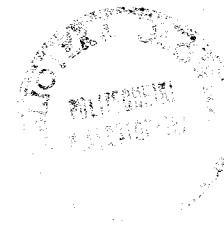


Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej



U-38

# **BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN**

Zeszyt 11



Wydawnictwo Politechniki Białostockiej

Białystok 2003

Redaktor naukowy:  
prof. nadzw. dr hab. inż. Paweł Lindstedt

Recenzenci:  
prof. dr hab. inż. Jerzy Manerowski – 1, 3, 7, 8, 10, 14, 21  
prof. zw. dr hab. inż. Stefan Szczeciński – 4, 5, 15, 16, 17, 20  
dr hab. inż. Józef Żurek, prof. ITWL – 12  
dr hab. inż. Sylwester Kłysz – 6, 13, 18, 19  
dr hab. inż. Krzysztof Sibilski – 2, 9, 11

Opracowanie redakcyjne:  
Lucyna Sewastianowicz

Skład:  
Teresa Dawidowicz

© Copyright by Politechnika Białostocka 2003

ISSN 0860-9292

Druk:  
Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej

## SPIS TREŚCI

1. <b>Henryk Borowczyk, Paweł Raszkievicz:</b> Koncepcja diagnostycznego modelu układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego .....	5
2. <b>Henryk Borowczyk, Tomasz Sańko-Sawczenko:</b> Niestateczna praca osiowej sprężarki lotniczego silnika turbinowego – przyczyny powstawania i metody zapobiegania. Cz. 1: Analiza problemu .....	17
3. <b>Henryk Borowczyk, Mariusz Sobiech:</b> Koncepcja diagnostycznego modelu układu sterowania przyspieszaniem turbinowego silnika odrzutowego .....	35
4. <b>Adam Dudar:</b> Moc indykowana tłokowej sprężarki chłodniczej .....	49
5. <b>Adam Dudar:</b> Pomiar parametrów ociekowej chłodnicy wody i wyznaczanie jej sprawności .....	61
6. <b>Małgorzata Grądzka-Dahle:</b> Ocena właściwości tribologicznych kompozytów z wypełniaczami węglowymi .....	69
7. <b>Krzysztof Jaworek, Cezary Nietupski:</b> Identyfikacja modelu dynamiki ruchu bioobiektów .....	79
8. <b>Adam Kotowski:</b> Diagnostowanie elementów maszyn w oparciu o parametry funkcji kwadratu wzmocnienia amplitudowego .....	95
9. <b>Cezary Kownacki:</b> Analiza sygnałów diagnostycznych na przykładzie efektu Barkhausena .....	107
10. <b>Paweł Lindstedt, Janusz Magier:</b> Przesłanki do parametrycznej diagnostyki układu łożyskowania silnika Allison 250-C20B .....	121
11. <b>Paweł Lindstedt, Paweł Ostapkowicz:</b> Sygnały słabych interakcji międzyobiektywych jako nowa informacja w procesie diagnozowania wycieków z rurociągów .....	135
12. <b>Jerzy Manerowski, Henryk Borowczyk, Tomasz Sawicki:</b> Ocena stanu technicznego układu sterowania przyspieszaniem turbinowego silnika odrzutowego typu 25 z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej .....	151
13. <b>Konstanty Miatluk:</b> Koordynacja procesów geometrycznego projektowania hierarchicznych wielopoziomowych systemów .....	163
14. <b>Jolanta Pauk:</b> Metody identyfikacji obiektów – stan wiedzy .....	179
15. <b>Sławomir Poskrobko, Jan Łach:</b> Współspalanie osadów ściekowych z węglem kamiennym .....	187

16. <b>Henryk Skrocki:</b> Wykorzystanie nadwyżek ciepła powstających przy spalaniu odpadów .....	197
17. <b>Henryk Skrocki:</b> Hydratacja i dehydratacja w magazynowaniu energii cieplnej .....	209
18. <b>Roman Trochimczuk, Siatoslav E. Karpovich:</b> Mechatroniczny system przemieszczeń dla technologii laserowych .....	219
19. <b>Roman Trochimczuk, Siatoslav E. Karpovich:</b> Technologia i technika formowania trójwymiarowych obiektów w szkle i w innych przezroczystych dielektrykach za pomocą lasera .....	231
20. <b>Wiesław Załuska:</b> Charakterystyki przepływowe i energetyczne pomp wirowych .....	245
21. <b>Tomasz Zubrycki, Paweł Suchodola, Krzysztof Jaworek:</b> Ocena lokomocji dwunożnej człowieka w ruchu płaskim z wykorzystaniem analizy portretów fazowych uzyskanych za pomocą urządzenia PDA .....	257

Henryk Borowczyk<sup>1</sup>, Paweł Raszkiewicz<sup>2</sup>

## KONCEPCJA DIAGNOSTYCZNEGO MODELU UKŁADU STEROWANIA DOPALACZEM TURBINOWEGO SILNIKA ODRZUTOWEGO

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono koncepcję diagnostycznego modelu układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego. Model opracowano na podstawie danych eksperymentalnych, stosując metodę identyfikacji obiektów dynamicznych (pakiet oprogramowania MATLAB – System Identification Toolbox) oraz wielowartościowe kodowanie parametrów modelu dynamicznego.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, identyfikacja, kodowanie, logika wielowartościowa, silnik turbinowy, układ sterowania

### 1. Wprowadzenie

Podstawowym problemem diagnostyki technicznej jest synteza modelu diagnozowanego obiektu opisującego relację między szeroko rozumianymi symptomami a uszkodzeniami [4]. Istotne jest również to, aby model dawał się zaimplementować w zautomatyzowanym (komputerowo sterowanym) systemie diagnostycznym. Komputeryzacja procesów diagnozowania pozwala na dokładniejszą oraz efektywniejszą rejestrację i analizę sygnałów, wszechstronne ich modelowanie i przetwarzanie, natomiast eliminacja czynnika ludzkiego zapewnia obiektywizm otrzymywanych wyników.

W niniejszej pracy przedstawiono sposób budowy modelu diagnostycznego układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego z wykorzystaniem metod identyfikacji oraz wielowartościowego kodowania. Opracowanie powstało w ramach pracy dyplomowej w Katedrze Automatyki i Diagnostyki na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej [6]. Wykorzystano dane z ekspe-

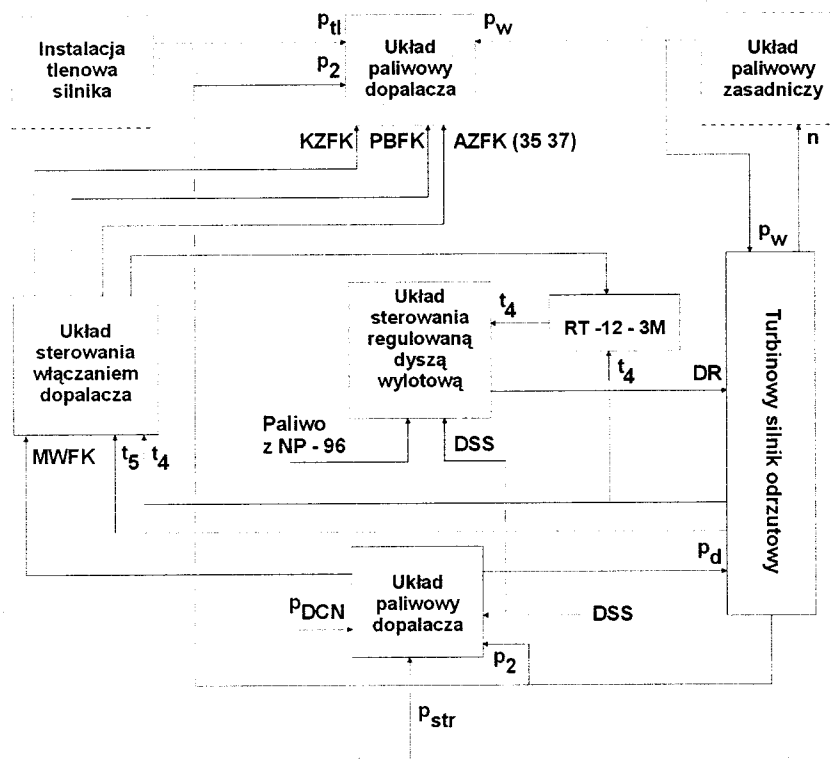
<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, [borowczyk@post.pl](mailto:borowczyk@post.pl)

<sup>2</sup> Absolwent Politechniki Białostockiej – 2003r., [praszkiwicz@o2.pl](mailto:praszkiwicz@o2.pl)

rymentów diagnostycznych przeprowadzonych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych [2].

## 2. Diagnozowany obiekt

Obiektem diagnozowania jest układ sterowania dopalaczem turbijnowego silnika odrzutowego typu 89. Dopalacz jest urządzeniem umożliwiającym spalanie dodatkowej ilości paliwa w przestrzeni za turbiną, co w połączeniu ze zmianą pola przekroju regulowanej dyszy wylotowej, pozwala na znaczne zwiększenie ciągu turbijnowego silnika odrzutowego [3, 5, 7].



Rys. 1. Schemat układu sterowania dopalaczem [2]

W skład układu sterowania dopalaczem wchodzi trzy podstawowe podukłady (rys. 1):

- zapłonowy,
- sterowania natężeniem przepływu paliwa doprowadzanego do komory dopalacza,
- sterowania regulowaną dyszą wylotową.

Układ zapłonowy wytwarza energię cieplną niezbędną do zainicjowania procesu spalania paliwa w dopalaczu. Uruchomienie układu zapłonowego jest możliwe po przekroczeniu prędkości obrotowej  $n_{fiz} = 80\%$ .

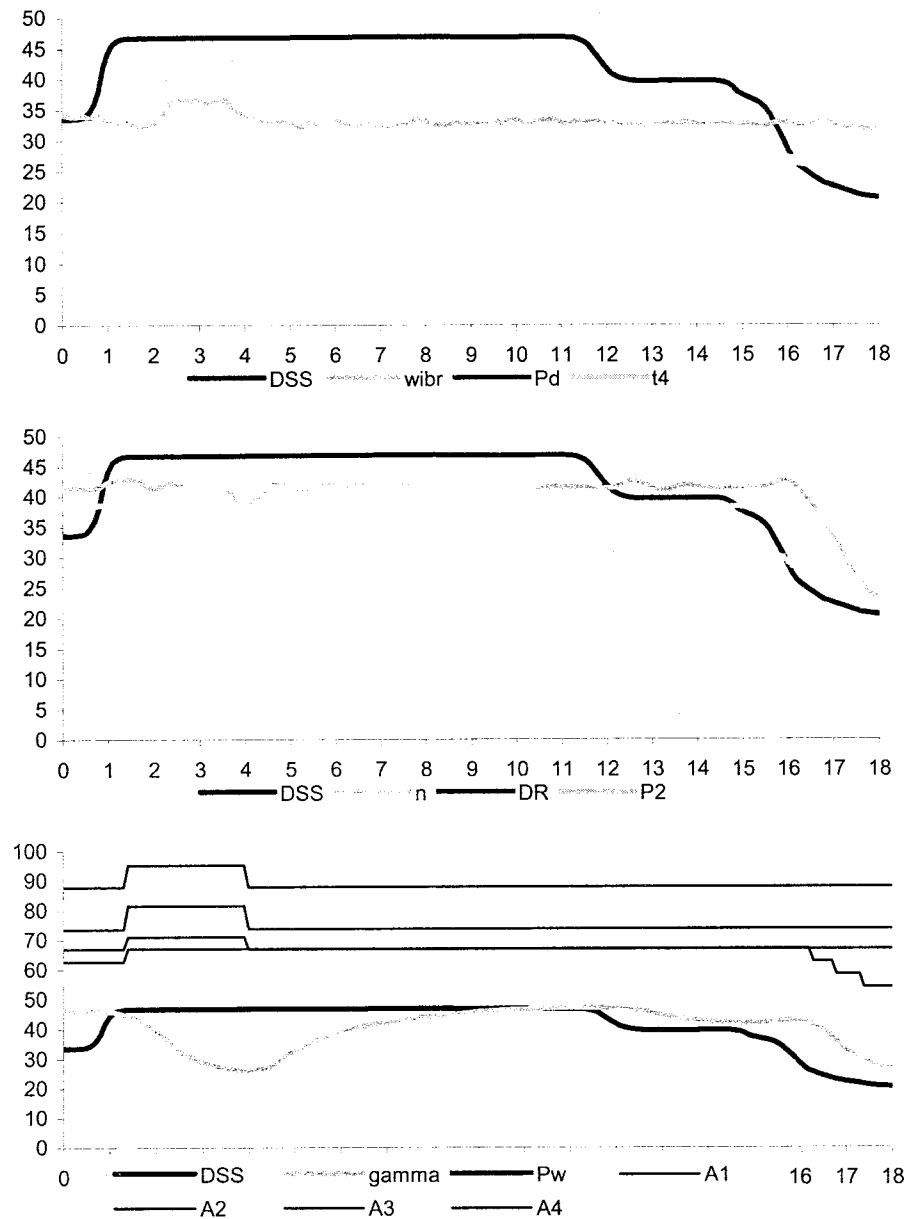
Układ paliwowy dopalacza steruje natężeniem przepływu paliwa – dozowanie paliwa uzależnione jest od położenia dźwigni sterowania silnikiem (DSS) pomiędzy oporami MINIMALNE DOPALANIE – MAKSYMALNE DOPALANIE.

Układ sterowania dyszą regulowaną zmienia pole przekroju wylotowego według ustalonego algorytmu. Pole przekroju zależy od położenia DSS i korygowane jest przez regulator temperatury RT-12-3M.

## 3. Sygnały diagnostyczne

W Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych podczas badań eksperymentalnych, na stanowisku diagnostycznym zarejestrowane zostały oscylogramy przebiegów sygnałów kontrolnych, które są nośnikami informacji o funkcjonowaniu obiektu. W ten sposób powstał przebieg parametrów wzorcowych (prawidłowy, bez uszkodzeń – oznaczony jako w) oraz zbiór przebiegów z symulowanymi uszkodzeniami, spośród których wybrano:

- u1 – nadmierne napięcie głównej sprężyny wahadła odśrodkowego regulatora prędkości obrotowej,
- u2 – obniżone napięcie głównej sprężyny wahadła odśrodkowego regulatora prędkości obrotowej,
- u3 – nadmierna przepustowość głównego pakietu dławiącego,
- u4 – obniżona przepustowość głównego pakietu dławiącego,
- u5 – nadmierne napięcie sprężyny zaworu różnicowego agregatu RSF-53B,
- u6 – obniżone napięcie sprężyny zaworu różnicowego agregatu RSF-53B,
- u7 – nieszczelność przewodu doprowadzającego powietrze zza sprężarki do agregatu RSF-53B,
- u8 – nadmierna przepustowość pakietu dławiącego suwaka termoregulatora,
- u9 – obniżona przepustowość pakietu dławiącego suwaka termoregulatora.



Rys. 2. Przebiegi sygnałów kontrolnych rejestrowane podczas pracy dopalacza bez uszkodz (wzorcowe) [2]

Sygnały odzwierciedlające funkcjonowanie układu sterowania dopalaczem to [2]:

a) sygnały ciągłe:

- n – prędkość obrotowa wirnika silnika,
- pd – ciśnienie paliwa dopalacza,
- pw – ciśnienie paliwa zasadniczej komory spalania,
- t4 – temperatura spalin za turbiną,
- DR – średnica dyszy regulowanej,
- p2 – ciśnienie powietrza za sprężarką,
- gamma – współczynnik wypełnienia regulatora temperatury,
- wibr – drgania silnika,
- DSS – położenie dźwigni sterowania silnikiem,

b) sygnały dwustanowe (przyjmujące dwie wartości – włączone/wyłączone):

- MWFK – sygnał włączenia/wyłączenia dopalacza (na linii automatyki A1),
- KZFK – sygnał włączenia/wyłączenia zaworu rozruchowego dopalacza (na linii automatyki A2),
- AZFK35, AZFK37 – sygnały włączenia/wyłączenia cewek zapłonowych (na linii automatyki A3),
- PBFK – sygnał włączenia/wyłączenia bloku rozruchowego dopalacza (na linii automatyki A4).

#### 4. Identyfikacja modelu dynamicznego

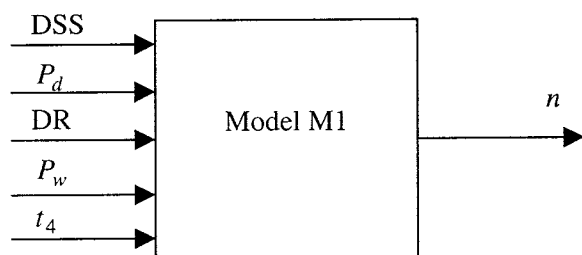
Identyfikacja modeli dynamicznych rzeczywistych obiektów polega na zbudowaniu matematycznego modelu, który z wystarczającą dokładnością odwzoruje właściwości dynamiczne obiektu. Do realizacji zadania wykorzystano pakiet oprogramowania *MATLAB 5.1, System Identification Toolbox* [8].

Identyfikacja obejmuje następujące etapy:

- przygotowanie danych eksperymentalnych (zebranych podczas eksploatacji obiektu),
- wybór struktury modelu,
- wyznaczenie parametrów modelu wybraną metodą identyfikacji,
- ocena zgodności właściwości dynamicznych modelu i rzeczywistego obiektu (dokładności identyfikacji) przez porównanie odpowiedzi czasowych modelu i obiektu na jednakowy sygnał wejściowy,
- jeśli uzyskana dokładność nie jest wystarczająca, należy przyjąć inną strukturę modelu i ponawiać identyfikację parametrów, aż do uzyskania zadowalających rezultatów.

Do identyfikacji dynamicznego modelu układu sterowania dopalaczem w brano przebiegi sygnałów, na podstawie których można wnioskować o stanie technicznym i uszkodzeniach obiektu:  $DSS$ ,  $DR$ ,  $P_d$ ,  $P_w$ ,  $P_2$ ,  $n$ ,  $t_4$ . W [6] opracowano dwa modele z wieloma wejściami i jednym wyjściem:

- model M1: sygnały wejściowe:  $DSS$ ,  $P_d$ ,  $DR$ ,  $P_w$ ,  $P_2$ ,  $t_4$ , sygnał wyjściowy  $n$ , (rys. 3),
- model M2: sygnały wejściowe:  $DSS$ ,  $n$ ,  $DR$ ,  $P_w$ ,  $P_2$ ,  $t_4$ , sygnał wyjściowy:  $P_c$



Rys. 3. Schemat modelu M1 [6]

Przyjęto model autoregresji z zewnętrznym wymuszeniem:  $ARX$  – *Autoregressive with exogenous input* zaimplementowany w przyborniku *System Identification Toolbox* pakietu *MATLAB*. Struktura modelu jest jednoznacznie określona za pomocą trzech parametrów:  $na$ ,  $nb$ ,  $nk$ , gdzie:

- $na$  – stopień wielomianu mianownika transmitancji,
- $nb$  – stopień wielomianu licznika transmitancji,
- $nk$  – opóźnienie w układzie.

Identyfikacja modelu polega na iteracyjnym poszukiwaniu zbioru współczynników transmitancji operatorowej, który minimalizuje sumę kwadratów różnic pomiędzy odpowiedzią modelu a odpowiedzią rzeczywistego obiektu w chwilach czasowych, dla których zarejestrowano sygnały wejściowe i wyjściowe obiektu. Dokładność identyfikacji zależy od trafności wyboru stopnia transmitancji operatorowej oraz od jakości zarejestrowanych danych doświadczalnych (przebiegów parametrów kontrolnych).

Ponieważ wektor współczynników  $[na \ nb \ nk]$ , określający rząd licznika i mianownika transmitancji oraz opóźnienie, nie jest znany, poszukuje się go według kryterium minimalizacji błędów określanego podczas weryfikacji modelu. Weryfikacja modelu otrzymanego dla przyjętej struktury dokonuje się przy użyciu funkcji *compare*, która powoduje wyświetlenie wyników weryfikacji i wartości błędów średniokwadratowego oraz szereg czasowy symulowanej odpowiedzi estymowanego m

delu. Optymalna struktura zwracana jest przez funkcję *selstruc*. Zawiera ona najmniejszą wartość błędów średniokwadratowych  $Fit$ . Z utworzonej macierzy formatu *THETA*, za pomocą funkcji *th2tf*, uzyskuje się współczynniki licznika i mianownika transmitancji dyskretnego modelu. Struktura modelu wybrana do dalszej analizy posiada następujące parametry:

$$na = 4, nb = 4, nk = 1.$$

Wyniki identyfikacji w postaci zbioru współczynników wielomianów licznika i mianownika transmitancji dyskretnego dla procesu prawidłowego (bez uszkodzeń) oraz z wybranymi symulowanymi uszkodzeniami zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1.

Fragment zestawienia wartości współczynników (A, B1) transmitancji dyskretnego modelu M1 [6]

A'n'	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	B1't <sub>4</sub> '	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>
w	1,000	-1,385	0,520	0,102	-0,067	w	0,000	-3,319	5,748	-4,350	2,019
u1	1,000	-1,575	0,867	-0,163	0,054	u1	0,000	0,051	-1,700	2,310	-0,287
u2	1,000	-1,392	0,751	0,057	-0,172	u2	0,000	0,907	2,949	-3,169	1,339
u3	1,000	-1,461	0,612	-0,044	0,078	u3	0,000	-1,380	1,457	0,387	-0,211
u4	1,000	-1,054	0,279	0,085	-0,131	u4	0,000	0,029	0,357	-0,309	0,527
u5	1,000	-0,669	0,269	0,232	0,049	u5	0,000	-2,336	-0,150	3,455	-0,869
u6	1,000	-0,657	0,415	-0,035	-0,078	u6	0,000	-0,223	0,045	-0,138	0,230
u7	1,000	-1,184	0,689	-0,137	0,190	u7	0,000	1,004	-2,771	3,807	-1,483
u8	1,000	-1,229	0,838	0,037	-0,048	u8	0,000	-0,050	1,212	-2,609	2,216
u9	1,000	-1,125	0,973	-0,312	0,234	u9	0,000	0,629	-1,206	-0,286	1,345

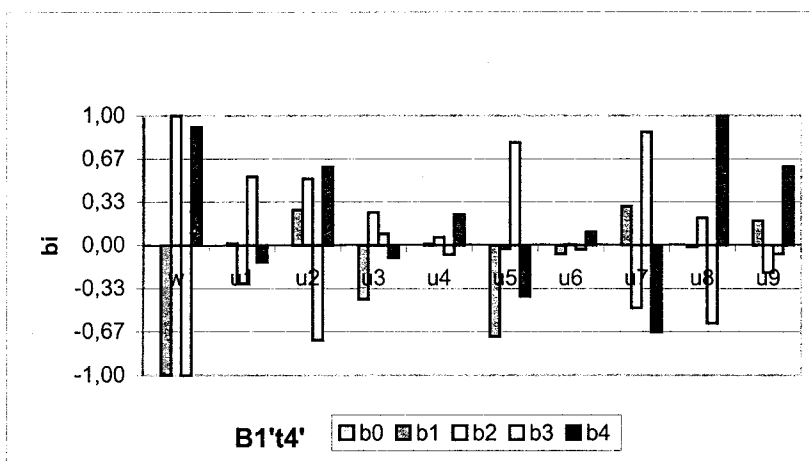
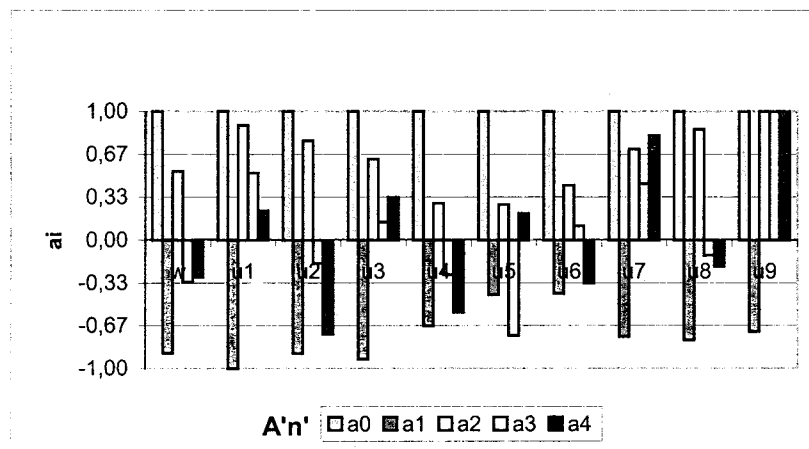
## 5. Model diagnostyczny

Wyznaczone współczynniki transmitancji zawierają informację o stanie technicznym badanego obiektu, mogą zatem stanowić podstawę do opracowania modelu diagnostycznego opisującego relację między wartościami współczynników a uszkodzeniami.

Dla ułatwienia dalszej analizy dokonano normalizacji wartości współczynników wielomianów transmitancji według zależności:

$$a_n' = \frac{a_n}{|a_n|_{\max}}$$

Po normalizacji współczynniki transmitancji przyjmują wartości z przedziału  $[-1; 1]$ . Wykres znormalizowanych współczynników przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wybrane znormalizowane wartości współczynników transmitancji dyskretniej – model M1

Kolejnym krokiem jest przeprowadzenie kodowania całkowitoliczbowego współczynników. Zasady kodowania przyjęte w opracowywanym modelu przedstawia rysunek 5. Przedział zmienności współczynników został (w pierwszym przybliżeniu) podzielony równomiernie na  $2 \times 3$  podprzedziały oraz wyróżniono wartość 0. Każdemu przedziałowi przyporządkowano liczbę całkowitą ze znakiem lub liczbę 0, co w rezultacie generuje kod siedmiowartościowy. Wyniki kodowania wartości współczynników transmitancji modelu M1 przedstawiono w tabeli 2.

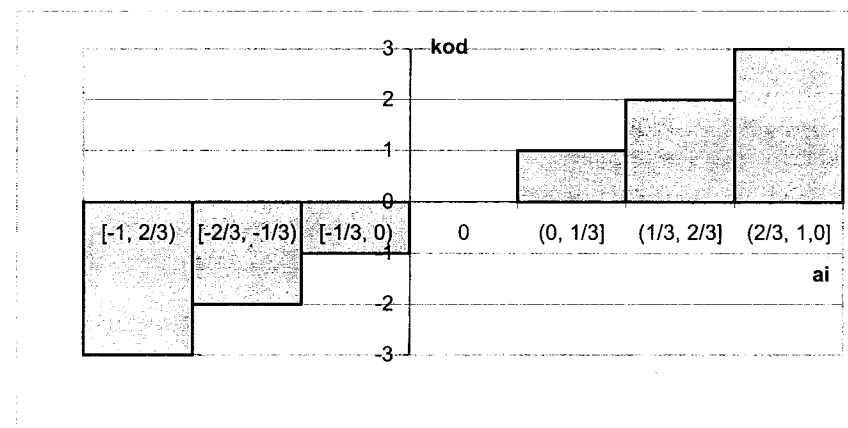
Rys. 5. Zasady kodowania wartości współczynników  $a_i$  i  $b_i$ 

Tabela 2.

Fragment tabeli kodowej współczynników A i B1 dla stanu zdadności oraz poszczególnych uszkodzeń układu sterowania dopalaczem – model M1

1/3						1/3					
A'n'	a0	a1	a2	a3	a4	B1't4'	b0	b1	b2	b3	b4
u4	3	-3	1	-1	-2	u5	0	-3	-1	3	-2
w	3	-3	2	-1	-1	w	0	-3	3	-3	3
u3	3	-3	2	1	1	u3	0	-2	1	1	-1
u2	3	-3	3	-1	-3	u8	0	-1	1	-2	3
u8	3	-3	3	-1	-1	u6	0	-1	1	-1	1
u1	3	-3	3	2	1	u7	0	1	-2	3	-3
u7	3	-3	3	2	3	u9	0	1	-1	-1	2
u9	3	-3	3	3	3	u1	0	1	-1	2	-1
u5	3	-2	1	-3	1	u4	0	1	1	-1	1
u6	3	-2	2	1	-2	u2	0	1	2	-3	2

### Identyfikacja uszkodzeń

Na podstawie wyznaczonych tabel kodowych można wnioskować o braku uszkodzeń (czyli o stanie zdadności obiektu), a także rozróżnić zaistniałe uszkodzenia. Identyfikacja uszkodzeń polega na analizie ciągów kodowych odpowiadających stanowi wzorcowemu ( $w$ ) oraz odpowiednim klasom uszkodzeń ( $u1...u9$ ). Identyfikacji takiej dokonuje się porównując pary ciągów kodowych – jeżeli ciągi różnią się co najmniej na jednej pozycji to uszkodzenia są rozróżnialne. W prze-

ciwnym przypadku należy rozważyć zmianę sposobu kodowania – zwiększyć liczbę podprzedziałów. Skuteczność wnioskowania jest tym lepsza im większa jest liczba pozycji, na których różnią się poszczególne pary ciągów kodowych.

Jak wynika z analizy tabeli 2, dla rozpatrywanego w niniejszej pracy modelu układu sterowania dopalaczem, poszczególne stany obiektu (zdadności i uszkodzenia) są wzajemnie rozróżnialne przy zastosowaniu kodu siedmiowartościowego.

Uwzględnienie większej liczby uszkodzeń lub uzyskanie większej precyzji diagnozowania, może wymagać rozszerzenia sposobu kodowania (rys. 6) o kolejnych wartościach kodowych. Niestety, wraz z ich wzrostem identyfikacja staje się trudniejsza. Jej przeprowadzenie wymaga zastosowania metod wykorzystujących logikę wielowartościową i teorię informacji [1] lub sieci neuronowe.

## 6. Podsumowanie

Proces identyfikacji uszkodzeń wspomagany komputerowo zwiększa obiektywizm i dokładność wnioskowania diagnostycznego. Możliwość taką stwarza zastosowanie systemu ekspertowego, którego bazę stanowią wyniki kodowania wartości współczynników. Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych, które umożliwiają kontrolę nad występującym tu złożonym problemem wielowymiarowości. W rozpatrywanych zagadnieniach zastosowanie znajduje także wiedza z identyfikacji procesów, logiki wielowartościowej i teorii informacji. Podsumowując można stwierdzić, że rozwiązania z niniejszej pracy w połączeniu ze znajomością wymienionych dziedzin, dają możliwość opracowania w pełni skomputeryzowanej i efektywnej metody diagnozowania układów automatycznej regulacji i sterowania.

## Literatura

1. **Borowczyk H.:** *Quasi-informacyjna metoda wyznaczania programu diagnozowania złożonych obiektów technicznych*. Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 1984.
2. **Borowczyk H., Kącki Cz., Kobański A.:** *Technologia identyfikacji uszkodzeń turbinowych silników odrzutowych typu 89 przy pomocy stanowiska diagnostycznego KAPSO-17MK*. ITWL, Warszawa, 1991.
3. **Dzierżanowski P., Kordziński W., Łyżwiński M., Szczeciński S., Wiatrak R.:** *Turbinowe silniki odrzutowe*. WKiŁ, Warszawa, 1983.

4. **Lindstedt P., Borowczyk H.:** *Kompleksowy system diagnostyczny statku powietrznego*. ITWL, Warszawa, 1998.
5. *Opis techniczny turbinowego silnika odrzutowego AŁ-21F3*.
6. **Raszkiewicz P.:** *Model diagnostyczny układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego*. Praca magisterska. Politechnika Białostocka, Białystok, 2003.
7. **Szczeciński S.:** *Napędy lotnicze*. WKiŁ, Warszawa, 1989.
8. *System identification toolbox, User's guide*. The MathWorks, 2000.



Henryk Borowczyk<sup>1</sup>, Tomasz Sańko-Sawczenko<sup>2</sup>

**NIESTATECZNA PRACA  
OSIOWEJ SPRĘŻARKI LOTNICZEGO  
SILNIKA TURBINOWEGO – PRZYCZYNY POWSTAWANIA  
I METODY ZAPOBIEGANIA  
Cz. 1: Analiza problemu**

**Streszczenie:** Przedmiotem rozważań jest analiza zjawiska niestatecznej pracy osiowej sprężarki lotniczego silnika turbinowego. Omówiono jeden z pierwszych nieliniowych modeli, opracowany przez E. M. Greitzer'a [5], stanowiący punkt wyjścia badań naukowych dotyczących niestatecznej pracy sprężarek silników turbinowych. Przedstawiono podstawowe metody stabilizacji pracy sprężarki: sterowanie upustem powietrza i położeniem łopatek aparatów kierujących.

**Słowa kluczowe:** silnik turbinowy, sprężarka osiowa, niestateczna praca

*Oznaczenia:*

$A_c$  – pole kanału przepływowego,  
 $a$  – prędkość dźwięku,  
 $B$  – parametr Greitzer'a,  
 $L_C$  – długość kanału przepływowego sprężarki,  
 $n_{zr}$  – zredukowana prędkość obrotowa,  
 $U$  – prędkość obwodowa,  
 $V_p$  – objętość odbiornika,  
 $\dot{m}_{zr}$  – zredukowane masowe natężenie przepływu,  
 $\eta_s$  – sprawność sprężarki,  
 $\Pi$  – spręż,

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, borowczyk@post.pl

<sup>2</sup> Absolwent Politechniki Białostockiej – 2003, sstomek9@interia.pl

- $\Pi_O$  – spręż obliczeniowy,  
 $\xi$  – bezwymiarowy czas określany częstotliwością rezonansową Helmholtz'a  $\omega_H$ ,  
 $\Psi$  – bezwymiarowy przyrost ciśnienia  $\Psi = 2\Delta P / \rho U^2$ ,  
 $\phi$  – średnie osiowe natężenie przepływu  $\phi = C_x / U$ ,  
 $\Psi(\phi)$  – bezwymiarowa charakterystyka sprężarki,  
 $\Phi(\psi)$  – bezwymiarowa charakterystyka odbiornika,  
 $\omega_H$  – częstotliwość rezonansowa Helmholtz'a.

## 1. Wprowadzenie

Niestateczna praca osiowej sprężarki lotniczego silnika turbinowego powodu wahania ciśnienia i natężenia przepływu strumienia czynnika roboczego (powi trza/spalin) w całym układzie gazodynamicznym silnika. Zaburzenia te mogą d prowadzić do wyłączenia silnika, a nawet do jego uszkodzenia w stopniu uni możliwiającym dalszą pracę. Mają zatem bezpośredni wpływ na trwałość silnił oraz bezpieczeństwo latania samolotów cywilnych i wojskowych.

Ze względu na stateczność pracy sprężarki wprowadza się ograniczenia ek ploatacyjne dla silników turbinowych. Ograniczenia te powodują wydłużenie cza: akceleracji i deceleracji (zwiększania i zmniejszania prędkości obrotowej), czy powodują pogorszenie dynamiki pracy silnika, przede wszystkim dotyczy to silr ków, w których sprężarki nie są regulowane. Zastosowanie w silnikach turbin wych sprężarek regulowanych pozwala na zmniejszenie zapasu stateczności umo liwiając pracę silnika blisko parametrów granicznych, co przekłada się na bardzi efektywne wykorzystanie ciągu silnika i obniżenie kosztów jego eksploatacji, a wymaga starannej eksploatacji, szczególnie układu sterowania sprężarką.

W związku z powyższym, wiedza na temat powstawania i przebiegu zjawisł niestatecznej pracy oraz jego wpływu na podstawowe parametry silnika, jest je nym z ważniejszych zagadnień dotyczących eksploatacji silników turbinowyc Pozwala bowiem na opracowanie bardziej efektywnych metod wykrywania i prz ciwdziałania niestatecznej pracy sprężarki. O aktualności problemu świadczy lic ba prac naukowo-badawczych podejmowanych w ostatnich latach [2, 3, 4, 8].

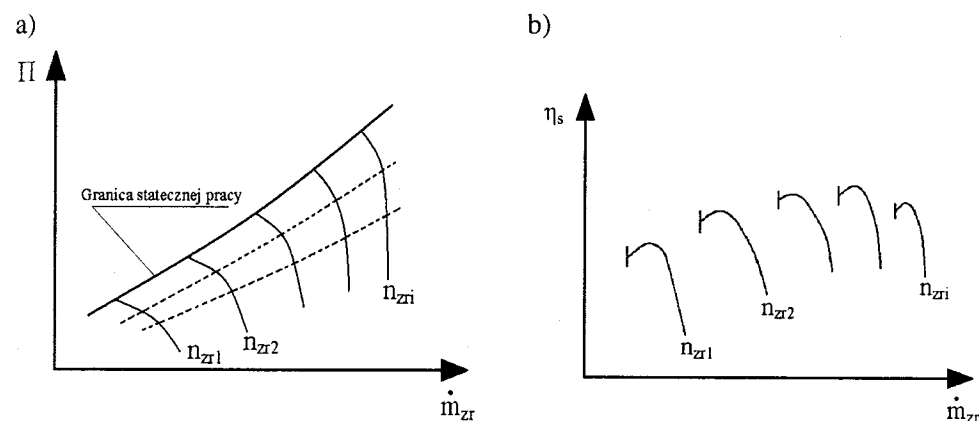
Niniejsza praca zawiera elementy analizy przeprowadzonej w ramach mag sterskiej pracy dyplomowej wykonanej w Katedrze Automatyki i Diagnostyki i Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej [10].

## 2. Charakterystyki sprężarki

Analiza procesów funkcjonowania sprężarki, zarówno na zakresach statecznych (w tym obliczeniowych), jak i niestatecznych, prowadzona jest z wykorzystaniem charakterystyk, określających relacje między jej podstawowymi parametrami:

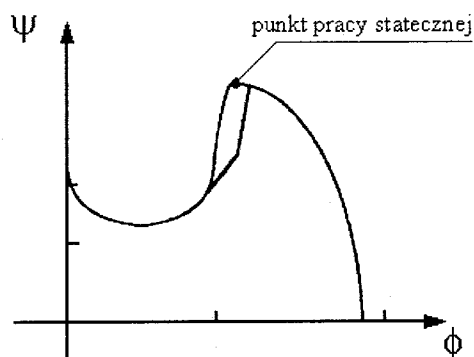
- masowym natężeniem przepływu powietrza,
- stopniem zwiększenia ciśnienia w sprężarce opisywanym sprężem (stosunkiem ciśnienia na wyjściu do ciśnienia na wejściu) lub przyrostem ciśnienia (różnicą między ciśnieniem wyjściowym i wejściowym),
- sprawnością sprężarki, określanej jako stosunek mocy sprężania w warunkach idealnych, do mocy rzeczywiście pobieranej przez sprężarkę.

Na rysunku 1 przedstawiono uogólnione charakterystyki sprężarki wyrażające zależność sprężu i sprawności od masowego natężenia przepływu przez sprężarkę oraz prędkości obrotowej.



Rys. 1. Charakterystyki uogólnione sprężarki osiowej [7]

Podstawową charakterystyką stosowaną przy modelowaniu niestatecznej pracy jest bezwymiarowa charakterystyka spiętrzenia (rys. 2). Przedstawia ona zależność pomiędzy bezwymiarowym wskaźnikiem spiętrzenia (przyrostem ciśnienia)  $\Psi$ , a bezwymiarowym masowym natężeniem przepływu  $\phi$ , zwanym również osiowym natężeniem przepływu. Wskaźniki  $\Psi$  i  $\phi$  mogą dotyczyć całej sprężarki, jak również jej pojedynczych stopni. Zaletą tej charakterystyki jest możliwość obserwacji ciągłych zmian punktu pracy sprężarki, w tym również histerezy związanej z występowaniem pracy niestatecznej [5].



Rys. 2. Bezwymiarowa charakterystyka spiętrzenia z zaznaczonym granicznym punktem pracy statecznej [10]

### 3. Przyczyny powstawania i rodzaje niestatecznej pracy sprężarki

Czynnikami powodującymi niestateczną pracę sprężarki są zaburzenia prędkości osiowej i/lub obwodowej przepływu, ciśnienia oraz temperatury strumienia powietrza w kanale przepływowym. Przyczyny niestatecznej pracy sprężarki silnika turbinowego można ogólnie sklasyfikować jako [1, 10]:

- wynikające z zakresu pracy silnika lub warunków lotu: praca silnika na zakłaskach przejściowych, nieprawidłowo skierowany strumień powietrza najczęściej występujący podczas rozruchu oraz lotu na dużych kątach natarcia, osadza się lodu na wlocie, zassanie gorących gazów z innego samolotu (podczas lotu grupowych) lub z odpalanych pocisków rakietowych,
- ze względu na stan techniczny silnika: zużyty lub zniszczony układ łopatek sprężarki, skorodowane lub zniszczone na skutek erozji profile łopatek kierownic i wirnika (pęknięcia, rysy, wygięcia, wyłamania),
- losowe, np. na skutek dostania się ciała obcego do silnika.

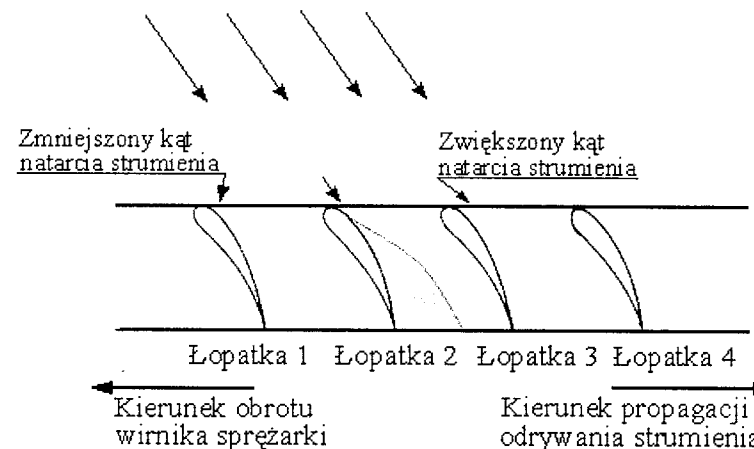
W literaturze przedmiotu [2, 3, 4, 5, 6, 8] wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje niestatecznej pracy: wirujące strefy oderwań i pompaż (o różnej intensywności).

### 4. Wirujące strefy oderwań

Zjawisko wirujących stref oderwań, to zaburzenie przepływu strumienia w kanale przepływowym sprężarki, które polega na odrywaniu strumienia od pro-

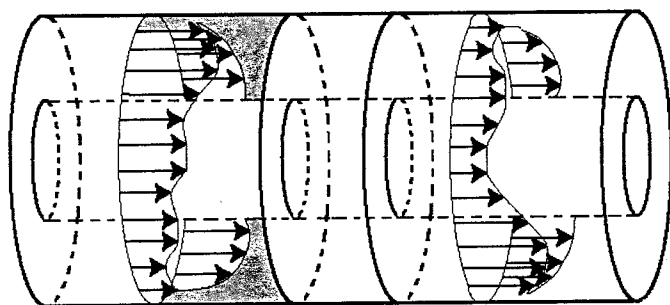
łopatek (głównie łopatek wirnikowych). Zjawisko to jest niezwykle groźne dla sprężarki silnika turbinowego, gdyż towarzyszą mu pulsacje strumienia o wysokiej częstotliwości. Drgania strumienia przenoszone na elementy silnika, w skrajnych przypadkach mogą powodować urywanie się tych elementów (w szczególności dotyczy to łopatek sprężarki), co w rezultacie może doprowadzić do całkowitego uszkodzenia zespołu napędowego.

Powstawanie zjawiska wirujących stref oderwań po raz pierwszy zostało przedstawione przez H. W. Emmons'a w roku 1955. Na rysunku 3 przedstawiono schemat obrazujący fizykę zjawiska. Nadmierny wzrost kąta natarcia strumienia powietrza napływającego na wieniec łopatkowy powoduje oderwania strumienia od profili łopatkowych, np. oderwanie na łopatce 2 opływa go, zmieniając kierunek – rozchodzi się od łopatki 2 w dwóch przeciwnych kierunkach ku łopatce 1 i ku łopatce 3, powodując tym samym zmiany w kącie natarcia na tych łopatkach. Kąt natarcia na łopatce 3, rośnie zaś na łopatce 1 maleje. W związku z kierunkiem obrotu wirnika sprężarki oraz tym, że kąt natarcia na łopatce 3 jest większy niż na łopatce 1, oderwania strumienia od profili łopatkowych rozprzestrzeniają się w kierunku przeciwnym do kierunku obrotu wirnika sprężarki, czyli od łopatki 2 do łopatki 3 [10]. Proces ten rozrasta się, propagując odrywania strumienia na sąsiednich łopatkach, które łącząc się w grupy, tworzą obszary oderwań. W miarę powiększania się, obszary oderwane dzielą się na kilka mniejszych i rozmieszczają się w przybliżeniu równomiernie na obwodzie wieńca.



Rys. 3. Model powstawania wirujących stref oderwań według H. W. Emmons'a (na podstawie [2, 3, 4])

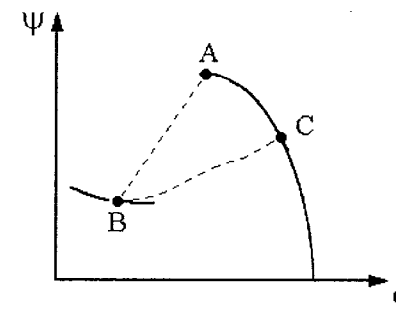
Do powstawania wirujących stref oderwań dochodzi podczas pracy silnika i zakresach przejściowych, tzn. gdy przepływ strumienia jest nieustalony. Wówczas składowe prędkości strumienia: osiowa i obwodowa znacznie odbiegają od wartości obliczeniowych, co powoduje zmianę kątów napływu strumienia na wieńca łopatkowe. Kąty natarcia rosną, tym samym natężenie przepływu maleje, co przyczynia się do powstawania oderwań strumienia od profili łopatek sprężarki. W sprężarkach osiowych oderwania powstają zazwyczaj po stronie wypukłej (ssnia) łopatki, ponieważ występują tam największe gradienty ciśnienia i większe je narastanie warstwy przyściennej [11]. Oderwania powodują, że w przestrzeni międzyłopatkowych wytwarzają się obszary zawirowań, które w miarę rozprzestrzeniania się mogą doprowadzić do tego, że część pola kanału przepływowej sprężarki będzie nieczynna - przepływ będzie dławiony (rys. 4).



Rys. 4. Schemat zjawiska wirujących stref oderwań w kanale przepływowej sprężarki (na podstawie [3])

Sprężarka wówczas może skokowo zmienić swój punkt pracy (z punktu A i B – rys. 5) i pracować przy stale utrzymujących się oderwaniach (objawami tego są: znaczny spadek natężenia przepływu oraz znaczne obniżenie ciśnienia). Powrót sprężarki do znamionowego punktu pracy nie następuje tą samą drogą, czyli linii AB. Punkt pracy przemieszcza się trajektorią od punktu B do punktu A, wzdłuż której cały czas utrzymują się oderwania. Jest to tzw. histereza sprężarki charakterystyczna dla pracy przy utrzymujących się wirujących strefach oderwań. W celu wyprowadzenia sprężarki z zakresu niestatecznej pracy należy najpierw zwiększyć natężenie przepływu co najmniej do punktu C, a następnie zdławić przepływ do żądanej wartości zawierającej się pomiędzy punktami C i A. W sprężarkach silników turbinowych jest to realizowane przez upusty powietrza, bądź nastawne kierownice stopni wlotowych i wylotowych.

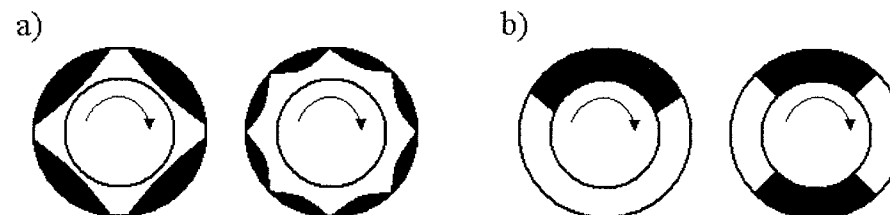
Zjawisko wirujących stref oderwań nie jest zaburzeniem stacjonarnym, obszary oderwane przemieszczają się po obwodzie wieńca zgodnie z kierunkiem obrotu wirnika sprężarki. Prędkość poruszania się obszarów oderwanych względem wieńca jest mniejsza od prędkości obrotowej wirnika i waha się od 20 do 75% tej prędkości, zaś typowe częstotliwości pulsacji strumienia są 10 – 50 razy większe, niż podczas pompażu [8]. Początkowo oderwane obszary przemieszczają się szybciej, a w miarę ich rozrostu, prędkości przemieszczania stopniowo maleją.



Rys. 5. Histereza pracy sprężarki osiowej podczas wystąpienia wirujących stref oderwań [10]

Można wyróżnić dwa typy wirujących stref oderwań w zależności od tego, jaką część wysokości kanału przepływowego danego stopnia obejmują oderwane obszary [4, 8]:

- na częściowej wysokości kanału przepływowego sprężarki (zwykle w pewnej odległości od wirnika do ścianki korpusu sprężarki) – rysunek 6a,
- na pełnej wysokości kanału przepływowego sprężarki (od wirnika do ścianki korpusu sprężarki) – rysunek 6b.



Rys. 6. Przykładowe rozmieszczenie i kształt oderwanych obszarów: a) na częściowej wysokości kanału przepływowego; b) na pełnej wysokości kanału przepływowego (na podstawie [8])

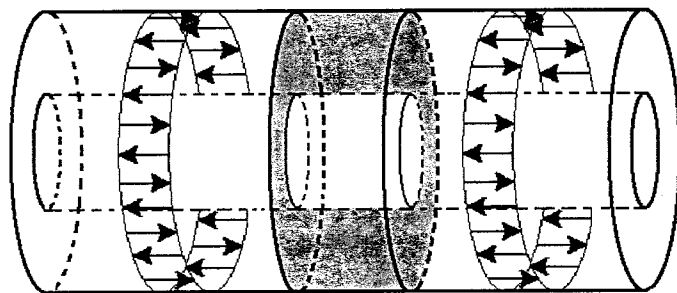
Liczba i kształt obszarów oderwanych na obwodzie wieńca jest ściśle uzależniony od konstrukcji sprężarki oraz jej parametrów i warunków pracy i wynosi zazwyczaj od jednego do dziewięciu [8]. Oderwania pojedyncze najczęściej zachodzą na pełnej wysokości kanału przepływowego i powodują gwałtowne spadki ciśnienia, zaś wielokrotne oderwania obejmują zazwyczaj część wysokości kanału przepływowego i powodują stopniowe spadki ciśnienia. Wysokie wartości stosunku średnicy wewnętrznej do zewnętrznej ( $D_w/D_z$ ) kanałów przepływowych osio-

wych sprężarek lotniczych silników turbinowych, sprzyjają oderwaniom na pełną wysokość kanału przepływowego [10].

## 5. Pompaż

Zjawisko pompażu polega na cyklicznych osiowych pulsacjach strumienia powietrza w kanale przepływowym silnika. Pompaż charakteryzuje się znacznie większą, w porównaniu z wirującymi strefami oderwań, amplitudą wahań natężenia przepływu i ciśnienia, lecz drgania strumienia mają znacznie niższą częstotliwość.

Ponieważ prawie zawsze pompaż poprzedzony jest wystąpieniem w sprężarce wirujących stref oderwań, zatem aby nie dopuścić do wystąpienia pompażu, dąży się do jak najwcześniejszego wykrycia wirujących stref oderwań. Przejście od wirujących stref oderwań do pompażu może nastąpić w krótkim czasie, dlatego w celu stabilizacji pracy sprężarki, układy przeciwdziałające niestatecznej pracy muszą być wyposażone w czujniki i elementy wykonawcze (odpowiednio kształtujące przepływ) o dużej szybkości działania. Powstanie wirujących stref oderwań niekoniecznie musi wywoływać pompaż. Wystąpi on wówczas, gdy oderwanie strumienia od profili łopatkowych będą silnie narastać, powodując osłabienie oderwania na pełną wysokość i na całym obwodzie kanału przepływowego

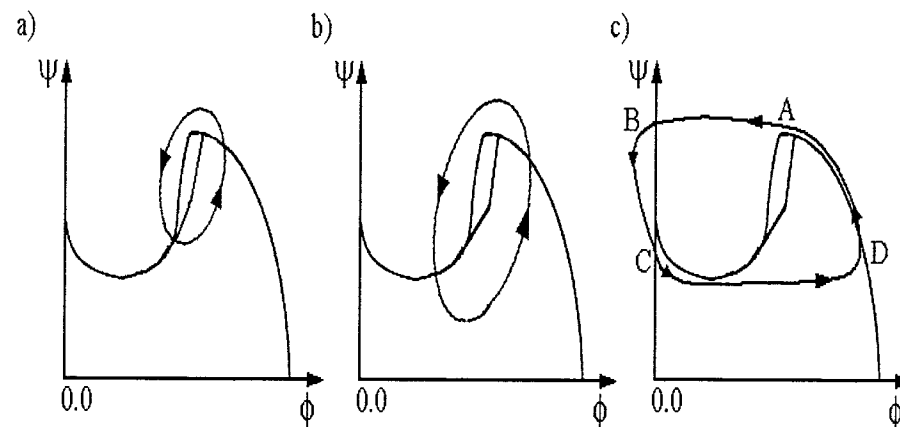


Rys. 7. Schemat pompażu w osiowym kanale przepływowym (na podstawie [3])

W przeciwieństwie do wirujących stref oderwań, pompaż zachodzi na całym obwodzie sprężarki równomiernie, a zaburzenie przepływu jest osiowosymetryczne (rys. 7). Zjawisko pompażu może przebiegać z różnym nasileniem, w zależności od długości okresu cyklu granicznego (rys. 8.) oraz od częstotliwości pulsacji. Względem na te czynniki wyróżnia się cztery podstawowe rodzaje pompażu [4, 8]:

- **pompaż łagodny** – małe okresowe drgania strumienia określane częstotliwościami rezonansowymi Helmholtz'a,
- **pompaż klasyczny** – duże wahania ciśnienia przy niskiej częstotliwości,
- **pompaż zmodyfikowany** – połączenie klasycznego pompażu z rozwiniętym zjawiskiem wirujących stref dławienia prędkości przepływu,
- **pompaż głęboki** – rozwinięty pompaż klasyczny połączony z występowaniem przepływu zwrotnego w sprężarce.

Ze wszystkich typów zaburzeń zachodzących w kanale przepływowym sprężarki, najbardziej rozwiniętym i niebezpiecznym jest pompaż głęboki (rys. 8c). Cykl pompażu głębokiego zaczyna się w punkcie A, w okolicy znamionowego punktu pracy sprężarki, gdzie przepływ staje się niestabilny (np. na skutek zaburzeń pojawiających się we wlocie). Punkt pracy przemieszcza się, następuje nagłe zmniejszenie masowego natężenia przepływu (przejście od punktu A do B). W punkcie B zachodzi odwrócenie kierunku przepływu strumienia. Sprężarka pracuje przy wysokich stratach z powodu niskiej prędkości odwróconego strumienia. Punkt pracy przemieszcza się do punktu C, gdzie przepływ przez sprężarkę jest całkowicie dławiony ( $\phi = 0$ ). W tym punkcie następuje nawrót strumienia w kierunku znamionowego przepływu. Sprężarka pracuje przy znacznie obniżonym ciśnieniu, wzrasta natomiast natężenie przepływu (przejście z punktu C do D), osiągając charakterystykę pracy statecznej (linia pomiędzy punktami D-A). Opisany cykl będzie się powtarzał, jeśli nie nastąpi chwilowe zwiększenie natężenia przepływu i późniejsze jego zdławienie.



Rys. 8. Pompaż: a) łagodny; b) klasyczny; c) głęboki [10]

Przebieg pompażu jest uzależniony od wielu czynników, między innymi o typu sprężarki, jej konstrukcji oraz podstawowych parametrów i warunków pracy. W sprężarkach silników turbinowych o dużym sprężu, przepływ zwrotny może wywołać falę uderzeniową, której wysokie ciśnienie prowadzi do zmiany kąta skrzywienia łopatek wieńców wirnikowych i stojanowych lub, w skrajnych przypadkach, może powodować ich urwanie. W sprężarkach niskoobrotowych pompa występuje zwykle w postaci umiarkowanej pulsacji strumienia.

## 6. Nieliniowy jednowymiarowy model przepływu przez sprężarkę E. M. Greitzer'a [5]

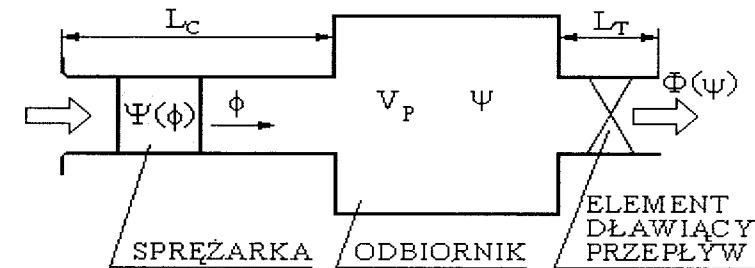
Istotną trudnością w tworzeniu modeli matematycznych zaburzonego przepływu jest przebieg zjawisk w wielostopniowych osiowych sprężarkach silników turbinowych. W celu określenia ich wpływu na podstawowe parametry silnika przeprowadza się badania doświadczalne na specjalnie przygotowanych silnikach i na tej podstawie określa się, który z parametrów charakteryzujących pracę silnika, może zostać wykorzystany do wykrywania początku zaburzenia. Należy podkreślić, że odchyłki produkcyjno-montażowe podzespołów silnika mogą spowodować, że przebieg tych zjawisk będzie różnić się nawet w silnikach tego samego typu. Mnogość czynników wpływających na powstawanie i przebieg zjawisk oraz ich wpływ na pracę silnika powoduje, że zarówno model matematyczny, jak i badania doświadczalne nie są w stanie w pełni ich opisać.

Matematyczny opis zjawisk wirujących stref oderwań i pompażu, z uwagi na charakter tych zaburzeń, wymaga zastosowania modelu nieliniowego. Pierwszy jednowymiarowy nieliniowy model przepływu przez sprężarkę przedstawił E. M. Greitzer w 1976 roku (rys. 9). Model ten pozwala określać zmiany położenia punktu pracy sprężarki, dzięki czemu można identyfikować rodzaj zaburzenia przepływu jakie pojawi się po przekroczeniu granicy statecznej pracy. Dla wirujących stref oderwań, będzie to zmiana punktu pracy i ustalenie go dla nowych (znacznie obniżonych) wartości ciśnienia i natężenia przepływu, zaś dla pompażu punkt pracy będzie podlegał cyklowi granicznemu.

Model E. M. Greitzer'a obejmuje następujące elementy:

- sprężarkę osiową,
- kanał łączący sprężarkę z odbiornikiem,
- odbiornik, który stanowi komora (przestrzeń) o dużej objętości,
- kanał wyjściowy, w którym przepływ jest dławiony.

Podczas badań [6] sprężarki, elementem dławiącym wypływ z odbiornika był zawór. Celem dławienia przepływu na wyjściu z odbiornika jest przemieszczenie punktu pracy sprężarki poza granicę stateczności, wymuszając tym samym zaburzenie przepływu w postaci wirujących stref oderwań lub pompażu. Rodzaj zjawiska zależy od stopnia zdławienia przepływu na wyjściu.



Rys. 9. Model E. M. Greitzera (na podstawie [5])

Zredukowana postać modelu Greitzer'a jest opisana równaniami następującymi [5]:

$$\frac{d\phi}{d\xi} = B(\Psi(\phi) - \psi) \quad (1)$$

$$\frac{d\psi}{d\xi} = \left(\frac{1}{B}\right)(\phi - \Phi(\psi)) \quad (2)$$

E. M. Greitzer pierwszy stwierdził, że dla sprężarki osiowej istnieje bezwymiarowy parametr, za pomocą którego można określić postać niestatecznej pracy po przekroczeniu granicy stateczności. W zależności od wartości tego parametru (poniżej lub powyżej pewnej wartości krytycznej) niestateczna praca sprężarki wystąpi w postaci wirujących stref oderwań, bądź w postaci pompażu. Parametr ten, nazywany parametrem Greitzer'a, określany jest następującą zależnością [5]:

$$B = \frac{U}{2\omega_H L_C}, \quad (3)$$

Częstotliwość rezonansowa Helmholtz'a  $\omega_H$  jest określana zależnością:

$$\omega_H = a \sqrt{\frac{A_C}{V_P L_C}}, \quad (4)$$

Ostatecznie parametr B przyjmuje postać:

$$B = \frac{U}{2a} \sqrt{\frac{V_p}{A_C L_C}}, \quad ($$

Zarówno model matematyczny [5], jak i badania specjalnie przygotowanej sprężarki [6], potwierdziły ważność tego parametru. Krytyczna wartość parametru ( $B_{kr}$ ), wyznaczająca granicę pomiędzy wirującymi strefami oderwań a pompem., jest dla każdej sprężarki inna. Przy różnych wartościach objętości odbiorni  $V_p$  i prędkości obwodowej  $U$  odpowiadającym tej samej wartości parametru zachowanie się punktu pracy sprężarki było niemal identyczne.

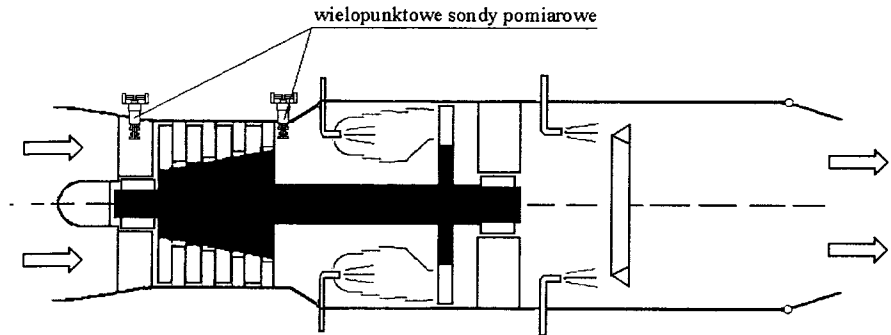
## 7. Wykrywanie niestatecznej pracy sprężarki

Zjawisko niestatecznej pracy sprężarki występuje najczęściej podczas zmiany prędkości obrotowej wirnika silnika. Dlatego też ważne jest jego wykrywanie podczas eksploatacji silnika (szczególnie w locie). W tym celu wykorzystywane następujące wielkości [1, 9, 10]:

- prędkość obrotowa wirnika silnika,
  - całkowite ciśnienie na wlocie sprężarki,
  - całkowita temperatura na wlocie sprężarki,
  - całkowite ciśnienie za sprężarką,
  - całkowita temperatura za sprężarką,
  - amplituda prędkości drgań wirnika silnika w kierunku osiowym.
- Charakterystyczne przekroje, w których wykonywane są pomiary to:
- wlot sprężarki – określanie parametrów strumienia powietrza wpływającego do sprężarki,
  - wylot sprężarki – wykrywanie niestatecznej pracy sprężarki,
  - wybrane stopnie sprężarki – określanie stopnia, na którym dochodzi do znacznych zmian ciśnienia.

Schemat układu wykrywania niestatecznej pracy sprężarki przedstawiono na rysunku 10. Pomiar ciśnienia i temperatury w przekroju wlotowym i wylotowym sprężarki odbywa się w trzech obszarach, rozmieszczonych równomiernie na cwoicie. Sondy pomiarowe umożliwiają wielopunktowy pomiar parametrów strumienia w dwóch kierunkach – zgodnym i przeciwnym do kierunku lotu. Istotne jest wczesne wykrywanie (a następnie przeciwdziałanie) niestatecznej pracy j

umieszczenie czujników na wlocie sprężarki, gdyż pozwala to obserwować zaburzenia wpływającego do niej strumienia powietrza. W celu pomiaru zaburzeń wysokoczęstotliwościowych (związanych z wirującymi strefami oderwań), należy stosować sondy pomiarowe o wysokiej częstotliwości próbkowania. Dzięki możliwości dwukierunkowego pomiaru przepływu strumienia, można badać pulsacje strumienia występujące podczas pompażu [10].



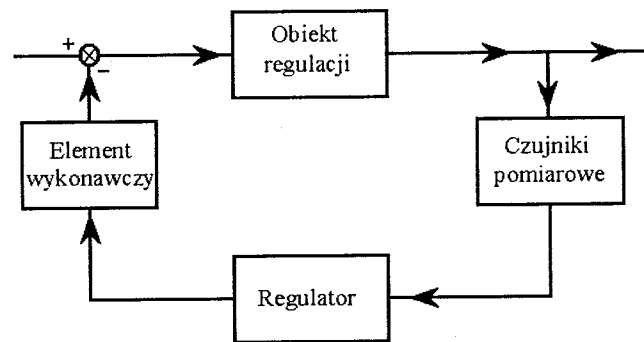
Rys. 10. Schemat rozmieszczenia czujników układu pomiarowego do wykrywania niestatecznej pracy sprężarki [10]

## 8. Stabilizacja pracy sprężarki

Aby nie dopuścić do wystąpienia zjawiska niestatecznej pracy sprężarki w procesie eksploatacji, stosowane są układy stabilizujące (tzw. antypompażowe). Układy stabilizujące projektuje się dla każdego silnika indywidualnie, z uwzględnieniem jego konstrukcji, charakterystyk i przeznaczenia.

Zadaniem układów stabilizujących jest wykrycie początku zaburzenia przepływu w sprężarce (jest to realizowane przez detekcyjny układ pomiarowy) oraz wyprowadzenie sprężarki z zakresu niestatecznej pracy za pomocą układu wykonawczego odpowiednio kształtującego przepływ czynnika roboczego. Zastosowanie układu wyprowadzania sprężarki z obszaru niestatecznej pracy pozwala na bezpieczne funkcjonowanie silnika w pobliżu parametrów granicznych. Daje to możliwość lepszego wykorzystania silnika oraz obniżenie kosztów jego eksploatacji.

Przekształcanie sygnałów pomiarowych w sterujące jest dokonywane przez regulator, który zawiera odpowiedni algorytm sterowania. Układy stabilizujące są budowane jako zamknięte układy automatycznej regulacji (z pętlą sprzężenia zwrotnego) – rysunek 11.



Rys. 11. Schemat układu przeciwdziałania niestatecznej pracy sprężarki

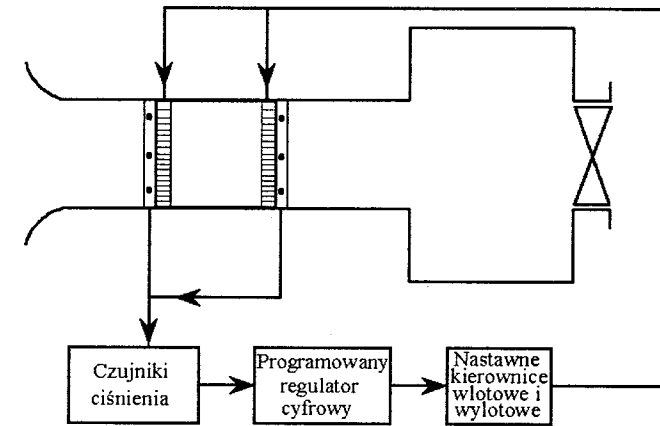
Można wyróżnić trzy zasadnicze metody stabilizacji pracy sprężarki [7]:

- nastawne łopatki kierownicze wlotowych i wylotowych stopni sprężarki – sprężu  $\pi_0 > 10$ ,
- upust powietrza z za środkowych stopni sprężarki – dla sprężu  $6 < \pi_0 < 9$ ,
- sprężarkę (silnik) konstruuje się jako wielowirnikową – dla sprężu  $\pi_0 > 6$ .

## 9. Regulacja sprężarki nastawnymi kierownicami

Regulacja sprężarki nastawnymi kierownicami (rys. 12) jest podstawowym zabezpieczeniem silnika przed niestateczną pracą. W prawie wszystkich typach współczesnych silników turbinowych kierownice wlotowe i wylotowe są regulowane. Zastosowanie indywidualnie nastawianych łopatek kierowniczych pozwala uzyskać obliczeniowy opływ profili łopatek sprężarki. Regulacja ta jest efektywna w szerokim zakresie prędkości obrotowych, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej sprawności sprężarki. Ze względu na to, że prędkość osiowa strumienia zmienia się wzdłuż kanału przepływowego sprężarki, kierownice stopni wlotowych i wylotowych muszą być regulowane przeciwstawnie.

Ten sposób regulacji sprężarki znajduje zastosowanie w silnikach stanowiących napęd samolotów latających z dużymi prędkościami, gdyż wraz ze wzrostem prędkości lotu, maleje zredukowana prędkość obrotowa wirnika, a regulacja try stopni wlotowych, spowodowałaby spadek względnej gęstości strumienia [7].



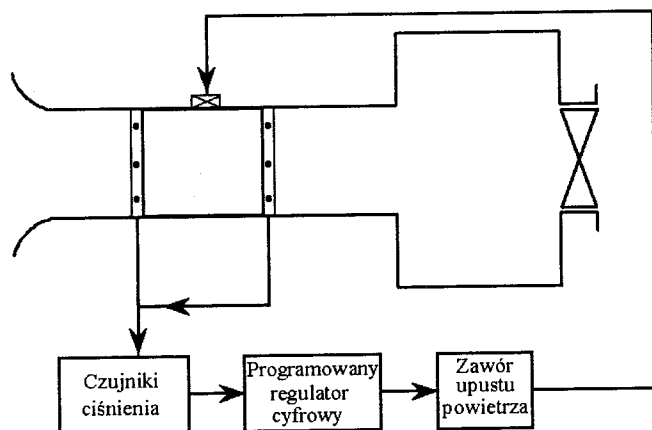
Rys. 12. Schemat układu regulacji sprężarki za pomocą nastawnych kierownic stopni wlotowych i wylotowych [10]

## 10. Regulacja sprężarki upustem powietrza

Schemat układu regulacji sprężarki upustem powietrza przedstawiono na rysunku 13. Upusty powietrza w sprężarkach jednowirnikowych umieszczone są zazwyczaj na środkowych stopniach. W przypadku sprężarki dwuwirnikowej upust powietrza znajduje się pomiędzy sprężarką niskiego, a wysokiego ciśnienia. Upuszczane powietrze nie przekracza 15 – 20 % powietrza przepływającego przez sprężarkę [7].

Upuszczanie pewnej ilości powietrza z kanału przepływowego sprężarki powoduje wzrost natężenia przepływu powietrza na stopniach wlotowych (przed upustem). Sprawia to, że kąt natarcia strumienia na łopatkach stopni przed upustem maleje i stopnie te wychodzą z zakresu niestatecznej pracy (składowa osiowa prędkość strumienia rośnie). W wyniku otwarcia upustu, na stopniach umieszczonych za upustem, natężenie przepływu zmniejsza się (składowa osiowa maleje), kąty natarcia strumienia na łopatkach zwiększają się, wyprowadzając ostatecznie sprężarkę z niestatecznego zakresu pracy. Regulacja sprężarki za pomocą upustu powietrza zapewnia wysoką sprawność i stateczną pracę sprężarki w szerokim zakresie prędkości obrotowych silnika.





Rys. 13. Schemat układu regulacji sprężarki upustem powietrza [10]

Regulacja upustem powietrza sprężarek silników jednowirnikowych jest szczególnie efektywna dla małych i średnich prędkości obrotowych, w których występuje znaczne obniżenie zapasu stateczności [7].

## 11. Podsumowanie

Dokonany w niniejszej pracy przegląd zagadnień dotyczących niestatecznej pracy sprężarki i metod jej zapobiegania, ukazuje szeroki obszar badawczy, istotny zarówno z naukowego, jak i użytkowego punktu widzenia. Można wyróżnić następujące grupy wzajemnie powiązanych problemów:

- modelowanie zjawisk niestatecznej pracy pojedynczych stopni oraz sprężarki jako całości,
- badania symulacyjne z wykorzystaniem modeli komputerowych,
- badania eksperymentalne w skali laboratoryjnej i na obiektach rzeczywistych
- opracowywanie metod zapobiegania niestatecznej pracy, w tym algorytm funkcjonowania automatycznych układów stabilizacji (antypompażowych),
- opracowywanie algorytmów sterowania procesem eksploatacji istniejących obiektów w celu minimalizacji prawdopodobieństwa wystąpienia niestatecznej pracy (odpowiednia regulacja, zalecenia eksploatacyjne – unikanie zakresów potencjalnie niebezpiecznych, itp.).

Ze względu na wysokie koszty badań eksperymentalnych na obiektach rzeczywistych, należy dążyć do maksymalnego wykorzystania metod symulacyjnych i wieloaspektowego przetwarzania dostępnych danych eksperymentalnych, pochodzących z różnych źródeł.

## Literatura

1. **Balicki W.:** *Pomiary i analiza obciążeń silnika turbinowego*. Prace Instytutu Lotnictwa nr 159, 1999.
2. **Behnken R. L.:** *Nonlinear control and modeling of rotating stall in an axial flow compressor*. California Institute of Technology Pasadena, California, 1997.
3. **Chung-hei (Simon) Yeung:** *Nonlinear control of rotating stall and surge with axisymmetric bleed and air injection on axial flow compressors*. California Institute of Technology Pasadena, California, 1999.
4. **Gravdahl J. T.:** *Modeling and control of surge and rotating stall in compressors*. Norwegian University of Science and Technology Trondheim, 1998.
5. **Greitzer E. M.:** *Surge and rotating stall in axial flow compressors*. P. 1 – *Theoretical compression system model*. Transactions of ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 98, pp. 190-198, April 1976.
6. **Greitzer E. M.:** *Surge and rotating stall in axial flow compressors*. P. 2: – *Experimental results and comparison with theory*. Transactions of ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 98, pp. 198-217, April 1976.
7. **Muszyński M., Orkisz M.:** *Modelowanie turbinowych silników odrzutowych*. Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa. Warszawa, 1997.
8. **Niazi S.:** *Numerical simulation of rotating stall and surge alleviation in axial compressors*. Georgia Institute of Technology, July 2000.
9. **Orkisz M. (red.):** *Turbinowe silniki lotnicze w ujęciu problemowym*. Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, Lublin, 2000.
10. **Sańko-Sawczenko T.:** *Metody diagnozowania niestatecznej pracy silnika turbinowego*. Praca magisterska, Politechnika Białostocka, Białystok, 2003.
11. **Tuliszka E.:** *Sprężarki, dmuchawy i wentylatory*. WNT, Warszawa, 1969.

Henryk Borowczyk<sup>1</sup>, Mariusz Sobiech<sup>2</sup>

**KONCEPCJA DIAGNOSTYCZNEGO MODELU  
UKŁADU STEROWANIA  
PRZYSPIESZANIEM TURBINOWEGO  
SILNIKA ODRZUTOWEGO**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono koncepcję diagnostycznego modelu układu sterowania przyspieszaniem turbinowego silnika odrzutowego. Model opracowano na podstawie danych eksperymentalnych, stosując metodę identyfikacji obiektów dynamicznych (pakiet oprogramowania MatLab – System Identification Toolbox) oraz wielowartościowe kodowanie parametrów modelu dynamicznego.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, identyfikacja, kodowanie, logika wielowartościowa, silnik turbinowy, układ sterowania

## 1. Wprowadzenie

Przedmiotem rozważań w niniejszej pracy jest problem syntezy diagnostycznego modelu układu sterowania przyspieszaniem turbinowego silnika odrzutowego na podstawie eksperymentalnych danych (przebiegów sygnałów diagnostycznych). Zaproponowana metoda postępowania obejmuje:

- wykorzystanie metod identyfikacji do zbudowania modelu dynamicznego odwzorowującego zachowanie rzeczywistego obiektu (pakiet oprogramowania Matlab – System Identification Toolbox),
- przeprowadzenie analizy wpływu uszkodzeń na parametry modelu obiektu zdadnego oraz niezdatnego (po wprowadzeniu symulowanych uszkodzeń [3]),
- przeprowadzenie wielowartościowego kodowania parametrów modelu – przypisanie liczb całkowitych ustalonym przedziałom zmienności parametrów,

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, [borowczyk@post.pl](mailto:borowczyk@post.pl)

<sup>2</sup> Absolwent Politechniki Białostockiej – 2003r., [sma11@poczta.onet.pl](mailto:sma11@poczta.onet.pl)

- zbudowanie wielowartościowej tabeli stanów jako formy odwzorowania relacji między stanami obiektu, a towarzyszącymi im symptomami w postaci określonych wartości kodowych zbioru parametrów modelu.

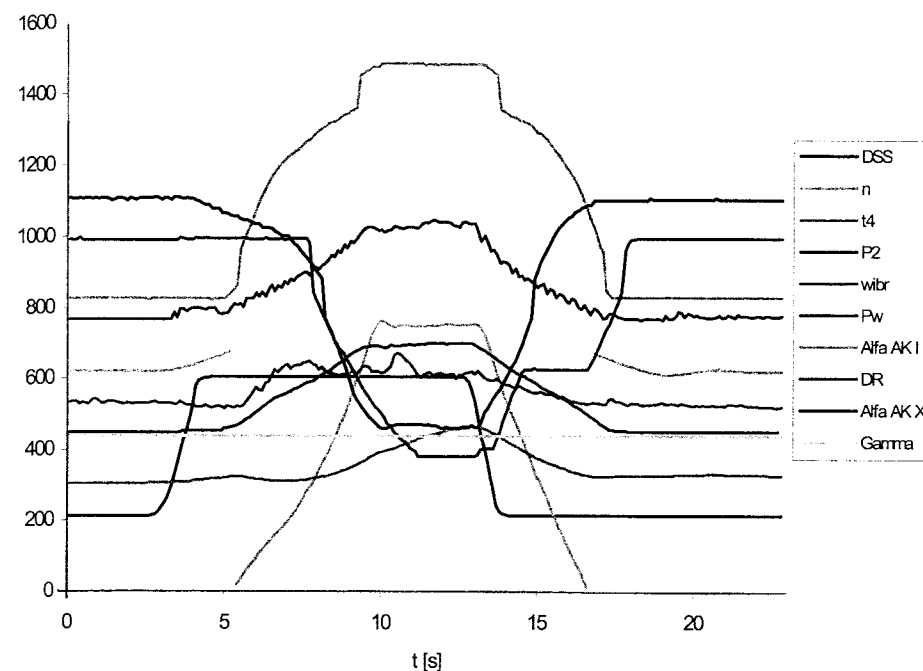
Opracowanie powstało w ramach magisterskiej pracy dyplomowej w Katedrze Automatyki i Diagnostyki na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej [7], na podstawie danych z eksperymentów diagnostycznych przeprowadzonych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych [3].

