

Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej

BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN

Zeszyt 10



Wydawnictwo Politechniki Białostockiej

Białystok 2002

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

Recenzenci:
prof. dr hab. inż. Jerzy Stanisław Manerowski – 1, 2, 3, 7, 15
dr hab. inż. Krzysztof Sibilski – 4, 5, 6, 8, 14
prof. zw. dr hab. inż. Stefan Szczeciński – 9, 10, 11, 12, 13

Opracowanie redakcyjne:
Jadwiga Żukowska

Skład i rysunki:
Autorzy

© Copyright by Politechnika Białostocka 2002

ISSN 0860-9292

Publikacja nie może być powielana i rozpowszechniana, w jakikolwiek sposób,
bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

Redakcja techniczna i druk:
Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej

Spis treści

1. Błachnio J., Kownacki C.: Próba oceny stanu warstwy wierzchniej elementu maszyny z wykorzystaniem analizy falkowej sygnału efektu Barkhausena	5
2. Borowczyk H., Kwieciński R.: Projekt ekspertowego systemu diagnozowania układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego	15
3. Borowczyk H., Szczepanik R.: Projekt ekspertowego systemu diagnozowania układu łożyskowania turbinowego silnika odrzutowego	27
4. Celmerowski A.: Chwytnak dwuszcękowy z napędem ślimakowym, z równoległym prowadzeniem szczęk	41
5. Jałbrzykowski M.: Wpływ sterylizacji na niszczenie powierzchni instrumentarium chirurgicznego	51
6. Jaworek K., Pauk J.: Metoda diagnozowania chodu człowieka	61
7. Jaworek K., Pauk J.: Identyfikacja modelu dynamiki lokomocji dwunożnej człowieka na przykładzie jego chodu	67
8. Jermolaj M., Kuciej M.: Badania drgań przekładni zębatej maszyny dziewiarskiej Terrot typ MP-2	75
9. Kołodziejczyk W., Łukaszuk M.: Stabilizacja temperatury odniesienia podczas długotrwałych pomiarów temperatury	85
10. Kołodziejczyk W.: Urządzenie do sterowania procesem napełniania komory wizualizacyjnej	93
11. Kotowski A., Lindstedt P.: Metoda wibroakustyczna w procesie oceny stanu technicznego maszyn	99
12. Lindstedt P., Ostapkowicz P.: Słabe międzyobiektywne interakcje w procesie diagnozowania wycieków z długich rurociągów	117
13. Łach J., Gagan J.: Zunifikowane podejście do analizy równań bilansowych regeneratorów nieruchomych i obrotowych	129
14. Sajewicz E., Sidun J., Koronkiewicz T.: Zachowanie się kręgosłupa lędźwiowego poddanego kompresji ze zginaniem w warunkach stabilizacji transpedikularnej	143
15. Trochimczuk R., Karpowicz S. E.: Wybrane aspekty formowania obiektów 3d w szkłe i innych przezroczystych dielektrykach za pomocą lasera	153

Contents

1. Błachnio J., Kownacki C.: THE ATTEMPT TO ESTIMATE FEATURES OF A MACHINE PART TOP LAYER USING WAVELET TRANSFORM OF THE BARKHAUSEN SIGNAL	14
2. Borowczyk H., Kwieciński R.: PROJECT OF EXPERT DIAGNOSTIC SYSTEM OF AFTERBURNER CONTROL SYSTEM OF TURBINE JET ENGINE	26
3. Borowczyk H., Szczepanik R.: PROJECT OF EXPERT DIAGNOSTIC SYSTEM OF BEARING SYSTEM OF TURBINE JET ENGINE	40
4. Celmerowski A.: AN IDEA AND MECHANICS MODELS OF TWO-JAWS GRIPPING DEVICE OF ROBOT MANIPULATOR	50
5. Jałbrzkowski M.: THE INFLUENCE OF THE STERILISATION ON THE DECAY OF THE SURFACE OF SURGICAL INSTRUMENTATIONS	60
6. Jaworek K., Pauk J.: THE METHOD OF HUMAN GAIT DIAGNOSTICS	66
7. Jaworek K., Pauk J.: THE IDENTIFICATION OF DYNAMICS MODEL OF HUMAN LOCOMOTION ON THE EXAMPLE OF GAIT	73
8. Jermolaj M., Kuciej M.: INVESTIGATIONS OF VIBRATION OF TOOTHED GEAR KNITTING TERROT MACHINE OF TYPE MP – 2	83
9. Kołodziejczyk W., Łukaszuk M.: STABILIZATION OF ICE BATH REFERENCE TEMPERATURE FOR LONG-TIME TEMPERATURE MEASUREMENT	91
10. Kołodziejczyk W.: A SYSTEM FOR FILLING PROCESS CONTROL	98
11. Kotowski A., Lindstedt P.: VIBROACOUSTIC METHOD IN PROCESS OF ESTIMATE ENGINE'S TECHNICAL CONDITION	115
12. Lindstedt P., Ostapkowicz P.: THE WEAK INTEROBJECTS INTERACTION IN PROCESS OF DIAGNOSIS EFFLUENTS FROM LONG PIPELINES	128
13. Łach J., Gagan J.: UNIFORM APPROACH TO CONSTRUCTION OF BALANCE EQUATIONS FOR FIXED MATRIX HEAT REGENERATORS	140
14. Sajewicz E., Sidun J., Koronkiewicz T.: OBSERVATION OF THE LUMBAR SPINE SUBJECTED TO ECCENTRIC COMPRESSION DURING TRANSPENDICULAR STABILIZATION	151
15. Trochimczuk R., Karpowicz S. E.: SELECT ASPECTS OF 3D OBJECTS FORMATION INSIDE GLASS AND OTHER TRANSPARENT DIELECTRICS BY MEANS OF LASER	160

