawody Shell Eco-marathon. *Mechanik*, 88: 148-151.
- [9] Skarka W., Rzydzik S., Szymon A.: Optymalizacja parametrów geometrycznych układu kierowniczego samochodu wyścigowego. *Mechanik*, 2015, 88: 1-12.

Damian SKUPNIK*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny,
Politechnika Śląska, Gliwice

*damian.skupnik@polsl.pl

ZASTOSOWANIE ALGORYTMU KUKUŁKI DO WIELOKRYTERIALNEJ OPTIMALIZACJI KONSTRUKCJI OBIEKTU TECHNICZNEGO

1. Wstęp

Poprawny proces projektowo-konstrukcyjny złożonego obiektu technicznego w większości wypadków wymaga przeprowadzenia optymalizacji cech konstrukcyjnych z uwzględnieniem różnych kryteriów. Niestety, bardzo często uzyskanie optymalnego rozwiązania ze względu na jedno kryterium oceny, prowadzi do wysoce nieoptymalnego rozwiązania ze względu na inne kryterium.

Formalnie proces optymalizacji wielokryterialnej może być opisany jako poszukiwanie wartości minimalnej

$$\min_{X \in \Omega} F(X) \quad (1)$$

dla zbioru funkcji celów

$$F(X) = \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)\} \quad (2)$$

w dziedzinie zmiennych decyzyjnych $X \in \Omega$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_m], \quad (3)$$

które podlegają pewnym ograniczeniom

$$\begin{aligned} g_i(X) &\leq 0, i \in \{1, 2, \dots, p\}, \\ h_j(X) &= 0, j \in \{1, 2, \dots, q\}, \\ x_k &\leq C, k \in \{1, 2, \dots, m\}, C \in R. \end{aligned} \quad (4)$$

W odniesieniu do optymalizacji jednokryterialnej $F(X) = f(X)$ istnieje bardzo obszerna literatura opisująca zaawansowane algorytmy bazujące najczęściej na metodach optymalizacji gradientowej, iteracyjnej lub heurystycznej. Algorytmy z ostatniej z wymienionych kategorii (np. algorytm genetyczny, symulowanego wyżarzania, mrówkowy, itp.) są szczególnie często stosowane przy rozwiązywaniu trudnych zadań programowania nieliniowego lub problemów klasy NP. W porównaniu z algorytmami bazującymi na metodach gradientowych, algorytmy heurystyczne cechują się relatywnie mniejszą wrażliwością na występowanie optimum lokalnych i bardzo często prowadzą do wystarczająco dobrego rozwiązania (suboptymalnego).

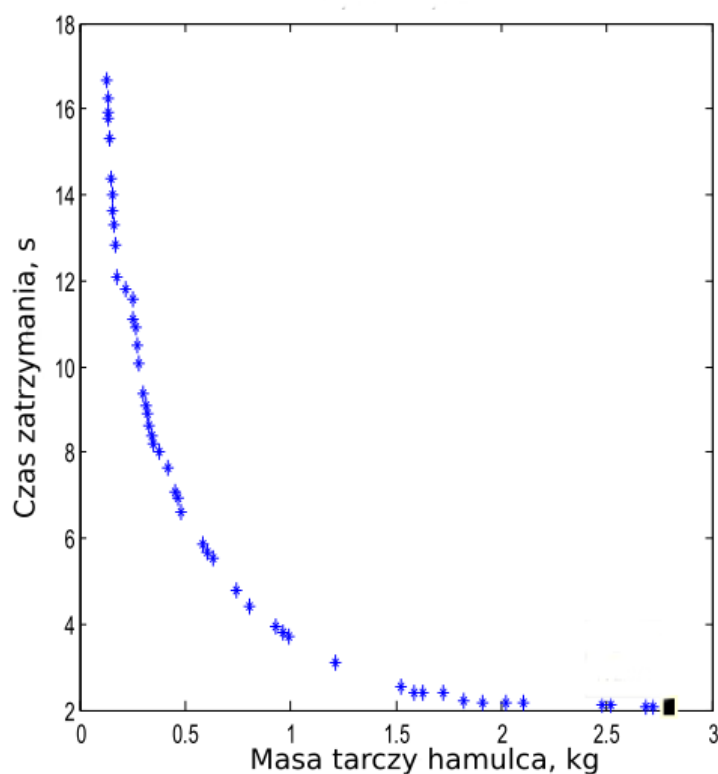
Problem optymalizacji wielokryterialnej nie jest tak szeroko opisywany w literaturze. Generalnie większość publikacji dotyczy określenia rozwiązania optymalnego poprzez wyznaczenie tzw. frontu Pareto (rys. 1), czyli zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto i dokonanie wyboru jednego lub kilku z nich.

Rozwiązanie jest optymalne w sensie Pareto, jeżeli poprawa wartości funkcji celu ze względu na jedno kryterium oceny, oznacza jednocześnie pogorszenie wartości funkcji celu ze względu na inne kryterium oceny.

Zbiór rozwiązań optymalnych w sensie Pareto stanowi podzbiór zbioru wszystkich możliwych rozwiązań, który charakteryzuje się tym, że jego elementy (rozwiązania zadania optymalizacji) nie są zdominowane. Rozwiązanie A dominuje rozwiązanie B wtedy, gdy rozwiązanie A nie jest gorsze od rozwiązania B ze względu na wszystkie rozpatrywane funkcje celu (kryteria) i jednocześnie rozwiązanie A jest lepsze od rozwiązania B w odniesieniu do przynajmniej jednej funkcji celu (kryterium). W przeciwnym wypadku rozwiązania A i B nie są zdominowane i należą do frontu Pareto.

Zadania optymalizacji wielokryterialnej rozwiązywane są również za pomocą algorytmów ewolucyjnych [1-4], także z zastosowaniem idei optimum w sensie Pareto [5-11] oraz z użyciem algorytmów optymalizacji rojem cząstek [12, 13].

Problem opracowania algorytmu umożliwiającego wyznaczenie rozwiązania jak najbardziej zbliżonego do wartości optymalnej i zapewniającego jednocześnie szybką zbieżność wyników do optimum globalnego ciągle istnieje. Jednym z bardziej współczesnych algorytmów tego typu jest algorytm kukułki.



Rys. 1. Przykładowy front Pareto uzyskany za pomocą algorytmu NSGA-II (na podstawie [15])

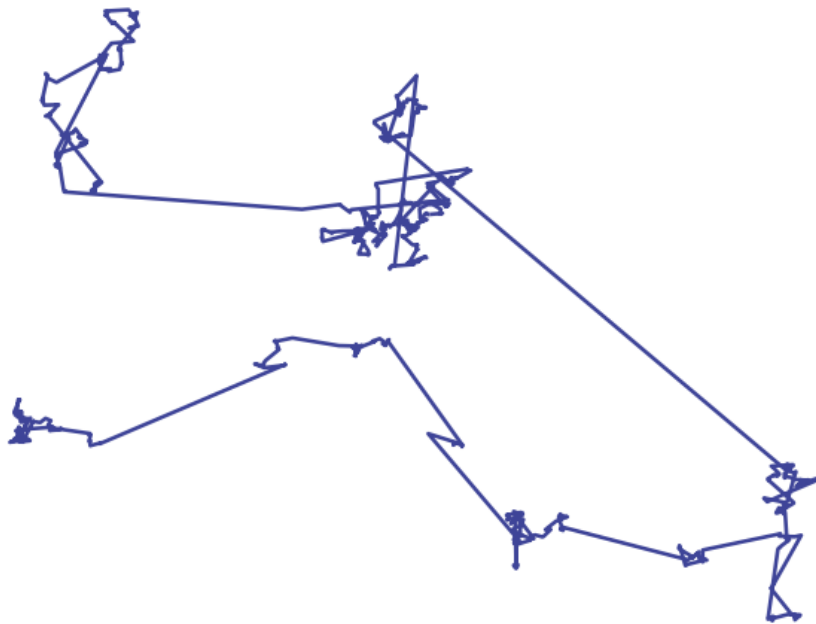
2. Algorytm kukułki

Algorytm kukułki został opracowany przez Xin-she Yang'a i Suash'a Deb'a w 2009 roku [16] na podstawie obserwacji zachowania pewnych gatunków kukułki, które nie budują gniazd tylko podrzucają swoje jaja do gniazd innych gatunków ptaków.

Ptaki, które rozpoznają w swoim gnieździe jaja kukułki albo porzucają to gniazdo i budują nowe w innym miejscu, albo wyrzucają podrzucone jaja. Kukułki starają się zminimalizować to ryzyko poprzez składanie jaj, których kolor i wzór wiernie naśladuje cechy jaj gospodarza gniazda.

Działanie algorytmu kukułki, który stanowi idealizację zachowania tego ptaka i w którym jajo reprezentuje rozwiązanie danego zadania optymalizacyjnego, realizowane jest z zastosowaniem następujących reguł:

- kukułka może złożyć jedno jajo w danym czasie, które podrzuca do losowo wybranego gniazda, przy czym lot w poszukiwaniu gniazda gospodarza realizowany jest w formie tzw. lotu Lévy'ego (błądzenie przypadkowe, w którym długość lotu opisywana jest rozkładem prawdopodobieństwa nie mającym skończonej wariancji, tzn. możliwe są dowolnie duże skoki wartości - rys. 2),
- gniazda zawierające najlepsze jaja przechodzą do kolejnej iteracji,
- liczba gniazd jest stała,
- gospodarz gniazda może rozpoznać jajo kukułki z prawdopodobieństwem $p \in [0,1]$ i w takiej sytuacji porzuca gniazdo, a następnie buduje nowe w losowo wybranym miejscu.



Rys. 2. Przykład lotu Lévy'ego dla 100 iteracji [17]

Do jednej z najważniejszych zalet algorytmu kukułki niewątpliwie należy zaliczyć jego prostotę, ponieważ wymaga podania wartości niewielkiej liczby parametrów (przede wszystkim liczby gniazd n (zwykle $n \in [15,50]$) i prawdopodobieństwa p porzucenia gniazda przez jego gospodarza). Ponadto zastosowanie tego algorytmu pozwala znaleźć wszystkie lokalne optima, jeżeli przyjęta liczba gniazd jest znacznie większa od liczby lokalnych optimów. Jest to szczególnie istotna cecha w odniesieniu do zadań optymalizacji wielokryterialnej.

Zastosowanie algorytmu kukułki okazało się skuteczne w rozwiązywaniu wielu zadań inżynierskich w tym m.in. przy optymalizacji konstrukcji [18]:

- łopatek turbin wiatrowych,
- kratownic,
- ram stalowych,
- sprężyn,
- elementów spawanych,
- przekładni zębatych.

Algorytm kukułki oczekiwał się również różnego rodzaju modyfikacji (np. [19]) mających na celu, m.in. poprawę szybkości zbieżności, umożliwienia działania w przestrzeni dyskretnej, zastosowania w optymalizacji wielokryterialnej. Obszerny przegląd literatury dotyczącej tego algorytmu znajduje się w [18].

3. Przykład zastosowania algorytmu kukułki

Rozpatrywany przykład dotyczy zadania zdefiniowanego w [20], które polega na zoptimalizowaniu konstrukcji tarczy hamulca poprzez zminimalizowanie masy tarczy i zminimalizowanie czasu hamowania. W zadaniu występują cztery zmienne decyzyjne:

- x_1 - promień wewnętrzny tarczy hamulca wyrażony w mm,
- x_2 - promień zewnętrzny tarczy hamulca wyrażony w mm,
- x_3 - siła hamująca wyrażona w N,
- x_4 - liczba powierzchni tarcia.

Funkcja celu umożliwiająca wyznaczenie masy tarczy hamulca w kilogramach dana jest następującym wzorem:

$$f_1(X) = 4,9 \cdot 10^{-5}(x_2^2 - x_1^2)(x_4 - 1), \quad (5)$$

natomiast zależność pozwalająca określić czas hamowania w sekundach ma postać

$$f_2(X) = 9,82 \cdot 10^6(x_2^2 - x_1^2)/x_3 x_4(x_2^3 - x_1^3). \quad (6)$$

Zmienne decyzyjne muszą spełniać następujące ograniczenia:

$$55 \leq x_1 \leq 80 \quad (7)$$

$$75 \leq x_2 \leq 110 \quad (8)$$

$$1000 \leq x_3 \leq 3000 \quad (9)$$

$$2 \leq x_4 \leq 20 \quad (10)$$

$$g_1(X) = x_2 - x_1 \geq 20 \quad (11)$$

$$g_2(X) = 30 - 2,5(x_4 + 1) \geq 0 \quad (12)$$

$$g_3(X) = 0,4 - x_3/3,14(x_2^2 - x_1^2) \geq 0 \quad (13)$$

$$g_4(X) = 1 - 2,22 \cdot 10^{-3}x_3(x_2^3 - x_1^3)/(x_2^2 - x_1^2)^2 \geq 0 \quad (14)$$

$$g_5(X) = 2,66 \cdot 10^{-2}x_3x_4(x_2^3 - x_1^3)/(x_2^2 - x_1^2) \geq 900 \quad (15)$$

Zastosowanie algorytmu kukułki w podstawowej wersji opisanej w punkcie 2. umożliwia rozwiązywanie zadań optymalizacji jednokryterialnej. W związku z tym, że rozpatrywane zadanie określone zależnościami od (5) do (15) wymaga uwzględnienia dwóch kryteriów oceny, zadanie rozwiązano dwukrotnie: raz z uwzględnieniem funkcji celu (5) i drugi raz ze względu na funkcję (6).