## 2. Diagnostowany obiekt

Diagnostowanym obiektem jest układ sterowania przyspieszaniem i zmniejszaniem prędkości obrotowej turbinowego silnika odrzutowego typu 89. Sygnałami mierzonymi i rejestrowanymi w procesach przyspieszania i zmniejszania prędkości obrotowej są [3]:

- $n$  – prędkość obrotowa wirnika silnika,
- $t_4$  – temperatura spalin za turbiną,
- DSS – położenie dźwigni sterowania silnikiem,
- DR – położenie dyszy regulowanej,
- $p_2$  – ciśnienie powietrza za sprężarką,
- $p_w$  – ciśnienie paliwa w kolektorze zasadniczej komory spalania,
- $\gamma$  – współczynnik wypełnienia regulatora temperatury,
- wibr – drgania silnika,
- $\alpha_{AKI}$  – kąt ustawienia wejściowych aparatów kierujących,
- $\alpha_{AKX}$  – kąt ustawienia wyjściowych aparatów kierujących.

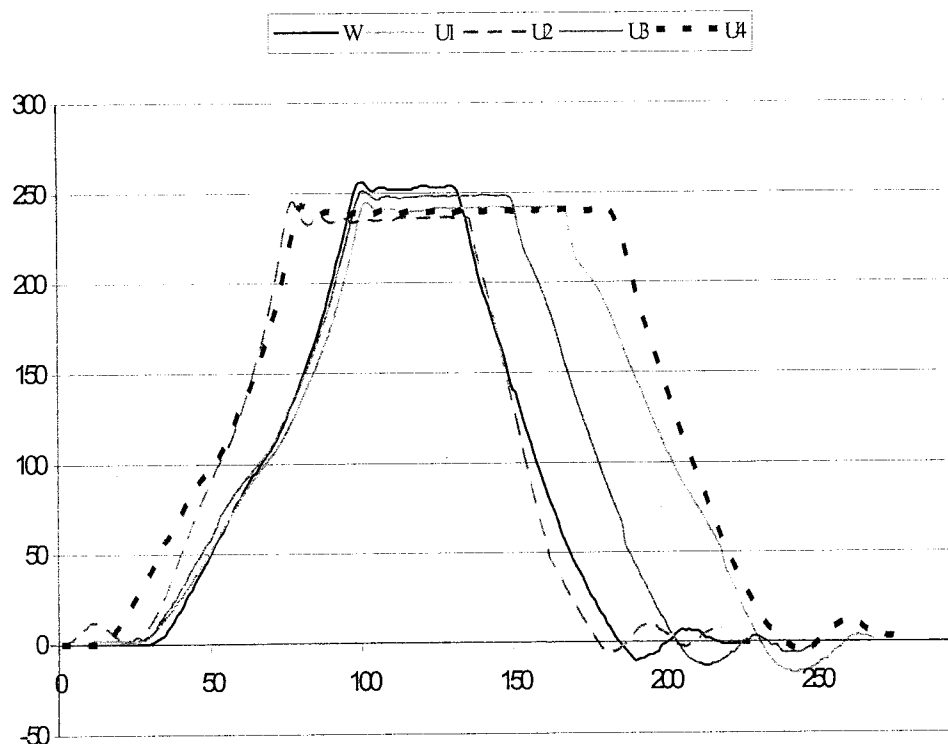
Na rysunku 1 przedstawiono prawidłowy przebieg sygnałów podczas zwiększania i zmniejszania prędkości obrotowej, natomiast na rysunku 2 – wpływ wbranych uszkodzeń na przebieg prędkości obrotowej  $n$  na tle przebiegu prawidłowego (wartości sygnałów podane są w jednostkach umownych wynikających z przetwarzania do postaci cyfrowej analogowych danych zapisanych na papierowej taśmie oscylograficznej).



Rys. 1. Sygnały zarejestrowane w procesie zwiększania i zmniejszania prędkości obrotowej silnika - przebieg prawidłowy [3]

Przyjęto następujące oznaczenia:

- W – wzorcowy przebieg sygnałów podczas zwiększania prędkości obrotowej silnika,
- U1 – obniżona przepustowość głównego pakietu dławiącego izodromy serwo-tłoka zaworu dławiącego,
- U2 – nadmierna przepustowość głównego pakietu dławiącego izodromy serwo-tłoka zaworu dławiącego,
- U3 – obniżona przepustowość pakietu dławiącego przyspieszania izodromy serwo-tłoka zaworu dławiącego,
- U4 – nadmierna przepustowość pakietu dławiącego przyspieszania izodromy serwo-tłoka zaworu dławiącego.



Rys. 2. Porównanie przebiegu sygnału „n” na tle różnych symptomów niesprawności układu sterowania przyspieszeniem

### ***Wpływ niewłaściwej przepustowości głównego pakietu dławiącego izodromy serwołoka zaworu dławiącego na przebieg procesu przyspieszania [3]***

Zbyt mała przepustowość głównego pakietu dławiącego powoduje zmniejszenie tempa wzrostu ciśnienia  $p_w$  przed wtryskiwaczami zasadniczej komory spalania. W rezultacie obserwuje się zwolnienie tempa zmian prędkości obrotowej w całym zakresie pracy silnika, zarówno podczas zwiększania, jak i zmniejszania prędkości obrotowej. Jest to szczególnie widoczne podczas przyspieszania w zakresie obrotów zredukowanych 75-82%, gdy zamyka się regulowana dysza wlotowa DR oraz podczas zmniejszania prędkości obrotowej w początkowej fazie procesu. Czas trwania procesu przejściowego wydłuża się.

Jeżeli przepustowość głównego pakietu dławiącego jest zbyt duża, to obserwuje się zjawisko odwrotne. Prędkość zmian ciśnienia  $p_w$  przed wtryskiwaczami zasadniczej komory spalania rośnie, a w konsekwencji szybsze są zmiany prędkości obrotowej  $n$  i ciśnienia  $p_2$  powietrza za sprężarką. Występuje przeregulowanie sygnałów:  $p_w$ ,  $n$ ,  $p_2$  oraz zmniejsza się czas trwania procesów przejściowych.

### ***Wpływ niewłaściwej przepustowości pakietu dławiącego przyspieszania izodromy serwołoka zaworu dławiącego na przebieg procesu przyspieszania [3]***

Zbyt mała przepustowość pakietu dławiącego przyspieszania powoduje zmniejszenie prędkości narastania ciśnienia  $p_w$  w drugiej fazie procesu przyspieszania. Skutkiem tego jest wydłużanie czasu drugiej fazy, a w rezultacie całego czasu przyspieszania.

Zwiększona przepustowość pakietu dławiącego przyspieszania powoduje odwrotne zjawisko. Prędkość narastania sygnałów w drugiej fazie przyspieszania jest większa w porównaniu z przebiegiem wzorcowym. Czasy drugiej fazy i całkowity czas przyspieszania maleją.

Zmiana przepustowości pakietu dławiącego przyspieszania nie wpływa na czas trwania procesu zmniejszania prędkości obrotowej.

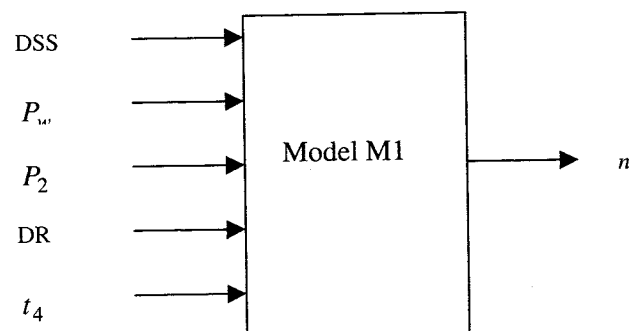
## **3. Identyfikacja modelu dynamicznego**

Identyfikacja modeli dynamicznych rzeczywistych obiektów polega na zbudowaniu matematycznego modelu badanego obiektu, który z wymaganą dokładnością odwzoruje właściwości dynamiczne obiektu. Identyfikacja jest procesem iteracyjnym i obejmuje co najmniej następujące etapy:

- wykonanie zaplanowanego eksperymentu identyfikacyjnego i zarejestrowanie zmiennych wejściowych i wyjściowych lub przygotowanie danych zebranych podczas eksploatacji obiektu,
- przyjęcie struktury modelu,
- wyznaczenie parametrów modelu wybraną metodą identyfikacji,
- ocenę zgodności właściwości dynamicznych modelu i rzeczywistego obiektu (dokładności identyfikacji), np. poprzez porównanie odpowiedzi czasowych modelu i obiektu na jednakowy sygnał wejściowy,

- przyjęcie odmiennej struktury modelu i ponowna identyfikacja parametrów modelu – jeśli uzyskana dokładność nie jest wystarczająca.

Na rysunku 3 przedstawiono jeden z modeli rozpatrywanych w pracy [7]. Sygnałami wejściowymi są: DSS,  $P_w$ ,  $P_2$ , DR,  $t_4$ , natomiast sygnałem wyjściowym – prędkość obrotowa wirnika silnika  $n$ .



Rys. 3. Schemat modelu M1 [7]

Do identyfikacji zastosowano biblioteczną funkcję `arx` pakietu MATLAB - System Identification Toolbox, która wykorzystuje metodę najmniejszych kwadratów (*LS Least Squares*). Polega ona na iteracyjnym poszukiwaniu zbioru współczynników transmitancji operatorowej, który minimalizuje sumę kwadratów różnic pomiędzy odpowiedzią modelu i rzeczywistego obiektu. Postać wywołania funkcji `arx` jest następująca [9]:

$$th = \text{arx}([y \ u], [na \ nb \ nk]),$$

gdzie:

- $y, u$  – wektory kolumnowe wyjściowy i wejściowy,
- $na$  – liczba biegunów (pierwiastków mianownika transmitancji),
- $(nb - 1)$  – liczba zer (pierwiastków licznika transmitancji),
- $nk$  – opóźnienie w układzie,
- $th$  – macierz wyniku w formacie THETA [9].

Tabela 1.

Współczynniki transmitancji ciągłej modelu M1

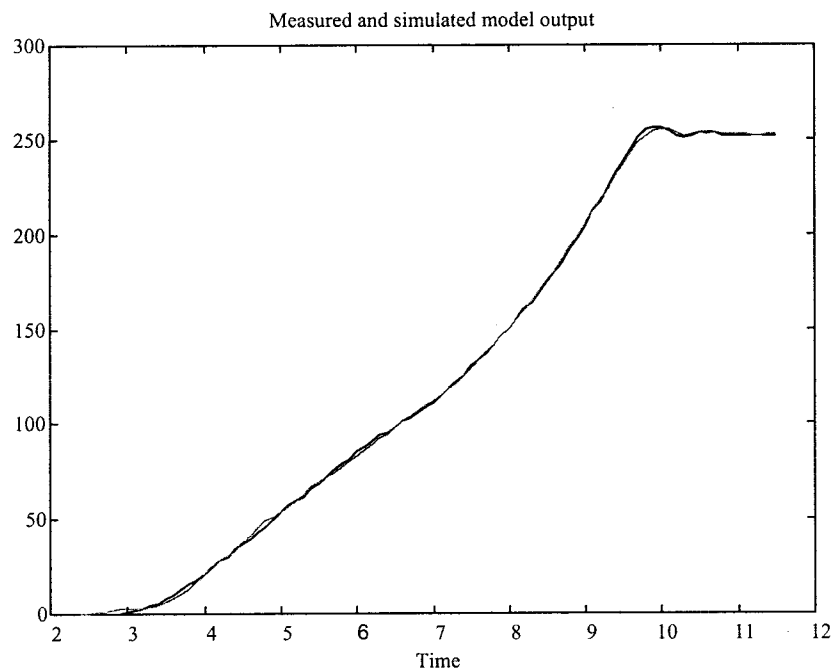
B1 DSS	s <sup>4</sup>	s <sup>3</sup>	s <sup>2</sup>	s <sup>1</sup>	s <sup>0</sup>
1	-0,01906	-2,9520	74,400	-186,00	622,90
2	0,00221	-0,0884	0,703	-12,81	329,30
3	0,02480	0,1113	-11,280	-27,17	198,70
4	0,00463	-0,5682	10,280	-30,79	307,20
5	0,03731	-2,1210	32,820	-135,20	577,40
B2 Pw					
1	0,01760	-1,1820	-13,850	446,20	3254,00
2	-0,01082	-0,2580	-17,750	450,30	1889,00
3	0,00239	-1,0770	-6,232	440,20	1919,00
4	0,00675	-0,0670	-16,360	203,20	1936,00
5	-0,02829	0,2054	-5,488	36,93	4339,00
B3 P2					
1	-0,00047	-6,1010	14,560	2200,00	-947,20
2	-0,03663	-1,7150	-81,010	2671,00	-1441,00
3	-0,03913	-3,8530	53,170	881,30	-1811,00
4	-0,28150	5,0460	-107,100	2409,00	-663,70
5	-0,16000	-1,9180	28,450	1585,00	-2137,00
B4 DR					
1	0,00002	0,2558	-2,052	-55,64	-116,10
2	0,00789	0,0774	-3,599	-13,25	-177,10
3	0,00150	-0,1469	6,002	-79,02	114,20
4	0,02202	-0,3319	0,969	-51,47	-226,20
5	0,00195	-0,3733	0,844	133,10	-325,10
B5 t4					
1	-0,12050	-5,6130	-151,100	6320,00	-1791,00
2	-0,12340	5,2250	-222,800	3449,00	-1923,00
3	0,00059	-4,4720	-46,840	2730,00	-192,50
4	0,20160	-7,4560	9,325	1220,00	-741,70
5	-0,32150	-4,3790	46,840	3518,00	-2614,00
A n					
1	1	66,2400	1121,000	5925,00	3773,00
2	1	94,0700	1066,000	6182,00	1241,00
3	1	62,3900	724,000	3739,00	445,10
4	1	80,8700	1253,000	4319,00	2347,00
5	1	54,1500	872,100	5242,00	3388,00

Dokładność identyfikacji zależy od trafności wyboru stopnia transmitancji operatorowej oraz od jakości zarejestrowanych danych doświadczalnych. Do dalszej analizy wybrano strukturę modelu o następujących parametrach [7]:

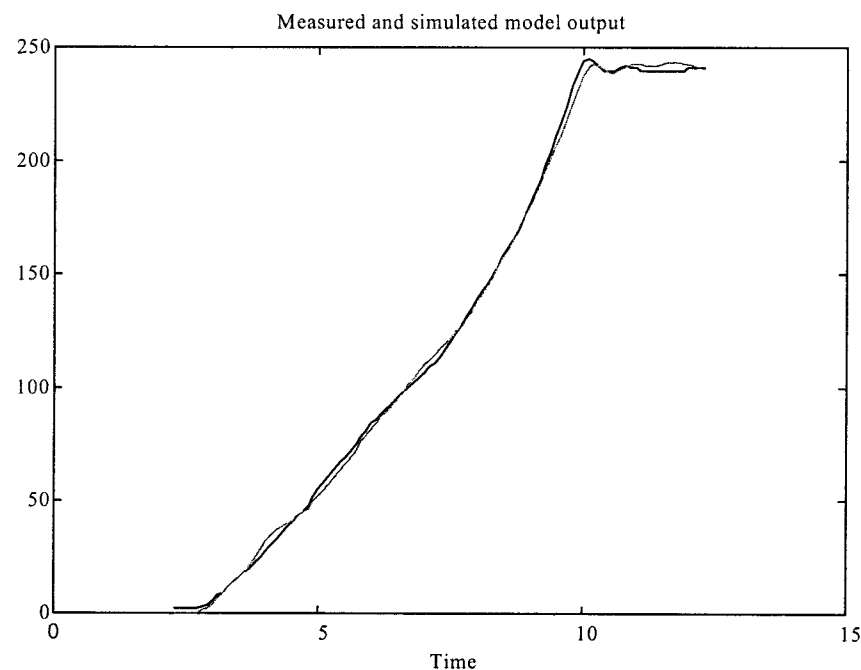
$$n_a = [4], n_b = [4 \ 4 \ 4 \ 4 \ 4], n_k = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1].$$

Z utworzonej macierzy formatu THETA uzyskuje się, za pomocą funkcji *th2tf*, współczynniki licznika i mianownika dyskretnej transmitancji modelu. Przejście z modelu dyskretnego na ciągły realizuje się za pomocą funkcji *d2c*. Parametry otrzymanej w ten sposób transmitancji ciągłej zawiera tabela 1.

Wyznaczony model dynamiczny może być wykorzystany do badań symulacyjnych. Poniżej przedstawiono przebiegi sygnału wyjściowego *n* uzyskanego z badań symulacyjnych modelu dla układu bez uszkodzeń (rys. 4) oraz do układu o obniżonej przepustowości głównego pakietu dławiącego izodromy serwołoka zaworu dławiącego (rys. 5). Uzyskane wyniki porównano z przebiegami rzeczywistymi i stwierdzono zgodność badań rzeczywistych i symulacyjnych.



Rys. 4. Odpowiedź układu bez uszkodzeń (linia przerywana – model, linia ciągła – układ rzeczywisty)



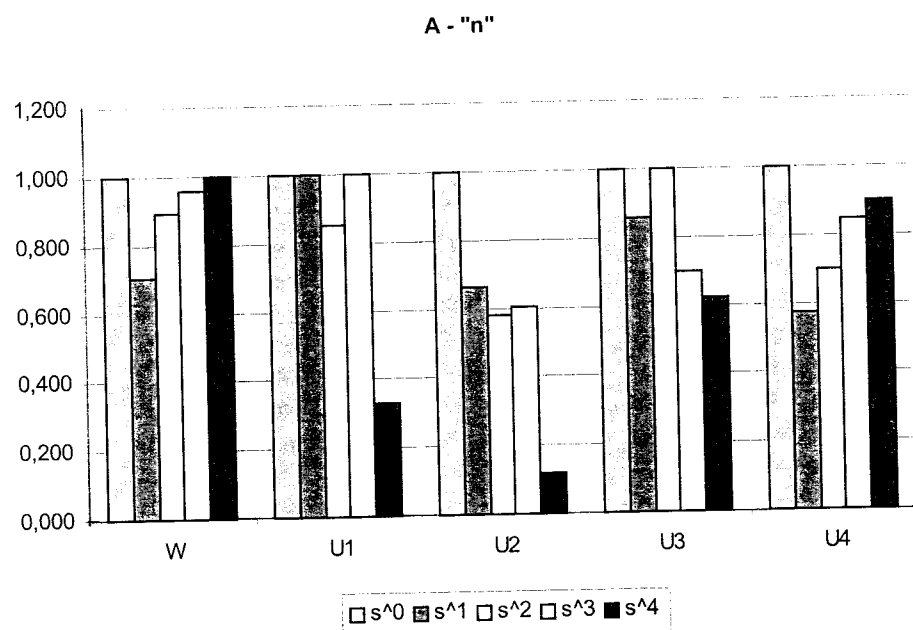
Rys. 5. Odpowiedź układu z obniżoną przepustowością głównego pakietu dławiącego izodromy serwołoka zaworu dławiącego (linia przerywana – model, linia ciągła – układ rzeczywisty)

#### 4. Model diagnostyczny

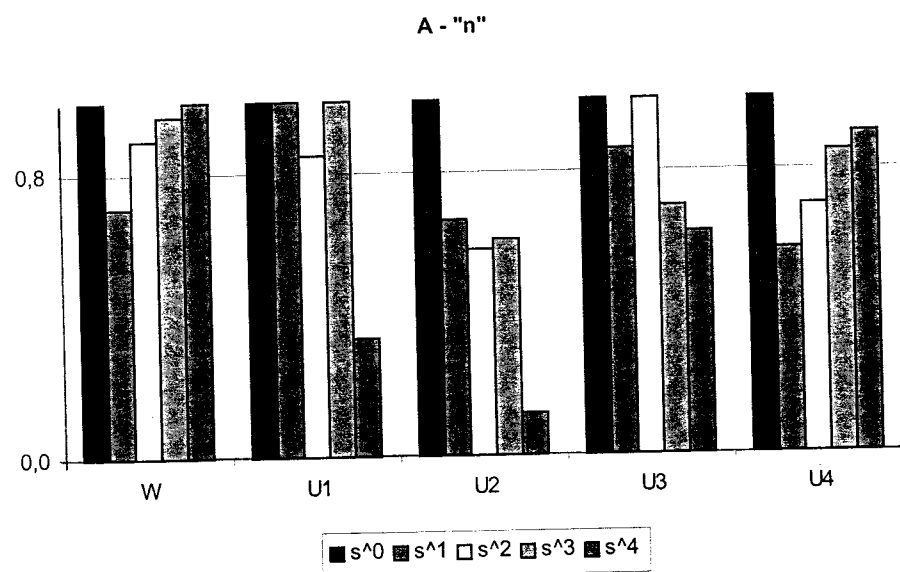
Ze względu na duże różnice zakresów wartości współczynników transmitancji (tab. 1) poddano je normalizacji wg zależności:

$$S^{N'} = \frac{S^N}{|S^N|_{\max}}$$

Otrzymano zbiór współczynników znormalizowanych, o wartościach z przedziału  $[-1, 1]$ . Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wykresy słupkowe wyznaczonych współczynników.



Rys. 6. Wartości znormalizowanych współczynników B2 dla poszczególnych uszkodzeń



Rys. 7. Wartości znormalizowanych współczynników A dla poszczególnych uszkodzeń

Następnie określono zasady kodowania umożliwiające interpretację rozpatrywanych uszkodzeń na podstawie rozbieżności i charakterystycznych zmian w porównaniu z przebiegiem wzorcowym. Kodowanie polega na przypisaniu wartościom, z określonego przedziału liczb rzeczywistych, jednej liczby całkowitej, co w znacznym stopniu ułatwia klasyfikację współczynników. Zakres zmienności współczynników  $B_n$  podzielono na cztery jednakowe podzakresy i wyróżnioną wartość 0, natomiast zakres zmienności A – na dwa podzakresy. Przyjętą zasadę kodowania przedstawiono na rysunku 8.

$B_n$		A	
Przedział	Kod	Przedział	Kod
$[-1, -1/2)$	-2	$(0, 0,8]$	0
$[-1/2, 0)$	-1	$(0,8, 1,0]$	1
0	0		
$(0, 1/2]$	1		
$(1/2, 1,0]$	2		

Rys. 8. Zasady kodowania wartości współczynników  $B_n$  i A

Postać ostatecznych wartości współczynników transmitancji modelu M1, po operacji kodowania, przedstawia tabela 2.

Tabela 2.  
Wartości kodowe dla poszczególnych uszkodzeń silnika (model A)

A	a <sub>4</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>	B1	a <sub>4</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>	B2	a <sub>4</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
W	1	0	1	1	1	W	-2	-2	2	-2	2	W	2	-2	-2	2	2
U1	1	1	1	1	0	U1	1	-1	1	-1	2	U1	-1	-1	-2	2	1
U2	1	0	0	0	0	U2	2	1	-1	-1	1	U2	1	-2	-1	2	1
U3	1	1	1	0	0	U3	1	-1	1	-1	1	U3	1	-1	-2	1	1
U4	1	0	0	1	1	U4	2	-2	1	-2	2	U4	-2	1	-1	1	2
B3	a <sub>4</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>	B4	a <sub>4</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>	B5	a <sub>4</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
W	-1	-2	1	2	-1	W	1	2	-1	-1	-1	W	-1	-2	-2	2	-2
U1	-1	-1	-2	2	-2	U1	1	1	-2	-1	-2	U1	-1	2	-2	2	-2
U2	-1	-2	1	1	-2	U2	1	-1	2	-2	1	U2	1	-2	-1	1	-1
U3	-2	2	-2	2	-1	U3	2	-2	1	-1	-2	U3	2	-2	1	1	-1
U4	-2	-1	1	2	-2	U4	1	-2	1	2	-2	U4	-2	-2	1	2	-2

Na podstawie otrzymanych tabel kodowych można wnioskować o stanie (rodzaju uszkodzenia) silnika. Warunkiem jednoznacznej identyfikacji stanu (zakwalifikowania do jednej z określonych klas uszkodzeń) jest rozróżnialność ciągów kodowych. Oznacza to, że ciągi kodowe, odpowiadające stanowi wzorcem (stanowi zdadności) oraz wyróżnionym uszkodzeniom, muszą różnić się parami na co najmniej jednej pozycji.

W przypadku konieczności uwzględnienia większej liczby uszkodzeń, sposób kodowania można rozszerzyć o dodatkowe przedziały wartości. Należy jednak uważać, że wraz ze wzrostem liczby przedziałów, identyfikacja staje się trudniejsza i wymaga wykorzystania formalnych metod analizy np. zastosowania logiki wielowartościowej oraz teorii informacji [1] lub użycia sztucznych sieci neuronowych.

## 5. Podsumowanie

Model diagnostyczny układu sterowania przyspieszaniem przedstawiony w niniejszej pracy stanowi próbą matematycznego zidentyfikowania i zdefiniowania niezdatności (uszkodzeń) silnika.

Kluczowym problemem identyfikacji jest weryfikacja modelu. W związku z tym estymowane modele poddano testowi symulacyjnemu, obliczając błąd średniokwadratowy, przyjmując go za kryterium określające zgodność modelu z posiadonym zbiorem obserwacji. Porównano wartości błędów średniokwadratowych dla różnych struktur oraz odpowiadające im wartości szukanych parametrów. Poddając te wartości odpowiednim modyfikacjom można na podstawie uzyskanych wyników, z dużą dokładnością wnioskować o stanie badanego obiektu (silnika), pod warunkiem, że procedura postępowania przy tworzeniu modelu jest oparta na jawnym wzorcu.

Uzyskane rezultaty wskazują na możliwość opracowania efektywnej metody diagnostowania układów automatycznej regulacji dzięki połączeniu wiedzy z dziedzin: identyfikacji procesów, logiki wielowartościowej, teorii informacji oraz sztucznych sieci neuronowych.

## Literatura

1. **Borowczyk H.:** *Quasi-informacyjna metoda wyznaczania programu diagnostowania złożonych obiektów technicznych.* Rozprawa doktorska. WAT, Warszawa, 1984.
2. **Borowczyk H.:** *Kompleksowy system diagnostyczny płatowca i zespołu napędowego samolotu MiG-29.* ITWL, Warszawa, 1997.
3. **Borowczyk H., Kącki Cz., Koblański A.:** *Technologia identyfikacji uszkodzeń turbinowych silników odrzutowych typu 89 przy pomocy stanowiska diagnostycznego KAPSO-17MK.* ITWL, Warszawa, 1991.
4. **Lindstedt P.:** *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy.* ASKON, Warszawa 2002.
5. **Lindstedt P., Borowczyk H.:** *Kompleksowy system diagnostyczny statku powietrznego.* ITWL, Warszawa, 1998.
6. **Manerowski J.:** *Identyfikacja modeli dynamiki ruchu sterowanych obiektów latających.* ASKON, Warszawa, 1999.
7. **Sobiech M.:** *Model diagnostyczny układu sterowania przyspieszeniem turbinowego silnika odrzutowego.* Praca magisterska, Politechnika Białostocka, Białystok, 2003.
8. **Zimmer A.:** *Identyfikacja obiektów i sygnałów. Teoria i praktyka dla użytkowników MATLABA.* PK, Kraków 1998.
9. *System identification toolbox, User's guide,* The MathWorks, 2000.
10. *Opis techniczny turbinowego silnika odrzutowego AŁ-21F3.*



Adam Dudar<sup>1</sup>

## MOC INDIKOWANA TŁOKOWEJ SPRĘŻARKI CHŁODNICZEJ

**Streszczenie:** W niniejszej pracy przedstawiono jedną z metod pomiaru mocy indykowanej tłokowej sprężarki chłodniczej. Stanowisko eksperymentalne zostało zbudowane w oparciu o agregat skraplający WF 180. Stosowne pomiary pozwalają określić parametry pracy badanej sprężarki oraz jej stan techniczny. Metoda badawcza opiera się na pomiarze ciśnienia w cylindrze sprężarki w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Do pomiaru ciśnienia wykorzystano tensometryczny przetwornik ciśnienia własnej konstrukcji, natomiast do określenia położenia tłoka zastosowano układ kontaktron – magnes. Układ pomiarowy został zbudowany przy wykorzystaniu rejestratora MC201 oraz komputera PC. Stanowisko badawcze jest obecnie w wyposażeniu Laboratorium Chłodnictwa w Katedrze Termodynamiki i Mechaniki Płynów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej.

**Słowa kluczowe:** moc indykowana, tłokowa sprężarka chłodnicza

### 1. Wprowadzenie

Przemiany rzeczywiste zachodzące w tłokowych maszynach cieplnych (silnikach i sprężarkach) odbiegają od teoretycznych obiegów termodynamicznych. Przyczyny tkwią w stratach, jakie towarzyszą realizacji obiegów teoretycznych. Natomiast straty są wynikiem rzeczywistych warunków pracy, różniących się od założonych teoretycznie. Odtworzenie rzeczywistych zmian ciśnienia, jakie zachodzą wewnątrz cylindrów, w których następuje realizacja teoretycznych założeń, jest możliwe za pomocą przyrządów zwanych indykatorami. Rejestrują one bieżące wartości ciśnienia w cylindrach maszyn tłokowych w funkcji zmieniających się objętości i dają obraz pracy w postaci tzw. wykresu indykatorowego [1].

Na podstawie tych wykresów można analizować proces sprężania zapoczątkowany przy otwartych zaworach dolotowych, napełnianie cylindra, otwieranie

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok

zaworów wylotowych, tłoczenie czynnika i takie jego charakterystyczne wielkości, jak: wykładnik przemiany, udział przestrzeni szkodliwej w napełnianiu cylindra sprężarki oraz straty na zaworach. Dzięki temu można dokonywać stosownej regulacji danej sprężarki.

Pomiar ciśnienia musi być wykonywany bardzo dokładnie, ponieważ w oparciu o zarejestrowane jego zmiany dokonuje się szczegółowej analizy pracy sprężarki [2].

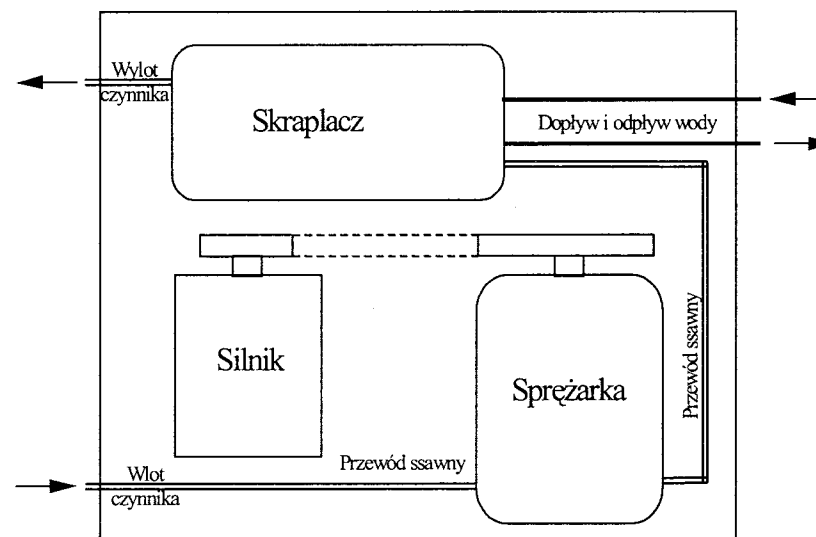
Najbardziej uniwersalny jest wykres ciśnienia w funkcji położenia wału korbowego  $p = f(\alpha)$ , gdzie  $\alpha$  – kąt obrotu wału. Wykres taki umożliwia wszechstronną analizę zjawisk zachodzących w cylindrze sprężarki. Jego zaletą jest równomierność podziałki kątowej, co oznacza że odcinki osi poziomej, odpowiadające jednakowej wartości kąta obrotu wału korbowego, są jednakowej długości. Należy zaznaczyć, że wykresy indykatorowe są szczególnie przydatne w analizie otwarcia zaworu tłocznego [2]. Głównym celem ich sporządzenia jest wyznaczenie średniego ciśnienia indykowanego, określenie największego ciśnienia w procesie tłoczenia oraz identyfikacja nieprawidłowości procesu sprężania na podstawie kształtu i wzajemnego położenia poszczególnych linii przemianowych.

W niniejszej pracy przedstawiono jedną z metod pomiaru mocy indykowanej sprężarki tłokowej chłodniczej. Zastosowane badania doświadczalne umożliwiają określenie stanu technicznego i osiągalnych parametrów pracy.

## 2. Koncepcja stanowiska badawczego

Do budowy stanowiska badawczego wykorzystano istniejący agregat skraplający produkcji NRD typu WF 180. Jest on przystosowany do pracy z czynnikami chłodniczymi R12 lub R22. Zakres pracy agregatu chłodniczego mieści się w przedziale: temperatura parowania  $t_o = (-30^\circ\text{C} \div -10^\circ\text{C})$  i temperatura skraplania  $t_k = (+25^\circ\text{C} \div +40^\circ\text{C})$ . Na rysunku 1 przedstawiono trzy główne podzespoły agregatu oparte na wspólnej ramie. Jednym z nich jest silnik elektryczny o moc 1,1 kW i prędkości obrotowej 1410 obr/min, którego zadaniem jest napędzanie sprężarki freonowej, będącej sercem agregatu. Sprężarka freonowa, jest to pionowa, dwucylindrowa sprężarka tłokowa z przekładnią pasową. Jej wydajność chłodnicza wynosi 2,1 kW. Cylindry sprężarki są uźebrowane tak, aby znacząco zwiększyć powierzchnię wymiany ciepła. Kolejnym urządzeniem, wchodzącym w skład agregatu skraplającego, jest skraplacz płaszczowo - rurowy chłodzony wodą. Podobnie jak sprężarka jest on przystosowany do czynników chłodniczych R12 i R22. Maksymalna temperatura czynnika w skraplaczu wynosi  $40^\circ\text{C}$ , a jego mała

symalna objętość  $3,4 \text{ dm}^3$ ; temperatura wody jest równa  $32^\circ\text{C}$ , a jej objętość w skraplaczu wynosi  $1,11 \text{ dm}^3$ . Powierzchnia wymiany ciepła jest równa  $1,05 \text{ m}^2$ .

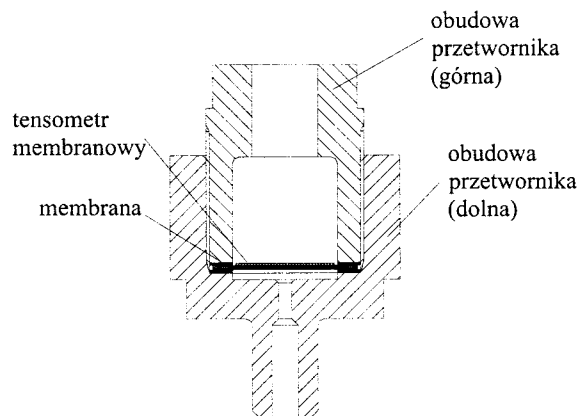


Rys. 1. Schemat blokowy agregatu skraplającego WF 180

Możliwość dokonania pomiaru ciśnienia w cylindrze była uwarunkowana od kanału pomiarowego w przestrzeni nad tłokiem. Wykonano go w płycie zaworowej sprężarki i zakończono specjalnym króćcem umożliwiającym przyłączenie przetwornika ciśnienia. Kanał o średnicy 4 mm powiększa przestrzeń szkodliwą sprężarki o dopuszczalną objętość 1% całej objętości cylindra. Pomiar ciśnienia został przeprowadzony za pomocą 2. Tensometryczny przetwornik ciśnienia

Przetwornik składa się z dwudzielnej obudowy wykonanej z mosiądzu oraz membrany wykonanej ze stali sprężynowej. Mosiężna obudowa przetwornika pełni funkcję oparcia dla znajdującej się wewnątrz membrany. Dolna część obudowy, w której znajduje się membrana, jest zakończona króćcem pomiarowym, który pozwala na podłączenie przetwornika do kanału pomiarowego. Górna część obudowy pełni rolę docisku membrany i zarazem chroni ją przed uszkodzeniem mechanicznym. Obie części obudowy połączone są za pomocą połączenia gwintowego. Uszczelnienie membrany tworzą dwa cienkie pierścienie miedziane powleczone teflonem. Na membranę naklefony jest foliowy tensometr membranowy o średnicy 15 mm, który jest podłączony do rejestratora pomiarowego. Zewnętrzna obudowa

dowa przetwornika jest izolowana w celu zminimalizowania wymiany ciepła z otoczeniem oraz zmniejszenia prawdopodobieństwa uszkodzenia mechanicznego przetwornika. Przetwornik ma więc zwartą budowę, umożliwiającą łatwy i niezawodny montaż na stanowisku pomiarowym.



Rys. 2. Tensometryczny przetwornik ciśnienia

Pomiar ciśnienia dokonywany jest w odstępach czasowych równych 1 ms, cc przy prędkości obrotowej wału korbowego sprężarki  $n = 652$  obr/min daje 92 punkty pomiarowe na jeden obrót.

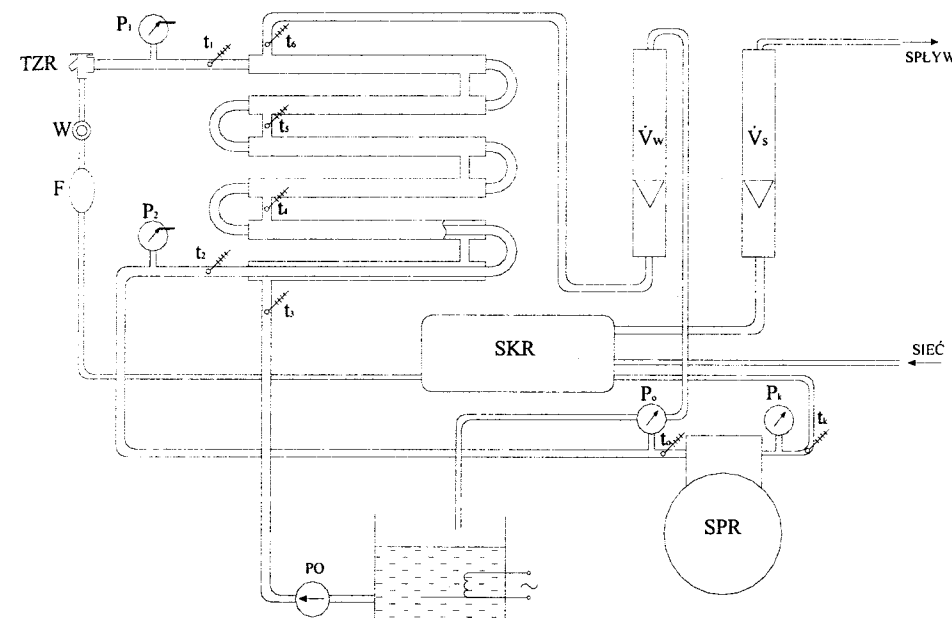
### 2.1. Pomiar położenia tłoka sprężarki

W celu otrzymania wykresu indykatorowego należy dokładnie oznaczyć położenie tłoka. Urządzenie rejestrujące kąt obrotu wału korbowego jest jednak kosztowne. W pracy zatem przyjęto uproszczenie, polegające na tym, że identyfikuje się położenie wału w chwili, gdy tłok osiąga ZZP (zewnętrzne zwrotne położenie). Do wyznaczenia tego punktu wykorzystano urządzenie zwane kontaktronem. Jego budowa i zasada działania jest bardzo prosta. W hermetycznie zamkniętej obudowie znajdują się dwie elektrody, które pod wpływem pola magnetycznego, wytworzonego przez magnes, zwiernają styki i powodują zamknięcie obwodu elektrycznego, co jest odnotowywane przez rejestrator pomiarowy. Na kole pasowym sprężarki umiejscowiony jest magnes, przy czym w takim specyficznym położeniu, w którym sygnalizuje górne położenie tłoka. Kontaktron znajduje się na statywie w odległości 4 mm od wirującego magnesu. W momencie, gdy magnes przemieści się

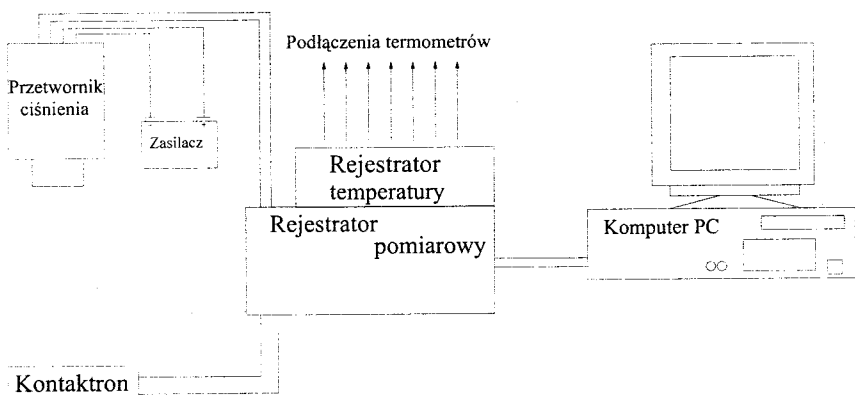
przed kontaktronem, sygnalizowane jest zetknięcie się styków i otrzymujemy pik elektryczny odczytany przez rejestrator.

### 2.2. Synchronizacja pomiaru ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego

Pomiaru ciśnienia i piku wytworzonego przez kontaktron dokonuje rejestrator elektroniczny, który zapisuje w swojej pamięci, a później przekazuje do pamięci komputera wyniki w postaci minimalnych zmian napięcia. Dane te są zapisywane w dwóch osobnych kanałach pomiarowych. Znajomość miejsca położenia tłoka po rejestracji piku umożliwia identyfikację odpowiadającego mu ciśnienia. W ten sposób pozyskuje się wartości ciśnienia we wspomnianych wcześniej 92 punktach pomiarowych. Proporcjonalność napięcia do ciśnienia jest uwarunkowana uprzednim wycechowaniem przetwornika, czyli wykonaniem jego charakterystyki. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 3 a układu pomiarowego na rysunku 4.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego SPR – badana sprężarka, SKR – skraplacz, F – filtr odwadniacz, W – wziernik, TZR – termostatyczny zawór rozprężny, PO – pompa obiegowa,  $t_0 - t_6$  – miejsca pomiaru temperatury,  $P_{0,1,2} - P_k$  – miejsca pomiaru ciśnienia



Rys. 4. Blokowy schemat układu pomiarowego

Wyniki pomiarów, w postaci zmian napięcia, uzyskane z rejestratora pomiarowego zestawia się w wybranym arkuszu kalkulacyjnym. Otrzymany wykres zmian ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego, który transformuje się w postaci wykresu indykatorowego.

### 3. Analiza wyników pomiarów

Na stanowisku badawczym wykonano pomiary w stanie ustalonym. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 1. Zależność ciśnienia wewnątrz cylindra w funkcji kąta obrotu wału korbowego rejestrowano komputerowo dla każdej serii pomiarów. Dysponując wykresami indykatorowymi można każdorazowo wyznaczyć średnie ciśnienie  $p_i$ .

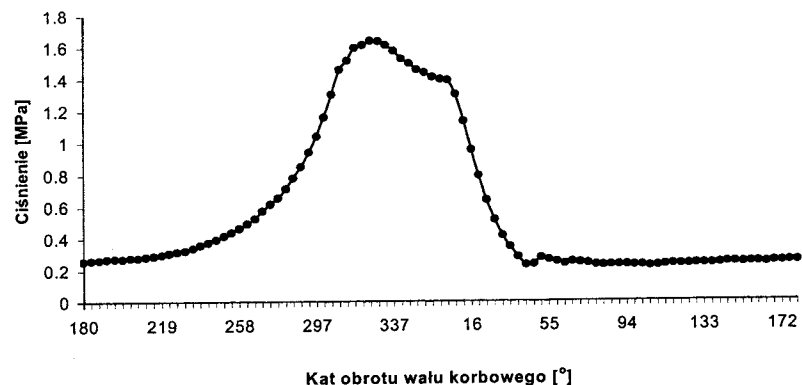
Tabela 1.

Zestawienie wyników pomiarów

Lp.	Wielkość mierzona	Oznaczenie	Jednostka	Numer pomiaru					Wartość średnia
				1	2	3	4	5	
1	Temperatura tłoczenia	$t_k$	°C	72,00	72,10	72,00	72,00	72,00	72,00
2	Temperatura ssania	$t_0$	°C	5,00	5,00	5,00	5,10	5,00	5,00
3	Temperatura czynnika na wlocie do parownika	$t_1$	°C	2,31	2,33	2,31	2,30	2,31	2,31
4	Temperatura czynnika na wylocie z parownika	$t_2$	°C	8,60	8,60	8,61	8,60	8,61	8,61
5	Temperatura cieczy chłodzącej na wylocie z parownika	$t_3$	°C	12,23	12,23	12,23	12,24	12,23	12,23
6	Temperatura cieczy chłodzącej na wlocie do parownika	$t_6$	°C	18,53	18,53	18,51	18,52	18,51	18,52
7	Temperatura cieczy chłodzącej w parowniku	$t_4$	°C	13,22	13,22	13,22	13,21	13,22	13,22
8	Temperatura cieczy chłodzącej w parowniku	$t_5$	°C	16,73	16,75	16,71	16,72	16,73	16,73
9	Ciśnienie tłoczenia	$p_k$	MPa	1,60	1,600	1,59	1,60	1,61	1,60
10	Ciśnienie ssania	$p_0$	MPa	0,314	0,315	0,315	0,315	0,316	0,315
11	Ciśnienie czynnika na wlocie do parownika	$p_1$	MPa	0,510	0,510	0,510	0,510	0,510	0,510
12	Ciśnienie par czynnika na wylocie z parownika	$p_2$	MPa	0,480	0,470	0,480	0,480	0,490	0,480
13	Wydatek objętościowy wody chłodzącej parownik	$\dot{V}_w$	m <sup>3</sup> /h	0,380	0,390	0,380	0,390	0,400	0,390
14	Wydatek objętościowy wody chłodzącej skraplacz	$\dot{V}_s$	m <sup>3</sup> /h	0,245	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250

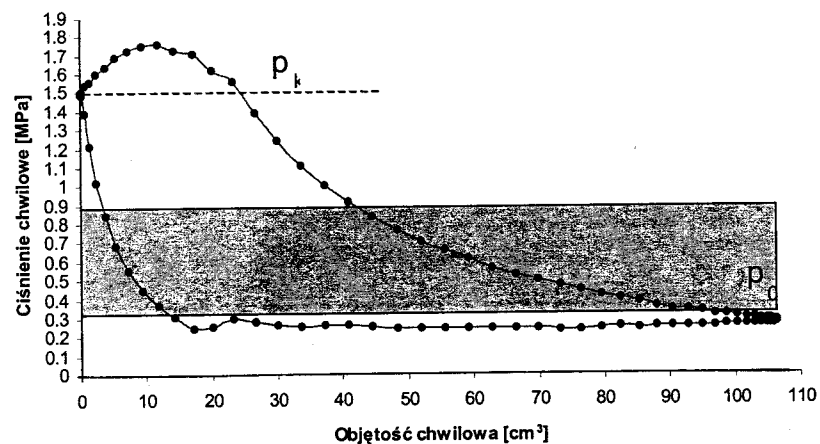
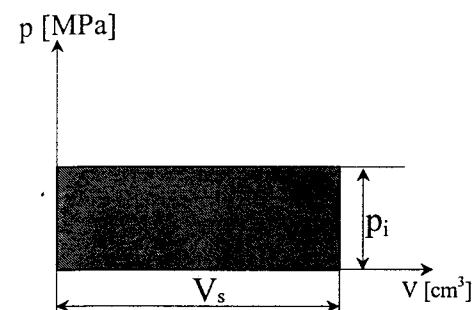
Na podstawie pomiarów zmian ciśnienia w cylindrze sprężarki otrzymuje się wykres ciśnienia w funkcji kąta obrotu (rys. 5). Zestawiając dwa ciągi wartości: ciśnienia w cylindrze i odpowiadającej mu objętości chwilowej czynnika, uzyskuje się poszukiwany wykres indykatorowy, przedstawiony na (rys. 6).

### Wartość ciśnienia w funkcji kąta położenia wału korbowego

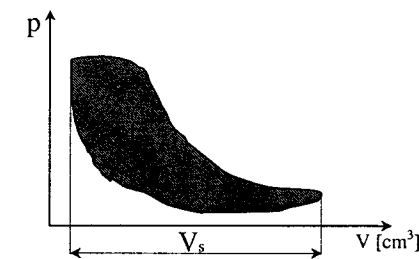


Rys. 5. Zmiana ciśnienia w funkcji kąta położenia wału korbowego

### Wykres indykatorowy

Rys. 6. Wykres indykatorowy ( $p_k$  – ciśnienie parowania,  $p_0$  – ciśnienie skraplania)

Rys. 7.



Rys. 8.

Aby wyznaczyć średnie ciśnienie indykowane  $p_i$  (rys. 7), należy obliczyć pole powierzchni „ $f$ ” (rys. 8), np. metodą planimetrowania. [3]. Wtedy

$$p_i = \frac{f}{V_s},$$

gdzie:  $V_s$  – objętość skokowa.

Moc indykowana (wewnętrzna) jest więc równa:

$$N_i = p_i \cdot \dot{V}_t,$$

gdzie:  $\dot{V}_t$  – teoretyczna wydajność objętościowa.

Ponadto wyznaczono szereg dodatkowych parametrów sprężarki i całego obiegu chłodniczego. Uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 2.

### Wyniki obliczeń

Tabela 2.

Lp.	Wielkość obliczona	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
1	2	3	4	5
1	Jednostkowa wydajność chłodnicza	$q_0$	158	kJ/kg
2	Wydajność masowa sprężarki	$\dot{m}$	0,01807	kg/s
3	Rzeczywista wydajność objętościowa sprężarki	$\dot{V}$	5,2	m <sup>3</sup> /h
4	Moc indykowana (wewnętrzna)	$N_i$	1305	W
5	Średnie ciśnienie indykowane	$p_i$	0,565	MPa
6	Teoretyczna sprawność wewnętrzna (indykowana)	$\eta_{i(t)}$	67,8	%

cd. tabeli 2.

1	2	3	4	5
7	Doświadczalna sprawność wewnętrzna (indykowana)	$\eta_{i(d)}$	49,9	%
8	Sprawność mechaniczna	$\eta_w$	90,7	%
9	Teoretyczna sprawność efektywna	$\eta_{e(t)}$	61,5	%
10	Doświadczalna sprawność efektywna	$\eta_{e(d)}$	45,2	%
11	Teoretyczna sprawność ogólna	$\eta_{0(t)}$	50,7	%
12	Doświadczalna sprawność ogólna	$\eta_{0(d)}$	37,7	%
13	Teoretyczny współczynnik wydajności chłodniczej	$\varepsilon_t$	4,39	–
14	Indykowany współczynnik wydajności chłodniczej	$\varepsilon_i$	2,19	–
15	Efektywny współczynnik wydajności chłodniczej	$\varepsilon_e$	1,98	–
16	Ogólny współczynnik wydajności chłodniczej	$\varepsilon_0$	1,64	–

#### 4. Wnioski

Głównym celem pracy było zbudowanie stanowiska badawczego oraz przedstawienie metody otrzymywania wykresu indykatorowego nie wymagającej dużych nakładów finansowych. Eksperymentalne stanowisko badawcze umożliwiło także wykonanie szeregu dodatkowych pomiarów wielkości charakterystycznych dla chłodniczej sprężarki tłokowej. Przedstawiona metoda nie była dotychczas stosowana w badaniach nad sprężarkami chłodniczymi. Badaniom poddano celowo już wyeksploatowaną sprężarkę po to, aby można było dokonać oceny jej stanu technicznego. Na podstawie wyników pomiarów można stwierdzić, że stan techniczny badanej sprężarki nie był najlepszy.

#### Literatura

1. Szolc T.: *Pracownia ciepłno-chemiczna*. WSiP, Warszawa, 1979.
2. Warczak W.: *Sprężarki łożnicze*. WNT, Warszawa, 1987.
3. Wesółowski A.: *Urządzenia chłodnicze i kriogeniczne oraz ich pomiary cieplne*. WNT, Warszawa, 1980.

#### INDICATED POWER OF REFRIGERATING PISTON COMPRESSOR

**Abstract:** A method of measurement of indicated power of refrigerating piston compressor has been presented in this work. The proper experimental test stand became built basing on the condensation unit of WF 180. Appropriate measurements permit determination of operational parameters of tested compressor as well as their technical state. Investigative method is strictly connected with measurement of pressure in cylinder of compressor as a function of crank angle. Measurement of pressure has been realized with use of the own extensometer's pressure converter, while piston position has been determined by means of contracton – magnet arrangement. Measurement system became executed with utilization of MC201 recorder as well as proper PC computer. At present, the demonstrated stand is on equipment of Laboratory of Refrigerating Engineering at Chair of Thermodynamics and Mechanics of Fluids on Mechanical Department of Technological University of Białystok.

Pracę wykonano w ramach realizacji pracy statutowej S/WM/2/01.

Adam Dudar<sup>1</sup>

## POMIAR PARAMETRÓW OCIEKOWEJ CHŁODNICY WODY I WYZNACZANIE JEJ SPRAWNOŚCI

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono opis szczelinowej chłodnicy wody i stanowisko badawcze, umożliwiające pomiar podstawowych parametrów eksploatacyjnych tego urządzenia oraz monitoring procesu ochładzania rozpylonego strumienia wody, w wyniku jego bezpośredniego kontaktu ze strumieniem powietrza. Szczelinowa chłodnica wody ma za zadanie obniżenie temperatury wody chłodzącej skraplacz za pomocą strumienia powietrza przepływającego przez centralę klimatyzacyjną. Urządzenie to stanowi integralną część centrali klimatyzacyjnej CMK-1, która znajduje się w Laboratorium Chłodnictwa Katedry Termodynamiki i Mechaniki Płynów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej.

**Słowa kluczowe:** szczelinowa chłodnica wody, system chłodzenia, chłodnia wody obiegowej

### 1. Wstęp

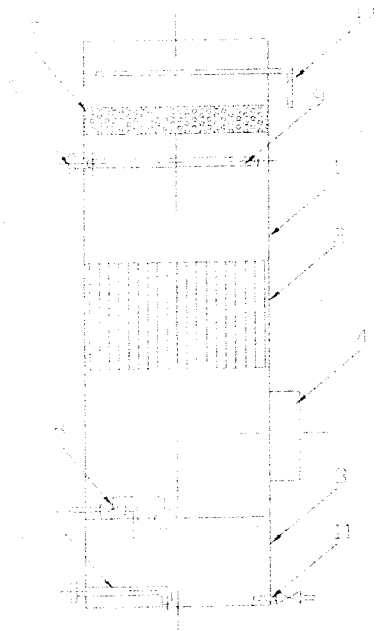
Deficyt wody, względy ekonomiczne oraz przepisy dotyczące ochrony środowiska naturalnego zmuszają do oszczędnego gospodarowania wodą. Oszczędność wody, w procesach technologicznych, można uzyskać poprzez jej wielokrotne wykorzystanie, budując obiegi zamknięte, w których podstawowym elementem może być wentylatorowa chłodnia wody [1]. Chłodnia wody obiegowej jest otwartym wymiennikiem ciepła, którego zadaniem jest chłodzenie wody poprzez odprowadzanie ciepła do powietrza atmosferycznego. W ten sposób można powtórnie użyć tej samej wody w układzie chłodzenia skraplacza. Dotychczas skraplacz był chłodzony wodą czerpaną z sieci wodociągowej. Otwarty system chłodzenia, znacznie podnosił koszty utrzymania całego urządzenia – zużycie wody do chłodzenia skraplacza wynosiło 24 – 40 kg/MJ. Zastosowanie zamkniętego układu chłodzenia może znacznie obniżyć koszty chłodzenia skraplacza.

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka Wydział Mechaniczny Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów  
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok

## 2. Koncepcja stanowiska

Przy projektowaniu chłodni szczególną uwagę zwrócono na zraszanie złoża, które w czasie pracy urządzenia nie może stawiać nadmiernego oporu przepływającemu ku górze powietrzu oraz spływającej w dół wodzie. Oznacza to, że musi być ono w odpowiednim stopniu zraszone, by umożliwić efektywną wymianę ciepła i masy na kontaktowej powierzchni. Jednocześnie duży nacisk należało położyć na wyeliminowanie zbędnych zakłóceń strumienia powietrza napływającego do chłodni. Powietrze chłodzące z centrali klimatyzacyjnej jest kierowane w pierwszej kolejności do zbiornika znajdującego się pod złożem, gdzie następuje zmniejszenie jego prędkości przepływu i wyrównanie strugi, po czym powietrze przepływa do złoża. Ograniczenie prędkości przepływu do pewnej wartości minimalnej warunkuje proporcjonalny rozdział strumienia powietrza w przestrzeniach pomiędzy pakietami złoża, daje także dodatkową korzyść w postaci zmniejszenia spadku ciśnienia w zraszanym złożu, oraz ogranicza w dużym stopniu porywanie kropeł chłodzonej wody z powietrzem, odcinając w ten sposób odkraplacz. Schemat chłodni szczelinowej przedstawia rysunek 1 [2].



**Rys. 1.** Schemat chłodni szczelinowej: 1 – obudowa, 2 – złoże, 3 – zbiornik wody ochłodzonej, 4 – wlot powietrza do starczonego z centrali, 5 – przyłącze odprowadzające ochłodzoną wodę z chłodnicy, 6 – kolektor, 7 – odkraplacz, 8 – zawór pływakowy wraz z przewodem wody uzupełniającej, 9 – dysze rozpylające, 10 – przewód służący do zbierania parametrów powietrza opuszczającego chłodnię, 11 – zawór spustowy

W dolnej części urządzenia znajduje się zbiornik ochłodzonej wody o pojemności 100 dm<sup>3</sup>. Ze względu na korozyjny wpływ środowiska wykonano go z blachy miedzianej o grubości 1mm. Podstawowym elementem roboczym szczelinowej chłodni wody jest zraszane złoże. Głównym zadaniem wypełnienia (złoża) jest intensy-

## 3. Budowa stanowiska

Chłodnia wody obiegowej składa się z czterech zasadniczych części: zbiornika wody, zraszanego złoża kontaktowego, komory z dyszami natryskowymi i odkraplacza.

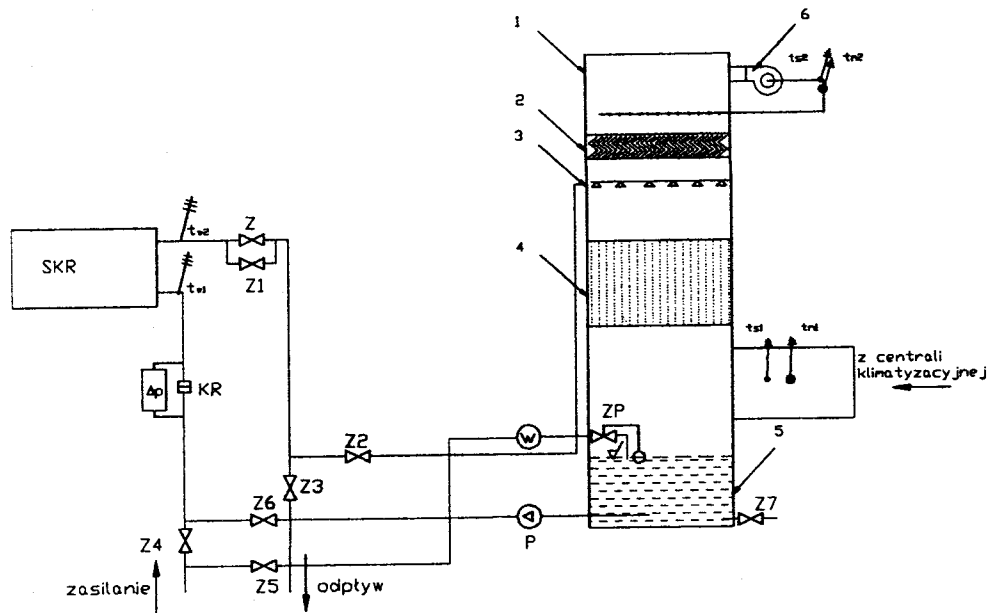
fikacja wymiany ciepła i masy pomiędzy chłodzoną wodą, a chłodzącym powietrzem [2]. Materiałem, z którego wykonano złoże, jest karton perforowany, nasączony środkami uniemożliwiającymi wchłanianie wilgoci. Złoże składa się z pakietu 100 płyt tworzących prostopadłościan o wymiarach 600 mm × 600 mm × 360 mm. Pomiedzy płytami kartonu zachowany jest odstęp 4,5 mm. Stałe odległości zapewniają odpowiednie przekładki odporne na wchłanianie wilgoci. Całość wypełnienia jest umieszczona w aluminiowej ramie, w celu wzmocnienia i zmniejszenia ryzyka ewentualnego uszkodzenia złoża podczas montażu. Uzyskane w ten sposób złoże posiada powierzchnię wymiany  $A = 47 \text{ m}^2$ . Drugim ważnym parametrem geometrycznym wypełnienia jest stosunek pola powierzchni wymiany do zajmowanej przez nie objętości, który wynosi  $F_v = 362,65 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Nad złożem znajdują się dysze natryskowe, których zadaniem jest rozpylenie strumienia wody i wprowadzenie jej w obszar wypełnienia w taki sposób, aby równomierną warstwą spływała ściankami złoża kontaktowego. Dobierając rodzaj dysz, należy zwrócić uwagę na fakt, że są to elementy kształtujące strumień wody podawanej na złoże. Dysze takie powinny charakteryzować się niewielkim spadkiem ciśnienia strumienia wody, przepustowością, a także prostotą i niewielkim kosztem ich wykonania. W zbudowanej chłodni rolę dysz spełniają 66 otworów o średnicy 1,5 mm. Odpowiedni stopień zraszania złoża zapewniają trzy rzędy otworów wywierconych w trzech miedzianych rurach o średnicy 28 mm. Odkraplacz zbudowany jest z warstwy luźno usypanych kawałków styropianu w różnych kształtach o grubości 15 cm. Powietrze, przepływające przez wolne przestrzenie między kawałkami styropianu, może zatem często zmieniać kierunek przepływu. Zapewnia to prawie całkowite oddzielenie kropeł wody porywanych przez strumień powietrza nad złożem. Nad odkraplaczem znajduje się kanał wykonany z tworzywa sztucznego o średnicy 22 mm. Umieszczony na jego końcu wentylator (poz. 6, rys. 2) czerpie powietrze opuszczające chłodnię. W przewodzie tym znajdują się dwa termometry (suchy i wilgotny) umożliwiające pomiar temperatury, który umożliwia określenie parametrów powietrza opuszczającego chłodnię.

## 4. Zasada działania

Strumień wody zasilający chłodnię krąży w zamkniętym obiegu pomiędzy chłodnią szczelinową, a skraplaczem – (rys. 2). Ogrzana woda z obiegu chłodzącego skraplacz SKR dopływa do chłodni 1, gdzie trafia do kolektora z dyszami rozpylającymi 3, który jest umieszczony pod odkraplaczem 2. Woda obiegowa, po przejściu przez dysze i rozpyleniu, spływa na złoże 4, gdzie ochładza się w wyniku



kontaktu z powietrzem płynącym w przeciwnym kierunku. Następnie płynie do zbiornika 5, który znajduje się na dnie chłodni i tworzy jego podstawę. Ochłodzona woda pobierana jest ze zbiornika za pomocą pompy obiegowej i kierowana do skraplacza. Porywane strumieniem powietrza cząsteczki wody zostają przechwycone przez odkraplacz 2. W związku z tym, że część wody odparowuje w procesie chłodzenia oraz jest porwana przez strumień powietrza, do obiegu jest doprowadzana woda uzupełniająca poprzez zawór pływakowy ZP. Powietrze potrzebne do ochłodzenia wody obiegowej w chłodnicy jest pobierane z hali laboratoryjnej oraz z zewnątrz przez wentylator znajdujący się w centrali klimatyzacyjnej.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: 1 - chłodnia szczelinowa, 2 - odkraplacz, 3 - dysza rozpylająca, 4 - zraszane złożo, 5 - zbiornik wody, 6 - wentylator wraz z sondą do pomiaru parametrów powietrza, Z1-Z6 - zawory regulacyjne, Z - automatyczny zawór wodny,  $t_{w1}$  temperatura wody na wyjściu z chłodni,  $t_{w2}$  - temperatura wody na wejściu do chłodni,  $t_{s1}$  temperatura powietrza wg termometru suchego na wlocie powietrza do chłodni,  $t_{m1}$  - temperatura powietrza według termometru wilgotnego na wlocie do chłodni,  $t_{s2}$  - temperatura powietrza wg termometru suchego na wylocie z chłodni,  $t_{m2}$  - temperatura powietrza wg termometru wilgotnego na wylocie z chłodni, KR - kryza pomiarowa, SKR - skraplacz, P - pompa obiegowa wody chłodzącej, W - wodomierz, ZP - zawór pływakowy

Dzięki zastosowaniu centrali klimatyzacyjnej, istnieją duże możliwości regulacji parametrów powietrza dostarczanego do badanej chłodnicy. W zależności od potrzeb, powietrze można chłodzić, ogrzewać, zwiększać lub zmniejszać jego wilgotność i natężenie przepływu. Umożliwia to dokonanie oceny wpływu parametrów powietrza na warunki pracy chłodnicy [3].

## 5. Metodyka wykonywania pomiarów

Przed uruchomieniem stanowiska należy sprawdzić otwarcie zaworów: Z1, Z3 i Z4. Następnie załącza się urządzenie chłodnicze i wentylator centrali klimatyzacyjnej oraz otwiera się zawory: Z2, Z5 i Z6, a zamyka zawór Z3. Po napełnieniu zbiornika chłodni wody obiegowej należy zamknąć zawór Z4. Niedmiar wody w zbiorniku będzie uzupełniany automatycznie poprzez zawór ZP. Kolejną czynnością jest włączenie pompy obiegowej skraplacza. Przy takich nastawach należy doprowadzić układ do stanu ustalonego. Można przyjąć, że stan ustalony osiąga się w momencie, gdy temperatury:  $t_{s1}$  i  $t_{m1}$  jak również  $t_{s2}$  i  $t_{m2}$  nie ulegną zmianie w przeciągu 5 minut o więcej niż  $0,2^{\circ}\text{C}$ , w trzech kolejno następujących po sobie pomiarach. Po osiągnięciu stanu ustalonego można dokonywać przedmiotowych pomiarów. Uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 1. Należy podkreślić, że ciągły proces ochładzania wody jest wolnozmienny, co pozwala na dokonywanie pomiarów manualnych, bez konieczności stosowania elektronicznych układów pomiarowych. Wystarczającym elementem układu pomiarowego jest więc manualny przełącznik miejsc pomiarowych oraz termometr elektroniczny.

Zestawienie wyników pomiarów

Tabela 1.

Lp.	Wielkość mierzona	Oznaczenie	Jednostka	Pomiar (wartości średnie)			
				1	2	3	4
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Spadek ciśnienia na kryzie	$\Delta p$	Pa	78			
2	Objętość wody wg wodomierza	$V$	$\text{dm}^3$	10	10	10	10
3	Czas pomiaru objętości wody	$\tau$	s	13	16	20	24
4	Objętość wody uzupełnianej wg wodomierza	$V'$	$\text{dm}^3$	0,1	0,1	0,1	0,1
5	Czas pomiaru objętości wody uzupełnianej	$\tau'$	s	20	15	13	12
6	Temperatura powietrza według termometru suchego na wlocie	$t_{s1}$	$^{\circ}\text{C}$	22,8			

cd. tabeli 1.

1	2	3	4	5	6	7	8
7	Temperatura powietrza według termometru wilgotnego na wlocie	$t_{m1}$	°C	17,5			
8	Temperatura powietrza według termometru suchego na wylocie	$t_{s2}$	°C	23	23	23	23
9	Temperatura powietrza według termometru wilgotnego na wlocie	$t_{m2}$	°C	19,9	18,9	18,5	18,4
10	Temperatura wody na wejściu do chłodni	$t_{w2}$	°C	27,8	27,9	28,4	29,1
11	Temperatura wody na wyjściu z chłodni	$t_{w1}$	°C	23,8	23,8	24,2	24,7
12	Temperatura wody uzupełniającej	$t_{wu}$	°C	17,7			

Wyniki pomiarów pozwalają określić sprawność cieplną chłodnicy  $\eta_c$  i wyznaczyć wielkość strumienia ciepła  $\dot{Q}$  przekazywanego do powietrza. Możliwe jest także określenie parametrów charakterystycznych dla pracy tego typu urządzenia. Wyniki stosownych obliczeń zestawiono w tabeli 2. Można je także przedstawić w formie graficznej.

Tabela 2.

Zestawienie wyników obliczeń

Lp.	Wielkość obliczona	Oznaczenie	Jednostka	Wynik			
				1	2	3	4
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Wydatek objętościowy powietrza	$\dot{V}_p$	$\frac{m^3}{s}$	2,26			
2	Wydatek masowy powietrza	$\dot{m}_p$	$\frac{kg}{s}$	2,77			
3	Wydatek masowy wody	$\dot{m}_w$	$\frac{kg}{s}$	0,78	0,62	0,5	0,42
4	Wydatek masowy wody uzupełniającej	$\dot{m}_{wu}$	$\frac{kg}{s} \cdot 10^{-4}$	5	6,7	7,7	8
5	Średnia gęstość powietrza (z wykresu i-x)	$\rho_p$	$\frac{kg}{m^3}$	1,185			

cd tabeli 2.

1	2	3	4	5	6	7	8
6	Wilgotność względna na wlocie do chłodni	$\varphi_1$	%	60			
7	Wilgotność względna na wylocie z chłodni	$\varphi_2$	%	70			
8	Zawartość wilgoci na wlocie	$x_1$	$\frac{g}{kg}$	10,3			
9	Zawartość wilgoci na wylocie	$x_2$	$\frac{g}{kg}$	12,10	11,9	11,7	11,5
10	Strumień ciepła odbieranego przez powietrze według $\Delta i_p$	$\dot{Q}_p$	kW	13,40	10,72	9,38	8,04
11	Strumień ciepła odbieranego przez powietrze – ciepło jawne	$\dot{Q}_j$	kW	0,54	0,54	0,54	0,54
12	Strumień ciepła odbieranego przez powietrze – ciepło utajone	$\dot{Q}_u$	kW	12,29	9,43	8,16	6,88
13	Całkowity strumień ciepła odbieranego przez powietrze	$\dot{Q}_c$	kW	12,83	9,97	8,70	7,42
14	Strumień ciepła odbieranego przez wodę	$\dot{Q}_w$	kW	12,90	10,43	8,60	7,70
15	Sprawność cieplna chłodni	$\eta_c$	%	40	39	38	37

## 6. Wnioski

Szczelinowa chłodnica wody obiegowej, została zbudowana we własnym zakresie z materiałów ogólnie dostępnych na rynku i przy minimalnym nakładzie finansowym. Należy stwierdzić że charakter przebiegu procesu chłodzenia wody w zbudowanej chłodni, jest zgodny z przesłankami natury teoretycznej. Przeprowadzone badania pozwoliły na pozytywną ocenę przydatności szczelinowych chłodnic wody obiegowej. Możliwa jest rozbudowa i modernizacja urządzenia oraz komputeryzacja toru pomiarowego. Natomiast automatyzacja pracy chłodni wymaga zastosowania zaworów elektromagnetycznych oraz zainstalowania klap regulujących przepływ powietrza.

## Literatura

1. **Bonca Z., Dziubek R.:** *Zagadnienia obliczeniowe z chłodnictwa i klimatyzacji*. Wyższa Szkoła Morska w Gdyni, Gdynia, 1995.
2. **Kołodziejczyk L., Rubik M.:** *Technika chłodnicza w klimatyzacji*. Arkady, Warszawa, 1976.
3. **Przydróżny S., Ferencowicz J.:** *Klimatyzacja*. Politechnika Wrocławska, Wrocław, 1989.

### MEASUREMENT OF PARAMETERS OF PORT WATER COOLER

**Abstract:** Detailed description of the port water cooler has been presented in this work. The proper experimental test stand permit measurement of basic operating device's parameters as well as monitoring of process of cooling of sprayed stream of water following as a result of their direct contact with stream of air. The port water cooler is assigned for decrease of temperature of condenser cooling water by means of stream of air flowing through the air conditioner of CMK-1. At present, this device makes the integral part of air conditioner of CMK-1, which is on equipment of Laboratory of Refrigerating Engineering at Chair of Thermodynamics and Mechanics of Fluids on Mechanical Department of Technological University of Białystok.

Pracę wykonano w ramach realizacji pracy statutowej S/WM/2/01.

Małgorzata Grądzka-Dahlke<sup>1</sup>

## OCENA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNYCH KOMPOZYTÓW Z WYPEŁNIACZAMI WĘGLOWYMI

**Streszczenie:** Kompozyty od wielu lat wykorzystywane są jako pokrycia chroniące powierzchnię elementów konstrukcyjnych przed zużyciem. W pracy przedstawiono wyniki badań nad właściwościami tarciovymi kompozytów na bazie polimerowej z napełniaczami węglowymi. Stwierdzono korzystny wpływ pokryć kompozytowych na zmniejszenie oporów ruchu i zmianę mechanizmów zużycia współpracujących powierzchni podczas tarcia.

**Słowa kluczowe:** kompozyty, napełniacze węglowe, tribologia

### 1. Wprowadzenie

Tworzywa kompozytowe otworzyły nowe perspektywy przed inżynierią materiałową, zwłaszcza w zakresie stosowania polimerów organicznych. Możliwość wykorzystania różnych matryc polimerowych (termoplasty, żywice chemo- i termoutwardzalne, polimery naturalne, kopolimery, kauczuki), jak i materiałów w postaci fazy rozproszonej (włókna węglowe, szklane, aramidowe, włókna naturalne, mineralne i biopolimerowe) pozwala uzyskać materiały o zróżnicowanych właściwościach. Mogą być stosowane zarówno w węzłach, gdzie wymagane jest jak najmniejsze tarcie (łożyska ślizgowe), jak też w elementach, gdzie zachodzi potrzeba dużych oporów ruchu, np. okładziny hamulcowe [5,6].

W wyborze materiałów przeznaczonych do współpracy tribologicznej brane są pod uwagę czynniki zewnętrzne, wymuszające określony zespół reakcji materiału, w tym: obciążenie, temperatura pracy, prędkości poślizgu, rodzaj smarowania lub jego brak, jak również właściwości materiałów, a w przypadku kompozytów – rodzaj osnowy, rodzaj zbrojenia, udział i wielkość fazy zbrojącej oraz jej morfo-

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Materiałoznawstwa, ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok

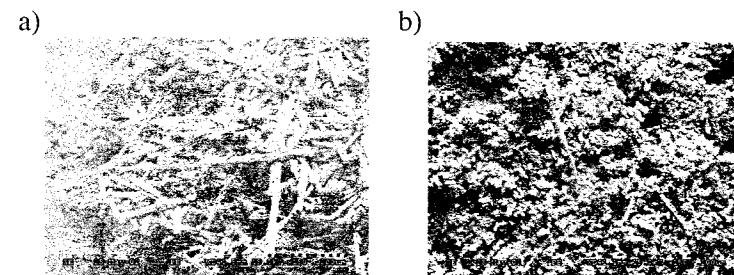
logia. Każdy z tych czynników wpływa na trwałość i niezawodność węzła tarciowego.

Współpraca elementów trących w warunkach stałych obciążeń i prędkości poślizgu sprzyja powstawaniu warstwek powierzchniowych, które w znacznej mierze wpływają na właściwości węzła tarcia [8]. Mogą to być warstewki tlenkowe, adsorpcyjne błonki pary wodnej, zaadsorbowane cząstki stałe, błonki o małej wytrzymałości na ścinanie wytwarzane celowo (grafit, dwusiarczek molibdenu, oleje smarne) oraz tzw. warstewki wtórne, zawierające m.in. cząsteczki tlenków, faz międzymetalicznych, produktów zużycia. Obecność tych warstwek może powodować zmniejszenie oporów ruchu i chronić powierzchnie trące przed zużyciem. W przypadku obciążeń zmiennych następuje niszczenie powstałych struktur powierzchniowych, szczególnie przy wysokich naciskach jednostkowych – zachodzi wówczas proces tworzenia złączy adhezyjnych i niszczenia ich, co prowadzi do intensywnego zużycia materiału. Zużycie zmęczeniowe mogą powodować dodatkowo cykliczne naprężenia rozciągająco-ściskające w warstwie powierzchniowej.

Jednym z rozwiązań problemu jest nanoszenie powłok na powierzchnie trące. Przy czym stosowane są zarówno twarde powłoki przeciwzużyciowe: TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NCD [2, 3] jak też powłoki polimerowe o dobrych właściwościach ślizgowych. Zastosowanie kompozytów poprzez odpowiedni dobór zbrojenia (proszki ceramiczne, metaliczne, napełniacze węglowe) pozwala kształtować cechy użytkowe materiałów [1, 4].