Józef Błachnio, Cezary Kownacki

PRÓBA OCENY STANU WARSTWY WIERZCHNIEJ ELEMENTU MASZYNY Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY FALKOWEJ SYGNAŁU EFEKTU BARKHAUSENA

Streszczenie: Metoda magnetyczna wykorzystująca efekt Barkhausena pozwala diagnozować stan warstwy wierzchniej materiałów ferromagnetycznych. Jakość uzyskanych danych zależy od przeprowadzonej analizy sygnału oraz od przyjętych w niej kryteriów oceny. Dotychczasowa obróbka impulsów sygnału efektu Barkhausena, stosowana w zestawie badawczym μ SCAN, nie daje wyczerpujących informacji o stanie warstwy wierzchniej badanego obiektu, a w szczególności o tym jak zmieniają się naprężenia własne w funkcji głębokości. W tym celu autorzy wprowadzają do analizy sygnału efektu Barkhausena transformatę falkową. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość oceny właściwości warstwy wierzchniej w funkcji głębokości.

Słowa kluczowe: warstwa wierzchnia, efekt Barkhausena, parametr magnetosprężysty, remanencja, koercja, transformata falkowa, naprężenia własne, częstotliwość środkowa

1. Wstęp

W każdym procesie produkcyjnym niezbędny jest etap kontroli jakości wytwarzanego produktu. Na tym etapie określa się potencjalną wartość rynkową produktu, ale przede wszystkim ocenia w jakim stopniu będzie on odporny na negatywne czynniki działające podczas jego eksploatacji. Jakość produktu wpływa na poziom bezpieczeństwa i efektywność jego użytkowania. Dowolny defekt lub uszkodzenie urządzenia powstałe na skutek wad technologicznych, może bowiem spowodować spadek wartości użytkowych urządzenia, a nawet stworzyć niebezpieczeństwo dla osób, które mają z nim styczność.

W monitoringu poziomu jakości stosuje się wiele metod diagnostycznych. Ze względów ekonomicznych, gdy bierze się pod uwagę minimalizację kosztów, coraz większa uwaga naukowców koncentruje się na badaniach nieniszczących. Umożliwiają one uzyskać rezultaty bliskie do uzyskanych badaniem metodami tradycyjnymi bez destrukcji badanego obiektu. Bowiemy w sytuacji, gdy wyrób jest

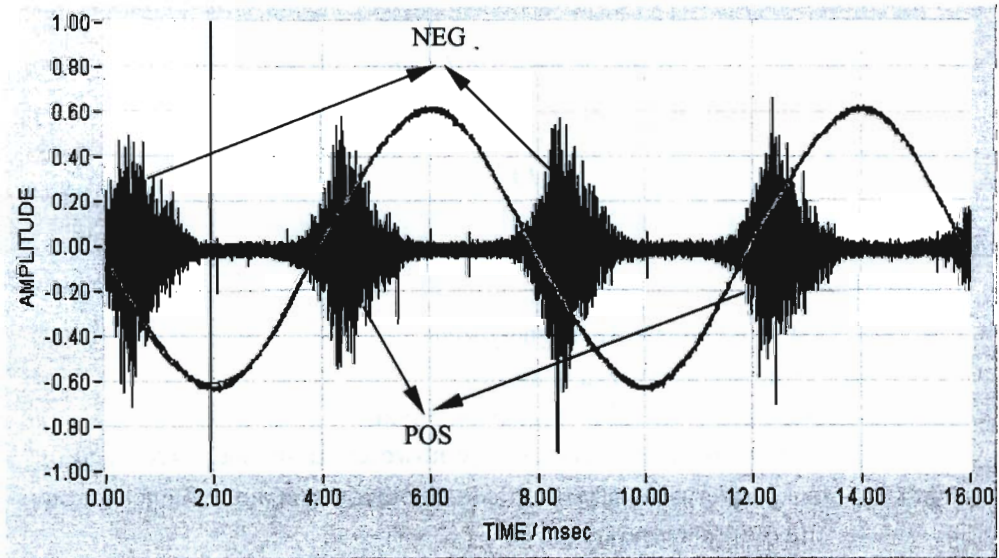
wolny od wad, można go wówczas nadal wykorzystać jako pełnowartościowy produkt.