Otrzymane wyniki (tab. 1) są zgodne z wynikami przedstawionymi w innych publikacjach dotyczących omawianego zadania (np. [15, 17]). Zaprezentowane w tab. 1 rezultaty dotyczą przypadku, gdy liczba gniazd n była równa 25, a prawdopodobieństwo porzucenia gniazda p wynosiło 0,25.

Tab. 1. Wyniki optymalizacji jednokryterialnej ze względu na funkcję celu $f_1(X)$ i $f_2(X)$

Zmienna decyzyjna	Rozwiązanie optymalne	
	Funkcja celu $f_1(X) = 0,1274$ kg ($f_2(X) = 16,6549$ s)	Funkcja celu $f_2(X) = 2,0711$ s ($f_1(X) = 2,7930$ kg)
x_1	55 mm	80 mm
x_2	75 mm	110 mm
x_3	3000 N	3000 N
x_4	2	11

Optymalne rozwiązanie zadania z jednoczesnym uwzględnieniem obydwu funkcji celów jest możliwe, np. poprzez wyznaczenie frontu Pareto [15, 17]. Można jednak zauważyć, że znajomość optymalnej wartości poszczególnych funkcji celów uzyskanych w drodze optymalizacji jednokryterialnej pozwala zmodyfikować wyrażenia opisujące te funkcje do następujących postaci:

$$f_1'(X) = (4,9 \cdot 10^{-5}(x_2^2 - x_1^2)(x_4 - 1))/0,1274, \quad (16)$$

$$f_2'(X) = (9,82 \cdot 10^6(x_2^2 - x_1^2)/x_3 x_4(x_2^3 - x_1^3))/2,0711. \quad (17)$$

W związku z tym, że wynik wyrażeń (16) i (17) jest bezwymiarowy oraz ich minimalna wartość wynosi 1, możliwe jest określenie nowej funkcji celu stanowiącej ważoną sumę funkcji (16) i (17), tzn.:

$$F(X) = w_1 f_1'(X) + w_2 f_2'(X), \quad (18)$$

gdzie w_1 oraz w_2 to wagi składowych funkcji celu.

W tab. 2. przedstawiono wynik optymalizacji wielokryterialnej (funkcja celu (18)) przy założeniu równoważności kryterium masy tarczy oraz czasu hamowania ($w_1 = w_2 = 1$) i dla identycznych wartości parametrów algorytmu, jak przy optymalizacji jednokryterialnej.

Tab. 2. Wynik optymalizacji wielokryterialnej ze względu na funkcję celu (18)

Zmienna decyzyjna	Funkcja celu $F(X) = 6.65133$ $(f_1(X) = 0,3528 \text{ kg},$ $f_2(X) = 8,0492 \text{ s})$
x_1	80 mm
x_2	100 mm
x_3	3000 N
x_4	2,9019 \approx 3

Analizując wykres frontu Pareto dla rozpatrywanego zadania (rys. 1), można zauważyć, że uzyskany wynik przynależy do zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto. Inne niezdominowane rozwiązania można uzyskać poprzez przyjęcie różnych wartości wag w_1 i w_2 .

4. Podsumowanie

Algorytm kukułki stanowi bardzo dobre narzędzie do rozwiązywania zadań optymalizacji, co zostało dowiedzione w wielu publikacjach ukazujących skuteczność jego działania przy rozwiązywaniu zadań testowych. W wielu wypadkach otrzymywane wyniki okazywały się lepsze w porównaniu z wynikami uzyskiwanymi za pomocą innych algorytmów (np. genetycznych, optymalizacji metodą roju cząstek, itp.). Ta cecha oraz relatywnie prosta postać algorytmu kukułki powoduje, że narzędzie to znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach związanych z pracą inżyniera.

Literatura

- [1] Coello C.A., Lamont G.B., Van Veldhuizen D.A.: Evolutionary algorithms for solving multiobjective problems, 2nd edn. Springer, Berlin, 2007.
- [2] Schaffer J.D., Grefenstette J.J.: Multiobjective learning via genetic algorithms. Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-85), Los Angeles, California, AAAI, pp 593–595, 1985.
- [3] Hajela P., Lin C.Y.: Genetic search strategies in multicriterion optimal design. Struct Optim 4:99–107, 1992.
- [4] Fonseca C.M., Fleming P.J.: Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization. In: Forrest S (ed) Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, San Mateo, California. University of Illinois at Urbana-Champaign, Morgan Kaufmann Publishers, pp 416–423, 1993.
- [5] Zitzler E., Laumanns M., Thiele L.: SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm. In: Giannakoglou K., Tsahalis D., Periaux J., Papailou P., Fogarty T.

- (eds) EUROGEN 2001. Evolutionary methods for design, optimization and control with applications to industrial problems, Athens, Greece, pp 95–100, 2001.
- [6] Zitzler E., Thiele L.: Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE Trans Evol Comput* 3(4):257–271, 1999.
- [7] Knowles J.D., Corne D.W.: Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy. *Evol Comput* 8 (2):149–172, 2000.
- [8] Corne D.W., Jerram N.R., Knowles J.D., Oates M.J.: PESA-II: region based selection in evolutionary multiobjective optimization. In: Spector L., Goodman E.D., Wu A., Langdon W., Voigt H-M, Gen M., Sen S., Dorigo M., Pezeshk S., Garzon M.H., Burke E. (eds), *Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference (GECCO'2001)*. Morgan Kaufmann, San Francisco, pp 283–290, 2001.
- [9] Corne D.W., Knowles J.D.: No free lunch and free leftovers theorems for multiobjective optimisation problems. In: Fonseca C.M., Fleming P.J., Zitzler E., Deb K., Thiele L. (eds): *Evolutionary multicriterion optimization. Second International Conference, EMO 2003, Faro, Portugal, April 2003*. Springer, Lecture Notes in Computer Science, vol 2632, pp 327–341, 2003.
- [10] Erickson M., Mayer A., Horn J.: The niched Pareto genetic algorithm 2 applied to the design of groundwater remediation systems. In: Zitzler E., Deb K., Thiele L., Coello C.A., Corne D. (eds) *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. Springer, Lecture Notes in Computer Science No. 1993, pp 681–695, 2001.
- [11] Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D.E.: A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization. *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, vol 1, Piscataway, New Jersey, June 1994. IEEE Service Center, pp 82–87, 1994.
- [12] Ray L., Liew K. M.: A swarm metaphor for multi objective design optimization. *Engineering Optimization* 2002; 34(2):141–53, 2002.
- [13] Abido, M.A.: Two-Level of Nondominated Solutions Approach To Multiobjective Particle Swarm Optimization. In: *Proceedings of the 2007 Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2007, London, UK, July 7-11*, pp. 726–733, 2007.
- [15] Sabarinath P., Hariharasudhan R., Thansekhar M.R., Saravanan R.: Optimum Design of Disc Brake Using NSGA-II Algorithm. *IJIRSET*, Volume 3, Special Issue 3, March 2014, pp. 1400-1405, 2014.
- [16] Xin-She Yang, Suash Deb.: Cuckoo search via Levy flights. In *Nature & Biologically Inspired Computing*, 2009. NaBIC 2009. World Congress, pages 210–214, IEEE, 2009.
- [17] Xin-She Yang, Suash Deb.: Multiobjective cuckoo search for design optimization. *Computers & Operations Research* 40 (2013), pp. 1616–1624.
- [18] Fister Jr I., Yang X. S., Fister D., Fister I.: Cuckoo search: A brief literature review. In: *Cuckoo Search and Firefly Algorithm: Theory and Applications, Studies in Computational Intelligence*, vol. 516, pp. 49-62, 2014.
- [19] Walton S., Hassan O., Morgan K., Brown M.R.: Modified cuckoo search: a new gradient free optimisation algorithm. *Chaos, Solitons & Fractals*, 44(9):710–718, 2011.
- [20] Osyczka A., Kundu S.: A modified distance method for multicriteria optimization using genetic algorithms. *Computers and Industrial Engineering* 30, 871–882, 1996.

Michał SZMAJDUCH¹, Marek WYLEŻOŁ²

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) michal.szmajduch@polsl.pl

2) marek.wylezol@polsl.pl

ALTERNATYWNA METODA POZYSKIWANIA DANYCH ANTROPOMETRYCZNYCH W MODELOWANIU OBIEKTÓW ERGONOMICZNYCH

1. Wstęp

Każdy człowiek na co dzień spotyka się z wieloma obiektami, które powinny być ergonomiczne, a więc wygodne i bezpieczne w użytkowaniu. Autorzy w swoich badaniach postanowili się skupić na obiektach obsługiwanych za pomocą ręki. W literaturze znajdziemy informację, że ręką nazywany „dystalną część kończyny piersiowej” [1]. Ręka ponadto składa się z części dłoniowej (wewnętrznej) i części grzbietowej (zewewnętrznej).

Wiele obiektów wymaga obsługi całą powierzchnią ręki, dlatego w badaniach skupiono się na obu częściach ręki. Coraz częściej różnym obiektom obsługiwanym ręką nadaje się cechy ergonomiczne dopasowane indywidualnie do wybranej osoby. Mówimy wtedy o obiektach personalizowanych. Użytkownikami takich obiektów często są osoby niepełnosprawne. W związku z możliwymi ograniczeniami ruchowymi stawów rąk takich osób - czasem zachodzi potrzeba przystosowania konkretnego obiektu do indywidualnego przypadku osobowego, aby zapewnić możliwość „normalnego” użytkowania.

Postęp techniczny podnosi wymagania stawiane nowym obiektom. Dzięki szybkiemu postępowi metod i technik projektowania oraz technologii wytwarzania nowe obiekty mogą być coraz lepiej dopasowane do ciała człowieka (w tym niepełnosprawnego), poprzez odpowiednio ukształtowaną postać geometryczną i wymiary.

Typowe podejście do projektowania obiektów ergonomicznych wiernie odwzorowujących powierzchnię ludzkiego ciała zakłada pozyskanie informacji geometrycznych w procesie inżynierii odwrotnej [3]. Digitalizacji może podlegać wtedy ludzka ręka lub jej negatywowy odcisk w tworzywie odkształcalnym.

W celu usprawnienia procesu projektowego autorzy opracowali specjalny wirtualny model parametryczny w środowisku CATIA v5 (Rys. 1.), aby wyeliminować konieczność każdorazowego przeprowadzania procesu inżynierii odwrotnej [2]. Model umożliwia zasymulowanie postaci dowolnej ludzkiej ręki we wszystkich możliwych ułożeniach jej anatomicznych części. Autorskie narzędzie opracowane w ramach wcześniejszych badań pozwala na zasymulowanie ludzkiej ręki niezależnie od jej wymiarów i proporcji; może to być lewa lub prawa ręka. Więzy kinematyczne modelu wirtualnego zostały dobrane tak, aby w realistyczny sposób zasymulować wszystkie połączenia stawowe. Stawy międzypaliczkowe (tj. pomiędzy poszczególnymi parami paliczków) realizują ruch względem jednej osi, tak jak w rzeczywistości. W przypadku stawów śródrečno-paliczkowych (tj. łączących śródrečno z paliczkami poszczególnych palców) możliwy jest ruch względem dwóch osi. Opisany model powstał w wyniku digitalizacji ręki osoby o jej regularnym kształcie i o wymiarach charakterystycznych dla 50. centyla.

Dysponując modelem, traktowanym dalej jako swego rodzaju narzędzie, można w łatwy sposób modelować nowe obiekty, a także modyfikować już istniejące (przy założeniu posiadania lub utworzenia ich modeli wirtualnych). Opracowane narzędzie umożliwia weryfikację cech ergonomicznych obiektu już podczas jego projektowania i dopasowywania do indywidualnych potrzeb osoby.

Tak wykorzystywane narzędzie pozwala zaoszczędzić czas potrzebny na digitalizację, ale w dalszym ciągu czasochłonne było pozyskiwanie danych antropometrycznych. Powszechnie stosowana metoda dokonywania pomiarów antropometrycznych zakłada stosowanie konwencjonalnych narzędzi pomiarowych (np. suwmiarki). Pomiary ręki w kilkudziesięciu miejscach są czasochłonne i wymagają zaangażowania osoby mierzonej.

W przypadku klasycznej metody postępowania pomiarów może dokonywać sama osoba, dla której modelowany będzie obiekt ergonomiczny, a następnie udostępnić uzyskane dane projektantowi. Takie podejście wiązało się jednak z możliwym błędem pomiarowym ze względu na brak doświadczenia osoby dokonującej pomiaru, a ponadto wymagało od niej zaangażowania w proces projektowy.

Inną możliwością pozyskania pomiarów było spotkanie docelowego odbiorcy obiektu ergonomicznego z projektantem w celu dokonania pomiarów odpowiednich wielkości. To podejście również wiązało się z dodatkowym zaangażowaniem osoby mierzonej.



Rys. 1. Parametryczny model ręki

W celu uproszczenia i przyspieszenia powyższych metod pomiarowych należało opracować alternatywną metodę pomiarową. Nowa metoda ma na celu zminimalizowanie zaangażowania osoby mierzonej w proces projektowy i minimalizację czasu potrzebnego na dokonanie pomiarów. Dodatkowym usprawnieniem powinno być umożliwienie zdalnej współpracy pomiędzy osobą, dla której projektowany jest obiekt i projektantem.