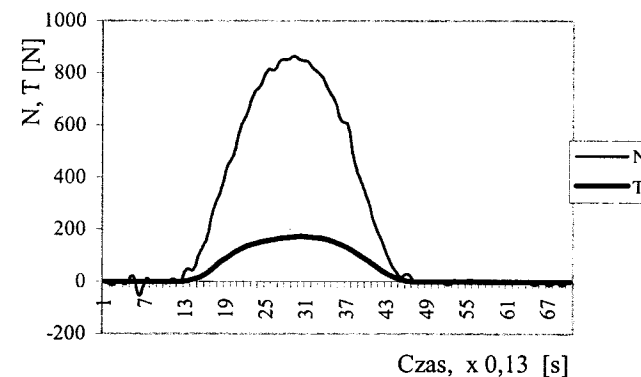
## 2. Materiały i metodyka badań

Badaniom poddano materiały kompozytowe na bazie żywicy bitumicznej z napełniaczami węglowymi. Zastosowano dwa rodzaje zbrojenia: krótkie włókna węglowe ( $\phi 5 \pm 20 \mu\text{m}$ ) (kompozyt I) oraz cząstki węgla amorficznego (kompozyt II). Obrazy mikroskopowe cząstek przedstawiono na rysunku 1. Materiały zostały opracowane w Instytucie Chemii Nieorganicznej Białoruskiej Akademii Nauk w Mińsku [7]. Próbkę do badań tarciowych w postaci pierścieni i tarcz wykonano ze stali chromowej 4H13 (twardość 20 HRC, chropowatość powierzchni  $R_a = 0,7 \mu\text{m}$ ). Materiały kompozytowe przygotowano według technologii producenta i naniesiono na powierzchnie pierścieni w postaci warstwek o grubości ok. 0,5 mm. Powierzchnie przeciwpróbek-tarcz nie były poddane modyfikacji. Równolegle przeprowadzono badania porównawcze dla pierścieni ze stali 4H13 bez pokryć.



Rys. 1. Morfologia cząstek zbrojenia kompozytów: a) włókna węglowe, b) cząstki węgla amorficznego

Badania tribologiczne przeprowadzono na aparacie tarciowym w układzie pierścień-tarcza przy ruchu obrotowo-rewersyjnym. Częstotliwość ruchu wynosiła 1 Hz, maksymalna prędkość poślizgu  $v_{\text{max}} = 0,018 \text{ m/s}$ . Obciążenie zadawane było impulsowo (o przebiegu zbliżonym do połówki sinusoidy – rys. 2), naciski jednostkowe zmieniały się od zera do  $p_{\text{max}}$ . Badania przeprowadzono dla trzech różnych wartości maksymalnych nacisków jednostkowych  $p_{\text{max}} = 5; 8; 11 \text{ MPa}$ , w warunkach smarowania statycznego 2% roztworem KMC. Mierzono wartości oporów ruchu podczas tarcia. Analizowano zmiany współczynników tarcia, obliczanych dla maksymalnych wartości siły  $T$  w każdym cyklu obciążenia w czasie 4 godzin badań (rys. 2).



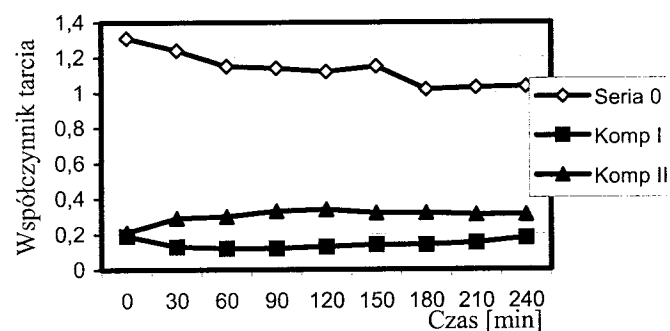
Rys. 2. Zmiany wartości nacisków  $N$  i siły tarcia  $T$  w czasie jednego cyklu obciążenia

Obserwacje śladów tarcia prowadzono na elektronowym mikroskopie skaningowym HITACHI S-3000N.

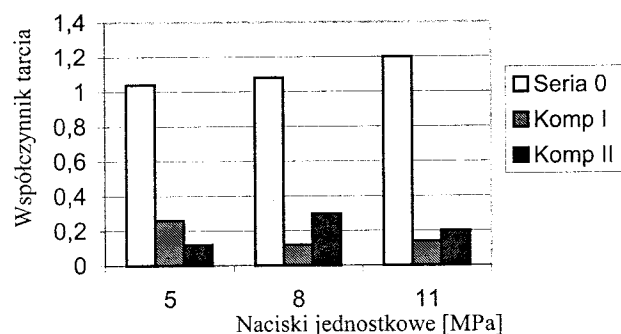
### 3. Wyniki badań i dyskusja

Wyniki porównawczych badań tarciovych wskazują na bardzo istotny wpływ pokryć kompozytowych na warunki tarcia i procesy zużycia.

Na rysunku 3 pokazano przykładowy przebieg wartości współczynników tarcia badanych materiałów, mierzonych przy naciskach jednostkowych  $p_{\max} = 8$  MPa, podczas 4-godzinnej cyklu badań. Na rysunku 4 zestawiono wartości współczynników uzyskane przy różnych obciążeniach. Na rysunkach 5-7 pokazano mikrofotografie śladów tarcia na powierzchniach badanych materiałów dla serii próbek niemodyfikowanych oraz z naniesionymi warstwami kompozytu I i II.



Rys. 3. Wpływ modyfikacji powierzchni na wartość współczynnika tarcia przy naciskach jednostkowych  $p_{\max} = 8$  MPa



Rys. 4. Wpływ nacisków jednostkowych na wielkość współczynnika tarcia

Jak wynika z przedstawionych danych, pokrycia kompozytowe pozwalają na znaczne obniżenie oporów ruchu, które dla materiałów niemodyfikowanych utrzymują się na wysokim poziomie w całym zakresie badanych obciążeń. Tak wysokie wartości współczynników tarcia ( $\mu \approx 1$ ) nie są charakterystyczne dla całego przebiegu badania. Odzwierciedlają one warunki ekstremalne podczas tarcia z cyklicznie zmiennym obciążeniem i prędkością. Wartości  $\mu$  były liczone dla maksymalnych zakresów nacisków, co jednocześnie odpowiadało zmianie kierunku ruchu, a więc prędkości względnej bliskiej  $v = 0$  m/s. W tych warunkach, pomimo zastosowania środka smarnego, następowało szczipanie pomiędzy cząstkami materiału próbki i przeciwpróbki, co powodowało znaczny wzrost oporów ruchu.

Potwierdzają to również obserwacje śladów tarcia niemodyfikowanych próbek ze stali 4H13 (rys. 5). Analiza topografii powierzchni wskazuje na adhezyjny charakter zużycia.



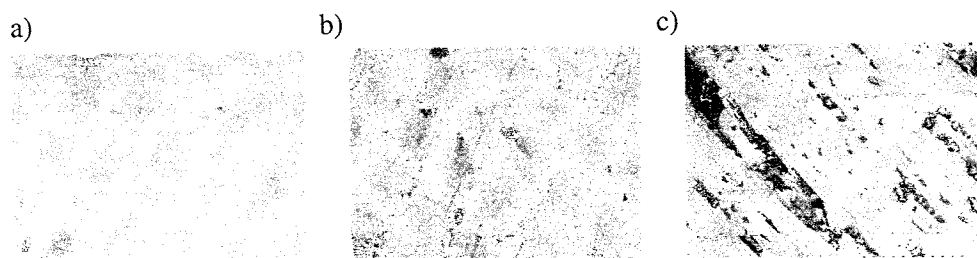
Rys. 5. Topografia powierzchni niemodyfikowanych próbek ze stali 4H13 po 4-godzinnych badaniach tarciovych (SEM, pow. 200 $\times$ ) przy naciskach jednostkowych: a)  $p_{\max} = 5$  MPa, b)  $p_{\max} = 8$  MPa, c)  $p_{\max} = 11$  MPa

Na powierzchni próbki po 4-godzinnym tarcu przy naciskach jednostkowych  $p_{\max} = 5$  MPa (rys. 5a) widoczne są silnie odkształcone obszary styku wokół bruzdy wypełnionej produktami zużycia. Brak wyraźnych mikropełnięć oraz znaczne odkształcenia połączeń adhezyjnych (wydłużenie mikroobszarów styku zgodne z kierunkiem ruchu) wskazują, że dominującym mechanizmem więzy tarciowej jest tworzenie się, a następnie ścinanie plastycznie odkształconych połączeń. Na powierzchni próbki stalowej po badaniach przy naciskach  $p_{\max} = 8$  MPa (rys. 5b) można również zaobserwować obszary po ścięciu połączeń adhezyjnych, a także mikropełnięcia na brzegu bruzdy, świadczące o lokalnym umocnieniu metalu w obszarach styku przy tarcu z większymi obciążeniami. W przypadku tarcia niemodyfikowanej stali przy maksymalnych naciskach jednostkowych  $p_{\max} = 11$  MPa

dominował zmęczeniowy charakter zużycia, co potwierdzają schodkowe odwarstwienia materiału na gładkiej powierzchni styku (rys. 5c).

Zastosowanie pokryć z kompozytów polimerowych na jednej z powierzchni trących w decydującej mierze wpłynęło na warunki tarcia. Uzyskano kilkakrotne zmniejszenie wartości współczynników tarcia dla obu badanych kompozytów. Przy czym można zaobserwować zróżnicowanie wyników w zależności od obciążeń. Przy niższych obciążeniach  $p_{\max} = 5$  MPa lepsze rezultaty uzyskano dla kompozytu II z napelniaczem w postaci węgla amorficznego, natomiast przy naciskach jednostkowych  $p_{\max} = 8$  MPa i  $p_{\max} = 11$  MPa niższe opory ruchu otrzymano dla kompozytu I zbrojonego włóknami węglowymi.

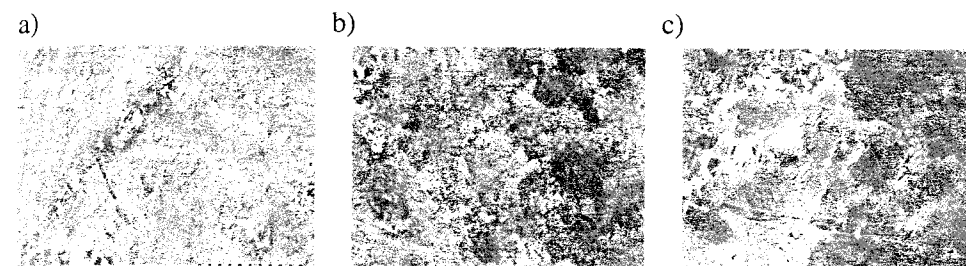
Analiza topografii powierzchni po tarcu wskazuje, że pokrycia wpłynęły na zmianę warunków tarcia i mechanizmów zużycia. Na rysunku 6 pokazano powierzchnie tarcz ze stali 4H14 po 4-godzinym cyklu badań tarciovych z pierścieniami z naniesionymi warstwami ochronnymi. Przy obciążeniu  $p_{\max} = 5$  MPa nie zaobserwowano śladów zużycia na powierzchni przeciwpółki (rys. 6a), przy obciążeniu  $p_{\max} = 8$  MPa na powierzchni tarczy widoczne są pojedyncze ślady zużycia ściernego (rys. 6b), natomiast po tarcu przy naciskach  $p_{\max} = 11$  MPa można zobaczyć cząstki produktów zużycia wciśnięte w materiał tarczy. Brak jest wyrw i nalepień, charakterystycznych dla zużycia adhezyjnego.



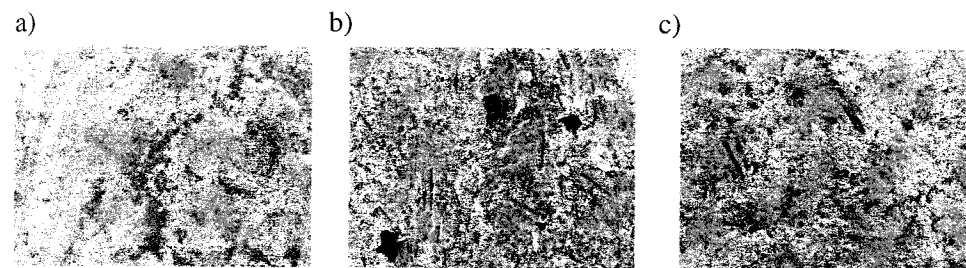
Rys. 6. Topografia powierzchni tarcz ze stali 4H13 po 4-godzinnych badaniach tarciovych z pierścieniami z warstwą kompozytu I (SEM, pow. 200x) przy naciskach jednostkowych: a)  $p_{\max} = 5$  MPa, b)  $p_{\max} = 8$  MPa, c)  $p_{\max} = 11$  MPa

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono mikrofotografie powierzchni pierścieni odpowiednio z warstwami kompozytu I i II po badaniach tarciovych. Na powierzchni materiałów widoczne są nierówności oraz ślady po cząstkach brojenia węglowego. Obecność tych nierówności prawdopodobnie sprzyjała utrzymaniu smaru pomiędzy współpracującymi powierzchniami, co korzystnie wpłynęło na obniżenie oporów ruchu. Oba badane materiały kompozytowe charakteryzowały się dobrą przy-

czepnością do stali. Nie zaobserwowano odwarstwienia ani przzerwania warstwy pokrycia.



Rys. 7. Topografia powierzchni kompozytu I po 4-godzinnych badaniach tarciovych (SEM, pow. 200x) przy naciskach jednostkowych: a)  $p_{\max} = 5$  MPa, b)  $p_{\max} = 8$  MPa, c)  $p_{\max} = 11$  MPa



Rys. 8. Topografia powierzchni kompozytu II po 4-godzinnych badaniach tarciovych (SEM, pow. 200x) przy naciskach jednostkowych: a)  $p_{\max} = 5$  MPa, b)  $p_{\max} = 8$  MPa, c)  $p_{\max} = 11$  MPa

Obserwacje mikroskopowe przy użyciu większych powiększeń pozwalają ocenić mechanizm zużycia materiału kompozytowego (rys. 9). Po cyklu badań tarciovych przy obciążeniu  $p_{\max} = 8$  MPa można zaobserwować dekohezję włókien węglowych i osnowy, powstałą na skutek naprężeń przy ruchu obrotowo-rewersyjnym próbki (rys. 9b), natomiast na rys. 9c na powierzchni pierścienia widoczne są poprzeczne pęknięcia materiału osnowy, powstałe podczas tarcia przy wysokich naciskach jednostkowych ( $p_{\max} = 11$  MPa).



Rys. 9. Topografia powierzchni kompozytu I po 4-godzinnych badaniach tarciovych (SEM, pow. 600x) przy naciskach jednostkowych: a)  $p_{\max} = 5$  MPa, b)  $p_{\max} = 8$  MPa, c)  $p_{\max} = 11$  MPa

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzono porównawcze badania nad właściwościami tarciovymi stali 4H13 niemodyfikowanej oraz pokrytymi warstwą kompozytu na bazie polimeru z wypełniaczami węglowymi podczas tarcia przy zmiennych prędkościach i obciążeniach. Uzyskane wyniki wskazują na celowość stosowania takiego rozwiązania. Inne warunki kontaktu współpracujących powierzchni oraz smarowania, związane ze strukturą i właściwościami kompozytów, powodują zmianę mechanizmu tarcia. W rezultacie pozwala to na znaczne obniżenie oporów ruchu oraz zużycia w porównaniu z materiałem niemodyfikowanym.

#### Literatura

1. Blanco C., Bermejo J., Marsh H., Menendez R.: *Chemical and physical properties of carbon as related to brake performance*. Wear, 213, 1/2 (1997), 1-12.
2. Grądzka-Dahlke M.: *The effect of nanocrystalline diamond layers on the tribological properties of an implant Co-Cr-Mo alloy*. Journal of Wide Bandgap Materials, 10 (2002), 43-52.
3. Grądzka-Dahlke M.: *The modification of tribological properties of an implant alloys by thin wear-resistant coatings*. Acta Mechanica Slovaca, 2 (2002), 239-244.
4. Hutton T., McEnaney B., Crelling J.: *Structural studies of wear debris from carbon-carbon composite aircraft brakes*. Carbon 37 (1999), 907-916.

5. Myalski J.: *Wpływ dodatku węgla szklonego na charakterystyki tribologiczne materiałów kompozytowych z osnową metaliczną*. Kompozyty, 3, 8 (2003), 317-321.
6. Pawelec Z., Dasiewicz J.: *Analiza przydatności proszków metali i stopów jako wypełniaczy ślizgowych kompozytów polimerowych*. Tribologia, 5(2003), 179-190.
7. Semenovich H.M., et. al.: *Influence of carbon fibre on formation kinetics of crosslinked copolymer from bisphenol A dicyanate and epoxy oligomer*. Reactive and Functional Polimers, 40.3 (1999), 281-288.
8. Szeptycka B., Skrzyniowski A.: *Badania tribologiczne hybrydowych warstw kompozytowych Ni-SiC-fluoropolimer*. Kompozyty, 3, 8 (2003), 325-331.

#### THE ESTIMATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF COMPOSITES WITH CARBON FILLERS

**Abstract:** The composites have been used for many years for wear protection. The paper presents results of the tribological researches of polymer based composites with carbon fillers. It was found that composite coatings allow to decrease friction value and wear of investigated materials.

**Key words:** composites, carbon filler, tribology

Autor składa podziękowania dr G.I. Dubkovej z Instytutu Chemii Nieorganicznej Białoruskiej Akademii Nauk w Mińsku (Białoruś) za udostępnienie materiałów kompozytowych do badań.

Praca wykonana w ramach badań własnych Nr W/WM/4/02.

Krzysztof Jaworek, Cezary Nietupski

## IDENTYFIKACJA MODELU DYNAMIKI RUCHU BIOOBIEKTÓW

**Streszczenie:** Z danych o bioobiektach, otrzymanych w wyniku pomiarów nie udaje się bezpośrednio uzyskać zbyt wielu informacji, zwłaszcza o sprawności, czy patologii ich aparatu ruchu. W artykule przedstawiono dwie metody identyfikacji: metodę funkcji regresji i metodę aproksymacji stochastycznej, przykładowe wartości liczbowe uzyskane za ich pomocą oraz sposób i cel zastosowania metody płaszczyzny Gaussa dla uzyskanych wcześniej współczynników identyfikacji.

**Słowa kluczowe:** identyfikacja, bioobiekt, metoda funkcji regresji, metoda aproksymacji stochastycznej, płaszczyzna Gaussa

### 1. Wstęp

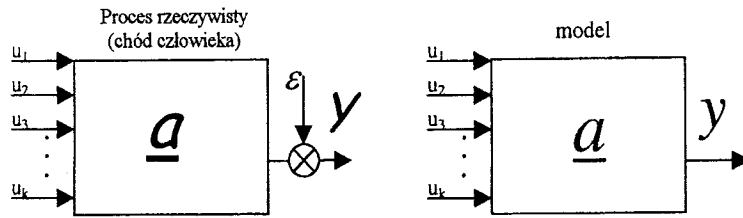
W wyniku pomiarów bioobiektów uzyskuje się, tzw. „surowe dane” biomechaniczne. W celu dalszej obróbki matematycznej należy je poddać filtracji. Dopiero przefiltrowane sygnały biomechaniczne nadają się do identyfikacji. W niniejszej pracy metody filtracji nie będą omawiane, gdyż nie jest to bezpośrednio związane z tematyką artykułu.

Przefiltrowane przebiegi czasowe też jednak nie są dobrym materiałem wejściowym do bezpośredniego orzekania o normie i patologii układu ruchowego bioobiektów. Użycie ich wymaga specjalistycznej wiedzy naukowców, którzy, oprócz danych pomiarowych, stosują także dodatkowe metody rozpoznawcze. Bez zastosowania adekwatnych do tych przebiegów modeli matematycznych, „nie medyk” nie potrafi wiele powiedzieć o stanie aparatu ruchu pacjenta lub sportowca.

Pierwszy sformalizowany model matematyczny został opisany przez C. F. Gaussa w XIX wieku. Zaproponował on metodę najmniejszej sumy kwadratów. Od tego czasu powstało kilka innych metod opierających się na tej metodzie identyfikacji. Wśród nich dwie nadają się do identyfikacji lokomocji kończynowej bioobiektów, ze względu na niewielką ilość danych *a priori* oraz możliwość interpolacji silnie nieliniowych przebiegów, uzyskiwanych z pomiarów biomechanicz-



nych. Istota poszukiwania modelu matematycznego jest przedstawiona na rysunku 1 [3].



Rys. 1. Identyfikacja modelu rzeczywistego procesu

Dla uzyskanych z pomiarów wartości sygnałów wejściowych  $u_1, u_2, \dots, u_k$  i wyjściowych  $y_n$ , w warunkach działających zakłóceń  $\varepsilon$  (traktowanych tu jako zakłócenie zastępcze działające na proces rzeczywisty jak i układ pomiarowy), określa się model obiektu  $\underline{a}$ . Równania opisujące obiekt (w przypadku obiektu dynamicznego) można przedstawić dla  $n$ -tej chwili czasowej w postaci równań różnicowych [3]:

$$\begin{aligned}
 Y_n &= a_1 Y_{n-1} + a_2 Y_{n-2} + \dots + a_K Y_{n-K} + \dots \\
 &\quad \dots + a_l u_{1n+1} + a_{l+1} u_{1n} + \dots \\
 &\quad \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\
 &\quad \dots a_{k-1} u_{kn-1} + a_k u_{kn} + \varepsilon_n,
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\underline{u} = [y_{n-1} \ y_{n-2} \ \dots \ y_{n-K} \ u_{1n-1} \ u_{1n} \ \dots \ u_{kn-1} \ u_{kn}], \tag{2}$$

$$\underline{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_l \ a_{l+1} \ \dots \ a_{k-1} \ a_k]^T. \tag{3}$$

## 2. Metoda funkcji regresji

Metoda funkcji regresji jest metodą „off-line”, co teoretycznie wyklucza ją z użycia w czasie rzeczywistym. Jednak w biocybernetyce nie ma potrzeby obliczeń w czasie rzeczywistym. Wystarczy tylko, że obliczenia zostaną zakończone w sensownym czasie. Równania można przedstawić dla  $n$ -tego pomiaru ( $n$ -tej chwili czasowej) zależnością [1]:

$$y_n = \underline{u}_n \underline{a}, \quad n = 1, 2, \dots, N_p, \tag{4}$$

gdzie:

- $y_n$  – wartość wielkości wyjściowej (moce chwilowe w rozwijane przez zespoły mięśniowe kończyn dolnych człowieka w  $n$ -tej chwili czasowej),
- $\underline{a}$  – macierz kolumnowa poszukiwanych współczynników równań,
- $\underline{u}_n$  – macierz wierszowa wielkości wejściowych (moce chwilowe w rozwijane przez zespoły mięśniowe kończyn dolnych człowieka w  $n$  – poprzednich chwilach czasowych),
- $N_p$  – liczba pomiarów.

Równanie (4) jest w piśmiennictwie fachowym nazywane funkcją regresji, a macierz  $\underline{a}$  – macierzą współczynników funkcji regresji;  $y_n$  jest wielkością mierzoną bezpośrednio podczas badań eksperymentalnych lub też obliczaną ze znanych związków z wykorzystaniem wyników wymienionych badań (moce chwilowe rozwijane przez zespoły mięśniowe kończyn dolnych człowieka). Wyrazy macierzy  $\underline{u}_n$  w przypadku ogólnym są określane analogicznie jak  $y_n$ . W związku z tym otrzymuje się wyniki pomiarów zarejestrowane w warunkach zakłóceń działających zarówno na układ pomiarowy, jak i na obiekt. Dla rzeczywistego obiektu przyjmuje się równanie w postaci:

$$Y_n = \underline{u}_n \underline{a} + \varepsilon_n, \quad n = 1, 2, \dots, N_p, \tag{5}$$

gdzie:

$\varepsilon_n$  jest zakłóceniem  $n$ -tego pomiaru.

Celem wyznaczenia współczynników  $\underline{a}$  metodą regresji [1] (metodą najmniejszej sumy kwadratów błędów) tworzy się funkcjonał:

$$S_{N_p} = \sum_{n=1}^{N_p} e_n^2, \tag{6}$$

gdzie:

$e_n$  – błąd estymowany modelem,

$$e_n = Y_n - y_n. \tag{7}$$

W wyniku minimalizacji funkcjonału  $S_{N_p}$  względem wyrazów  $\underline{a}$ , otrzymuje się równanie algebraiczne umożliwiające wyznaczenie macierzy  $\underline{a}$ :

$$\underline{\underline{A}}^* \underline{\underline{a}} = \underline{\underline{a}}^*, \quad (8)$$

gdzie oznaczono:

$$\underline{\underline{A}}^* = \sum_{n=1}^{N_P} \underline{\underline{u}}_n^T \underline{\underline{u}}_n, \quad (9)$$

$$\underline{\underline{a}}^* = \sum_{n=1}^{N_P} Y_n \underline{\underline{u}}_n^T, \quad (10)$$

przedstawiając równania modelu i obiektu dla  $N_P$  pomiarów w postaci

$$\underline{\underline{y}} = \underline{\underline{U}} \underline{\underline{a}}, \quad (11)$$

gdzie:

$$\underline{\underline{y}} = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_{N_P}]^T, \quad (12)$$

$$\underline{\underline{U}} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1k} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{N_P 1} & u_{N_P 2} & \dots & u_{N_P k} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Macierze zależności (12) określa się wzorami:

$$\underline{\underline{A}}^* = \underline{\underline{U}}^T \underline{\underline{U}}, \quad (14)$$

$$\underline{\underline{a}}^* = \underline{\underline{U}}^T \underline{\underline{Y}}. \quad (15)$$

### 3. Metoda aproksymacji stochastycznej

Metoda aproksymacji stochastycznej jest metodą typu „on-line”, co oznacza, że może być użyta do obliczeń w czasie rzeczywistym. Ogólny czas obliczeń jest porównywalny z metodą funkcji regresji dla niezbyt długo trwających przebiegów, lecz dla tej metody obliczenia można rozłożyć w czasie, dzieląc na znacznie mniejsze kroki, i umożliwiając jednocześnie uzyskanie wyników już po kilku pierwszych iteracjach. Metoda aproksymacji stochastycznej umożliwia obliczenia współczynników poszukiwanego modelu w trakcie eksperymentu.

Dla procesu dynamicznego (co odpowiada rozpatrywanemu w artykule procesowi) w ogólnym przypadku przyjmuje się, że rzeczywisty obiekt opisany jest równaniem

$$y_n = a_1 y_{n-1} + a_2 y_{n-2} + \dots + a_K y_{n-K} + \varepsilon_n, \quad n = k+1, \dots, N_P \quad (16)$$

gdzie:

$y_i$  – wartości wyjść obiektu uzyskane z pomiarów,

$a_i$  – nieznanne współczynniki rzeczywistego obiektu,

$\varepsilon_n$  – zakłócenia obiektu i pomiaru charakteryzujące się zerową wartością średnią i liczbą skorelowania nie większą od  $K$ ,

$K$  – stopień skorelowania,

$y_i$  – wartości mocy rozwijane przez główne zespoły mięśniowe obsługujące trzy stawy kończyny dolnej człowieka

$$y_n = \underline{\underline{U}}_n \underline{\underline{a}}, \quad (17)$$

gdzie wektor danych uzyskanych z eksperymentu  $\underline{\underline{U}}_n$  odpowiadający  $n$ -tej chwili czasowej oraz wektor poszukiwanych współczynników modelu  $\underline{\underline{a}}$  są równe:

$$\underline{\underline{U}}_n = [y_{n-1} \quad y_{n-2} \quad \dots \quad y_{n-K}], \quad (18)$$

$$\underline{\underline{a}} = [a_1 \quad \dots \quad a_K]^T. \quad (19)$$

Identyfikacja modelu (17) metodą aproksymacji stochastycznej polega na iteracyjnym wyznaczaniu wektora poszukiwanych współczynników  $\underline{\underline{a}}$  (19) na podstawie wyników pomiarów wykonanych na rzeczywistym obiekcie. Algorytm metody aproksymacji stochastycznej, określający wartości wyrazów wektora  $\underline{\underline{a}}_i$  w  $i$ -tym kroku iteracji, w zależności od wartości wyrazów wektora z  $i-1$  kroku oraz odpowiadających aktualnych danych eksperymentalnych charakteryzowanych wektorem  $\underline{\underline{U}}_i$  (13) jest następujący [3]:

$$\underline{\underline{a}}_i = \underline{\underline{a}}_{i-1} + \underline{\underline{P}}_i \underline{\underline{U}}_i^T (y_i - \underline{\underline{U}}_i \underline{\underline{a}}_{i-1}), \quad (20)$$

$$\underline{\underline{P}}_i = \underline{\underline{P}}_{i-1} - \frac{\underline{\underline{P}}_{i-1} \underline{\underline{U}}_i^T \underline{\underline{U}}_i \underline{\underline{P}}_{i-1}}{(1 + \underline{\underline{U}}_i \underline{\underline{P}}_{i-1} \underline{\underline{U}}_i^T)}. \quad (21)$$

Jak wynika z postaci zależności (21), inicjacja obliczeń wymaga przyjęcia wartości początkowych wektora  $\underline{a}_0$  i macierzy  $P$ . W przypadku braku informacji *a priori* o wartościach parametrów modelu, przyjmuje się:

$$\underline{a}_0 = [0 \ 0 \ \dots \ 0]^T, \quad (22)$$

$$\underline{P}_0 = r \Lambda, \quad (r \approx 10^2 \div 10^3). \quad (23)$$

Klasyfikacją klasycznego algorytmu (20) i (21) jest algorytm rekurencyjny w postaci:

$$\underline{a}_i = \underline{a}_{i-1} + \underline{P}_i \underline{U}_i^T (y_i - \underline{U}_i \underline{a}_{i-1}), \quad (24)$$

$$\underline{P}_i = \left( \underline{P}_{i-1} - \frac{\underline{P}_{i-1} \underline{U}_i \underline{P}_{i-1}}{(1 + \underline{U}_i \underline{P}_{i-1} \underline{U}_i^T)} \right) / \lambda. \quad (25)$$

Z piśmiennictwa [1]  $\lambda$  ( $<1$ ) jest nazywana współczynnikiem zapominania. Powoduje on zmniejszenie dwu poprzednich wartości wyrazów wektora  $\alpha$  na wartość bieżącą (zapominanie). W celu zmniejszenia wpływu początkowych (nie-dokładnych) wartości wyrazów wektora  $\alpha$  na ostateczne wyniki, w praktyce stosuje się współczynnik  $\lambda$  o zmiennej w trakcie procesu obliczania wartości. W opracowanych przez autorów programach komputerowych przyjęto następującą zależność na obliczanie  $\lambda$ :

$$\lambda_i = 0,99\lambda_{i-1} + 0,01. \quad (26)$$

#### 4. Zastosowanie metody płaszczyzny Gaussa w badaniach nad lokomocją dwunożną człowieka

W wyniku identyfikacji modelu mocy chwilowych, rozwijanych przez zespoły mięśniowe nóg człowieka (zarówno w normie, jak i patologii), uzyskano równanie różnicowe III rzędu o postaci:

$$y(a) = a_1 y(n-1) + a_2 y(n-2) + a_3 y(n-3), \quad (27)$$

gdzie:  $a_1, a_2, a_3$  – współczynniki identyfikacji.

Zauważono, że wartości współczynników równania są różne dla metody funkcji regresji i metody aproksymacji stochastycznej.

Równanie (27) można poddać przekształceniu  $Z$ , a wtedy otrzymuje się równanie:

$$Y(z) = a_1 z^{-1} Y(z) + a_2 z^{-2} Y(z) + a_3 z^{-3} Y(z), \quad (28)$$

gdzie:  $Y(z)$  – jest to transformata  $Z$  sygnału  $y(n)$ .

Równanie (28) można przekształcić do kolejnej postaci:

$$Y(z) \cdot [z^3 - a_1 z^2 - a_2 z - a_3] = 0. \quad (29)$$

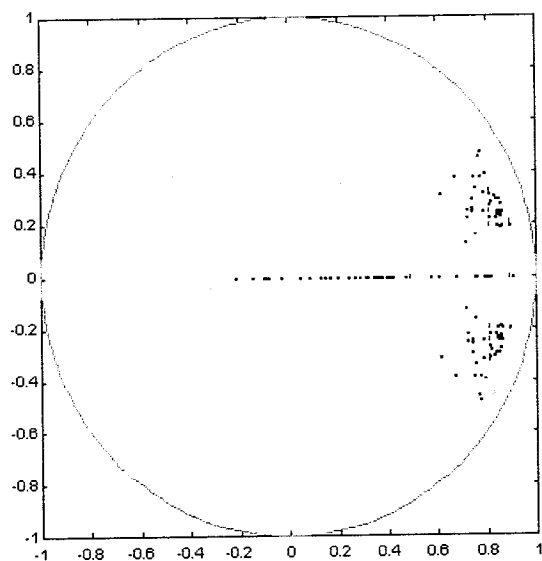
Dla  $Y(z) \neq 0$  otrzymuje się równanie:

$$z^3 - a_1 z^2 - a_2 z - a_3 = 0. \quad (30)$$

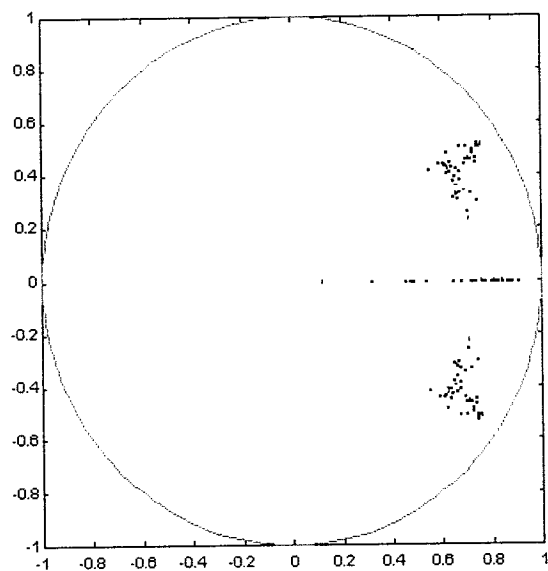
Dla znanych wartości współczynników identyfikacji  $a_1, a_2$  i  $a_3$  rozwiązuje się równanie (30), a pierwiastki tego równania wprowadza się na płaszczyznę Gaussa.

#### 4.1a Norma – MFR (przykład)

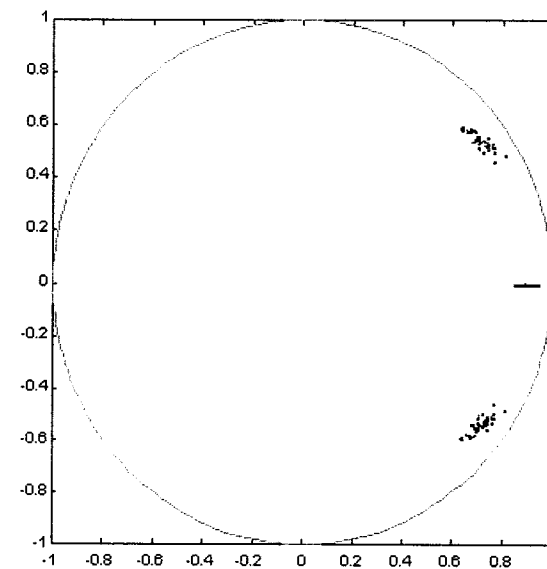
Dla metody funkcji regresji typowe położenia trzech pierwiastków równania (30) (dwa są wspólnie sprzężone, a jeden jest rzeczywisty) na płaszczyźnie Gaussa, dla zidentyfikowanych przebiegów mocy chwilowych rozwijanych w normie przez główne zespoły mięśniowe człowieka pokazano na rysunkach: 2a, 2b, 2c,



Rys. 2a. Staw biodrowy



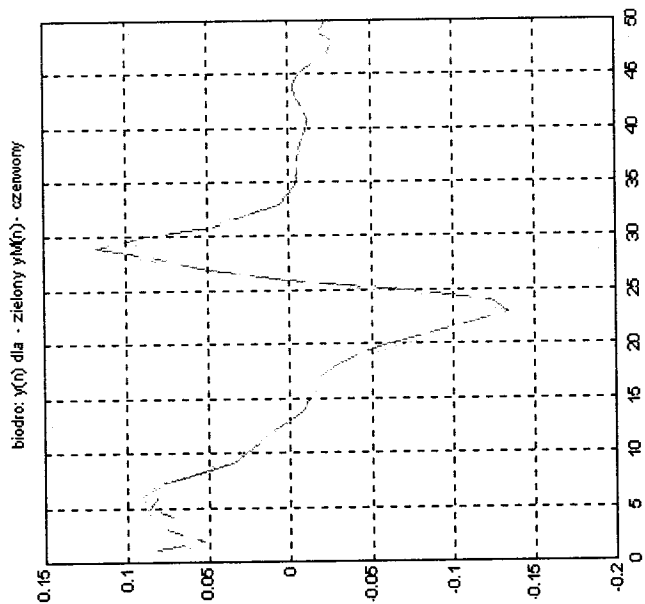
Rys. 2b. Staw kolanowy



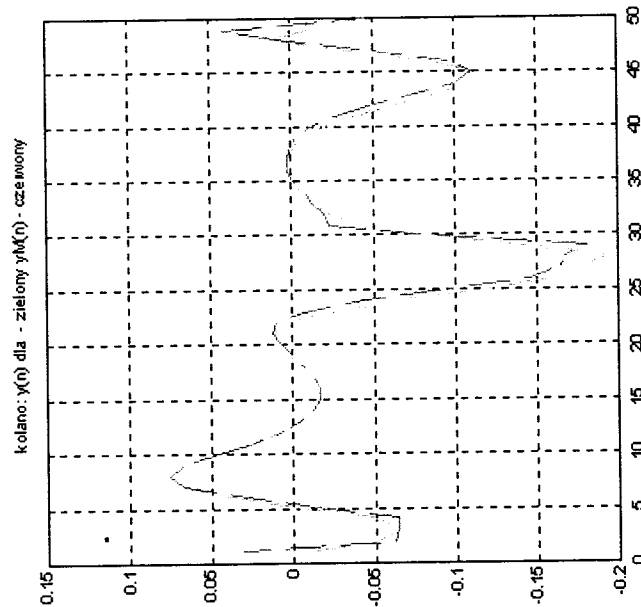
Rys. 2c. Staw skokowo-goleniowy

Rys. 2. Położenie pierwiastków równania (30) po identyfikacji trzech współczynników metodą funkcji regresji, dla wszystkich dostępnych przebiegów (w normie)

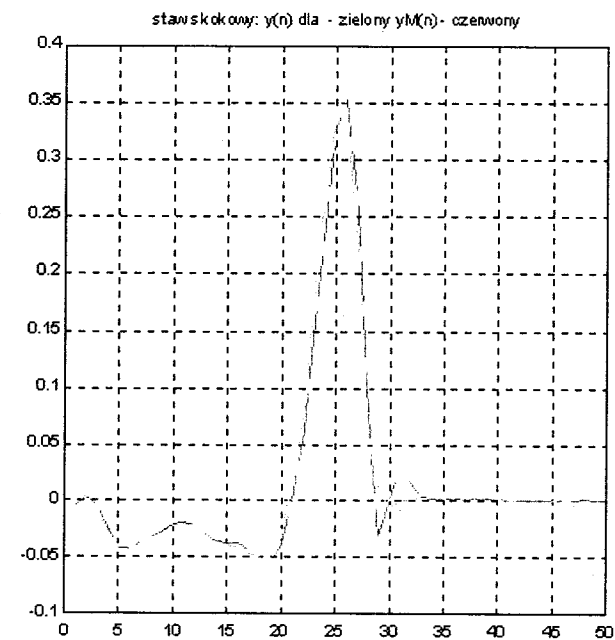
Przykładowe przebiegi mocy chwilowych (znormalizowanych do ciężaru osoby badanej) rozwijanych przez główne zespoły mięśniowe człowieka pokazano na rysunkach: 3a, 3b, 3c.



Rys. 3b. Staw kolanowy



Rys. 3a. Staw biodrowy



Rys. 3c. Staw skokowo-goleniowy

Rys. 3. Typowe przebiegi mocy chwilowych w normie dla trzech głównych stawów nogi człowieka

W tabeli 1 pokazano wartości współczynników identyfikacji uzyskane dla normalnego chodu człowieka metodą funkcji regresji.

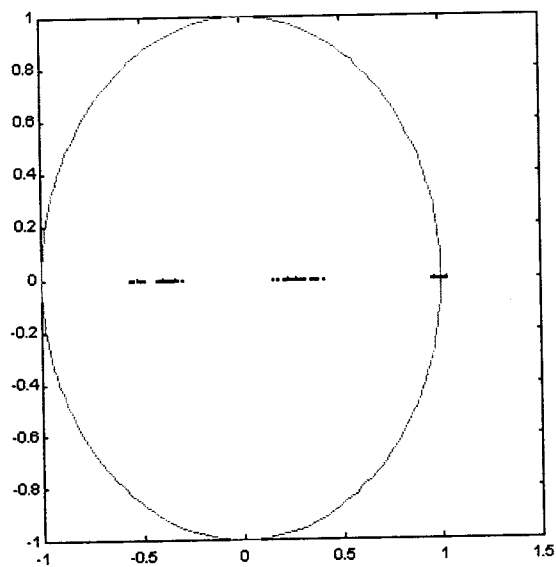
Tabela 1.  
Wartości współczynników identyfikacji  
uzyskane metodą regresji dla normalnego chodu człowieka

Staw	Obiekt(plik)
Biodrowy	$a_1 = 2.002649$
	$a_2 = -1.371324$
	$a_3 = 0.286331$
Kolanowy	$a_1 = 1.863079$
	$a_2 = -1.257289$
	$a_3 = 0.293362$
Skokowy	$a_1 = 2.356436$
	$a_2 = -2.130208$
	$a_3 = 0.734120$

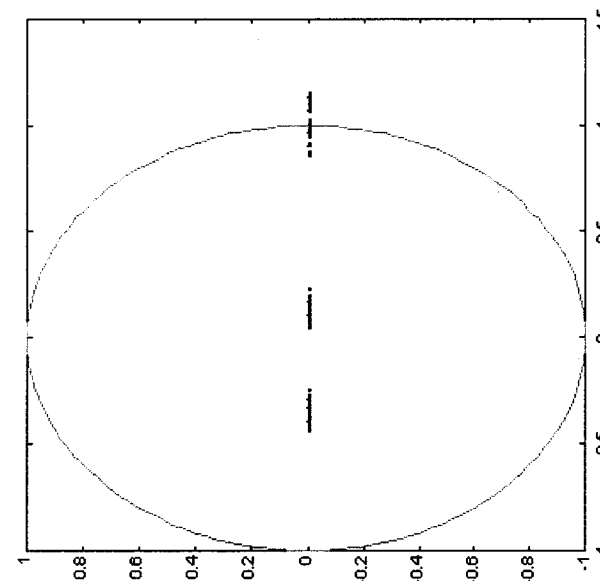
#### 4.1b Norma – MAS (przykład)

Dla metody aproksymacji stochastycznej typowe położenia trzech pierwiastków równania (30) (w większości przypadków wszystkie pierwiastki równania (30) są rzeczywiste) na płaszczyźnie Gaussa, dla zidentyfikowanych przebiegów mocy chwilowych rozwijanych w normie przez główne zespoły mięśniowe człowieka, pokazano na rysunkach: 4a, 4b, 4c.

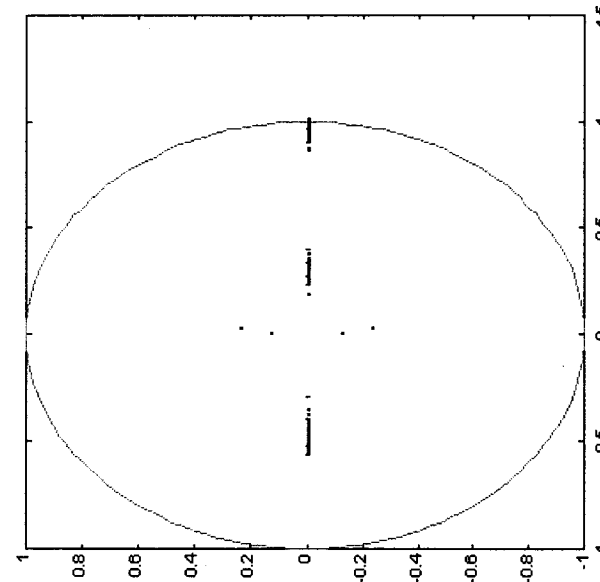
Przykładowe przebiegi mocy chwilowych (znormalizowanych do ciężaru osoby badanej) rozwijanych przez główne zespoły mięśniowe człowieka pokazano na rysunkach: 5a, 5b, 5c.



Rys. 4a. Staw biodrowy

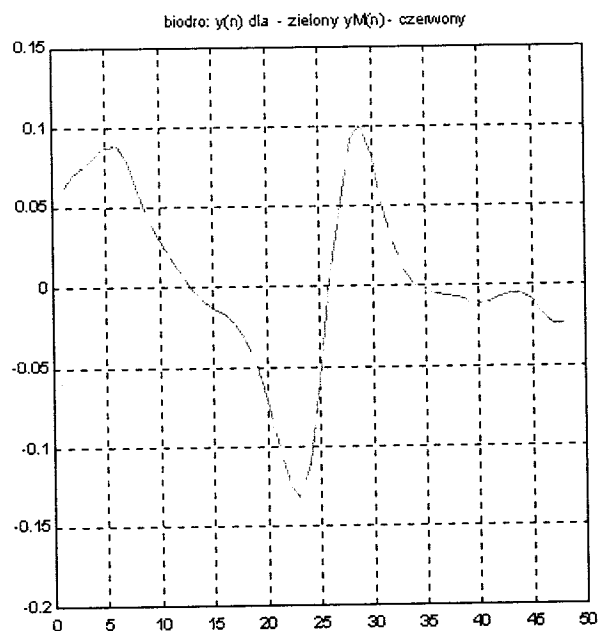


Rys. 4c. Staw skokowo-goleniowy

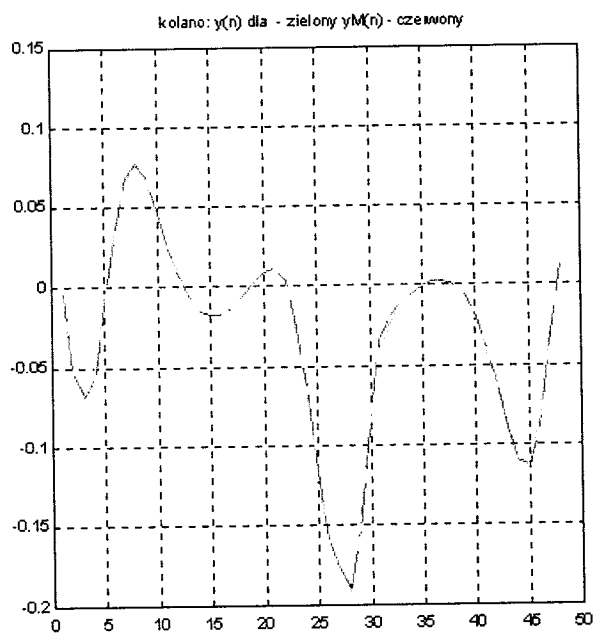


Rys. 4b. Staw kolanowy

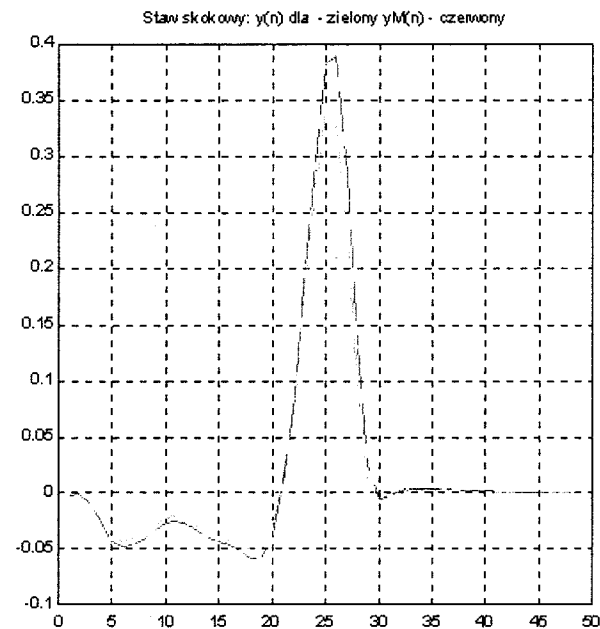
Rys. 4. Położenie pierwiastków równania (30) po identyfikacji trzech współczynników metodą aproksymacji stochastycznej dla wszystkich dostępnych przebiegów (w normie)



Rys. 5a. Staw biodrowy



Rys. 5b. Staw kolanowy



Rys. 5c. Staw skokowo-goleniowy

Rys. 5. Typowe przebiegi mocy chwilowych w normie dla trzech głównych stawów nogi człowieka

W tabeli 2 pokazano wartości współczynników identyfikacji uzyskane dla normalnego chodu człowieka.

Tabela 2.

Wartości współczynników identyfikacji uzyskane metodą aproksymacji stochastycznej dla normalnego chodu człowieka

Staw	Obiekt(plik)
Biodrowy	$a_1 = 0.874600$
	$a_2 = 0.220356$
	$a_3 = -0.113803$
Kolanowy	$a_1 = 0.786127$
	$a_2 = 0.385556$
	$a_3 = -0.192186$
Skokowy	$a_1 = 0.939206$
	$a_2 = 0.247737$
	$a_3 = -0.029094$

## 5. Wnioski

Skorelowano opinię konsylium lekarzy z położeniem pierwiastków równania (30) na płaszczyźnie Gaussa. Zauważono, że w wyniku procesu rehabilitacji lub interwencji chirurgicznej zmienia się położenie pierwiastków równania (30) na płaszczyźnie Gaussa.

Zauważono, że właściwa diagnoza sposobu leczenia narządów ruchu pacjenta wydana przez konsylium lekarzy – pokrywa się ze zjawiskiem cofania się pierwiastków równania (30) w kierunku początku układu współrzędnych odniesienia, tj. punkt (0,0) na płaszczyźnie Gaussa.

## Literatura

- [1] **Bubnicki Z.:** *Identyfikacja obiektów sterowania*. PWN, Warszawa, 1974.
- [2] **Mańczak K.:** *Metody identyfikacji obiektów dynamicznych*. PWN, Warszawa, 1983.
- [3] **Manerowski J.:** *Identyfikacja modeli ruchu sterowanych obiektów latających*. „ASKON”, Warszawa, 1999.
- [4] **Jaworek K., Pauk J.:** *Parametric identification of lower limbs during walking of a man*. Design a Nature. Vol. 3, WIT Press, Southampton 2002, pp. 361-366.
- [5] **Pauk J., Jaworek K.:** *A method of identification human gait*. Acta of Bioengineering and Biomechanics, 2003, Vol. 5, supl., pp. 374-378.

### IDENTIFICATION DYNAMICS MOTION MODEL OF BIOOBJECTS

**Abstract:** In biomechanics of human gait analytical formulas of instantaneous power developed by main muscles of leg during walking of man are not known until today. Two methods of identification (very well known for example in aviation): regression function (MFR) and stochastic approximation (MAS) were used to find difference equations for instantaneous power developed by main muscles (for hip, knee and ankle joints) of a leg during normal walking of a man. The Z transform were used to find roots of these difference equations. Next, roots obtained from difference equations for hip, knee, and ankle joints were transformed on the plane of Gauss. Correlation between roots locus on the plane of Gauss and diagnosis of hospital doctor advisers from Bioengineering Center from Milan-Italy were found.

Adam Kotowski<sup>1</sup>

## DIAGNOZOWANIE ELEMENTÓW MASZYN W OPARCIU O PARAMETRY FUNKCJI KWADRATU WZMOCNIENIA AMPLITUDOWEGO

**Streszczenie:** W procesie oceny stanu technicznego elementów maszyn często wykorzystywana jest metoda wibroakustyczna, bo sygnały odpowiedzi akustycznej zawierają informacje o własnościach konstrukcyjnych badanego elementu. Fakt ten został wykorzystany do badań różnych elementów maszyn. W pracy proponuje się przejście od zmian przebiegów sygnałów diagnostycznych w czasie (wymuszenia i odpowiedzi) do zmian parametrów funkcji określonej jako kwadrat ich wzmocnienia amplitudowego (KWA). Przetwarzanie sygnałów na parametry diagnostyczne, które pozostają w ścisłym związku z parametrami stanu technicznego obiektu, realizowane jest przy użyciu funkcji korelacji oraz gęstości widmowej mocy.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka maszyn, metoda wibroakustyczna

## 1. Wstęp

Badania elementów maszyn prowadzone są często w warunkach stacjonarnych na diagnostycznym stanowisku metodami badań nieniszczących (metoda wibroprądkowa, ultradźwiękowa, penetracyjna). W celu rozszerzenia tych badań stosuje się metodę wibroakustyczną. Metoda ta opiera się na pomiarze drgań. Nie może być ona jednak stosowana bezpośrednio dla elementów o małej masie, wiotkich lub w przypadku braku możliwości montażu akcelerometru. Powstał zatem problem opracowania uniwersalnej metody pośredniej pomiaru drgań, opartej o pomiar i analizę sygnałów akustycznych (będących w ścisłym związku z sygnałem drgań elementu) [6]. Właściwe zadawanie znanych dodatkowych zewnętrznych wymuszeń, umożliwia pozyskanie informacji diagnostycznej zawartej w sygnałach odpowiedzi wzbudzonego w ten sposób elementu. Okazuje się, że odpowiednia ana-

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Diagnostyki, adamk@pb.bialystok.pl



liza sygnałowa pozwala transformować nawet bardzo złożone przebiegi sygnałów diagnostycznych (wejścia i wyjścia) na inne, dające się opisać za pomocą prostych funkcji analitycznych, które stają się podstawą do dalszych analiz i postawienia diagnozy.

Pomiar sygnału akustycznego jest trudny ze względu na istniejące zakłócenia. Stąd badania diagnostyczne powinny być przeprowadzane w warunkach zapewniających odizolowanie środowiska pomiaru od zewnętrznych pól akustycznych. Problem zakłóceń może być także rozwiązany przez zastosowanie w procesie wnioskowania diagnostycznego analitycznych funkcji korelacji, gęstości widmowej mocy i kwadratu wzmocnienia amplitudowego.

## 2. Informacyjne własności sygnału wibroakustycznego

W diagnostyce technicznej maszyn ważną rolę nośnika informacji o stanie technicznym zajmuje sygnał wibroakustyczny (WA). Sygnał ten uważa się za źródło informacji diagnostycznej ponieważ [9]:

- zjawiska WA są odzwierciedleniem najistotniejszych własności i procesów zachodzących w urządzeniu,
- sygnał WA jako nośnik informacji wyróżnia się dużą pojemnością i szybkością przekazywania. Ilość informacji przekazanych przez sygnał w jednostce czasu:

$$C = T \cdot \Delta f \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{N_s}{N_n} \right) \quad [\text{bit/s}] \quad (1)$$

gdzie:

- $T$  – czas pobrania sygnału,
- $\Delta f$  – pasmo częstotliwości sygnału,
- $N_s$  – moc sygnału użytecznego,
- $N_n$  – moc szumów zakłócających.

Wzór (1) wskazuje na istotną zależność ilości przekazywanych informacji od „okresowości” sygnału. Pod tym względem procesy (sygnały) WA znacznie przewyższają inne procesy zachodzące w urządzeniach mechanicznych.

Wielkości mierzalne charakteryzujące sygnały WA, to np. poziom ciśnienia akustycznego, przemieszczenie, prędkość, przyspieszenie ruchów drgających, odkształcenia wywołane ruchami drgającymi. Wskazanie określonych wielkości jest podstawą do wydzielenia składowej użytecznej sygnału oraz określenia estymat jej charakterystyk w dziedzinie czasu lub częstotliwości, którymi mogą także być

parametry funkcji korelacji i gęstości widmowej mocy. Operacji tych dokonuje się przy wykorzystaniu wyspecjalizowanych narzędzi i metod analizy sygnałów.

## 3. Opis zarejestrowanego sygnału diagnostycznego funkcją korelacji

Każdy zarejestrowany sygnał posiada skończony czas trwania –  $T$  i określony krok pozyskania sygnału (próbki) –  $\Delta t$ . Są to bardzo istotne parametry pomiaru. Eksperymentalnie sprawdzono, że wpływają one w znaczący sposób na postać wyznaczonego numerycznie przebiegu funkcji korelacji [15]. Na rysunku 1 przedstawiono przebiegi funkcji korelacji impulsowo zadanego sygnału wymuszenia młotkiem udarowym firmy ENDEVCO i rejestracji tego sygnału przy użyciu systemu PULSE firmy Brüel & Kjær przy różnych parametrach rejestracji sygnału.

Wiadomo, że postać numeryczną funkcji korelacji własnej określa zależność wyrażona wzorem (2) [14]:

$$R_{vv}(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^{i=N} v(i) v(i+m) \quad (2)$$

Zatem różnice w zarejestrowanym sygnale czasowym, w różnych nastawach rejestratora, przekładają się na różnice w przebiegach funkcji korelacji. Wyznaczone funkcje korelacji można opisać prostymi wzorami analitycznymi zawierającymi człony wykładnicze, okresowe, okresowe wykładniczo malejące, które są jednak inne dla różnych parametrów rejestracji nawet tego samego sygnału. Przykładowo: funkcja korelacji własnej może być dobrze odwzorowana zależnościami w postaci (dla  $\tau \geq 0$ ):

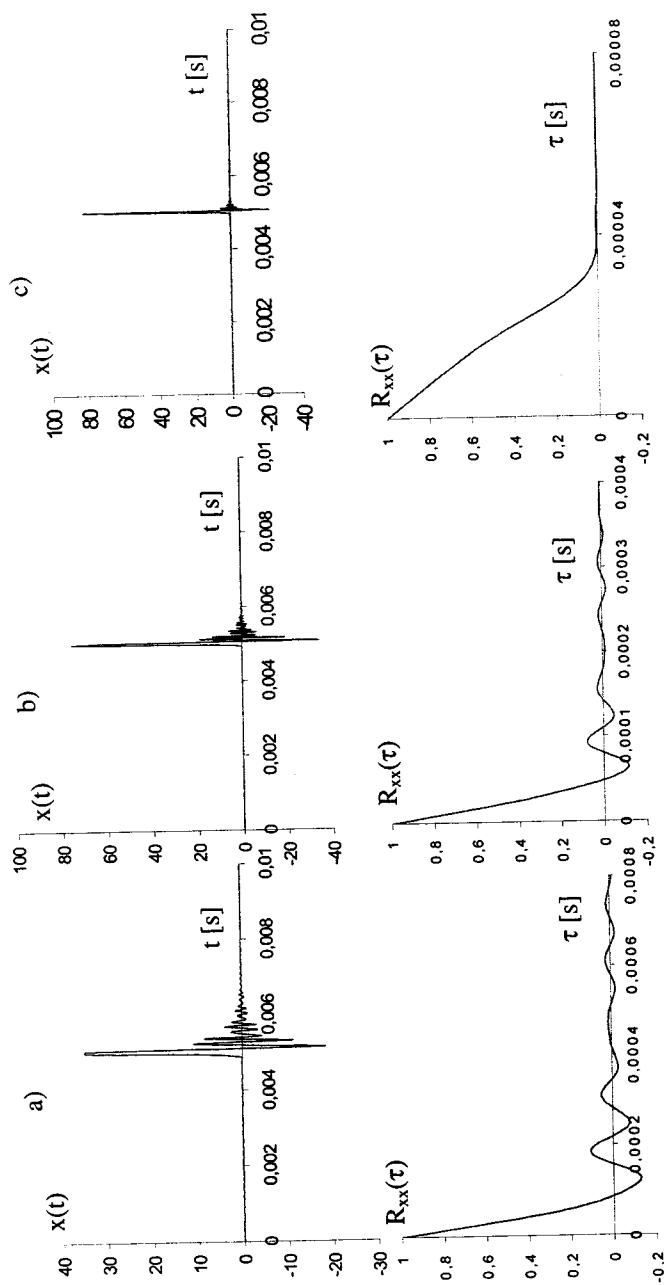
$$R_{vv}(\tau) = a e^{-b\tau} \quad (3)$$

$$R_{vv}(\tau) = a e^{-b\tau} \cos(\omega_o \tau) \quad (4)$$

$$R_{vv}(\tau) = a e^{-b\tau} (a_o \cos(\omega_o \tau) + b_o \sin(\omega_o \tau)) \quad (5)$$

gdzie:

- $a$  – współczynnik tłumienia,
- $b, c$  – amplitudy funkcji okresowych,
- $\omega_o$  – częstość podstawowa zmian funkcji korelacji,
- $\tau$  – argument funkcji korelacji.



Rys. 1. Przebiegi czasowe i odpowiadające im funkcje korelacji własnej wyznaczone numerycznie dla różnych parametrów rejestracji: a) przebieg czasowy; b)  $T = 125$  ms,  $\Delta t = 61,0$   $\mu$ s; c)  $T = 62,5$  ms,  $\Delta t = 30,5$   $\mu$ s; d)  $T = 31,2$  ms,  $\Delta t = 15,2$   $\mu$ s;  $T$  – okres obserwacji sygnału,  $\Delta t$  – krok próbkowania

Mając sprecyzowaną postać analityczną i wykorzystując odpowiednie oprogramowanie posiadające narzędzia do dopasowywania krzywych, można znaleźć parametry, dla których dopasowanie funkcji analitycznej do numerycznie otrzymanego przebiegu funkcji korelacji jest najlepsze. Takie podejście pozwala na ilościowy opis sygnałów diagnostycznych (ich funkcji korelacji) i przeniesienie tej wiedzy do dalszych analiz z wykorzystaniem na przykład funkcji gęstości widmowej mocy.

#### 4. Diagnostowanie z wykorzystaniem funkcji kwadratu wzmocnienia amplitudowego

Funkcja korelacji i gęstości widmowej mocy są ze sobą ściśle powiązane przekształceniem Fouriera. Istnieje zatem możliwość powiązania parametrów funkcji korelacji z parametrami funkcji gęstości widmowej mocy. Odpowiednio realizowane przekształcenia, których celem jest otrzymanie wyrażeń wynikających ze stosunków funkcji gęstości widmowej mocy własnej lub wzajemnej, pomiędzy dwoma sygnałami diagnostycznymi, pozwalają obserwować zmiany parametrów wyrażonych liczbowo, a ściśle powiązanych ze stanem technicznym diagnozowanego elementu maszyny.

##### 4.1. Model diagnostyczny

Model diagnostyczny wskazuje na powiązanie sygnałów o różnych postaciach ze zmianą stanu technicznego. Ta relacja przyczynowo-skutkowa pomiędzy cechami stanu obiektu (uszkodzenia), a parametrami diagnostycznymi zorientowanymi uszkodzeniu, może przybrać postać:

$$R_{xnxn}(\tau, \theta) = f(U_1; \dots; U_i; \dots; U_n) \quad (6)$$

$$S_{xnxn}(\omega, \theta) = f(U_1; \dots; U_i; \dots; U_n) \quad (7)$$

gdzie:

- $R_{xnxn}$  – przebieg funkcji korelacji własnej,
- $S_{xnxn}$  – przebieg funkcji gęstości widmowej mocy własnej,
- $\theta$  – czas eksploatacyjny,
- $U_n$ , – kolejne uszkodzenia.

Dodatkowo wprowadza się pojęcie funkcji kwadratu wzmocnienia amplitudowego (KWA) w postaci:

$$|G(j\omega, \theta)|^2 = \frac{S_{yy}(j\omega, \theta)}{S_{xx}} \Big|_{s=j\omega} = \frac{b_m(\theta)s^m + \dots + b_1(\theta)s + b_o(\theta)}{a_n(\theta)s^n + \dots + a_1(\theta)s + a_o(\theta)} \quad (8)$$

Wówczas model diagnostyczny jako zbiór parametrów funkcji KWA przybiera postać:

$$\begin{aligned} b_{m\dots o}(\theta) &= f(U_1; \dots U_i; \dots U_n) \\ a_{n\dots o}(\theta) &= f(U_1; \dots U_i; \dots U_n) \end{aligned} \quad (9)$$

Model diagnostyczny (9) określa relację pomiędzy wartościami parametrów licznika ( $b_m \dots b_o$ ) i mianownika ( $a_n \dots a_o$ ), a stanem technicznym obiektu. Informacja o zmianach tych parametrów tworzy przesłanki do postawienia diagnozy.

#### 4.2. Wyznaczanie funkcji KWA

Mając zarejestrowane sygnały diagnostyczne, można je dowolnie transformować. Takimi przekształceniami są: funkcja korelacji i przekształcenie Fouriera. Określona wcześniej postać analityczna funkcji korelacji własnej, dopasowana do przebiegu otrzymanego numerycznie na podstawie zarejestrowanego sygnału, podlega przekształceniu Fouriera (10):

$$S_{xx(yy)}(j\omega) = \int_0^T R_{xx(yy)}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (10)$$

Mając wyznaczone analitycznie  $S_{xx}(j\omega)$  i  $S_{yy}(j\omega)$  na podstawie zależności (9), wyznacza się funkcję KWA. Ostatecznie oblicza się parametry ( $b_m \dots b_o$ ) i ( $a_n \dots a_o$ ) na podstawie wcześniej wyznaczonych parametrów funkcji korelacji wzajemnej. Przykładowo: dla funkcji analitycznych  $R_{xx}$  i  $R_{yy}$  w postaci:

$$R_{xx}(\tau) = ae^{-b\tau} \quad (11)$$

$$R_{yy}(\tau) = a_o e^{-b_o\tau} \cos(\omega_o\tau) \quad (12)$$

mamy:

$$S_{xx}(j\omega) \Big|_{s=j\omega} = \frac{-a(e^{-T(b+s)} - 1)}{b+s} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} S_{yy}(j\omega) \Big|_{s=j\omega} &= \\ &= \frac{a_o e^{-T(b_o+s)} (b_o \cos(\omega_o T) + s \cos(\omega_o T) - \omega_o \sin(\omega_o T)) - a_o b_o - a_o s}{s^2 + 2b_o s + (b_o^2 + \omega_o^2)} \quad (14) \end{aligned}$$

gdzie:

$T$  – czas obserwacji sygnału,  
 $s$  – zmienna zespolona.

Po zastosowaniu odpowiednich przekształceń otrzymuje się ostatecznie:

$$KWA = \frac{S_{yy}(j\omega)}{S_{xx}(j\omega)} \Big|_{s=j\omega} = \frac{e^{-sT} (A_1 s + A_2) + A_3 s^2 + A_4 s + A_5}{e^{-sT} (B_1 s^2 + B_2 s + B_3) + B_4 s^2 + B_5 s + B_6} \quad (15)$$

Parametry funkcji (14) – ( $A_1 \dots A_5$ ) i ( $B_1 \dots B_6$ ) stanowią informację diagnostyczną wyrażoną liczbowo. Ich analiza pozwala identyfikować stan techniczny badanego elementu.

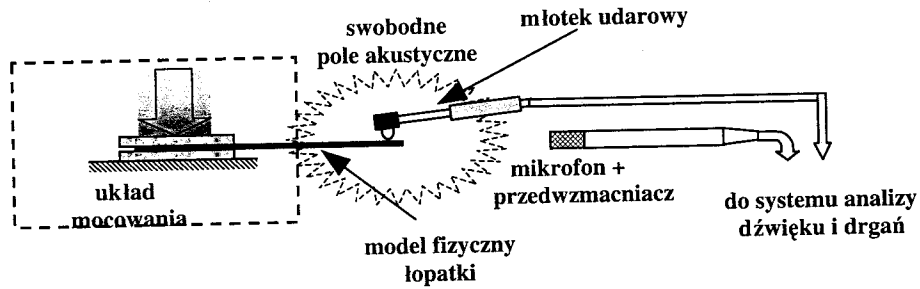
#### 4.3. Diagnozowanie łopatki wirnikowej

Układ pomiarowy użyty do badań składa się z (rys. 2):

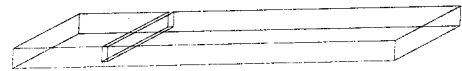
- analizatora dźwięku i drgań PULSE firmy Brüel&Kjær,
- mikrofonu pola swobodnego firmy Brüel&Kjær wraz z akcesoriami,
- młotka udarowego firmy ENDEVCO.

W przeprowadzonych badaniach obiektem był model fizyczny łopatki wirnikowej w postaci elementu płaskiego wykonanego ze stali 1H13 o wymiarach 185×34,9×3,7 mm. Odpowiednie warunki pomiaru zapewniał układ zamocowania modeli łopatki (praska hydrauliczna, uchwyt mocujący). Symulowane uszkodzenie polegało na wprowadzeniu nacięcia o głębokości około 1,5 mm i szerokości około

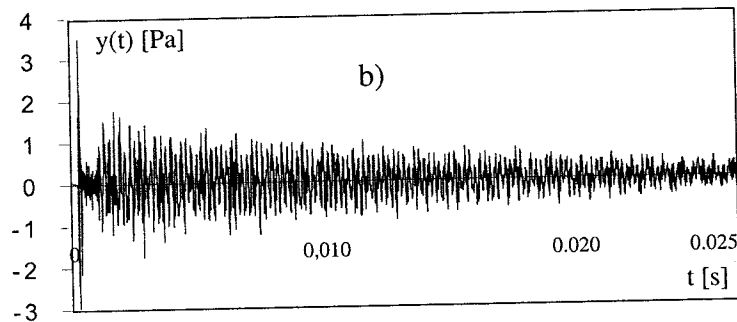
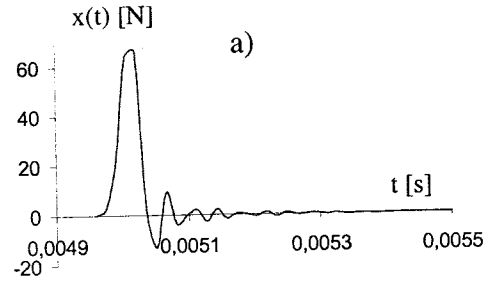
0,4 mm (rys. 3). Uszkodzenie położone było w obrębie podstawy pióra modelu łopatkki.



Rys. 2. Układ pomiarowy

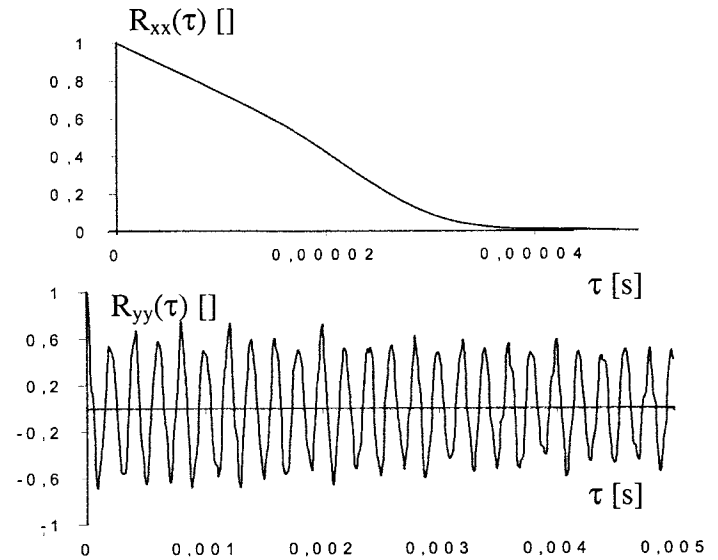


Rys. 3. Symulowane uszkodzenie modelu fizycznego łopatkki (przy podstawie)



Rys. 4. Przebiegi czasowe: a) siły uderzenia łopatkki młotkiem uderowym; b) odpowiedzi akustycznej

Przebiegi czasowe wymuszenia (uderzenie w obrębie wierzchołka młotkiem uderowym) oraz odpowiedzi akustycznej modelu fizycznego łopatkki przedstawiono na rysunku 4. Odpowiadające im przebiegi funkcji korelacji  $R_{xx}(\tau)$ ,  $R_{yy}(\tau)$  przedstawiono odpowiednio na rysunku 5.



Rys. 5. Przebiegi funkcji korelacji własnej  $R_{xx}$  i  $R_{yy}$  odpowiednio sygnałów  $x(t)$  i  $y(t)$  – rys. 4

Dla przyjętych funkcji analitycznych  $R_{xx}(\tau)$  i  $R_{yy}(\tau)$  w postaci:

$$R_{xx}(\tau) = a e^{-b\tau}; \quad R_{yy(xy)}(\tau) = a_o e^{-b_o\tau} \cos(\omega_o\tau) + a_1 e^{-b_1\tau} \cos(\omega_1\tau) \quad (16)$$

i na podstawie (10) obliczając  $S_{xx}(j\omega)$  oraz  $S_{yy}(j\omega)$  [7] otrzymujemy ostatecznie KWA w postaci:

$$KWA = \frac{e^{sT} [s^4 P_1 + s^3 P_2 + s^2 P_3 + s P_4 + P_5] + s^4 P_6 + s^3 P_7 + s^2 P_8 + s P_9 + P_{10}}{M_1 s^4 + M_2 s^3 + M_3 s^2 + M_4 s + M_5} \quad (17)$$

Obliczone parametry funkcji  $R_{xx}(\tau)$  przedstawiają się następująco (wartości średnie z kilku uderzeń):

$$a = 1,038, \quad b = 54489,195.$$

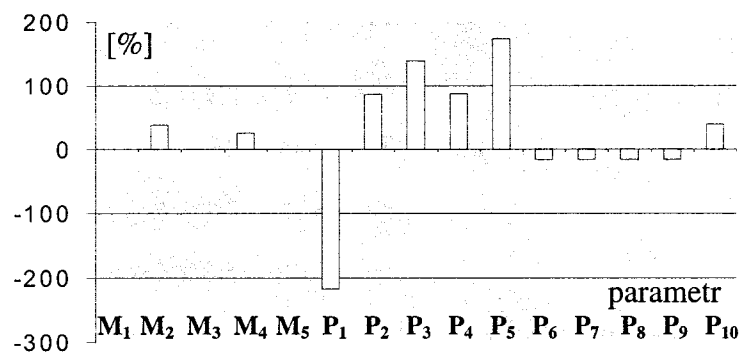
Natomiast wartości parametrów funkcji  $R_{yy}(\tau)$  przedstawiono w tabeli 1. Uderzenie modelu łopatki było trzykrotne przed i po wprowadzeniu uszkodzenia.

Tabela 1.

Parametry funkcji korelacji własnej  $R_{yy}(\tau)$ 

Numer uderzenia	Wartości parametrów funkcji $R_{yy}(\tau)$					
	$a_o$	$b_o$	$c_o$	$a_1$	$b_1$	$c_1$
Przed uszkodzeniem 1	0,2108	68,88233	103732,8252	0,48886	69,44318	31565,69845
2	0,15482	71,80213	103756,8122	0,52568	86,79315	31566,6505
3	0,07544	94,88743	103769,7549	0,63641	66,64734	31542,9933
<b>średnia</b>	<b>0,14702</b>	<b>78,52396333</b>	<b>103753,1308</b>	<b>0,550316667</b>	<b>74,2945567</b>	<b>31558,44742</b>
Po uszkodzeniu 1	0,115	161,78717	103452,8489	0,67892	100,84056	31532,55535
2	0,13255	149,42827	103460,5033	0,63991	92,04912	31541,57144
3	0,13296	133,36257	103460,8883	0,63369	95,6006	31540,56628
<b>średnia</b>	<b>0,126836667</b>	<b>148,19267</b>	<b>103458,0802</b>	<b>0,65084</b>	<b>96,1634267</b>	<b>31538,23102</b>

Na podstawie danych z tabeli 1 obliczono wartości parametrów dla KWA i porównano je dla przypadku przed i po wprowadzeniu uszkodzenia. Procentowe zmiany tych parametrów przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Procentowe zmiany parametrów funkcji w relacji łopatka nie-uszkodzona-uszkodzona

Analizując parametry funkcji korelacji  $R_{yy}(\tau)$  można zauważyć, że nie w każdym przypadku istnieje pewność, co do wiarygodności wyznaczenia parametrów tej funkcji. Dotyczy to szczególnie przypadków zaznaczonych w tabeli 1 podwójnymi liniami.

## 5. Podsumowanie

Stwierdza się, że istnieje możliwość przejścia od przebiegu czasowego sygnału wibroakustycznego (odpowiedzi akustycznej na zadane wymuszenie) do wartości parametrów funkcji określonej w pracy jako kwadrat wzmocnienia amplitudowego. Wymaga to zastosowania numerycznej obróbki sygnału (obliczenie funkcji korelacji) oraz metod obliczeniowych w postaci operacji dopasowywania krzywych (znalezienie wartości parametrów funkcji korelacji).

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń wiadomo, że warunki realizacji metody, w tym częstotliwość próbkowania, znacząco wpływają na postać i parametry funkcji korelacji, funkcji gęstości widmowej mocy, a ostatecznie funkcji KWA. Przyjęcie ustalonych warunków realizacji metody zapewni poprawny przebieg procesu diagnozowania.

Wyznaczona funkcja KWA umożliwia identyfikację stanu technicznego łopatki dzięki uzyskaniu nowej informacji diagnostycznej w postaci parametrów wyznaczanych funkcji. Parametry funkcji KWA są jednoznaczna informacją diagnostyczną, wyrażoną w postaci liczbowej. Dzięki zastosowanej metodzie można w znaczący sposób rozszerzyć wibroakustyczną diagnostykę elementów maszyn.