Jedną z nowoczesnych nieniszczących metod diagnostycznych jest metoda szumu magnetycznego bazująca na zjawisku Barkhausena. Wykorzystuje się ją do badania warstwy wierzchniej materiałów ferromagnetycznych, tj. struktury oraz poziomu naprężeń. Metoda ta polega na analizie sygnału efektu Barkhausena, której wynikami są parametry charakteryzujące stan badanego materiału. Stosowane dotychczas metody nieniszczące nie pozwalają uzyskać wystarczającej ilości informacji, która pomogłaby to w pełni zidentyfikować wszystkie procesy zachodzące w warstwie wierzchniej badanego obiektu, a w szczególności zmianę naprężeń własnych w funkcji głębokości. Niezbędne są zatem badania nad udoskonaleniem i rozszerzeniem możliwości tych metod. W tym celu autorzy proponują wykorzystać transformatę falkową do analizy sygnału efektu Barkhausena. Zastosowanie tego narzędzia może umożliwić opracowanie metody, pozwalającej uzyskać większe niż dotąd informacje o właściwościach warstwy wierzchniej elementów maszyn i konstrukcji.

2. Metoda analizy sygnału efektu Barkhausena zaimplementowana w zestawie badawczym μ SCAN

Efekt Barkhausena, na którym bazują opisane później metody, wykorzystuje właściwości strukturalne materiałów ferromagnetycznych, np. stali. Materiały te mają strukturę domenową. Każde ziarno ferromagnetyka ma domeny magnetyczne, tj. obszary, w których momenty magnetyczne atomów znajdują się w położeniu wzajemnie równoległym. Poszczególne domeny są rozdzielone ścianami Blocha. Jeżeli na ziarna materiału nie działa żadna siła wewnętrzna i zewnętrzna lub zewnętrzne pole magnetyczne, to domeny nie zmieniają położenia względem siebie i nie zmienia się kierunek momentów magnetycznych. Jednak jeśli materiał zostanie poddany działaniu, np. zmiennego pola magnetycznego, momenty magnetyczne domen uporządkują się w kierunku wektora pola i ściany pomiędzy domenami zmieniają położenie. Ruch ścian jest jednak uwarunkowany również naprężeniami wewnętrznymi jakie występują w materiale, które mogą go powstrzymywać lub przyspieszać. Zmiany położenia ścian oraz samych domen powodują zmiany pola magnetycznego ferromagnetyka, które może być rejestrowane przez urządzenie pomiarowe. Zarejestrowany sygnał jest tzw. szumem magnetycznym, tj. sygnałem efektu Barkhausena [1].

Zestaw μ SCAN 500 jest jednym z kompletnych stanowisk badawczych, które umożliwiają pomiar i rejestrację sygnału efektu Barkhausena na komputerze PC, z maksymalną częstotliwością próbkowania 5MHz. Zapisane przebiegi sygnałów efektu Barkhausena analizuje się z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania współpracującego z urządzeniem. Poniżej (rys. 1.) przedstawiono przykładowy przebieg sygnału efektu Barkhausena, który został zarejestrowany zestawem μ SCAN 500 [2][3].



Rys. 1. Przebieg sygnału efektu Barkausena oraz prądu magnesującego (krzywa sinusoidalna) zarejestrowanego z zestawu μ SCAN. Zaznaczone zostały impulsy typu pozytywnego (POS) i negatywnego (NEG)

Aplikacja współpracująca z zestawem μ SCAN wykorzystuje numeryczną metodę analizy sygnałów Barkhausena, która estymuje parametry opisujące stan warstwy wierzchniej o grubości odpowiadającej analizowanemu zakresowi częstotliwości sygnału. Najważniejsze z nich to PEAK oraz PEAK POSITION [2][3]. Na ich podstawie wnioskuje się o poziomie naprężeń własnych oraz o zmianach struktury warstwy wierzchniej badanego obiektu.