2. Opracowana metoda

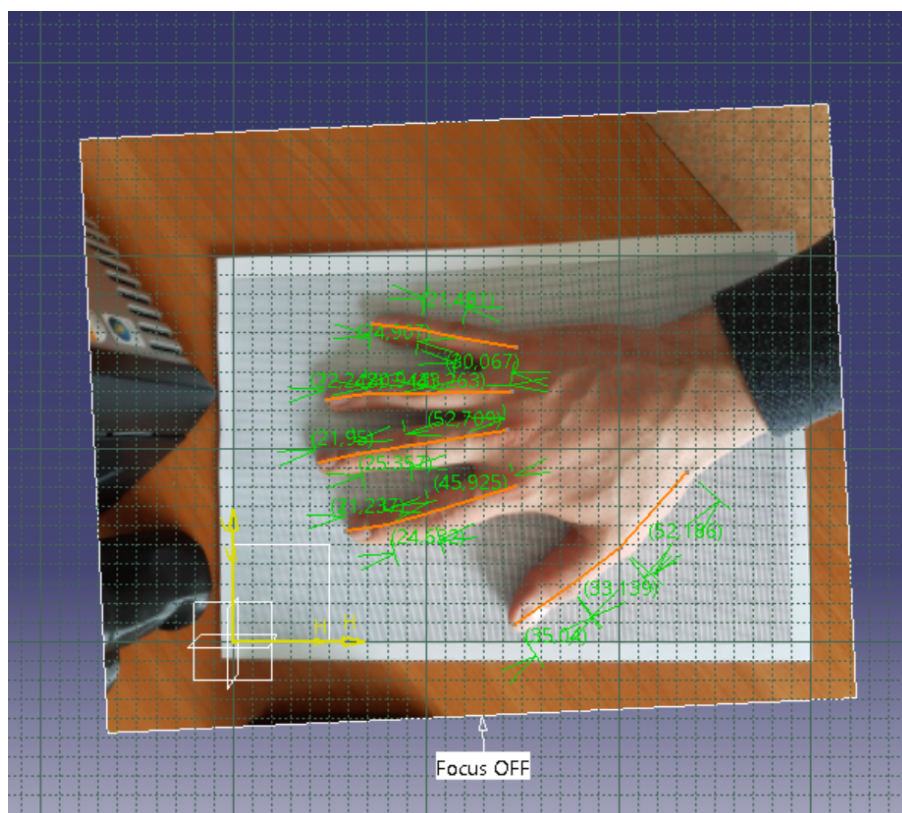
W ramach realizowanych badań należało opracować narzędzie, które ograniczy do minimum udział osoby mierzonej w procesie projektowo-konstrukcyjnym a jednocześnie umożliwi szybkie i dokładne pozyskanie danych antropometrycznych. Powinno też być możliwe całkowicie zdalne dostarczenie danych do projektanta. W związku z powyższym, przyjęto pewne założenia.

Do pomiarów powinno się wykorzystywać fotografie ludzkich rąk jako podstawowe źródło danych antropometrycznych. Zdjęcia projektantowi można dostarczyć pocztą elektroniczną. Pojedyncze zdjęcie wykonane w określony sposób powinno dostarczać wszystkich niezbędnych wartości wymiarowych.

W wyniku wykonanych badań doświadczalnych ustalono, że położenie ręki na płaskiej powierzchni nie wpływa w znaczący sposób na wymiary odczytane ze zdjęcia.

Podczas opracowania metody pomiarowej założono wykorzystanie pojedynczego zdjęcia ręki, do której dopasowywany będzie modelowany obiekt. Aby wykonać zdjęcie należało położyć rękę płasko na kartce papieru (najlepiej kartce w kratkę), a następnie wykonać zdjęcie z góry na powierzchnię grzbietową ręki. Wykonane dowolnym urządzeniem zdjęcie należało przesłać drogą elektroniczną do projektanta.

Przesłane zdjęcie należało zaimportować do opracowanego narzędzia (modelu) w środowisku CATIA v5. Kolejnym krokiem było dopasowanie arkusza papieru ze zdjęcia do linii siatki w modelu i odpowiednie wyskalowanie go tak, aby odpowiednie linie siatki modelu pokrywały się z kratką na kartce papieru. W przypadku „czystej” kartki papieru dowolnego formatu należało najpierw przystosować do wymiarów arkusza prostokąt w szkicu należącego do modelu pomiarowego, do której nastąpiło dopasowanie. Następnie należało umieścić na tle modelu fotografię w taki sposób, aby krawędzie arkusza pokrywały się z wcześniej określonym prostokątem na szkicu.

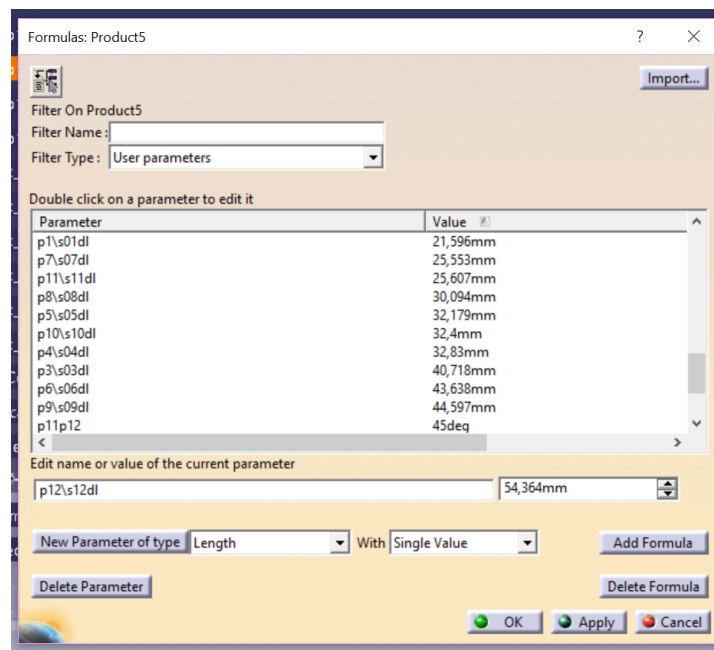


Rys. 2. Model do pozyskiwania danych antropometrycznych

Kolejnym krokiem było dopasowanie punktów szkicu w modelu charakterystycznych miejsc na zdjęciu ręki. Więzy wymiarowe na szkicu zostały określone jako referencyjne, co umożliwiło swobodne przesuwanie punktów (Rys. 2.). Po aktualizacji modelu, wartości więzów wymiarowych były automatycznie przenoszone do tablicy projektowej (w sensie systemu CATIA v5), gdzie przypisane im zostały parametry odpowiadające nazwami parametrom we wcześniej opracowanym modelu parametrycznym ręki (Rys. 3.). W związku z tym można było eksportować tablicę projektową z zewnętrznego pliku .XLS. Dane antropometryczne można dzięki temu wykorzystać w różny sposób, a nie tylko w ramach zaproponowanej metody

Plik z danymi odczytanymi ze zdjęcia można m.in. importować do wcześniej opracowanego modelu ręki. Po imporcie danych i odświeżeniu modelu w środowisku CATIA v5 model automatycznie przystosowuje się do aktualnego przypadku, wiernie symulując postać geometryczną ręki analizowanej w danym przypadku.

W celu sprawdzenia dokładności zaproponowanej przez autorów metody pomiarowej porównano wyniki otrzymane przy użyciu autorskiego narzędzia i metod konwencjonalnych. Różnice wartości wymiarowych otrzymanych różnymi metodami były w granicach błędu pomiarowego metody konwencjonalnej.



Rys. 3. Parametry otrzymane w wyniku pomiarów

3. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań opracowano metodę pozyskiwania danych antropometrycznych alternatywną do metod powszechnie stosowanych. Głównym celem nowej metody było uproszczenie i przyspieszenie procesu pomiarowego danej osoby. W środowisku CATIA v5 opracowano model służący jako narzędzie pomiarowe. Dane wejściowe do modelu pomiarowego dostarczane są w postaci pojedynczego zdjęcia mierzonej ręki. Dane wyjściowe są zwracane w postaci pliku .XLS, w którym zestawione są niezbędne dane antropometryczne w postaci wartości wymiarowych. Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność opisanego sposobu.

Literatura

- [1] Krysiak K., Kobryń H., Kobryńczuk F.: *Anatomia zwierząt. T. 1: Aparat ruchowy*, Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa, 2012
- [2] Szmajduch M., Wyleżoł M., *Biomechaniczny wirtualny model ręki do symulacji uszkodzeń palców*. Inżynier XXI wieku. Wydaw. Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, 2015
- [3] Wyleżoł M., *Zastosowanie inżynierii odwrotnej do modelowania uchwytów ergonomicznych*. Modelowanie Inżynierskie T. 3, nr 34, 2007

Michał SZUMOWSKI¹, Marek FIDALI²

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

1) michal.szumowski@rail.bombardier.com

2) marek.fidali@polsl.pl

METODY DIAGNOZOWANIA NAPĘDÓW ZWROTNICOWYCH

1. Wstęp

Na polskim rynku kolejowym zauważalne są istotne zmiany wynikające ze wzrostu poziomu inwestycji mających na celu rozwój i dostosowanie krajowej infrastruktury do europejskiego interoperacyjnego systemu kolei. Istotną częścią transformacji rynku transportu szynowego jest jego unowocześnienie związane z wprowadzeniem nowoczesnych technologii informacyjnych oraz transmisyjnych, co wpisuje się w kanony szeroko pojętego Internetu Rzeczy.

Najważniejszym aspektem działania zarządcy infrastruktury kolejowej jest zapewnienie ciągłego, optymalnego ruchu pociągów w ramach zarządzanej przez niego infrastruktury przy bezwzględnym spełnieniu wymagań bezpieczeństwa. Ogromne rozproszenie urządzeń różnego typu na rozległym obszarze powoduje zwiększenie uciążliwości oraz kosztów związanych z prawidłowym utrzymaniem urządzeń sterowania ruchem, wśród których są m.in. napędy zwrotnicowe.

Zapewnienie poprawnej pracy układu napęd zwrotnicowy – rozjazd kolejowy, decyduje o bezpieczeństwie podróży oraz ma ogromny wpływ na koszty związane z jego utrzymaniem. Zdalny monitoring takiego układu oraz jego automatyczna diagnostyka są najlepszą metodą na ograniczenie kosztów związanych z utrzymaniem przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości świadczonych usług.

Rozwój technik informatycznych oraz telekomunikacyjnych oraz wzrost świadomości klienta wymuszają na producentach systemów sterowania ruchem diametralną zmianę sposobu utrzymania urządzeń z tradycyjnego na nowoczesny z rozszerzonymi możliwościami zdalnego monitorowania oraz diagnostyki.

Artykuł stanowi przegląd metod diagnostyki napędów zwrotnicowych dostępnych na rynku. Szczególną uwagę zwrócono na metody rozszerzone w swej funkcjonalności o zaawansowaną predykcję uszkodzeń i stanów awaryjnych. Dokonano analizy narzędzi diagnostycznych producentów zarówno oferujących systemy diagnostyczne jako dodatkowy pakiet do oferowanych urządzeń jak również systemów oferowanych osobno możliwych do adaptacji dla urządzeń różnych typów i różnych producentów.

2. System rozjazd kolejowy – napęd zwrotnicowy

Rozjazd kolejowy jest jednym z najważniejszych elementów infrastruktury kolejowej, a jego poprawna praca ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo przewożonych osób. Rozjazd kolejowy pozwala składom kolejowym na zmianę kierunku jazdy z toru głównego na tor zwrotny. Zmiana kierunku ruchu poruszających się po rozjazdach składów jest możliwa po uprzedniej zmianie położenia ruchomych części rozjazdu – iglic zwrotnicy lub ruchomego dzioba krzyżownicy – i zablokowaniu ich w pozycji końcowej. Sterowanie iglicami zwrotnicy odbywa się za pomocą napędów zwrotnicowych. Napędy zwrotnicowe jako jednostki aktuacyjne sterowania ruchem kolejowym są urządzeniami, w których następuje transformacja ruchu obrotowego silnika elektrycznego na ruch iglic zwrotnicy poprzez ruch posuwisto-zwrotny suwaka nastawczego. Jednostki te spełniają również funkcję kontrolną – dając informację o aktualnej pozycji iglic zwrotnicy oraz zabezpieczającą.



Rys.1. Napęd zwrotnicowy zabudowany przy rozjeździe [7]

Przy opracowywaniu systemu monitorowania i diagnozowania napędu zwrotnicowego należy zatem ukłąd rozjazd kolejowy – napęd zwrotnicowy jako integralną całość.