## Literatura

1. Baskakow Ś. I.: *Sygnały i układy radiotechniczne*. PWN, Warszawa, 1991.
2. Cempel Cz.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. WNT, Warszawa, 1982.
3. Cempel Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1985.
4. Cempel Cz.: *Wibroakustyka stosowana*. PWN, Warszawa, 1989.
5. Cholewa W., Moczulski W.: *Diagnostyka techniczna maszyn*. Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1993.

6. **Kotowski A.:** *Wibroakustyczna metoda diagnozowania łopatek wirnikowych oparta na analizie drgań własnych o wysokiej częstotliwości.* 7<sup>th</sup> International Conference AIRDIAG 2001, ITWL, Warszawa, 2001, s. 99-105.
7. **Kotowski A., Lindstedt P.:** *Metoda wibroakustyczna w procesie oceny stanu technicznego maszyn.* Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn, Z.10 (2002), s. 99-115.
8. **Kurowski W.:** *Dyskretne widmo Fouriera w diagnostyce wibroakustycznej.* Wydaw. Politechniki Białostockiej, Białystok, 1997.
9. **Kurowski W.:** *Podstawy teoretyczne komputerowego miernictwa systemów mechanicznych.* Wydaw. Politechniki Białostockiej, Białystok, 1994.
10. **Lindstedt P.:** *Formowanie sygnałów diagnostycznych.* Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 1997, z. 2, s. 239-245.
11. **Lindstedt P.:** *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy.* Wydawnictwo Naukowe „ASKON”, Warszawa, 2002.
12. **Łączkowski R.:** *Drgania elementów turbin cieplnych.* WNT, Warszawa, 1974.
13. **Łączkowski R.:** *Wibroakustyka maszyn i urządzeń.* WNT, Warszawa, 1983.
14. **Niederliński A.:** *Systemy komputerowe automatyki przemysłowej.* WNT, Warszawa, 1985.
15. **Signal Processing Toolbox: User's Guide.** The MathWorks Inc., 1996.
16. **Szabatin J.:** *Podstawy teorii sygnałów.* WKiŁ, Warszawa, 2000.
17. **Żóltowski B., Ćwik Z.:** *Leksykon diagnostyki technicznej.* Wydaw. Uczel. ATR, Bydgoszcz, 1996.

#### DIAGNOSTICS OF ENGINE PARTS ON THE BASE OF GAIN SQUARE FUNCTION PARAMETERS

**Abstract:** In this paper a method of conversion of vibroacoustic signals into diagnostic parameters is presented. Acoustic response signals include information about engine part constructional properties. There was taken advantage of that fact to study engine parts. A way of the conversion using correlation and power spectral density is discussed. This operation requires particular software applications, e.g. signal processing, curve fitting and analytic modifications. Changes of parameters determine an information in a process of estimation of engine part technical condition.

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/3/03.

Cezary Kownacki

### ANALIZA SYGNAŁÓW DIAGNOSTYCZNYCH NA PRZYKŁADZIE SYGNAŁU EFEKTU BARKHAUSENA

**Streszczenie:** Nowoczesne metody diagnostyczne opierają się nie tylko na złożonych urządzeniach pomiarowych, ale także na algorytmach przetwarzania sygnałów pomiarowych, które mają wpływ na ostateczny wynik, wiarygodność i powtarzalność eksperymentu. Problem analizy sygnałów diagnostycznych został w artykule przedstawiony w oparciu o porównanie dotychczasowej metody analizy sygnału efektu Barkhausena oraz zaproponowanej przez autora, wykorzystującej transformatę falkową. Przeprowadzone badania z wykorzystaniem próbek ze stali 2H13 oraz otrzymane wyniki umożliwiły uzyskanie informacji o stanie warstwy wierzchniej w funkcji głębokości, co poszerzyło możliwości diagnozowania elementów maszyn.

**Słowa kluczowe:** sygnał diagnostyczny, sygnał Barkhausena, analiza widmowa, transformata Fouriera, transformata falkowa, warstwa wierzchnia, naprężenia własne

#### 1. Wprowadzenie

W trakcie badań diagnostycznych, opartych zarówno na metodach klasycznych jak i nieniszczących, otrzymuje się znaczną ilość informacji zawartej w różnego rodzaju sygnałach, które uzyskujemy z urządzeń pomiarowych. Nie zawsze jednak informacje o stanie badanych obiektów mogą być bezpośrednio odczytane z sygnałów pomiarowych. Na jakość i postać tych sygnałów ma wpływ wiele czynników zewnętrznych, jak również zakłócenia. Jakość sygnałów można polepszyć stosując różne metody filtracji [4], [8]. Jednak o wiele trudniej jest znaleźć jednoznaczny relację pomiędzy parametrami sygnału, a parametrami określającymi stan fizyczny diagnozowanego urządzenia lub elementu maszyny.

Obecnie stosowane metody analizy sygnałów opierają się na parametrach określających amplitudę i rozkład częstotliwościowy sygnału. Na podstawie tych danych buduje się model określający stan obiektu. Stosowane do tego narzędzia najczęściej opierają się na analizie widmowej sygnału oraz wyznaczają jego parametry ilościowe i statystyczne [4][8]. Nie zawsze jednak transformata Fouriera oraz funkcje korelacji i autokorelacji są przydatne. Problemy pojawiają się w mo-

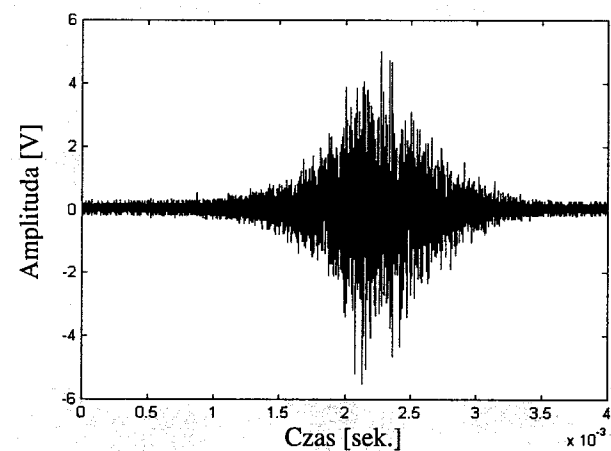
mencie, gdy informacja niesiona przez sygnał jest zmienna w czasie i jest od niego uzależniona. Takie sygnały mają charakter stochastyczny i muszą być analizowane z uwzględnieniem czasu, dlatego też pojawiła się modyfikacja transformaty Fouriera stosująca przesuwane okna czasowe [2], [8]. Znacznie lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie ciągłej transformaty falkowej, która umożliwia analizę sygnału w funkcji częstotliwości i czasu. Istotę transformaty falkowej oraz jej zalety zostaną przedstawione w artykule na przykładzie analizy sygnału efektu Barkhausena.

## 2. Sygnał Barkhausena

Sygnał Barkhausena jest złożonym sygnałem napięciowym o charakterystyce szumu stacjonarnego. Na sygnał ten składają się losowe impulsy napięcia indukowane w cewce urządzenia pomiarowego. Przyczyną ich powstawania jest spontaniczny ruch ścian domen magnetycznych ferromagnetyka pod wpływem zmiennego zewnętrznego pola magnetycznego. Przyłożone pole oddziałuje, bowiem na orientację wektorów magnetycznych domen, a zatem również na ich energię wewnętrzną. W sieci krystalicznej ferromagnetyka mogą wystąpić defekty, które dla poruszających się ścian stanowią swoiste bariery. Ich pokonanie jest możliwe tylko wtedy, gdy energia wewnętrzna domeny osiągnie odpowiedni poziom. Po pokonaniu bariery następuje gwałtowny spadek energii domeny, a obracający się wektor magnetyczny indukuje impuls napięcia. Ponieważ pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego znajduje się wiele domen, powstaje znaczna ilość impulsów, które tworzą sygnał. Zjawisko oddziaływania pola magnetycznego na ferromagnetyk jest nazwane magnetycznym efektem Barkhausena, od nazwiska niemieckiego naukowca, który je odkrył. Na rysunku 1 jest przedstawiony przykładowy sygnał efektu Barkhausena [3], [7], [8].

Efekt Barkhausena opiera się na wzajemnych relacjach i oddziaływaniach między strukturą magnetyczną (domenową) ferromagnetyka, a siłami oddziaływania międzatomowego sieci krystalicznej. Ruch ścian domenowych i domen, czyli obszarów w obrębie których momenty magnetyczne poszczególnych atomów są uporządkowane w tym samym kierunku, wiąże się z przemieszczaniem się atomów. Powoduje to zmiany w strukturze sieci krystalicznej, a w związku z tym zmianę kierunków wektorów magnetycznych oraz poziomu namagnesowania ferromagnetyka. Na przemieszczanie się atomów mają również wpływ siły wewnętrzne (naprężenia), które mogą ten proces hamować lub potęgować. Amplituda impulsów napięciowych składających się na sygnał Barkhausena jest zależna od

prędkości i ilości ścian domen, które poruszają się pod wpływem zewnętrznego pola; pośrednio odwzorowuje ona poziom naprężeń. Badania nad zjawiskiem Barkhausena prowadzą do wypracowania praktycznej metody umożliwiającej identyfikację stanu warstwy wierzchniej materiału ferromagnetycznego na podstawie zarejestrowanego sygnału. Została opracowana komercyjna aparatura badawcza, za pomocą której można dokonać detekcji i analizy sygnału Barkhausena. Otrzymane dane nie pokazują jednak wyczerpujących informacji o badanym obiekcie, ponieważ dotychczasowa metoda analizy sygnału posiada istotne ograniczenia [3], [7], [8].



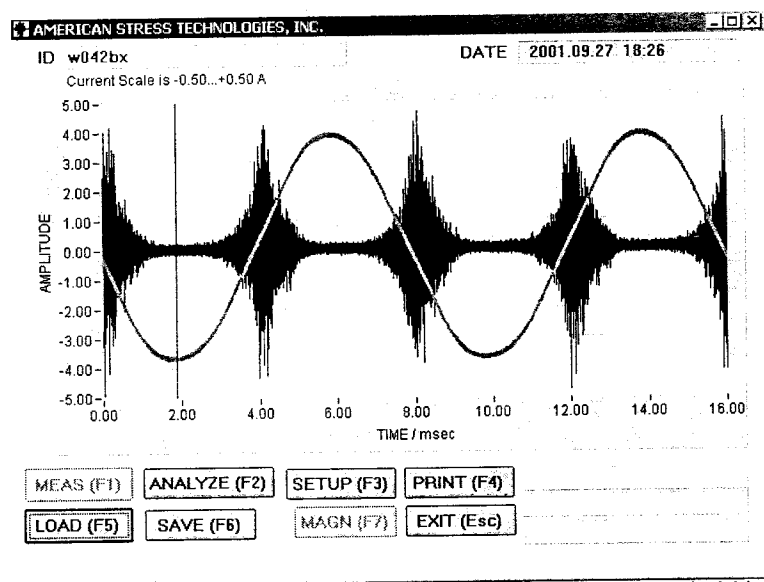
Rys. 1. Sygnał efektu Barkhausena odpowiadający połowie cyklu magnesowania (impuls Barkhausena) – częstotliwość prądu magnesującego 125 Hz, częstotliwość próbkowania sygnału 5 MHz

Ciągła transformata falkowa nie była dotąd wykorzystywana do analizy sygnału efektu Barkhausena i oceny stanu warstwy wierzchniej. Prowadzono jedynie badania nad zastosowaniem dyskretnej transformaty falkowej do eliminacji szumu toru pomiarowego z sygnału Barkhausena. Aby przekonać się jakie korzyści oferuje zastosowanie transformaty falkowej, autor porównał jej możliwości z efektami dotychczasowej metody uzyskanymi za pomocą aparatury  $\mu$ SCAN [1], [2], [7].

### 3. Obecnie stosowane metody analizy

Obecnie stosowane metody analizy sygnału efektu Barkhausena dążą do ustalenia określonych parametrów, na podstawie których można określić stan obiektu w oparciu o jego właściwości magnetyczne. Obiektem badań jest warstwa wierzchnia elementów wykonanych z materiałów ferromagnetycznych. Grubość badanej warstwy jest ograniczona przenikalnością sygnału elektromagnetycznego. Dotychczasowe metody analizy pozwalają badać warstwę wierzchnią tylko do głębokości około 20  $\mu\text{m}$  [1], [2]. Nie można również określić rozkładu właściwości warstwy wierzchniej w funkcji głębokości. Niedoskonałości stosowanych metod analizy można zaobserwować badając sygnał efektu Barkhausena za pomocą aparatury badawczej  $\mu\text{SCAN}$  firmy STRESSTECH OY z Finlandii.

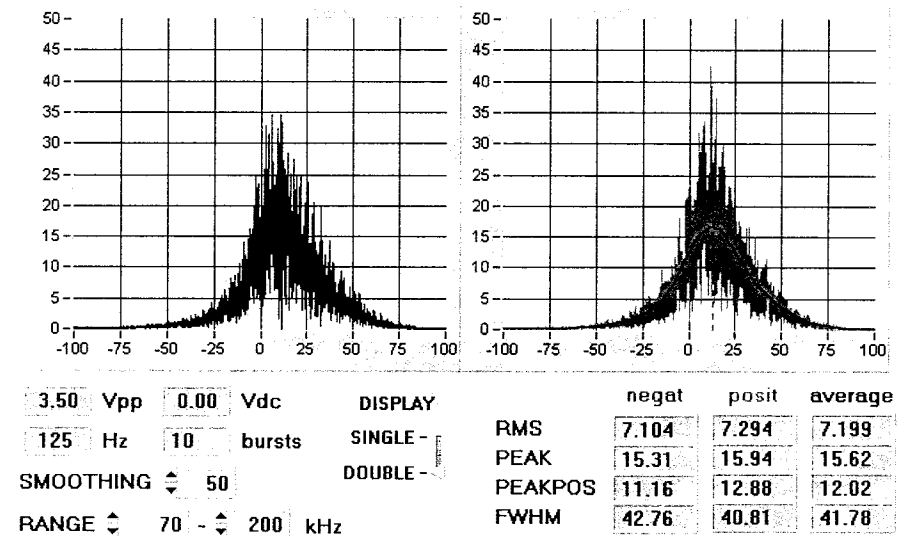
Aparatura ta umożliwia analizę sygnału efektu Barkhausena wg trzech sposobów. Pierwszy z nich polega na cyfrowym przetworzeniu zarejestrowanego sygnału, który jest przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Sygnał Barkhausena rejestrowany przez aparaturę  $\mu\text{SCAN}$ ; krzywa sinusoidalna oznacza przebieg prądu magnesującego [1], [2]

Sygnał jest wstępnie filtrowany przez środkowoprzepustowy filtr o regulowanym paśmie przenoszenia. Domyślnie jest to zakres 70-200 kHz i odpowiada grubości badanej warstwy około 20  $\mu\text{m}$  (w zależności od rodzaju materiału). Następ-

nie jest on uśredniany z 10 impulsów Barkhausena (5 cykli magnesowania) do 2 wypadkowych impulsów typu POS (narastający prąd magnesujący od wartości minimalnej do maksymalnej) i NEG (opadający prąd magnesujący od wartości maksymalnej do minimalnej). Dalej przy pomocy prostownika (znak amplitudy impulsu nie zależy od poziomu naprężeń) i filtru PEAK estymuje się obwiednię sygnału, oddzielnie dla wypadkowej POS oraz NEG [1], [2], [8]. Na podstawie obwiedni wyprowadza się dwa parametry: PEAK i PEAK POSITION. Parametr PEAK oznacza szczytową wartość obwiedni i jest skorelowany z wielkością amplitud impulsów w sygnale i pozostałością magnetyczną, czyli remanencją. Parametr PEAK POSITION określa położenie wartości szczytowej w stosunku do momentu zmiany znaku prądu magnesującego i związany jest twardością magnetyczną, czyli koercją. Wyniki analizy i sposób ich prezentacji są przedstawione na rysunku 3. Otrzymane parametry dotyczą kształtu całego sygnału bez wyszczególniania jego składowych częstotliwościowych i określają jedynie ogólny stan badanej warstwy wierzchniej. Niestety nie można na ich podstawie określić rozkładu właściwości warstwy wierzchniej w funkcji głębokości, co pozwoliłoby dokładniej odwzorować stan badanego elementu maszyny.

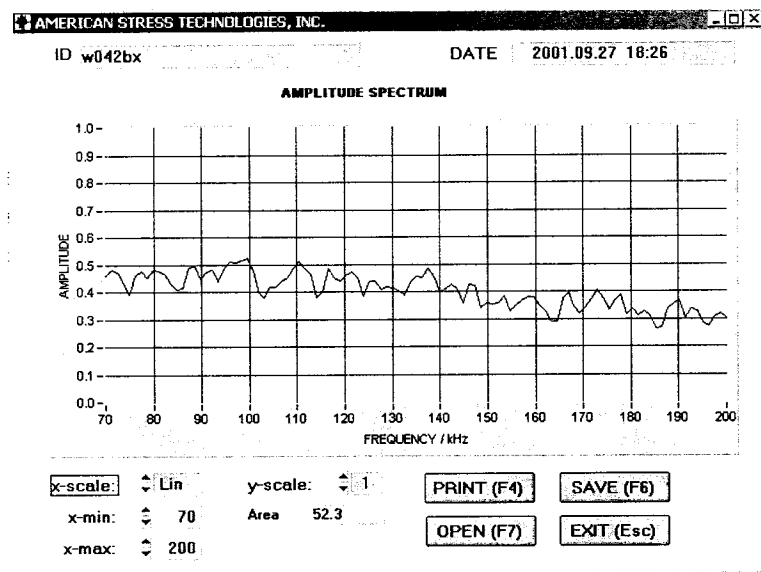


Rys. 3. Wyniki cyfrowej analizy sygnału efektu Barkhausena i ich wizualizacja [1], [2]

Urządzenie badawcze  $\mu\text{SCAN}$  umożliwia również zastosowanie dwóch innych sposobów analizy: widmową i ilościową. Analiza widmowa jest przeprowadzana przy użyciu transformaty FFT (rys. 4), zaś ilościowa polega na zliczaniu impulsów

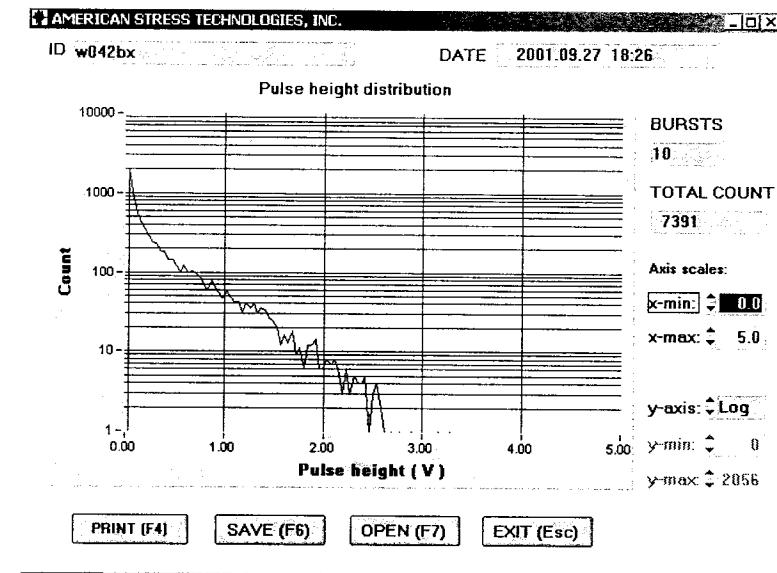


napięciowych i przedstawieniu otrzymanych wartości w postaci histogramu (rys. 5) [1], [2].



Rys. 4. Spektrum widmowe sygnału Barkhausena wykonane przez aparaturę  $\mu$ SCAN [1], [2]

Na podstawie analizy widmowej i ilościowej trudno jest jednak ustalić dokładny stan warstwy wierzchniej biorąc pod uwagę głębokość pomiaru, ponieważ czynniki zewnętrzne inaczej oddziałują na domeny i sieć krystaliczną położone w różnej odległości od powierzchni materiału. Uzyskanie informacji o rozkładach badanych parametrów w funkcji głębokości pozwoliłoby lepiej ocenić wpływ obciążeń eksploatacyjnych badanego obiektu (elementu maszyny) na stan jego warstwy wierzchniej.



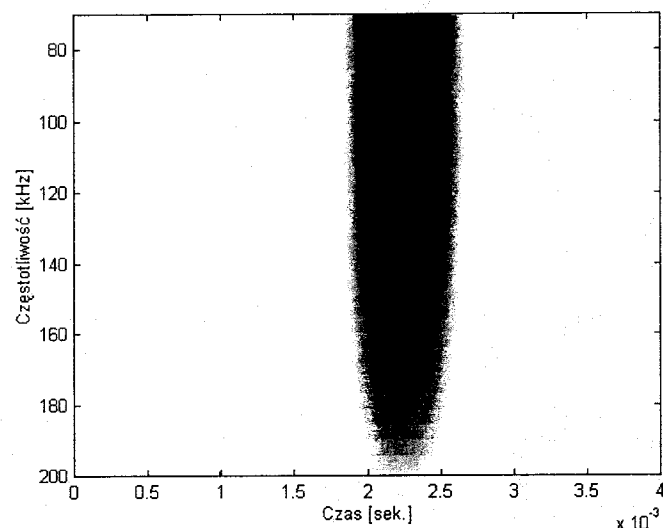
Rys. 5. Wynik analizy ilościowej sygnału efektu Barkhausena – histogram amplitudy impulsów napięciowych [1], [2]

#### 4. Analiza falkowa

W celu osiągnięcia szerszej informacji zakodowanej w sygnale diagnostycznym należy skorzystać z nowoczesnych metod analizy. W niniejszym rozdziale zaprezentowano możliwości transformaty falkowej i odniesiono je do przedstawionych powyżej wyników. W analizie została wykorzystana ciągła transformata falkowa, która wyznacza współczynniki falkowe w funkcji skali i czasu [5], [7], [10]. Stosując zależności między skalą funkcji falkowej, a jej częstotliwością, można przypisać wartościom skali odpowiednie wartości częstotliwości [7], [8]. Takiej możliwości nie stwarza dyskretna transformata falkowa, która dzieli pasmo przenoszenia sygnału na coraz węższe zakresy częstotliwości, bez określania ich konkretnej wartości. Z tego powodu znajduje ona zastosowanie jedynie w odszumianiu badanego sygnału [6].

W analizie falkowej wykorzystano sygnały zarejestrowane dla próbek ze stali 2H13 nieutwardzonych i utwardzonych metodą mikrokulowania. Każdy sygnał składa się z 10 skoków Barkhausena [1]. Otrzymane współczynniki falkowe dla każdego skoku Barkhausena uśredniono do jednej wypadkowej i wyznaczono jej

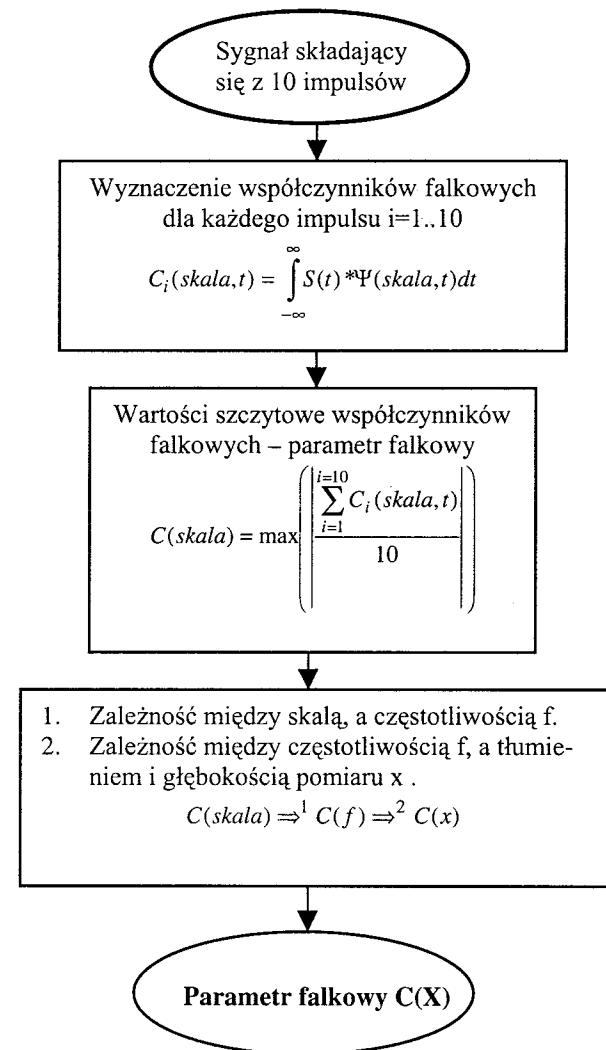
wartość bezwzględna, gdyż ich znak świadczy jedynie o kierunku poruszania się domen i nie ma wpływu na odwzorowanie skali zjawiska i właściwości warstwy wierzchniej. Uzyskane wypadkowe współczynniki falkowe można przedstawić jako powierzchnię, która jest wygładzonym wykresem współczynników falkowych w funkcji częstotliwości i czasu (rys. 6) [8].



**Rys. 6.** Wykres wartości wypadkowych współczynników falkowych w funkcji czasu (oś pionowa) i skali (oś pozioma). Kolor ciemny oznacza najwyższe wartości współczynników, jasny – najniższe wartości współczynników

Otrzymany obraz wartości współczynników falkowych pozwala zorientować się o zmianie struktury sygnału nie tylko w funkcji czasu, ale również w funkcji skali, czyli częstotliwości (a zatem i głębokości [1], [2], [7]), co nie było możliwe w przypadku transformaty Fouriera i parametru PEAK. Na podstawie obrazu można ocenić szczegółowy stan warstwy wierzchniej. Konieczne jest jednak przyjęcie odpowiednich parametrów opisujących płaszczyznę wypadkowych współczynników falkowych. Zmiany wartości wprowadzonych parametrów pozwolą określić rozkład i gradient zmian właściwości warstwy wierzchniej w funkcji głębokości. W związku z tym został wprowadzony parametr falkowy odwzorowujący wartości szczytowe współczynników falkowych sygnału Barkhausena w funkcji skali, a następnie częstotliwości. Znając zależność (1) pomiędzy częstotliwością i przenikalnością sygnału elektromagnetycznego przyjęty parametr można przedstawić jako funkcję głębokości warstwy wierzchniej [1], [2], [7]. Opracowany algorytm

określania parametrów falkowych w zastosowanej metodzie analizy falkowej przedstawiono na rysunek 7.



**Rys. 7.** Zaproponowana metoda analizy falkowej [7], [8]

$$D(x) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} g(f) \cdot \exp\left(-A \cdot x \cdot f^{\frac{1}{2}}\right) df}{\int_{f_1}^{f_2} g(f) df} \quad (1)$$

gdzie:  $A = (\pi\mu_r\sigma_e)^{1/2}$

$\mu_r$  – względna przenikalność magnetyczna,

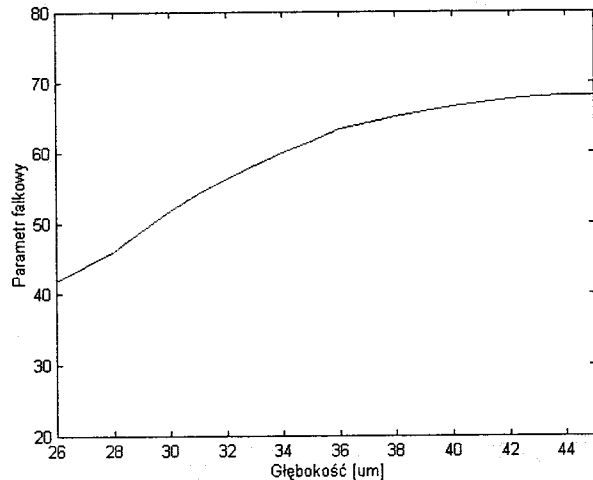
$\sigma_e$  – przewodność elektryczna właściwa,

$x$  – odległość od powierzchni w głąb materiału,

$f_1 \div f_2$  – wybrany do analizy zakres częstotliwości szumu magnetycznego,

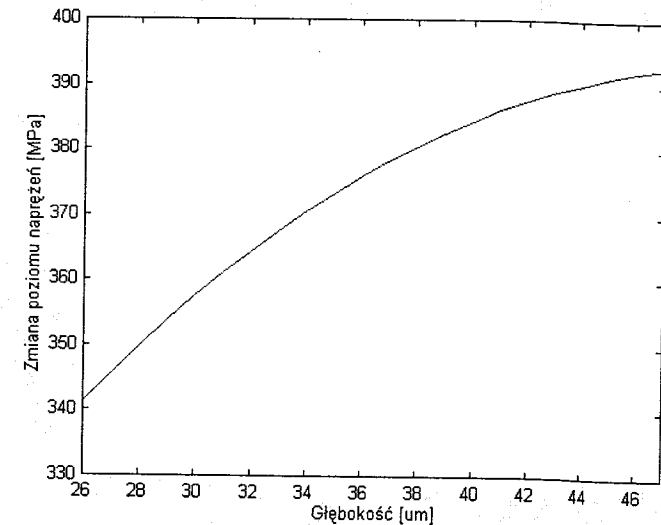
$g(f)$  – funkcja statystycznego rozkładu amplitudy sygnału w funkcji częstotliwości (dla szumu białego  $g(f) = 1$ ).

Na podstawie analizy sygnałów zarejestrowanych dla próbki utwardzonej i nieutwardzonej, zaobserwowano zmiany parametru falkowego, które posiadają charakter zbliżony do zmian naprężeń w funkcji głębokości, wprowadzonych za pomocą procesu mikrokulowania [7]. Wykres zmiany parametru falkowego w funkcji głębokości przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Wykres zmiany parametru falkowego w funkcji głębokości, charakteryzujący zmiany stanu warstwy wierzchniej pod wpływem utwardzenia za pomocą mikrokulowania próbki ze stali 2H13

Porównując przebiegi zmian parametru falkowego w funkcji głębokości z przebiegami naprężeń uzyskanymi metodą rentgenowską  $\sin^2 \Psi$  (rys. 9) łatwo zauważyć, że charakter obu przebiegów jest zgodny. Można zatem wysnuć wniosek, że wyniki uzyskane za pomocą analizy falkowej sygnału efektu Barkhausena umożliwiają są zbliżone do wyników uzyskanych metodą rentgenowską. Na podstawie tej metody można ocenić stan warstwy wierzchniej oraz rozkład naprężeń, jaki może nastąpić podczas procesu technologicznego w trakcie produkcji lub eksploatacji badanego obiektu. Rezultatu tego nie udaje się uzyskać za pomocą metod zastosowanych w aparaturze  $\mu$ SCAN. Parametry takie jak: PEAK, PEAK POSITION, spektrum fourierowskie, czy histogram amplitudy impulsów napięciowych nie charakteryzują rozkładu właściwości warstwy wierzchniej w funkcji głębokości, chociaż sygnał Barkhausena zawiera informacje pochodzące z różnych jej poziomów. Pozwalają one jedynie na uśrednione oszacowanie stanu warstwy wierzchniej elementu maszyny oraz porównanie jej ze stanem innych podobnych obiektów. Niemożliwe jest określenie, jak głęboko zaszły zmiany w strukturze warstwy wierzchniej pod wpływem np. utwardzania.



Rys. 9. Wykres zmiany naprężeń własnych pod wpływem utwardzenia za pomocą mikrokulowania – zmierzone metodą rentgenowską z użyciem trawienia sekwencyjnego

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że użyta transformata falkowa oferuje nowe możliwości. Aby przekonać się o wiarygodności wyników autor przeprowadzi dalsze badania nad właściwościami parametru falkowego, a w szczególności nad wpływem innych czynników na jego przebieg, tj. procesy technologiczne, jakim poddano badany obiekt oraz parametry analizy sygnału. Końcowym efektem prowadzonych badań będzie opracowanie nowej metody umożliwiającej w sposób szybki i nieniszczący ocenić rozkład właściwości warstwy wierzchniej w funkcji jej głębokości na podstawie sygnału efektu Barkhausena.

## 5. Wnioski

Porównując metody analizy sygnału Barkhausena zaprezentowane w artykule można stwierdzić, że tylko transformata falkowa stwarza nowe możliwości badania stanu warstwy wierzchniej, a przy tym jest szybsza i mniej kosztowna od powszechnie uznanej metody rentgenowskiej. Dotychczas stosowane parametry PE-AK i PEAK POSITION pozwalają w ogólny sposób określić właściwości badanej warstwy wierzchniej i nie znajdują praktycznego zastosowania, np. w procesie kontroli jakości lub diagnostyce eksploatowanych maszyn. Transformata Fouriera także nie daje możliwości uzyskania praktycznej informacji, która mogłaby opisać rozkład właściwości warstwy wierzchniej w funkcji głębokości. Ograniczenia te powodują, że analiza sygnału Barkhausena nie może być traktowana jako samodzielna nieniszcząca metoda oceny warstwy wierzchniej. Zastosowanie transformaty falkowej stwarza nowe możliwości wykorzystania efektu Barkhausena, na co wskazuje zgodny przebieg zmian parametru falkowego i naprężeń własnych w badanych próbkach.

Ponieważ analiza falkowa jest zupełnie nowym podejściem i wiele zagadnień jest w trakcie opracowywania, do pierwszych wyników należy również podchodzić ostrożnie. Zastosowana w niej zależność na tłumienie sygnału jest modelem matematycznym zjawiska [7] zależnym od kilku parametrów. Dlatego też trudno dokładnie określić jak kształtuje się w badanym sygnale udział impulsów generowanych przez ruch domen na różnych głębokościach warstwy wierzchniej i jak one oddziałują na siebie. Uzyskane wyniki otwierają drogę do dalszych badań i potwierdzają zalety transformaty falkowej, która znacznie lepiej odwzorowuje właściwości warstwy wierzchniej na całej jej głębokości, niż metoda zaproponowana przez producentów aparatury  $\mu$ SCAN [7], [8]. Zalety transformaty falkowej w analizie, kompresji i filtracji sygnałów są wystarczającym dowodem [6], [10], że

będzie miała ona wpływ na rozwój nieniszczących metod diagnostycznych, a w związku na jakość i trwałość użytkowanych maszyn i urządzeń.

## Literatura

1. American Stress Technologies Inc.:  *$\mu$ SCAN 500 System v1.22 user's manual.*
2. American Stress Technologies Inc.:  *$\mu$ SCAN 500 Operating instructions v.1.5.3*
3. **Błachnio J.:** *Ocena stanu warstwy wierzchniej łopatek wirnika sprężarki metodą szumu Barkhausena.* Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, 1998 z. 3, s. 193.
4. **Cholewa W.:** *Diagnostyka techniczna maszyn: pomiary i analiza sygnałów.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1993.
5. **Jaworek K., Derlatka M., Kownacki C.:** *O cyfrowym filtrowaniu sygnałów biomechanicznych.* II Sympozjum: Inżynieria Ortopedyczna i Protetyczna, IOP99, Białystok, 1999, 125-133.
6. **Jaworek K., Kownacki C., Pauk J.:** *Transformata falkowa – nowoczesne narzędzie do analizy sygnałów pomiarowych.* Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn, Z. 8 (2001), s. 199-212.
7. **Kownacki C., Błachnio J.:** *Próba oceny stanu warstwy wierzchniej elementu maszyny z wykorzystaniem analizy falkowej sygnału efektu Barkhausena.* Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn, Z. 10 (2002), s. 5-14.
8. **Kownacki C., Błachnio J.:** *Transformata falkowa w analizie szumu magnetycznego.* 7th International Conference: Airplanes and helicopters diagnostics: AIRDIAG'2001, WITWL, Warszawa, 2001, s. 89-98.
9. **Kurowski W.:** *Podstawy teoretyczne komputerowego miernictwa systemów mechanicznych.* Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 1994.
10. Wavelet Toolbox: *User's Guide.* The Math Works inc, 1996.

## DIAGNOSTIC SIGNALS ANALYSIS ON EXAMPLE OF BARKHAUSEN EFFECT

**Abstract:** The value of today's non-destructive methods is dependent on reliability, utility and repeatability of received their results. The analysis method quality and parameter as the result of used analysis method of measured signal has impact on those coefficients. In the case of Barkhausen signal it's especially important due to signal composite nature. Present analysis method can obtain parameters related with state of top layer, but it can't estimate their value for different depths. Using wavelet transform by author allows to work out new analysis method, which can obtain approximate information about stress as a function of top layer depth.

Paweł Lindstedt<sup>1</sup> Janusz Magier<sup>2</sup>

**PRZESŁANKI DO PARAMETRYCZNEJ DIAGNOSTYKI  
UKŁADU ŁOŻYSKOWANIA  
SILNIKA ALLISON 250-C20B**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono opis układu łożyskowania wirnika turbinowego silnika śmigłowego Allison 250-C20B z uwzględnieniem otoczenia tego układu, którym są wszystkie czynniki zewnętrzne mające wpływ na jego działanie. Wśród nich wyróżnia się czynniki zależne od funkcjonowania elementów silnika współdziałających z układem łożyskowania wirnika i czynniki zależne od jakości obsługi technicznej. Otoczenie układu łożyskowania ma wpływ na jego proces zużywania, który ocenia się na podstawie sygnałów diagnostycznych otoczenia i układu. Przedstawiono modele diagnostyczne układu, które są zależnościami pomiędzy stanem technicznym układu a sygnałami układu i jego otoczeniem.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka parametryczna, silnik śmigłowy, układ łożyskowania

## 1. Wstęp

Lotniczy silnik turbinowy działa w otoczeniu, które ma wpływ jego stan techniczny [1, 6, 7]. Otoczeniem silnika są następujące czynniki zewnętrzne:

- działalność obsługowa (w tym regulacja),
- warunki użytkowania (temperatura otoczenia, wilgotność, ciśnienie atmosferyczne),
- sposób użytkowania (częstotliwość zmian zakresów pracy i obciążenia, stosunek osiąganych wartości sygnałów funkcjonalnych do ich wartości dopuszczalnych).

Każdy z wyżej wymienionych czynników ma wpływ na szybkość zużywania się elementów silnika, jak również na jego charakterystyki bezpieczeństwa i nie-

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Diagnostyki

<sup>2</sup> Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych – w ramach projektu badawczego KBN nr 5T12D01122

zawodności. Wśród podzespołów silnika, szczególnie wrażliwych na uszkodzenia z powodu bezpośredniego kontaktu z gazami wylotowymi o wysokiej temperaturze są: komora spalania, turbina i układy łożyskowania wirników, koła zębate reduktora oraz układy łożyskowania napędów.

Obiektem diagnostycznym jest układ łożyskowania wirników śmigłowcowego silnika turbinowego. W celu określenia jego modeli matematycznych i diagnostycznych układ łożyskowania wyodrębnia się z silnika biorąc pod uwagę wzajemne oddziaływanie, które można sprowadzić do standardowej relacji obiekt (silnik) – element obiektu (układ łożyskowania).

Otoczeniem układu łożyskowania jest zbiór oddziaływań innych podzespołów silnika i ich otoczenia. Zatem otoczeniem układu łożyskowania są:

- elementy wirnika działające w bezpośrednim kontakcie z powietrzem (sprężarka) i gazami wylotowymi (turbina), które są źródłem drgań przekazywanych na łożyska podpór wałów,
- komora spalania stanowiąca źródło pulsacji ciśnienia gazów na skutek nierównomiernego dostarczania paliwa oraz wysokiej temperatury, od której pochodzą jedne z głównych obciążeń łożysk,
- układ olejowy – ciśnienie, temperatura i masowe natężenie przepływu oleju przez wtryskiwacze, które mają wpływ na procesy zużycia zachodzące w parach kinematycznych układu łożyskowania,
- elementy masowe wirnika – niewyważenie wirnika powoduje pojawienie się reakcji dynamicznych obciążających łożyska,
- obsługa techniczna – utrzymanie drożności kanałów olejowych i wtryskiwaczy oraz prawidłowy montaż wtryskiwaczy zapewniający odpowiednie ukierunkowanie strumienia oleju.

Można ustalić następujące sygnały charakteryzujące otoczenie układu łożyskowania:

- amplituda drgań ( $A$ ) wymuszonych pulsacją ciśnienia gazów wylotowych i niejednorodnością strumienia przepływającego przez łopatki wirników,
- prędkości obrotowe wirników ( $N1$  i  $N2$ ),
- temperatura gazów wylotowych ( $TOT$ ),
- temperatura oleju ( $t_{o1}$ ),
- ciśnienie oleju ( $p_{o1}$ ),
- masowe natężenie przepływu oleju ( $m_{o1}$ ),
- obciążenie łożysk od niewyważenia dynamicznego wirnika ( $R$ ),
- jakość obsługi (regulacja),
- warunki użytkowania (przeciążenia).

Do oceny stanu technicznego układu łożyskowania wirnika stosuje się następujące metody diagnozowania i związane z nimi sygnały diagnostyczne:

- diagnozowanie funkcjonalne – sygnały diagnostyczne wynikają z działania układu łożyskowania,
- diagnozowanie tribologiczne – sygnałami diagnostycznymi są parametry produktów zużycia wytworzonych w podporach wałów wirników,
- diagnozowanie wibroakustyczne – sygnałem diagnostycznym są drgania przekazywane do otoczenia przez podpory wałów wirników.

O skuteczności diagnozowania w dużej mierze decyduje podatność diagnostyczna układu łożyskowania wirników. Określona jest ona przez następujące czynniki:

- wiedzę o konstrukcji układu i danych technicznych łożysk,
- wiedzę o działaniu układu z uwzględnieniem wpływu otoczenia,
- charakterystyki niezawodnościowe,
- dostęp do sygnałów diagnostycznych decydujący o możliwości ich pomiaru i rejestracji.

Zatem można stwierdzić, że niekorzystny wpływ na podatność diagnostyczną układu łożyskowania wirników ma:

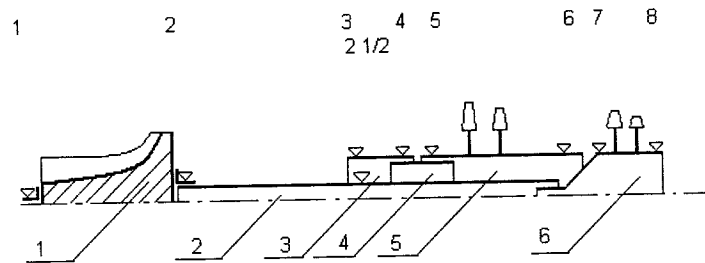
1. Niepełny, fragmentaryczny opis konstrukcji układu. Producent często nie udostępnia użytkownikowi silnika szczegółowych informacji o budowie układu i danych technicznych jego elementów. Problem ten dotyczy szczególnie importowanych silników lotniczych, między innymi silników Allison 250-C20B. Stąd pojawiają się problemy w realizacji optymalnej obsługi takich obiektów.
2. Brak pełnej wiedzy o rozwoju uszkodzenia lub przyczyn nadmiernego zużycia się elementów układu łożyskowania. Brak wystarczającej liczby dostępnych sygnałów diagnozowania funkcjonalnego. W praktyce eksploatacyjnej silników Allison 250-C20B wystąpiły przypadki zniszczenia lub uszkodzenia łożysk wirnika bez uprzedniego wystąpienia dostatecznych zmian przebiegu sygnałów diagnostycznych: funkcjonalnych, tribologicznych i wibroakustycznych.

Powyższe problemy utrudniają diagnozowanie układu łożyskowania. W tej sytuacji powstaje konieczność poszukiwania nowych rozwiązań pozwalających uzyskać nową informację diagnostyczną. Jednym z nich jest pozyskiwanie informacji poprzez zastosowanie kompleksowej metody diagnozowania.

## 2. Układ łożyskowania jako obiekt diagnozowania

### 2.1. Budowa i działanie układu łożyskowania wirników silnika Allison 250-C20B

Układ wirnikowy silnika Allison 250-C20B składa się z wirnika turbiny wysokiego ciśnienia i wirnika turbiny napędowej. Schemat tego układu z zaznaczeniem lokalizacji poszczególnych łożysk przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Układ łożyskowania wirników silnika Allison 250-C20B: 1 - sprężarka, 2 - wał turbiny wysokiego ciśnienia, 3 - koło napędzające reduktora, 4 - wał turbiny napędowej, 5 - turbina napędowa, 6 - turbina wysokiego ciśnienia

W konstrukcji układu zastosowano następujące rodzaje łożysk [8]:

Łożysko nr 1	- kulkowe 10x26x8 mm	- 6898607
Łożysko nr 2	- kulkowe 30x55x (16)13 mm	- 6889093
Łożysko nr 2 1/2	- wałeczkowe 32ODx7 mm	- 23034787
Łożysko nr 3	- wałeczkowe 40x68x14 mm	- 23053297
Łożysko nr 4	- wałeczkowe 40x68x14 mm	- 23053297
Łożysko nr 5	- kulkowe 40x62x (15)x12 mm	- 6871505
Łożysko nr 6	- kulkowe 29x42x9 mm	- 23007202
Łożysko nr 7	- kulkowe 29x42x9 mm	- 23007202
Łożysko nr 8	- kulkowe 20x42x (15)12 mm	- 23031478

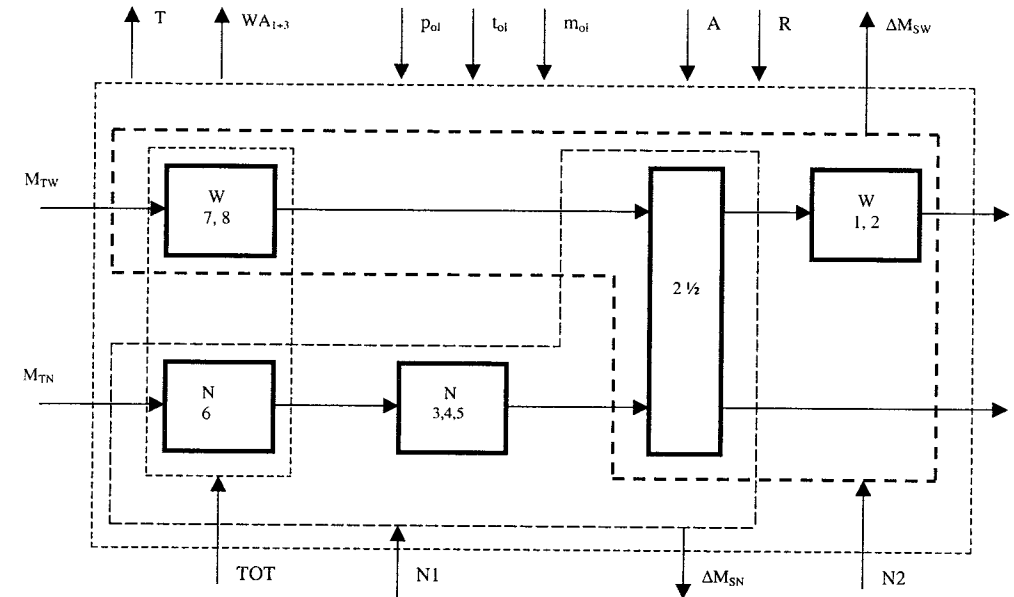
(występują różnice w oznaczeniach typu i rodzaju łożysk. W opracowaniu [3] podano następującą specyfikację łożysk:

Łożysko nr 6 - 6875004 - wałeczkowe,  
 Łożysko nr 7 - 6875004 - wałeczkowe.

Wirnik wysokiego ciśnienia podparty jest na łożyskach numer: 1, 2, 7 i 8. Podporami wirnika turbiny napędowej są łożyska numer: 2 1/2, 3, 4, 5 i 6.

Układ łożyskowania i jego otoczenie przedstawiono na rysunku 2.

### Przesłanki do parametrycznej diagnostyki układu łożyskowania silnika Allison 250-C20B



Rys. 2. Otoczenie układów łożyskowania wirników silnika Allison 250-C20B; gdzie: N1 - prędkość obrotowa wirnika wysokiego ciśnienia, N2 - prędkość obrotowa turbiny napędowej, TOT - temperatura gazów wylotowych,  $M_{TW}$  - moment obrotowy turbiny wysokiego ciśnienia,  $M_{WW}$  - moment obrotowy przekazywany z wału turbiny wysokiego ciśnienia do wirnika sprężarki,  $M_{TN}$  - moment obrotowy turbiny napędowej,  $M_{WN}$  - moment obrotowy przekazywany z wału turbiny napędowej do reduktora,  $p_{oi}$  - ciśnienie oleju,  $t_{oi}$  - temperatura oleju,  $m_{oi}$  - masowe natężenie przepływu oleju przez podpory wałów wirnika,  $A$  - amplituda drgań wymuszonych nierównomiernością ciśnienia powietrza i gazów wylotowych w kanale przepływowym silnika,  $R$  - oddziaływania dynamiczne od niewyważenia wirnika,  $T$  - sygnały diagnozowania tribologicznego,  $WA_1$  - sygnał diagnozowania wibroakustycznego rejestrowany w płaszczyźnie łożysk nr 6 i 7,  $WA_2$  - sygnał diagnozowania wibroakustycznego rejestrowany w płaszczyźnie reduktora,  $WA_3$  - sygnał diagnozowania wibroakustycznego rejestrowany w płaszczyźnie łożyska nr 1,  $\Delta M_{SW}$  - straty momentu obrotowego w układzie łożyskowania wirnika wysokiego ciśnienia,  $\Delta M_{SN}$  - straty momentu obrotowego w układzie łożyskowania wirnika turbiny napędowej

Straty momentów obrotowych w układzie łożyskowania oblicza się z następujących zależności:

$$\Delta M_{SW} = M_{TW} - M_{WW} = \Delta M_{SW/1,2} + \Delta M_{SW/7,8} \quad (1)$$

$$\Delta M_{SN} = M_{TN} - M_{WN} = \Delta M_{SW/6} + \Delta M_{SW/21/2+5} \quad (2)$$

gdzie dodatkowo:

$\Delta M_{SW/m,n}$  – straty momentu obrotowego w poszczególnych łożyskach wirnika wysokiego ciśnienia,

$\Delta M_{SN/m,n}$  – straty momentu obrotowego w poszczególnych łożyskach wirnika turbiny napędowej.

Z rysunku 2 widać, że moment obrotowy turbiny wysokiego ciśnienia  $M_{TW}$  przekazywany jest poprzez wał turbiny do wirnika sprężarki oraz do napędu agregatów zabudowanych na korpusie reduktora. Moment obrotowy turbiny napędowej  $M_{TN}$  przekazywany jest do reduktora. Wały turbin osadzone są na podporach, których podstawowymi elementami są łożyska toczne. Zespół wału i współpracujących z nim łożysk może być traktowany jako układ przenoszenia momentu obrotowego od turbiny napędowej przez reduktor do wirników śmigłowca. Straty momentu obrotowego spowodowane są uszkodzeniami łożysk, będących przyczyną pogorszenia warunków działania, a także na skutek niekorzystnego oddziaływania otoczenia.

Straty momentu obrotowego w układzie łożyskowania można określić następująco:

$$\Delta M_S = M_{SW} - M_{SN} \quad (3)$$

gdzie dodatkowo:

$\Delta M_S$  – całkowite straty momentu obrotowego w układzie łożyskowania.

Sygnałem funkcjonalnym związanym z układem łożyskowania jest czas wybiegu wirnika  $t_w$ . Czas wybiegu jest funkcją strat momentu obrotowego w układzie łożyskowania:

$$t_w = f\left(\frac{1}{\Delta M_S}\right) \quad (4)$$

W prawidłowo działającym układzie łożyskowania wartość strat momentu obrotowego jest niewielka i nie wpływa na działanie układu. W przypadku poważnego uszkodzenia łożyska, straty momentu obrotowego mogą być tak duże, że ruch obrotowy wirnika będzie utrudniony. Całkowite unieruchomienie wirnika w wyniku uszkodzenia (zniszczenia) łożyska oznacza, że wartość strat momentu obrotowego  $\Delta M_S$  w układzie łożyskowania przekracza wartość momentu obrotowego turbiny  $M_{TN}$ . Wzrost tarcia w łożysku, spowoduje wzrost jego zużycia i dodatkowo zmianę wartości sygnałów diagnostycznych: tribologicznych  $T$  i wibroakustycznych  $WA$ .

## 2.2. Charakterystyki niezawodnościowe

W czasie eksploatacji lotniczego silnika turbinowego następuje zużywanie elementów układów tribologicznych, w tym układów łożyskowania wirników. Zużyciu ulegają elementy łożysk stanowiące pary kinematyczne, szczególnie te, które poddane są działaniu wysokiej temperatury i wibracji. Procesy powodujące zużycie (zmęczenie, erozja, korozja, starzenie) zachodzą z różną intensywnością dla różnych elementów układów łożyskowania, zależną od lokalnego oddziaływania otoczenia. Oddziaływania te mają wpływ na przebiegi sygnałów diagnostycznych wykorzystywanych do identyfikacji uszkodzeń i prognozowania zużycia elementów układu. Rozpatruje się następujące relacje:

- między poszczególnymi sygnałami diagnostycznymi (modele matematyczne),
- między uszkodzeniami i generowanymi przez nie sygnałami diagnostycznymi (modele diagnostyczne).

Zbiór typowych uszkodzeń, zbiór wygenerowanych przez nie sygnałów diagnostycznych oraz zbiór sygnałów otoczenia podano w tabeli 1.

Tabela 1.

Układ łożyskowania jako obiekt diagnostyczny

Lp.	Oznaczenie	Opis uszkodzenia	Sygnały związane z elementami układu	Sygnały otoczenia
1	U1	Uszkodzenie łożysk nr 7 i 8	$\underline{T}$ , $\underline{WA}_1$ , $t_w$	$\underline{TOT}$ , $t_{o1}$ , $p_{o1}$ , $m_{o1}$ , $\underline{N1}$
2	U2	Uszkodzenie łożyska nr 6	$\underline{T}$ , $\underline{WA}_1$	$\underline{TOT}$ , $t_{o1}$ , $p_{o1}$ , $m_{o1}$ , $\underline{N2}$
3	U3	Uszkodzenie łożysk nr 1 i 2	$\underline{T}$ , $\underline{WA}_2$ , $\underline{WA}_3$ , $t_w$	$t_{o1}$ , $p_{o1}$ , $m_{o1}$ , $\underline{N1}$
4	U4	Uszkodzenie łożysk nr 3, 4, 5	$\underline{T}$ , $\underline{WA}_1$ , $\underline{WA}_2$	$t_{o1}$ , $p_{o1}$ , $m_{o1}$ , $\underline{N2}$
5	U5	Uszkodzenie łożyska nr 2 ½	$\underline{T}$ , $\underline{WA}_2$	$t_{o1}$ , $p_{o1}$ , $m_{o1}$ , $\underline{N1-N2}$
6	U6	Uszkodzenie łożysk układu	$t_w$ , $\underline{T}$	$\underline{N1}$ , $\underline{N2}$ , $\underline{WA}_1$ , $\underline{WA}_2$ , $\underline{WA}_3$

Dostępne sygnały diagnostyczne zaznaczono podkreśleniem.

## 3. Modele matematyczne układu łożyskowania wirników silnika Allison 250-C20B

Modele matematyczne elementów składowych (łożysk) układów łożyskowania wirników silnika Allison 250-C20B można wyznaczyć w oparciu o równanie stanu:



$$\frac{dx}{dt} = a(w_i)x + b(w_j)u \quad (5)$$

gdzie:

$x$  – współrzędna stanu (sygnały związane z poszczególnymi elementami układu),

$u$  – sygnał sterowania (oddziaływania zewnętrzne na układ),

$w_i$  – parametry stanu układu łożyskowania,

$w_j$  – nastawy regulatora (parametry oddziaływań zewnętrznych),

$a$  – macierz stanu,

$b$  – macierz sterowania.

Stąd układ łożyskowania można opisać następującymi równaniami:

- wirnik wysokiego ciśnienia – łożyska nr 1 i 2:

$$\frac{d\overline{WA}_2}{dt} = a_{1/1,2}\overline{WA}_2 + b_{1/1,2}\overline{p}_{ol} + b_{2/1,2}\overline{t}_{ol} + b_{3/1,2}\overline{m}_{ol} + b_{4/1,2}\overline{N1} \quad (6)$$

$$\frac{d\overline{T}}{dt} = a_{2/1,2}\overline{T} + b_{5/1,2}\overline{p}_{ol} + b_{6/1,2}\overline{t}_{ol} + b_{7/1,2}\overline{m}_{ol} + b_{8/1,2}\overline{N1} \quad (7)$$

$$\frac{d\overline{WA}_3}{dt} = a_{3/1,2}\overline{WA}_3 + b_{9/1,2}\overline{p}_{ol} + b_{10/1,2}\overline{t}_{ol} + b_{11/1,2}\overline{m}_{ol} + b_{12/1,2}\overline{N1} \quad (8)$$

$$\frac{d\overline{t}_w}{dt} = a_{4/1,2}\overline{t}_w + b_{13/1,2}\overline{p}_{ol} + b_{14/1,2}\overline{t}_{ol} + b_{15/1,2}\overline{m}_{ol} + b_{16/1,2}\overline{N1} \quad (9)$$

- wirnik wysokiego ciśnienia – łożyska nr 7 i 8:

$$\frac{d\overline{t}_w}{dt} = a_{1/7,8}\overline{t}_w + b_{1/7,8}\overline{p}_{ol} + b_{2/7,8}\overline{t}_{ol} + b_{3/7,8}\overline{m}_{ol} + b_{4/7,8}\overline{N1} + b_{5/7,8}\overline{TOT} \quad (10)$$

$$\frac{d\overline{T}}{dt} = a_{2/7,8}\overline{T} + b_{6/7,8}\overline{p}_{ol} + b_{7/7,8}\overline{t}_{ol} + b_{8/7,8}\overline{m}_{ol} + b_{9/7,8}\overline{N1} + b_{10/7,8}\overline{TOT} \quad (11)$$

$$\frac{d\overline{WA}_1}{dt} = a_{3/7,8}\overline{WA}_1 + b_{11/7,8}\overline{p}_{ol} + b_{12/7,8}\overline{t}_{ol} + b_{13/7,8}\overline{m}_{ol} + b_{14/7,8}\overline{N1} + b_{15/7,8}\overline{TOT} \quad (12)$$

- wirnik turbiny napędowej – łożysko nr 6:

$$\frac{d\overline{T}}{dt} = a_{1/6}\overline{T} + b_{1/6}\overline{p}_{ol} + b_{2/6}\overline{t}_{ol} + b_{3/6}\overline{m}_{ol} + b_{4/6}\overline{N1} + b_{5/6}\overline{TOT} \quad (13)$$

$$\frac{d\overline{WA}_1}{dt} = a_{23/6}\overline{WA}_1 + b_{6/6}\overline{p}_{ol} + b_{7/6}\overline{t}_{ol} + b_{8/6}\overline{m}_{ol} + b_{9/6}\overline{N1} + b_{10/6}\overline{TOT} \quad (14)$$

- wirnik turbiny napędowej – łożyska nr 3, 4, 5:

$$\frac{d\overline{WA}_1}{dt} = a_{1/(5)}\overline{WA}_1 + b_{1/(5)}\overline{p}_{ol} + b_{2/(5)}\overline{t}_{ol} + b_{3/(5)}\overline{m}_{ol} + b_{4/(5)}\overline{N2} \quad (15)$$

$$\frac{d\overline{T}}{dt} = a_{2/(5)}\overline{T} + b_{5/(5)}\overline{p}_{ol} + b_{6/(5)}\overline{t}_{ol} + b_{7/(5)}\overline{m}_{ol} + b_{8/(5)}\overline{N2} \quad (16)$$

$$\frac{d\overline{WA}_2}{dt} = a_{3/(5)}\overline{WA}_2 + b_{9/(5)}\overline{p}_{ol} + b_{10/(5)}\overline{t}_{ol} + b_{11/(5)}\overline{m}_{ol} + b_{12/(5)}\overline{N2} \quad (17)$$

– łożysko wspólne – nr 2 ½ (2.5):

$$\frac{d\overline{T}}{dt} = a_{1/2.5}\overline{T} + b_{1/2.5}\overline{p}_{ol} + b_{2/2.5}\overline{t}_{ol} + b_{3/2.5}\overline{m}_{ol} + b_{4/2.5}(\overline{N1} - \overline{N2}) \quad (18)$$

$$\frac{d\overline{WA}_2}{dt} = a_{2/2.5}\overline{WA}_2 + b_{5/2.5}\overline{p}_{ol} + b_{6/2.5}\overline{t}_{ol} + b_{7/2.5}\overline{m}_{ol} + b_{8/2.5}(\overline{N1} - \overline{N2}) \quad (19)$$

Uszkodzenie (zużycie) łożysk układu:

$$\frac{dt_w}{dt} = a_{1w}t_w + b_{1w}\overline{N1} + b_{2w}\overline{N2} + b_{3w}\overline{WA}_1 + b_{4w}\overline{WA}_2 + b_{5w}\overline{WA}_3 \quad (20)$$

Współczynniki  $a_{ijk}$  (gdzie  $ijk$  – indeks parametru:  $i$  – kolejne wartości tej samej zmiany stopnia zużycia;  $jk$  – kolejne podzespoły układu łożyskowania) macierzy stanu „a” są związane ze stanem technicznym układu. Można je identyfikować metodami identyfikacji modelu dynamicznego obiektu za pomocą programu Matlab [2, 8] podczas badań diagnostycznych (czas dynamiczny  $t$ ) i obserwować ich zmiany podczas wnioskowania diagnostycznego (czas eksploatacji  $\Theta$ ). Zmiany współczynników  $a_{ijk}$  mogą być bezpośrednio związane z uszkodzeniami U1÷U6.

#### 4. Modele diagnostyczne układów łożyskowania wirników silnika Allison 250-C20B

Modele diagnostyczne otrzymujemy po przekształceniu równań (6)+(20):

- wirnik wysokiego ciśnienia – łożyska nr 1 i 2 (uszkodzenie U3):

$$U_{11}(\Theta) = \frac{\dot{W}\bar{A}_2}{W\bar{A}_2} - b_{1/1,2} \frac{\bar{p}_{ol}}{W\bar{A}_2} - b_{2/1,2} \frac{\bar{t}_{ol}}{W\bar{A}_2} - b_{3/1,2} \frac{\bar{m}_{ol}}{W\bar{A}_2} - b_{4/1,2} \frac{\bar{N}1}{W\bar{A}_2} \quad (21)$$

$$U_{12}(\Theta) = \frac{\dot{T}}{T} - b_{5/1,2} \frac{\bar{p}_{ol}}{T} - b_{6/1,2} \frac{\bar{t}_{ol}}{T} - b_{7/1,2} \frac{\bar{m}_{ol}}{T} - b_{8/1,2} \frac{\bar{N}1}{T} \quad (22)$$

$$U_{13}(\Theta) = \frac{\dot{W}\bar{A}_3}{W\bar{A}_3} - b_{9/1,2} \frac{\bar{p}_{ol}}{W\bar{A}_3} - b_{10/1,2} \frac{\bar{t}_{ol}}{W\bar{A}_3} - b_{11/1,2} \frac{\bar{m}_{ol}}{W\bar{A}_3} - b_{12/1,2} \frac{\bar{N}1}{W\bar{A}_3} \quad (23)$$

$$U_{14}(\Theta) = \frac{\dot{t}_w}{t_w} - b_{13/1,2} \frac{\bar{p}_{ol}}{t_w} - b_{14/1,2} \frac{\bar{t}_{ol}}{t_w} - b_{15/1,2} \frac{\bar{m}_{ol}}{t_w} - b_{16/1,2} \frac{\bar{N}1}{t_w} \quad (24)$$

- wirnik wysokiego ciśnienia – łożyska nr 7 i 8 (uszkodzenie U1):

$$U_{21}(\Theta) = \frac{\dot{t}_w}{t_w} - b_{1/7,8} \frac{\bar{p}_{ol}}{t_w} - b_{2/7,8} \frac{\bar{t}_{ol}}{t_w} - b_{3/7,8} \frac{\bar{m}_{ol}}{t_w} - b_{4/7,8} \frac{\bar{N}1}{t_w} - b_{5/7,8} \frac{T\bar{O}T}{t_w} \quad (25)$$

$$U_{22}(\Theta) = \frac{\dot{T}}{T} - b_{6/7,8} \frac{\bar{p}_{ol}}{T} - b_{7/7,8} \frac{\bar{t}_{ol}}{T} - b_{8/7,8} \frac{\bar{m}_{ol}}{T} - b_{9/7,8} \frac{\bar{N}1}{T} - b_{10/7,8} \frac{T\bar{O}T}{T} \quad (26)$$

$$U_{23}(\Theta) = \frac{\dot{W}\bar{A}_1}{W\bar{A}_1} - b_{11/7,8} \frac{\bar{p}_{ol}}{W\bar{A}_1} - b_{12/7,8} \frac{\bar{t}_{ol}}{W\bar{A}_1} - b_{13/7,8} \frac{\bar{m}_{ol}}{W\bar{A}_1} - b_{14/7,8} \frac{\bar{N}1}{W\bar{A}_1} - b_{15/7,8} \frac{T\bar{O}T}{W\bar{A}_1} \quad (27)$$

- wirnik turbiny napędowej – łożysko nr 6 (uszkodzenie U2):

$$U_{31}(\Theta) = \frac{\dot{T}}{T} - b_{1/6} \frac{\bar{p}_{ol}}{T} - b_{2/6} \frac{\bar{t}_{ol}}{T} - b_{3/6} \frac{\bar{m}_{ol}}{T} - b_{4/6} \frac{\bar{N}2}{T} - b_{5/6} \frac{T\bar{O}T}{T} \quad (28)$$

$$U_{32}(\Theta) = \frac{\dot{W}\bar{A}_1}{W\bar{A}_1} - b_{6/6} \frac{\bar{p}_{ol}}{W\bar{A}_1} - b_{7/6} \frac{\bar{t}_{ol}}{W\bar{A}_1} - b_{8/6} \frac{\bar{m}_{ol}}{W\bar{A}_1} - b_{9/6} \frac{\bar{N}2}{W\bar{A}_1} - b_{10/6} \frac{T\bar{O}T}{W\bar{A}_1} \quad (29)$$

- wirnik turbiny napędowej – łożyska nr 3, 4, 5 (uszkodzenie U4):

$$U_{21}(\Theta) = \frac{\dot{W}\bar{A}_1}{W\bar{A}_1} - b_{1/(5)} \frac{\bar{p}_{ol}}{W\bar{A}_1} - b_{2/(5)} \frac{\bar{t}_{ol}}{W\bar{A}_1} - b_{3/(5)} \frac{\bar{m}_{ol}}{W\bar{A}_1} - b_{4/(5)} \frac{\bar{N}2}{W\bar{A}_1} \quad (30)$$

$$U_{42}(\Theta) = \frac{\dot{T}}{T} - b_{5/(5)} \frac{\bar{p}_{ol}}{T} - b_{6/(5)} \frac{\bar{t}_{ol}}{T} - b_{7/(5)} \frac{\bar{m}_{ol}}{T} - b_{8/(5)} \frac{\bar{N}2}{T} \quad (31)$$

$$U_{43}(\Theta) = \frac{\dot{W}\bar{A}_2}{W\bar{A}_2} - b_{9/(5)} \frac{\bar{p}_{ol}}{W\bar{A}_2} - b_{10/(5)} \frac{\bar{t}_{ol}}{W\bar{A}_2} - b_{11/(5)} \frac{\bar{m}_{ol}}{W\bar{A}_2} - b_{12/(5)} \frac{\bar{N}2}{W\bar{A}_2} \quad (32)$$

- łożysko wspólne – nr 2 1/2 (uszkodzenie U5):

$$U_{51}(\Theta) = \frac{\dot{T}}{T} - b_{1/2,5} \frac{\bar{p}_{ol}}{T} - b_{2/2,5} \frac{\bar{t}_{ol}}{T} - b_{3/2,5} \frac{\bar{m}_{ol}}{T} - b_{4/2,5} \frac{(\bar{N}1 - \bar{N}2)}{T} \quad (33)$$

$$U_{52}(\Theta) = \frac{\dot{W}\bar{A}_2}{W\bar{A}_2} - b_{5/2,5} \frac{\bar{p}_{ol}}{W\bar{A}_2} - b_{6/2,5} \frac{\bar{t}_{ol}}{W\bar{A}_2} - b_{7/2,5} \frac{\bar{m}_{ol}}{W\bar{A}_2} - b_{8/2,5} \frac{(\bar{N}1 - \bar{N}2)}{W\bar{A}_2} \quad (34)$$

Uszkodzenie łożysk układu (uszkodzenie U6):

$$U_{61} = \frac{\dot{t}_w}{t_w} - b_{1w} \frac{\bar{N}1}{t_w} - b_{2w} \frac{\bar{N}2}{t_w} - b_{3w} \frac{W\bar{A}_1}{t_w} - b_{4w} \frac{W\bar{A}_2}{t_w} - b_{5w} \frac{W\bar{A}_3}{t_w} \quad (35)$$

Z równań (21)+(35) wynika, że poszczególne uszkodzenia  $U1+U6$  mogą być zidentyfikowane za pomocą kilku modeli diagnostycznych. Stwarza to dodatkowe możliwości w procesie uściślenia i weryfikacji diagnozy, prognozy i genezy stanu technicznego układu łożyskowania i jego elementów składowych (łożysk).

## Podsumowanie

Otoczeniem układów łożyskowania wirników są sygnały funkcjonalne podzespołów silnika. Sygnały te wynikają z wzajemnego oddziaływania pomiędzy układem łożyskowania a silnikiem. Ich wartości decydują o warunkach pracy łożysk i wpływają na przebieg procesu zużywania zachodzącego w układach tribologicznych.

W celu wyznaczenia modeli matematycznych i diagnostycznych należy układ łożyskowania wirnika wysokiego ciśnienia i turbiny napędowej wyodrębnić z silnika zachowując wzajemne oddziaływania.

Wartości sygnałów funkcjonalnych podzespołów silnika stanowiących otoczenie układów łożyskowania zależą także od czynników tworzących otoczenie silnika. Czynniki te to: obsługa techniczna i regulacja oraz sposób i warunki użytkowania. Istnieje ścisły związek pomiędzy działaniami kształtującymi otoczenie silnika, a przebiegiem zużywania łożysk, określającym ich stan techniczny. Optymalizacja tych działań ma na celu utrzymanie normalnego poziomu zużywania i może być dokładniej zrealizowana poprzez stosowanie diagnozowania kompleksowego: funkcjonalnego, tribologicznego i wibroakustycznego.

## Literatura

1. Ashby W. R.: *Wstęp do cybernetyki*. PWN, Warszawa, 1963.
2. Bubnicki Z.: *Identyfikacja obiektów sterowania*. PWN, Warszawa, 1974.
3. „H+S AVIATION LTD Raport o stanie modelu 250” z dnia 31.03.1999 roku.
4. *Instrukcja Użytkowania i Obsługi Technicznej Silnika Allison Modele 250-C20, -C20B, -C20F, -C20J, -C20W* – dokument nr 10W2. Allison Engine Company Inc1995.
5. Kotowski A., Lindstedt P.: *Metoda wyznaczania parametrów diagnostycznych na podstawie mierzonych sygnałów diagnostycznych oparta na rekurencyjnych neuronach*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn, Z. 8 (2001).

6. Lindstedt P.: *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*. ASKON, Warszawa, 2002.
7. Lindstedt P., Borowczyk H., Magier J.: *Diagnostyka silnika śmigłowego w inżynierjno-lotniczym otoczeniu*. Prace Naukowe ITWL, Z. 15 (2003).
8. Manerowski J.: *Identyfikacja modeli dynamiki ruchu sterowanych obiektów latających*. ASKON, Warszawa, 1999.
9. *Model 250-C20 Series*. Illustrated Parts Catalog. Pub. No. 10W4. 13ed. Rev. 1, Dated July 15, 1998.
10. *Śmigłowiec PZL Kania. Instrukcja Obsługi Technicznej. Cz. 1. Płatowiec*. PZL Świdnik S.A.
11. Wiener N.: *Cybernetyka czyli sterowanie i komunikacja w zwierzęciu i maszynie*. PWN, Warszawa, 1971.

### THE PREMISES TO THE PARAMETRICAL DIAGNOSTICS OF THE BEARING SYSTEM OF THE ENGINE ALLISON 250-C20B

**Abstract:** In this paper the description of the bearing system of the rotor of the engine Allison 250-C20B (turbine helicopter's engine) with taking its environment into consideration is presented. The environment of this system are all external factors which have the influence on its work. Among these factors can be distinguished factors depended on the operation of the engine' elements co-operated with the bearing system of the rotor and factors depended on the quality of the technical service. The environment of the bearing system has a influence on its process of the wearing which is estimated on the basis of the diagnostic signals of the environment and the system. The diagnostic models of the system which are relationships between the health/maintenance status of the system and the signals of the system and its environment, are also showed.

Paweł Lindstedt<sup>1</sup>, Paweł Ostapkowicz<sup>1</sup>

**SYGNAŁY  
SŁABYCH INTERAKCJI MIĘDZYOBIEKTOWYCH  
JAKO NOWA INFORMACJA W PROCESIE  
DIAGNOZOWANIA WYCIEKÓW Z RUROCIĄGÓW**

**Streszczenie:** Praca dotyczy zagadnienia diagnozowania wycieków z rurociągów. Rurociągi są obiektami trudnymi do diagnozowania, zwłaszcza w stanie z wyciekami. Powstaje zatem problem polepszania ich podatności diagnostycznej, która ma podstawowy wpływ na skuteczność realizowanej działalności diagnostycznej. Polepszanie podatności diagnostycznej stanowi ideę nowo opracowywanej metody, nazwanej metodą słabych interakcji międzyobiektywnych. Polega ona na dołączeniu do badanego obiektu dodatkowego korekcyjnego obiektu badawczego i pozyskiwaniu w ten sposób nowej informacji diagnostycznej. W pracy zaprezentowano przebiegi nowych sygnałów diagnostycznych, które uzyskano w trakcie badań eksperymentalnych na specjalnie wybudowanym stanowisku modelowym oraz przedstawiono koncepcję systemu diagnostycznego, wykorzystującego nowo pozyskiwane informacje.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka techniczna, podatność diagnostyczna, rurociągi, wycieki

### Wstęp

Diagnozowanie wycieków z instalacji hydraulicznych jest istotnym zagadnieniem związanym z ich eksploatacją. Nabiera ono szczególnego znaczenia w przypadku rurociągów naftowych, gdzie wycieki mogą prowadzić do powstawania dużych strat ekonomicznych związanych z utratą tłoczonego produktu i usuwaniem skutków skażenia środowiska oraz powodować zagrożenie życia ludzkiego. Proces diagnozowania ma za zadanie określić miejsce i oszacować wielkość wycieku.

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Diagnostyki, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

Obecnie diagnostyka wycieków z rurociągów jest już unormowana prawnie. Zgodnie ze standardami obowiązującymi w krajach Unii Europejskiej rurociągi magistralne powinny być wyposażone w systemy pomiarowo-informatyczne, pozwalające na pełną kontrolę procesu tłoczenia. W Niemczech w 2000 roku przepisy te obostrzono wprowadzając normę TRbF 301, która nakłada obowiązek wyposażenia rurociągu w dwa niezależne systemy wykrywania i lokalizacji nieszczelności. Problem ten w niedalekiej przyszłości dotyczyć będzie sieci rurociągów naftowych w Polsce, której poszczególne odcinki nie posiadają jeszcze odpowiednich systemów diagnostycznych.

Rurociągi, ze względu na duże rozmiary oraz złożoną dynamikę procesu tłoczenia, są obiektami o małej podatności diagnostycznej. Ich diagnozowanie, w tym lokalizacja i identyfikacja wycieków, jest trudne i skomplikowane. Nadal poszukuje się nowych metod detekcji wycieków. Efektem tych poszukiwań jest proponowana metoda, nazwana **metodą słabych interakcji międzyobiektowych**.

Zanim nowa metoda znajdzie ewentualne zastosowanie na rzeczywistych obiektach, wskazane jest przeprowadzenie jej weryfikacji, najczęściej w kilku etapach. Jednym z etapów może być weryfikacja na fizycznym modelu zastępczym obiektu rzeczywistego. Podobne postępowanie zostało przyjęte w przypadku proponowanej metody słabych interakcji międzyobiektowych. Jej eksperymentalna weryfikacja zostanie przeprowadzona na specjalnie wybudowanym stanowisku z rurociągiem modelowym. Konstrukcja stanowiska umożliwi dowolne symulowanie wartości i miejsc wycieków. Założono, że dla obiektu modelowego zostanie stworzony system diagnostyczny oparty o stosowane obecnie metody i polepszy się jego efektywność wykorzystując nowe informacje w postaci sygnałów słabych interakcji międzyobiektowych.

## 1. Metody diagnozowania wycieków

Metody diagnozowania wycieków z rurociągów dzielą się na dwie grupy. Pierwszą grupę stanowią metody zewnętrzne, pozwalające na bezpośrednie wykrycie miejsca wycieku. Wymienić tu należy metody z użyciem specjalizowanych urządzeń, np. wykorzystujące techniki akustyczne, dielektryki, światłowody, termografię i metody organoleptyczne, np. regularne patrole z psami wzdłuż rurociągu. Druga grupa metod to metody wewnętrzne. Wykrycie miejsca wycieku z ich użyciem następuje w sposób pośredni (analityczny), w oparciu o dokonany pomiar wewnętrznych parametrów procesu przepływu (np. ciśnienia, natężenia przepływu, temperatury). Pozwalają one ponadto oszacować wielkość wycieku. Istotne jest również to, że metody wewnętrzne dają szansę na wykrycie sztucznych wycieków

z rurociągów (kradzieży), do których dochodzi o wiele częściej niż w przypadku wycieków naturalnych (np. skutek korozji, pęknięć zmęczeniowych).