Proces analizy i obróbki zastosowany w urządzeniu μ SCAN jest następujący. Najpierw sygnał efektu Barkhausena uzyskany z głowicy pomiarowej składający się z kilku impulsów, typu POS, gdy prąd magnesujący narasta i typu NEG, gdy opada jest poddany działaniu cyfrowego filtra środkowo przepustowego w celu

wyodrębnienia zakresu częstotliwości, właściwego dla badanej głębokości warstwy wierzchniej obiektu. Grubość tej warstwy zależy bowiem od zdolności przenikania sygnału magnetycznego przez materiał, czyli od jego właściwości. Sygnał efektu Barkhausena jest bardziej tłumiony tj. badana warstwa jest cieńsza, dla szerokich pasm wysokich częstotliwości. W przypadku wąskich pasm niższych częstotliwości zachodzi sytuacja odwrotna. Zależność tłumienia od wartości i zakresu częstotliwości sygnału opisana jest wzorem [1] [2] [3].

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

gdzie:

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

μ_r – względna przenikalność magnetyczna,

σ_e – przewodność elektryczna właściwa,

x – odległość od powierzchni w głąb materiału,

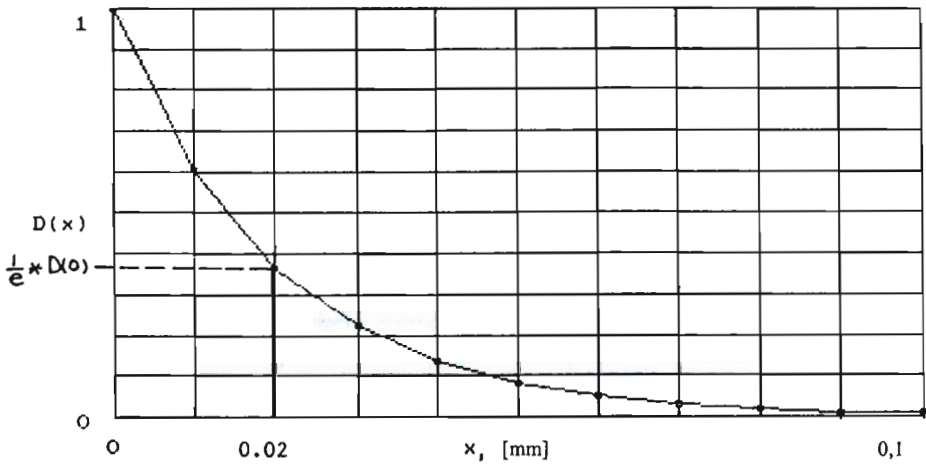
$f_1 \div f_2$ – wybrany do analizy zakres częstotliwości szumu magnetycznego,

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

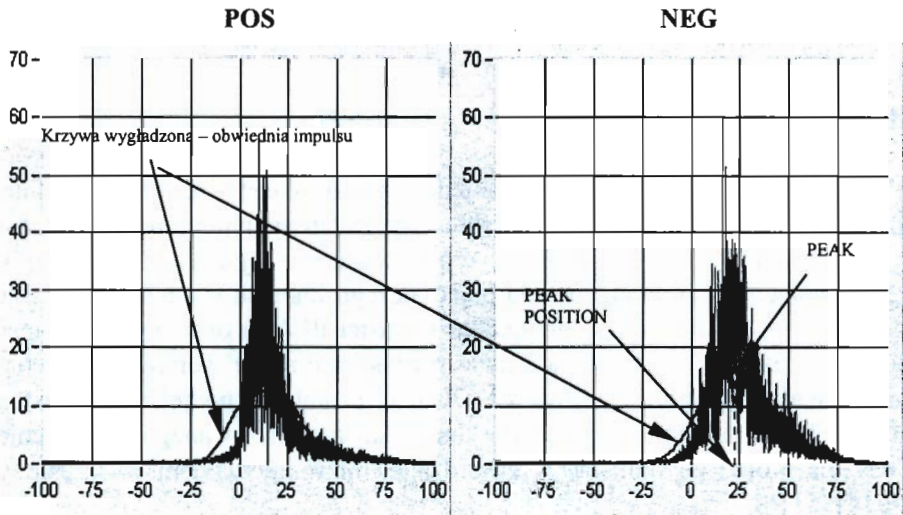
Grubość badanej warstwy wierzchniej, o której stanie możemy wnioskować z zarejestrowanego sygnału, można estymować rozwiązując równość $D(x) = D(0) \cdot e^{-1}$, gdzie niewiadoma x to poszukiwana głębokość, a $e = 2,7183$. Na rysunku 2 przedstawiony jest przebieg funkcji tłumienia dla względnej przenikalności magnetycznej 1 000 i przewodności elektrycznej właściwej $5 \cdot 10^6 \Omega/m$, z zaznaczeniem poszukiwanej wartości głębokości x w punkcie przecięcia się $D(x)$ i prostej $D(0)/e$.

W dalszej kolejności element prostujący w zestawie μ SCAN oblicza bezwzględną wartość sygnału, a następnie składające się na niego impulsy są uśrednianie do dwóch wypadkowych, dla narastającego POS i opadającego NEG prądu magnesującego. Przy użyciu cyfrowego dolnoprzepustowego filtra PEAK FILTER o paśmie przenoszenia w zakresie 10 kHz – 5 Mhz są wyznaczane obwiednie

obu impulsów, których wartości szczytowe określono jako parametr PEAK, a ich położenie to PEAK POSITION (rys. 3) [2][3].