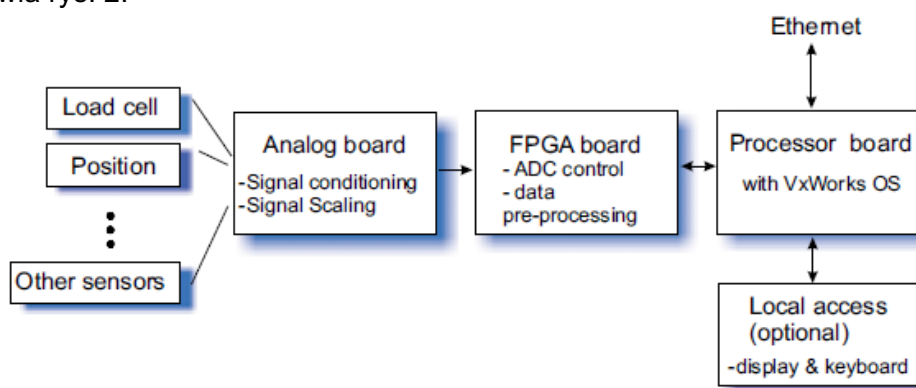
4. Przegląd metod diagnozowania napędów zwrotnicowych

Istniejące metody diagnozowania napędów zwrotnicowych bazują na analizie sygnałów generowanych podczas każdorazowego przestawiania rozjazdu. Sygnały pochodzą z układów pomiarowych i czujników mierzących m.in. [6]:

- prąd pobierany przez silnik
- napięcie zasilania,
- siłę nastawczą i/lub opory przestawiania,
- poziom ciśnienia akustycznego dźwięku emitowanego podczas przestawiania,
- ciśnienie oleju w napędach elektrohydraulicznych.

Rejestrowane przebiegi są przesyłane za pomocą przewodowych lub bezprzewodowych systemów telemetrycznych do zewnętrznych baz danych.

Bazy danych powstałe podczas rejestracji w/w sygnałów wraz ze wsparciem specjalistów w zakresie konstrukcji napędów zwrotnicowych są źródłem wiedzy deklaratywnej niezbędnej do opracowania algorytmów wnioskowania w procesie oceny stanu środka technicznego, jakim jest ukłąd rozjazd – napęd zwrotnicowy. Oczywiście algorytmy są obudowane odpowiednim oprogramowaniem zezwalającym na graficzną komunikację z użytkownikiem. Przykładowy schemat systemu zdalnego monitoringu i diagnostyki przedstawia rys. 2.



Rys.2. Przykładowy ukłąd zdalnego monitorowania napędu zwrotnicowego [6]

Najważniejszym elementem wszystkim systemów monitorowania i diagnostyki napędów zwrotnicowych są algorytmy umożliwiające poprawną detekcję, izolację oraz identyfikację uszkodzeń.

Na podstawie przeglądu literatury można wyróżnić trzy główne grupy metod monitorowania i diagnostyki napędów zwrotnicowych.

4.1 Metody ilościowe bazujące na modelu

Głównym założeniem ilościowych metod bazujących na modelu jest utworzenie modelu matematycznego opisującego działanie urządzenia w stanie pełnej zdatności.

Stosunkowo najprostsze metody wykorzystujące techniki progowe bazujące na założeniu, że sygnały wyjściowe powinny być niższe niż wcześniej zdefiniowane progi dla stanu pełnej zdatności. Po przekroczeniu progów generowane są alarmy świadczące o wykryciu błędów [2], [3].

Bardziej złożone metody ilościowe wykorzystują model matematyczny lub fizyczny procesu w celu porównania wejść i wyjść procesu rzeczywistego i modelu stanowiącego proces referencyjny np. opisujący urządzenie w pełnej zdatności. Model procesu może zostać opracowany za pomocą przekształcenia modelu fenomenologicznego powstałego na podstawie np. zapisu równania ruchu.

Modele procesu przestawiania rozjazdu za pomocą napędu zwrotnicowego mogą również być opracowywane za pomocą wielomianowych technik dopasowywania krzywych tj. ARX czy sztucznych sieci neuronowych (NN) [1] tworzonych i trenowanych na podstawie rejestrowanych wcześniej danych.

4.2 Metody jakościowe bazujące na modelu

Podejście oparte na modelu jakościowym opierają się na podstawowym zrozumieniu diagnozowanego procesu wyrażonego w kategoriach funkcji jakościowych [4]. Diagnostyka w tym podejściu oparta jest na dwóch zasadniczych elementach: wiedzy w dziedzinie 'a priori' oraz strategii wyszukiwania [2]. Wiedza deklaratywna pozyskana od ekspertów jest opisywana za pomocą reguł np. w formie modeli przyczynowo skutkowych, drzew uszkodzeń czy binarnych tablic decyzyjnych. Metody te w „czystej” formie nie znalazły szerszego zastosowania w diagnozowaniu napędów zwrotnicowych, są za to stosowane jako części systemów hybrydowych w połączeniu z metodami bazującymi na metodach pomiarowych.

4.3 Metody bazujące na danych pomiarowych

Metody oparte o rejestrowane dane pomiarowe sprowadzają się do problemu klasyfikacji i rozpoznawania wzorców [5]. Jej celem jest zakwalifikowanie danych procesowych do zdefiniowanych wcześniej wzorców. Jedną z metod opartych na analizach danych wykorzystywanych w diagnozowaniu układów zwrotnica-napęd zwrotnicowy jest jakościowa analiza trendów (ang. Qualitative trend analysis QTA).

Kolejna z metod wykorzystywana w diagnozowaniu procesu przestawiania napędu zwrotnicowego jest analiza składowych głównych (ang. Principal Component Analysis PCA).

Szeroko stosowane są również sztuczne sieci neuronowe i ich rozszerzenia np. w formie sieci neuronowo-rozmytych wykorzystywane do klasyfikacji błędów na podstawie pomiarów zużycia prądu podczas przestawiania rozjazdu.

Znane są również zastosowania klasyfikatorów w postaci maszyny wektorów nośnych (ang. Support Vector Machine SVM) na podstawie analizy prądu i siły oporów przestawiania [8] czy też zarejestrowanego natężenia dźwięku [7].

5. Komercyjnie stosowane metody diagnozowania napędów zwrotnicowych

Czołowi producenci urządzeń infrastruktury kolejowej i urządzeń sterowania ruchem kolejowym, ale również firmy specjalizujące się w systemach wspomagających mają w swoich ofertach rozwiązania dedykowane zarządcom i operatorom infrastruktury służące zdalnemu monitorowaniu stanu urządzeń oraz ich diagnostyki.

Poniżej przedstawiono przykładowe systemy monitorowania i diagnostyki napędów zwrotnicowych wykorzystywane komercyjnie w instalacjach na całym świecie.

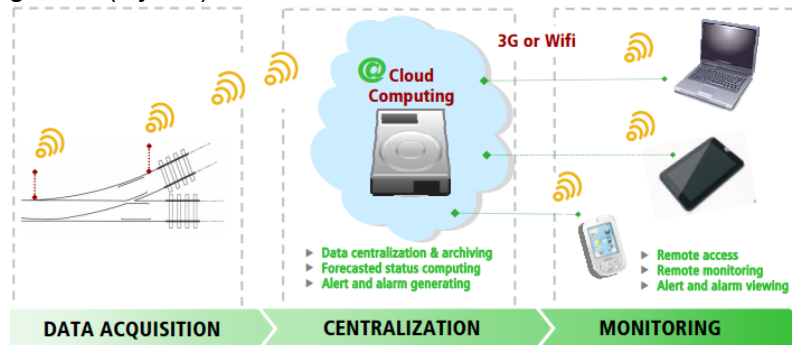
5.1 Systemy producentów rozjazdów wraz z urządzeniami automatyki

Voestalpine – Phoenix^{CMS®} + Phoenix^{MDS®}

Producent w pełni skonfigurowanych rozjazdów wraz z urządzeniami automatyki oferujący również własny system monitorowania – Phoenix Central Management System (CMS) i diagnostyki – Phoenix Modular Diagnostic system (MDS) [10]. Rozwiązania umożliwiają monitorowanie i diagnozowanie taboru oraz instalacji stacjonarnych m.in. rozjazdów wraz z napędami zwrotnicowymi czy systemów przejazdowych z napędami rogatkowymi. Możliwa integracja z urządzeniami innych producentów. System używany w instalacjach w 27 krajach m.in. W Austrii, Niemczech, Zjednoczonym Królestwie, Stanach Zjednoczonych czy Singapurze. Algorytm diagnostyczny systemu oparty na analizie statycznej rejestrowanych sygnałów i trendów.

Vossloh-Cogifer – SURVAIG[®]

Producent zintegrowanych rozwiązań infrastruktury kolejowej i powiązanych z nią urządzeń automatyki oferuje system monitorowania i wspierania działań diagnostycznych – SURVAIG [11]. Po raz pierwszy zainstalowany na linii kolejowej dużych prędkości pomiędzy Hiszpanią i Francją. System bazuje na rejestracji za pomocą dodatkowych czujników takich parametrów jak: zużycie energii, poziom wibracji, temperaturę czy wilgotność do monitorowania funkcjonowania rozjazdów w celu wczesnego wykrywania potencjalnych zagrożeń (Rys. 3).



Rys.3. Schemat działania systemu SURVAIG [11]

5.2 Systemy producentów urządzeń automatyki

Siemens – Railigent[®]

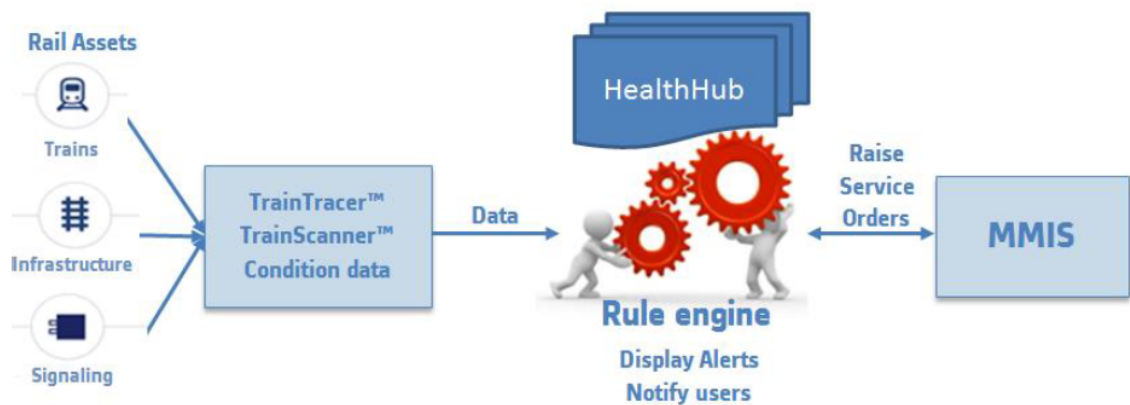
Modułowy system Railigent produkcji Siemens służy do zdalnego monitorowania, wykonywania analiz diagnostycznych oraz przewidywania uszkodzeń [12]. System może monitorować urządzenia sterowania ruchem kolejowym oraz tabor. W związku z tym, że system jest stosunkowo nowy brak szczegółowych informacji o jego funkcjonowaniu.

Alstom – HealthHub[®]

System HealthHub (Rys. 4) produkcji Alstom może monitorować tabor, infrastrukturę oraz urządzenia sygnalizacyjne [13]. Algorytm diagnostyczny oparty na regułach zbudowanych na podstawie wiedzy eksperckiej. Pierwsza instalacja w 2006 roku w Zjednoczonym Królestwie od tego czasu został zainstalowany na ponad 700 składach. Część dotycząca diagnozowania urządzeń sterowania ruchem na wczesnym etapie rozwoju.

Thales – Intelligent Asset Management

System firmy Thales użytkowany w Zjednoczonym Królestwie na około 30 000 instalacjach monitorujący urządzenia sterowania ruchem kolejowym m.in. napędów zwrotnicowych i obwodów torowych.

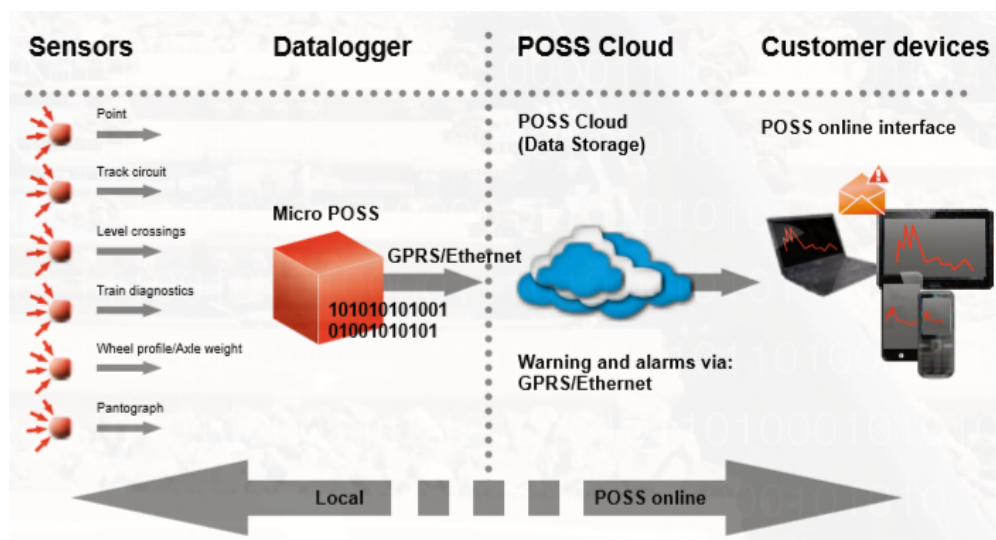


Rys.4. Schemat działania systemu HealthHub [14]

5.3 Systemy producentów stron trzecich

Strukton – POSS®

POSS to system diagnostyki głównie napędów zwrotnicowych, opracowany przez firmę Strukton [15]. Umożliwia włączenie do systemu diagnostyki napędów zwrotnicowych dowolnego typu, dowolnego producenta (Rys. 5). System używany w 10 000 instalacji na całym świecie m.in. w Holandii, Zjednoczonym Królestwie, Szwecji i Włoszech. Diagnostyka oparta o analizę natężenia prądu.