W oparciu o metody buduje się systemy detekcji wycieków, których zadaniem powinno być jak najszybsze wykrycie wycieku, jego dokładna lokalizacja i identyfikacja. Ponadto taki system diagnostyczny powinna cechować niska cena budowy i eksploatacji oraz wysoka wrażliwość na wyciek.

Prace nad metodami i systemami, które pozwoliłyby na szybką oraz dokładną lokalizację i identyfikację wycieku, prowadzone są na świecie od przeszło 20 lat. Okazuje się jednak, że budowa wysokiej klasy systemu zapewniającego dużą dokładność i szybkość wykrycia wycieku jest przedsięwzięciem bardzo drogim i skomplikowanym. Wymaga on bowiem instalacji na rurociągu wielu drogich urządzeń pomiarowych. Alternatywą pomiędzy dokładnością i szybkością wykrywania miejsca i wielkości wycieku, a ponoszonymi kosztami, mogą być zatem metody wewnętrzne. Korzystają one z sygnałów elementarnych urządzeń pomiarowych instalowanych powszechnie na rurociągach. Takimi sygnałami jest mierzone ciśnienie, natężenie przepływu i temperatura. Rozwiązaniem optymalnym byłoby, aby pomiar tych wielkości był dokonywany w jak najmniejszej ilości punktów, a najlepiej tylko na początku i na końcu rurociągu. Do takich metod zaliczyć można stosowaną obecnie metodę gradientową, metodę korelacyjną i metodę opartą na śledzeniu czoła fali rozprężeniowej. Metody te zostały opisane poniżej.

**Metoda gradientowa** polega na lokalizacji miejsca wycieku na podstawie wyznaczonych gradientów ciśnienia w stanach ustalonych bez wycieku i z wyciekami. Ponieważ poszukuje się punktu przecięcia dwóch półprostych o zbliżonych nachyleniach, aby uniknąć wrażliwości obliczeń na błędy pomiarowe, zamiast gradientów ciśnienia używa się ich przyrostów, definiowanych następująco:  $z < z_L : dg_p = g_{p1} - g_o$  oraz  $z > z_L : dg_k = g_{k1} - g_o$ .

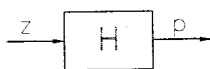
**Metoda korelacyjna** oparta jest także na wyznaczonych gradientach ciśnienia dla stanu bez wycieku i z wyciekami oraz ich przyrostach. Pojawienie się wycieku powoduje, że  $dg_p > 0$ , a  $dg_k < 0$ . Zatem ich iloczyn jest ujemny. W przypadku małych wycieków w warunkach pracy nieustalanej, skutek zakłóceń w postaci zmian ciśnienia zasilania i natężenia przepływu, iloczyn ten może być jednak chwilami dodatni. Stąd warunek ujemności iloczynu przyrostów gradientów ciśnienia zastępuje się warunkiem silniejszym, który zapewni odfiltrowanie zakłóceń. Warunkiem tym jest warunek ujemności funkcji korelacji wzajemnej obydwu przyrostów gradientów ciśnienia. Przesunięcie wartości funkcji w obszar wartości ujemnej wykrywa się wprowadzając sumę korelacji wzajemnych, która, gdy przekroczy określoną wartość progową uwzględniającą występujące zakłócenia, informuje o pojawieniu się wycieku.

**Metoda oparta na śledzeniu czoła fali rozprężeniowej** wykorzystuje wspomniane zjawisko powstawania i rozchodzenia się fali rozprężeniowej ciśnienia. Fala rozchodzi się z prędkością dźwięku. Jej wartość zależy głównie od rodzaju parametrów tłoczonego czynnika (gęstości, współczynnika ściśliwości) i w niedużym stopniu od parametrów rurociągu. Za czołem fali rozprężeniowej ciśnienie w rurociągu maleje o tym mniejszą wartość, im większa jest odległość danego przekroju od miejsca wycieku. Miejsce wycieku określa się w oparciu o obserwację zmian wartości ciśnienia  $dp$  pojawiających się najpierw w punkcie pomiaru najbliżej położonym od miejsca wycieku  $z_L$ , a następnie, z pewnym opóźnieniem, w kolejno odległych punktach pomiarowych.

Pomimo, iż metody diagnozowania wycieków stosowane są często jednocześnie, wzajemnie uzupełniając się i weryfikując (tworząc w ten sposób systemy diagnostyczne), pozwalają identyfikować jedynie znaczne wycieki i lokalizować je ze zgrubną dokładnością. W przypadku wymienionych metod, ich praktyczna wrażliwość na wyciek średnio wynosi 5÷7 % wartości przepływu, na co ma wpływ trudna podatność diagnostyczna rurociągu.

## 2. Metoda słabych interakcji międzyobiektywnych

Proponowana metoda opiera się na zastosowaniu układów korekcyjnych. Korekcja realizowana jest przez dołączenie do badanego układu, elementów automatyki nazywanych korektorami. Korektor musi być dobrany, zgodnie z zasadami automatyki, do parametrów konstrukcyjnych badanego obiektu. Każda zmiana parametrów konstrukcyjnych obiektu (np. wskutek uszkodzenia lub zużycia) powoduje zmianę funkcjonowania korektora (przebiegu i kształtu sygnału) [7].



**Rys. 1.** Diagnostycznie niepodatny obiekt techniczny:  $z$  – zakłócenie (np. wyciek);  $H$  – transmitancja;  $p$  – sygnał wyjściowy (np. ciśnienie)

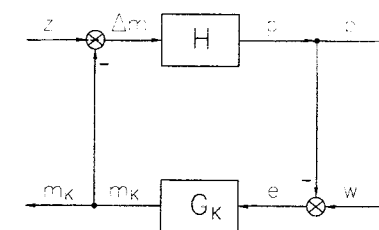
W przypadku rurociągów o zmianie parametrów obiektu można mówić np. w stanie pracy z wyciekem. Na skutek tej zmiany, w praktyce eksploatacyjnej proces diagnozowania nie może być zrealizowany ze względu na brak dostatecznej informacji o obiekcie (zmianie jego transmitancji  $H = \frac{p}{z}$ ) oraz o otoczeniu (zakłóceniach działających na obiekt  $z$ , którym jest wyciek) – rysunek 1. Dysponuje się zatem jednym równaniem, w którym wielkość  $p$  (ciśnienie w rurociągu) jest znana, a dwie wielkości

$H$  i  $z$  nie są znane.

Problem ten można rozwiązać, opierając się na wywoływaniu słabych międzyobiektywnych interakcji między obiektem badanym (rurociągiem) o transmitancji  $H$  i obiektem badawczym (korektorem) o znanej transmitancji  $G_K$ , co zostało pokazane na rysunku 2. Dla układu otrzymuje się zależności (1) i (2).

$$p = H(z - m_K) \quad (1)$$

$$m_K = G_K w - G_K H z + G_K H m_K \quad (2)$$

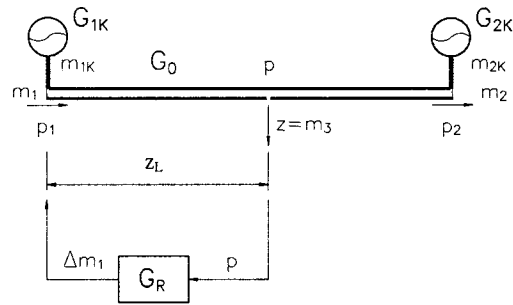


**Rys. 2.** Podatny diagnostycznie obiekt techniczny:  $H$  – obiekt badany (rurociąg);  $G_K$  – obiekt badawczy (korektor);  $z$  – zakłócenie (wyciek);  $w$  – wartość zadana do korektora;  $e$  – uchyb regulacji;  $m_K$  – sygnał wyjściowy z korektora

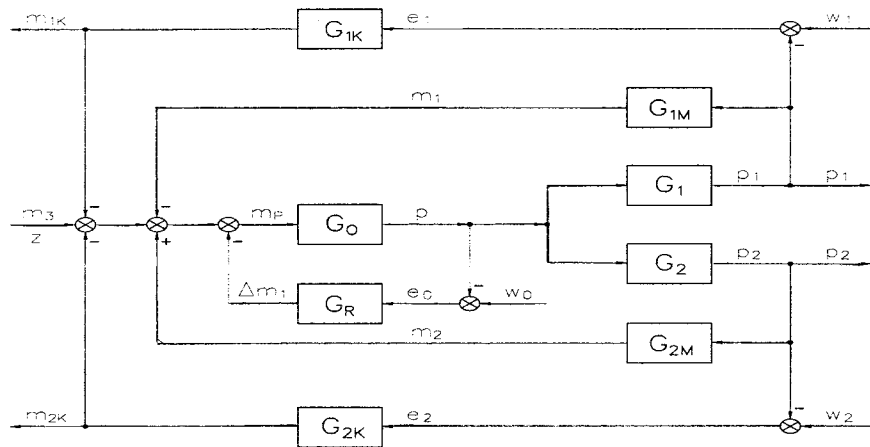
Jeżeli wiadomo, że sygnałem zadanym do korektora  $w$  jest wartość sygnału wyjściowego  $p$  w chwili poprzedniej, to układ równań (1) i (2) jest rozwiązywalny. Można zatem wyeliminować nieznane zakłócenie  $z$ , a następnie określić zmiany zachodzące w obiekcie  $H$  na podstawie zmian parametrów w korektorze  $G_K$ .

Praktyczna realizacja pomysłu polega na dołączeniu do rurociągu, na początkowym i końcowym jego odcinku, korektorów badawczych. Układy pomiarowe korektorów mierzą fluktuację przepływu pomiędzy badanym obiektem a korektorem. Pomiar ten dokonywany jest na elemencie typu kryza z użyciem czujnika różnicy ciśnień. Konstrukcja korektora umożliwi nastawę jego punktu pracy i dostrajanie do sygnału z rurociągu. Schemat rurociągu z dołączonymi korektorami do wywoływania słabych międzyobiektywnych interakcji przedstawiono na rysunku 3.

Rurociąg z dołączonymi korektorami (rys. 3) można sprowadzić do układu automatycznej regulacji (rys. 4).

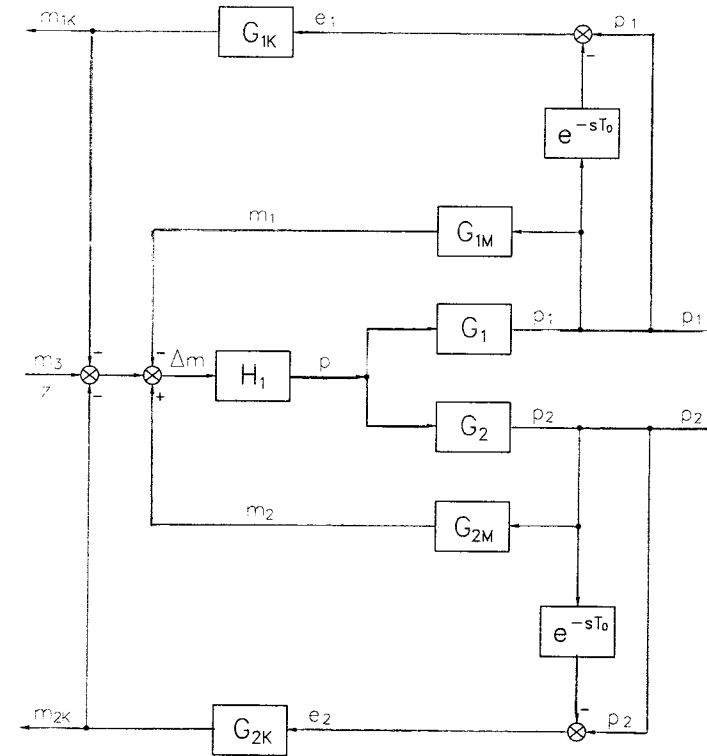


**Rys. 3.** Schemat funkcjonalny rurociągu z dołączonymi obiektami badawczymi (korektorami):  $p$  - ciśnienie w rurociągu;  $m_1, m_2$  - masowe natężenie przepływu;  $m_{1K}, m_{2K}$  - masowe natężenie przepływu do (od) korektora;  $m_3$  - masowe natężenie wycieku;  $\Delta m_1$  - masowe natężenie od regulatora;  $G_0$  - transmitancja obiektu badanego;  $G_R$  - transmitancja regulatora ciśnienia  $p$ ;  $G_{1K}, G_{2K}$  - transmitancja obiektów badawczych (korektorów)



**Rys. 4.** Schemat blokowy rurociągu jako układu automatycznej regulacji:  $m_p$  - masowe natężenie przepływu od stacji pomp;  $G_0$  - transmitancja obiektu;  $G_R$  - transmitancja regulatora ciśnienia;  $G_1, G_2$  - transmitancja przetworzenia ciśnienia  $p$  na  $p_1$  i  $p_2$  (są zależne od  $l$ );  $G_{1M}, G_{2M}$  - transmitancje przetwarzania ciśnienia  $p_1$  i  $p_2$  na  $m_1$  i  $m_2$ ;  $G_{1K}, G_{2K}$  - transmitancje korektorów;  $w_1, w_2$  - sygnały zadane do korektorów

Stosując zasady algebry przekształcania schematów blokowych, układ z rysunku 4 można sprowadzić do następującej postaci (rys. 5).



**Rys. 5.** Model dynamiczny rurociągu z wyciekami:  $H_1$  - transmitancja rurociągu z układem regulacji ciśnienia  $p$

Model dynamiczny (rys. 5) w pełni odzwierciedla pracę rurociągu. Zakłócenie, którym jest wyciek  $m_3$  będzie identyfikowane z wykorzystaniem tylko dostępnych sygnałów:  $m_{1K}, m_{2K}, p_1, p_2, m_1, m_2$  oraz znanych transmitancji  $G_{1K}, G_{2K}, G_{1M}, G_{2M}$  oraz  $G_1, G_2$ . W procesie określania  $m_3$  dąży się do wyeliminowania zawsze nieznannej transmitancji  $H_1$ , która to opisuje niestacjonarną, nieliniową część rurociągu.

Z modelu symulacyjnego wyznacza się:

$$\Delta m = m_3 - m_1 - m_{1K} + m_2 - m_{2K} \quad (3)$$

$$m_3 = \Delta m + m_1 + m_{1K} - m_2 + m_{2K} \quad (4)$$

$$m_3 = p \frac{1}{H_1} + p_1 G_{1M} + m_{1K} - p_2 G_{2M} + m_{2K} \quad (5)$$

W wyniku kolejnych przekształceń otrzymuje się kilka zależności, w tym (6).

$$m_3 = m_{1K} \frac{m_1 - m_2}{m_{1K} - m_{2K}} \left( \frac{G_{1K} - G_{2K}}{G_{1K}} \right) - m_{1K} \frac{G_{1K} + G_{2K}}{G_{1K}} - m_{1K} \frac{1}{G_O G_{1K}} \quad (6)$$

Otrzymana zależność pozwala identyfikować wyciek na podstawie nowej, dotychczas nie wykorzystywanej informacji, którą stanowią sygnały  $m_{1K}$ ,  $m_{2K}$ . Następnie, znając uściśloną wartość  $m_3$ , można przystąpić do dokładnej lokalizacji wycieku na podstawie wartości sygnałów  $m_{1K}$ ,  $m_{2K}$ .

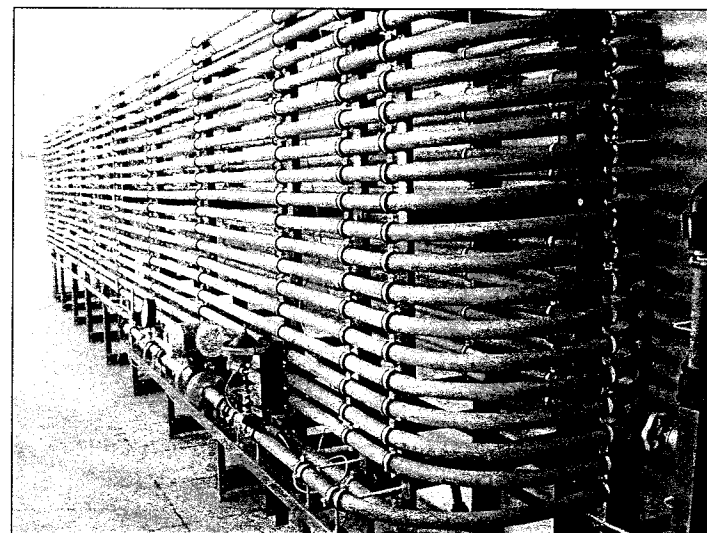
Należy podkreślić, iż wprowadzenie korektorów i ich praca nie będzie wpływać na poprawne działanie rurociągu.

### 3. Stanowisko modelowe

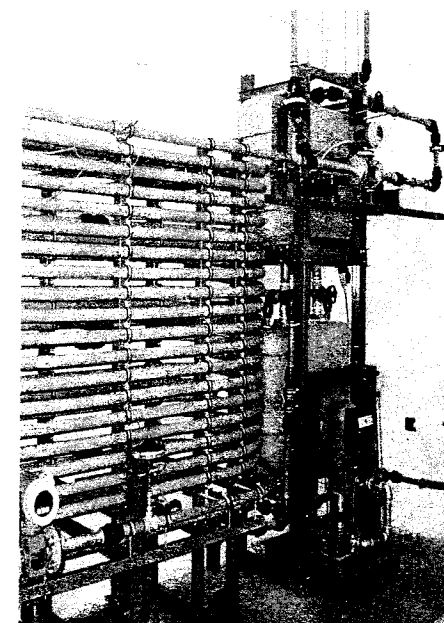
Stanowisko modelowe zostało pokazane na rysunkach 6 i 7. Składa się ono z rurociągu modelowego o długości 380 metrów i średnicy wewnętrznej  $d = 34$  mm, pompy o zmiennym wydatku oraz układu zbiorników. Tłoczonym czynnikiem, zamiast produktu naftowego, będzie odpowiednio przygotowana chemicznie woda.

Na rurociągu zainstalowano, standardowe dla tego typu obiektu, przyrządy i czujniki pomiarowe oraz zamontowano korektory badawcze i kraniki upustowe do symulacji wycieków. Informacje na ten temat zostały zestawione w tabeli 1. Wartość symulowanego wycieku, regulowana za pomocą pokrętki kranika upustowego, może wynosić  $0 \pm 20\%$  wielkości przepływu. Do jego dokładnego pomiaru może być użyty przepływomierz.

Wartość podstawowych parametrów przepływu, dla określonych wielkości wydatku pompy, zestawiono w tabeli 2.



Rys. 6. Ogólny widok rurociągu modelowego



Rys. 7. Widok układu pompującego oraz miejsc zamontowania przepływomierzy i korektorów badawczych



Tabela 1.

Rozmieszczenie przyrządów i czujników pomiarowych

Pomiar	Współrzędna punktu wzdłuż rurociągu [m]
Przepływ (przełykiomierze elektromagnetyczne)	-2,5; 380,5
Ciśnienie (czujniki ciśnienia)	1; 75; 141; 281; 335; 378
Temperatura (termometry)	wlot; wylot
Sygnały międzyobiektywnych interakcji (korektory)	-2; 380

Tabela 2.

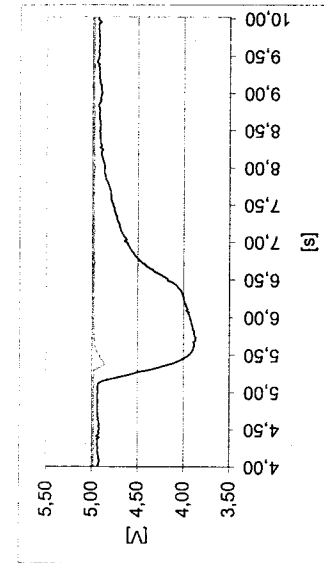
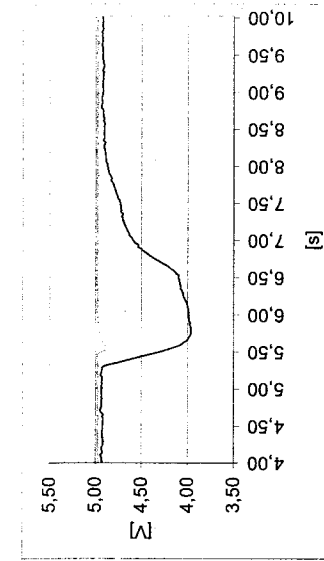
Charakterystyka rurociągu:  $p_{01}, p_{02}$  – wartość ciśnienia w punktach o współrzędnej 1 m i 378 m;  $p_{hp}$  – strata ciśnienia wywołana różnicą wysokości między początkiem i końcem rurociągu;  $p_{smp}$  – suma miejscowych strat ciśnienia na łukach;  $Q_0$  – wielkość przepływu;  $v_0$  – prędkość przepływu;  $\lambda$  – współczynnik tarcia nie zawierający w sobie strat miejscowych;  $Re$  – liczba Reynoldsa

Pompa [%]	$p_{01}$ [kPa]	$p_{02}$ [kPa]	$p_{01} - p_{02}$ [kPa]	$p_{hp}$ [kPa]	$p_{smp}$ [kPa]	$Q_0$ [l/min]	$v_0$ [m/s]	$\lambda$	$Re$
50	200	18	182	13	7	63,4	1,16	0,0215980	39295
60	287	24	263	13	10	78,8	1,45	0,0206550	48840
70	382	32	350	13	14	93,6	1,72	0,0197003	58013
80	495	42	453	13	20	109,4	2,01	0,0187930	67806
90	652	53	599	13	27	128,4	2,36	0,0181432	79582
100	822	63	759	13	36	147,6	2,71	0,0174485	91482

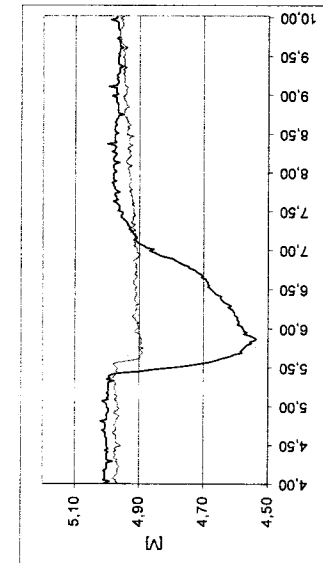
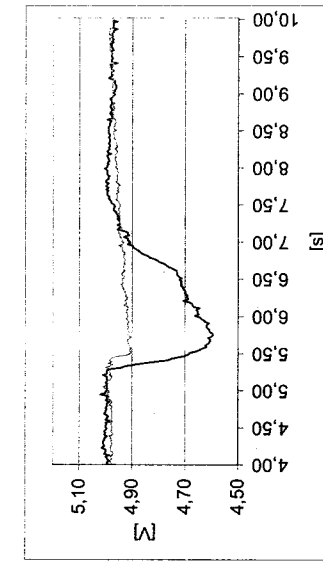
#### 4. Sygnały słabych interakcji międzyobiektywnych

Na rysunkach 8-11 pokazano zarejestrowane przebiegi sygnałów na korektorach badawczych, w czasie pracy obiektu z 90% wydatkiem pompy, uzyskane na etapie uruchamiania instalacji.

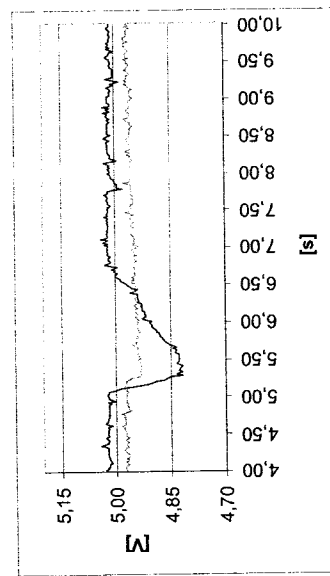
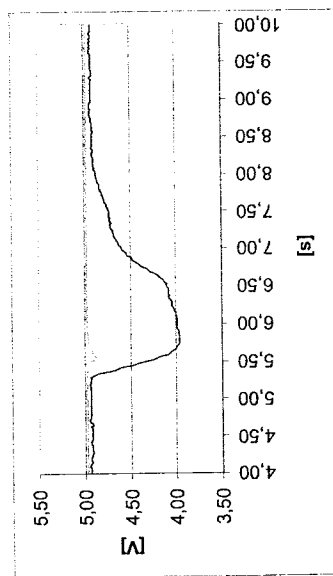
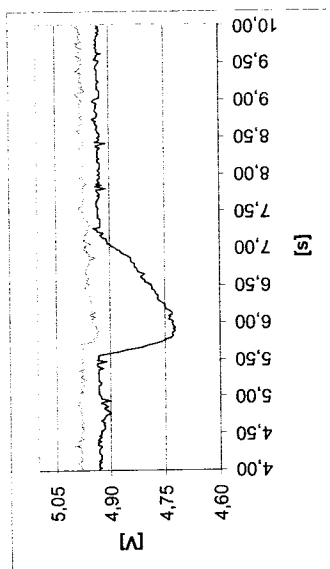
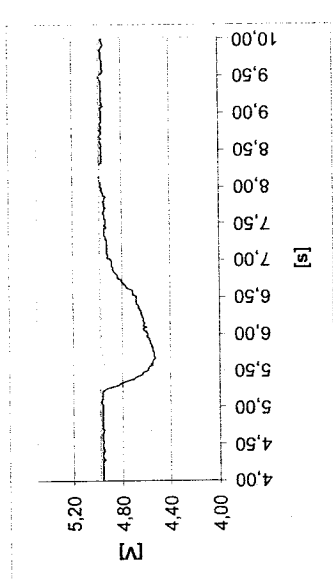
Można zaobserwować reakcję korektorów na wycieki rzędu 4% wielkości przepływu. Rokuje to, po dokładnym ustaleniu parametrów pracy korektorów i badaniu relacji pomiędzy tymi sygnałami a wyciekami, uzyskanie identyfikacji wycieku na poziomie lub poniżej 3% wielkości przepływu, co odpowiada obszarowi zainteresowania nowo opracowywanej metody i tworzonego systemu.



Rys. 8. Przebiegi sygnałów międzyobiektywnych interakcji dla przyjętych warunków tłoczenia przy wycieku rzędu 16% i 8% wielkości dla identycznych wartości ciśnienia dla korektorów (dysza na korektorze 1 o średnicy 1 [mm], na korektorze 2 o średnicy 2,5 [mm])



Rys. 9. Przebiegi sygnałów międzyobiektywnych interakcji dla przyjętych warunków tłoczenia przy wycieku rzędu 8% wielkości przepływu oraz przy dwukrotnym zmniejszeniu ciśnienia na korektorze 2 (dysza na korektorze 1 o średnicy 1 [mm], na korektorze 2 o średnicy 0,5 [mm])

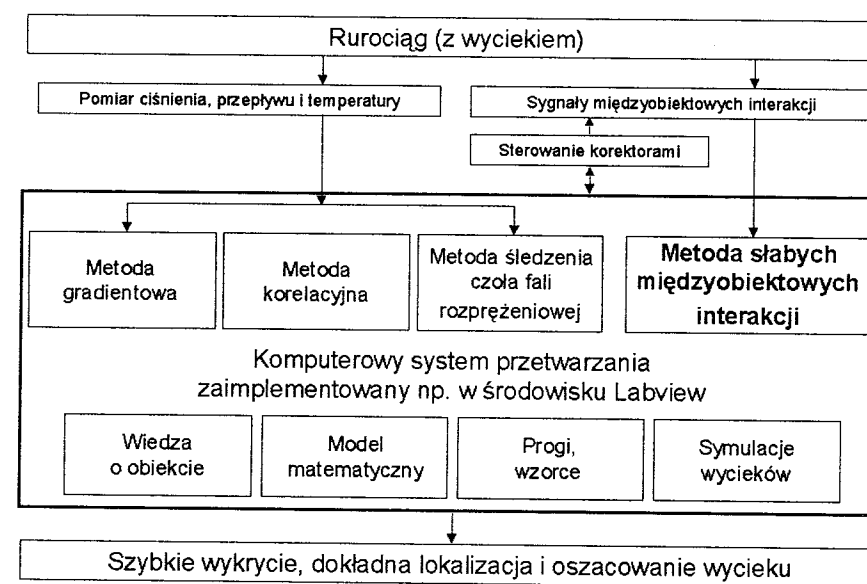


Rys. 10. Przebiegi sygnałów międzyobjektowych interakcji dla przyjętych warunków tóczenia przy wycieku rzędu 8% wielkości przepływu oraz przy dwukrotnym zmniejszeniu ciśnienia na korektorze 2 (dysza na korektorze 1 o średnicy 1 mm, na korektorze 2 o średnicy 2,5 mm)

Rys. 11. Przebiegi sygnałów międzyobjektowych interakcji dla przyjętych warunków tóczenia przy wycieku rzędu 4% wielkości przepływu oraz przy dwukrotnym zmniejszeniu ciśnienia na korektorze 2 (dysza na korektorze 1 o średnicy 1 mm, na korektorze 2 o średnicy 0,5 mm)

## 5. Koncepcja opracowywanego systemu lokalizacji i identyfikacji wycieków

Zakłada się, że tworzony system ma być uruchomiony na opisanym stanowisku badawczym. W systemie zostaną jednocześnie wykorzystane, stosowane obecnie, metody: metoda gradientowa, metoda korelacyjna i metoda oparta na śledzeniu czoł fali rozprężeniowych oraz metoda słabych międzyobjektowych interakcji z nową informacją w postaci jej sygnałów. Dodatkowo zostaną wykorzystane informacje zebrane w trakcie eksperymentalnych badań symulacyjnych oraz wyniki obliczeń modelowych obiektu. Wiedza ta będzie wykorzystana do tworzenia nowych procedur i dokładnego szacowania miejsca i wielkości wycieku, ustalanych zgrubnie w oparciu o obecnie stosowane metody. Implementacja systemu zostanie prawdopodobnie wykonana w środowisku LABVIEW. Schemat systemu został pokazany na rysunku 12.



Rys. 12. Koncepcja systemu diagnostycznego

Można przypuszczać, że tworzony system pozwoli na identyfikację wycieku na poziomie 3% wielkości przepływu i procentową poprawę stopnia lokalizacji w porównaniu z dotychczasowymi metodami.

Kolejnym planowanym etapem działań będzie rozwiązanie problemu odniesienia wyników uzyskanych na stanowisku badawczym oraz podjęcie ewentualnej próby przeniesienia tworzonego systemu i jego adaptacji na obiekt typu rzeczywistego.

## Wnioski

Wstępne wyniki badań potwierdzają, że identyfikacja i lokalizacja wycieków, prowadzona obecnie stosowanymi metodami, będzie mogła być polepszona dzięki nowym informacjom w postaci sygnałów **słabych interakcji międzyobiektowych**.

Dalsze prace nad projektem należy prowadzić dwutorowo, tzn. dokładnie ustalić parametry pracy korektorów i badać relacje między tymi sygnałami, a wyciekami oraz skupić się nad tworzeniem i dopracowaniem procedur diagnozowania wycieków.

Pozytywne wyniki dalszych badań będą podstawą do podjęcia prac nad wdrożeniem opracowywanej metody na obiektach rzeczywistych.

## Literatura

1. **Antoniewicz J.:** *Automatyka*, WNT, Warszawa, 1975.
2. **Billman L., Isermann R.:** *Leak detection methods for pipelines*. Automatica, vol. 23, no. 3, 1987, pp. 381-385.
3. **Chądryński M. A.:** „Wielka rura” w Polsce. *Rurociągi* 2001, nr 1-2.
4. **Duckworth R. A.:** *Mechanika płynów*. WNT, Warszawa 1983.
5. **Grabarczyk Cz.:** *Przepływy cieczy w przewodach*. Envirotech, Warszawa, 1997.
6. **Hegel R., Zakrzewski J.:** *Miernictwo dynamiczne*. WNT, Warszawa, 1984.
7. **Lindstedt P.:** *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*. Askon, Warszawa, 2002.
8. **Lindstedt P.:** *Formowanie sygnałów diagnostycznych*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, 1997, nr 2.
9. **Lindstedt P.:** *Element korekcyjny jako źródło informacji diagnostycznej*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, 1995, nr 2.
10. **Lindstedt P.:** *Słabe interakcje w procesie diagnozowania długich rurociągów naftowych i gazowych*. 6<sup>th</sup> International Conference AIRDIAG'99, ITWL, Warszawa, 2000.

11. **Lindstedt P.:** *Słabe interakcje w procesie diagnozowania wycieków z układów hydraulicznych*. Prace Naukowe ITWL, Zeszyt 10, 2000.
12. **Lindstedt P., Ostapkowicz P.:** *Słabe międzyobiektowe interakcje w procesie diagnozowania wycieków z długich rurociągów*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn Z. 10, 2002.
13. **Lindstedt P., Ostapkowicz P.:** *Słabe międzyobiektowe interakcje w procesie polepszania podatności diagnostycznej długich rurociągów*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej nr 139, Budowa i Eksploatacja Maszyn z. 8, 2001.
14. **Lindstedt P., Ostapkowicz P.:** *Stanowisko modelowe do identyfikacji i lokalizacji wycieków z długich rurociągów naftowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej nr 139, Budowa i Eksploatacja Maszyn Z. 8, 2001.
15. **Niederliński A.:** *Systemy komputerowe automatyki przemysłowej*. Tom 2, WNT, Warszawa, 1985.
16. Norma PN-76/M-34034: *Rurociągi – zasady obliczeń strat ciśnienia*.
17. **Sobczak R.:** *Detekcja wycieków z rurociągów magistralnych cieczy*. Nafta Gaz, 2001, nr 2, s. 97-107.
18. **Sobczak R.:** *Gradientowa metoda lokalizacji nieszczelności w rurociągach magistralnych*. Przemysł Chemiczny, 2002, nr 10, s. 651-655.
19. **Sobczak R.:** *Lokalizacja wycieków z rurociągów*. Pomiar Automatyka Robotyka, 1999, nr 3, s. 11-16.
20. **Sobczak R., Fijolek F.:** *System mikroprocesorowy do wykrywania i lokalizacji wycieków z rurociągów magistralnych cieczy*. Automation'98, s. 85-93.
21. **Sobczak R.:** *Wykrywanie i lokalizacja wycieków z rurociągów przesyłowych cieczy*. *Rurociągi*, 1998, nr 3.
22. **Żółtowski B., Ćwik Z.:** *Leksykon diagnostyki technicznej*. Wydaw. Uczel. ATR, Bydgoszcz, 1996.

## SIGNALS OF THE WEAK INTEROBJECTS INTERACTIONS AS A NEW INFORMATION IN PROCESS OF DIAGNOSING OF THE LEAKAGES FROM PIPELINES

**Abstract:** This work concerns a problem of diagnosing of the leakages from pipelines. The pipelines are difficult objects to diagnosing, especially in a state with a leakage. Therefore, there is a problem of improving their diagnostic susceptibility, which has a basic influence on the efficacy of the executed diagnostic activity. The improving of the diagnostic susceptibility is a idea of newly elaborated method, named the method of weak interobjects interactions. It works by connection an additional, testing object (corrector) to a tested object. In this work computer simulations and results, obtained during experimental research on special pipeline model station, has been presented. The conception of diagnostic system, using newly received information, is also showed.

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/3/03.

Jerzy Manerowski<sup>1</sup>, Henryk Borowczyk<sup>2</sup>, Tomasz Sawicki<sup>3</sup>

**OCENA STANU TECHNICZNEGO  
UKŁADU STEROWANIA PRZYSPIESZANIEM  
TURBINOWEGO SILNIKA ODRZUTOWEGO TYPU 25  
Z WYKORZYSTANIEM SZTUCZNEJ SIECI NEURONOWEJ**

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono metodę oceny stanu technicznego układu sterowania przyspieszaniem turbinowego silnika odrzutowego typu 25 z zastosowaniem sztucznej sieci neuronowej. Wykorzystano przebiegi sygnałów diagnostycznych z eksperymentalnych badań przeprowadzonych na obiektach rzeczywistych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Sieć neuronową opracowano za pomocą oprogramowania STUTTGART NEURAL NETWORK SYMULATOR (SNNS).

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, układ sterowania, silnik turbinowy, sztuczna sieć neuronowa

## 1. Wprowadzenie

Stosowane dotychczas techniki diagnozowania złożonych obiektów technicznych w wielu przypadkach nie są wystarczające i nie zawsze odpowiadają stawianym wymaganiom. Dlatego też poszukuje się nowych metod diagnozowania opierających się na systemach równoległego przetwarzania danych, np. sztucznych sieci neuronowych.

Podstawową zaletą sieci neuronowych jest zdolność samouczenia, co pozwala na celowe i skuteczne działanie nawet w sytuacjach, gdy projektant sieci nie zna algorytmu według którego można/należy rozwiązać postawione zadanie. Z drugiej strony, w diagnostyce technicznej kluczową kwestią jest liczba (najczęściej nieznana) sygnałów i/lub parametrów niezbędnych do prawidłowej oceny stanu technicznego obiektów, a także trudności z interpretacją obserwowanych zmian para-

---

<sup>1</sup> Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, [jerzy.manerowski@itwl.pl](mailto:jerzy.manerowski@itwl.pl)

<sup>2</sup> Politechnika Białostocka; [borowczyk@post.pl](mailto:borowczyk@post.pl)

<sup>3</sup> Absolwent Politechniki Białostockiej – 2003 r., [fiveok@wp.pl](mailto:fiveok@wp.pl)

metrów. Można zatem oczekiwać, że połączenie wiedzy z zakresu diagnostyki i sztucznych sieci neuronowych przyniesie wymierne korzyści.

W niniejszej pracy przedstawiono zastosowanie sztucznej sieci neuronowej do oceny stanu technicznego układu przyspieszania turbinowego silnika odrzutowego typu 25. Opracowanie powstało w ramach dyplomowej pracy magisterskiej wykonanej w Katedrze Automatyki i Diagnostyki na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej [3]. W pracy wykorzystano dane z eksperymentów diagnostycznych przeprowadzonych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych [7].

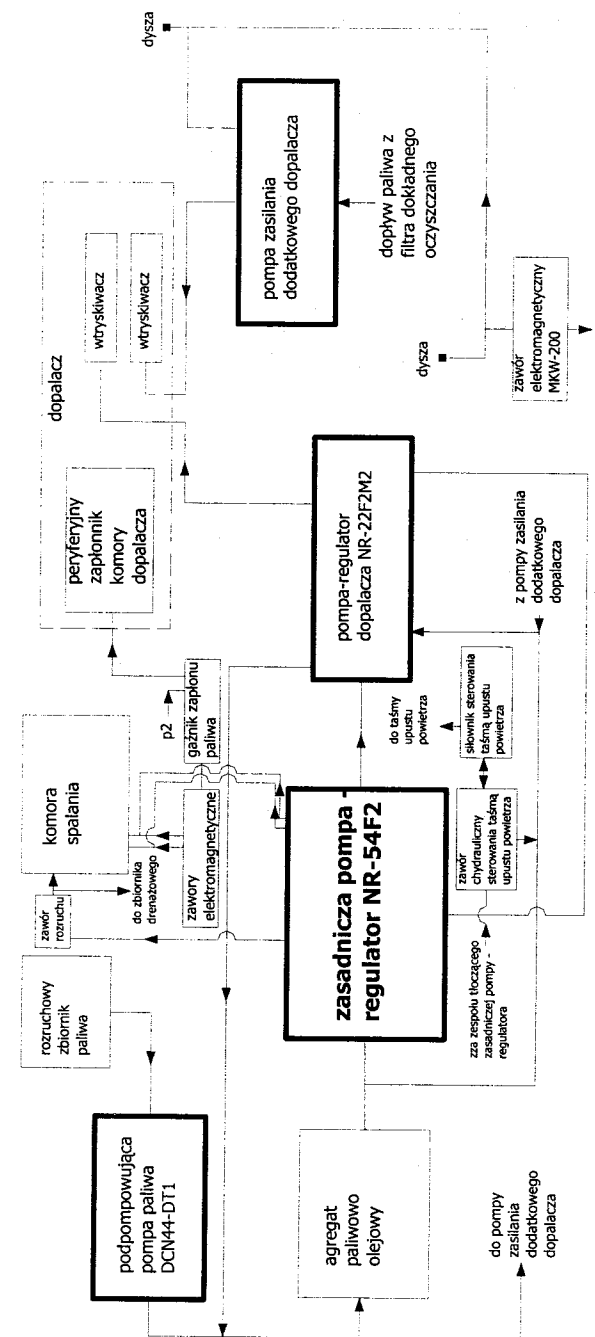
## 2. Diagnozowany obiekt

Obiektem diagnozowania jest układ sterowania przyspieszaniem turbinowego silnika odrzutowego typu 25 (rys. 1), który z technicznego punktu widzenia jest systemem regulacji procesu dostarczania paliwa do komory spalania.

Zadaniem pompy-regulatora NR-54F2 jest dostarczanie paliwa do zasadniczej komory spalania silnika. Głównymi jej zespołami są:

1. pompa wielotłoczkowa,
2. układ automatycznego sterowania wydatkiem paliwa zapewniający:
  - automatyczne sterowanie wydatkiem paliwa dopływającego do silnika podczas jego uruchamiania;
  - rozdzielanie paliwa podawanego przez pompę-regulator NR-54F2 do kanałów wtryskiwaczy zasadniczej komory spalania silnika w zależności od zapotrzebowania silnika;
  - automatyczne utrzymanie ustalonego zakresu pracy silnika w różnych warunkach lotu;
  - automatyczne sterowanie wydatkiem paliwa dopływającego do silnika podczas przyspieszania;

Oscylogramy zawierające przebiegi czasowe mierzonych sygnałów zostały uzyskane w procesie pomiarowym za pomocą stanowiska diagnostycznego [7]. Do dalszej analizy przyjęto te sygnały, których przebieg jest uzależniony od stanu technicznego pompy.



Rys. 1. Schemat układu paliwowego turbinowego silnika odrzutowego typu 25 [7]

### 3. Zbiór wybranych uszkodzeń i sygnałów diagnostycznych

W procesie identyfikacji wybranych uszkodzeń silnika typu 25 wykorzystuje się następujące sygnały diagnostyczne [3, 7].

- n1 – prędkość obrotowa wirnika niskiego ciśnienia (WNC),
- n2 – prędkość obrotowa wirnika wysokiego ciśnienia (WWC),
- t4 – temperatura całkowita strumienia gazów za turbiną,
- p2 – ciśnienie powietrza za sprężarką,
- p4 – ciśnienie gazów za turbiną,
- pw – ciśnienie paliwa przed wtryskiwaczami komory spalania.

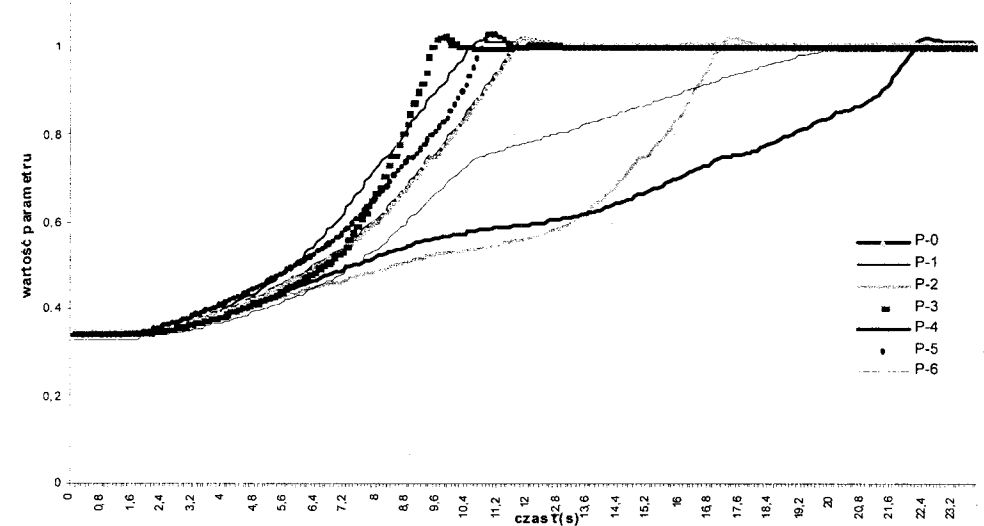
Zmiany przebiegów są skutkiem występujących, zdefiniowanych uszkodzeń (tab. 1).

Tabela 1.

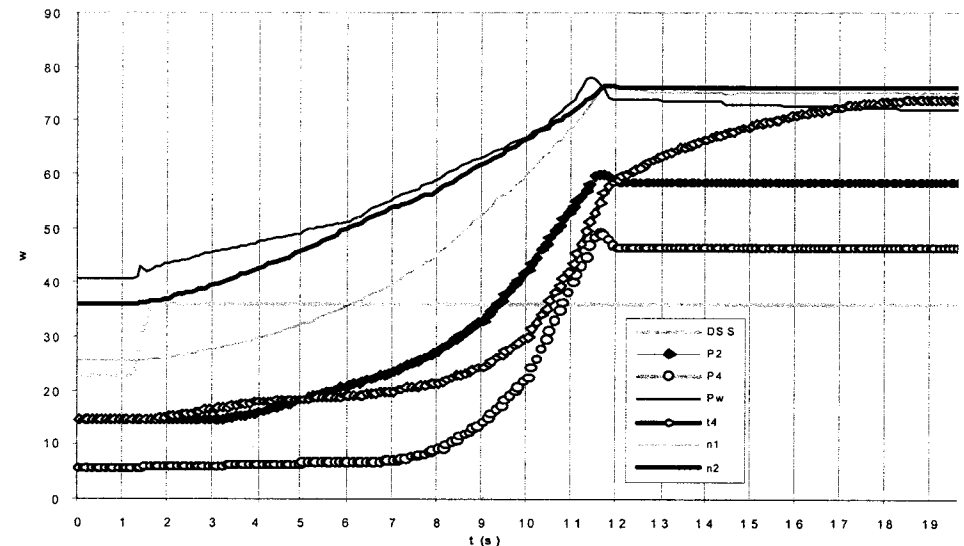
Zbiór wybranych uszkodzeń silnika 25 (na podstawie [7])

Lp.	Symptom stanu/uszkodzenia	Określenie stanu/uszkodzenia	Oznaczenie oscylogramu
1	Prawidłowy przebieg procesu przyspieszania od zakresu mg do n1 = 99%	Prawidłowy przebieg procesu przyspieszania	P-0
2	Czas przyspieszania od zakresu mg do n1=99% niezgodny z WT	Nadmierna przepustowość dławika I gałęzi ONC	P-1
		Zmniejszona przepustowość dławika I gałęzi ONC	P-2
		Nadmierna przepustowość dławika II gałęzi ONC	P-3
		Zmniejszona przepustowość dławika II gałęzi ONC	P-4
		Nadmierna przepustowość dławika sprzężenia zwrotnego	P-5
		Zmniejszona przepustowość dławika sprzężenia zwrotnego	P-6

Rysunek 2 przedstawia wpływ wybranych uszkodzeń układu przyspieszania na przebieg prędkości obrotowej wirnika niskiego ciśnienia (WNC), a na rysunku 3 przedstawiono prawidłowy przebieg procesu przyspieszania.



Rys. 2. Przebiegi czasowe sygnału n1 dla wybranych uszkodzeń (na podstawie [7])



Rys. 3. Przebieg sygnałów w prawidłowym procesie przyspieszania (na podstawie [7])

#### 4. Określenie struktury sieci neuronowej oraz przygotowanie danych do uczenia sieci

Podstawą przeprowadzenia identyfikacji uszkodzeń za pomocą sieci neuronowej jest przygotowanie odpowiednich danych do uczenia sieci, dobór typu sieci oraz jej parametrów.

Przygotowanie danych do uczenia sieci neuronowej polega na [3]:

- przeskalowaniu wszystkich badanych sygnałów, wyrażonych w fizycznych jednostkach miary, w taki sposób, aby przyjmowały one wartości z zakresu [0, 1],
- doborze zakresu wykorzystania.

Przyjęte w pracy [3] wartości współczynników skalowania sygnałów przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.**  
Wartości współczynników skalowania sygnałów

Sygnal	Współczynnik skalowania
P2	0,010
P4	0,033
Pw	0,010
n1	1,000
n2	1,000
t4	0,014

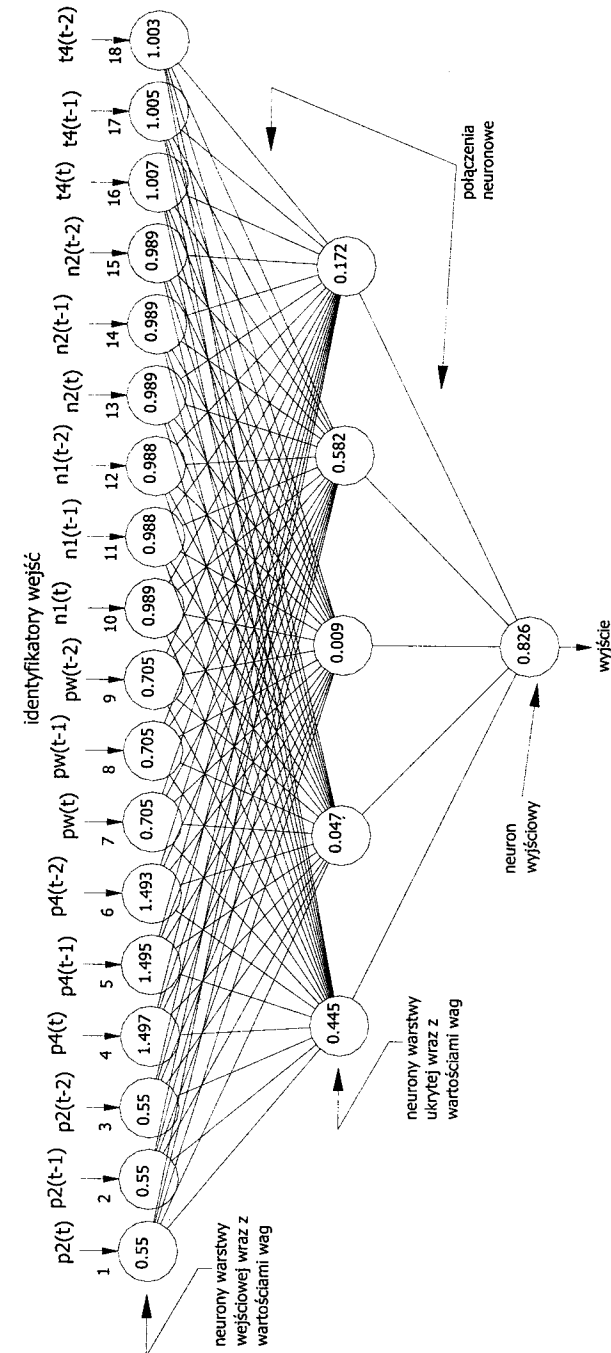
W wyniku analiz przeprowadzonych w pracy [3] stwierdzono, że w rozpatrywanym przypadku może być zastosowana sieć feed-forward, z osiemnastoma neuronami wejściowymi, pięcioma neuronami warstwy ukrytej oraz jednym neuronem wyjściowym (rys. 4).

Przyczyną wyboru osiemnastu wejść jest to, że na każde kolejne trzy wejścia przypada jedna charakterystyka oscylogramu co przedstawiono w tabeli 3.

**Tabela 3.**

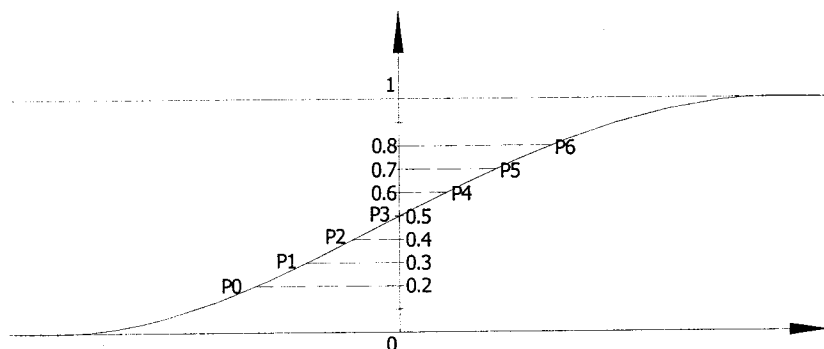
Postać uogólniona sposobu podawania danych na wejścia sieci neuronowej

czas t [s]	Wejścia								
	1	2	3	4	...	15	16	17	18
0	P2(t)	P2(t-1)	P2(t-2)	P4(t)	...	n2(t-2)	t4(t)	t4(t-1)	t4(t-2)
0.1	P2(t)	P2(t-1)	P2(t-2)	P4(t)	...	n2(t-2)	t4(t)	t4(t-1)	t4(t-2)
0.2	P2(t)	P2(t-1)	P2(t-2)	P4(t)	...	n2(t-2)	t4(t)	t4(t-1)	t4(t-2)
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
13.8	P2(t)	P2(t-1)	P2(t-2)	P4(t)	...	n2(t-2)	t4(t)	t4(t-1)	t4(t-2)
13.9	P2(t)	P2(t-1)	P2(t-2)	P4(t)	...	n2(t-2)	t4(t)	t4(t-1)	t4(t-2)
14	P2(t)	P2(t-1)	P2(t-2)	P4(t)	...	n2(t-2)	t4(t)	t4(t-1)	t4(t-2)



Rys. 4. Wykorzystana sieć neronowa typu feed-forward [3]

Ponieważ wyjście sieci powinno przyjmować różne wartości, w zależności od rozpoznanego stanu pompy-regulatora, zastosowano pojedynczy neuron o charakterystyce sigmoidalnej (rys. 5).



Rys. 5. Sigmoidalna funkcja neuronu wyjściowego [3]

Do testowania sieci wykorzystano wartości oryginalnych przebiegów sygnałów zakłócone szumem białym za pomocą funkcji RANDBETWEEN programu Excel®.

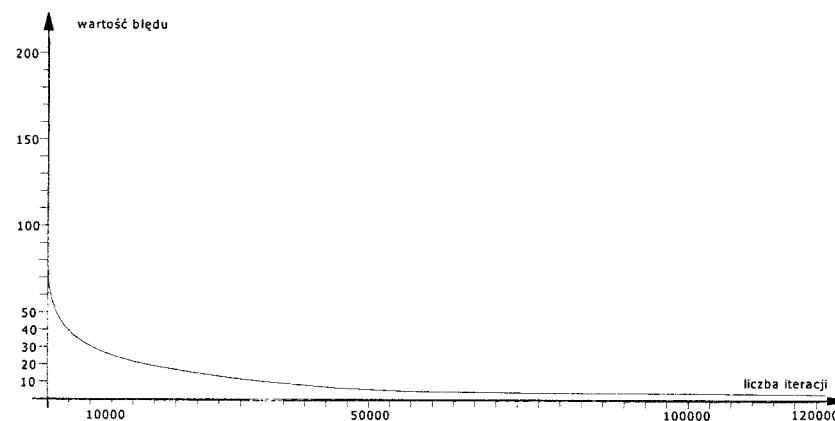
## 5. Wyniki identyfikacji uszkodzeń z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej

Wystarczającą liczbą iteracji w toku uczenia jest wartość 120 000, gdzie błąd osiąga poziom 2,87 %, więc jest wystarczająco mały, aby uznać, że sieć jest odpowiednio nauczona.

Rysunek 6 przedstawia charakterystykę przebiegu procesu uczenia.

Z analizy wyników procesu uczenia wynika, że pomimo chwilowych niedopuszczalnych błędów, ich procent jest niewielki.

Tabela poniżej przedstawia dane dla każdego stanu technicznego, wyrażone w procentach, które zawierają się w dopuszczalnych przedziałach.



Rys. 6. Charakterystyka przebiegu procesu uczenia [3]

Tabela 4.

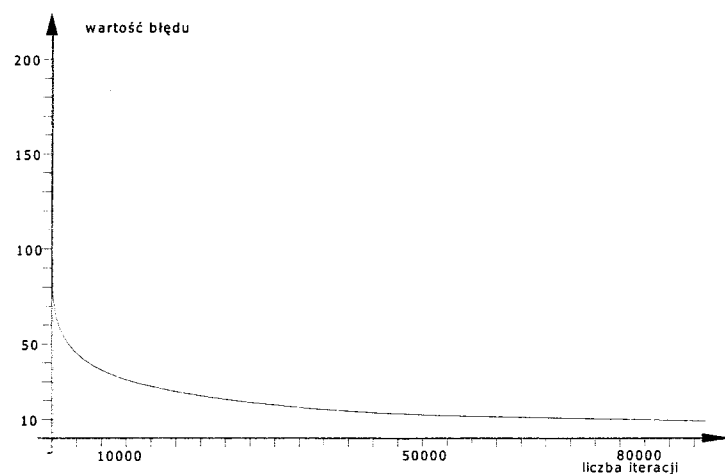
Jakość nauczonej sieci neuronowej (wyrażona w %)

Oscylogram	W zakresie	Poniżej zakresu	Powyżej zakresu
P0	68,4	12,6	19,0
P1	72,9	11,3	15,8
P2	76,3	13,4	10,3
P3	78,4	8,9	12,7
P4	74,2	6,1	19,7
P5	79,1	14,4	6,5
P6	81,6	4,7	13,7

Do testowania sieci neuronowej wykorzystano zakłócone szumem białym przebiegi pierwotne. Na rysunku 7 przedstawiono zmianę wartości błędu (w funkcji liczby iteracji) w procesie testowania sieci. Powyżej 80 000 iteracji wartość błędu stabilizuje się.

Tabela 4 przedstawia ocenę skuteczności przebiegu procesu testowania. Można zauważyć, że przy zadanych parametrach i liczbie iteracji jest ona wystarczająca chociaż mniej dokładna aniżeli proces uczenia.





Rys. 7. Charakterystyka przebiegu procesu testowania sieci [3]

**Tabela 5.**  
Jakość testowanej sieci neuronowej (wyrażona w %)

Oscylogram	W zakresie	Poniżej zakresu	Powyżej zakresu
P0	58.6	12.6	28.8
P1	61.3	11.3	27.4
P2	60.8	19.5	19.7
P3	64.3	21.4	14.3
P4	72.7	12.6	14.7
P5	57.4	19.4	23.2
P6	81.6	7.1	11.3

Wartości wymagane na wyjściu oraz ich zakresy są takie same jak w przypadku uczenia sieci.

## 6. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonego uczenia i testowania SSN dowodzą, że istnieje możliwość diagnozowania stanu technicznego pompy-regulatora NR-54F2 z wykorzystaniem SSN. Przygotowanie danych do diagnozowania rozpatrywanego obiektu jest stosunkowo łatwe i praktycznie możliwe w trybie "on line", w procesie

eksploatacji samolotu. Rozpatrywany przypadek pokazuje funkcjonalność i skuteczność tej metody.

Dalszy rozwój podjętej problematyki jest celowy m. in. w zakresie systemów opartych na SSN dla zespołów napędowych i budowy bazy danych z procesu eksploatacji.

## Literatura

1. **Duch W., Korbicz J., Rutkowski L., Tadeusiewicz R.:** *Sieci Neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza. Warszawa, 2000.
2. **Osowski S.:** *Sieci Neuronowe w ujęciu algorytmicznym*. WNT, Warszawa, 1996.
3. **Sawicki T.:** *Sztuczna sieć neuronowa w zastosowaniu do oceny stanu technicznego układów funkcjonalnych turbinowego silnika odrzutowego*. Praca magisterska, Politechnika Białostocka, Białystok 2003.
4. **Seminarium:** *Sieci Neuronowe*. Warszawa 1999.
5. **Silnik 25.** Opis techniczny, Dowództwo Wojsk Lotniczych, Poznań 1984
6. SNNS – Stuttgart Neural Network Simulator, User Manual, Version 4.1, UNIVERSITY OF STUTTGART, Institute For Parallel And Distributed High Performance Systems (IPVR),
7. *Technologia identyfikacji uszkodzeń silników typu: 37, 95 i 25 z charakteru przebiegu parametrów kontrolnych rejestrowanych na oscylogramach stanowiskami diagnostycznymi SD1-E7 i SD2-E7*. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa, 1973.
8. **Żurada J., Barski M., Jędruch W.:** *Sztuczne Sieci Neuronowe*. PWN, Warszawa, 1996.

Konstanty Miatluk<sup>1</sup>

## KOORDYNACJA PROCESÓW GEOMETRYCZNEGO PROJEKTOWANIA HIERARCHICZNYCH WIELOPOZIOMOWYCH SYSTEMÓW

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono model geometryczny i sposoby koordynacji procesów projektowania (syntezy i analizy) złożonych systemów. Opracowana konstrukcja cybernetyczna oparta jest na technologii wielopoziomowych systemów hierarchicznych. Proponowana metoda koordynacji została zilustrowana wynikami rozwiązań różnych zagadnień dotyczących zautomatyzowanego projektowania geometrycznego.

**Słowa kluczowe:** projektowanie geometryczne, koordynator, wielopoziomowy system hierarchiczny

### 1. Wprowadzenie

Proces konstruowania geometrycznego jest podstawowym procesem w systemach projektowania zautomatyzowanego, szczególnie w syntezy i analizie inżynierskiej.

Wyraz geometryczny (konstrukcja symboliczna) projektowanego obiektu powinien być uzgodniony na wszystkich etapach procesu projektowania. Opracowaniem takich wyrazów zajmuje się wielu badaczy i placówek badawczych na świecie [15-17]. Obecnie istnieje wiele różnych metod rozwiązania zagadnień konstruowania geometrycznego [1-3, 5]. Najwięcej osiągnięć w tej dziedzinie mają instytuty w Stanach Zjednoczonych, Japonii i w Europie Zachodniej.

We współczesnych systemach projektowania zautomatyzowanego można wymienić dwie podstawowe klasy wyrazów geometrycznych: przedstawienie graniczne (ang. Boundary Representation, BR) i geometrię konstruktywną obiektów 3-wymiarowych (ang. Constructive Solid Geometry, CSG). Wyżej wymienione modele nie pozwalają jednak na rozwiązywanie problemów projektowania: uzgodnionej syntezy i analizy (ruchu i deformacji) struktur z różnych poziomów. Jest to spowodowane ograniczeniami, które stwarzają konstrukcje teoretyczne.

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Diagnostyki

Właściwie opracowane metody elementów skończonych i granicznych oraz równania całkowo-różniczkowe nie umożliwiają rozwiązań takich zagadnień, gdyż nie uwzględniają one powiązań międzypoziomowych obiektów w przestrzeni hierarchicznej, np. jednoczesnego zagadnień ruchu i deformacji obiektu. Stosowanie wymienionych metod wymaga opracowania złożonych modeli, czasochłonnych obliczeń i komputera o dużej pojemności pamięci. Inaczej mówiąc, znaczna część zagadnień analizy, która opera się na zjawiskach hierarchicznych (np. ruch żywych łańcuchów biomechanicznych jest wywołany dynamiką ich struktur) i nie jest dostatecznie sformalizowana znanymi modelami matematycznymi, np. z teorii zbiorów (rozmytych).

Dlatego bardzo ważne jest opracowanie sposobu przedstawienia wyrazów geometrycznych i metody koordynacji procesów projektowania geometrycznego: syntezy i analizy (ruchu i deformacji), które:

- powiążą geometrię obiektu z charakterystykami innych poziomów (np. fizycznymi, chemicznymi, technicznymi itp.);
- zezwalają na zaobserwowanie powiązania dynamiki obiektów z różnymi poziomami;
- będą uzgodnione z ogólnymi wymogami w systemach projektowania [13] i ze znanymi konstrukcjami teoretycznymi.

W niniejszej pracy, do osiągnięcia celu, jako aparat teoretyczny, została wybrana konstrukcja symboliczna systemów hierarchicznych wielopoziomowych [7-8, 12].

## 2. Podstawy teoretyczne geometrycznego przedstawienia projektowanych systemów

System hierarchiczny wielopoziomowy przedstawiony jest na każdym poziomie za pomocą własnego bloku – *aed* (ze starożytnego greckiego) – (rys. 1) i oznaczony jest:

$$S^\ell = \{ \omega^\ell, S_0^\ell, \sigma^\ell \}, \quad (1)$$

gdzie:

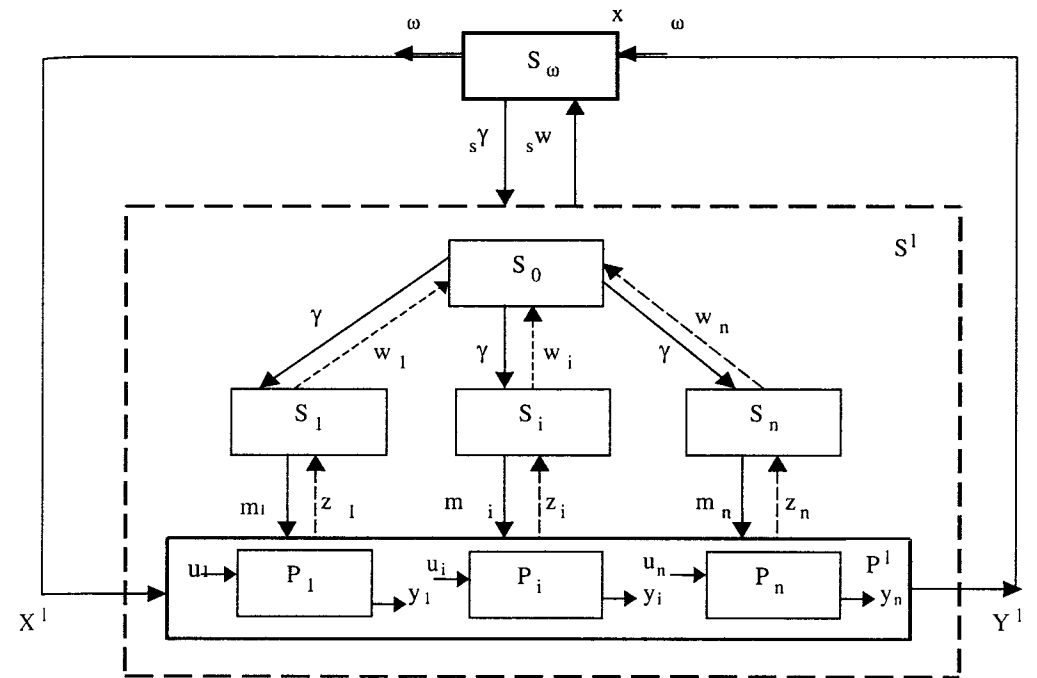
$\omega^\ell$  – dynamiczna realizacja zaagregowana  $S^\ell$ ,

$\sigma^\ell$  – struktura  $S^\ell$ ,

$S_0^\ell$  – koordynator,

$\ell$  – indeks poziomu,

$\ell \in L^s$ ;  $L^s$  – pozytywny system numeryczny.



Rys. 1. Schemat standardowego bloku systemów hierarchicznych (*aed*), gdzie:  $X$  – wejście,  $Y$  – wyjście,  $S^\ell$  – system poziomu  $\ell$ ,  $S_i$  – podsystem,  $S_0$  – koordynator,  $P^\ell$  – proces,  $P_i$  – podproces,  $S_\omega$  – środowisko (otoczenie)

Wyraz  $S^\ell$  zawiera powiązane koordynatorem (systemy sterowania)  $S_0^\ell$  modelu obiektu  ${}_o S^\ell$ , jego środowiska  ${}_\omega S^\ell$ , procesu  ${}_o P^\ell$ , w którym budowany jest obiektem  ${}_o S^\ell$  w otoczeniu  ${}_\omega S^\ell$ , procesu  ${}_\omega P^\ell$ , w którym środowisko  ${}_\omega S^\ell$  oddziałuje na  ${}_o S^\ell$ .

Realizacja dynamiczna  ${}_o(\bar{\rho}, \bar{\varphi})^\ell$  przedstawiona jest w postaci:

$$\begin{aligned} {}_o(\bar{\rho}, \bar{\varphi})^\ell : {}_o\bar{\rho}^\ell &= \{ {}_o\rho_t : C_t \times X_t \rightarrow Y_t \ \& \ t \in T \}^\ell, \\ {}_o\bar{\varphi}^\ell &= \{ {}_o\varphi_{t'} : C_t \times X_{t'} \rightarrow C_{t'} \ \& \ t, t' \in T \ \& \ t' > t \}^\ell, \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

$T^\ell$  - czas poziomu  $\ell$ .  $C^\ell, X^\ell, Y^\ell$  – stan, wejście i wyjście systemu poziomu  $\ell$ .

Powiązania  $C^\ell$ ,  $X^\ell$ ,  $Y^\ell$  dla obiektu, środowiska i ich procesów przedstawione są w tabeli 1.

Tabela 1.

Powiązania stanów, wejść i wyjść

${}_\omega U^\ell$	$C^\ell$	$X^\ell$	$Y^\ell$
${}_o S^\ell$	$C^\ell$	$X^\ell$	$Y^\ell$
${}_o P^\ell$	$X^\ell$	$C^\ell$	$Y^\ell$
${}_\omega P^\ell$	${}_\tau \omega X^\ell \times Y^\ell = {}_\omega X^\ell$	${}_\omega C^\ell$	${}_\tau \omega Y^\ell \times X^\ell = {}_\omega Y^\ell$
${}_\omega S^\ell$	${}_\omega C^\ell$	${}_\tau \omega X^\ell \times Y^\ell = {}_\omega X^\ell$	${}_\tau \omega Y^\ell \times X^\ell = {}_\omega Y^\ell$

${}_\tau \omega X^\ell$  i  ${}_\tau \omega Y^\ell$  są to części  ${}_\omega X^\ell$  i  ${}_\omega Y^\ell$ , które bezpośrednio nie zależą od  $S^\ell$ .

Struktura  $\sigma^\ell$  jest oznaczona jako system formalny:

$$\sigma^\ell = S_0^\ell, \{ \bar{\omega}^{\ell-1}, {}_\sigma U^\ell \} = \{ S_0^\ell, \tilde{\sigma}^\ell \}, \quad (3)$$

gdzie:

$S_0^\ell$  – koordynator [9],

$\bar{\omega}^{\ell-1}$  – realizacja dynamiczna zaagregowana podsystemów

$$\bar{S}^{\ell-1} = \{ S_i^{\ell-1} : i \in I^\ell \},$$

${}_\sigma U^\ell$  - współdziałania podsystemów  ${}_\sigma U^\ell \supset {}_\omega \bar{U}^{\ell-1} = \{ {}_\omega U_i^{\ell-1} : i \in I^\ell \}$ .

System  $S_0^\ell$  nazywa się koordynatorem:

$$S_0^\ell = \{ \omega_0^\ell, S_{00}^\ell, \sigma_0^\ell \}, \quad (4)$$

gdzie:

$\omega_0^\ell$  – dynamiczna realizacja zaagregowana  $S_{00}^\ell$ ,

$\sigma_0^\ell$  – struktura  $S_0^\ell$ .

$S_0^\ell$  zawiera trzy warstwy:

- warstwę wyboru ( ${}_\lambda S_0^\ell$ ),
- warstwę nauczania ( ${}_\varphi S_0^\ell$ ),
- warstwę samoporzadkowania ( ${}_\psi S_0^\ell$ ), które są powiązane w następujący sposób:

$${}_\lambda S_0^\ell = \{ {}_\lambda \omega^\ell, {}_\varphi S_0^\ell, {}_\lambda \sigma^\ell \}, \quad (5)$$

$${}_\varphi S_0^\ell = \{ {}_\varphi \omega^\ell, {}_\psi S_0^\ell, {}_\varphi \sigma^\ell \},$$

$${}_\psi S_0^\ell = \{ {}_\psi \omega^\ell, {}_\tau S_0^\ell, {}_\psi \sigma^\ell \}.$$

Zadanie warstwy **wyboru** – wybrać takie zadanie sterowania  $S^\ell$  poprzez jedną wybraną ze strategii koordynacji,  ${}_\tau \lambda_o^\ell \in \Lambda_o^\ell = \{ {}_\tau \lambda_o^\ell, \gamma \lambda_o^\ell, \beta \lambda_o^\ell, \alpha \lambda_o^\ell \}$ , która odpowiada bieżącemu stanowi organizacji systemu i niepewności informacji koordynatora  $S_0^\ell$ ;

zadanie warstwy **nauczania** – zmienić strategię koordynatora (sterowanie strukturą warstwy wyboru  ${}_\lambda S_0^\ell$ );

zadanie warstwy **samoporzadkowania** – udoskonalić ogólny stan konstrukcji symbolicznej  $S^\ell$ .

Dynamiczne realizacje warstw koordynatora są przedstawione w postaci modeli kanonicznych  $\hat{\omega}_0^\ell = \{ \bar{\hat{\varphi}}, \bar{\hat{\lambda}} \}_0^\ell, S_0^\ell$ , gdzie:

$$\bar{\hat{\varphi}}_0^\ell = \{ \hat{\varphi}_{0n'}^\ell : C_0^\ell \times X_{0n'}^\ell \rightarrow C_0^\ell \ \& \ t, t' \in T^\ell \ \& \ t' > t \}, \quad (6)$$

$$\bar{\hat{\lambda}}_{0r}^\ell = \{ \hat{\lambda}_{0r}^\ell : C_0^\ell \times \hat{X}_0^\ell \rightarrow \hat{Y}_0^\ell \ \& \ t \in T^\ell \}.$$

Model kanoniczny [11] buduje się na podstawie koncepcji systemu wielowarstwowego, w którym funkcje  $\{ \bar{\hat{\varphi}}_0^\ell \}$  odpowiadają warstwom nauczania i samoporzadkowania, natomiast funkcje  $\{ \bar{\hat{\lambda}}_0^\ell \}$  odpowiadają strategiom koordynacji na warstwie wyboru.

Koordynator rozwiązuje główne zagadnienie projektowania na odpowiednich warstwach za pomocą różnych strategii i w ten sposób spełnia wymogi systemów zautomatyzowanego projektowania.

### 3. Przedstawienie wyrazów geometrycznych

Każdy obiekt geometryczny można przedstawić w postaci systemu hierarchicznego:

$${}_g S^\ell = \{\omega^\ell, S_0^\ell, \sigma^\ell\}, \quad (7)$$

gdzie:

$\omega^\ell$  – opis formy obiektu jako jedności w jego otoczeniu (w konstrukcji geometrycznej wyższego poziomu),

$\sigma^\ell$  – struktura geometryczna obiektu,

$S_0^\ell$  – koordynator, który wiąże  $\sigma$  z  $\omega$ .

Dynamikę zmiany stanów obiektu  ${}_g S^\ell$  opisuje się za pomocą systemu  ${}_o(\bar{\rho}, \bar{\varphi})^\ell$  (2).

Numeryczny system pozycyjny  $L^S$  wiąże (scala) wszystkie charakterystyki geometryczne systemu  ${}_g S^\ell$ . Główne charakterystyki to: defekt powiązań (połączeń) oraz konstruktywny wymiar obiektu.

Defekt powiązań (połączeń) w kodzie numerycznym pozycyjnym  $L^S$  jest oznaczony jako:

$$\tilde{\xi}^\ell = (n_3 \dots n_0)_\xi, \quad \xi^\ell \in \{\xi_\sigma^\ell, \xi_\omega^\ell\}. \quad (8)$$

Konstruktywny wymiar  $\delta^\ell \in \Delta^\ell$  systemu  $S^\ell$  jest jego charakterystyką numeryczną, która jest opisana w  $L^S$  kodzie w następujący sposób:

$$\tilde{\delta}^\ell = (n_3 \dots n_0)_\delta, \quad \delta^\ell \in \{\delta_\sigma^\ell, \delta_\omega^\ell\}, (n_i)_\delta = (n_{3-i})_\xi, \quad (9)$$

gdzie:  $(n_i)_\delta \in N$ ,  $i=0,1,2,3$ ;  $\delta_\omega^\ell$  i  $\delta_\sigma^\ell$  – są to odpowiednio konstruktywne wymiary struktury  $\sigma^\ell$  i kształty geometryczne  $\omega^\ell$ .

Charakterystykę metryczną  $\mu^\ell \in M^\ell$  (pomiar długości, powierzchni, objętości i kątów) buduje się za pomocą jedynek  ${}_\tau \eta^\ell \in H^\ell = \{\eta_\gamma, \eta_\beta, \eta_\alpha, \eta\}$  ze współczynnikiem z  $L^S$ :

$$\begin{aligned} {}_\tau \tilde{\mu}^\ell &= {}_\tau(-\tilde{\mu}^\ell, {}^0\tilde{\mu}^\ell, +\tilde{\mu}^\ell), \\ {}^0\tilde{\mu}^\ell &= {}_\tau(-\tilde{\mu}^{\ell-1}, {}^0\tilde{\mu}^{\ell-1}, +\tilde{\mu}^{\ell-1}) = {}_\tau\tilde{\mu}^{\ell-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie:  $\tau \in {}_\psi L$ ,  $-\tilde{\mu}^\ell$  jest ujemnym,  ${}^0\tilde{\mu}^\ell$  jest neutralnym (zerowym),  $+\tilde{\mu}^\ell$  jest dodatnim elementem jedynki  $\tilde{\mu}^\ell$ ;  ${}^0\tilde{\mu}^\ell$  jest jedynką niższego poziomu  $\ell-1$  itd. Neutralny element  ${}^0\tilde{\mu}^\ell$  jest miarą długości, powierzchni i objętości – w zależności od tego jaki stan (jakie wymiary konstrukcyjne  $\xi_{\omega, \sigma}^\ell$  i defekty powiązań  $\delta_{\omega, \sigma}^\ell$ ) jest rozpatrywany:  ${}_\tau C^\ell$  lub  ${}_\tau U^\ell$ .

Należy zauważyć, że wymiary Euklidesa, Lebesgue'a, Urysona oraz wymiary parametryczne można otrzymać jako szczególne przypadki konstruktywnego wymiaru  $\tilde{\delta}^\ell$ , a znane rodzaje grafów można oznaczyć za pomocą  $\tilde{\xi}^\ell$ .