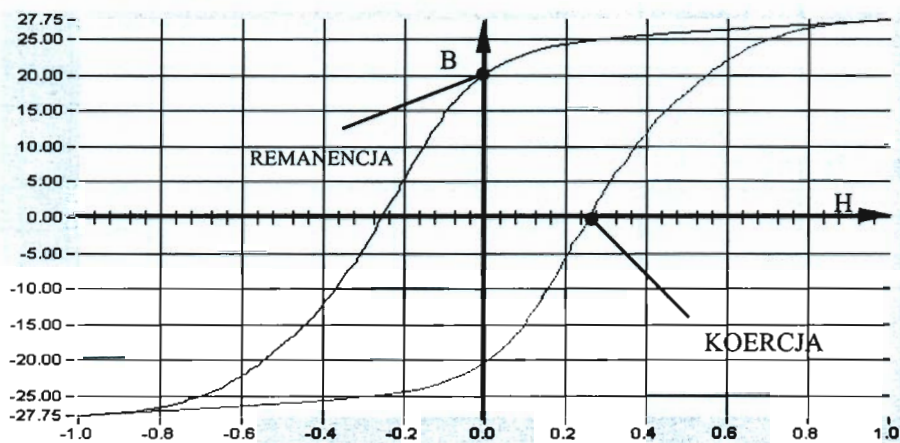
Rys. 2. Przebieg funkcji tłumienia dla $f=70\text{--}200$ kHz, $\mu_r = 1000$ i $\sigma_e = 5 \cdot 10^6$ Ω/m



Rys. 3. Uśrednione i wyprostowane impulsy typu POS i NEG

Otrzymane parametry PEAK i PEAK POSITION są powiązane z remanencją i koercją magnetyczną. Przybliżoną pętlę histerezy indukcji magnetycznej można

bowiem uzyskać całkując obwiednie impulsów typu POS i NEG. Na jej podstawie określa się wartość remanencji i koercji, czyli indukcji szczątkowej i twardości magnetycznej materiału ferromagnetycznego (rys 4.). Niestety, przy użyciu tej metody nie jest możliwa ocena stanu warstwy wierzchniej w funkcji głębokości, gdyż są to informacje uśrednione z całej głębokości badanej warstwy.



Rys. 4. Pętla histerezy indukcji magnetycznej wyznaczona przez program zestawu μ SCAN

3. Próba zastosowania transformaty falkowej

Nowym narzędziem służącym do analizy sygnałów jest transformata falkowa. Umożliwia ona obserwację cech charakterystycznych sygnału zarówno w czasie jak i skali, dla której można wyznaczyć odpowiadającą jej częstotliwość środkową. Przyjmując pewne parametry dla pojedynczego impulsu sygnału efektu Barkhausena (jak to ma miejsce w przypadku wartości PEAK) oraz wyznaczając ich wartość dla różnych skal, można będzie przedstawić stanu warstwy wierzchniej w funkcji skali, a potem częstotliwości. Dlatego też autorzy podjęli próbę zastosowania falek do analizy sygnału Barkhausena, zarejestrowanego urządzeniem μ SCAN dla próbki ze stali 2H13, utwardzanej mikrokulowaniem w określonym czasie [4] [5] [6].

Istotą transformaty falkowej jest funkcja falkowa, która pełni podobną rolę jak funkcje harmoniczne $\sin\alpha$ i $\cos\alpha$ w transformacie Fouriera, lecz jej własności są znacznie lepsze niż własności funkcji harmonicznych [5] [6]. Może być ona rozpatrywana również jako rodzaj „filtra” o określonej częstotliwości centralnej f_C .

Splot tej funkcji z badanym sygnałem wyodrębnia z niego składową o częstotliwości odpowiadającej f_C . Kształt i długość funkcji falkowej zmienia się wraz ze skalą, a zatem zmienia się także jej częstotliwość środkowa. Stosując różne wartości skali uzyskujemy w transformacie falkowej analizę wielorozdzielczą [4] [5]. Częstotliwość środkowa zależy również od okresu próbkowania sygnału i opisuje ją wzór:

$$f_a = \frac{f_C}{a \cdot \Delta} \quad (2)$$

gdzie:

f_C – częstotliwość środkowa funkcji falkowej dla skali 1,

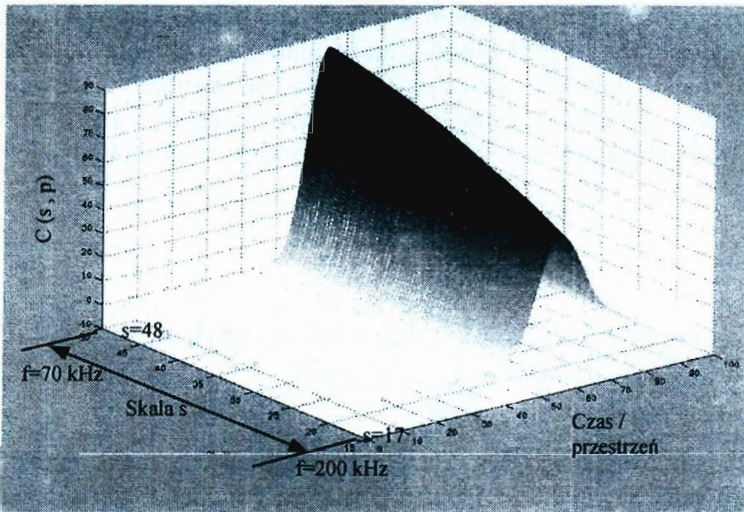
a – wartość skali (czynnik bezwymiarowy),

Δ – okres próbkowania sygnału.

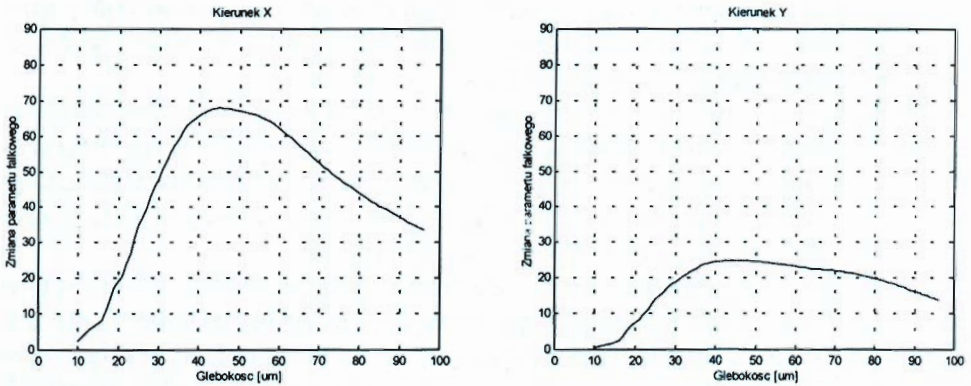
W przypadku badanego sygnału efektu Barkhausena maksymalna częstotliwość próbkowania wynosi 5 MHz, stąd górną granicą analizowanego zakresu częstotliwości jest 2,5 MHz. Przyjmując, że wystarczającą głębokością do oceny stanu warstwy wierzchniej jest 100 μm i korzystając z zależności (2) dla funkcji falkowej z rodziny symlets oraz funkcji tłumienia (1) dla stali 2H13 otrzymujemy dolną granicę częstotliwości wynoszącą 15 kHz. W analizie autorzy wykorzystają więc zakres częstotliwości 15 kHz – 2,5 MHz, któremu odpowiada zakres skali od 2 (2,5 MHz) do 222 (15 kHz) i przedział głębokości 10-100 μm .

Przekształceniu transformata falkową (funkcja falkowa z rodziny symlets) poddano wszystkie impulsy składające się na badany sygnał efektu Barkhausena. Dla każdego impulsu otrzymano współczynniki falkowe, z których wyznaczono obwiednię wypadkowego skalogramu. Przykład uzyskanej obwiedni skalogramu przedstawia rysunek 5 (dla częstotliwości 70-200 kHz) [6].

Dla wyznaczonej obwiedni można już wprowadzić parametry falkowe, które opiszają jej cechy charakterystyczne, a jednocześnie przedstawią informację zawartą w impulsach sygnału Barkhausena w funkcji skali. Za taki parametr przyjęto wartości szczytowe obwiedni dla wszystkich wartości skali, tj. 2-222. Wykorzystując zależność określającą funkcję tłumienia (1) i częstotliwość środkową (2) można przedstawić ten parametr jako funkcję głębokości (10-100 μm). Rysunek 6 przedstawia przebiegi zmiany (spadku) przyjętego parametru falkowego dla kierunku pomiaru X i Y, jakie nastąpiły po utwardzeniu badanej próbki, w funkcji głębokości.