Rys.5. Schemat działania systemu POSS firmy Strukton [15]

Inspection – FlexMonitoring®

Flex Monitoring to system firmy Inspection zabudowany na sieci kolejowej w Holandii [16]. System używany w instalacjach obejmujących 700 napędów zwrotnicowych, 600 obwodów torowych oraz 50 systemów przejazdowych. Diagnozowanie oparte na analizie sygnałów prądu, napięcia i temperatury.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeglądu literatury opisano metody diagnostyki urządzeń sterowania ruchem kolejowym, jakim są napędy zwrotnicowe. W dużej mierze są to metody oparte na modelu jakościowym oraz analizie danych pomiarowych jak również metody hybrydowe stanowiące synergiczne połączenie ich obu. Duży nacisk położony jest na metody klasyfikacji wzorców bazujące na metodach sztucznej inteligencji.

Przegląd rynku pozwala stwierdzić, że bardzo mocno rozwinięte systemy monitoringu i diagnostyki oferują dostawcy rozwiązań kompleksowych oferujących rozjazdy już wyposażone w urządzenia sterowania ruchem kolejowym. Duży udział w rynku mają też

firmy tzw. stron trzecich nieposiadający w swojej ofercie własnych urządzeń sterowania ruchem, a oferujący systemy na tyle elastyczne, że jest możliwość zaimplementowania w nim urządzeń sterowania ruchem różnych typów i różnych producentów.

Niestety, analiza rynku nie pozwoliła na jednoznaczne wskazanie metod diagnostycznych zaimplementowanych w systemów konkretnych producentów.

Na sieci kolejowej zarządzanej przez PKP PLK S.A. nie ma jeszcze zainstalowanego i w pełni użytkowanego systemu zdalnego monitorowania i diagnozowania napędów zwrotnicowych. Biorąc pod uwagę trendy zmian strategii utrzymania napędów zwrotnicowych należy, w niedalekiej przyszłości, spodziewać się pojawienia zamówień na taki system. Badania realizowane przez autorów mają na celu opracowanie i wdrożenie układu monitorowania i diagnostyki napędu zwrotnicowego produkowanego przez firmę Bombardier.

Literatura

- [1] M. Fidali, P. Wojciechowki, A. Pełka: Fault detection of railway point machine using diagnostic models, Conference paper „International Congress on Technical Diagnostic 2016”, ICDT 2016, September 2016, Gliwice,
- [2] T. Asada: Novel condition monitoring techniques applied to improve the dependability of railway point machines, University of Birmingham, May 2013,
- [3] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. N. Kavuri, K. Yin: A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods, Computers and Chemical Engineering 27 (2003) pp. 293-311
- [4] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. N. Kavuri, K. Yin: A review of process fault detection and diagnosis. Part II: Qualitative models and search strategies, Computers and Chemical Engineering 27 (2003) pp. 313-326
- [5] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. N. Kavuri, K. Yin: A review of process fault detection and diagnosis. Part III: Process history based methods, Computers and Chemical Engineering 27 (2003) pp.327-346,
- [6] F. Zhou, M. Duta, M. P. Henry: Condition monitoring and validation of railway point machines
- [7] A. Pełka: Diagnozowanie urządzeń sterowania ruchem kolejowym na przykładzie napędu zwrotnicowego, Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2009
- [8] J. Lee, H. Choi, D. Park, Y. Chung, H. Kim, S. Yoon: Fault detection and Diagnosis of Railway Point Machines by Sound Analysis, Sensors, April 2016
- [9] O. F. Eker, F. Camci, U. Kumar: SVM Based Diagnostics on Railway Turnouts, International Journal of Performability Engineering, Vol. 8, No. 3, may 2012, pp. 289-298
- [10] Voestalpine (2017) <https://www.voestalpine.com/signaling/en/products/diagnostic-and-monitoring-technologies/>
- [11] Vossloh-Cogifer (2017) <https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/products-at-a-glance/signalsysteme/>
- [12] Siemens (2017) <https://www.siemens.com/global/en/home/products/mobility/rail-solutions/services/digital-services/railigent.html>
- [13] Alstom (2017) <http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/rail-systems/services/maintenance/>
- [14] Thales (2017)
- [15] Strukton Rail (2017) <https://www.struktonrail.com/systems/poss-railway-condition-monitoring/>
- [16] Inspection (2017)

Mateusz TYCZKA*

Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

*mateusz.tyczka@polsl.pl

WYKORZYSTANIE METOD SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W ALGORYTMACH ZARZĄDZANIA ENERGIĄ W POJAZDACH HYBRYDOWYCH

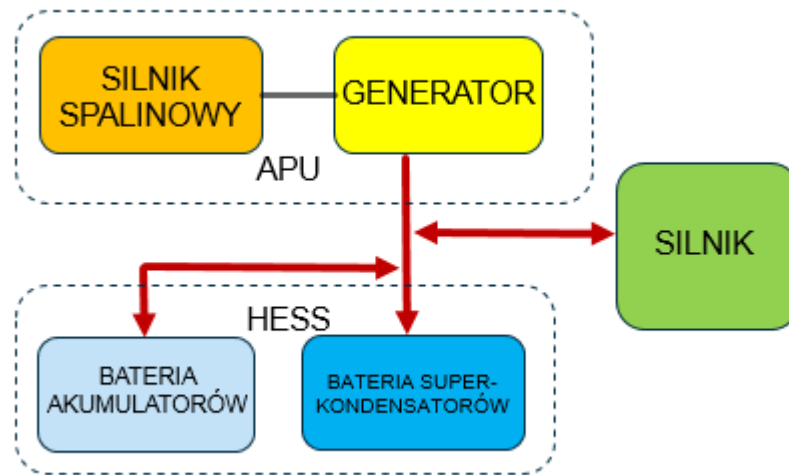
1. Wstęp

Artykuł przedstawia możliwości zastosowania metod sztucznej inteligencji w algorytmach zarządzających energią w pojazdach typu hybrydowego. W szczególności dotyczy to pojazdów hybrydowych typu plug-in oraz pojazdów hybrydowych typu power split. W tych przypadkach zarządzanie energią w pojeździe jest najtrudniejsze. Ze względu na skomplikowaną budowę układu na którą składa się wiele źródeł zasilania lub wiele napędów o różnych charakterystykach. Jest to zagadnienie złożone. Z tego powodu w tego typu pojazdach konieczne jest zastosowanie algorytmu zarządzania energią w pojeździe. Dodatkowo charakter jazdy samochodem ze względu na swą naturę powoduje nieregularne zmiany zapotrzebowania na moc. Właściwe zarządzanie energią może zapewnić duże oszczędności w zużyciu energii. Coraz częściej w celu rozwiązania tego zagadnienia stosuje się algorytmy oparte na sztucznej inteligencji. Dotychczasowe badania pokazują, że zastosowanie algorytmów opartych na metodach sztucznej inteligencji daje lepsze rezultaty w stosunku do wykorzystania rozwiązań tradycyjnych. Najczęściej stosowane metody sztucznej inteligencji w zastosowaniu algorytmów zarządzania energią zostały opisane poniżej.

2. Problem badawczy i metody rozwiązania

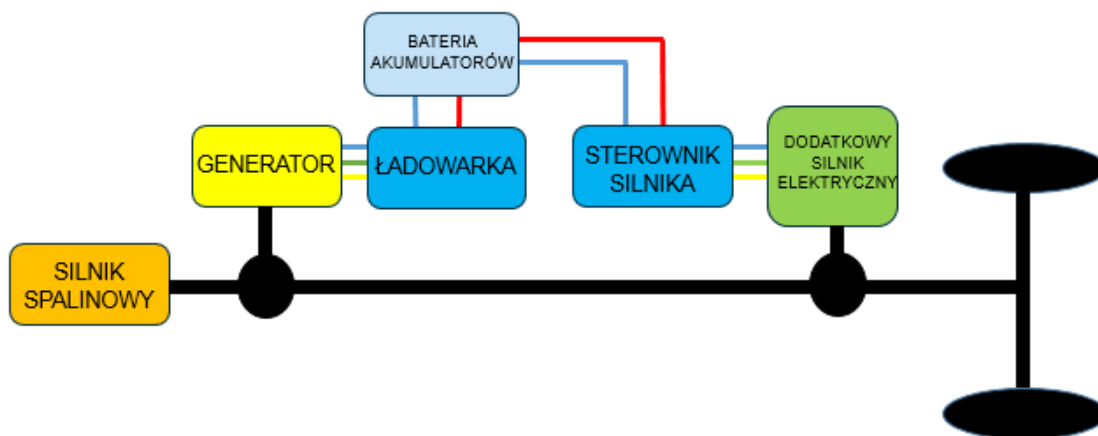
Samochody hybrydowe typu plug-in i power split różnią się w budowie i w działaniu. Samochody hybrydowe typu plug posiadają jeden elektryczny silnik będący napędem głównym, są one przystosowane do poruszania się z wykorzystaniem wyłącznie napędu elektrycznego przy ograniczonym zasięgu wynoszącym do kilkudziesięciu kilometrów. Z tego powodu wyposażone są one w baterie o stosunkowo dużej pojemności w porównaniu z innymi typami samochodów hybrydowych. W przypadku przejazdu na większe odległości, energia produkowana jest na bieżąco przez dodatkowy silnik spalinowym połączony z generatorem. Główna przewaga tego typu pojazdów nad tradycyjnymi samochodami polega na możliwości przejazdu na krótkie dystanse wyłącznie z zasilania baterijnego a następnie uzupełnienia energii z sieci elektrycznej. Druga przewaga takich pojazdów polega na wykorzystaniu silnika spalinowego wyłącznie lub niemal wyłącznie w punkcie najwyższej sprawności takiego silnika. Bardziej zaawansowane typy samochodów hybrydowych wyposażone są dodatkowo w baterie superkondensatorów pozwalających na wykorzystania odzysku energii z hamowania oraz lepszą dynamikę jazdy. Podstawową trudnością wymuszającą zastosowanie zaawansowanych algorytmów zarządzania energią jest występowanie trzech źródeł zasilania w pojeździe. Dodatkowo kierunki przepływu energii występujące w pojeździe występują w obu kierunkach zarówno pomiędzy poszczególnymi źródłami zasilania jak i głównym elektrycznym silnikiem napędowym. Przepływ energii w pojeździe hybrydowym typu plug-in został przedstawiony na rys. 1. W pojeździe możemy wyróżnić system magazynowania energii (ang. HESS- hybrid Energy storage system) oraz dodatkowe źródło zasilania (ang. APU- Assistance power unit). W skład systemu magazynowania energii wchodzi bateria akumulatorów pełniąc funkcję większego magazynu energii oraz bateria superkondensatorów

o znacznie mniejszej pojemności, umożliwiającą jednak przepływ znacznie większych mocy. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem w przypadku APU jest silnik spalinowy wraz z generatorem. Można go jednak zastąpić innym źródłem energii, jak ogniwo paliwowe.



Rys.1. Schemat przepływu energii dla samochodu hybrydowego typu plug-in

Samochody hybrydowe typu power split działają według innej zasady. W pojazdach tych w większości pojazd jest napędzany silnikiem spalinowym. Dodatkowymi elementami występującymi w pojeździe są generator, bateria akumulatorów oraz silnik elektryczny. Jednak w przeciwieństwie do samochodów hybrydowych typu plug-in ma on jedynie zadanie wspierające główny silnik spalinowy. Moc generowana przez silnik spalinowy, poprzez system sprzęgieł i przekładni jest dzielona na tą napędzającą koła oraz generator elektryczny, którego zadaniem jest ładowanie baterii akumulatorów. W razie potrzeby dodatkowa moc generowana jest poprzez silnik elektryczny. Główny problem zarządzania energią w pojeździe polega na odpowiednim zarządzaniu mocą generowaną przez silnik przy jednoczesnym zapewnieniu wystarczającej mocy na kołach pojazdu. W razie potrzeby moc na przenoszona no koła pojazdu jest zwiększana lub zmniejszana, tak by umożliwić pracę silnika w jak najbardziej optymalnych warunkach.



Rys.2. Schemat przepływu energii dla samochodu hybrydowego typu power split

Powyższe zagadnienia można rozwiązywać poprzez następujące rodzaje strategii sterowania:

- strategia w oparciu o reguły,
- inteligentne strategie:
 - strategie opierające się na algorytmach optymalizacyjnych,
 - strategie opierające się o rozpoznawanie wzorców jazdy (ang. DPR-driving pattern recognition),
 - w oparciu o algorytmy sterowania predykcyjnego (ang. MPC- model predictive control).

Strategie oparte o reguły decyzyjne są najprostsze do implementacji. Opierają się one o zespół reguł warunkowych regulujących zarządzanie energią w pojeździe. Są one stałe i niezależne od warunków panujących na drodze oraz rzeczywistego zapotrzebowania na moc pojazdu. Nie pozwalają one na uzyskanie wysokiej sprawności całego układu. Algorytmy sztucznej inteligencji nie są w nich stosowane i dlatego nie są one przedmiotem niniejszego artykułu.