Przykład relacji  $\tilde{\delta}^\ell$  z wymiarem Euklidesa:

$$\begin{aligned} \text{gdzie: } \tilde{\delta}^\ell \leftrightarrow \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} &\leftrightarrow S^\ell \text{ – kropka,} \\ &\text{linia,} \\ &\text{powierzchnia,} \\ &\text{3-wymiarowy obiekt.} \end{aligned}$$

Informację geometryczną (zbiór zmiennych  $\bar{Z}$ ) można podzielić na trzy klasy, zgodnie z (7):

$$\bar{Z} = \{Z_1, Z_2, Z_3\} = \{\Omega, \Gamma, \Sigma\}, \quad (11)$$

gdzie:

$\Omega = \{\omega_i : i \in I_\Omega\} = Z_1$  opisuje za pomocą charakterystyki metrycznej stan geometrycznego obiektu, przedstawionego w postaci zaagregowanej dynamicznej  $\omega^\ell$ ;

$\Gamma = \{\gamma_i : i \in I_\Gamma\} = Z_2$  – opisuje współdziałania  ${}_\omega U^\ell$  obiektu geometrycznego z innymi obiektami (granice obiektu, ustalone za pomocą koordynatora);

$\Sigma = \{\sigma_i : i \in I_\Sigma\} = Z_3$  – opisuje strukturę obiektu.

Wtedy dowolny obiekt geometryczny może być przedstawiony w postaci relacji  $S \subset \Omega \times \Gamma \times \Sigma$  na kartezjańskim iloczynie zmiennych  $\Omega, \Gamma, \Sigma$ . Każda z klas zmiennych ma swoją odpowiednią strukturę.

Należy zauważyć, że wszystkie obiekty geometryczne przedstawione w postaci wielopoziomowych systemów hierarchicznych mają strukturę, funkcję, koordynatora i inne charakterystyki tych systemów. Każdy obiekt (nawet kropka i linia)

ma swoją strukturę geometryczną. Nazywane są one obiektami umownymi (uwarunkowanymi), przykładem takiego obiektu może być kropka umowna.

#### 4. Rodzaje działań koordynatora z geometrycznymi obiektami

Dla każdego rodzaju struktur obiektów geometrycznych  $\Sigma = \{\sigma^0, \sigma^1, \sigma^2, \sigma^3\} = \{\text{kropka, linia, powierzchnia, 3-wymiarowy obiekt}\}$  istnieją 3 klasy działań koordynatora.

1. Działania, które zezwalają na zmianę obiektu, ale nie zmieniają typu struktury obiektu. Te klasy działań umożliwiają rozpatrzenie każdego typu struktury jako systemu dynamicznego. Do niego należą operacje prostoliniowego ruchu, powrotu, zmiany rozmiaru  $\mu_1$  z  $\Omega$  i niektóre rodzaje deformacji.
2. Działania, które powodują zmiany struktury i zmieniają wszystkie elementy obiektu.  
Te klasy działań zawierają wyżej wymienione (punkt 1) operacje, a także:
  - dodawanie, usunięcie, zmianę elementów; (operacje te nie powinny zmieniać typu struktury – powiązania i konstruktywnego wymiaru obiektu, np. łączenia elementów liniowych w jeden długi element);
  - dekompozycję elementów struktury na elementy niższych poziomów;
  - zmianę powiązań elementów.
3. Działania, które powodują zmiany poziomu obiektu.  
Te klasy działań zawierają wyżej wymienione (punkt 1,2) operacje, a także:
  - zmiany rozmiaru, które powodują zmiany typu obecnej struktury obiektu:

$$\sigma^0 \leftrightarrow \sigma^3; \sigma^1 \rightarrow \sigma^0; \sigma^2 \rightarrow \sigma^0$$

– usunięcie i dekompozycję elementów na elementy niższego poziomu:

$$\sigma^3 \rightarrow \sigma^2 \rightarrow \sigma^1 \rightarrow \sigma^0$$

– syntezę systemu wyższego poziomu z elementów z niższego poziomu:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}^0 &\rightarrow S^1, \bar{\sigma}^0 \rightarrow S^2, \bar{\sigma}^0 \rightarrow S^3, \\ \bar{\sigma}^1 &\rightarrow S^2, \bar{\sigma}^1 \rightarrow S^3, \\ \bar{\sigma}^2 &\rightarrow S^3. \end{aligned}$$

Te działania wykonuje koordynator  $S_0^3$  najbardziej złożonego obiektu geometrycznego  $S^3$ , który zawiera zbiór podsystemów wszystkich poziomów. Koordynator  $S^2$ ,  $S^1$  i  $S^0$  ma mniejsze możliwości (z wyżej wymienionych) działań, np. koordynator  $S_0^0$  kropki umownej  $S^0$  wykonuje tylko operacje prostoliniowego ruchu, ograniczone zmianą rozmiarów i dekompozycją na kropki z niższych poziomów  $S^{-1}$ ,  $S^{-2}$  itd.

#### 5. Algorytm koordynacji procesów syntezy geometrycznych obiektów

Podczas budowania (syntezy) geometrycznych obiektów koordynator wykonuje następujące działania:

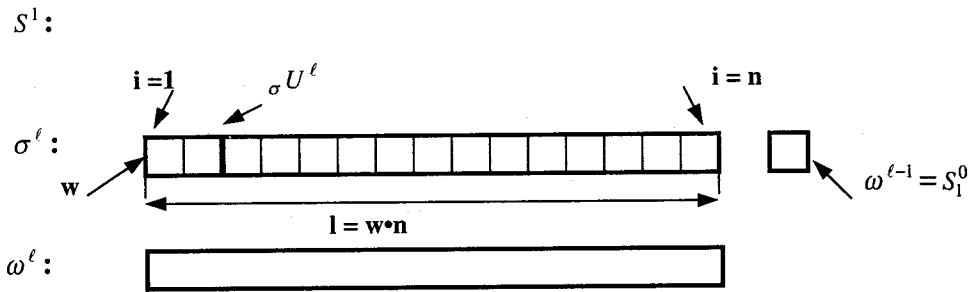
- określa konstruktywny wymiar wynikowego geometrycznego obiektu (wybór z  $\Sigma$  potrzebnej klasy struktury  $\sigma^0, \sigma^1, \sigma^2, \sigma^3$ ),
- określa rodzaj zmian standardowego elementu oznaczonej struktury, jakich należy dokonać, aby zbudować potrzebny obiekt  $S$ ,
- definiuje kolejność działań z klas wyżej wymienionych (punkt 4),
- wykonuje działania syntezy (ten proces odpowiada obliczaniu charakterystyk  $\{\Omega, \Gamma, \Sigma\}$  wynikowych obiektów).

Powiązania między podstawowymi strukturami geometrycznymi są przedstawione w postaci działań z wyżej wymienionych klas. Za pomocą tych działań można otrzymać wyjściowy obiekt z obecnego wejściowego.

Na przykład, działanie koordynatora  $R_3 : C \times X \rightarrow Y$ , gdzie:

$C = \{S_1^0, \dots, S_n^0\}$ ,  $X = \{\sigma^1, \omega\}$ ,  $Y = S^1$  pozwala zbudować część linii  $S^1$  – rys.2 (ze szkieletu  $C$  kropek – kwadratów  $S_1^0, \dots, S_n^0$ , typu struktury i dodatkowej informacji otrzymanej od konstruktora). Dzięki temu istnieje możliwość określenia wszystkich parametrów  $\{\Omega, \Gamma, \Sigma\}$ :

$$S^\ell = S^1; \sigma^\ell \leftrightarrow \text{linia}, {}^0\tilde{\mu}^\ell \leftrightarrow \mathbf{w}, {}_\tau\tilde{\mu}^\ell \leftrightarrow \mathbf{l}, \delta_\omega^\ell = 0010, \delta_\sigma^\ell = 000n \text{ itp.}$$

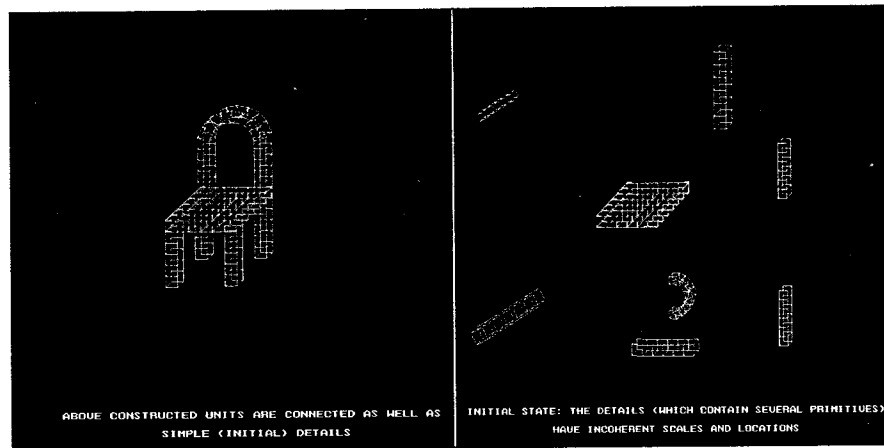


Rys. 2. Synteza obiektu geometrycznego (linii)  $S^1$  z kropek umownych

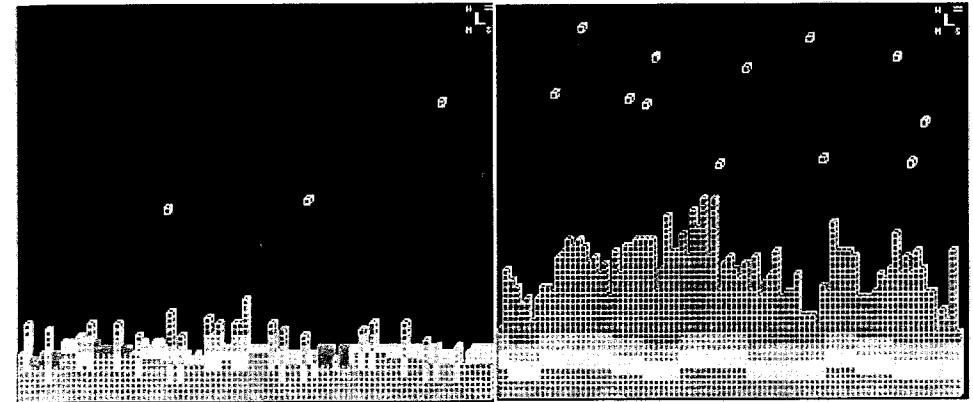
Proces syntezy struktury  $\sigma^\ell$  systemu dowolnego poziomu  $\ell$  z elementów  $\bar{\omega}^{\ell-1}$  niższego poziomu, realizuje koordynator  $S_0^\ell$  (na warstwie wyboru) i może być przedstawiony w postaci:

$$S_0^\ell : \{\bar{\omega}^{\ell-1}, \sigma U^\ell\} \rightarrow \sigma^\ell. \quad (12)$$

Zagadnienia syntezy obiektu geometrycznego (np. krzesła) złożonego z części prostych (rys. 3a) i syntezy warstwy półprzewodnikowej (rys. 3b) są przykładami rozwiązywania zagadnień syntezy obiektów geometrycznych za pomocą opracowanej metody koordynacji.



Rys. 3a. Synteza obiektu geometrycznego (krzesła) złożonego z części prostych



Rys. 3b. Przykład syntezy warstwy półprzewodnikowej

Należy podkreślić, że istnieje powiązanie między opisem obiektu otrzymanego za pomocą opracowanej metody, a opisem tradycyjnym analitycznym. Na przykład, jeżeli zmiana współrzędnych  $\sigma U^\ell$  (kąta) między kolejnymi elementami strukturalnymi obiektu liniowego  $\sigma^\ell$  jest stała, to obiekt przyjmuje formę koła. Można to zapisać w sposób następujący:

$$\frac{d_\sigma U^\ell}{di} = \text{const}, \quad \rightarrow \quad \omega^\ell : \text{[Diagram of a circle with diameter 2R]} \quad \rightarrow \quad X^2 + Y^2 = R^2,$$

gdzie:  $i$  – to numer elementu struktury,  $i \in n$ ,  $n$  – liczba elementów. Opis analityczny został przedstawiony dla zewnętrznej części koła w przestrzeni kartezjańskiej.

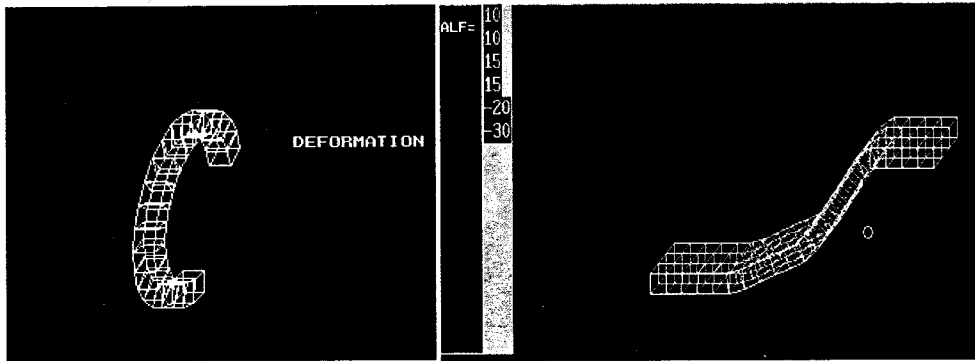
### 6. Definicja procesów koordynacji ruchu i deformacji systemów na różnych poziomach

Zagadnienia koordynacji ruchu i deformacji obiektu (zagadnienie analizy) jest oznaczone jako zadanie koordynacji standardowym blokiem (ang. *aed*) systemu hierarchicznego wielopoziomowego  $S^\ell$ . Ruchem obiektu  ${}_o S^\ell$  w środowisku  ${}_o S^\ell$  nazywa się zmianę jego współrzędności (tzn. wzajemnych połączeń)  ${}_o U^\ell$

z elementami  $S_i^\ell (i \in I^{\ell+1})$  systemu środowiska. Przez deformację będziemy rozumieć zmianę współdziałań  ${}_\sigma U^\ell$  elementów jego struktury  $\sigma^\ell$ .

Dodawanie do powiązań  ${}_\sigma U^\ell$  dodatnich i ujemnych jedynek  $\mu^\ell$  (elementów) z zachowaniem przynależności struktury  $\sigma^\ell$  do niektórych klas struktur powoduje efekt deformacji struktury  $\sigma^\ell$ . Przykłady rozwiązywania różnych zagadnień deformacji obiektów są przedstawione na rysunku 4. Zmiana  ${}_\sigma U^\ell$  powoduje zmiany powiązań  ${}_\omega U^\ell$ , co jest ekwiwalentne do ruchu obiektu  ${}_o S^\ell$  w jego otoczeniu  ${}_\omega S^\ell$ . Odpowiednio zorganizowanym deformacjom (np. bieżącej fali deformacji) odpowiadają klasy sposobów sterowania ruchem obiektu.

Miarą masy jest metryczna charakterystyka  $\tilde{\mu}^\ell \in \Omega^\ell$  stanu  $c \in C^\ell$  systemu  ${}_o S^\ell$ , jego wejść  $X^\ell$  i wyjść  $Y^\ell$ .



Rys. 4. Przykłady różnych rodzajów deformacji obiektów w budowie maszyn.

Neutralny element  ${}^0 \tilde{\mu}^\ell = (-\tilde{\mu}^{-1}, {}^0 \tilde{\mu}^{\ell-1}, +\tilde{\mu}^{\ell-1}) = \tilde{\mu}^{\ell-1}$  jest miarą długości, powierzchni, objętości – w zależności od tego jaki stan (tzn. jakie są wymiary konstrukcyjne  $\xi_{\omega,\sigma}^\ell$  i defekty powiązań  $\delta_{\omega,\sigma}^\ell$ ) jest rozpatrywany jako  ${}_\tau C^\ell$  lub  ${}_{\tau\omega} U^\ell$ ,  $\tau \in {}_\psi L$ . Miarę ruchu (prędkość, impuls itd.) można przedstawić jako miary zmian stanów systemów dynamicznych za jedynekę czasu  ${}_\tau \eta_T^\ell ({}_\tau \eta_T^\ell \in {}_\psi T^\ell = \{ {}_\gamma T^\ell, {}_\beta T^\ell, {}_\alpha T^\ell \})$  w przestrzeniach:  $M^\ell, \Xi^\ell, \Delta^\ell$ . Miary ruchu mają swoje

kierunki zgodnie z adresem tych elementów ze środowiska  ${}_\omega S^\ell$ , odnośnie których ten ruch jest rozpatrywany (obserwowany). Ogólne prawo ruchu i deformacji można też przedstawić za pomocą *aed'u* w postaci (1).

Geometryczne i fizyczne oceny oznaczone są w przestrzeniach stanów:  $M^\ell, \Xi^\ell, \Delta^\ell, T^\ell$ . Wszystkie polecenia są wykonywane w tych przestrzeniach za pomocą systemu numerycznego pozycyjnego  $L^S$ . Sposoby projektowania i obliczania ruchów oraz deformacji zależą od jedynek  $\tilde{\mu}^\ell, \xi^\ell, \delta^\ell$  struktury  $\sigma^\ell$  i dynamicznej realizacji zaagregowanej  $\omega^\ell$  i odpowiadają one strategii koordynacji  ${}_\tau \lambda_o^\ell \in \Lambda_o^\ell = \{ {}_\gamma \lambda_o^\ell, {}_\beta \lambda_o^\ell, {}_\alpha \lambda_o^\ell \}$ , dla różnych warunków pewności wiedzy.

Szczególne rodzaje ruchów i deformacje można określić z ogólnej reguły przez wprowadzanie odpowiednich warunków, np. fizycznemu ruchowi (zmiana współrzędnych lokalizacji obiektu w przestrzeni) w przedziale czasu  $\bar{T}_{it}^\ell$  odpowiada przypadek:

$${}_\sigma U^\ell \Big|_{\bar{T}_{it}^\ell} = \text{const}, \quad (13)$$

kiedy współdziałania strukturalne  ${}_\sigma U^\ell$  są niezmiennie (w określonych momentach czasowych) i w ten sposób struktura  $\sigma^\ell$  zachowa swój stan. Taki ruch jest uwarunkowany procesem  ${}_\omega P^\ell$ , dla którego:

$$\begin{aligned} {}_{\omega p} (\bar{\rho}, \bar{\varphi})^\ell : {}_{\omega p} \bar{\rho}^\ell &= \{ {}_{\omega p} \rho_i^\ell : {}_\omega X_i^\ell \times {}_\omega C_i^\ell \rightarrow {}_\omega Y_i^\ell \ \& \ t \in T^\ell \} \\ {}_{\omega p} \bar{\rho}^\ell &= \{ {}_{\omega p} \rho_{it'}^\ell : {}_\omega X_i^\ell \times {}_\omega C_{it'}^\ell \rightarrow {}_\omega X_i^\ell \ \& \ t \in T^\ell \ \& \ t' > t \} \end{aligned} \quad (14)$$

$${}_\omega X^\ell = {}_{\tau\omega} X^\ell \times Y^\ell, \quad {}_\omega Y^\ell = {}_{\tau\omega} Y^\ell \times X^\ell.$$

Na drugim końcu skali znajduje się ruch biomechaniczny dla którego istotny jest wzór:

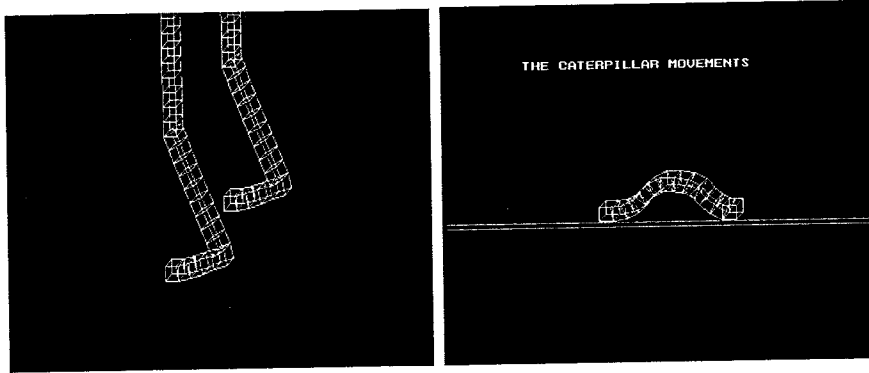
$$({}_{\tau\omega} X^\ell \times {}_{\tau\omega} Y^\ell) \Big|_{\bar{T}_{it}^\ell} = {}_{\tau\omega} U^\ell \Big|_{\bar{T}_{it}^\ell} = \text{const}, \quad (15)$$

inaczej mówiąc, współdziałania  ${}_\omega U^\ell$  zależą w przedziale czasu  $\bar{T}_{it}^\ell$  tylko od zmiany współdziałań strukturalnych  ${}_\sigma U^\ell \Big|_{\bar{T}_{it}^\ell}$ . Taki ruch jest uwarunkowany procesem  ${}_o P^\ell$ , dla którego:



$$\begin{aligned} {}_{op}(\bar{\rho}, \bar{\varphi})^\ell : {}_{op}\bar{\rho}^\ell &= \{ {}_{op}\rho_i^\ell : X_i^\ell \times C_i^\ell \rightarrow Y_i^\ell \ \& \ t \in T^\ell \}, \\ {}_{op}\bar{\varphi}^\ell &= \{ {}_{op}\varphi_{it'}^\ell : X_i^\ell \times C_{it'}^\ell \rightarrow X_i^\ell \ \& \ t, t' \in T^\ell \ \& \ t' > t \}. \end{aligned} \quad (16)$$

Pozostałe klasy ruchów znajdują się wśród wyżej wymienionych i są różnymi kombinacjami symbolicznego wyrazu  $S^\ell$ . Przykłady rozwiązywania zadań koordynacji ruchów biomechanicznych przedstawione są na rysunku 5.



Rys. 5. Przykłady projektowania ruchów: a) lokomocji dwunożnej człowieka (jako zbioru łańcuchów biokinetycznych), b) węża

Ogólne prawo koordynacji można zapisać także w następującej postaci:

$$C^{\ell+1} \Big|_{S_i, S_\tau} = B_i \cdot C_i^\ell + B_\tau \cdot C_\tau^\ell + \psi^{\ell+1} B_U \cdot U_{i,\tau}, \quad (17)$$

gdzie:  $C^{\ell+1}, C_i^\ell, C_\tau^\ell \in \Omega \times \Gamma \times \Sigma$ ,  $B$  – charakterystyka wagowa, systemowa stała  $\psi$ , którą wybiera się w zależności od odpowiednich typów dynamiki struktur projektowanych obiektów.

W ten sposób, zadanie sterowania ruchem i deformacją zredukowano do zadania koordynacji bloku standardowego  $S^\ell$  systemów hierarchicznych wielopoziomowych.

Otrzymane wyniki mają charakter ogólny i mogą być wykorzystane w abstrakcyjnym projektowaniu systemów hierarchicznych. Przeprowadzone badania pokazują, że opracowana metoda koordynacji może być wykorzystywana w projektowaniu ruchów obiektów, jak również w analizie procesów deformacji tworzonych obiektów.

## 7. Wnioski

1. Opracowany model geometryczny odpowiada wymogom systemu zautomatyzowanego projektowania. Koordynator rozwiązuje zagadnienia projektowania na swoich warstwach wyboru, nauczania i samoporzędkowania.
2. Otrzymane modele i algorytmy mogą być stosowane w zagadnieniach geometrycznego projektowania obiektów o różnej naturze: w syntezie geometrycznej [10, 14] i w deformacji obiektów i maszyn o różnej postaci, w syntezie warstw półprzewodników i konstrukcjach połączeń w elektronice, w wykrywaniu defektów połączeń w obwodach elektronicznych i jako rozchodząca się fala deformacji, w projektowaniu ruchów (lokomocji dwunożnej) człowieka [4], w ruchach węża oraz w ruchach o budowie łańcuchowej molekularnej itp.
3. Proponowana metoda koordynacji wielopoziomowych hierarchicznych systemów umożliwi korzystniejsze rozwiązywanie zagadnień zautomatyzowanego projektowania geometrycznego (ze względu na rangę problemów, czas obliczeń oraz pojemność pamięci komputera) w porównaniu z obecnie stosowanymi metodami.

## Literatura

1. Amenta Nina, Bern M., Eppstein D.: *The Crust and the b-Skeleton: Combinatorial Curve Reconstruction*. GMIP, Vol.60, No.2 (1998), pp.125-135.
2. Bardin E., Cohen L. D., Ayache N.: *A Parametric Deformable Model to Fit Unstructured 3D Data*. Computer Vision and Image Understanding, Vol.71, No.1 (1998), pp. 39-54.
3. Chinosi C., Della Croce L., Scapolla T.: *Hierarchical Finite Elements for Thin Plates and Shells*. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, Vol.2, No.2 (1998), pp.151-160.
4. Miatliuk K., Novikava S., Jaworek K.: *Motion Design of Two-Legged Locomotion Process of a Man*, Proceedings of ICCS'04, in Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Vol. 4, pp.1123-1128, 2004.
5. Hagen H., Roller D.: *Geometric Modeling: Methods and Applications*, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
6. Lee I.-K., Kim M.-S., Elber G.: *Polynomial/Rational Approximation of Minkovsky Sum Boundary Curves*. GMIP, Vol.60, No.2 (1998), pp. 136-165.
7. Mesarovič M. D., Macko D., Takahara Y.: *Theory of Hierarchical Multi-level Systems*. Academic Press, New York, 1970.

8. Mesarovič M. D., Takahara Y.: *General Systems Theory: Mathematical Foundations*. Academic Press, New York, 1975.
9. Метлюк К. Н.: *Формальная модель координатора двухуровневой системы*. - Минск, 1987, 24с. (Ин-т техн. кибернетики АН БССР; № 12)
10. Miatliuk K. et al.: *The Coordinating System of Knowledge Network for Tractor & Automobile Industry*, Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Technology, Policy and Innovation, LEMMA Publ., Utrecht, 2001, pp.292-293.
11. Мятлюк К. М., Галавенчык І. У.: *Динаміка стратэгіі каардынацыі // Теория и методы автоматизации проектирования сложных систем и автоматизации научных исследований*, Минск, ИТК АН БССР, 1990, С.50-54.
12. Novikava S., Mialtiuk K., Gancharova S., Kaliada W.: *Aed Construction and Technology in Design*, Large Scale Systems: Proceedings of 7th IFAC/IFORS/IMACS Symposium, Pergamon Press, London, 1995, pp.379-384.
13. Novikava S., Ananich G., Miatliuk K. et al.: *The Structure and the Dynamics of Information in Design Systems*. Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Design ICED'90, Vol. 2, Dubrovnik, 1990, pp. 946-953.
14. Новикова С. И., Метлюк К. Н.: *Применение модели двухуровневой системы в задачах синтеза геометрических объектов*, Тез. Всесоюз. конф. "Методы и средства обработки сложной графической информации". - Ч.1.-Горький, 1988.- С.113.
15. Porttmann H., Wallner J.: *Computational Line Geometry*. Springer-Verlag, Berlin, 2001.
16. Porttman H., Leopoldseeder S., Hofer M.: *Approximation with active B-spline curves and surfaces*, Proceedings Pacific Graphics'02, IEEE Press, 2002.
17. Rusinkiewicz S., Levoy M.: *Efficient variants of ICP algoritms*. Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, Quebec, 2001.
18. Miatliuk K., Siemieniako F.: *Hierarchical multilevel systems technology realisation in the coordination of biomechanical systems*, Proceedings of International Conference on Systems Science, Wrocław, 2004 (w druku).

#### COORDINATION PROCESSES OF GEOMETRIC DESIGN OF HIERARCHICAL MULTILEVEL SYSTEMS

**Abstract:** New geometrical model and coordination ways of design processes (analysis and synthesis) of complex objects have been considered in presented paper. The developed cybernetic construction is based on hierarchical multilevel systems theory. Proposed geometric construction and coordination method is applied in solving of automated design tasks of different levels systems.

Jolanta Pauk<sup>1</sup>

### METODY IDENTYFIKACJI OBIEKTÓW – PRZEGLĄD I STAN WIEDZY

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono podstawowe zagadnienia dotyczące procesu identyfikacji, stan wiedzy z tego zakresu oraz różne metody identyfikacji parametrycznej. Podano wady i zalety ich stosowania.

**Słowa kluczowe:** identyfikacja, model, obiekt

#### 1. Wstęp

Początki metod estymacji są związane z badaniami astronomicznymi i pojawieniem się zagadnienia interpretacji sprzecznych obserwacji wynikających z niedoskonałości przyrządów i metod pomiarowych, z powodu dużych odległości. W 1629 roku G. Galileusz stwierdził, że w przypadku błędów pomiarowych, w celu uzyskania jak najlepszego wyniku, należy dokonać w eksperymencie możliwie jak najmniejszych poprawek po to, aby z pomiarów niezgodnych uzyskać pomiary zgodne. Tę zasadę Galileusza zastosowano do wyznaczania nieznanego nachylenia prostej na podstawie niedokładnej znajomości współrzędnych punktów. W 1722 roku R. Cotes zaproponował przyjęcie tego nachylenia jako stosunku średniej rzędnych do średniej odciętych. W latach 1749-1750 L. Euler i J. T. Mayer zmodyfikowali to postępowanie dzieląc punkty na podgrupy. R. J. Boscovich w 1757 roku zaproponował estymację nachylenia, aby minimalizować sumę wartości bezwzględnych odchylenia rzędnych punktów od prostej. Zasada ta była rozważana przez P. S. Laplace'a. K. F. Gauss i A. M. Legendre wprowadzili do estymacji miarę dopasowania równania do pomiarów w postaci sumy kwadratów odchylenia rzędnych. W 1854 roku P. L. Czebyszew zaproponował minimalizację największej wartości bezwzględnej odchylenia. Jednak większą popularnością cieszyła się metoda najmniejszych kwadratów Gaussa, ze względu na dość łatwy algorytm wyznaczania ocen parametrów.

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Diagnostyki.

Powyższe metody pozwalały na uwzględnienie większej liczby pomiarów niż minimalna, równa liczbie parametrów, dzięki czemu otrzymane oceny były średnio znacznie bliższe prawdziwym wartościom parametrów, szczególnie przy dużych, niesystematycznych błędach pomiarów. Dzięki tym pracom powstały takie działy matematyki jak: statystyka oraz teoria aproksymacji.

W latach 40. i 50. XX wieku nastąpił rozwój nowej dziedziny – sterowania automatycznego. Wiązało się to przede wszystkim z potrzebami techniki wojskowej i kosmonautyki oraz ze sterowaniem procesami technologicznymi. Do wyznaczenia sterowań potrzebne były modele matematyczne obiektów, a więc i metody pozwalające na ich szybką budowę. W latach 50. pojawiły się publikacje związane z metodami budowy modeli obiektów na podstawie pomiarów ich sygnałów wejściowych i wyjściowych. W tym czasie H. Thal-Larsen, V. Strejc udoskonaliли, wprowadzone po raz pierwszy przez K. Küpfmüllera, metody graficzne oceny parametrów prostych obiektów. W 1956 roku F. B. Hildebrandt i C. Lanczos rozwinęli metodę wprowadzoną w 1795 roku przez G. Prony'ego. Podobną metodę zaproponował Y. Z. Cypkin. F. Ba Hli w 1954 roku opracował metodę momentów do wyznaczania parametrów obiektów. T. P. Goodman, J. B. Reswick, J. H. Laning i R. H. Battin próbowali zastosować do budowy modelu metodę korelacji. G. L. Rabkin, B. A. Mitrofanow, J. O. Szterenberga, A. A. Kardaszow, L. W. Karnuszin i E. C. Levy zaproponowali metody wyznaczania parametrów z danych częstotliwościowych. E. Whittaker i inni w 1958 roku wprowadzili pojęcie identyfikacji rekurencyjnej i sterowania adaptacyjnego w odniesieniu do modelu.

Pierwszą definicję identyfikacji podał L. A. Zadeh w latach 60. XX wieku. Do rozwoju identyfikacji przyczyniły się także badania P. Eykhoffa oraz T. C. Lee. Od 1967 roku International Federation of Automatic Control organizuje co 3 lata konferencje pod nazwą „Identification and System Parameter Estimation” poświęcone rozwojowi metod identyfikacji. Z tymi konferencjami wiązały się przeglądowe prace M. Cuenoda i A. P. Sage'a, P. Eykhoffa, K. J. Åströma. Charakter przeglądowy mają także prace A. Younga oraz R. E. Niemana, R. A. Fishera i D.E. Seborga. W latach 60. podjęto próby wspólnego rozwiązywania zadań identyfikacji i sterowania optymalnego. Wśród proponowanych metod była między innymi metoda quasi – linearyzacji wprowadzona do rozwiązywania zadań sterowania optymalnego przez R. Bellmana w 1957 roku i R. Kalabę w 1959 roku, a do identyfikacji przez K. S. P. Kumara i R. Shridara oraz R. Bellmana i R. Kalabę w 1965 roku. Metodę niezmienniczego zanurzenia wprowadzili do zadań identyfikacji P.M. Deutchmندی i R. Shridar oraz A. P. Sage i Masters w 1966 roku. Sage i J. L. Melsa zastosowali do identyfikacji zasadę maksimum Pontriagina. W latach 60. powstały także takie metody identyfikacji jak metoda całkowita, a także metoda filtrów stanu

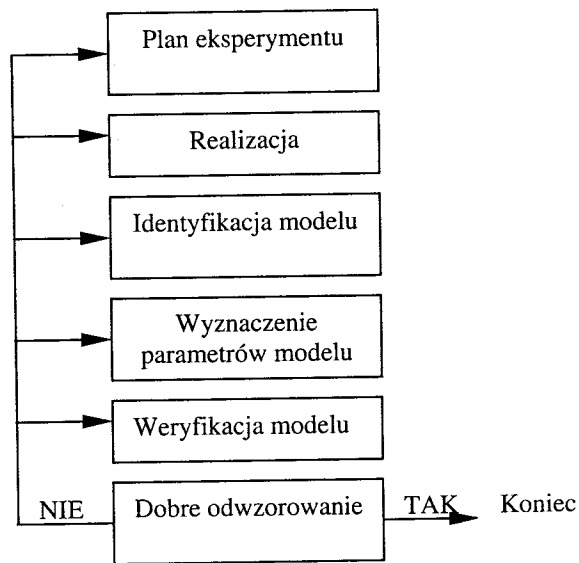
stosowana przez M. V. Mathewsa, W. W. Seiferta, Y. Kaya i S. Yamamura. Do rozwoju identyfikacji przyczyniło się znacznie upowszechnienie komputerów i rozwój komputerowych metod obliczeniowych, np. metod rozwiązywania układów równań liniowych, metod optymalizacji nieliniowej, a w szczególności algorytmów minimalizacji sumy kwadratów dla funkcji nieliniowych.

W latach 70. nastąpiło usystematyzowanie identyfikacji jako samodzielnego działu rozwijającego metody budowy modeli na podstawie pomiarów sygnałów wejściowych i wyjściowych obiektów. Wówczas zintensyfikowano prace nad podstawami identyfikacji i metodami ich rozwiązywania. Wprowadzono i upowszechniono takie pojęcia jak identyfikowalność, klasyfikacja metod identyfikacji, ogólny schemat postępowania w identyfikacji, metody weryfikacji otrzymanych modeli i wyboru ich struktury. Nastąpiło również odejście od rozwoju metod identyfikacji obiektów z czasem ciągłym na rzecz rozważania obiektów z czasem dyskretnym. Pierwszą metodę identyfikacji obiektów z czasem dyskretnym podali już w latach 60. między innymi M. J. Levin, K. Steiglitz i L. E. McBride, K.J. Åström, K. Y. Wong i E. Polak. Prekursorem badań nad metodami identyfikacji w Polsce jest Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych. Zagadnieniem tym zajmują się obecnie A. Niederliński, R. Gessing, Z. Bubnicki, J. Seidler, K. Mańczak [4,5,9,10].

## 2. Czym jest identyfikacja?

Modelowanie jest procesem żmudnym, a w przypadku złożonych obiektów, o nieznanym do końca zasadzie działania, często zawodnym. W takim przypadku identyfikacja może okazać się sposobem szybszym i wymagającym mniejszego nakładu pracy. Metody identyfikacji są używane w teorii sterowania i projektowania obiektów (konstrukcja algorytmów predykcyjnych, symulacja), telekomunikacji, geofizyce, mechanice, nauce o środowisku, ekonometrii oraz biologii [10].

Podstawowym podejściem w budowie modeli obiektów i procesów jest budowa modeli najprostszych, a następnie, na podstawie analizy rozbieżności między zachowaniem się modelu i obiektu (procesu) modelowanego, budowa modeli coraz bardziej złożonych w taki sposób, aby odwzorowanie obiektu (procesu) rzeczywistego było dokonane z pewną założoną dokładnością [5,9,11,12,13]. Wybór struktury i postaci modelu jest w praktyce podyktowany jego planowanym zastosowaniem, jak i własnościami obiektu lub procesu. Na rysunku 1 przedstawiono procedurę identyfikacji modelu matematycznego.



Rys. 1. Procedura identyfikacji obiektu (procesu)

Warunkiem rozpoczęcia identyfikacji jest wykonanie pomiarów na rzeczywistym obiekcie. Następnym etapem jest określenie klasy modeli, w której będzie poszukiwany najlepszy model, w sensie przyjętego wskaźnika jakości identyfikacji.

Otrzymany model podlega weryfikacji, na podstawie analizy różnic między sygnałami wyjściowymi modelu i obiektu. W wyniku weryfikacji następuje przyjęcie lub odrzucenie modelu.

### 3. Metody identyfikacji parametrycznej

Najwcześniej rozwiniętą metodą identyfikacji była metoda funkcji korelacji gęstości widmowej. Po raz pierwszy estymację parametrów modeli z czasem dyskretnym na podstawie funkcji korelacji, na przełomie lat dwudziestych i trzydziestych XX wieku zaprezentowali P. C. Yule i G. Walker, którzy przedstawili sposób obliczenia estymatorów dla modelu autoregresji. Zagadnienie to upowszechnili M. S. Bartlett oraz H. B. Mann i A. Wald. W 1958 roku E. C. Levy przystosował tę metodę w sposób dogodny do obliczeń komputerowych. Następnie została ona zmodyfikowana przez C. K. Sanathana, J. Koernerera oraz M. T. Jonga i K. S. Shanmugana. Algorytmy rozkładu gęstości prawdopodobieństwa przedstawili F. L.

Bauer, J. Rissanen. Wadą tej metody jest możliwość jej zastosowanie tylko w ograniczonej klasie modeli oraz złożone algorytmy obliczeniowe [4,10].

Metodę najmniejszej sumy kwadratów przedstawił w 1806 roku A.M. Legendre, a następnie w 1809 roku K. F. Gauss. Metoda ta służyła do wyznaczania orbit, planet i komet. Gauss wysunął postulat o przyjmowaniu średniej arytmetycznej zaobserwowanych wartości tej samej wielkości, jako wartości najbardziej prawdopodobnej. W przypadku pośrednich obserwacji, za najbardziej prawdopodobną wartość nieznanego parametru, przyjmował wartość, której suma kwadratów błędów między wartościami zaobserwowanymi a obliczonymi, pomnożonych przez współczynniki wagowe będzie najmniejsza. Metoda ta znalazła zastosowanie w mechanice nieba, genetyce, rolnictwie, chemii, metalurgii, energetyce, ekonometrii oraz cybernetyce. T. C. Hsia zaproponował interesującą metodę trójstopniową najmniejszej sumy kwadratów. Charakteryzuje się ona małą liczbą obliczeń oraz nie wymaga procedury iteracyjnej. Wśród metod najmniejszej sumy kwadratów identyfikacji obiektów dynamicznych należy wymienić metodę zmiennych pomocniczych, zaproponowaną w 1941 roku przez O. Reiersola, do badania zależności w ekonometrii. Do automatyki została przeniesiona przez P. Josepha, J. Lewisa i J. Tou. Rozwinęli ją M. L. Wong i E. Polak. Zaletą tej metody jest możliwość uzyskania estymatorów nieobciążonych [10].

K. F. Gauss zaproponował również metodę, którą w 1912 roku R. A. Fisher rozwinął i przedstawił w postaci metody największej wiarygodności. Zastosowanie metody największej wiarygodności przedstawili K. J. Aström i T. Bohlin. Omówili oni szczegółowo właściwości estymatorów i algorytmy obliczeń. W odniesieniu do metody najmniejszej sumy kwadratów, metoda ta wymaga o wiele więcej informacji o zmiennych (znajomość rozkładu prawdopodobieństwa zmiennych). Obliczenie estymatorów największej wiarygodności jest bardziej skomplikowane, niż obliczenie estymatorów najmniejszej sumy kwadratów [4, 9, 10].

H. Robbins i S. Monro w 1951 roku sformułowali zasadę aproksymacji stochastycznej. Podali oni procedurę iteracyjną do określenia pierwiastka funkcji regresji. J. Kiefer i J. Wolfowitz poszukiwali funkcji jednej zmiennej w warunkach zakłóceń losowych. Natomiast J. R. Blum użył aproksymacji stochastycznej do szukania ekstremum funkcji wielowymiarowych w warunkach zakłóceń losowych. W 1956 roku A. Dvoretzky podał ogólną procedurę iteracyjną. Przegląd metod aproksymacji stochastycznej związanych z identyfikacją przedstawili D. J. Wilde, R. C. K. Lee oraz H. B. Łoginow. Metodę aproksymacji stochastycznej stosuje się między innymi w teorii rozpoznawania obrazów, automatyce. W 1941 roku H. Hotelling opublikował przegląd zasad aproksymacji stochastycznej. H. Robbins i S. Monro jako pierwsi dokonali jej formalizacji matematycznej. Zaletą tej metody

jest prostota obliczeń. W metodzie najmniejszej sumy kwadratów nakład obliczeń był proporcjonalny do sześciannu wymiarowości funkcji regresji, natomiast w metodzie aproksymacji stochastycznej nakład obliczeń jest proporcjonalny do wymiarowości funkcji regresji modelu obiektu. Do zalet opisywanej metody należy zaliczyć również możliwość przyjęcia bardzo słabych założeń dotyczących badanego obiektu. Do wad należy zaliczyć heurystyczny charakter [4, 10].

#### 4. Identyfikacja w biomechanice chodu człowieka

Organizm człowieka jest układem wykazującym zdolność do samoregulacji i samooptrymalizacji. Proces samodzielnego poszukiwania optymalnej techniki ruchu człowieka opiera się na metodzie prób i błędów. W celu poprawnego sformułowania optymalnego modelu dla danego osobnika i wykonywanego zadania ruchowego, należy przeprowadzić identyfikację modelu, a następnie jego optymalizację. Identyfikacja obiektów i procesów biomechanicznych ma szczególne znaczenie, gdyż własności dynamiczne układu ruchu człowieka są słabo poznane [7, 8].

W przypadku bioobiektów, wiedza na temat istoty zjawisk i sposobów oddziaływania między nimi jest często niewystarczająca do utworzenia równań algebraicznych opisujących mechanizm działania. W związku z tym istnieje możliwość badania zjawiska z zewnątrz. Badany obiekt (proces) zostaje wówczas przedstawiony w postaci tzw. czarnej skrzynki symbolizującej nieznaną mechanizm działania. Obserwowane jest wejście i wyjście takiego obiektu (procesu). W medycynie jest to często jedyne możliwe podejście [6]. W tym przypadku modelowanie polega na przedstawieniu matematycznego opisu odpowiedzi badanego obiektu (procesu), a nie opisu jego funkcjonowania. Powstałe równanie jest równaniem empirycznym.

Podjęto próby identyfikacji sił uogólnionych w układach biomechanicznych. Nie można jednak tej metody zastosować do wyznaczenia wartości momentów sił rozwijanych w stawach kończyny dolnej podczas podwójnego podporu w chodzie, ze względu na małą liczbę niezależnych równań ruchu [2, 3]. Metody identyfikacji parametrycznej zaczęto stosować również w funkcjonalnej stymulacji elektrycznej, wykorzystując do modelowania aktywność mięśni oraz dynamikę segmentów poszczególnych części ciała człowieka [1].

#### 5. Podsumowanie

Modele uzyskane z identyfikacji nie wyjaśniają fizycznej istoty procesu, gdyż w większości uzyskane parametry modelu nie mają interpretacji fizycznej. Służą jedynie do uzyskania zadowalającej zgodności modelu z danymi eksperymentalnymi. Mimo ograniczonych możliwości tworzenia modeli uogólnionych na tyle, by mogły mieć charakter aplikacyjny, identyfikacja stanowi główne źródło poznania w dziedzinie badań nad ruchem ciała człowieka [8, 9].

Wybór metody identyfikacji jest związany z ilością informacji o obiekcie, posiadaną przed rozpoczęciem procesu identyfikacji. Dotyczy to przede wszystkim struktury obiektu, stochastyczności zakłóceń, stochastyczności parametrów obiektu. Spośród metod identyfikacji, najmniejszej ilości informacji a priori wymagają metody aproksymacji stochastycznej i metoda funkcji regresji. W metodzie regresji stosuje się najprostszy typ modelu matematycznego. Metoda aproksymacji stochastycznej nie potrzebuje dużej pamięci, gdyż nie wymaga gromadzenia wszystkich danych doświadczalnych. Może być łatwo dostosowana do algorytmów działających w czasie rzeczywistym, używanych do śledzenia zmieniających się w czasie parametrów. Umożliwia przeprowadzenie diagnostyki badanego obiektu.

#### Literatura

1. **Pavan E., et al.:** *Parameter identification for model-based control in functional electrical stimulation system.* Proceedings of the International Biomechatronics Workshop, Enschede The Netherlands 1999, pp. 66-70.
2. **Czyżkowski T. M., Maroński R., Pietrucha J.:** *Zastosowanie teorii sterowania optymalnego do identyfikacji sił uogólnionych w obiektach biomechanicznych.* Zeszyty Naukowe AWF we Wrocławiu Nr 42, 1986, s. 79-82.
3. **Eykhoff P.:** *Identyfikacja układów dynamicznych.* PWN, Warszawa, 1980.
4. **Golański P., Rymaszewski S.:** *Identyfikacja modelu dynamiki procesów naprowadzania lotu i sterowanej rakiety.* Prace Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2001.
5. **Kalicka R.:** *Modelowanie procesów kinetycznych w systemach biomedycznych.* Optymalna identyfikacja modelu. Monografie 18, Gdańsk, 2000.
6. **Kornecki S.:** *Identyfikacja własności biomechanicznych procesu stabilizacji mięśniowej.* Studia i Monografie AWF, z. 11, Wrocław, 1986.

7. **Kornecki S., Zawadzki J.:** *Zagadnienia identyfikacji parametrycznej i strukturalno-funkcjonalnej w badaniach techniki ruchu*. Problemy Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, Biomechanika, T. 5, WkiŁ, Warszawa, 1990, s. 413-433.
8. **Manerowski J.:** *Identyfikacja modeli dynamiki ruchu sterowanych obiektów latających*. Wydawnictwo Naukowe ASKON, Warszawa, 1999.
9. **Mańczak K, Nahorski Z.:** *Komputerowa identyfikacja obiektów dynamicznych*. PWN, Warszawa, 1983.
10. **Pauk J.:** *Parametric identification of lower limbs during walking of a man*. Conference Proceedings IV World Congress of Biomechanics, Canada, 2002, CD-ROM.
11. **Pauk J.:** *Identification of human gait model*. Conference Proceedings Biomechanics of man, Cejkovice, 2002, pp. 127-129.
12. **Pauk J, Jaworek K.:** *Parametric identification of lower limbs during walking of a man*. Design & Nature, WET Press, Southampton, 2000, pp. 361-366.

**Abstract:** There are presented the methods of identification of dynamical objects (function regression, stochastic approximation, function correlatio, density spectrum, the highest realibity, etc.) with their advantages and disadvantages in the paper. Moreover the paper presents historical aspect of identification of objects.

Sławomir Poskrobko<sup>1</sup>, Jan Łach<sup>2</sup>

## WSPÓLSPALANIE OSADÓW ŚCIEKOWYCH Z WĘGLEM KAMIENNYM

**Streszczenie:** Oczyszczalnie ścieków są od wielu lat priorytetowymi inwestycjami w ochronie środowiska. W efekcie, niemal każda gmina posiada już dzisiaj nawet kilka małych oczyszczalni, dzięki którym dało się zauważyć wyraźną poprawę czystości wód w rzekach. Jednak kilkuletnie funkcjonowanie wielu oczyszczalni ścieków, w zdecydowanej większości według nowych technologii, przysporzyło poważnych problemów, wytwarzając odpad w postaci osadów ściekowych. Laguny tej płynnej masy (o wilgotności około 90%) zalegają bowiem dzisiaj w dołach w pobliżu oczyszczalni, stwarzając poważne zagrożenie dla środowiska. Na rynku krajowym pojawiło się więc wiele technologii przystosowanych do spalania osadów ściekowych. Przedstawiciele firm światowych przekonują przyszłych inwestorów o skuteczności i wysokiej efektywności oferowanych instalacji, nie mówiąc zbyt wiele na temat bilansu energetycznego, stanowiącego o kosztach termicznego unieszkodliwiania osadów, w których 90 % wynosi udział wody.

W niniejszej pracy przedstawiono metodę unieszkodliwiania osadów ściekowych na złożu węglowym w kotłach rusztowych WR – 5. Zastosowanie tych kotłów uzasadnia się ich powszechną dostępnością. Stanowią one bowiem wyposażenie lokalnych ciepłowni miejskich. Realne jest więc zdecydowane obniżenie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych nowej instalacji do spalania osadów.

**Słowa kluczowe:** osady ściekowe, oczyszczalnia ścieków, spalanie osadów

### 1. Wstęp

W ostatnich latach ubiegłego stulecia powstało w Polsce wiele inwestycji, których celem jest poprawa jakości wód w polskich rzekach. Na inwestycje te składała się przede wszystkim budowa nowoczesnych oczyszczalni ścieków i tysięcy kilometrów kanalizacji. Niemalże każda gmina eksploatuje oczyszczalnię ścieków

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, ul. Wiejska 45C, 15-950

<sup>2</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, ul. Wiejska 45C, 15-950

już od co najmniej kilku lat. Można więc powiedzieć, że zdobyto dostateczne doświadczenie, aby spojrzeć nieco szerzej na problemy eksploatacyjne oczyszczalni, pozostawiając jednak otwarty problem zagospodarowania – a w zasadzie unieszkodliwienia – osadów ściekowych „produkowanych” w oczyszczalniach. Należy zaznaczyć, że mówiąc o zagospodarowaniu osadów, ma się na myśli przede wszystkim ich efektywne wykorzystanie w gospodarce. Przez wiele lat zagospodarowywano więc osad przede wszystkim jako substancję nawozową używającą pola uprawne, stosowano go do pielęgnacji zieleni miejskiej itp. Okazało się jednak, że osady ściekowe zawierają dużo związków szkodliwych, szczególnie metali ciężkich oraz ich związków rozpuszczalnych w wodzie i rozcieńczonych kwasach, bakterii, wirusów i ich przetrwalników, detergentów itp. Oznacza to, że wspomniany powyżej sposób ich zagospodarowywania może poważnie zagrażać środowisku naturalnemu. Z tego też względu w krajach Unii Europejskiej zarysowuje się coraz trwalsza tendencja ograniczania biologicznego wykorzystania osadów m.in. w celu uniknięcia wtórnych zakażeń gleby związkami chemicznymi i różnymi formami przetrwalnikowymi. Stosowane obecnie w Polsce metody unieszkodliwiania ograniczają się jedynie do składowania osadów w dołach w pobliżu oczyszczalni bądź deponowania ich na wysypiskach śmieci. Metody te, aczkolwiek ograniczają oddziaływanie osadów na środowisko, to jednak nadal nie eliminują poważnych zagrożeń. Analiza osiągnięć z zakresu badań podstawowych dotyczących metod przeróbki osadów prowadzi do wniosku, że już w niedalekiej przyszłości wdrożone zostaną nowe technologie, których celem będzie minimalizacja wytwarzania osadów wszędzie tam, gdzie jest to możliwe [1]. Rozwijając się również będą technologie unieszkodliwiania metodą termiczną w procesach spalania bezpośredniego [2] lub współspalania z innymi paliwami [3].

## 2. Stan gospodarki osadami w Polsce – metody unieszkodliwiania

Masa osadów z oczyszczalni ścieków w Polsce jest oszacowana. Według Nardziakiewicza i Kozioła [4], teoretyczna wielkość koniecznych do usunięcia osadów w skali kraju wynosi od około 980 000 Mg do około 2 500 000 Mg suchej masy. Cechą charakterystyczną osadów jest jednak wysoka zawartość wilgoci, która wynosi około 70% po ich wyciskaniu w prasach. Oznacza to, że masa substancji, którą należy przetworzyć, wynosi od 3 000 000 do 8 500 000 ton. Ilość powstających osadów można najlepiej oszacować na podstawie liczby mieszkańców. Według Bienia [5], ilość ta jest następująca:

- osady wstępne – 0.8 dm<sup>3</sup>/mieszkańca przy 6% zawartości s.m. w osadzie,
- osad wtórny – 1.5 - 8 dm<sup>3</sup>/mieszkańca przy 2% zawartości s.m. w osadzie,
- osady po chemicznym strąceniu – 1.2 - 8 dm<sup>3</sup>/mieszkańca przy 2% zawartości s.m. w osadzie o uwodnieniu 6 %.

Z wystarczającym przybliżeniem [6] przyjmuje się, że z 1 m<sup>3</sup> ścieków uzyskuje się średnio 0,6 – 2,0 kg suchej masy.

Przegląd metod utylizacji i unieszkodliwiania dowodzi, iż najczęściej stosowane są następujące technologie:

- składowanie osadów w stanie uwodnionym (około 90% wilgotności),
- składowanie w stanie odwodnionym mechanicznie (około 70% wilgotności),
- kompostowanie,
- stosowanie do celów rolniczych.

Natomiast rzadko bywają stosowane takie metody, jak: suszenie, higienizacja i hydroliza, bądź składowanie w stanie przetworzonym, ponieważ wymagają one ponoszenia nakładów finansowych, które często przekraczają możliwości gmin i powiatów. Najbardziej skutecznymi metodami unieszkodliwiania, dominującymi w krajach Unii Europejskiej, są technologie termiczne wysokotemperaturowe. Ich stosowanie wymaga jednak dużych nakładów finansowych, zarówno na etapie finansowania inwestycji, jak również w okresie eksploatacji. Warto przypomnieć, że spalanie masy osadu o wilgotności 70% wymaga dużych nakładów energetycznych. W typowych spalarniach osadów niewiele ciepła można odzyskać i wykorzystać do innych celów. Termiczną metodę unieszkodliwiania osadów wdrożono w Polsce w Dębogórze koło Gdyni. Technologia ta została opracowana w Politechnice Śląskiej, a producentem urządzeń jest firma RAFAKO z Raciborza. Metoda oparta jest na spalaniu suszonego (o wilgotności 35 – 40%) osadu na złożu fluidalnym pęcherzowym. Inne, spotykane w Europie, technologie termicznego unieszkodliwiania osadów polegają na ich spalaniu w piecach szybowych i obrotowych. Instalacje te wyposażone są w wysokosprawne systemy do oczyszczania spalin.

Powszechność stosowania węgla kamiennego w polskiej energetyce sprawia, że uwodnione osady ściekowe mogą być, jak podaje Pronobis [7], z powodzeniem unieszkodliwiane termicznie przez współspalanie w zawieszynie wodnej przy użyciu palników olejowych w kotłach energetycznych opalanych pyłem węglowym. Jednak jak dotąd, technologia ta nie znalazła powszechnego zastosowania w Polsce, mimo wielu skutecznych wdrożeń w Niemczech. Ciekawą metodę unieszkodliwiania osadów zaproponowała niemiecka firma PHILAQUA RST. Technologia opiera się na zastosowaniu ozonu w obróbce osadów po biologicznym procesie ich fermentacji, a także osadów zalegających na poletkach składowiskowych. Sprowadza

się to do dobrania odpowiednich proporcji cieczy obiegowej, osadu i ozonu. Poważną zaletą tej metody jest uzyskanie znacznej redukcji substancji biologicznej z osadów, z jednoczesnym pozostawieniem substancji mineralnych, których część stanowią związki rozpuszczalne w wodzie. Technologia ta, charakteryzująca się stosunkowo niskimi kosztami eksploatacyjnymi i brakiem negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne, ma realne szanse wdrożenia w Częstochowie i w Hajnówce.

### 3. Właściwości paliwowe osadów ściekowych

Badania nad właściwościami paliwowymi osadów ściekowych pod kątem ich współspalania z węglem kamiennym wykonano pod kierunkiem J. W. Wandrasza w Politechnice Śląskiej. W tabeli 1 [6] przedstawiono takie właściwości paliwowe osadów, jak: wartość opałowa, skład elementarny, udział części lotnych, charakterystyczne temperatury mięknięcia i topnienia popiołu. Wartości te porównano z analogicznymi właściwościami węgla kamiennego i brunatnego. Natomiast w tabeli 2 zaprezentowano stwierdzone zakresy zmienności zawartości wybranych metali w osadach. Badania wykonano na osadach pochodzących z oczyszczalni ścieków w Górnośląskim Okręgu Przemysłowym.

Tabela 1.

Właściwości paliwowe osadów oraz węgla kamiennego i brunatnego [6]

Pozycja	Jednostka	Osady (sucha masa)	Węgiel brunatny	Węgiel kamienny
Wartość opałowa	MJ/kg	7 – 15	6,7 – 11 (20)	16,7 – 34
Udział części lotnych	%	50 – 55	7 – 60	2,5 – 45
Skład elementarny:				
C	%	28 – 35	20 – 46	45 – 85
H	%	4 – 5,5	2 – 3,8	1 – 5
N	%	3,5 – 5,5	0,2 – 1,2	0,7 – 2,2
S	%	1 – 1,5	0,1 – 2,7	0,1 – 3,9
Cl	%	0,03 – 0,08	brak danych	(11)
Wilgoć	%	-	16 – 55	0,02 – 0,40
Popiół	%	20 - 40	7 - 38	1,5 – 20 3 – 40
Temperatura mięknięcia popiołu	°C	>1050	1030 - 1170	1000 – 1500
Temperatura topnienia popiołu	°C	> 1240	1270 - 1400	1030 – 1500

Tabela 2.

Zakres stężeń wybranych pierwiastków w osadach ściekowych dużej oczyszczalni miejskiej oraz w węglach wydobytych na świecie [6]

Pierwiastek	Jednostka	Osady: badana oczyszczalnia ścieków	Osady: wartości ekstremalne w Polsce	Węgiel kamienny
Al.	ppm	27406 – 28571		1800
As	µg/kg	6,2 – 15,3		0 – 170
Cd	ppm	1,36 – 20	1 – 560	0,1 – 3
Co	ppm	10,9 – 40,0		0 – 140
Cr	ppm	106,2 – 380	8 – 17100	0 – 60
Cu	ppm	80 – 800	14 – 1250	0,5 – 50
Fe	ppm	23586 – 26000		
Hg	ppm	1,99 – 2, 50		0,02 – 1
Mg	ppm	4519 – 5697	200 – 18100	
Mn	ppm	479 – 600		4 – 1990
Ni	ppm	16 – 50	3 – 950	0 – 130
Pb	ppm	20,0 – 49,5	58 – 2970	2 370
Se	ppm	1,2 – 1,3		0,02 – 10
Sn	ppm	23,1 – 27, 1		1 – 10
V	ppm	34,1 – 36,4		2 – 100
Zn	ppm	2432 – 6100	1150 - 10000	2 – 3560

Jak podano w opracowaniu 6, tak duże zróżnicowanie zawartości poszczególnych metali wynika głównie z tego, że do oczyszczalni komunalnych odprowadzono ścieki przemysłowe, których nie poddano wstępnemu oczyszczaniu.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż właściwości paliwowe osadów świeżych charakteryzują się stosunkowo stabilnymi wartościami udziału poszczególnych pierwiastków, a więc wartość opałowa osadów świeżych nie wykazuje istotnych zmian. Natomiast w osadach składowanych, z upływem czasu następuje obniżenie ich wartości opałowej, co jest spowodowane m.in. zmniejszeniem się udziału części palnych, np. udział części palnych w przypadku osadów świeżych zmienia się w zakresie 51 – 58 %, a dla osadów składowanych w przedziale 46 – 55 % i wykazuje tendencję spadkową.



#### 4. Propozycja współspalania osadów ściekowych z węglem kamiennym w kotle rusztowym WR 5 – bilans energetyczny

Możliwość współspalania osadów ściekowych z węglem kamiennym jest szeroko analizowana w literaturze naukowo-technicznej. Poniżej zostanie przedstawiony bilans energetyczny procesu spalania osadów ściekowych na złożu węglowym w kotle wodnym rusztowym. Obiektem bilansowym, z uwagi na powszechność stosowanego w polskiej energetyce komunalnej, jest kocioł WR 5. Kotły te stanowią wyposażenie wielu ciepłowni w miastach powiatowych. Bilansowanie przeprowadza się przy następujących założeniach:

1. ma się do czynienia ze stanem ustalonym,
2. spalanie jest niezupełne i niecałkowite,
3. pomija się towarzyszące spalaniu zjawisko dysocjacji,
4. pomija się entalpię mieszania paliwa i spalin,
5. moc cieplna kotła  $\dot{Q}_k = 5957,855 \text{ kW}$ , a jego sprawność  $\eta_k = 0.877$ ,
6. wilgotność osadu odwodnionego po przejściu przez prasy  $w_0 = 70\%$ ,
7. udział masowy osadów w paliwie wynosi 20% [8].

W obliczeniach bilansowych przyjęto, że:

1. wartość opałowa węgla –  $W_w = 28,183 \text{ MJ/kg}$  (KWK „Janina”),
2. wartość opałowa osadu ściekowego –  $W_o = 4,8 \text{ MJ/kg}$ ,
3. wartość opałowa mieszaniny paliwowej –  $W_{wo} = 23,506 \text{ MJ/kg}$ ,
4. strumień masowy wody z kotła –  $\dot{m}_1 = 118,6 \text{ t/h}$ ,
5. strumień masowy wody do kotła –  $\dot{m}_2 = 118,6 \text{ t/h}$ ,
6. strumień masowy węgla –  $\dot{m}_w = 849,6 \text{ kg/h}$ ,
7. strumień masowy osadów –  $\dot{m}_o = 212,4 \text{ kg/h}$ ,
8. strumień masowy popiołu –  $\dot{m}_p = 203,4 \text{ kg/h}$ ,
9. moc cieplna kotła –  $Q_k = 6100 \text{ kW}$ ,
10. temperatura spalin –  $t_{sp} = 124 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
11. temperatura powietrza spalania –  $t_3 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
12. temperatura wody powrotnej do kotła –  $t_2 = 74,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
13. temperatura wody z kotła –  $t_1 = 117,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
12. entalpia właściwa powietrza spalania: –  $i_3 = 55 \text{ kJ/kg}$ ,
13. entalpia właściwa wody powrotnej: –  $i_2 = 311,45 \text{ kJ/kg}$ ,

14. entalpia właściwa wody zasilającej kocioł: –  $i_1 = 492,36 \text{ kJ/kg}$ ,
15. entalpia właściwa spalin: –  $i_{sp} = 287,5 \text{ kJ/kg}$ ,
16. entalpia właściwa popiołu i żużła: –  $i_p = 1024 \text{ kJ/kg}$ .

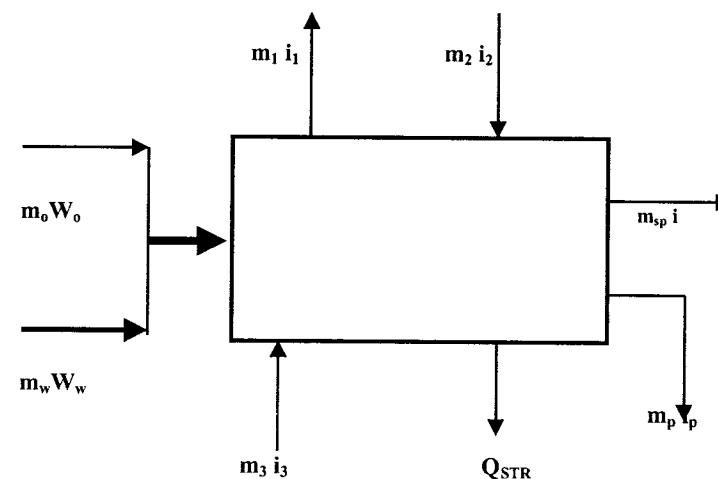
Bilans masowy dla rozważonego procesu ma postać:

$$\dot{m}_0 + \dot{m}_w + \dot{m}_3 + \dot{m}_2 - \dot{m}_1 - \dot{m}_{sp} - \dot{m}_p = 0, \quad (1)$$

a bilans energetyczny kotła przedstawia się następująco:

$$\eta_k \cdot (\dot{m}_0 \cdot W_o + \dot{m}_w \cdot W_w) + \dot{m}_3 \cdot i_3 + \dot{m}_2 \cdot i_2 - \dot{m}_1 \cdot i_1 - \dot{m}_{sp} \cdot i_{sp} - \dot{m}_p \cdot i_p = 0 \quad (2)$$

Z powyższego układu równań obliczono strumień masowy powietrza spalania  $\dot{m}_3 = 8,9522 \text{ kg/s}$  oraz strumień masowy spalin  $\dot{m}_{sp} = 9,203 \text{ kg/s}$ . Schemat bilansowy współspalania osadów ściekowych z węglem kamiennym przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat bilansowy współspalania osadów ściekowych z węglem kamiennym w kotle rusztowym WR 5 o mocy cieplnej 6,1 MW

## 5. Wnioski

Na podstawie wstępnej analizy opartej o bilans masy i energii, termiczna utylizacja osadów ściekowych współspalanych z węglem kamiennym w kotle rusztowym WR 5 jest możliwa. Jednak w celu podjęcia decyzji co do wyboru omawianej technologii unieszkodliwiania osadów, należy przeprowadzić obliczenia szczegółowe dotyczące równań bilansowych w zakresie bilansów cząstkowych, wynikających ze składu elementarnego mieszaniny paliwowej (np. bilans węgla, azotu, wodoru, tlenu, siarki itd.). Analizie obliczeniowej szczegółowej należy poddać również sam proces spalania (współspalania) w kotle w celu uściślenia przedstawionych w pracy obliczeń bilansowych. Na podstawie uzyskanych wyników można dopiero planować procedury wdrożeniowe z wykorzystaniem rzeczywistego kotła WR 5. Z uwagi na to, iż unieszkodliwiany jest odpad, instalacja kotła wymaga dodatkowego wyposażenia w system oczyszczania spali. Emisja zanieczyszczeń gazowych do atmosfery powinna spełniać normy Unii Europejskiej zapisane w Dyrektywie 2000/76/EC. Po uzyskaniu pozytywnych wyników z badań wdrożeniowych, instalacja, zgodnie z obowiązującym prawem, powinna przejść wymaganą procedurę w celu dopuszczenia jej do eksploatacji jako tzw. spalarni odpadów. Badania pilotażowe przeprowadzone przez zespół J. W. Wandrasza w Ciepłowni Fasty w Białymstoku dowiodły, że metoda współspalania osadów z węglem kamiennym nie stanowi zagrożenia dla środowiska naturalnego. Podstawową jej zaletą jest korzystny bilans energetyczny oraz niskie nakłady inwestycyjne i niskie koszty eksploatacyjne. Wydaje się więc, iż technologia ta z powodzeniem powinna znaleźć szerokie zastosowanie w Polsce.

Pomijając metody termiczne, ze względu na niskie koszty i wysoką skuteczność, na uwagę zasługuje technologia Philaqua polegająca na rozpuszczaniu osadów ściekowych za pomocą ozonu. Stosowana jest jako element końcowy procesu oczyszczania ścieków.

## Literatura

1. Materiały badawczo-wdrożeniowe firmy Philaqua RST Aufbereitungstechnik ARGE. Gladbeck, Niemcy, 2001.
2. *Termiczna utylizacja osadów ściekowych*. Materiały informacyjne firmy RA-FAKO, Racibórz, listopad 2001.
3. **Wandrasz J. W.:** *Współspalanie osadów ściekowych na złożu węglowym*. Ciepłownia Fasty-Białystok, (niepublikowana praca badawcza).

4. **Nadziakiewicz J., Koziół M.:** *Osady z oczyszczalni ścieków – właściwości oraz sposoby termicznego zagospodarowania*. Praca zbiorowa „Paliwa z odpadów” (pod redakcją J. W. Wandrasza, J. Nadziakiewicza), T. 2, Wydawnictwo Helion, Gliwice, 1999.
5. **Bień J. B.:** *Osady ściekowe – teoria i praktyka*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2002.
6. **Koziół M., Nadziakiewicz J.:** *Wpływ zmienności właściwości osadów ściekowych na możliwość ich współspalania z węglem*. Praca zbiorowa „Paliwa z odpadów” (pod redakcją J. W. Wandrasza, J. Nadziakiewicza), T. 3, Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2001.
7. **Pronobis M.:** *Modernizacja kotłów energetycznych*. WNT, Warszawa, 2002.
8. **Nadziakiewicz J.:** *Spalanie stałych substancji odpadowych*. Wydawnictwo Gnome, Katowice, 2001.

## CON - COMBUSTION OF SLUDGE WITH HARD COAL

**Abstract:** From many years, sewage-treatment plants are preference investments in protection of environment. In effect, almost every commune possesses already some of sewage-treatment plants, thanks of which it gave to notice emphatic improvement of cleanness of water in rivers. However, several years long functioning of many sewage-treatment plants in decided most cases according to new technologies caused serious problems consisting in waste production in the form of sludge. Today, lagoon of this liquid mass (with humidity about 90%) cover settling pits around sewage-treatment plants, creating serious threat for environment. Many technologies adapted to burning of sludge already appeared on our national market. Representatives of world firms convince future investors about effectiveness and high efficiency of offered installation, no saying too many on energy balance determining cost of thermal neutralizing of sludge with fraction of water about 90%. This paper is devoted to the presentation of the technology of neutralizing of sludge on coal deposit in the WR-5 stoker fired boilers. Use of this boilers is connected with theirs general accessibility. They make equipment of local municipal heating plant. Then, it is real to reduce both capital and operating costs of new installation to burning of sludge.

Pracę wykonano w ramach realizacji pracy statutowej S/WM/2/01.

Henryk Skrocki<sup>1</sup>

## WYKORZYSTANIE NADWYŻEK CIEPŁA POWSTAJĄCYCH PRZY SPALANIU ODPADÓW

**Streszczenie:** Podczas pracy spalarni odpadów – przede wszystkim w okresie letnim – występują okresowe nadwyżki energii cieplnej. Interesująca wydaje się propozycja ich zagospodarowania do produkcji „chłodu”. W pracy zaproponowano zastosowanie bromo-litowego urządzenia chłodniczego do oziębiania wody. Przygotowana woda lodowa może być wykorzystana w klimatyzacji lub w procesach produkcyjnych wymagających chłodzenia.

**Słowa kluczowe:** spalanie odpadów

### Oznaczenia

AUCH	– absorpcyjne urządzenie chłodnicze
SPC	– sprężarkowa pompa ciepła
EC	– elektrociepłownia
TG	– turbina gazowa
APC	– absorpcyjna pompa ciepła
DN	– desorber niskotemperaturowy
DW	– desorber wysokotemperaturowy
TUO	– termiczna utylizacja odpadów
$Q_g$	– strumień ciepła dostarczony do AUCH
$D$	– strumień masowy pary wodnej
$Q_0$	– wydajność chłodnicza
$\varepsilon$	– współczynnik wydajności chłodniczej
$\dot{m}_u$	– strumień masowy roztworu ubogiego (o niskim stężeniu LiBr w H <sub>2</sub> O)
$\dot{m}_b$	– strumień masowy roztworu bogatego

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów,  
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok

$\dot{m}$	– strumień masowy wody jako czynnika chłodniczego
$\xi_u$	– stężenie masowe LiBr w roztworze ubogim
$\xi_b$	– stężenie masowe LiBr w roztworze bogatym
$h$	– entalpia właściwa
$\dot{m}_{pd}$	– strumień pary wodnej wypływający z DW i ogrzewający roztwór ubogi w DN

## 1. Wstęp

Jednym ze sposobów utylizacji odpadów (w tym również odpadów niebezpiecznych) jest spalanie. Metoda ta jest stosowana w świecie coraz powszechniej. Spalanie odpadów w Polsce jest w natomiast na etapie początkowym. Trudności w zastosowaniu metody wynikają z poczucia zagrożenia społeczeństwa zanieczyszczeniem środowiska przez emitowane spaliny. Brak jest jeszcze świadomości, że stosowane obecnie technologie oczyszczania spalin nie powodują zagrożenia dla środowiska. Stosowne zabezpieczenia zapewniają przepisy dotyczące granicznych wartości emisji szkodliwych składników powstających w procesie spalania. Szczegółowy monitoring umożliwi zaś bieżącą kontrolę emisji produktów spalania. Obecnie w Polsce wprowadza się przede wszystkim kontrolowane spalanie odpadów szpitalnych. Należy oczekiwać, że w następnej kolejności budowane będą spalarnie odpadów komunalnych i fabrycznych. Odpady, zarówno komunalne, jak i fabryczne, zawierają znaczne ilości tworzyw sztucznych nie podlegających naturalnemu rozkładowi w rozsądnym okresie czasu. Zwiększają one wprawdzie kaloryczność odpadów jako paliwa, jednak z drugiej strony komplikują proces oczyszczania spalin. Koszt spalania 1 kg odpadów szpitalnych wynosi około 2 – 3 zł. Koszty funkcjonowania spalarni można znacznie zmniejszyć, budując układy wieloskojarzone z jednoczesnym wytwarzaniem energii elektrycznej, ciepłej i chłodniczej.

## 2. Przegląd instalacji do spalania odpadów

Na typowy proces termicznej utylizacji odpadów składa się:

- spalanie odpadów,
- odzyskiwanie ciepła powstającego podczas spalania,
- oczyszczanie spalin i innych produktów spalania,
- zagospodarowanie produktów spalania i produktów oczyszczania spalin.

Spalanie odpadów najczęściej odbywa się na ruszcie, znacznie rzadziej stosuje się systemy ze stacjonarnym złożem fluidalnym. Inną metodą, będącą obecnie jeszcze w stanie prób, jest wykorzystywanie wstępnego zgaszania (pirolizy), a następnie – spalania powstałego gazu. Do zainicjowania i podtrzymywania procesu pirolizy wykorzystuje się ciepło spalania powstałego gazu. Proces zaczyna być opłacalny, gdy odpady mają bardzo wysoką kaloryczność, natomiast sprawność ogólna instalacji służących do spalania typowych odpadów komunalnych może być mniejsza od zera (dodatkowe źródło ciepła np. gaz sieciowy do podtrzymywania pirolizy). Polska firma RAFAKO oferuje duży wybór kotłów odzyskowych do termicznej utylizacji odpadów o wydajnościach od 6 do 100 t/h pary przy parametrach: ciśnienie 2 – 12 MPa i temperatura 220 – 500°C. Z przedsiębiorstw zagranicznych na polskim rynku znana jest firma ENTECH z Australii, która produkuje zestawy do termicznej utylizacji odpadów w różnej konfiguracji. Układ taki składa się z:

- pirolitycznej komory gazyfikującej odpady,
- termicznego reaktora, w którym spala się wytworzony wcześniej gaz,
- systemu odzysku energii cieplnej,
- systemu oczyszczania spalin.

System odzysku energii może wytwarzać gorącą wodę, parę lub energię elektryczną w turbozespolu.

## 3. Odzysk energii spalania

Do odzyskiwania energii ze spalonych odpadów służą różne urządzenia, np.:

- a) komora spalania odpadów wraz z instalacją oczyszczania spalin, kocioł odzyskowy produkujący parę wodną wysokoprężną (~ 30 MPa), turbina przeciwprężna, wymiennik ciepła typu para przeciwprężna – woda grzewcza zasilająca sieć ciepłowniczą,
- b) komora spalania odpadów wraz z instalacją oczyszczania spalin, kocioł odzyskowy, silnik Spillinga, wymiennik ciepła typu para nasycona – woda grzewcza lub, zamiast wymiennika, chłodziarka H<sub>2</sub>O/LiBr,
- c) komora zgaszania odpadów, komora spalania gazu, kocioł odzyskowy, instalacja oczyszczania spalin,
- d) komora spalania odpadów wraz z instalacją oczyszczania spalin, kocioł odzyskowy o parametrach pary stosowanych w energetyce zawodowej współpracujący z elektrowniami zawodowymi. (przykładowo kocioł firmy RAFAKO o pa-

rametrach pary: temperatura – 500°C i ciśnienie 12 MPa zainstalowany wspólnie z niemiecką firmą EVT w Mannheim w Niemczech).

#### 4. Energia uzyskiwana ze spalania odpadów

Wartość opałowa odpadów w zasadniczym stopniu zależy od ich składu morfologicznego. W ostatnich latach obserwuje się w Polsce stały wzrost zawartości tworzyw sztucznych i substancji palnych w odpadach komunalnych. Średnia roczna wartość opałowa odpadów komunalnych wynosi około 9200 kJ/kg [1]. Obecnie „produkuje się” w Polsce średnio 330 kg odpadów rocznie na 1 mieszkańca [7]. Ze spalania tej ilości odpadów można uzyskać – w przypadku miasta liczącego 30 tysięcy mieszkańców – energię o mocy około 3 MW. Średnie zapotrzebowanie na energię cieplną przy temperaturze zewnętrznej –15°C wynosi około 1,5 kW na 1 mieszkańca. Spalanie odpadów o wspomnianej wartości opałowej pokrywa to zapotrzebowanie w 6,8% [1]. Udział energii cieplnej w całorocznym bilansie jest bardziej korzystny i wynosi około 26% całej energii wyprodukowanej na potrzeby mieszkańców [1].