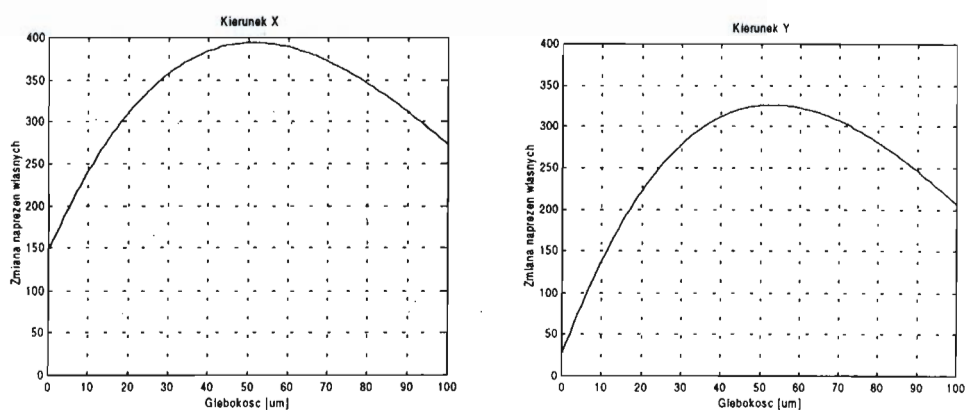


Rys. 5. Obwiednia skalogramu transformaty falkowej $C(s,p)$ gdzie s – skala, p – przestrzeń/czas



Rys. 6. Bezwzględne zmiany parametru falkowego w funkcji głębokości warstwy wierzchniej

Punktem odniesienia dla uzyskanych wyników są przebiegi bezwzględnej zmiany (spadku) naprężeń własnych w warstwie wierzchniej uzyskanych z pomiarów metodą rentgenowską urządzeniem MSF-3M/PSF-3M firmy Rigaku. Zostały one przedstawione na rysunek 7.



Rys. 7. Zmiany naprężeń własnych w warstwie wierzchniej na głębokości od 10 do 100 µm

Porównując opracowaną metodę falkową z metodą rentgenowską można zaobserwować, że w podobny sposób odwzorowują one zmiany jakie zaszły po utwardzeniu próbki w zakresie głębokości 10-100 µm. Nie wolno jednak zmiany parametru falkowego utożsamiać ze zmianami wartości naprężeń własnych. Reprezentują one bowiem różne wielkości, a także przyjęty parametr falkowy nie ma interpretacji fizycznej tak jak naprężenia, które mają wymiar fizyczny. Możliwe jest natomiast opracowanie modelu matematycznego, który pozwoli na podstawie metody falkowej wyznaczyć poziom naprężeń, co będzie kolejnym etapem badań nad zastosowaniem transformaty falkowej.

4. Korzyści wynikające z analizy falkowej sygnału efektu Barkhausena – podsumowanie

Z porównania wyników uzyskanych metodą transformaty falkowej i metodą zastosowaną w zestawie badawczym µSCAN widać wyraźną różnicę na korzyść tej pierwszej. Parametr PEAK stosowany w urządzeniu µSCAN ma bowiem charakter wartości średniej dla całej badanej grubości warstwy wierzchniej i może być związany z ogólnym poziomem naprężeń. Trudno jest więc ocenić dokładne zmiany jakie zaszły w funkcji głębokości warstwy wierzchniej podczas np. eksploatacji elementu maszyny. Parametr falkowy może być rozpatrywany jako funkcja skali, częstotliwości i głębokości. Ponadto analiza falkowa znacznie lepiej odwzorowuje składowe sygnału niż FFT, co wynika z zalet funkcji falkowej i jej przewagi nad funkcjami harmonicznymi $\sin\alpha$ i $\cos\alpha$.

Parametr falkowy w postaci obwiedni nie umożliwia jednak uzyskania konkretnych informacji o stanie warstwy wierzchniej bez powiązania go z fizycznymi wielkościami takimi jak np. naprężenia własne. Wypracowanie koncepcji i metody, która pozwoli na identyfikację zmiany naprężeń na podstawie parametru falkowego, czyli obwiedni falkowej, będzie przedmiotem dalszych prac autorów. Rozwiązanie tego problemu umożliwi użytkownikom zastosowanie metody do oceny jakości stanu warstwy wierzchniej w procesie produkcji oraz do diagnozowania jej stanu w procesie eksploatacji elementów maszyn i konstrukcji.

Literatura

1. **Błachnio J.:** *Ocena stanu warstwy wierzchniej łopatek wirnika sprężarki metodą szumu Barkhausena*, Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Zeszyt nr 3, ITWL, Warszawa, 1998, s. 193.
2. American Stress Technologies Inc., *μSCAN 500 System v1.22 user's manual*.
3. American Stress Technologies Inc., *μSCAN 500 Operating instructions v.1.5.3*
4. Wavelet Toolbox: *User's Guide*, The Math Works inc, 1996.
5. **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), Białystok, 2001, s. 199-212.
6. **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.

THE ATTEMPT TO ESTIMATE FEATURES OF A MACHINE PART TOP LAYER USING WAVELET TRANSFORM OF THE BARKHAUSEN SIGNAL

Summary: The method based on the Barkhausen effect allows evaluating a state of ferromagnetic materials top layer. Obtained data depends on the ways of a signal analysis and parameters, which are established. The present method of the Barkhausen effect signal analysis used in μSCAN scientific set can't give enough amount of data about the top layer of tested machine part, and in particular a change of its own stress as a function of depth. So the authors introduce a new analysis method based on a wavelet transform. The obtained results allow estimating the state of top layer as a function of depth.