3. Metody optymalizacyjne

Metody optymalizacyjne znajdują coraz częstsze zastosowanie do zarządzania energią w pojeździe. Zazwyczaj, aby możliwe było zoptymalizowanie przepływu energii w pojeździe elektrycznym potrzeba utworzyć w pierwszej kolejności model energetyczny układu. Następnie za pomocą powstałego układu poszukuje się optymalnych stanów naładowania układu w poszczególnych chwilach czasu. W tym przypadku stosowanie metod sztucznej inteligencji daje szybkie i dobre rezultaty. Do najczęściej wykorzystywanych algorytmów sztucznej inteligencji należą: algorytmy genetyczne, algorytmy rojowe czy programowanie dynamiczne. Ze względu jednak na długi czas obliczeń oraz konieczność znajomości zapotrzebowania na energię pojazdu, przed jego wyruszeniem w trasę, nie nadają się do bezpośredniego zastosowania w pojazdach. Mogą one jednak z powodzeniem być stosowane jako kryterium w stosunku do innych metod. Wyniki uzyskane z optymalizacji mogą być wykorzystane jako najlepsze wyniki, do których inne metody powinny dążyć.

4. Algorytm rozpoznawania wzorców jazdy

Algorytmy rozpoznawania wzorców działają według następującego schematu:

1. Zebranie danych o zapotrzebowaniu na energię i prędkości pojazdu podczas pewnego ostatniego przedziału czasu (na przykład 2 minut).
2. Analiza pozyskanych danych i na jej podstawie określenie z jakim wzorcem jazdy mamy obecnie do czynienia (autostrada, zakorkowane miasto itd.)
3. Dobór strategii sterowania optymalnej dla określonego wzorca jazdy.

Konkretne strategie sterowania dla poszczególnych wzorców jazdy są najczęściej strategiami w oparciu o reguły. Główny nacisk w przypadku algorytmów DPR kładziony jest na część dotyczącą rozpoznawania z jakim typem wzorca jazdy mamy do czynienia. Można to osiągnąć na wiele sposobów.

Najprostsze podejście przedstawiono w pracy [1]. Autorzy proponują podejście, w którym porównywano 14 parametrów statystycznych wzorcowych profili prędkości oraz aktualnego profilu prędkości pojazdu. Następnie obliczano odległość euklidesową aktualnego profilu od profili wzorcowych. Jako obowiązujący przyjmowano wzorzec o najmniejszej odległości od aktualnego profilu prędkości. Choć przedstawiony sposób rozpoznawania wzorców jazdy nie wykorzystuje algorytmów sztucznej inteligencji, to jednak dostosowuje się do aktualnej sytuacji drogowej.

Jedną z możliwości wykorzystania metod sztucznej inteligencji do rozpoznawania wzorców jazdy jest wykorzystanie logiki rozmytej. W artykule [2] za pomocą logiki rozmytej rozpoznawano wzorzec jazdy. Długość okna czasowego analizowanej historii ruchu wynosiła 100 s. Głównymi parametrami analizowanymi przez autorów była średnia

i maksymalna wartość prędkości pojazdu. Artykuł [3] opisuje wykorzystanie logiki rozmytej do rozpoznawania jednego z 4 wzorców jazdy pojazdu. Pierwszy wzorec odpowiadał jeździe przerywanej, jaka występuje w warunkach dużego korku. Ostatni wzorec odpowiadał sytuacji jazdy po autostradzie przy swobodnym ruchu. Autorom udało się poprawić efektywność względem prostej strategii sterowania opartej na regułach o 3,8%. Inna bardzo interesująca propozycja wykorzystania metod sztucznej inteligencji została opisana w [4]. W tym przypadku autorzy korzystali zarówno z logiki rozmytej jak i sztucznych sieci neuronowych. W przeciwieństwie do innych metod opierających się na rozpoznawaniu wzorców, w tym przypadku autorzy nie określali z jakim typem wzorca mamy do czynienia. Zamiast tego zastosowali odmienne podejście, w którym identyfikują oni osobno poszczególne aspekty jazdy samochodem, takie jak rodzaj jazdy, styl prowadzenia, które następnie składają we wzorec jazdy. Na jego podstawie dobierana była strategia zarządzania energią w pojeździe. Problemem w przypadku tego artykułu okazała się mała ilość danych uczących dla sieci neuronowych.

5. Algorytm predykcyjny

Algorytmy zarządzania energią w pojazdach hybrydowych wykorzystujące predykcję działają według innego wzorca. Może on być realizowany przez kilka różnych metod, jednak można wyróżnić pewne wspólne etapy dla każdej z nich. Pierwszym jest predykcja profilu prędkości, na podstawie którego oblicza się zapotrzebowanie na energię w pojeździe. W niektórych przypadkach obliczanie profilu prędkości jest pomijane, zaś zapotrzebowanie na energię oblicza się za pomocą innych metod. Zapotrzebowanie na energię jest przewidywane dla krótkiego horyzontu czasowego wynoszącego na ogół około 10 s. Następnie następuje optymalizacja przeprowadzana na podstawie przewidywanego zapotrzebowania na energię, która następnie jest wykonywana przez układ zarządzania energią. Optymalizacja może zostać przeprowadzona za pomocą różnych metod takich jak: programowanie dynamiczne, programowanie nieliniowe, programowanie kwadratowe czy zasada maksimum Pontriagina [5]. Cała operacja jest następnie powtarzana

Najczęściej wykorzystywane do algorytmu predykcyjnego są łańcuchy Markova. W tej metodzie na podstawie rachunku prawdopodobieństwa prognozowana jest przyszła wartość prędkości lub zapotrzebowania na moc pojazdu. Co istotne do obliczenia wartości przewidywanej mocy lub prędkości pojazdu konieczna jest znajomość tych wartości jedynie dla bieżącego momentu czasowego. Aby zastosować metodę konieczna jest znajomość wartości macierzy prawdopodobieństwa pomiędzy kolejnymi krokami obliczeń. Przykłady wykorzystania tej metody można znaleźć w [6, 7]. W powyższych artykułach autorzy wykorzystywali łańcuchy Markova do przewidywania zapotrzebowania na energię. Na podstawie uzyskane wyniku optymalizowali oni energię w pojeździe hybrydowym typu power- split. Innym przykładem może być wykorzystanie łańcuchów Markova w algorytmie predykcyjnym dla hybrydy typu szeregowego [8].

Inną często wykorzystywaną metodą jest wykorzystanie modelu malejącego eksponentalnie (ang. exponentially decreasing model) do przewidywania wymaganego momentu na wale wyjściowym silnika. W algorytmie tym przewiduje się, że moment wymagany na wale wyjściowym silnika będzie eksponentalnie maleł wraz z upływem czasu. Przykłady wykorzystania można znaleźć w artykułach [9, 10]. Szczególnie interesujący model opisano w pracy [9], gdzie wykonano algorytm dla hybrydy typu plug- in. Użytkano różne wyniki dla różnych badanych profili prędkości. Dla jednego z nich udało się zaoszczędzić 21,9 % energii względem sterowania opartego o reguły.

Powyższe algorytmy, choć interesująca i wykorzystujące sterowanie predykcyjne, nie wykorzystują jednak klasycznych metod sztucznej inteligencji. W artykule [11] autorzy zastosowali dobrze opisaną metodę sztucznej inteligencji, jaką są sztuczne sieci neuronowe. Jako wejście do sieci neuronowej wykorzystali oni 14 parametrów statystycznych obliczanych na podstawie aktualnego profilu prędkości pojazdu. Cykle prędkości wyko-

rzystane do testowania algorytmów w tym przypadku składały się z kilku podcykli. Autorzy przytoczonej pracy ograniczyli się do przewidywania, który z podcykli będzie aktualnie wykorzystywany. W ogólnym przypadku możliwe jest jednak rozszerzenie działania sieci do przewidywania prędkości pojazdu bez znajomości podcykli. Podobnie jak ma to miejsce w przypadku wykorzystywania sztucznych sieci neuronowych do rozpoznawania wzorców jazdy, problemem jest bardzo mała liczba danych uczących w postaci profili prędkości pojazdu.

6. Problemy i trudności w zastosowaniu metod sztucznej inteligencji do zarządzania energią w pojazdach hybrydowych

Wiele metod sztucznej inteligencji, jak na przykład sztuczne sieci neuronowe, bardzo dobrze spisuje się w przypadku odwzorowywania nieliniowych zależności, z którymi mamy do czynienia chociażby w algorytmach MPC. Jednakże do poprawnego działania potrzebują one sporej ilości danych uczących oraz osobnego zbioru danych służących weryfikacji działania sieci. W przypadku pojazdów istnieje wiele trudności z pozyskaniem i opracowaniem miarodajnych profili prędkości, które odpowiadałyby różnym sytuacjom drogowym. W artykule [12] przedstawiono wyniki kilkuletnich pomiarów profili prędkości z kilkunastu pojazdów w różnych miejscach Europy. Na ich podstawie autorzy opracowali 12 subprofilów prędkości, adekwatnych dla różnych sytuacji drogowych. Mogłyby one posłużyć jako profile wzorcowe dla różnych metod opartych na DPR. Każdy z subprofilów jest jednak pojedynczym profilem prędkości, co nie jest wystarczające do zastosowania sztucznych sieci neuronowych. W artykule [13] zastosowano łańcuchy Markowa by wygenerować profile prędkości odpowiadające wzorcowemu, jednak różniące się od niego. Dotychczas nie zostało jednak potwierdzone czy wygenerowane w ten sposób dane są możliwe do zastosowania jako przykłady uczące dla sztucznych sieci neuronowych. Podobna sytuacja dotyczy także zastosowania innych metod sztucznej inteligencji, w których konieczne jest stosowanie dużej ilości przykładów uczących.

7. Podsumowanie

W nowoczesnych układach sterowania mocą w pojeździe hybrydowym coraz częściej stosuje się rozwiązania inteligentne. Jest to spowodowane skomplikowaną budową całego układu. Rozwiązania, które możliwe są do wykorzystania w pojeździe bazują na rozpoznawaniu wzorców trasy i sterowaniu predykcyjnym. Coraz częściej w obu zagadnieniach stosuje się różne algorytmy sztucznej inteligencji. Najbardziej ciekawym rozwiązaniem zarówno w przypadku rozpoznawania wzorców trasy jak i sterowania predykcyjnego, jest zastosowanie sztucznych sieci neuronowych. Sporym problemem stojącym na przeszkodzie w ich stosowaniu jest ograniczona liczba danych uczących w postaci rzeczywistych i miarodajnych profili prędkości pojazdu. Problem ten nie został dotychczas rozwiązany.

Literatura

1. Lei Z., Qin D., Liu Y., Peng Z., Lu L.: Dynamic energy management for a novel hybrid electric system based on driving pattern recognition, *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 45: 940-954.
2. Zhang S., Xiong R.: Adaptive energy management of a plug-in hybrid electric vehicle based on driving pattern recognition and dynamic programming, *Applied Energy*, 2015, 155: 68-78.
3. Wei Z., Xu Z., Halim D.: Study of HEV power management control strategy based on driving pattern recognition, *Energy Procedia*, 2016, 88: 847-853.
4. Langari R., Won J-S.: Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle—Part I: System Architecture and Design of the Driving Situation Identification Proces, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54: 925- 934

5. Sun C., Hu X., Moura S. J., Sun F.: Velocity Predictors for Predictive Energy Management in Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Transactions on control systems technology*, 2015, 23: 1197-1204
6. Moura S. J., Fathy H. K., Callaway D. C., Stein J. L.: A Stochastic Optimal Control Approach for Power Management in Plug-In Hybrid Electric Vehicles. 2011. 19: 545-554.
7. Liu J., Peng H.: Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle, *IEEE Transactions on control systems technology*, 2008, 16: 1242-1251.
8. Ripaccioli G., Bernardini D., Di Cairano S., Bemporad A, Kolmanovsky I. V.: A Stochastic Model Predictive Control Approach for Series Hybrid Electric Vehicle Power Management, *American Control Conference (ACC)*, Baltimore, MD, USA czerwiec-lipiec 2010 30, 2010: 1-6
9. Zhang S., Xiong R., Sun F.: Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid energy storage system. *Applied Energy*, 2017, 185: 1654-1662
10. Borhan H., Vahidi A., Phillips A. M., Kuang M., L., Komanovsky V., Di Cairano S.: MPC-Based Energy Management of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle, *IEEE Transactions on control systems technology*, 2012, 20: 593-603.
- 11 Park J., Chen Z., Kiliaris L., Kuang M. L., Masrur M. A., Phillips M. A., Murphey Y. L.: Intelligent Vehicle Power Control Based on Machine Learning of Optimal Control Parameters and Prediction of Road Type and Traffic Congestion, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58, 2009, 4741- 4756
12. André M.: The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Science of the Total Environment*, 2004, 334-335: 73-84.
13. Nyberg P., Frisk E., Nielsen L.: Generation of Equivalent Driving Cycles Using Markov Chains and Mean Tractive Force Components, *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47: 8787-8792.