#### 5. Układy skojarzone

Produkcja energii cieplnej i elektrycznej w skojarzeniu jest metodą bardzo efektywną. W największych polskich miastach działają elektrociepłownie wytwarzające ciepło (źródło energii cieplnej zdalaczynnej) i energię elektryczną. Teoretyczną analizę poprawy efektywności elektrociepłowni przeprowadzono w [8]. Wzrost sprawności EC można uzyskać przez obniżenie temperatury spalin odpływających z kotła odzyskowego. Do tego celu zastosowano pompę ciepła. Analizowano trzy układy skojarzone:

- kocioł parowy, turbina przeciwnieprężna, generator, sprężarkowa pompa ciepła (SPC), wykorzystując w 100% wytworzoną energię elektryczną do napędu sprężarki chłodniczej,
- elektrociepłownia parowo – gazowa zasilana gazem ziemnym, tj.: turbina gazowa (TG), generator, SPC zasilana jak w punkcie a,
- EC parowo-gazowa jak w punkcie b), ale z zastosowaniem absorpcyjnej pompy ciepła (APC).

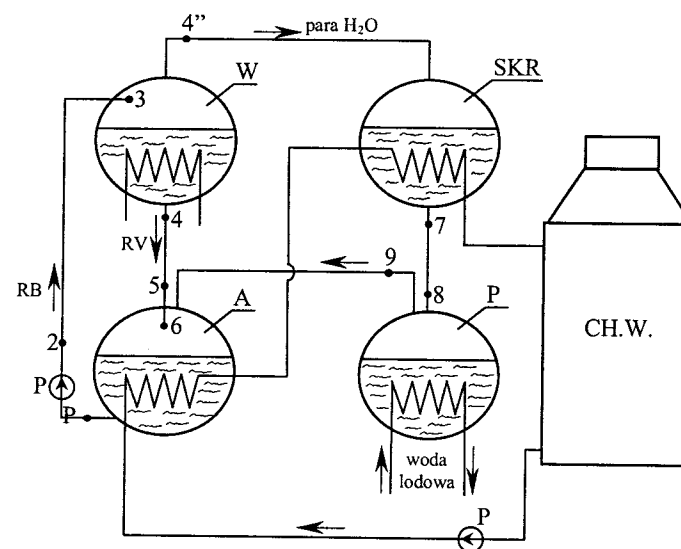
Korzystny wynik analizy uzyskano jedynie dla układu c), z zastrzeżeniem, że nie świadczy on jeszcze o celowości instalowania APC, w każdym przypadku należy bowiem przeprowadzić analizę ekonomiczną.

W [4] przedstawiono wiele przykładów zastosowania układów ciepłochłodniczych. Układy te, zbudowane w oparciu o absorpcyjne urządzenia chłodnicze (AUCH), wykorzystują ciepło odpadowe. AUCH można wykorzystać do:

- absorpcyjnej pompy grzewczej niskoogrzewanej (transformator ciepła),
- absorpcyjnej pompy ciepła wysokoogrzewanej (APC),
- chłodziarki absorpcyjnej (produkcja wody lodowej),
- urządzenia grzewczo-chłodniczego (produkcja wody lodowej i wody grzewczej).

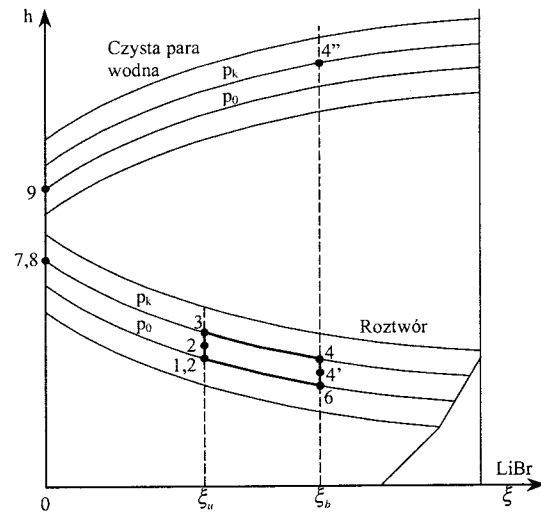
#### 6. Absorpcyjne urządzenie chłodnicze

Absorpcyjne urządzenia chłodnicze (AUCH) wykorzystują procesy wymiany ciepła i masy przebiegające w roztworach dwuskładnikowych. Do znanych AUCH należy zaliczyć amoniakalno-wodne urządzenie chłodnicze, w którym czynnikiem chłodniczym jest  $\text{NH}_3$  oraz bromolitowe urządzenie chłodnicze, w którym czynnikiem chłodniczym jest woda.



Rys. 1. Schemat ideowy bromolitowego AUCH (A – absorber, P – parownik, W – wornik, SKR – skraplacz, P – pompa, CH.W. – chłodnia wentylatorowa)

Amoniakalne AUCH stosowane są w zakresie temperatur parowania sięgających 45°C, natomiast bromolitowe mają zastosowanie przeważnie w klimatyzacji do chłodzenia wody lodowej o temperaturze 6–12°C. Schemat ideowy bromolitowego AUCH przedstawiono na rysunku 1, natomiast parametry obiegu na rysunku 2.



Rys. 2. Obieg bromolitowego AUCH

W bromolitowych AUCH nie występują zawory dławiące. Różnica ciśnień pomiędzy  $p_o$  i  $p_k$  jest na tyle mała, że wystarczy odpowiednie rozmieszczenie wymienników ciepła (hydrostatyczne różnice ciśnień) w pionie. AUCH wyposaża się w regeneracyjne wymienniki ciepła celem zwiększenia efektywności obiegu. Efektywność AUCH można również poprawić przez dwustopniową desorpcję roztworu LiBr-H<sub>2</sub>O. Ubogi roztwór tłoczony przez pompę obiegową, po podgrzaniu w niskotemperaturowym wymienniku ciepła, jest rozdzielany na dwa strumienie o jednakowym natężeniu płynące do desorberów: niskotemperaturowego DN i wysokotemperaturowego DW. Desorber wysokotemperaturowy DW jest podgrzewany parą wodną napędową, natomiast drugi DN jest zasilany parą wodną powstałą z odparowania roztworu uboższego w DW. Opisane wyżej AUCH produkowane jest przez firmę Carrier i YORK. Wszystkie wymienniki ciepła, pompy i armatura (łącznie z automatyką) umieszczone są na wspólnej ramie i w całości dostarczane na miejsce montażu.

## 7. Silnik parowy Spillinga

Silnik parowy Spillinga pracuje według termodynamicznego obiegu Rankine'a. Jest to unowocześniona wersja tradycyjnego silnika parowego. Innowacyjność konstrukcji polega przede wszystkim na zastosowaniu materiałów umożliwiających pracę bezsmarną. Para opuszczająca silnik nie jest zanieczyszczona olejem i może być powtórnie wykorzystana (jako skropliny) w obiegu cieplnym zamkniętym. Silniki parowe Spillinga budowane są najczęściej jako zespoły z generatorami elektrycznymi o mocy od 60 do 1500 kW. Mogą też napędzać bezpośrednio maszyny robocze (sprężarki, pompy). Sprawność całkowita, odniesiona do izentropowego rozprężania pary, wynosi około 45–50%.

## 8. Analiza wytwarzania energii elektrycznej, ciepła i chłodu w urządzeniach skojarzonych z kotłem odzyskowym wykorzystującym ciepło termicznej utylizacji odpadów (TUO)

Do analizy użyto kotła odzyskowego typu OS-8.1 firmy RAFAKO o parametrach:

- ciśnienie pary – 2,0 MPa,
- temperatura pary – 300°C,
- wydajność pary – 6 t/h.

Kocioł jest przystosowany do spalania odpadów w podanej powyżej ilości, tj. „produkowanej” przez miasto o wielkości 30 tysięcy mieszkańców.

### 8.1. Silnik parowy Spillinga

Parametry wlotowe pary wodnej:

$$p_{wlot} = 20 \text{ bar},$$

$$p_{wylot} = 3 \text{ bar},$$

$$D = 6 \text{ t/h} = 1,67 \text{ kg/s}.$$

Moc teoretyczna  $N_t$  (rozprężania izentropowego) wynosi

$$N_t = D \cdot \Delta h_t = 665 \text{ kW},$$

natomiast moc rzeczywista (po uwzględnieniu sprawności całkowitej  $\eta = 0,45$ ) jest równa

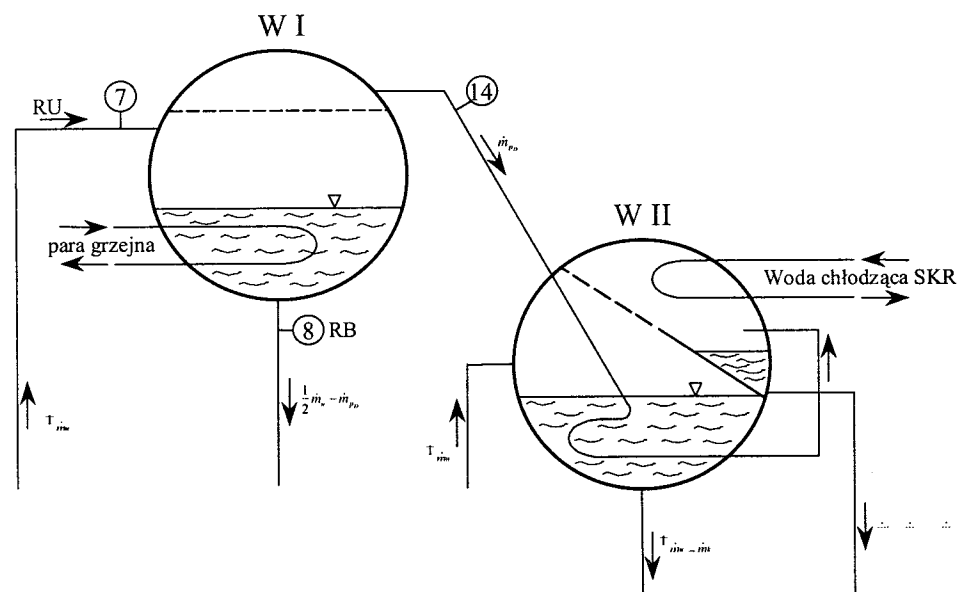
$$N_{rz} = 665 \cdot 0,45 = 295 \text{ kW.}$$

Temperatura pary wylotowej wynosi  $t_{wylot} = 185 \text{ }^\circ\text{C}$  (po uwzględnieniu, że  $\Delta h_{rz} = \frac{N_{rz}}{D}$ ).

Oznacza to, że parametry pary wylotowej za silnikiem Spillinga są wystarczające do zasilania chłodziarki absorpcyjnej.

## 8.2. Absorpcyjne urządzenie chłodnicze

Do analizy przyjęto AUCH firmy Carrier typ 16JT. Jest to urządzenie o dwustopniowej desorpcji roztworu bogatego i dwustopniowej regeneracji ciepła roztworów, co umożliwi uzyskanie wysokiego współczynnika wydajności chłodniczej. Schemat budowy urządzenia przedstawiono w [9], natomiast na rysunku 3 podano parametry obiegu roztworów.



Rys. 3. Obieg roztworów AUCH urządzenia 16JT

### 8.2.1. Bilans masowy desorberów

Bilans masowy desorbera wysokotemperaturowego ma postać:

$$\dot{m}_u(1 - \xi_u) - \dot{m}_b(1 - \xi_b) = \dot{m}, \quad (1)$$

$$\dot{m}_u - \dot{m}_b = \dot{m}, \quad (2)$$

przy czym strumień masowy czynnika chłodniczego (wody – pary wodnej)  $\dot{m}$  wyznaczono ze wzoru  $\dot{m} = \frac{Q_o}{q_o}$ , gdzie:  $q_o$  – ciepło parowania wody przy ciśnieniu

parowania. Z układu równań (1) i (2) wyznaczono strumienie  $\dot{m}_u$  i  $\dot{m}_b$ .

Bilans masowy desorbera niskotemperaturowego

$$\frac{1}{2} \dot{m}_u(1 - \xi_u) = \left( \frac{1}{2} \dot{m}_u - \dot{m}_{pd} \right) (1 - \xi_b) + \dot{m}_{pd}. \quad (3)$$

Z równania tego wyznaczono  $\dot{m}_{pd}$ .

### 8.2.2. Bilans cieplny desorberów

Bilans cieplny desorberów:

$$Q_g + \frac{1}{2} \dot{m}_u \cdot h_7 = \left( \frac{1}{2} \dot{m}_u - \dot{m}_{pd} \right) \cdot h_8 + \dot{m}_{pd} \cdot h_{14} \quad (4)$$

służy zaś wyznaczenia  $Q_g$ .

Współczynnik wydajności chłodniczej wyznaczono ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{Q_g} = 2,24 \quad (5)$$

### 8.2.3. Strumień cieplny pary grzewczej

Przyjęto, że para o parametrach wylotowych z silnika Spillinga będzie bezpośrednio podawana do desorbera wysokotemperaturowego AUCH, w którym następuje izobaryczne wykroplenie. Skropliny podawane będą pompą do kotła odzyskowego. Strumień cieplny oddany w AUCH określa wzór:

$$Q_g = D \cdot \Delta h, \quad (6)$$

gdzie:

$\Delta h = h_{wl} - h_{wyl}$ ,  $h_{wl}$  – entalpia właściwa pary wlotowej do chłodziarki,

$h_{wyl}$  – entalpia właściwa skroplin opuszczających chłodziarkę.

W analizowanym przypadku otrzymuje się:

$$Q_g = 1,677(2836 - 560) = 3801 \text{ kW}.$$

### 8.2.4. Wydajność chłodnicza

Wydajność chłodniczą wyznaczono na podstawie zależności (5)

$$Q_o = \varepsilon \cdot Q_g = 2,24 \cdot 3801 = 8140 \text{ kW}.$$

Dobrano AUCH typ 16JT firmy Carrier (szt. 2) o wydajności chłodniczej 4220 kW każda.

## 9. Podsumowanie

Z otrzymanych wyników wynika, że przy średnich zyskach ciepła 8 kW na jedno mieszkanie w okresie letnim, wyprodukowanego „chłodu” wystarczy na klimatyzowanie około 1000 mieszkań. Jest to znaczna ilość, jak na trzydziestotysięczne miasto. Wodę lodową można transportować na znaczne odległości rurami preizolowanymi. Rurociągi takie układa się bezpośrednio w gruncie na głębokości, gdzie średnia roczna temperatura wynosi 10°C. Przy średniej temperaturze wody lodowej 9°C, różnica temperatur pomiędzy medium chłodzącym, a gruntem jest bardzo mała. Straty ciepła są zatem znikome. Trzeba jedynie liczyć się ze stratami pracy pompowania wody (opory przepływu). Przedstawiona koncepcja

może być atrakcyjna w modernizacji sieci ciepłowniczych małych miast w przy przechodzeniu z tradycyjnych sieci kanałowych na sieci preizolowane lub też w budowie nowych sieci. W okresie chłodnym para odlotowa z silnika Spillinga może – w zainstalowanych dodatkowych wymiennikach ciepła – podgrzewać sieciową wodę grzewczą.

## Literatura

1. **Pacher W.:** *Spalanie odpadów komunalnych z wykorzystaniem ciepła do ogrzewania miasta jako aktywny czynnik ochrony środowiska*. Gospodarka Paliwami i Energią, 4, 1997.
2. **Szrgut J., Cholewa A.:** *Siłownia turbogazowa na wilgotne powietrze*. Gospodarka Paliwami i Energią, 4, 1997.
3. **Kurpisz K.:** *Transformator ciepła – zasada działania i możliwości zastosowań w Polsce*. Gospodarka Paliwami i Energią, 10-12, 1989.
4. **Siekanowicz T.:** *Przykłady wykorzystania energii odpadowej przy zastosowaniu technik chłodniczych*. Gospodarka Paliwami i Energią, 11, 2002.
5. **Misra R.D., Sahoo P.K., Sahoo S., Gupta A.:** *Thermoeconomic optimization of a single effect water/LiBr vapour absorption refrigeration system*. International Journal of Refrigeration, 26, 2003, 158-169.
6. **Kurpisz K.:** *Analiza sposobów wykorzystania niskotemperaturowej energii odpadowej*. Gospodarka Paliwami i Energią, 9, 1988.
7. **Skowron H., Mirosław J.:** *Rozwój technologii termicznej utylizacji odpadów komunalnych – uwarunkowania wdrożeń w Polsce*. Energetyka, 12, 1999.
8. **Szargut J.:** *Celowość stosowania pomp cieplnych w elektrociepłowniach*. Gospodarka Paliwami i Energią, 4, 1996.
9. **Katalog produktów firmy „Carrier”**. *Air conditioning solutions for all applications*. Paris, 2001.

### UTILIZING OF SURPLUS OF THERMAL ENERGY PRODUCED IN INCINERATING PLANT

**Abstract:** During work of incinerating plant one deals with periodical surplus of thermal energy first of all in summer period. It seems that interesting proposal can be connected with their utilization to production of “coolness”. This paper is devoted to presentation of bromine-lithium refrigerating system appropriated to cooling of water. Like this prepared ice water can be used as cooling medium in air-conditioning or in manufacturing processes.

Pracę wykonano w ramach realizacji pracy statutowej S/WM/2/01.



Henryk Skrocki<sup>1</sup>

## HYDRATACJA I DEHYDRATACJA W MAGAZYNOWANIU ENERGII CIEPLNEJ

**Streszczenie:** Wiele niekonwencjonalnych źródeł energii odznacza się złą koherentnością. W instalacjach grzewczych, wykorzystujących te źródła, uruchamiane jest, w okresach wzmożonego zapotrzebowania na energię cieplną, dodatkowe źródło ciepła (kocioł gazowy lub olejowy). Urządzenie to można je wyeliminować magazynując nadwyżki niekonwencjonalnej energii uzyskiwane w okresach zmniejszonego zapotrzebowania na ciepło (lato) i odzyskiwania energii cieplnej podczas zwiększonego zapotrzebowania (jesienno-zimowy sezon grzewczy). W pracy przedstawiono możliwość magazynowania energii cieplnej w hermetycznych zbiornikach wypełnionych solą metalu (np. siarczkiem sodu). Jest w nich zainstalowany wymiennik ciepła, służący do ładowania lub rozładowywania akumulatora energii cieplnej. Woda ogrzana (np. w kolektorach słonecznych lub w skraplaczach urządzeń klimatyzacyjnych) przekazuje ciepło podczas ładowania do wypełniającej zbiornik uwodnionej soli (hydratu), powodując jej osuszenie (dehydratację). Rozładowywanie akumulatora następuje podczas uwodnienia hydratu. Wydziela się wtedy ciepło hydratacji i powstaje sól uwodniona (hydrat). Proponowana metoda umożliwia transport zamkniętego zbiornika na znaczne odległości, jak również rozładowywanie akumulatora w dowolnym czasie.

**Słowa kluczowe:** hydratacja, dehydratacja, magazynowanie energii cieplnej

### 1. Wstęp

Podczas wytwarzania energii elektrycznej, jak również w różnych procesach produkcyjnych, powstają duże ilości tzw. energii odpadowej. Gdyby udało się tę energię zmagazynować, a następnie wykorzystać w innym miejscu i czasie, to możliwe byłoby poprawienie ogólnego bilansu zużycia energii, a tym samym zmniejszenie wydobycia nieodnawialnych nośników energii. Należy podkreślić, że wiele ośrodków naukowych na świecie prowadzi intensywne badania nad różnymi sposobami magazynowania energii.

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok

Pomimo znacznego zmniejszenia energochłonności przemysłu wytwórczego, przewiduje się jednak duży wzrost spożycia energii (o charakterze wykładniczym), przy czym należy mieć świadomość, że znaczne ilości energii pochłaniają procesy produkcji „chłodu”. Dotyczy to zarówno chłodnictwa, jak i klimatyzacji. Jednocześnie w procesach tych powstają duże ilości ciepła odpadowego (3-4 -krotnie wyższe niż zużyta energia elektryczna). Duże ilości energii odpadowej powstają także w motoryzacji – silniki samochodowe przekazują do otoczenia, tylko przez chłodnicę, około 20 % energii zawartej w spalonym paliwie.

Niewyczerpalnym źródłem energii jest Słońce. Energię promieniowania słonecznego można pozyskiwać kilkoma sposobami. Przede wszystkim, proces ten zachodzi w kolektorach płaskich (powietrznych i cieczowych), układach skupiających promieniowanie słoneczne (elektrownie słoneczne) oraz w ogniwach foto-woltaicznych przetwarzających promieniowanie słoneczne bezpośrednio w energię elektryczną (technologia ostatnich lat). Natężenie promieniowania słonecznego w strefach klimatycznych Polski jest zmienne w obrębie roku. Największe jest latem, gdy zapotrzebowanie na energię ciepłą jest niewielkie, natomiast małe jest zimą, a więc w okresie wzmożonego zużycia energii. Idealny magazyn energii ciepłej powinien więc charakteryzować się przede wszystkim możliwością długotrwałego przechowywania zmagazynowanego ciepła. Niemniej istotne są także jego cechy jak: gęstość upakowania energii (w 1 kg medium), temperatura ładowania i rozładowywania oraz powtarzalność dużej ilości cykli ładowania i rozładowywania.

## 2. Metody magazynowania energii ciepłej

Stosowane są różnorodne metody magazynowania energii. Zależą one od rodzaju energii, jak również od jej praktycznego zastosowania. Niektóre z metod pozwalają jedynie na krótkoterminowe przechowywanie energii, inne z kolei umożliwiają przechowywanie zgromadzonej energii przez długi czas.

Sposoby magazynowania energii:

### A. Wykorzystanie ciepła właściwego ciał stałych i cieczy:

- magazyny krótkookresowe – ciecz lub ciała stałe (np. kamienie) zgromadzone w małych, dobrze izolowanych zbiornikach,
- magazyny długookresowe – duże, podziemne zbiorniki wodne utworzone w naturalnych jaskiniach lub sztucznie metodą wybuchu albo też wyrobiska nieczynnych kopalń, które wprawdzie nie są izolowane, ale ze względu na głębokość zalegania, nie ma dużych różnic temperatury między wodą a ot-

czającą skałą, co przy dużych wymiarach złoża powoduje jego bardzo powolne wychładzanie.

### B. Wykorzystanie ciepła przemian fazowych

Do magazynowania energii ciepłej można wykorzystać w zasadzie tylko przemiany fazowe typu ciało stałe – ciecz. Są to magazyny krótkookresowe (do kilku dni). Materiały zmieniające fazę powinny charakteryzować się:

- dużym ciepłem przemiany fazowej,
- odpowiednią temperaturą przemiany związaną z temperaturą źródła energii magazynowanej,
- stabilnością właściwości cieplnych w kolejnych cyklach ładowania i rozładowywania.

Zależnie od niezbędnego zakresu temperatury (uwarunkowanego sposobem wykorzystania energii i rodzajem źródła) oraz warunków pracy mogą być użyte różne materiały, takie jak:

- metale (Al, Na i ich stopy),
- sole, hydraty,
- woski, parafiny,
- specjalnie preparowane substancje organiczne (np. polietylen) o dużej gęstości (HDPE), zachowujące uprzedni kształt po przemianie fazowej pierwszego rodzaju.

### C. Wykorzystanie ciepła przemian chemicznych, fizykochemicznych i fotochemicznych

Odwracalne reakcje endo- i egzotermiczne wydają się być bardzo atrakcyjną metodą magazynowania energii. Charakteryzują się bowiem bardzo dużą gęstością upakowania energii (o prawie rząd wielkości większą niż w przemianach fazowych), długotrwałym przechowywaniem zgromadzonej energii bez strat i nie wymagają izolacji zbiorników. Ten sposób magazynowania posiada jednak wady między innymi konieczność budowania dość skomplikowanych i rozległych instalacji. Wymaga on także wiedzy i doświadczenia z zakresu chemii, inżynierii chemicznej, materiałoznawstwa, wymiany ciepła itp. Należy jednak stwierdzić, że reakcje odwracalne stwarzają duże możliwości magazynowania energii ciepłej i mogą być stosowane jako odbiorniki ciepła w procesach przemysłowych, wysokotemperaturowych reaktorach jądrowych, a także mogą akumulować energię pozyskaną w kolektorach słonecznych. Brak jest jednak odpowiedzi na pytanie, czy rozwiązania te znajdą szerokie zastosowanie ze względu na ich złożoność i wysokie koszty. Pewne obawy budzi również powtarzalność cykli łączenia i rozpadu danych związków. Do przemian fizykochemicznych, umożliwiających gromadzenie energii ciepłej, należą: hydratacja i dehydratacja. W czasie uwodnienia bez-

wodnej soli metalu powstaje hydrat (sól uwodniona) oraz wydziela się określona ilość ciepła. Ilość wydzielonego ciepła i temperatura reakcji zależą od rodzaju soli. W procesie odwrótnym, tzn. suszenia soli, ciepło jest dostarczane (magazynowane).

Rekcje fotochemiczne zachodzą pod wpływem pochłaniania promieni światła monochromatycznego lub pełnego widma widzialnego. W ich trakcie, napromieniowane substancje rozpadają się na prostsze elementy, pobierając przy tym energię. W ciemności substancje te natychmiast (lub po określonym czasie) wracają do stanu poprzedniego, oddając ciepło.

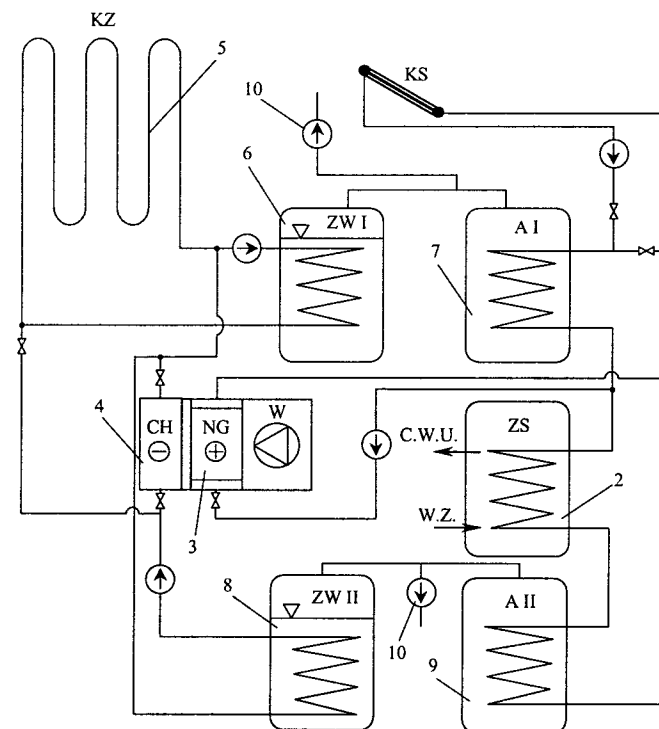
### 3. Przegląd badań eksperymentalnych różnych metod magazynowania energii

Badania eksperymentalne dotyczące magazynowania energii cieplnej w stopniu najszerszym obejmują przemiany fazowe. Dość liczna grupa badaczy zajmuje się przemianami fazowymi różnych związków chemicznych. Przegląd możliwych do zastosowania tzw. materiałów fazowo zmiennych PCM (z ang. Phase Change Materials) przedstawiono w [5]. Badania przydatności pewnych mieszanin związków organicznych i nieorganicznych do magazynowania opisano w [13]. Badane próbki zawierały sól glauberską  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  oraz kwas stearynowy w różnych proporcjach. Zmniejszenie zużycia energii cieplnej można uzyskać w systemach biernego wykorzystania promieniowania słonecznego, ponieważ ciepło jest akumulowane w nasłonecznionych ścianach betonowych. Akumulacyjność ścian można znacznie poprawić przez impregnację betonu materiałem PCM. W [13] przedstawiono badania kompozytów (porowaty beton – hydrat  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). Porowaty beton nasączano przez 7 godzin hydratem w temperaturze  $75^\circ\text{C}$ , a następnie poddawano go badaniom termodynamicznym. Badania mieszaniny dwuskładnikowej mocznik – octan sodowy  $\text{NaC}_2\text{H}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  oraz trójskładnikowej mocznik – octan sodowy – octan ołowiany  $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2\text{Pb} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  jako materiałów PMC do budowy akumulatorów współpracujących z kolektorami słonecznymi zaprezentowano w [16]. Ciekawą propozycję zastosowania materiałów PCM do budowy słonecznego „garnka do gotowania” opisano w [14]. Izolowany słoneczny „garek” zawiera 3,5 kg kwasu stearynowego i jest przykryty podwójną szybą. Badania prowadzono pod kątem jego przydatności do gotowania potraw (w eksperymencie gotowano ryż w wodzie). Wyniki eksperymentu potwierdziły przydatność proponowanego rozwiązania. Modelowe i eksperymentalne badania akumulatora wypełnionego piłeczkami ping-pongowymi zawierającymi stearynę przedstawiono w [1]. Badania akumulatorów ciepła z grupy wykorzystującej ciepło właściwe opisano w [4, 15, 18]. Magazyny ciepła oparte na procesach desorpcji i sorpcji na zeolitach przed-

stawiono zaś w [3]. Największą koncentrację magazynowanej energii można uzyskać w procesach dehydratacji soli uwodnionej (hydratu) i hydratacji soli bezwodnej. Tego typu magazyny omówiono w [7, 8, 10, 11, 26].

### 4. Koncepcja akumulatora ciepła opartego na procesach dehydratacji i hydratacji do ogrzewania domu jednorodzinnego

Zakłada się, że dobrze zaizolowany dom będzie zasilany w energię cieplną za pomocą systemu pobierającego energię z kolektorów słonecznych i gruntowych. Dodatkowym źródłem energii w okresie letnim jest ciepło odpadowe z klimatyzacji pomieszczeń mieszkalnych. Nadmiar energii wytwarzanej latem gromadzony będzie w magazynach opartych na procesach dehydratacji oraz hydratacji. Schemat systemu przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat zasilania domu jednorodzinnego w energię cieplną: 1 – kolektory słoneczne (KS), 2 – zasobnik c.w.u. (ZS), 3 – nagrzewnica (NG), 4 – chłodnica (CH), 5 – kolektor ziemny (KZ), 6 – zbiornik wody (skroplin) I stopnia (ZWI), 7 – zbiornik hydratu I stopnia (AI), 8 – zbiornik wody II stopnia (ZWII), 9 – zbiornik hydratu II stopnia (układ chłodzenia) (AII)

## Opis działania systemu

Zbiornik hydratu (siarczku sodu) 7 jest połączony bezpośrednio ze zbiornikiem wody 6. Z układu usunięte jest powietrze, co sprawia, że ciśnienie pary wodnej, w warunkach równowagi termicznej między tymi zbiornikami, jest wyższe nad powierzchnią wody niż nad powierzchnią hydratu. W związku z tym, para wodna ze zbiornika wodnego będzie przepływała do hydratu. W wyniku pochłaniania wody następuje wzrost temperatury hydratu, a tym samym także ciśnienia nad jego powierzchnią. Ciśnienia wyrównują się wtedy, gdy różnica temperatury soli i wody wyniesie 55 K. Ustali się więc stan równowagi ciśnień i przepływ pary ustanie. Zmiana warunków równowagi wywołuje wzrost (ogrzewanie ciepłem kolektorów słonecznych) lub spadek temperatury soli (odbiór ciepła przez nagrzewnicę powietrza). W systemie opisanym w [10], ładowanie akumulatora w okresie letnim odbywa się energią ciepłą przekazywaną przez gorącą wodę podawaną z kolektorów słonecznych. Para wodna, opuszczająca zbiornik 7 osuszanej (dehydratyzowanej) soli, wpływa do zbiornika 6, w którym ulega skropleniu. Temperaturę, konieczną do utrzymania skraplania, zapewnia się poprzez chłodzenie kolektorem ziemnym 5. Istotną nowością, w stosunku do metody opisanej w [10], jest propozycja uzupełnienia tego systemu o układ klimatyzacji pomieszczeń mieszkalnych. W okresie działania klimatyzacji włącza się zbiornik hydratu II i wody II oraz chłodnicę powietrza 4. Jest to możliwe, ponieważ określoną wyżej różnicę temperatury soli i wody (55 K), można ustalić na dowolnym poziomie skali temperatury.

## 5. Bilans cieplny układu

W celu właściwego doboru pojemności zbiorników i urządzeń należy sporządzić szczegółowy bilans energetyczny układu. W tradycyjnym systemie ogrzewania czy klimatyzacji, urządzenia dobiera się do maksymalnej, obliczonej mocy. W opisanym układzie, ze względu na dość skomplikowany system przepływu ciepła, podejście takie nie jest wystarczające. Należy bowiem zbilansować zyski i straty ciepła w co najmniej miesięcznych przedziałach czasowych lub nawet tygodniowych. Jest to konieczne do ustalenia właściwych strumieni masowych oraz temperatury czynników. Bilans ogólny przepływów ciepła można przedstawić następująco:

- okres gorący (ładowanie magazynu ciepła AI + klimatyzacja):

$$Q_{KS} + Q_{AII} = Q_{AI} + Q_{C.W.U.},$$

- okres przejściowy (jesiennie-wiosenny):

$$Q_{KS} = Q_{AI} + Q_{AII} + Q_g,$$

- okres grzewczy:

$$Q_{KS} + Q_{AI} + Q_{AII} = Q_g,$$

gdzie:

$$Q_g = Q_{C.O.} + Q_{C.W.U.}$$

$Q_{C.O.}$  – ciepło centralnego ogrzewania,

$Q_{C.W.U.}$  – ciepło ciepłej wody użytkowej,

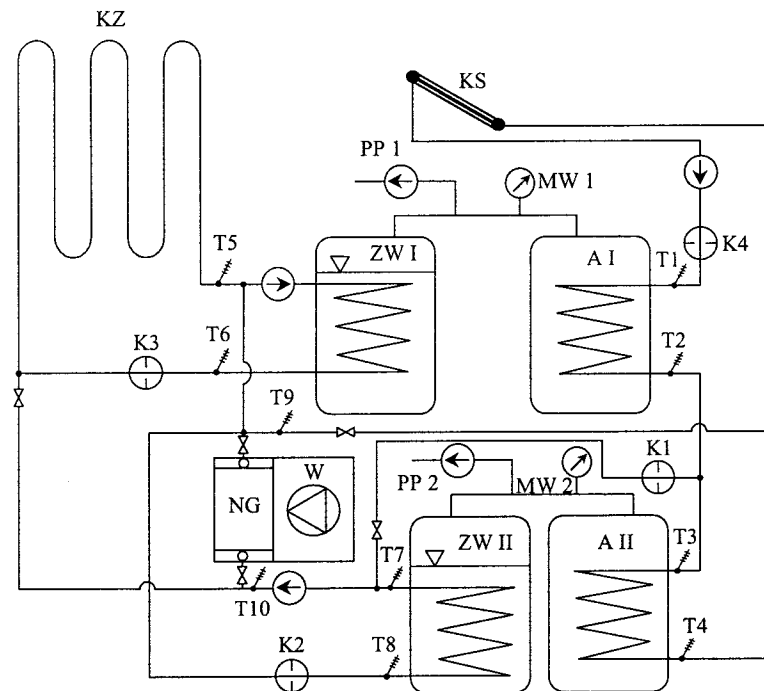
$Q_{AI}$  – ciepło absorbowane w magazynie AI,

$Q_{AII}$  – ciepło oddawane w magazynie AII w okresie działania klimatyzacji (powiększa strumień ciepła magazynowanego w AI), w okresie przejściowym magazyn AII jest ładowany w pierwszej kolejności a ciepło jest przekazywane do KZ,

$Q_{KS}$  – ciepło promieniowania słonecznego absorbowane przez ciecz obiegową.

## 6. Stanowisko do badań symulacyjnych

Do badań symulacyjnych zaproponowanego systemu wykonane zostanie stanowisko pomiarowe wg schematu przedstawionego na rysunku 2. Do jego budowy będzie wykorzystany istniejący kolektor słoneczny firmy VISSMAN oraz aparat wentylacyjno-grzewczy firmy KLIMOR.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego: KS – kolektor słoneczny, KZ – kolektor ziemny, AI, AII – magazyny ciepła, ZWI, ZWII – zbiorniki wody, NG – nagrzewnica, chłodnica wodna, W – wentylator, PP1, PP2 – pompy próżniowe, MW1, MW2 – manowakuometry, K1+K4 – przepływomierze, T1+T10 – termometry

## 7. Podsumowanie

Zaproponowany system magazynowania energii oparto na wykorzystaniu dziewięciowodnego siarczku sodu  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  jako absorbera ciepła w procesie dehydratacji. Badania symulacyjne powinny być poprzedzone rozeznaniem przydatności takiego absorbera w procesach dehydratacji-hydratacji. Najważniejszymi cechami, na które należy zwrócić szczególną uwagę, są: różnica entalpii przed i po hydratacji oraz stabilność właściwości fizycznych w kolejnych cyklach procesu. Ma to istotne znaczenie, gdyż dane literaturowe wykazują duże rozbieżności odnośnie stopnia dehydratacji, a tym samym i różnicy entalpii.

## Literatura

1. Pluta Z., Wnuk R.: *Badanie modelu zbiornika akumulacyjnego z dwoma mediami magazynującymi energię cieplną słonecznej instalacji przygotowania ciepłej wody użytkowej*. *Gospodarka Paliwami i Energią*, 2, 1995.
2. Azpiazu M. N., Morquillas J. M., Vazquez A.: *Heat recovery from a thermal energy storage based on the  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$  cycle*. *Applied Thermal Engineering*, 23, 2003, 733-741.
3. Kulig E.: *Gromadzenie i odzyskiwanie energii cieplnej w procesach desorpcji i sorpcji na zeolitach*. *Gospodarka Paliwami i Energią*, 1, 1994.
4. Kajser H., Odziewa B.: *Akumulacja odnawialnej energii cieplnej*. *Gospodarka Paliwami i Energią*, 10, 1997.
5. Pielichowski K., Flejtuch K.: *Zastosowanie materiałów fazowo-zmiennych do akumulacji ciepła*. *Gospodarka Paliwami i Energią*, 1, 2003.
6. Wojtaś R., Kulig E., Sułko K.: *Chemiczne magazynowanie energii cieplnej*. Cz. 1, *Gospodarka Paliwami i Energią*, 10, 1988.
7. Wojtaś R., Kulig E., Sokołowski P.: *Chemiczne magazynowanie energii cieplnej*. Cz. 2, *Gospodarka Paliwami i Energią*, 11, 1988.
8. Wojtaś R., Kulig E., Sokołowski P.: *Chemiczne magazynowanie energii cieplnej*. Cz. 3, *Gospodarka Paliwami i Energią*, 10-12, 1989.
9. Mugier D., Goetz V.: *Energy storage comparison of sorption system for cooling and refrigeration*. *Solar Energy*, Vol. 71, No. 1, 2001, pp. 47-55.
10. Jabłkowski J.: *Pompa cieplna dwustronnego działania*. *Przegląd Budowlany*, 3, 1984.
11. Levitskij E. A., Aristov Yu. I., Tokarev M. M., Parmon V. N.: „Chemical Heat Accumulators”: *A new approach to accumulating low potential heat*. *Solar Energy Materials and Solar Cell*, 44, 1996, 219-235.
12. Tayeb A. M.: *Organic-inorganic mixtures for solar energy storage system*. *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 36, No. 36, 1995, pp. 969-974.
13. Hadjeva M., Stoykov R., Filipova Tz.: *Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage*. *Renewable Energy*, 19, 2000, 111-115.
14. Buddah D., Sahoo L. K.: *Solar cooker with latent heat storage: desing and experimental testing*. *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 38, No. 5, pp. 493-498, 1997.
15. Al-Nimr M. A., Abu-Quidais M. K., Mashagi M. D.: *Dynamic behaviour of a packed bed energy storage system*. *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 37, No. 1, pp. 23-30, 1996.

16. **El-Bassuoni Abdel-Monem A., Tayeb A. M., Helwa N. H., Fathy A. M.:** *Modification of urea-sodium acetate trihydrate mixture for solar energy storage.* Renewable Energy, 28, 2003, 1629-1643.
17. **Fujimoto S., Bilgen E., Ogura H.:** *CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> chemical heat pump system.* Energy Conversion and Management, 43, 2002, 947-960.
18. **Januszewski J.:** *Akumulacja i pozysk ciepła z gruntu.* Gospodarka Paliwami i Energią, 8, 1996.

#### HYDRATION AND DEHYDRATION IN STORAGE OF THERMAL ENERGY

**Abstract:** In general, unconventional sources of energy are characterized by poor coherency. In heating systems with these sources is imperative to start additional heat source such as gas or oil boiler in period of intensive demand for thermal energy. Such procedure can be eliminated by storing of unconventional energy surplus in period of reduced demand for heat (i.e. in summer) and their recuperation during increase of demand for heat in heating season (i.e. in autumn and winter). This paper is devoted to presentation of possibility of thermal energy storage in hermetic containers comprising such filling substance as salt metal (e.g. sodium sulfide). Inside these tanks, heat exchanger is fixed, which serves both loading and unloading of thermal energy accumulator. During loading period, warm water heated by solar collector or condenser of air conditioner transfers heat to hydrated salt hydrate. Then, one deals with hydrate drying (i.e. dehydration). Unloading of thermal energy accumulator is related to period of hydration of hydrate (i.e. hydrated salt formation due to heat of hydration). Proposed method makes possible transportation of closed containers on considerable distance as well as unloading of thermal energy accumulator in any time.

Pracę wykonano w ramach realizacji pracy statutowej S/WM/2/01.

Roman Trochimczuk<sup>1</sup>, Sviatoslav E. Karpovich<sup>2</sup>

#### MECHATRONICZNY SYSTEM PRZEMIESZCZEŃ DLA TECHNOLOGII LASEROWYCH

**Streszczenie:** Praca prezentuje wybrane zagadnienia związane ze współrzędnościowym systemem pozycjonującym w laserowym systemie formowania trójwymiarowych obiektów w szkle i w innych przezroczystych dielektrykach. Przedstawiono aspekty związane z doбором algorytmów sterujących współrzędnościowym systemem przemieszczeń, scharakteryzowano kontroler systemu sterującego oraz mechatroniczny system przemieszczeń oparty na napędach liniowych bezpośredniego działania.

**Słowa kluczowe:** współrzędnościowy system przemieszczeń, laserowy system formowania, formowanie obiektów 3D

#### 1. Wprowadzenie

Laserowe systemy formujące obiekty 2D i 3D wewnątrz szkła, bądź też innego dielektryka, stawiają przed projektantami współrzędnościowych systemów pozycjonujących wysokie wymagania co do dokładności, powtarzalności pozycjonowania, maksymalnych prędkości i przyspieszeń napędu, dużego zakresu przemieszczeń oraz wysokiej jakości wykonania stosowanych układów. Poza tym należy dodatkowo brać pod uwagę: dobór odpowiednich układów sterujących napędem oraz, co najważniejsze – odpowiednio zaplanować trajektorię przemieszczeń według określonych kryteriów pozwalających optymalnie wykorzystać możliwości systemu (tory optymalne z punktu widzenia czasu, energii, nakładów). Z punktu widzenia technologicznego można stwierdzić, że jakość wykonanej powierzchni oraz dokładność formowanego odwzorowania w głównej mierze zależy od zastosowanego układu pozycjonującego w laserowym systemie formowania. Pamiętać

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechatroniki, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

<sup>2</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Automatykacji, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

również należy, iż z każdym krokiem kiedy zmniejsza się normę technologiczną (dotyczącą powtarzalności, dokładności, rozdzielczości), a równocześnie zależy na powiększeniu obszaru roboczych przemieszczeń wzrastają również wymagania stawiane przed układem pozycjonującym. W nowo opracowywanych układach powinno stosować się systemy pozycjonujące znacznie przewyższające potrzeby w momencie zakupu, po to aby przez co najmniej 4 – 6 lat, kiedy wzrośnie do nowego poziomu norma technologiczna, z urządzeń można było korzystać. Ogólne informacje w polskiej literaturze naukowej związane z zagadnieniami prezentowanymi w niniejszym artykule były przyczynkiem do ich opisanie poniżej.

## 2. Ogólna charakterystyka współrzędnościowego systemu przemieszczeń

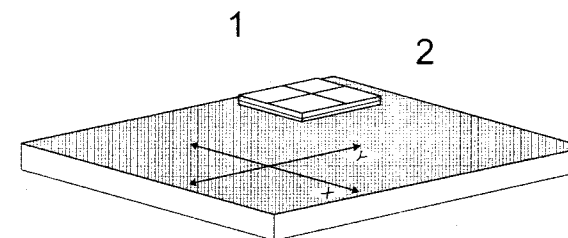
Laserowe technologie nakładają na projektantów systemów przemieszczeń coraz wyższe wymagania. Efektywne wykorzystanie możliwości lasera w systemach formowania trójwymiarowych obiektów, możliwie jest dzięki zastosowaniu elastycznego systemu przemieszczeń, z możliwością sterowania nim za pomocą komputera klasy IBM. Podstawą do stworzenia takich zintegrowanych elektromechanicznie układów są elektromagnetyczne moduły przemieszczeń (zapewniające, bez mechanicznych transmisji, liniowe, kątowe, a także inne złożone przemieszczenia w cylindrycznych i sferycznych systemach przemieszczeń) oraz kontrolery stworzone na bazie mikroprocesora sterującego przemieszczeniami. Zunifikowany moduł liniowego silnika krokowego pozwala w praktyce ma maksymalne uproszczenie konstrukcji współrzędnościowego pozycjonera, dając równocześnie możliwość skalowania charakterystyk mocy napędu oraz otrzymanie układu bez kinematycznych transmisji i przekształceń dzięki zastosowaniu typowych elektromagnetycznych bloków.

Analiza literatury naukowo – technicznej [3], [9], [10], [11] pozwala określić podstawowe zasady projektowania precyzyjnych współrzędnościowych systemów pozycjonujących, opartych na bazie liniowych silników krokowych:

- 1) każdy elementarny pozycjoner, wchodzący w skład mechatronicznych, współrzędnościowych systemów przemieszczeń, powinien posiadać autonomiczne kanały do sterowania i zasilania w celu realizacji zamierzonych technologicznie charakterystyk (przesunięcie, dokładność, prędkość, przyspieszenie), niezależnie od innych pozycjonerów zgodnie z zasadą blokowo - modułowej budowy,
- 2) korpus pozycjonera powinien mieć minimalną masę, przy warunku maksymalnej twardości i wytrzymałości, zapewniającą stabilność geometrycznych, roboczych parametrów powierzchni współrzędnościowego układu przemieszczeń,

- 3) stworzenie urządzeń wykorzystujących dokładne pozycjonery z założoną liczbą stopni swobody powinno być optymalne pod względem: niezależnych przestrzeni kinematycznych oraz konstrukcji układów współrzędnościowych.

Opracowany przez firmę Ruch Servomotor planarny dwuosiowy system przemieszczeń stworzony na bazie liniowego silnika krokowego składa się z induktora oraz statora (rys. 1). Stator zrealizowany jest w postaci płaskiej żeliwnej płyty, z naniesioną periodycznie na powierzchni zębową strukturą. W skład induktora wchodzi dwie ortogonalnie rozłożone grupy modułów elektromagnetycznych. Robocza powierzchnia elektromagnetycznych modułów (biegunów) posiada periodyczną zębową strukturę, z przydzielonym fazowym przesunięciem od bieguna do bieguna. W celu otrzymania powietrznej poduszki pomiędzy induktorem a stator, w induktor wmontowane są pneumatyczne dysze eżektorowe, które połączone są z układem pneumatycznym.



Rys. 1. Szkic dwuosiowego, planarnego systemu przemieszczeń oparty na liniowym silniku krokowym 1) induktor, 2) stator

Tabela 1.

Ogólne dane techniczne współrzędnościowego układu przemieszczeń [13]

Maksymalny rozmiar statora [mm]	1000×1500
Ilość faz	2; 4; 3
Wartość prądu sterującego [A]	1,5±0,15; 3±0,3
Maksymalna prędkość [m/s]	1÷1,5
Maksymalne przyspieszenie [m/s <sup>2</sup> ]	20÷30
Powtarzalność [mm·10 <sup>-3</sup> ]	3
Dokładność pozycjonowania [mm·10 <sup>-3</sup> ]	±5; ±10; ±15
Rozdzielczość [mm·10 <sup>-3</sup> ]	0,01; 0,1; 1,0; 5,0; 10,0
Szczelina powietrzna [mm·10 <sup>-3</sup> ]	1±52
Zakres temperatury pracy [°C]	5÷35
Ciśnienie powietrza [MPa]	0,3±0,04

W tabeli 1 zamieszczono ogólne dane techniczne charakteryzujące prezentowany współrzędnościowy system przemieszczeń. Pozycjonery stworzone na bazie liniowych silników krokowych pozwalają na realizację złożonych współrzędnościowych układów o dużej dokładności przemieszczeń, o szerokim zakresie zmian parametrów ruchu oraz wysokiej produktywności. Charakteryzują się modułowością, niezależnością sterowania przemieszczeniami, możliwością zaprogramowania cyklu pracy, zarówno w układzie otwartym, jak i układzie sterowania ze sprzężeniem zwrotnym. Użycie poduszki powietrznej oddzielającej stator od induktora pozwala na praktyczną likwidację tarcia w systemie, co gwarantuje stabilność parametrów, charakterystyk dynamicznych oraz zwiększenie okresu eksploatacji.

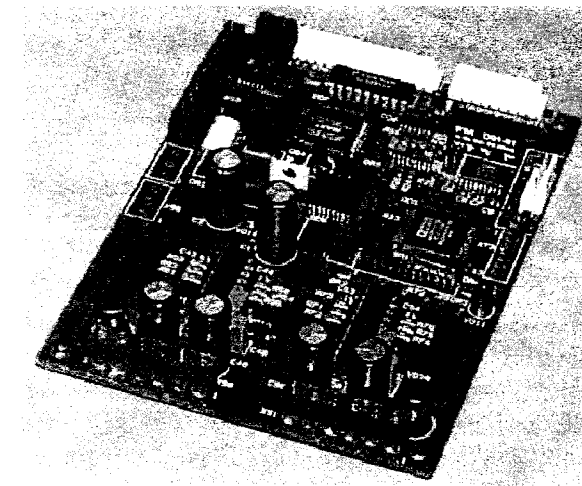
### 3. Kontroler systemu sterującego układem pozycjonującym

Na potrzeby sterowania mechatronicznym, współrzędnościowym układem pozycjonującym wykorzystywanym w systemie formowania obiektów 2D i 3D w szkle i innych przezroczystych dielektrykach opracowany został w Białoruskim Państwowym Uniwersytecie Informatyki i Radioelektroniki w Mińsku oraz w firmie GNPkTM < Planar > kontroler sterujący napędami bezpośredniego działania. Przeznaczony jest on do niezależnego sterowania dwoma silnikami krokowymi, działającymi do wartości prądu równej 1,5 A. Kontroler posiada 4 cyfrowe izolowane wejścia, 6 cyfrowych nie izolowanych wejść z amplitudą jedynki cyfrowej do 30 W oraz 8 cyfrowych nie izolowanych wyjść typu otwarty kolektor z maksymalną wartością prądu do 500 mA. Dana konfiguracja pozwala na podłączenie sensorów położenia, a także wykorzystuje wejścia i wyjścia jako dostępne do programowania danego procesu sterowania.

Wśród głównych technicznych cech charakteryzujących opracowany kontroler można wyróżnić [12]:

- układ oparto na cyfrowym, sygnałowym procesorze ADSP2186 firmy Analog Devices,
- równoległe czasowe sterowanie dwoma krokowymi układami pozycjonującymi,
- zakres przemieszczenia:  $\pm 2\ 147\ 483\ 648$  wartości dyskretnych,
- język wysokiego poziomu opisujący przemieszczenia,
- programowe zadawanie wartości prędkości i przyspieszeń przemieszczenia współrzędnościowego układu pozycjonującego,
- możliwość obróbki zadań wejścia-wyjścia równocześnie z realizacją przemieszczeń,
- liniowa oraz kołowa interpolacja,
- 2 drivery dwufazowych silników krokowych z maksymalną wartością prądu do 1,5 A,

- elastyczne zadanie maksymalnej wartości prądu w fazie dla każdego z silników,
- 4 optoizolowane wejścia cyfrowe,
- 6 cyfrowych wejść z maksymalnym natężeniem logicznej jedynki do 24 W,
- 8 wyjść typu otwarty kolektor z dopuszczalnym obciążeniem do 500 mA,
- driver silnika posiada ochronę przed krótkimi wartościami obciążeń, spadkami wartości zasilania oraz wpływami przeciążeń cieplnych,
- interfejs łączący z komputerem osobistym klasy IBM – typu RS232/ RS485 z prędkością przesyłu do 57 600 bit/s przy zastosowaniu optoizolacji,
- zasilanie od 18 W do 40 W,
- robocza temperatura eksploatacji kontrolera: od 0 do 40°C,
- wymiary: 135×100 mm.



Rys. 2. Widok kontrolera sterującego współrzędnościowym układem pozycjonującym

Opracowany kontroler może być stosowany w zaawansowanych technicznie układach złożonych z wielu napędów. Możliwości programowania parametrów startu i zatrzymywania silnika oraz zastosowanie enkoderów zapewniają niezależne i równoległe w czasie sterowanie, z uwzględnieniem warunku optymalizacji zadawanej trajektorii. Wykorzystanie specjalizowanej karty kontrolera pozwoliło na opracowanie systemu sterowania, napędów bezpośredniego działania, zapewniającego uzyskanie wysokich parametrów dokładności pozycjonowania. Spełniony jest zatem warunek stosowania go w laserowych, grawerujących układach formowania obiektów.



#### 4. Matematyczny opis krzywych przemieszczeń systemu pozycjonującego

Otrzymanie wysokojakościowych powierzchni formowanego za pomocą lasera obiektu wewnątrz szkła lub innego dielektryka uwarunkowane jest między innymi przez zastosowanie [1], [2]:

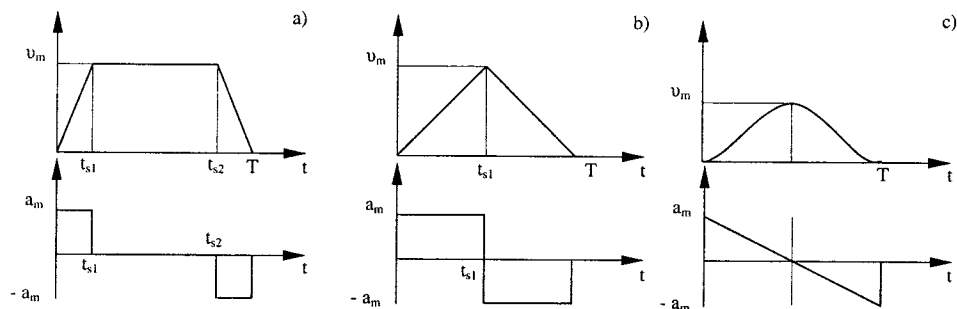
- odpowiedniego algorytmu dyskretyzacji, tj. zamianę płaskiego rastrowego obrazu oraz trójwymiarowych odwzorowań zamodelowanych w pamięci komputera, na obiekty złożone z punktów, odpowiednio posortowanych i równo rozłożonych na całej płaszczyźnie,
- wysokiej jakości współrzędnościowego układu przemieszczeń opartego na napędach bezpośredniego działania sprzęgniętego programowo z sensorami przemieszczeń, sensorami zliczającymi ilość powstałych defektów, które formują zamodelowane odwzorowanie,
- odpowiedniego oprogramowania sterującego łączącego cechy edytora zamodelowanego i przeprowadzonego w procesie dyskretyzacji obiektu z oprogramowaniem uwzględniającym parametry obróbki i wytwarzającym komendy sterujące kontrolerem stanowiska laserowego oraz całym stanowiskiem do formowania obiektów (w przypadku ELS-02 oprogramowanie <Sculptor>),
- odpowiednich algorytmów wykorzystywanych do odwzorowania wartości prędkości i przyspieszeń poprzez matematyczny opis krzywych, po których następuje przemieszczenie współrzędnościowego układu pozycjonującego.

Planując trajektorię mechatronicznego systemu przemieszczeń, ustala się jego tor według określonych kryteriów po to, aby otrzymać zamierzony ruch. Kryteria te określane są funkcjonalnością systemu z uwzględnieniem warunków pobocznych dotyczących przebiegów czasowych: przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń ruchu dla każdego stopnia swobody. Generowanie trajektorii odbywa się w czasie rzeczywistym za pomocą komputera (punkty trajektorii są obliczane z pewną prędkością zwaną częstotliwością zadawania trajektorii).

Jednym z możliwych sposobów zadawania przemieszczenia dla współrzędnościowego układu pozycjonującego jest szczegółowe podawanie sekwencji pożądanego położenia między punktami początkowymi i końcowymi, otrzymanymi po procesie dyskretyzacji modelowanego obiektu. Wraz z przestrzennymi ograniczeniami ruchu należy również określać czasowe własności ruchu, aby otrzymać ruch płynny. Nierównomierne lub gwałtowne ruchy powodują przedwczesne zużycie mechanizmów oraz drgania części i zespołów laserowego systemu do formowania obiektów 2D i 3D, wpływając z czasem na jakość wytwarzanego produktu finalnego.

Oprogramowanie sterujące współrzędnościowym systemem pozycjonującym, laserowego systemu grawerującego, wykorzystuje do odwzorowania przemieszczeń trzy podstawowe profile prędkości i przyspieszeń w punktach toru:

- 1) symetryczny trapezowy profil prędkości,
- 2) symetryczny trójkątny profil prędkości,
- 3) odwzorowanie przez krzywe typu splajn (rys. 3).



Rys. 3. Profile prędkości i przyspieszeń: a) symetryczny trapezowy, b) symetryczny trójkątny, c) przebieg po krzywej splajn

Jeżeli trajektoria lub odwzorowujące profile prędkości i przyspieszeń są podane w punktach dyskretnych powstałych po procesie dyskretyzacji zamodelowanego wcześniej obiektu 2D lub 3D, to problem planowania trajektorii lub planowania toru może zostać sprowadzony do aproksymacji funkcji przy danych miejscach podparcia. W tym celu przedział czasowy  $[0, T]$  jest rozkładany przez zasadniczo monotonicznie rosnącą sekwencję punktów dyskretnych  $t_i$  z  $t_{i+1} > t_i$  ( $i = 0, 1, \dots, N - 1$ ) na  $N$  przedziałów czasowych  $[t_i, t_{i+1}]$ .

Trapezowy profil prędkości jest szczególnie ważny i jest często wykorzystywany w technice z powodu łatwości realizacji. Jego istotną wadą jest nieciągły przebieg przyspieszenia.

Dla symetrycznego trapezowego profilu prędkości [5] przyjmuje się, że  $t_{s1} = t_s$ ;  $t_{s2} = T - t_s$ . Warunki brzegowe formułuje się następująco:

$$\begin{aligned} s(0) &= s_0, & s(T) &= s_1, \\ \dot{s}(0) &= 0, & \dot{s}(T) &= 0. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Trapezowy profil prędkości ma profil przyspieszenia w kształcie bloku:

$$a = \begin{cases} +a_m & \text{dla } 0 \leq t \leq t_s \quad (\text{faza przyspieszania}), \\ 0 & \text{dla } t_s \leq t \leq T - t_s \\ -a_m & \text{dla } T - t_s \leq t \leq T \quad (\text{faza hamowania}). \end{cases} \quad (1.2)$$

Przez dwukrotne różniczkowanie i uwzględnienie warunków brzegowych otrzymuje się stąd dla parametru toru:

$$s(t) = \begin{cases} s_0 + \frac{1}{2}a_m t^2 & \text{dla } 0 \leq t \leq t_s, \\ s_0 - \frac{1}{2}a_m t_s^2 + a_m t_s t & \text{dla } t_s \leq t \leq T - t_s, \\ s_1 - \frac{1}{2}a_m T^2 + a_m T t - \frac{1}{2}a_m t^2 & \text{dla } T - t_s \leq t \leq T. \end{cases} \quad (1.3)$$

Czas przełączania, w zależności od  $a_m$ , może być obliczony z:

$$t_s^2 - t_s T + \frac{s_1 - s_0}{a_m} = 0, \quad t_s = \frac{T}{2} \pm \sqrt{\frac{T^2}{4} - \frac{s_1 - s_0}{a_m}}. \quad (1.4)$$

Z warunków tych łatwo daje się wyprowadzić ważny przypadek graniczny – trójkątny, symetryczny profil prędkości, mający tylko jedną fazę przyspieszania i jedną hamowania. Brak jest w nim „przejazdu” tak jak w przypadku profilu trapezoidalnego, z wartością przyspieszenia równą zero. Stosując ten profil otrzymuje się szybkie przejazdy układu pozycjonującego, ale też przy dużych wartościach przyspieszeń (do 10 000 mm/s<sup>2</sup>), laserowy system formowania obiektów wprawiany jest w znaczne drgania, powodując wzrost poziomu hałasu. Obowiązuje dla niego zależność  $t_s = T/2$ . Z tej ostatniej zależności [5] otrzymuje się:

$$\frac{T^2}{4} - \frac{s_1 - s_0}{a_m} = 0 \quad \text{lub} \quad T = 2\sqrt{\frac{s_1 - s_0}{a_m}}. \quad (1.5)$$

Tego typu zasady ruchu, wykorzystujące trójkątny profil prędkości, określane są jako ruchy *bang-bang*.

Najbardziej sprzyjającym wariantem rozkładu jest zastosowanie krzywych typu splajn, których użyto do sterowania profilem prędkości [4], [6]. Profil taki zapewnia mniejsze wartości przyspieszeń i równomierne narastanie prędkości, których wartość jest mniejsza niż w przypadku wymienionych wcześniej profili. Do-

godnym mechanizmem jest zastosowanie interpolacji splajnami trzeciego stopnia [7], [8] co oznacza, że krzywa składa się z odcinków opisanych wielomianem trzeciego stopnia. Krzywa ta we wszystkich punktach osobliwych, musi być dwukrotnie różniczkowalna.

Krzywą wielomianową trzeciego stopnia opisuje się wektorowym odwzorowaniem parametrycznym

$$P(u) = A_3 u^3 + A_2 u^2 + A_1 u + A_0, \quad \text{gdzie: } a \leq u \leq b \quad (1.6)$$

Wprowadzając  $u^* = (u - a)/(u - b)$ , dowolny segment kubiczny można przedstawić jako odwzorowanie parametru  $u^*$  zmieniającego się w przedziale [0, 1]. Segment kubiczny opisany współczynnikami  $A_3, A_2, A_1, A_0$  może być również zdefiniowany przez podanie jego punktów końcowych  $P_0 = P(0)$  i  $P_1 = P(1)$  oraz wektorów pochodnych  $P'(0)$  i  $P'(1)$ , stycznych do krzywej w tych punktach.

Współczynniki  $A_3, A_2, A_1, A_0$  w funkcji  $P(0), P(1), P'(0)$  i  $P'(1)$ , można wyznaczyć ze wzorów:

$$\begin{aligned} A_0 &= P(0) \\ A_1 &= P'(0) \\ A_2 &= -3P(0) + 3P(1) - 2P'(0) - P'(1) \\ A_3 &= 2P(0) - 2P(1) + P'(0) + P'(1) \end{aligned} \quad (1.7)$$

Na tej podstawie zależność (1.6) można przedstawić w postaci:

$$P(u) = (2u^3 - 3u^2 + 1)P(0) + (-2u^3 + 3u^2)P(1) + (u^3 - 2u^2 + u)P'(0) + (u^3 - u^2)P'(1) \quad (1.8)$$

lub inaczej:

$$P(u) = h_{00}P(0) + h_{01}(u)P(1) + h_{10}(u)P'(0) + h_{11}P'(1), \quad (1.9)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} 0 &\leq u \leq 1, \\ h_{00}(u) &= 2u^3 - 3u^2 + 1 \\ h_{01}(u) &= -2u^3 + 3u^2 \\ h_{10}(u) &= u^3 - 2u^2 + u \\ h_{11}(u) &= u^3 - u^2 \end{aligned} \quad (1.10)$$

Współczynniki  $h_{00}(u)$ ,  $h_{01}(u)$ ,  $h_{10}(u)$ ,  $h_{11}(u)$  określone dla przedziału  $0 \leq u \leq 1$ , noszą nazwę kubicznych funkcji bazowych *Hermite'a*. Reprezentacja *Hermite'a* ma bezpośrednią interpretację geometryczną: kształt krzywej zależy od punktów końcowych i wektorów pochodnych  $P'(0)$  i  $P'(1)$ , stycznych do krzywej w tych punktach.

Zaletami przedstawionego powyżej postępowania jest przede wszystkim jego prostota oraz fakt dwukrotnego różniczkowania krzywej. Niedogodnością jest to, że lokalne zmiany punktów interpolacji mają wpływ na przebieg całej krzywej oraz że wraz ze wzrostem liczby punktów interpolacji zwiększa się czas wstępnych obliczeń.

Użycie w oprogramowaniu sterującym <Sculptor> mechanizmu splajnu zredukowało szумы i wibracje powstające podczas normalnego reżimu pracy systemu laserowego formowania trójwymiarowych obrazów. Poza tym, co jest bardzo istotne z punktu widzenia eksploatacji, zwiększyła się żywotność samego systemu, gdyż znacznie zmniejszyło się zużycie elementów współrzędnościowego układu pozycjonującego.

## 5. Podsumowanie

W celu zapewnienia wysokiej jakości produktu stworzonego za pomocą laserowego systemu do formowania trójwymiarowych obiektów w szkle i innych przezroczystych dielektrykach należy spełnić wiele warunków. Wśród nich bardzo istotną rolę odgrywa współrzędnościowy system pozycjonujący wraz z kontrolerem i oprogramowaniem sterującym. Oprogramowanie powinno łączyć w sobie różnego rodzaju algorytmy (wykorzystujące mechanizmy splajnu, sterowania trójkątnym, trapezoidalnym profilem prędkości, przyspieszeń), które pozwoliłyby na wybór właściwej metody sterowania w zależności od typu formowanego obiektu, przy wartości przyspieszenia układu pozycjonującego do  $7500 \text{ mm/s}^2$ . Natomiast kontroler wraz z układem jezdny zapewnian musi wysoką produktywność, elastyczność, niezawodność oraz komfort obsługi, zarówno poprzez samodiagnozowanie, jak i zintegrowane techniki pomiaru i napędu – nawet w przypadku wykorzystywania w przyszłości do formowania obiektów w szkle lub innym dielektryku, lasera o częstotliwości pracy większej niż 100 Hz.

## Literatura

1. **Trochimczuk R., Karpowicz S. E.:** *Wybrane aspekty formowania obiektów 3D w szkle i innych przezroczystych dielektrykach za pomocą lasera*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn Z. 10 (2002).
2. **Trochimczuk R., Karpovich S.:** *Nanosculptor software for fabrication of spatial structures in crystals*. Physics, Chemistry and Application of Nanostructures, Nanomeeting 2003, World Scientifics, 2003.
3. **Dostanko A. P., Tolochko N. K., Karpovich S. E., et al:** *Technology and technigie of precise laser modification of solid-state structures*. Technoprint, Mińsk, 2002.
4. **Pritschow G.:** *Technika sterowania obrabiarkami i robotami przemysłowymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1995.
5. **Heimann B., Gerth W., Popp K.:** *Mechatronika. Komponenty, metody, przykłady*. PWN, Warszawa, 2001.
6. **Kiciak P.:** *Podstawy modelowania krzywych i powierzchni, zastosowania w grafice komputerowej*. WNT, Warszawa, 2000.
7. **Marciniak K.:** *Obróbka powierzchni krzywoliniowych na frezarkach sterowanych numerycznie*. WNT, Warszawa, 1988.
8. **Craig J. J.:** *Wprowadzenie do robotyki. Mechanika i sterowanie*, WNT, Warszawa, 1995.
9. **Karpovich S. E., Żarski W. W., Ljaszuk J. F., Mierzyński J. M.:** *Precyzyjnyje koordinatnyje sistemy na osnovie elektropriwoda prjamogo dejstwia*. GNPkTM „Planar”, Mińsk 2001.
10. **Karpovich S. E., Rusieckij A.M., Ljaszuk J. F., Matjuszko W. E.:** *Optyimizacjonnoje projektirowanie precyzyjnych koordinatnyh sistiem i mehanizmow oborudowania proizwodstwa elektronnoj techniki*. NPO „INTEGRAL”, Mińsk, 1999.
11. **Karpovich S., Mierzyński J.:** *Design aspects of flexible manufacturing systems with linear stepping motors*. Proceedings of 41th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, Germany, 1996.
12. *Kontroler szagowego priwoda – techniczeskoje opisanie*, materiały GNPkTM „Planar”, Mińsk 2002.
13. *Katalogi i materiały reklamowe firmy Ruch Servomotor*, Mińsk, 2003.

MECHATRONIC COORDINATE SYSTEM FOR LASER TECHNOLOGY

**Abstract:** The article presents in synthetic form related aspects of coordinate systems for engrave laser system and for the creations three-dimensional images inside the glass and other transparent dielectrics. Some aspects of control system relation (algorithms, control card) and a mechatronic displacement system with linear stepping motors.

Roman Trochimczuk<sup>1</sup>, Sviatoslav E. Karpovich<sup>2</sup>

TECHNOLOGIA I TECHNIKA FORMOWANIA  
TRÓJWYMIAROWYCH OBIEKTÓW W SZKLE  
I W INNYCH PRZEZROCZYSTYCH DIELEKTRYKACH  
ZA POMOCĄ LASERA

**Streszczenie:** Publikacja prezentuje wybrane zagadnienia związane z laserowym formowaniem trójwymiarowych obiektów w szkle i w innych przezroczystych dielektrykach. Opisuje stosowane metody dyskretyzacji obiektów, przedstawia zagadnienia związane z technologią formowania punktowego elementu struktury oraz opisuje stosowany do procesu formowania układ lasera

**Słowa kluczowe:** laser neodymowy, formowanie laserem, dyskretyzacja obiektów

## 1. Wprowadzenie

Wśród wielu możliwości zastosowań technik wykorzystujących laser jako narzędzie do obróbki materiału, na uwagę zasługują metody formowania trójwymiarowych obiektów. Zbudowany w ramach współpracy między Białoruskim Państwowym Uniwersytetem Informatyki i Radioelektroniki w Mińsku oraz firmą Lotis TII laserowy system ELS – 02, grawerujący obiekty wewnątrz struktury szkła oraz w innych przezroczystych dielektrykach, bez naruszenia zewnętrznej struktury materiału, wnosi nową jakość wprowadzanych na rynek produktów (elementy promocyjno-reklamowe). Znajomość osobliwości przygotowania obiektu do procesu obróbki (dyskretyzacja) oraz przebiegu lokalnych zmian krystalicznej formy obrabianego materiału w znacznym stopniu determinuje dobór charakterystyk samego lasera (układu modów, właściwości skupienia, długości fali, zakresu mocy). W pracy niniejszej zostaną omówione wyżej wymienione zagadnienia w celu rozszerzenia wiedzy z tej dziedziny.

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechatroniki, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

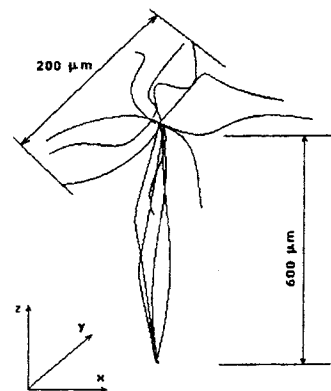
<sup>2</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Automatykacji, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

## 2. Metody dyskretyzacji obiektów

W procesie dyskretyzacji utworzonych obiektów wykorzystuje się metody, które zamieniają w pamięci komputera obsługującego rastrowy obraz (nieprzezroczyste powierzchnie, określenie granic i zajmowanych obszarów itp.) na obraz stworzony z punktów wykonywanych za pomocą lasera.

Otrzymany wynik takiej transformacji powinien spełniać warunek dokładnego odwzorowania punktów zamodelowanego uprzednio obiektu.

Technologiczna operacja formowania trójwymiarowych obiektów oparta jest na tworzeniu za pomocą laserowych impulsów nagrzewających, lokalnych defektów o rozmiarach  $200 \times 200 \times 600 \mu\text{m}$ , wizualnie odwzorowujących punktowy obiekt (rys. 1) [3]. Dlatego też konieczne jest, aby format odwzorowujący, wykorzystany do tworzenia złożonej struktury formowanego obiektu, był sprowadzony do zbioru uporządkowanych punktów. Rezultat operacji przekształcenia na punkty, powinien zapewnić maksymalne przybliżenie do formy wyjściowego odwzorowania.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie formy punkтового defektu

Trzeba jednak wziąć pod uwagę pewne ograniczenia wynikające z samego charakteru procesu, a przede wszystkim [1], [2]:

- jeżeli częstotliwość lasera impulsowego użytego w stanowisku obróbczym wynosi 50 – 100 Hz; to biorąc pod uwagę obiekt o wymiarach  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ , w procesie dyskretyzacji może powstać ok. 8 mld punktów, co przy założonym odstępnie między punktami  $50 \mu\text{m}$ , realizowane będzie od 2 do 5 lat,
- powstały defekt w wyniku procesu formowania nie może przekraczać rozmiaru  $200 \times 200 \times 600 \mu\text{m}$ ,
- odległość między powstałymi defektami nie może być mniejsza niż rozmiar samego defektu, dlatego też sam proces technologiczny musi spełniać warunek wysokiej dokładności, z jednoczesną eliminacją błędów niesionych przez pozycjonujący układ współrzędnościowy.

Wybór odpowiedniego algorytmu dyskretyzacji stanowi problem ze względu na dopasowanie wielkości i ilości punktów, które jakościowo mają odwzorowywać zamodelowany obiekt. Na rysunku 2 dla zilustrowania problemu przedstawiona jest zależność koniecznego zbioru punktów od wybranego typu algorytmu [3]. W danym przypadku wyjściowa figura geometryczna została przecięta płaszczy-

znami skierowanymi do osi Z. Otrzymano dwuwymiarowe kontury, które zostały przeanalizowane funkcją dzielenia krzywych. W rezultacie, między płaszczyznami przechodzącymi przez oś Z, powstają przerwy. Jednakowo w płaszczyźnie XY, sformowany obiekt w pełni przedstawiony jest jako rysunkowe odwzorowanie.

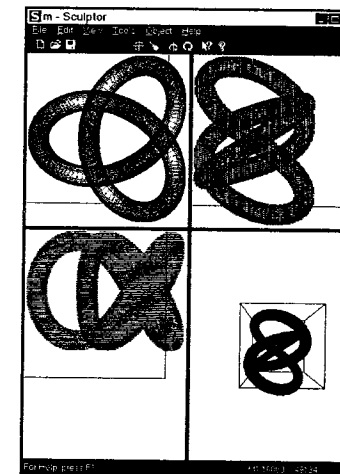
Do rozwiązania tego problemu może zostać wykorzystany, przedstawiony dalej algorytm dyskretyzacji [8]. Trójwymiarowa scena rozbicia na punktowy zbiór, swoją mocą przewyższa konieczną, ostateczną liczbę punktów według założonego porządku. Po zakończeniu tej operacji dokonuje się przypadkowego wyboru małego obszaru przestrzeni. Przed operacją obróbki punktów, konieczne jest posortowanie ich, albo też zgrupowanie w celu podwyższenia prędkości przeprowadzanych operacji.

Problemem, który także należy uwzględniać podczas przeprowadzania procesu dyskretyzacji jest tzw. gubienie informacji o strukturze obiektu wynikające z niewłaściwego doboru parametrów wykorzystywanego algorytmu. Może to zachodzić w przypadkach nieodpowiedniego określenia kąta nachylenia płaszczyzny przecinającej, przy wykorzystaniu metody dzielenia obiektu na sekcje, niewłaściwego wyboru odległości między punktami itd. Przykładowo: dzieląc płaszczyznami figurę w kształcie cylindra, równoległe do jego podstawy, nie otrzymamy skończonego zbioru w podstawie, z powodu braku konturów przecinających. Problem ten może być rozwiązany matematycznie. Rozwiązanie powinno zawierać analizę struktury obiektu poddawanej dyskretyzacji, z uwzględnieniem metody i parametrów matematycznych, służących do osiągnięcia najdokładniejszego odwzorowania obiektu.

Oprogramowanie Sculptor laserowego systemu formowania trójwymiarowych obiektów wykorzystuje do dyskretyzacji zamodelowanych obiektów trzy metody [2], [6], [7]:

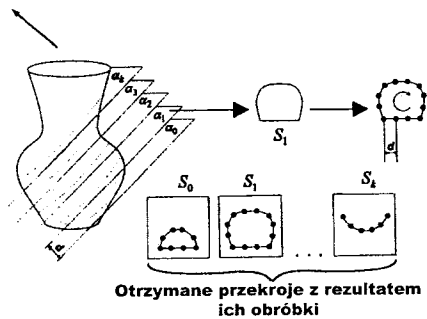
- metodę dyskretyzacji dzielenia obiektu na sekcje,
- metodę dyskretyzacji opartą na algorytmie wypełniania trójkątów przez punkty,
- metodę dyskretyzacji równoległymi wiązkami.

Pierwsza z wymienionych metod opiera się na standardowej operacji wykorzystywanej w programie 3D StudioMAX. Zakłada się, że obiekt składa się z sek-



Rys. 2. Zależność koniecznej ilości punktów od wybranego algorytmu dyskretyzacji

cji, które stanowią o tym, że jest on przedstawiany jako szereg złożonych, zamkniętych konturów. W każdej sekcji przeprowadzana jest analiza krzywej powstałej w wyniku przecięcia, która w dalszym etapie jest przybliżana przez trójkąty. Na podstawie tak wyliczonej trajektorii, przy warunku równomiernego rozłożenia punktów na otrzymanej krzywej, uzyskuje się przetransformowany punktowy model. Graficzne przedstawienie idei tej metody zamieszczono na rysunku 3 [3].