Angelika WRONKOWICZ^{1a}, Krzysztof DRAGAN^{2b}, Anna TIMOFIEJCZUK^{3a}

- a) Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice
- b) Pracownia Badań Nieniszczących, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa

1) angelika.wronkowicz@polsl.pl

2) krzysztof.dragan@itwl.pl

3) anna.timofiejczuk@polsl.pl

ZASTOSOWANIE METOD ANALIZY OBRAZU W BADANIACH ULTRADŹWIĘKOWYCH STRUKTUR KOMPOZYTOWYCH

1. Wstęp

Polimerowe materiały kompozytowe, dzięki ich licznym zaletom, znalazły bardzo szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Cechują się bardzo dużą wytrzymałością przy relatywnie niskiej masie oraz odpornością na korozję, co pozwala stosować je m.in. w produkcji elementów poszycia statków powietrznych, kadłubów łodzi, jachtów oraz nadwozi samochodów sportowych.

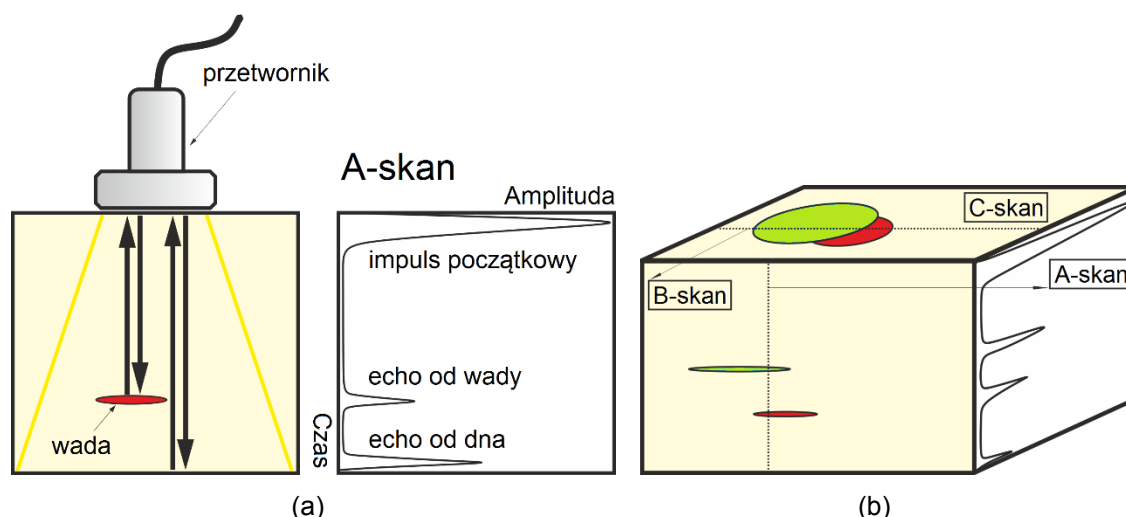
Kompozyty, z uwagi na ich złożoną budowę i anizotropię, są podatne na powstawanie różnego rodzaju uszkodzeń, zarówno w trakcie ich wytwarzania jak i eksploatacji, o charakterze odmiennym od spotykanych dotąd przy zastosowaniu stopów metali. Do głównych wad produkcyjnych i uszkodzeń eksploatacyjnych kompozytów należą: porowatość, wtrącenia ciał obcych, rozwarstwienia, pęknięcia osnowy czy odklejenia. Jednym z często występujących rodzajów uszkodzeń w eksploatacji elementów kompozytowych są uszkodzenia powstałe wskutek uderzeń o niskich energiach. Uszkodzenia te są niemal niewidoczne na powierzchni elementu, skąd wywodzi się ich angielska nazwa: Barely Visible Impact Damage (BVID), jednocześnie powodując powstanie sieci pęknięć osnowy oraz rozwarstwień wewnątrz elementu. Może to, wskutek dalszych obciążeń eksploatacyjnych elementu, doprowadzić do znacznego zmniejszenia jego wytrzymałości. Uszkodzenia powstałe w kompozytach są zjawiskami złożonymi i propagują stopniowo, często powodując przerodzenie się mikropęknięć w makropęknięcia, wskutek obciążania struktury. Makropęknięcia rozwijają się w rozwarstwienia, co z kolei może doprowadzić do całkowitego zniszczenia elementu [6].

Jednym z podstawowych wymogów stawianych nowoczesnym środkiem transportu, zwłaszcza w przemyśle lotniczym, jest zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa, w celu ochrony życia ludzkiego i uniknięcia znacznych strat finansowych. Z tego względu wymagana jest regularna diagnostyka elementów kompozytowych, umożliwiająca wczesną detekcję uszkodzeń, co pozwala zapobiegać zdarzeniom katastroficznym. W celu wykrywania większości z wymienionych wad i uszkodzeń konieczne jest stosowanie czasochłonnych i zaawansowanych metod badań nieniszczących. Jedną z metod najczęściej stosowanych do diagnostyki elementów wykonanych z materiałów kompozytowych jest metoda ultradźwiękowa (UT). Metoda ta jest czuła na uszkodzenia, powszechnie występujące w kompozytach [12]. Badania nieniszczące metodą UT polegają na transmisji fal ultradźwiękowych wewnątrz badanego materiału i obserwacji odbitych fal (metoda Pulse-Echo) bądź fal przepuszczonych przez materiał (metoda Through-Transmission). W praktyce, systemy wykorzystujące metodę Pulse-Echo są bardziej użyteczne, gdyż wymagają tylko jednostronnego dostępu do badanego elementu. Badania nieniszczące metodą UT umożliwiają zwizualizowanie postaci geometrycznej wewnętrznego uszkodzenia oraz obliczenie z wysoką dokładnością jego pola powierzchni oraz głębokości, na jakiej się znajduje.

1.1. Badania nieniszczące metodą ultradźwiękową

Przykładowy schemat badania ultradźwiękowego metodą Pulse-Echo przedstawiony został na Rys. 1a. Głowica pomiarowa, której elementem aktywnym jest przetwornik piezoelektryczny, umożliwiający wzajemne przekształcanie przyłożonego do niego napięcia elektrycznego oraz jego odkształceń, generuje w badanym elemencie falę sprężystą. Do badań kompozytów najczęściej wykorzystywane są fale podłużne o częstotliwościach w zakresie 1-5 MHz [4,15].

W przypadku badania jednym przetwornikiem w trybie Pulse-Echo w zarejestrowanym na przetworniku przebiegu czasowym napięcia, w zobrazowaniu w trybie A (określanym jako A-skan), wyróżnić można co najmniej dwie składowe. Pierwsza to sygnał wejściowy pochodzący od odbicia wzbudzonej fali sprężystej od powierzchni, do której przyłożono głowicę ultradźwiękową. Druga składowa to echo od dna związane z odbiciem fali sprężystej od przeciwległej powierzchni badanego elementu (Rys.1). W przypadku, gdy uszkodzenie lub inna nieciągłość znajduje się w badanym elemencie bezpośrednio pod położeniem sondy, na A-skanie dodatkowo pojawi się sygnał pochodzący od fali odbitej od uszkodzenia (Rys. 1a). Położenie dodatkowego echa sygnału na osi czasu pozwala uzyskać informację o głębokości, na której znajduje się uszkodzenie pod badaną powierzchnią.



Rys.1. Schemat podstawowych trybów wyświetlania wyników badań metodą UT (Pulse-Echo): A-skan (a), A-, B-, C-skan (b) [źródło: opracowanie własne]

Złożenie A-skanów, zarejestrowanych wzdłuż wybranej ścieżki przesuwu przetwornika, pozwala uzyskać zobrazowanie w trybie B – tzw. B-skan, umożliwiający wizualizowanie przekroju badanego elementu wzdłuż tej ścieżki (Rys. 1b). Każdy z A-skanów stanowi pojedynczą linię przekroju, wzdłuż której intensywność kolorów, widoczna na B-skanie, zależy od wartości amplitudy sygnału w poszczególnych chwilach czasu.

Wymiarowanie uszkodzeń umożliwia tzw. zobrazowanie w trybie C (Rys. 1b), przedstawiające widok z góry badanego elementu (tzw. C-skan). C-skan powstaje w wyniku przetwarzania A-skanów zarejestrowanych dla zadanego obszaru badanego elementu. Rejestrowane są dwa podstawowe parametry otrzymanego sygnału po odbiciu fali ultradźwiękowej, z których można utworzyć C-skan: amplituda oraz czas przejścia fali (z ang. Time of Flight - ToF). W danym punkcie utworzonego obrazu, C-skan (amplitudowy) przynosi informację o maksymalnej wartości amplitudy sygnału uzyskanej w tym punkcie, natomiast C-skan (ToF) reprezentuje czas przejścia fali dla składowej sygnału o najwyższej amplitudzie, który zwykle odpowiada uszkodzeniom znajdującym się najbliżej powierzchni badanego elementu.

1.2. Wykrywanie i określanie rozmiaru uszkodzeń ze skanów ultradźwiękowych

Zgodnie z zasadą tolerowanego uszkodzenia [5], element kompozytowy z istniejącym uszkodzeniem może być dopuszczony do dalszej eksploatacji, jeżeli jest włączony w odpowiedni program obsługi serwisowej. Program taki zakłada m.in. identyfikację rozmiaru uszkodzenia i monitorowanie jego przyrostu oraz odpowiednią reakcję, zanim uszkodzenie spowoduje zmniejszenie wytrzymałości resztkowej struktury, poniżej dopuszczalnej granicy. W świetle postępującej propagacji uszkodzeń w kompozytach, powinny one być okresowo kontrolowane w celu monitorowania rozmiaru uszkodzenia, co jest szczególnie ważne w przypadku elementów statków powietrznych.

Określenie rozmiaru wykrytego uszkodzenia, zarejestrowanego podczas inspekcji, wykonywane jest poprzez analizę skanów ultradźwiękowych oraz obliczenie powierzchni wybranego obszaru za pomocą oprogramowania dedykowanego badaniom ultradźwiękowym. W praktyce, rozmiar uszkodzenia jest zazwyczaj określany na podstawie ręcznie zaznaczonego obszaru zainteresowania (z ang. region of interest – ROI) na C-skanach oraz ręcznego ustawienia parametrów przetwarzania obrazu, umożliwiającego ekstrakcję obszarów zidentyfikowanych przez eksperta jako uszkodzenie spośród obszarów nieuszkodzonych badanego elementu. Jednakże, jest to procedura czasochłonna i niepozwalająca na uzyskiwanie powtarzalności wyników. Z tego powodu coraz częściej mówi się o potrzebie opracowania metod wspomagających analizę skanów ultradźwiękowych.

W dotychczasowej literaturze można znaleźć różne podejścia do rozwiązania przedstawionego problemu, w tym wspomaganie bądź automatyzacji analizy skanów ultradźwiękowych. Są one oparte na zastosowaniu metod przetwarzania i analizy obrazu, a także metod sztucznej inteligencji. Jedne z pierwszych prac poświęconych zastosowaniu metod przetwarzania obrazu na potrzeby oceny skanów ultradźwiękowych, były oparte na prostych krokach, takich jak segmentacja obrazu przez progowanie [2] oraz analiza statystyczna [3]. Kotropoulos i in. [7] przedstawili bardziej zaawansowany algorytm oparty na zastosowaniu filtrów adaptacyjnych oraz samoorganizujących się sieci neuronowych. Bozzi i in. [1] zaproponowali procedurę wykrywania wad porowatości w materiałach stosowanych w przemyśle lotniczym, wykorzystującą dwuwymiarową transformację falkową oraz metodę ekstrakcji cech obrazu. Praca autorstwa Momtaz oraz Sadr [10] dotyczy wykrywania i grupowania wad widocznych w obrazach ultradźwiękowych za pomocą ekstrakcji cech obrazu z wykorzystaniem wzorca rozety. Inne podejście oparte na metodach wykrywania i analizy cech obrazu zostało zaprezentowane w pracy Rashli i in. [11]. Niektóre prace skierowane na automatyzację wykrywania uszkodzeń o określonym kształcie oparte są na wykorzystaniu transformacji Hough'a, np. zaproponowana przez Meksen i in. [9]. Inne podejście, którego celem była detekcja rozwarstwień w kompozytach polimerowych zbrojonych włóknem węglowym (CFRP), oparte zostało na logice rozmytej i przedstawione w pracy Li i in. [8].

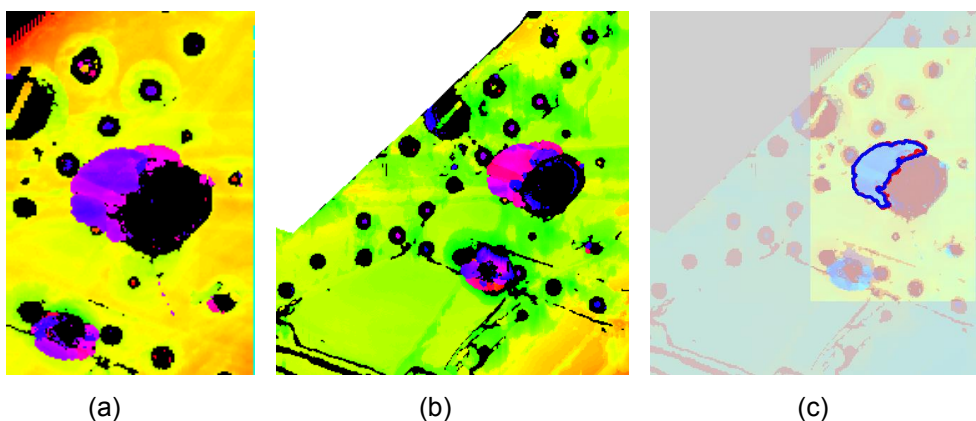
Wiele z przedstawionych wyżej metod, jest jednak skierowanych na konkretny problem. Są one ograniczone do małej grupy badanych materiałów, bądź wykrywania jednego rodzaju lub kształtu uszkodzenia, dlatego algorytmy te nie cechują się uniwersalnością. W przypadku analizy rzeczywistych struktur kompozytowych, często o zmiennej grubości oraz z przymocowanymi elementami (takimi jak wzmocnienia, nity itp.) oraz ze złożonymi postaciami uszkodzeń, jak np. BVID, mogą zaistnieć problemy w interpretacji analizowanych skanów ultradźwiękowych. Osoba analizująca dane podczas takiej inspekcji powinna posiadać odpowiedni certyfikat kompetencji w metodzie ultradźwiękowej oraz duże doświadczenie, aby postawić odpowiednią diagnozę. W celu uproszczenia oraz częściowego zautomatyzowania procedury oceny uszkodzenia, zaproponowano szereg algorytmów przetwarzania i analizy obrazów ultradźwiękowych, z których wybrane [13,14,15] zostały pokrótce omówione w niniejszej pracy. Inne, interesujące podejścia do oceny rozmiaru uszkodzenia, zaproponowane przez jednego z autorów, opierają się m.in. na metodach wykrywania krawędzi [5] oraz określania stosunku sygnału do szumu (z ang. Signal to Noise Ratio) [4].

2. Wyniki badań

W niniejszym rozdziale przedstawiono przykładowe wyniki wybranych prac poświęconych opracowaniu kilku algorytmów opartych na przetwarzaniu i analizie obrazu, w celu wspomagania badań ultradźwiękowych struktur kompozytowych. Wszystkie algorytmy przetwarzania obrazu zostały zaimplementowane w środowisku Matlab®.

2.1. Monitorowanie rozmiaru uszkodzenia na podstawie C-skanów

Jak wcześniej zauważono, analiza skanów ultradźwiękowych rzeczywistych struktur lotniczych wskazuje na trudności w interpretacji z uwagi na ich dużą złożoność. Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom ekspertów analizujących takie wyniki, autorzy [13] zaproponowali algorytm umożliwiający interaktywną ekstrakcję uszkodzenia ze skanów ultradźwiękowych, umożliwiającą ekspertowi wskazanie na obrazie obszaru zainteresowania. Drugim etapem algorytmu było dopasowanie do siebie C-skanów uzyskanych podczas badań tego samego elementu w różnych okresach czasu i porównanie konturu uszkodzenia oraz jego pola powierzchni. Zaproponowany algorytm składa się z dwóch głównych etapów: ekstrakcja uszkodzenia i obliczenie jego pola powierzchni (etap przeprowadzany osobno dla dwóch wejściowych C-skanów), a następnie dopasowanie i nałożenie na jednym obrazie pary skanów odpowiadających sobie obszarów badanego elementu wraz z konturami uszkodzenia i obliczenie zmiany pola powierzchni.



Rys.2. Przykładowa para C-skanów z badań UT przeprowadzonych w odstępie dwóch lat (a,b), dopasowane C-skany oraz wykryte kontury wskazanego uszkodzenia (c) [13]

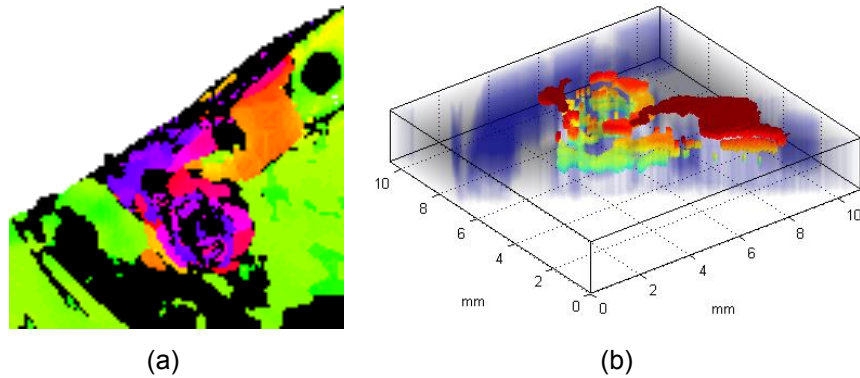
Opracowany algorytm przetestowano na zestawach skanów ultradźwiękowych, uzyskanych podczas inspekcji elementów wojskowych statków powietrznych wykonanych z kompozytu CFRP. Badania przeprowadzono w odstępie dwóch lat za pomocą systemu MAUS® firmy Boeing. Przykładową parę wejściowych C-skanów przedstawiono na Rys. 2a-b, natomiast wynik umożliwiający porównanie konturów uszkodzenia – na Rys. 2c.

2.2. Trójwymiarowa rekonstrukcja uszkodzenia ze skanów ultradźwiękowych

Kolejny z zaproponowanych algorytmów został opracowany w celu umożliwienia trójwymiarowej rekonstrukcji C-skanów, szczegółowo opisany w artykule [15]. Algorytm ten został przetestowany na wynikach badań ultradźwiękowych rzeczywistego elementu – statecznika pionowego statku powietrznego. Do głównych etapów algorytmu przetwarzania obrazu należało wielopoziomowe progowanie obrazu, interaktywny wybór obszaru zainteresowania oraz tzw. operacje morfologiczne. Zaimplementowano dodatkowe przekształcenia matematyczne, umożliwiające przetworzenie C-skanu (dwuwymiarowej macierzy) do postaci trójwymiarowej macierzy, wykorzystując do tego celu wartości poszczególnych punktów (pikseli) obrazu, zawierających dane o głębokości,

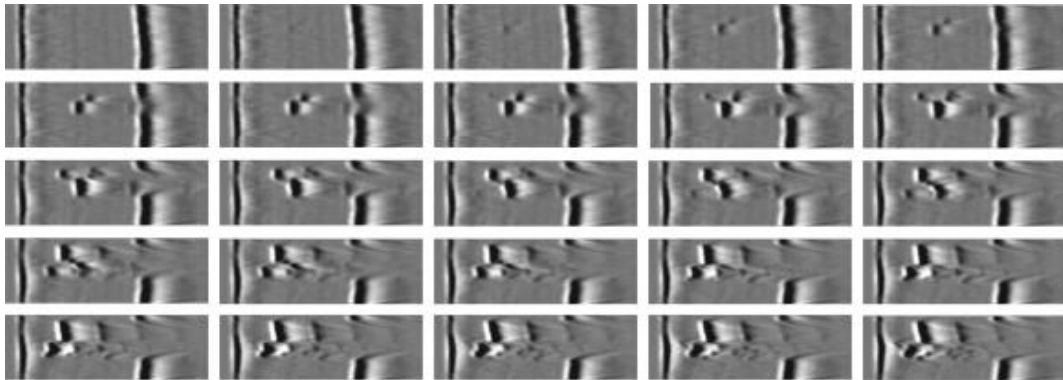
na której znajduje się uszkodzenie. Przykładowy C-skan oraz jego trójwymiarowa wizualizacja zostały przedstawione odpowiednio na Rys. 3a oraz Rys. 3b.

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż przedstawiona wizualizacja nie odzwierciedla uszkodzenia w pełni, co wynika ze sposobu tworzenia C-skanów oraz faktu, iż na C-skanach widoczne są uszkodzenia będące najbliższe badanej powierzchni, natomiast inne nieciągłości, znajdujące się pod tym uszkodzeniem, są przez nie zakryte.

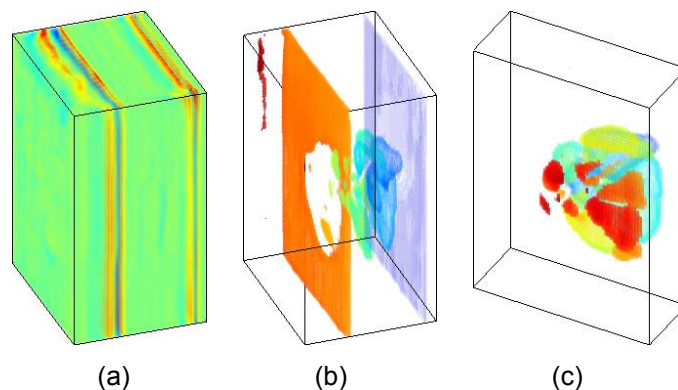


Rys.3. Przykładowy C-skan (a) i trójwymiarowa wizualizacja uszkodzenia (b) [15]

Kolejny algorytm opracowano do celów trójwymiarowej rekonstrukcji uszkodzenia z serii B-skanów, które razem zawierają więcej informacji diagnostycznej niż pojedynczy C-skan, co umożliwia uzyskanie dokładniejszej wizualizacji uszkodzenia. Do tego celu wykorzystano wyniki badań próbki CFRP ze sztucznie wprowadzonym uszkodzeniem typu BVID. Przykładowa seria uzyskanych podczas badań UT B-skanów została przedstawiona na Rys. 4. Wybrane etapy trójwymiarowej rekonstrukcji uszkodzenia pokazano na Rys. 5. Szczegółowy opis algorytmu został przedstawiony w [14].



Rys.4. Przykładowa seria wybranych B-skanów [14]



Rys.5. Trójwymiarowa rekonstrukcja serii B-skanów: przed filtracją (a), po filtracji (b), po odjęciu płaszczyzn brzegowych próbki (c) [14]

4. Podsumowanie

W celu wykrywania wad i uszkodzeń w strukturach kompozytowych konieczne jest stosowanie czasochłonnych metod badań nieniszczących. Powszechnie stosowaną metodą są badania ultradźwiękowe, umożliwiające wizualizację wewnętrznego uszkodzenia oraz obliczenie jego rozmiaru i głębokości, na jakiej się znajduje. Z uwagi na wspomnianą czasochłonność badań oraz analizy wyników, a także problemy w interpretacji skanów, w przypadku badania złożonych elementów, istnieje potrzeba opracowania metod wspomagających i przyspieszających analizę wyników badań ultradźwiękowych. W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań poświęconych opracowaniu algorytmów wspomagających wykrywanie uszkodzeń w skanach ultradźwiękowych struktur kompozytowych, a także umożliwiającą trójwymiarową wizualizację uszkodzeń.

Literatura

- [1] Bozzi E., Cavaccini G., Chimenti M., Di Bono M.G., Salvetti O.: *Defect detection in C-scan maps*, Pattern Recognition and Image Analysis, t. 17, Nr 4, 2007
- [2] Corneloup G., Moysan J., Magnin I.E.: *Bscan image segmentation by thresholding using cooccurrence matrix analysis*, Pattern Recognition, t. 29, 1996
- [3] Cornwell I., McNab A.: *Towards automated interpretation of ultrasonic NDT data*, NDT&E International, t. 32, Nr 2, 1999
- [4] Dragan K.: *Image processing approach for the Non Destructive Evaluation (NDE) of the composite materials as the input to structural durability assessment*, Technical News 1, Lviv, Ukraine, 2011
- [5] Dragan K., Stefaniuk M., Synaszko P.: *Numerical approach for ultrasonic imaging of defects in composites*, Composites Theory and Practice, t. 12, Nr 2, 2012
- [6] Giurgiutiu V.: *Chapter 5 - damage and failure of aerospace composites*, Structural Health Monitoring of Aerospace Composites, Academic Press, Oxford, 2016
- [7] Kotropoulos C., Magnisalis X., Pitas I., Strintzis M.G.: *Nonlinear ultrasonic image processing based on signal-adaptive filters and self-organizing neural networks*, IEEE Transactions on Image Processing, t. 3, Nr 1, 1994
- [8] Li S., Poudel A., Chu T.P.: *Fuzzy logic based delamination detection in CFRP panels*, Informatica, t. 37, Nr 4, 2013
- [9] Meksen T.M., Draï R., Sellidj F.: *Pattern recognition in ultrasonic imagery using the Hough transform*, Materiały konferencji "World Congress on Ultrasonics", Paris, France, wrzesień 2003
- [10] Momtaz A., Sadr A.: *Clustering of Ultrasonic C-Scan Images using Rosette Pattern*, International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology, t. 10, Nr 6, 2009
- [11] Rashli R., Bakar E.A., Othman A.R.: *Feature analysis of ultrasonic C-Scan image for nondestructive evaluation*, Materiały konferencji "the IEEEJ Image Electronics and Visual Computing Workshop", Kuching, Malaysia, listopad 2012
- [12] Smith R.A.: *Composite defects and their detection*, R. Rawlings (Ed.), Encyclopaedia of Life Support Systems, t. 3: Materials science and engineering, UNESCO, 2009
- [13] Wronkiewicz A., Dragan, K.: *Damage size monitoring of composite aircraft structures based on ultrasonic testing and image processing*, Composites Theory and Practice, t. 16, Nr 3, 2016
- [14] Wronkiewicz A., Dragan K., Dziendzikowski M., Chalimoniuk M., Sbarufatti C.: *3D Reconstruction of Ultrasonic B-Scans for Nondestructive Testing of Composites*, International Conference on Computer Vision and Graphics, Springer International Publishing, 2016
- [15] Wronkiewicz A., Katunin A., Dragan, K.: *Ultrasonic C-Scan image processing using multilevel thresholding for damage evaluation in aircraft vertical stabilizer*, International Journal of Image, Graphics and Signal Processing, t. 7, Nr 11, 2015