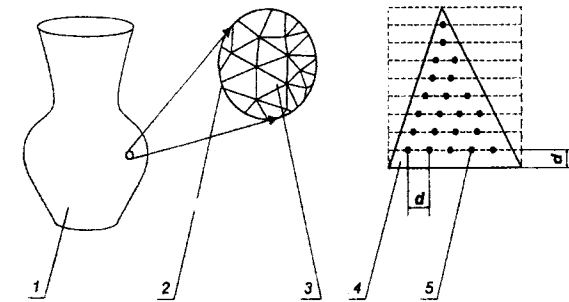


Rys. 3. Graficzne przedstawienie metody dyskretyzacji dzielenia obiektu na sekcje

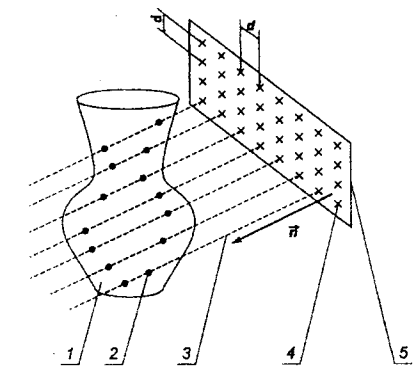
naniu z metodą przedstawioną poprzednio. Jednak zastosowany algorytm stwarza również pewne niedogodności. Po pierwsze, każdy z trójkątów wypełniany jest przez punkty oddzielnie, co w strukturze geometrycznej może przejawiać się koncentracją punktów na linii łączenia geometrycznych konturów sąsiadujących ze sobą trójkątów. W związku z tym niekontrolowane jest powstające odwzorowanie przez punkty w każdym trójkątnym obszarze, dla których założono warunek jednakowej odległości między sąsiadującymi punktami. Można wprawdzie zrezygnować z wypełniania krawędzi punktami, trzeba jednak wziąć pod uwagę pojawiający się problem braku granic tworzonego obiektu. Druga niedogodność wynika z zaobserwowanego zjawiska, że kiedy mamy szeroką strukturę wyjściową obiektu, powierzchnie są odwzorowywane przez tak małe trójkąty, że często rozmiary trójkąta są mniejsze od rozmiaru wstawionego do wnętrza punktu.

Uwzględniając przedstawione niedogodności wynikające z algorytmu, należy stwierdzić, że mimo wszystko jest on jednak bazowym do otrzymywania pierwszych przybliżających odwzorowań, realizujących dane przekształcenie bez utraty informacji.

Metoda dyskretyzacji równoległymi wiązkami (rys. 5) [3] oparta jest na pozyskiwaniu punktów przez wiązki przenikające równoległe zamodelowany obiekt. Jednym z parametrów charakteryzujących algorytm jest wektor normalny do powierzchni rzutowania.



Rys. 4. Graficzne przedstawienie metody dyskretyzacji opartej na algorytmie wypełniania trójkątów punktami: 1 - obiekt wyjściowy programu 3D StudioMax, 2 - powiększona struktura obiektu (uporządkowany zbiór trójkątów), 3 - wybrany trójkąt w kolejnej iteracji, 4 - powiększony widok trójkąta wybranego do operacji wypełnienia, 5 - jeden z wielu punktów przedstawiających zbiór danych wyjściowych;  $d$  - minimalna odległość między punktami (jedyny parametr wykorzystywany w algorytmie)



Rys. 5. Graficzne przedstawienie metody dyskretyzacji równoległymi wiązkami: 1 - obiekt wyjściowy programu 3D StudioMax, 2 - jeden z wielu punktów przedstawiających zbiór danych wyjściowych, 3 - wiązka rzutująca, 4 - komórka matrycy rzutującej, 5 - płaszczyzna bazowa;  $d$  - minimalna odległość pomiędzy punktami (parametr wykorzystywany w algorytmie);  $\vec{n}$  - wektor płaszczyzny rzutującej

Jest on prostopadły do powierzchni i przenika obiekt. Wiązki przenikają obiekt przy założonej minimalnej odległości od siebie (od punktów bazowych) tworząc strukturę sąsiadujących ze sobą kwadratów. Podaje się przy tym parametr  $d$  - minimalna odległość między wiązkami, będący długością boku kwadratu. Następnym krokiem jest ustalenie punktów uzyskanych przez przeniknięcie wiązek. Wykorzystuje się w tym celu standardową funkcję IntersectRay pakietu 3D StudioMAX. Niedogodnością funkcji jest znajdowanie tylko jednego punktu przenikania, na wiązce przenikającej. Do znalezienia wszystkich pozostałych punktów obiektu

eliminuje się ze struktury obiektów dane trójkąty i powtórnie wykonuje się powyżej wymienione operacje. Funkcja *IntersectRay* „dostrzega” tylko te trójkąty, które zwrócone są do niej w kierunku normalnym. Powtórne przejście algorytmu ujawnia pozostałą część pozyskiwanych punktów obiektu.

### 3. Technologia formowania punktowego elementu struktury

Laserową obróbkę materiałów można podzielić na dwie główne grupy: laserowego cięcia materiałów oraz metodę lokalnego termopęknięcia (pęknięcia na skutek procesów cieplnych) struktury. Proces laserowego cięcia polega na całkowitym przecięciu materiału i otrzymaniu na jego powierzchni tzw. „ścieżek”, tworzących strukturę detalu. Mniej energetycznym procesem jest metoda utworzenia lokalnego termopęknięcia struktury, którą wykorzystuje się w rozdzielaniu kruchych materiałów, poprzez wykorzystanie termonaprężeń w obszarze naświetlonym wiązką laserową, których wartość przekroczyła przedział wytrzymałości materiału.

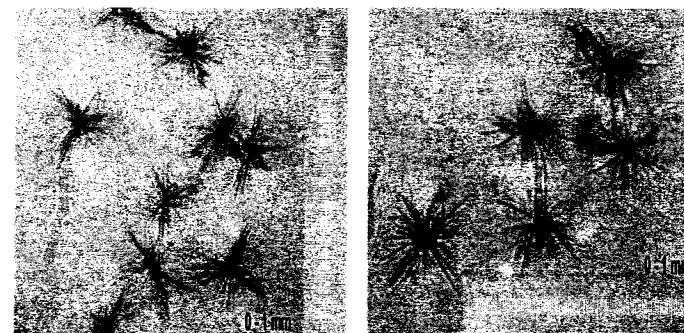
Temperatura topnienia materiału odpowiada takiej wartości temperatury, przy której fizyczne właściwości materiału zmieniają się najgwałtowniej. Poniżej tej temperatury, materiał znajduje się w stanie stałym, a powyżej w stanie ciekłym. Zjawisko termopęknięcia charakterystyczne jest dla kruchych materiałów, takich jak ceramika, szkło itp.

Z powodu małej przewodności cieplnej, skłonność do zniszczenia obszaru kruchego materiału, w którym zachodzą w danym momencie znaczne termonaprężenia, jest bardzo mała. Aby powstał defekt ważne jest, aby lokalnie obrabiany obszar doprowadzić szybko do temperatury przegrzania. Prędkość rozchodzenia się naprężeń w głąb materiału, zależy od prędkości przeniesienia ciepła i przewodności cieplnej. Małe wartości przewodności cieplnej kruchych materiałów warunkują niewielkie prędkości rozprzestrzeniania się naprężeń cieplnych w porównaniu z możliwymi prędkościami przemieszczeń wiązki laserowej w danej płaszczyźnie. Prowadzi to do opóźnienia powstania defektu w stosunku do trajektorii samej wiązki.

W przypadku powstania defektów (pęknięć) w strukturze szkła wyróżnia się dwa procesy. Pierwszy – początkowe stadium, charakteryzuje się niewielką prędkością rozchodzenia się pęknięcia (około  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$  m/s). Drugie, szybkie stadium – prędkość rozchodzenia się pęknięcia w szkłe jest stała i dochodzi do wartości 50 – 60% prędkości rozchodzenia się poprzecznych sprężystych fal (dla szkła prędkość ta równa jest  $2 \cdot 10^3$  m/s) [3]. W procesie laserowego termopęknięcia największą wagę odgrywa prędkość pęknięć, realizowana w drugim stadium i po-

zwalająca uzyskać możliwy do przyjęcia poziom fal sprężystych, który można zastosować w produkcji. Dlatego ważne jest, aby przyłożone zostały do materiału takie porcje energii cieplnej znacznie przewyższające właściwą energię formowania się nowej powierzchni, przy koniecznym poziomie prędkości ujawnienia pęknięcia (dla szkła prędkość niszczenia jest rzędu  $10^{-1}$  – 1,0 m/s, co odpowiada energii ujawnienia nowej powierzchni większej od 8 – 10 J/m<sup>2</sup>) [3].

Do dostatecznie szybkiego „zniszczenia” materiału konieczne jest zapewnienie maksymalnej wartości naprężeń. Im większe będą naprężenia od przedziału termicznej stałości, tym większe będzie prawdopodobieństwo otrzymania defektu. Dlatego gradienty temperatur, tworzące się pod wpływem wiązki laserowej, powinny być jak największe. Gradient temperaturowy charakteryzuje się dwoma współczynnikami: maksymalną temperaturą nagrzania i minimalnym obszarem nagrzewanego materiału. Zależą od koncentracji energii i prędkości z jaką przemieszczana jest wiązka laserowa (w zależności od właściwości materiału).



Rys. 6. Fotografie punktowych defektów tworzących strukturę formowanego obiektu

Potrzeba zapewnienia maksymalnego gradientu temperatury w szkłe wymusza określone ograniczenia na wymienione współczynniki. Obszar nagrzewany powinien być minimalny, równocześnie sam proces nagrzania powinien odbyć się z dostatecznie szybko, a maksymalna temperatura nagrzania szkła nie powinna przewyższać temperatury płynięcia, w której naprężenia w szkłe szybko zmniejszają swoją wartość. Z tego powodu najlepiej jest, aby proces termopęknięcia szkła przebiegał z maksymalną, odniesioną do przedziału właściwości termicznych, temperaturą płynięcia. Formę powstałych defektów w strukturze szkła zamieszczono na rysunku 6. Fotografie punktowych elementów struktury formowanego obiektu, wykonano z wykorzystaniem mikroskopu prześwietleniowego NU firmy

CarlZeiss Jena oraz aparatu Nikon – Digital Camera CoolPIX 950, przy powiększeniu 152 $\times$ .

Proces formowania punktu struktury charakteryzuje się pewnymi osobliwościami technologicznymi. W procesie termopęknięcia na ustalonym konturze początkowy punkt pęknięcia, powstały pod wpływem padającej wiązki, powinien być w pełni określony. Przy większych odległościach punkty pęknięcia rozchodzą się nierównomiernie. Może zdarzyć się, że powstające pęknięcia będzie wyprzedzać wiązkę formującą, co prowadzi do nie kontrolowanej zmiany struktury szkła, albo też będzie przesuwac się w bok od przemieszczającej się wiązki, jeżeli płaszczyzna rozdzielająca nie znajduje się w środku. Kontrolowane termopęknięcia powstają przy spełnieniu następującego warunku: odległość odchyłki musi być równa kolejnej wielkości grubości rozdzielającego materiału.

Ważne jest zapisanie zadanej odchyłki pęknięcia, na danym i koniecznym odcinku linii rozdzielających. Pęknięcie powstaje na ścieżkach, które mają dużą ilość różnych defektów – mikropęknięć, odprysków, zadrapań itp. W tej sytuacji trudno jest zagwarantować, że na sąsiadujących liniach rozdzielania nie pojawią się gruboziarniste defekty, mogące przeszkadzać w powstaniu pęknięcia od strony płaszczyzny punktu, realizowanego w dalszej kolejności przez wiązkę laserową. Czasami w pewnych odległościach od brzegu tworzonej płaszczyzny, skierowane pęknięcia zawadzają formującą, przemieszczającą się wiązkę. Pęknięcie w takim przypadku zostaje „skrzywione”. W celu usunięcia „skrzywienia” należy zmniejszyć prędkość przemieszczenia wiązki laserowej na głównym odcinku, zwiększając jednocześnie stopień oddziaływania na szkło. Prowadzi to do bardzo dokładnego rozdzielania. Podstawowe parametry, takie jak: zmiana stopnia skupienia wiązki z przejściem na skrawanie na głównym odcinku, wcześniejsze naniesienie zadrapań, lekkie obłupywanie brzegów, styczność ostrego instrumentu chłodzącego.

Bardzo trudno utworzyć pęknięcie pod wpływem procesów cieplnych na skraju szkła, utworzone w procesie laserowego termopęknięcia. Wysoka jakość obrabianego brzegu szkła, powstała w rezultacie jego rozdzielania rozpatrywaną metodą, prowadzi do rozcięcia szkła wiązką przenikającą.

Na skończonym odcinku linii rozdzielania termopęknięcie odciąża się. W tym momencie pęknięcie często wyprzedza wiązkę laserową, co prowadzi do zatracenia kontroli nad realizowanym procesem. Aby usunąć przyczynę skrzywienia linii termopęknięcia, można zwiększyć prędkość przemieszczania wiązki laserowej na skończonym odcinku rozdzielania, lub zmniejszyć jej moc. Pozwala to wyeliminować wyprzedzenia i zapewnić kontrolę nad rozprzestrzeniającymi się termopęknięciami na całej linii rozdzielania.

Wraz z pojawieniem się szczeliny w rezultacie termopęknięcia, następuje rozdzielanie krawędzi. W materiał wnikają oddziaływania mechaniczne powodujące jego dalsze rozłamywanie. W sterowanym procesie termopęknięcia po zadanym konturze, pojawiające się oddziaływania powinny rozkładać się symetrycznie w stosunku do płaszczyzny rozdzielania. Symetria ta jest automatycznie zachowana, jeżeli rozdzielanie realizuje się w środku próbki. Jeżeli jednak od próbki oddziela się wąski, płaski materiał, zostaje naruszona symetria sił. W tym przypadku termopęknięcie w strukturze szkła przyjmuje położenie odchyłone w stosunku do kierunku działania wiązki laserowej. Nierzadko również pojawia się skrzywienie pęknięcia w stronę oddzielającej wąskiej płaszczyzny z odłamywaniem jej części. Kontrolowanie termorozszczepiania w tym wypadku staje się trudne.

Większą rolę w formowaniu punktu struktury w procesie termorozszczepienia odgrywa sama forma wiązki laserowej [5]. Aby zapewnić wysoką jakość procesu termorozszczepiania ważne jest, aby ślad zostawiany na obrabianej powierzchni materiału przez wiązkę laserową posiadał kształt elipsy, wyciągniętej w kierunku rozdzielania. Wobec tego ważnym parametrem jest średnica wiązki laserowej, która powinna być w przybliżeniu równa grubości ścianki szkła.

Warto zaznaczyć, że proces laserowego termopęknięcia efektywnie jest realizowany wtedy, gdy w wyjściowych szklanych produktach pojawiają się odpowiednie naprężenia cieplne. W przeciwnym wypadku rozdzielanie struktury szkła za pomocą promieniowania laserowego jest utrudnione, a przy nakładaniu się istniejących wysokich naprężeń w szkłe, procesy te nie mogą być realizowane.

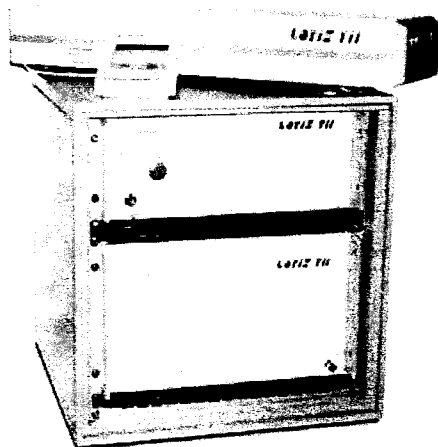
#### 4. Impulsowy laser jako instrument formowania punktu i punktowych obiektów

Lasery neodymowe na szkłe i lasery na granacie mają różne zakresy zastosowań. W związku z dużym przewodnictwem cieplnym i jednorodnością, lasery na granacie można łatwo uruchomić w trybie pracy ciągłej lub periodycznie – impulsowej. Osiąga się przy tym średnie moce rzędu kilkuset watów. Szkło neodymowe, w związku z dużą objętością i bardzo dużym stężeniem jonów aktywatora, łatwo magazynuje energię.

Lasery neodymowe pracują w różnych stopniach generacji – od ciągłego do krótkoimpulsowego, w którym długość impulsu wynosi 0,5  $\mu$ s. Osiąga się to metodą synchronizacji modów przy dużej szerokości linii wzmocnienia, charakterystycznej dla szkieł laserowych. Wyróżniają się one również doskonałymi parametrami energetycznymi.



Na potrzeby formowania punktowych obiektów w strukturze wewnętrznej szkła i innych przezroczystych dielektryków, w ramach współpracy między firmą



Rys. 7. Fotografia elementów składowych systemu laserowego LS-2136-E4 [5]

Lotis TII, a Białoruskim Państwowym Uniwersytetem Informatyki i Radioelektroniki w Mińsku opracowany został impulsowy, czterokanałowy laser dla stanowiska ELS – 02 (Engrave Laser System), typu LS-2136-E4 Nd: YAG, o ogniskowych dla podstawowej częstotliwości – 1064 nm oraz drugiej harmonicznej – 532 nm.

Laserowy system [7] przedstawiony na rysunku 7 składa się z następujących elementów składowych:

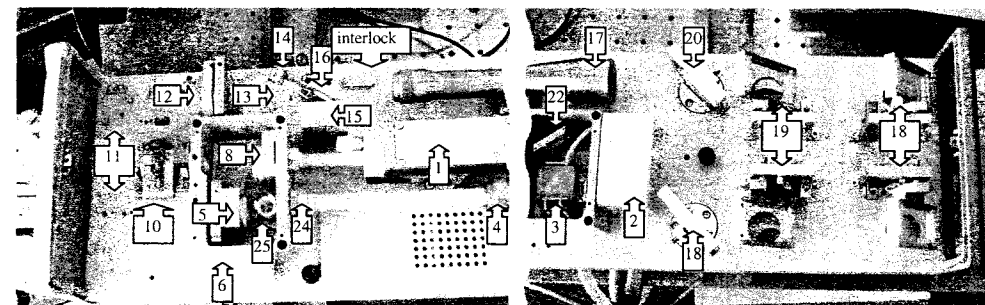
- 1) bloku zasilającego PS-2241T,
- 2) emitera laserowego LE-2222ELS,
- 3) systemu chłodzącego CP-1132,
- 4) bloku sterowania nadrzędnego RC-5.

Laser wykorzystuje teleskopowy rezonator, pozwalający otrzymać jednolitą,

kierunkową wiązkę o wysokiej energii i małej rozbieżności. Umożliwia to skompensowanie rozbieżności powstałej na skutek procesów cieplnych zachodzących w soczewce pręta Nd: YAG. Układ nie potrzebuje do chłodzenia zewnętrznej sieci wodociągowej. Woda krąży w zamkniętym obiegu, a ochładzana jest całkowicie przez zainstalowany wymiennik ciepła, z wydajnością chłodzenia do 1000W, przy temperaturze otaczającego środowiska 20°C. Operacje wykonywane za pomocą laser wykorzystują zjawisko stymulowania pobudzonego fotonu do wyższego poziomu w kryształach Nd<sup>3+</sup>: YAG za pomocą impulsowego pompowania przez lampę. Generowanie drugiej harmonicznej otrzymywane jest dzięki zastosowaniu nieliniowego kryształu KTP „obcinającego” II typ dopasowania fazy. Lampa Heraeus Noblelight (5x75XFP), wykorzystywana jest do oświetlenia kryształu Nd: YAG, w celu otrzymania inwersji obsadzeń oraz przejścia fotonu na wyższe poziomy. Lampa wraz z aktywnym elementem pozwalają na jednorodną iluminację oraz filtrację części promieniowania UV, pompowanego światła.

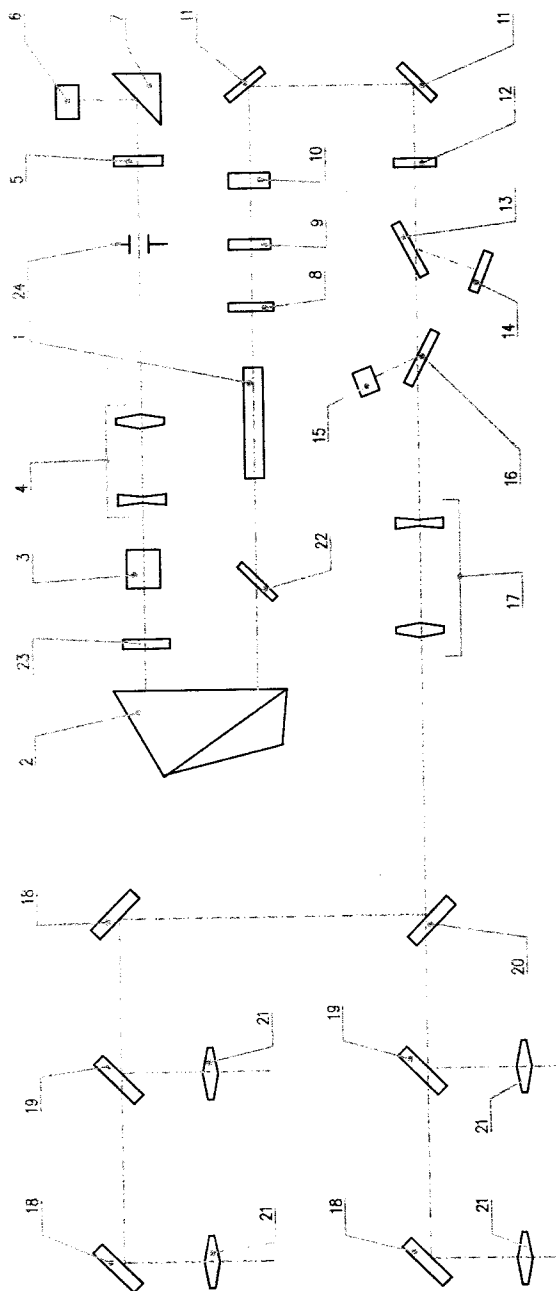
Emiter laserowy jest kluczowym elementem systemu laserowego (rys. 8) [4]. Pozwala on na konwersję elektrycznie pompowanej energii na promieniowanie laserowe. Odpowiednio przygotowana konstrukcja umożliwia wyeliminowanie

wysokich napięć między układem emitera, a blokiem zasilającym, co zwiększa bezpieczeństwo pracy urządzenia.



Rys. 8. Fotografia wewnętrznej budowy emitera laserowego: 1 – komora pompująca (aktywny element i lampa błyskowa); 2 – pokrywa zabezpieczająca sześcienną pryzmę; 3 – QSW-oprawka; 4 – wewnętrzny teleskop; 5 – oprawka lustra wewnętrznego; 6 – ochronna przykrywa pyrodetektora 1; 8 – obsadka lustra wyjściowego; 10 – kryształ drugiej harmonicznej; 11 – lustra separatora częstotliwości; 12 –  $\lambda/2$ -płyta; 13 – polaryzator; 14 – przesłona promieniowania; 15 – ochronna przykrywa pyrodetektora 2; 16 – płyta kompensatora; 17 – wyjściowy teleskop; (18 - 20) – lustra rozdzielające promieniowanie; 22 – polaryzator; 24 – przykrywa obiektywu; 25 – wewnętrzna przysłona

Optyczny schemat rezonatora laserowego przedstawiono na rysunku 9. Załamana wiązka laserowa przechodzi przez trójścienny pryzmat (2), tylne (5) i wyjściowe lustro (8). Tryb przełączania realizowany jest przez komórkę Pockelsa (3) i cienką błonę polaryzatora (22). Rotator (23) używany jest do obracania płaszczyzny polaryzatora po przejściu promieniowania laserowego przez pryzmat (2). Tryb sterowania wewnętrznym teleskopem (4) spełnia dwie funkcje. Pierwszą funkcją jest kompensacja ciepła obiektywu elementu aktywnego, która aproksymuje liniową funkcję uśredniając sygnał wejściowego zasilania lampy błyskowej. Bez konieczności optycznego dostrajania, oscylator pracuje w szerokim, ciągłym zakresie częstotliwości cyklu, utrzymując niską wartość rozbieżności. Dostrojenie teleskopu, w celu skompensowania wpływu ciepła soczewki oscylatora, realizowane jest w pełnym zakresie: od zera do maksymalnej wartości przepustowości systemu. Drugą realizowaną funkcją jest redukcja kierunkowej rozbieżności wiązki, w celu zmniejszenia jej poprzecznego rozmiaru. Optyka, zmniejszając średnicę wiązki wewnętrznej między teleskopem i tylnym lustrem, powoduje dyfrakcję fali w tylnej nodze rezonatora i w ten sposób podstawowy TEM<sub>00</sub> tryb wewnętrznej wiązki jest większy niż w konwencjonalnym stałym rezonatorze o podobnej długości.



Rys. 9. Schemat optyczny lasera typu LS-2136-E4: 1 – element aktywny; 2 – sześcienny pryzmat; 3 – Q-SW kryształ; 4 – wewnętrzny teleskop; 5 – wsteczne lustro ( $R > 99\%$ ); 6 – pryzmat składany; 7 – pryzmat wyjściowy; 8 – lustro wyjściowe; 9 – 45° – rotator; 10 – kryształ drugiej harmonicznej; 11 – lustra separatora częstotliwości; 12 –  $\lambda/2$ -płyta; 13 – polaryzator; 14 – przesłona promieniowania; 15 – pyrodetektor 2; 16 – płyta kompensatora; 17 – wyjściowy teleskop; (18 - 20) – lustra rozdzielające promieniowanie; 21 – przysłony kanałów; 22 – polaryzator; 23 – 30° – rotator; 24 – obiektyw

Tryb  $TEM_{00}$  ogranicza sumaryczną liczbę wyższych trybów, które ograniczają aperturę (rozwartość układu optycznego decydująca o zdolności rozdzielczej układów optycznych i jasności obrazów) i oscylacje, poprzez zmniejszanie kierunkowej rozbieżności wiązki. Własności sześciennego pryzmatu powodują, że optyka rezonatora jest odporna na wpływy cieplne i fizyczne. Model lasera LS-2136-E4 zawiera element tłumiący drugą harmoniczną, który składa się z polaryzatora (13) i  $\lambda/2$  (532 nm) opóźniającej płyty (12) – (rys. 9) [4]. Tłumik stosowany jest do zmiany energii wyjściowej drugiej harmonicznej, obracając  $\lambda/2$  płytę według osi, bez zmiany wartości energii pompowanej. Teleskop wyjściowy (17) służy do wytworzenia wiązki o rozszerzającej się średnicy i do kompensacji jej rozbieżności, a system luster dzielących (18 - 20) do dzielenia jednej wiązki laserowej na cztery, o identycznych wartościach energii. Przysłony kanałów wykorzystywane są do wybrania wykonywanych operacji.

## 5. Podsumowanie

Wykorzystanie do formowania trójwymiarowych obiektów czterokanałowego lasera LS-2136-E4 znacznie zwiększyło wydajność systemu ELS-02, przeznaczonego do precyzyjnego, podpowierzchniowego znakowania (teksty, kody kreskowe, symbole oraz grafiki różnego rodzaju), bez naruszania zewnętrznej struktury materiału obrabianego. W czasie jednego cyklu technologicznego możliwa stała się jednoczesna obróbka czterech identycznych obiektów wewnątrz szkła lub innego przezroczystego dielektryka, nie tracąc przy tym na jakości obrabianych powierzchni. Zapewnienie w czynnościach przygotowawczych odpowiedniego algorytmu dyskretyzacji oraz uzupełnienie wiedzy z zakresu technologii formowania punktowego elementu struktury, umożliwiło stworzenie odpowiednich algorytmów sterujących formującą wiązką laserową. Stałość parametrów układu lasera oraz krystaliczna jednorodność obrabianego materiału, przy zapewnieniu efektywności sortowania punktów powstałych po procesie dyskretyzacji, wydają się być jednymi z głównych parametrów, które odgrywają znaczącą rolę w wysokojakościowym, laserowym procesie technologicznym.

## Literatura

1. Trochimczuk R., Karpowicz S. E.: *Wybrane aspekty formowania obiektów 3D w szkłe i innych przezroczystych dielektrykach za pomocą lasera*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn nr 10, Wydawnictwo PB 2002.

2. **Trochimczuk R., Karpovich S.:** *Nanosculptor software for fabrication of spatial structures in crystals*, Physics, Chemistry and Application of Nanostructures, Nanomeeting 2003, World Scientific, 2003.
3. **Dostanko A. P., Tolochko N. K., Karpovich S. E., i inni:** *Technology and technigue of precise laser modification of solid-state structures*. Technoprint, Mińsk, 2002.
4. *Instruction manual for Nd:YAG laser system LS-2136-E4* – Lotis TII, Mińsk, 2002.
5. **Kananowicz W. P., Karseko W. G., Kirilenko A. W.:** *Objemnoje lasernoje grawirowanie*. Materiały konferencji „Nowyje technologii izgotowlenia mnogokrystalnych modulej”, Mińsk – Naroch, 25-29 wrzesień 2000.
6. **Kananowicz W. P., Karseko W. G., Orlonok A. B.:** *Dyskretizacja trechmernihich obiektów przy lasernom objemnom grawirowaniu*. Technoprint, Mińsk, 2000.
7. **Kananowicz W. P.:** *Razrabotka algorytmow i programnowo obespieczenia ustanowki lasernej grawirowki*. Materiały VI Konferencji Studentów i Aspirantów „Nowyje matematyczeskije metody i kompjuternyje technologii w projektirowaniu, proizvodstwie i naucznych isledowaniach”, Gomel – Białoruś, 19-22 marca 2001.
8. **Trochimczuk R., Kananowicz W. P., Karpovich S. E.:** *Struktura programm-nogo obespečenija dla upravljenija procesom lazernogo formiowanija trechmernihich objektow*. Izvestija Belorusskoj Inżynernoj Akademii, nr 1/2, Mińsk, 2003.

#### TECHNOLOGY OF FORMING 3D OBJECTS INSIDE GLASS AND OTHER TRANSPARENT DIELECTRICS BY MEANS OF LASER

**Abstract:** The article present select issues of forming 3d objects inside glass and other transparent dielectrics by means of laser. The method of objects discretization related to the technology of forming point elements structures. The method of discretization and the laser system applied to forming proces are presented.

Wiesław Załuska<sup>1</sup>

## CHARAKTERYSTYKI PRZEPIYWOWE I ENERGETYCZNE POMP WIROWYCH

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki z badań charakterystyk przepływowych pomp wirowych. Badania pomp wykonano w czasie rzeczywistego rozbioru wody do miejskiej sieci hydraulicznej. W trakcie tych badań dokonano pomiarów chwilowych rozbiorów, ciśnień i oporów hydraulicznych przepływu w zespołach pomp oraz rurociągów przesyłowych. Wyniki badań stanowiły podstawę do opracowania kompleksowych charakterystyk przepływowych poszczególnych pomp. Na załączonych wykresach przedstawiono teoretyczne, fabryczne i doświadczalne charakterystyki pracy pomp wirowych. Badania i rzeczywiste charakterystyki pracy pomp posłużyły do opracowania wniosków i zaleceń wymaganych przy prowadzonych pracach modernizacyjnych układu pompowego.

**Słowa kluczowe:** maszyny przepływowe, pompy, charakterystyki przepływowe, pompownie

### 1. Wprowadzenie

Ograniczenie kosztów eksploatacyjnych pompowni, a w szczególności kosztów zużycia energii elektrycznej, wiąże się z potrzebą modernizacji układów pompowych. Ważnym elementem, decydującym o podjęciu stosownych prac, jest ograniczenie awarii systemu oraz zapewnienie ciągłości dostaw wody dla użytkowników. Konieczność wymiany zużytych agregatów pompowych oraz ograniczenie kosztów eksploatacyjnych, szczególnie kosztów zużycia energii elektrycznej, są czynnikami decydującymi o konieczności modernizacji pompowni. Równie ważnym elementem jest ograniczenie awarii systemu oraz zapewnienie ciągłości dostaw wody dla użytkowników.

Prawidłowy dobór pomp i układu sterowania jest uwarunkowany wykonaniem szczegółowej analizy pracy układu. Dobór pomp wiąże się on z określeniem wymaganego wydatku pompowni, co oznacza, że wskazane jest wykonanie pomiarów

<sup>1</sup> Zamiejscowy Wydział Mechaniczny w Suwałkach, Politechnika Białostocka, ul. Sejneńska 35, 16-400 Suwałki.

rozbioru wody. Pozyskane dane umożliwiają określenie rozbiórów chwilowych, które stanowią punkt wyjścia do ustalenia wymaganego wydatku pompowni. Należy przy tym unikać dobierania pomp o parametrach większych niż wymagane, ponieważ prowadzi to do małej sprawności pompowni, a więc do podwyższonych kosztów eksploatacyjnych. Drugą istotną sprawą w doborze pomp jest ustalenie wymaganej wysokości podnoszenia. Należy więc określić zmiany warunków ssania i tłoczenia, zarówno ciśnienia w sieci wodociągowej, czy też poziomu wody w zbiorniku zasilającym pompownię. Znaczne różnice po stronie tłoczenia związane są ze szczytowymi rozbiórami dziennymi i spadkiem obciążenia sieci nocą.

Analiza warunków pracy pompowni umożliwia wybór określonego typu pomp [2]. Pompy o płaskiej charakterystyce  $H = f(Q)$  wybiera się wtedy, gdy trzeba utrzymać niewielkie zmiany wysokości podnoszenia przy relatywnie dużym zakresie wydatku. Pompę o stromej charakterystyce  $H = f(Q)$  dobiera się zaś wtedy, gdy wymagane są odpowiednio mniejsze zmiany wydatku. Dla potrzeb pompowni rzadko udaje się dobrać jedną pompę tak, aby zapewniała pokrycie zapotrzebowania na wodę w ciągu całej doby, pracując jednocześnie z najwyższą sprawnością. Pokrycie zapotrzebowania na wodę realizowane jest zazwyczaj przez układ pompowy. Pompy w układach pompowych, zależnie od oczekiwanych efektów, łączone są szeregowo, równolegle lub w sposób mieszany. Należy zaznaczyć, że szeregowe łączenie pomp nie jest wskazane, ze względu na obecność całej gamy pomp z wirnikami wielostopniowymi. Natomiast szeroko jest stosowane łączenie równoległe, powodujące przyrost wydatku pompowni bez znacznej zmiany wysokości podnoszenia. Pompy z wirnikami wielostopniowymi można także łączyć równoległe, ale wówczas, przy zmianie zapotrzebowania na wodę, włącza się albo wyłącza następne pompy. W takim układzie pompy pracują zawsze z wysoką sprawnością niezależnie od zapotrzebowania na wodę. Ogromne znaczenie w pracy pompowni ma zastosowanie automatycznej regulacji, chociażby z uwagi na uderzenia hydrauliczne występujące podczas uruchamiania bądź zatrzymywania pomp.

## 2. Regulacja i sterowanie pomp

Proces zamierzonego dostosowywania parametrów pracy pompy do zmieniających się w czasie wymagań układu pompowego nazywa się regulacją parametrów pompy wirowej. W zależności od wymaganych parametrów na wypliwie z układu pompowego można wyróżnić:

- regulację wydajności pompy,
- regulację wysokości podnoszenia pompy.

Parametrami regulacji mogą być:

- prędkość obrotowa pompy,
- kąt ustawienia łopatek kierownicy wlotowej,
- kąt ustawienia łopatek wirnika (w przypadku niektórych pomp),
- liczba włączonych pomp w zespole złożonym z  $n$  pomp połączonych równoległe,
- średnica zewnętrzna wirnika (lub łopatek wirnika) zmieniona przez obtaczanie wirnika lub samych łopatek.

Jako odrębny zbiór traktowane są te wielkości (stopień otwarcia zaworu regulacyjnego w rurociągu tłocznym, stopień otwarcia zaworu w rurociągu upustowym), których zmiana powoduje zmianę charakterystyki układu pompowego. Wielkości te, związane z regulacją dławieniową i upustową, można nazwać parametrami regulacyjnymi układu pompowego.

## 3. Regulacja punktu pracy pompy za pomocą obtaczania wirnika

Zmianę parametrów pracy pompy poprzez zmniejszenie średnicy zewnętrznej wirnika można zaliczyć do „regulacji”, z tym, że jest to zmiana jednorazowa i nieodwracalna. Jeśli to zmniejszenie jest niewielkie ( $d/d' \geq 0.85$ ), to można założyć, że: (a), szerokość kanału wylotowego z wirnika zmienia się w niewielkim stopniu ( $b \cong b'$ ); (b), otrzymuje się podobne wylotowe trójkąty prędkości. Z rozumowania tego otrzymuje się zależność  $\frac{H'}{H} \cong \frac{Q'}{Q}$ , która wynika z tego, że wirniki przed i po

stoczeniu nie są geometrycznie podobne. Parametry pompy przed i po obtoczeniu leżą na linii prostej [3]. Ograniczeniem dopuszczalnego obtoczenia wirnika jest przesuwająca się w lewą stronę wykresu muszlowego wartość wydajności  $Q_{opt}$ , odpowiadająca najwyższej sprawności  $\eta_{max}$  i zmniejszającej się wartości  $\eta'_{max} < \eta_{max}$ . Średnice zewnętrzne wirników pomp odśrodkowych o wyróżniku szybkobieżności  $n_q < 30$  można zmniejszyć o około 20-25% bez większego obniżenia ich sprawności. Natomiast w przypadku pomp o większych wartościach wyróżnika szybkobieżności  $n_q$ , następuje wyraźne obniżenie sprawności. Należy podkreślić, że  $n_q$  pompy wirowej o średnicy wirnika  $d$  [m] podnoszącej na wysokość  $H$  [m] przy  $n$  [obr/min] i wydajności  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] rozumie się szybkość obrotową  $n_q$  geometrycznie podobnej pompy o średnicy wirnika  $d_s$ , która przy wysokości

podnoszenia  $H = 1\text{ m}$  miałyby wydajność  $Q = 1\text{ m}^3/\text{s}$ . Wartość  $n_q$  nie zależy od gęstości i lepkości podnoszonej cieczy.

#### 4. Regulacja układu pompowego przez stosowanie napędów o zmiennych prędkościach obrotowych

Regulację obrotów silników elektrycznych dokonuje się obecnie na ogół za pomocą falowników, czyli przetwornic częstotliwości [1,2]. Służą one do zmiany częstotliwości prądu i napięcia zasilania silnika. W ten sposób można zmieniać prędkość obrotową silników klatkowych w zakresie  $n_n = 0,1 \div 2,0$ . Jeśli chodzi o zasadę działania układu pompowego z przetwornicami, to: (a), jeśli ciśnienie w zasilanym systemie jest niższe od wymaganego, zwiększa się prędkość obrotową pompy, a zatem i jej wydatek; (b), gdy pompa osiągnie nominalną prędkość obrotową a ciśnienie nadal jest niższe od wymaganego, przetwornica częstotliwości powoduje załączenie drugiej pompy i jednocześnie obniżenie prędkości obrotowej pompy pierwszej tak, aby wydatek obu pomp wzrastał płynnie; (c), po osiągnięciu wymaganej wartości ciśnienia, przetwornica utrzymuje tę wartość poprzez zwiększanie lub zmniejszanie prędkości obrotowej pompy. Możliwe jest również ustalenie funkcji równomiernego użytkowania poszczególnych pomp za pomocą automatycznej zmiany kolejności ich pracy. Stosowane są też systemy sterowania pozwalające na wprowadzanie poszczególnych pomp do pracy za pośrednictwem przetwornicy częstotliwości. Pompa sterowana przez przetwornicę, po osiągnięciu maksymalnej prędkości obrotowej, przechodzi na zasilanie bezpośrednie, zaś przetwornica wprowadza do pracy kolejną pompę zestawu.

#### 5. Efekty uzyskiwane przy płynnym sterowaniu pompami

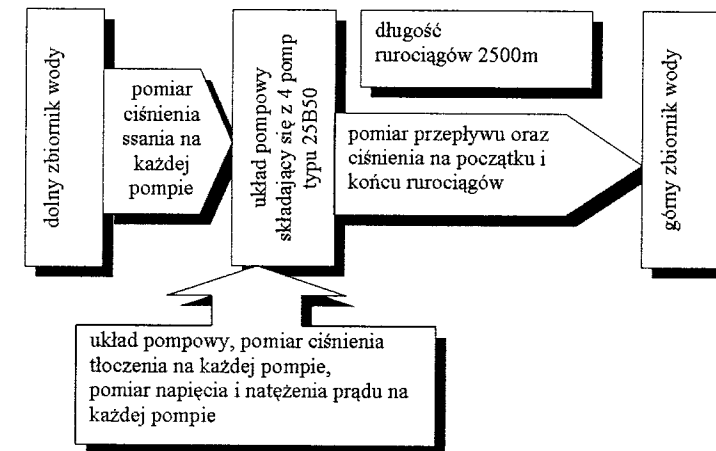
W przeważającej większości przypadków najmniejszą energochłonność i największą sprawność pompowni uzyskuje się w efekcie stosowania układów regulacji prędkości obrotowej. Efekty płynnej i bezstopniowej regulacji pracy pomp uwiadcniają się w następujących aspektach:

- płynnego dostosowywania się pracy pompowni do chwilowych wydajności rozbioru,
- likwidacji uderzeń hydraulicznych, mogących być niekiedy konsekwencją dwustanowego sterowania pompami,

- większej sprawności energetycznej systemów sterowanych w sposób płynny,
- lepszego dostosowania układu pompowego do wymagań procesu technologicznego uzdatniania wody.

#### 6. Opis pracy układu pompowego

Badaniami objęto cztery pompy typu 25B50, dla których wykonano pomiary charakterystyk: przepływowej, mocy i sprawności [4,5]. W skład analizowanego układu wchodziły również dwa rurociągi przesyłowe  $\phi 600\text{ mm}$  i  $\phi 800\text{ mm}$ .



Rys. 1. Schemat analizowanego układu wodociągowego

Pomiary charakterystyk pomp prowadzono zgodnie z wymogami PN-85/M-44001 „Pompy wirowe. Pomiary wielkości charakterystycznych.” Pomiaru przepływu dokonano za pomocą przepływomierzy elektromagnetycznych o klasie dokładności 0,25, a pomiary ciśnień w rurociągach wykonano za pomocą manometrów o klasie dokładności 0,6. Opory hydrauliczne rurociągów obliczono ze stosownych wzorów empirycznych, pozyskując tym samym ich charakterystyki hydrauliczne. Analizy pracy pompowni dokonano pod kątem jej modernizacji [5] i zwiększenia docelowej wydajności do  $2583\text{ m}^3/\text{h}$ .

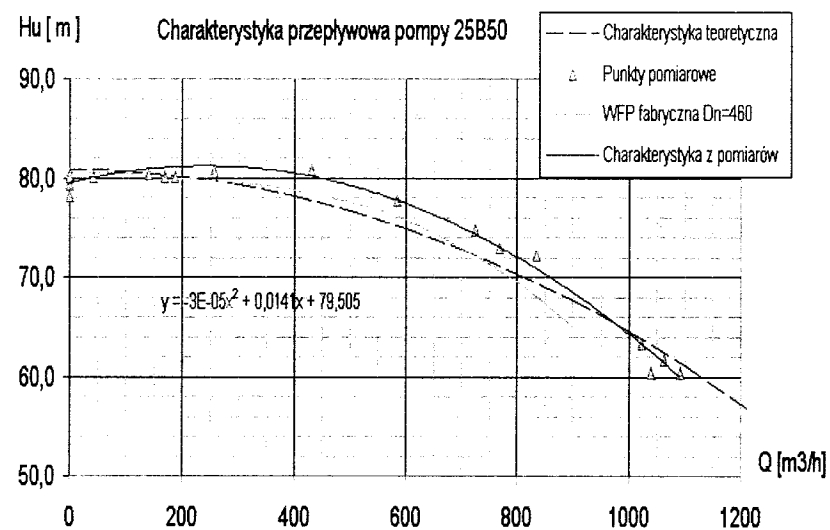
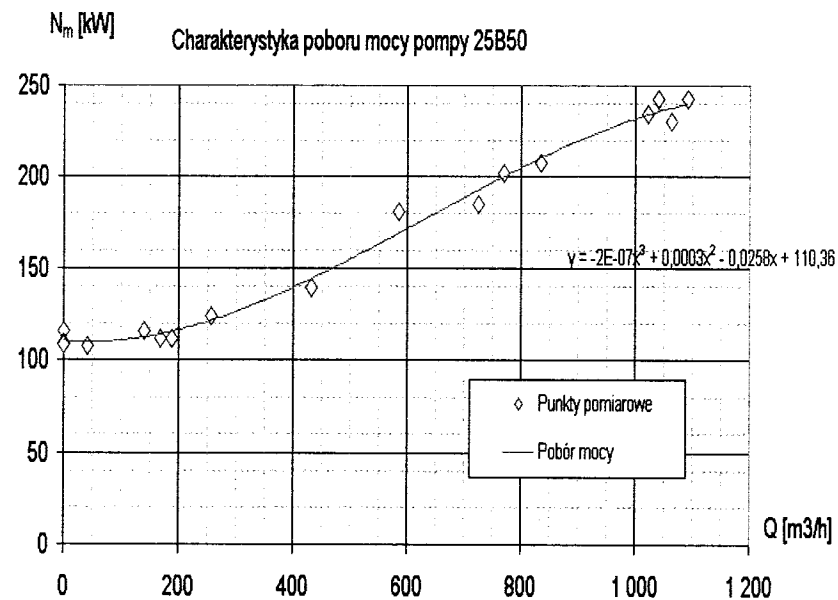
## 7. Wyniki pomiarów

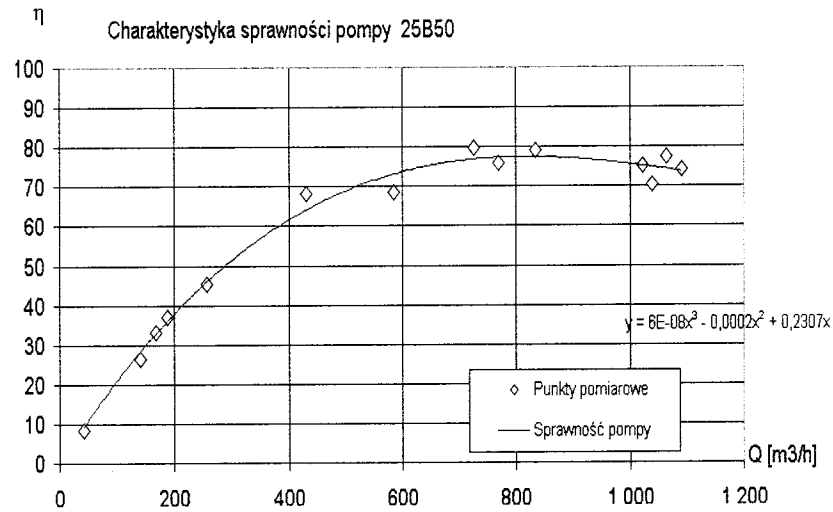
Badania, prowadzone podczas eksploatacji zespołu pomp zasilających stację uzdatniania wody, umożliwiły wykonanie pełnych charakterystyk poszczególnych pomp. Przykładowe wyniki pomiarów i uzyskane charakterystyki pracy pomp zamieszczono na rysunkach od 2 do 7. Wirnik pompy nr 3 został eksperymentalnie stoczony do średnicy 435 mm w celu dostosowania punktu pracy tej pompy do mniejszych rozbiorów wody.

Tabela 1.

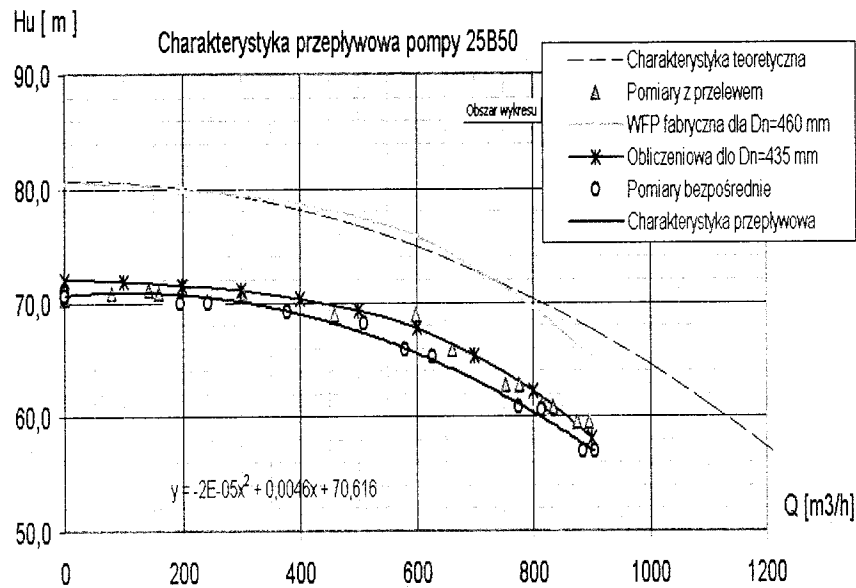
Wyniki pomiarów charakterystyk energetycznych pompy

Lp.	$Q$ [m <sup>3</sup> /h]	$H_u$ [m]	$N_{el}$ [kW]	$N_m$ [kW]	$N_u$ [kW]	$H$
1	1 107,0	61,0	251,454	238,378	183,885	77,14
2	1 082,0	61,2	250,836	237,792	180,333	75,84
3	1 070,0	61,6	249,600	236,621	179,522	75,87
4	1 064,0	62,2	246,511	233,693	180,289	77,15
5	1 021,0	63,8	242,186	229,593	177,541	77,33
6	975,1	65,3	236,008	223,736	173,622	77,60
7	900,0	67,1	229,212	217,293	164,500	75,70
8	865,3	69,2	219,327	207,922	163,205	78,49
9	790,6	71,5	208,206	197,379	153,947	78,00
10	640,0	74,4	190,289	180,394	129,778	71,94
11	515,4	77,7	164,959	156,381	109,093	69,76
12	340,0	78,9	129,743	122,996	73,100	59,43
13	213,2	78,9	118,622	112,454	45,838	40,76
14	260,0	79,0	134,685	127,682	55,972	43,84
15	313,4	77,9	163,105	154,624	66,510	43,01

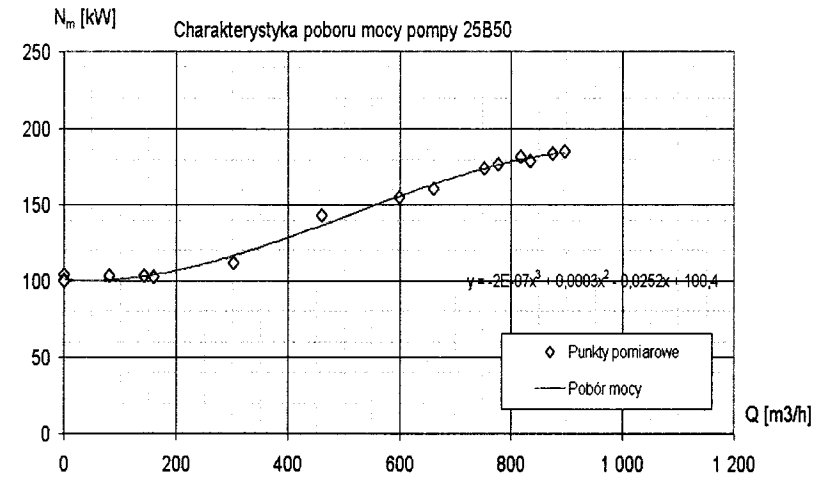
Rys. 2. Charakterystyki przepływowa  $H_u(Q)$  pompy nr 2Rys. 3. Charakterystyki zapotrzebowania mocy  $N_m(Q)$  dla pompy nr 2



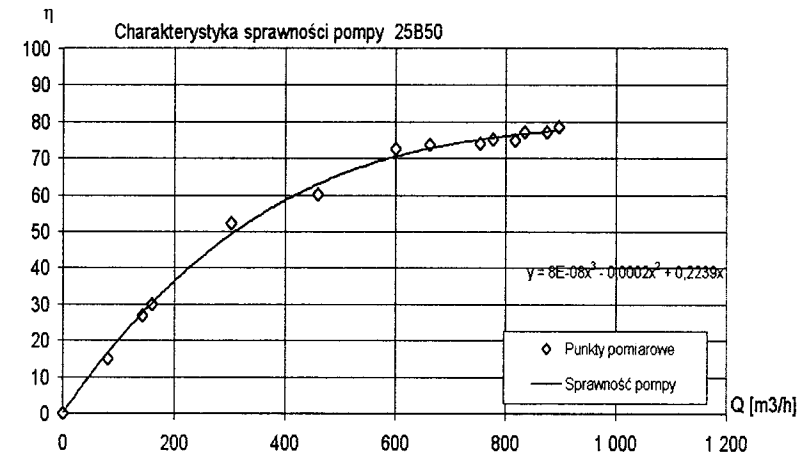
Rys. 4. Charakterystyki sprawności  $\eta_2(Q)$  pompy nr 2



Rys. 5. Charakterystyki przepływu  $H_u(Q)$  pompy nr 3



Rys. 6. Charakterystyki zapotrzebowania mocy  $N_m(Q)$  dla pompy nr 3



Rys. 7. Charakterystyki sprawności  $\eta_2(Q)$  pompy nr 3

## 8. Wnioski z badań

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów uzyskano pełne charakterystyki energetyczne poszczególnych pomp zespołu pompowego. Badania stanowiły podstawę dla techniczno-ekonomicznej oceny celowości modernizacji istniejącej

pompowni. Przewidywana docelowa wydajność pompowni powinna wynosić 62 tys m<sup>3</sup>/dobę, co odpowiada przepompowywaniu 2583 m<sup>3</sup> wody na godzinę. Analiza wyników umożliwi sformułowanie następujących wniosków:

1. Charakterystyki przepływowe pomp w badanym układzie są zbliżone do charakterystyk fabrycznych producenta z odchyleniem około 4%.
2. Pomierzone optymalne punkty pracy pomp mieszczą się w zakresie wydatków równych  $Q = 800 \text{ m}^3/\text{h}$ . Odbiegają one znacznie od nominalnych parametrów znamionowych pomp  $Q = 500 \text{ m}^3/\text{h}$ , odczytanych z ich tabliczek znamionowych.
3. Po przetoczeniu wirników pomp na wymiar  $d_n = 435 \text{ mm}$  nie będzie zapewniona możliwość uzyskania docelowej wydajności pompowni. W pierwotnej koncepcji przyjęto pozostawienie istniejących pomp i stoczenie wirników na wymiar  $d_n = 435 \text{ mm}$ .
4. Dotychczasowy układ rurociągów o średnicach 600 mm i 800 mm może zapewnić przepompowanie 2400 m<sup>3</sup>/h wody, tj. poniżej planowanej docelowej wartości 2583 m<sup>3</sup>/h.
5. Sprawność przepływowa pomp 25B50 zastosowanych do modernizowanego układu wyniesie 70%. Po stoczeniu wirników na średnicę większą niż 435 mm wskazana jest jednoczesna praca dwóch pomp. Dla projektowanego układu wielkość stoczenia średnicy pompy nr 3 jest za duża.
6. Ze względów energetycznych, optymalne byłoby zastosowanie nowych pomp lub wymiana wirników o maksymalnej sprawności osiąganey dla  $Q \cong 600 \text{ m}^3/\text{h}$ .
7. Celowe wydaje się zastosowanie płynnej regulacji prędkości obrotowej pomp, dostosowującej wydajność układu pompowego do chwilowych rozbiórów wody.

## Literatura

1. **Jędral W.:** *Pompy wirowe odśrodkowe*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996.
2. **Korczak A., Rokita J.:** *Pompy i układy pompowe – obliczenia i projektowanie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1998.
3. **Jackowski K., Jankowski Z., Jędral W.:** *Układy pompowe*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1992.

4. **Załuska W.:** *Wykonanie pomiarów i charakterystyk zespołu pompowego pompowni I stopnia SUW Wasilków – Wodociągi Białostockie*. Białystok, 1998, (opracowanie własne).
5. **Załuska W.:** *Opracowanie charakterystyk pracy zespołu pompowni I stopnia SUW Wasilków*. ELIMP, Warszawa, 1998.

## OPERATING CHARACTERISTICS OF IMPELLER PUMPS

**Abstract:** The paper is devoted to presentation of results and conclusions from investigations of impeller pumps. Investigations were performed considering real redistribution of water into municipal hydraulic net. During these experimental tests, measurements of temporary flow redistributions, pressures and hydraulic resistances were accomplished in set of pumps as well as in pipelines. Results of investigations made up basis to elaborate complex operating characteristics of individual impeller pumps. On enclosed graphs, theoretical, manufacturing and experimental characteristics of impeller pumps have been demonstrated.



Tomasz Zubrycki, Paweł Suchodoła, Krzysztof Jaworek

**OCENA LOKOMOCJI DWUNOŻNEJ CZŁOWIEKA  
W RUCHU PŁASKIM Z WYKORZYSTANIEM  
ANALIZY PORTRETÓW FAZOWYCH  
UZYSKANYCH ZA POMOCĄ URZĄDZENIA PDA**

**Streszczenie:** Dzięki zastosowaniu nowoczesnych technik cyfrowych – mikrokontrolerów – możliwe było opracowanie, w oparciu o metodę płaszczyzny fazowej, urządzenia PDA, służącego do szybkiej oceny stanu aparatu ruchu człowieka.

**Słowa kluczowe:** metoda płaszczyzny fazowej, lokomocja człowieka, mikrokontroler, biomechanika

## 1. Wstęp

Badanie lokomocji dwunożnej człowieka, polega na analizie danych pomiarowych, np. kątów względnych między udem a tułowiem, udem a golenią oraz golenią a stopą, uzyskanych podczas chodu człowieka, np. przy pomocy systemu ELITE-3D zainstalowanego w Centrum Bioinżynierii w Mediolanie.

Proces sterowania ruchem kończyn dolnych jest bardzo złożony. Podczas trwania fazy podporowej stopy z podłożem, zaangażowanych jest od 15 do 17 głównych mięśni, które generują momenty w stawie biodrowym, kolanowym i skokowym [1]. Wynika z tego, że uzyskanie tej samej zmiany kąta, np. między udem a golenią, może następować przy dużej liczbie kombinacji momentów w trzech głównych stawach nogi.

Aby analiza ruchu była bardziej przejrzysta i przystępna, można usunąć dane dotyczące czasu, ponieważ bioelektryczna aktywność mięśni kończyny dolnej zależy od położenia kończyny, a nie od czasu. J. W. Gibbs w badaniach równowagi chemicznej zrezygnował z czasu jako jawnej zmiennej i sporządził wykresy współrzędnych uogólnionych  $(q, \dot{q})$ , przy czym  $q$  była to wybrana wielkość charakteryzująca obserwowany proces, zaś  $\dot{q}$  oznaczała pochodną względem czasu tej wielkości, a para punktów  $(q, \dot{q})$  na płaszczyźnie zwanej fazową w układzie  $Oq\dot{q}$  charakteryzuje stan ruchu badanego układu [1].

Francuski matematyk J. H. Poincaré opracował metodę płaszczyzny fazowej, która doskonale nadawała się do opisu stanów układów fizycznych. Uzyskane na tej płaszczyźnie rodziny trajektorii fazowych układu pozwalały wnioskować o stabilności badanego układu oraz o jego właściwościach dynamicznych [1].

Metoda płaszczyzny fazowej okazała się dogodnym graficznym sposobem analizy ruchu wybranych segmentów kończyny dolnej i miednicy człowieka podczas chodu i biegu. Gustafsson, Lanshammer i Paul zauważyli, że uzyskiwane torzy fazowe pozornie przecinają się w miejscach nie będących punktami osobliwymi płaszczyzny fazowej. W rzeczywistości to nie trajektoria przecina się na płaszczyźnie fazowej, lecz jej rzut z przestrzeni fazowej  $Oq\dot{q}\ddot{q}$  na płaszczyznę fazową w układzie  $Oq\dot{q}$  [1].

Wzrost zainteresowania metodą płaszczyzny fazowej w biomechanice chodu i biegu nastąpił w końcu lat osiemdziesiątych XX wieku. Stwierdzono, że kształt toru fazowego na płaszczyźnie fazowej zależy od wyboru współrzędnej stanu  $q$  – przyjęcie za współrzedną stanu kąta względnego między wybranymi segmentami kończyny dolnej pozwala uzyskać czytelne torzy fazowe na płaszczyźnie fazowej [2].

Do przetwarzania danych pomiarowych używa się „dużych”, drogich komputerów klasy PC. Powstał więc pomysł zbudowania niewielkiego, przenośnego (zasilanego bateryjnie) urządzenia, służącego do analizy i oceny chodu człowieka przy zastosowaniu metody wykresów fazowych. Metoda ta nie wymaga, w przeciwieństwie do zmodyfikowanej metody wskaźnikowej [1], zastosowania bardzo kosztownej aparatury pomiarowej, np. optycznego systemu rejestracji ruchu ELITE-3D, co znacznie obniża koszty badań.

## 2. Mikrokontrolery PIC

Mikrokontroler (komputer jednoukładowy) jest wyspecjalizowanym układem scalonym bardzo wielkiej skali integracji, w skład którego wchodzi:

- mikroprocesor,
- pamięć programu przechowująca rozkazy dla mikroprocesora,
- pamięć typu RAM na dane oraz wyniki operacji,
- układy wejścia – wyjścia, umożliwiające wprowadzanie do pamięci rozkazów i danych oraz wyprowadzanie wyników,
- urządzenia dodatkowe, np. przetworniki a/c, komparatory, timery.

Mikrokontroler jest kompletnym, programowalnym, autonomicznym układem (nie wymaga podłączania zewnętrznych układów pomocniczych, np. pamięci), mogącym realizować wszystkie operacje składające się na przetwarzanie informa-

cji łącznie z jej wymianą z określonym otoczeniem (zarówno przy użyciu sygnałów cyfrowych, jak i analogowych).

Mikrokontrolery są dzisiaj jedną z najbardziej popularnych grup cyfrowych układów scalonych. Stosowane są szeroko w elektronicznym sprzęcie powszechnego użytku, aparaturze kontrolno – pomiarowej, systemach automatyki przemysłowej, telekomunikacji, przemyśle samochodowym i lotniczym, a także w technice wojskowej i kosmicznej [5].

Mikrokontrolery PIC firmy Microchip są 8-bitowymi układami typu RISC (ang. Reduced Instruction Set Computing/Computer), wykonanymi w architekturze typu Harvard – pamięć komputera podzielona jest na pamięć programu i pamięć danych, które są dostępne przez dwie oddzielne, niezależne szyny.

Mikrokontrolery o architekturze typu RISC charakteryzują się niewielką liczbą prostych, odpowiednio dobranych rozkazów, umożliwiających realizację wszystkich wymaganych zadań. Rozkazy ortogonalne (symetryczne) umożliwiają wykonanie wszystkich operacji na wszystkich rejestrach przy zastosowaniu adresowania bezpośredniego lub pośredniego. Dzięki temu programowanie jest bardziej efektywne.

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wybranych parametrów technicznych komputerów jednoukładowych produkowanych przez firmę MICROCHIP.

**Tabela 1.**

Zestawienie parametrów technicznych mikrokontrolerów PIC (stan na 22 kwietnia 2003 r.) [10]

Nazwa parametru	Rodzina układów PIC				
	12CXXX	16C5X	16CXXX	17CXXX	18CXXX
Maksymalna częstotliwość zegara	10 MHz	40 MHz	40 MHz	33 MHz	40 MHz
Minimalny czas wykonania jednego rozkazu <sup>1</sup>	400 ns	100 ns	100 ns	121 ns	100 ns
Maksymalna liczba wejść/wyjść	6	20	36	66	68
Maksymalny rozmiar pamięci programu (w słowach)	2048	2048	8192	16384	65536
Maksymalny rozmiar pamięci typu RAM (w bajtach)	128	73	368	902	3840
Maksymalny rozmiar pamięci EEPROM (w bajtach)	16	–	256	–	1024
Rozdzielczość przetwornika a/c	8 bitów	–	10 bitów	10 bitów	10 bitów
Maksymalna liczba wejść przetwornika a/c	4	–	14	16	16
Liczba rozkazów	35	33	35	58	77
Sprzętowe mnożenie	–	–	–	tak	tak
Liczba układów w rodzinie <sup>2</sup>	13	15	96	8	40

<sup>1</sup> wykonanie jednego rozkazu zajmuje cztery takty zegara (tzw. cykl zegarowy).

<sup>2</sup> wersje układów na niskie napięcie zasilania nie były brane pod uwagę.

Większość mikrokontrolerów produkowanych przez firmę MICROCHIP dostępna jest w kilku wariantach, różniących się między sobą następującymi parametrami:

- rodzajem pamięci programu (ROM, EPROM, FLASH),
- zakresem napięcia zasilania (standardowe 5V, obniżone),
- rodzajem obudowy i zakresem temperatury pracy.

Najczęściej stosowane są mikrokontrolery z rodziny PIC16CXXX. Układy te, pomimo wad związanych z organizacją pamięci danych (podzielona na banki, nieciągła) oraz pamięcią programu (nieodrobna obsługa tablic danych), są uniwersalnymi, tanimi układami, których możliwości są wystarczające do realizacji większości, niekoniecznie prostych zadań.

W urządzeniach, które wymagają złożonych, długich programów, większej pojemności pamięci typu RAM lub dużej liczby wejść/wyjść konieczne jest stosowanie mikrokontrolerów PIC 18CXXX, które dodatkowo pozbawione są wad „młodszych” komputerów jednocukładowych z rodziny PIC 16CXXX.

Najważniejsze zmiany wprowadzone w mikrokontrolerach z rodziny PIC 18CXXX, w porównaniu z układami PIC 16CXXX, to:

- zwiększenie długości słowa maszynowego z 14 do 16 bitów,
- zwiększenie szerokości szyny adresującej pamięć programu z 13 do 21 bitów, dzięki czemu maksymalny rozmiar tej pamięci to 2MB (2 097 152 bajty), czyli 1M słów 16-bitowych,
- zwiększenie liczby rozkazów z 35 do 77,
- wprowadzenie obsługi tzw. tablic danych umieszczonych w pamięci programu,
- zwiększenie rozmiaru stosu z 8 do 31 poziomów,
- zwiększenie szerokości szyny adresującej pamięć danych z 9 do 12 bitów, dzięki czemu maksymalny rozmiar tej pamięci to 4KB (4 096 bajtów),
- zmiana organizacji pamięci danych – ciągła pamięć typu RAM oraz oddzielny bank rejestrów sterujących,
- trzy rejestry FSR do adresowania pośredniego pamięci danych (w PIC 16CXXX tylko jeden) oraz obsługa automatycznego zwiększania/zmniejszania adresu,
- układ sprzętowego mnożenia 8-bitowych liczb (16-bitowy wynik),
- hierarchiczny system przerwań.

Należy podkreślić, że mikrokontrolery z rodziny PIC 18CXXX, pomimo 16-bitowej długości słowa maszynowego, są tak jak PIC 16CXXX komputerami 8-bitowymi, ponieważ operują na 8-bitowych danych zapisanych w pamięci typu RAM.

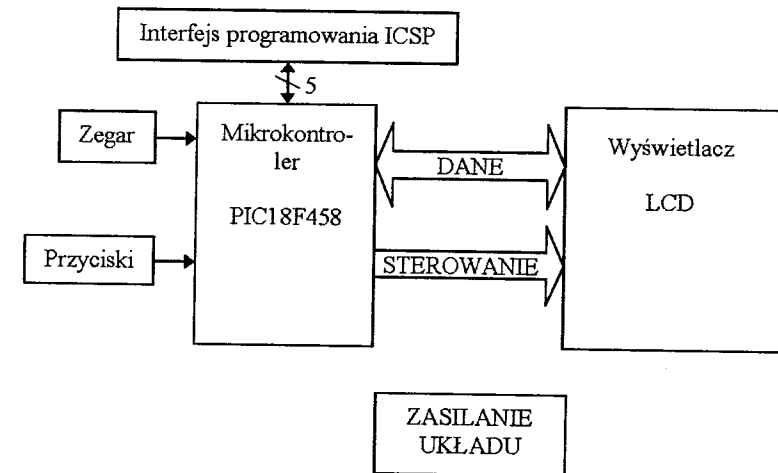
W mikrokontrolerach z rodziny PIC 18CXXX, zarówno architektura, jak i lista rozkazów, są zoptymalizowane pod kątem programowania w języku C, dzięki czemu programy napisane w tym języku po kompilacji są o wiele krótsze i bardziej efektywnie, niż w wersji dla mikrokontrolerów PIC 16CXXX.

### 3. Urządzenia PDA

**Analizator wykresów fazowych PDA** (ang. *Phase Diagrams Analyzer*) swoją nazwę zawdzięcza metodzie wykorzystywanej do oceny chodu człowieka. Jest to niewielkie, przenośne, zasilane bateryjnie urządzenie, które na podstawie danych pomiarowych uzyskanych np. przy pomocy włoskiego systemu ELITE – 3D, rysuje na graficznym ekranie LCD wykresy przebiegu kątów względnych w czasie i wykresy fazowe dla trzech głównych stawów kończyny dolnej człowieka.

Urządzenie PDA zostało zaprojektowane tak, aby jego użytkowanie nie sprawiało żadnych trudności. Umieszczono je w poręcznej obudowie i wyposażono w przejrzyste menu. Zasilanie bateryjne umożliwia wykorzystanie urządzenia w warunkach terenowych, natomiast liczne funkcje oszczędzania energii zapewniają długi czas pracy. Zastosowanie do budowy urządzenia ogólnie dostępnych komponentów, umożliwiło zminimalizowanie jego kosztów.

Projekt całego urządzenia oparty został na przedstawionym schemacie blokowym urządzenia (rys. 1).

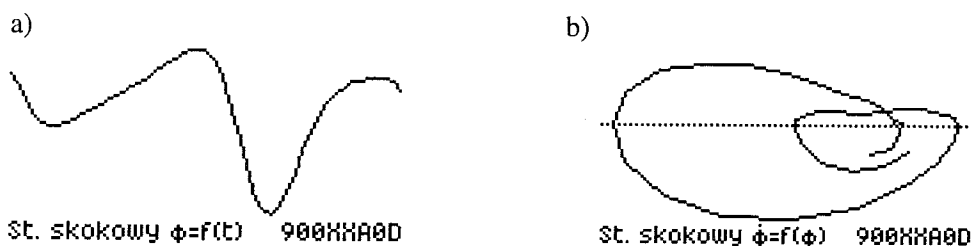


Rys. 1. Schemat blokowy analizatora wykresów fazowych – PDA

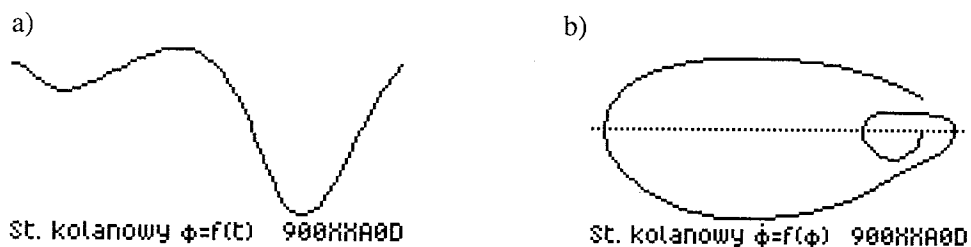
Głównym elementem analizatora jest mikrokontroler firmy Microchip o symbolu PIC 18F458. Do prezentacji wykresów wykorzystany został graficzny moduł LCD firmy Data Image o rozdzielczości 128×64 punkty [11]. Do komunikacji z komputerem służy interfejs programowania ICSP. Za pomocą tego interfejsu dokonywane jest programowanie mikrokontrolera oraz wprowadzanie danych, na podstawie których wykreślane są wykresy fazowe i przebiegi kątów względnych w czasie.

Oprogramowanie dla mikrokontrolera zostało napisane w asemblerze z optymalizacją kodu programu pod względem maksymalnej wydajności i minimalnego zapotrzebowania na zasoby pamięci.

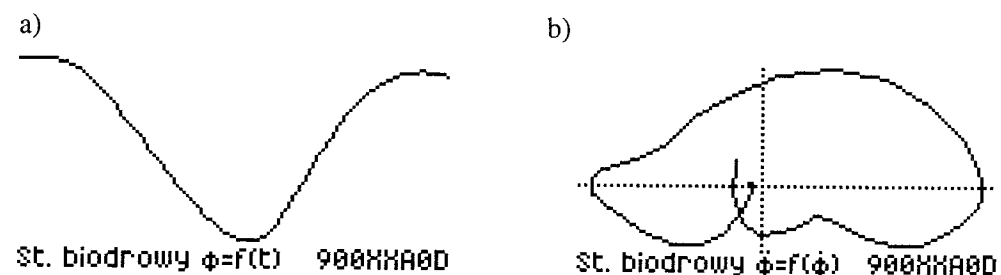
Zbudowane urządzenia jest w stanie wyznaczyć przebiegi kątów względnych i wykresy fazowe dla trzech głównych stawów kończyny dolnej człowieka na podstawie danych pomiarowych. Na poniższych rysunkach przedstawione zostały wykresy wykonane dla jednego zestawu danych badanej osoby.



Rys. 2. Wykresy dla stawu skokowego uzyskane za pomocą urządzenia PDA: a) wykres kątów względnych w czasie, b) wykres fazowy  $\phi_{Sk} = f(\phi_{Sk})$  (gdzie:  $\phi_{Sk}$  – kąt względny między golenią a stopą)



Rys. 2. Wykresy dla stawu kolanowego uzyskane za pomocą urządzenia PDA: a) wykres kątów względnych w czasie, b) wykres fazowy  $\phi_K = f(\phi_K)$  (gdzie:  $\phi_K$  – kąt względny między udem a golenią)



Rys. 3. Wykresy dla stawu biodrowego uzyskane za pomocą urządzenia PDA: a) wykres kątów względnych w czasie, b) wykres fazowy  $\phi_B = f(\phi_B)$  (gdzie:  $\phi_B$  – kąt względny między udem a tułowiem)

Wykresy fazowe uzyskane za pomocą PDA umożliwiają:

- ocenę stanu aparatu ruchu człowieka, polegającą na analizie przebiegu trajektorii fazowej, przy czym prędkościom kątowym  $\dot{\phi}_i > 0$  odpowiada rozprędkanie kończyny, natomiast prędkościom kątowym  $\dot{\phi}_i < 0$  – hamowanie kończyny,
- określenie średnich mocy rozwijanych w poszczególnych grupach mięśniowych nogi na podstawie powierzchni tzw. „dużych” i „małych” pętli skorelowanych odpowiednio z fazą wymachu oraz z fazą podporową.

#### 4. Podsumowanie

Aby ocenić układ ruchu człowieka, należy przeprowadzić specjalistyczne badania, do których potrzebny jest bardzo drogi sprzęt diagnostyczny. Większości szpitali i ośrodków rehabilitacyjnych w Polsce nie stać na zakup drogiej aparatury.

Budowa odpowiedniego narzędzia diagnostycznego, z wykorzystaniem nowoczesnych, tanich mikrokontrolerów sprawi, że będzie ono dostępne dla większości odbiorców zainteresowanych taką aparaturą.

Analizator wykresów fazowych PDA jest urządzeniem autonomicznym niewymagającym żadnych zewnętrznych układów do poprawnej pracy. Istnieją plany dalszej rozbudowy urządzenia PDA, między innymi o klawiaturę numeryczną, możliwość pomiaru kątów względnych za pomocą elektrogoniometrów oraz wprowadzenia filtracji danych pomiarowych.

W efekcie dalszych prac nad analizatorem wykresów fazowych, zostanie opracowana niezależna stacja diagnostyczna, mająca zastosowanie w klinicznych badaniach aparatu ruchu człowieka.

## Literatura

1. **Jaworek K.:** *Metoda wskaźnikowa oceny lokomocji człowieka na przykładzie chodu i biegu*. Rozprawa habilitacyjna, Polska Akademia Nauk, Instytut Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, Warszawa, 1992 Prace Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej PAN nr 32.
2. **Zubrycki T.:** *Komputery jednocukładowe firmy Microchip jako układy do oceny lokomocji dwunożnej człowieka w ruchu płaskim, z wykorzystaniem analizy portretów fazowych – faza podporowa*. Praca magisterska, Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Białystok, 2003.
3. **Suchodoła P.:** *Komputery jednocukładowe firmy Microchip jako układy do oceny lokomocji dwunożnej człowieka w ruchu płaskim, z wykorzystaniem analizy portretów fazowych – faza wymachu*. Praca magisterska, Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Białystok, 2003.
4. **Pełka R.:** *Mikrokontrolery – architektura, programowanie, zastosowania*, WKiŁ, Warszawa, 1999.
5. Microchip: *PICmicro Mid-Range MCU Family Reference Manual*, Microchip Technology Inc. 1997.
6. Microchip: *PICmicro 18C MCU Family Reference Manual*, Microchip Technology Inc. 2000.
7. Microchip: *PIC18FXX8 Data Sheet – High Performance, 28/40-Pin Enhanced FLASH Microcontrollers with CAN*, Microchip Technology Inc. 2002.
8. Microchip: *In-Circuit Serial Programming (ICSP) Guide*, Microchip Technology Inc. 2000.
9. Microchip: [www.microchip.com](http://www.microchip.com) – strona internetowa firmy Microchip Technology.
10. Data Image: [www.dataimage.com.tw](http://www.dataimage.com.tw) – strona internetowa firmy Data Image.