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/5/98.

Henryk Borowczyk¹, Radosław Kwieciński²

PROJEKT EKSPERTOWEGO SYSTEMU DIAGNOZOWANIA UKŁADU STEROWANIA DOPALACZEM TURBINOWEGO SILNIKA ODRZUTOWEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono projekt ekspertowego systemu diagnostycznego, opracowany w ramach magisterskiej pracy dyplomowej w Politechnice Białostockiej. Diagnostowanym obiektem jest układ sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego typu 89. Źródłem danych są badania eksperymentalne przeprowadzone w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Podstawę zaprojektowanego systemu ekspertowego stanowi system szkieletowy PC SHELL firmy AITECH.

1. Wprowadzenie

Obserwuje się szybki rozwój metod diagnozowania, stosowanych w badaniach diagnostycznych. Do dużej doskonałości doprowadzono pomiar sygnałów diagnostycznych a także wskaźników służących do ich porównania. Istnieją metody wyznaczania parametrów diagnostycznych na podstawie sygnałów diagnostycznych [3, 4]. Podstawowym problemem do rozwiązania pozostaje komputerowe wspomaganie wnioskowania diagnostycznego, które dotychczas realizowane jest przez diagnostę lub zespół diagnostów. Takie wnioskowanie jest nieefektywne ze względu na wady wnoszone przez czynnik ludzki (subiektywizm, przekonanie, relatywizm, ...). Istnieje zatem potrzeba komputerowego wspomaganie wnioskowania diagnostycznego. Komputerowe wspomaganie stwarza warunki niezbędne do zachowania identyczności procesu przetwarzania informacji diagnostycznej. Jedną z możliwości jest zastosowanie systemu ekspertowego, czemu poświęcona jest niniejsza praca.

¹ Politechnika Białostocka, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych,
borowczyk@cobracomp.home.pl

² Absolwent Politechniki Białostockiej – 2002 r., ratlek@poczta.onet.pl

2. Diagnostyczny obiekt

Obiektem diagnostyki jest układ sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego typu 89, składający się z trzech współpracujących podukładów:

- zapłonowego,
- paliwowego,
- sterowania dyszą wylotową silnika.

Zadaniem układu zapłonowego jest wytworzenie energii cieplnej, niezbędnej do zainicjowania procesu spalania dodatkowego paliwa doprowadzanego do komory dopalacza (za turbiną silnika).

Układ paliwowy odpowiada za dozowanie paliwa dopalacza odpowiednio do ustawienia przez pilota dźwigni sterowania silnikiem (DSS) w zakresie MinimalneDopalenie – MaksymalneDopalenie.

Układ sterowania dyszą zmienia średnicę dyszy wylotowej silnika zgodnie z ustalonym algorytmem, na podstawie bieżących wartości parametrów procesów termogazodynamicznych.

W procesie eksploatacji występują uszkodzenia sprawiające, że dopalacza nie można uruchomić lub że działa on nieprawidłowo. W Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych przeprowadzono badania eksperymentalne nad układami zdatnymi i z wprowadzonymi symulowanymi uszkodzeniami. Określono zbiór sygnałów diagnostycznych:

ciągłych:

- n – prędkość obrotowa wirnika silnika,
- p_d – ciśnienie paliwa dopalacza,
- p_w – ciśnienie paliwa zasadniczej komory spalania,
- T_4 – temperatura spalin za turbiną,
- DR – średnica dyszy regulowanej,
- p_2 – ciśnienie powietrza za sprężarką,
- Γ – współczynnik wypełnienia regulatora temperatury,
- $wibr$ – drgania silnika,
- DSS – położenie dźwigni sterowania silnikiem,

i *dwustanowych* (przyjmujących jedynie dwie wartości – 0 lub 1):

- $MWFK$ – sygnał włączenia/wyłączenia dopalacza,
- $KZFK$ – sygnał włączenia/wyłączenia zaworu rozruchowego dopalacza,
- $AZFK35$, $AZFK37$ - sygnały włączenia/wyłączenia cewek zapłonowych,
- $PBFK$ - sygnał włączenia/wyłączenia bloku rozruchowego dopalacza.

Uzyskane wyniki, przedstawione w opracowaniu [1], mogą być wykorzystane w procesie projektowania ekspertowego systemu wspomagającego wnioskowanie diagnostyczne.

3. Ogólna struktura systemu ekspertowego

Główną część systemu ekspertowego stanowi baza wiedzy, zawierająca informację z określonej dziedziny. Wiedza zapisywana jest za pomocą określonego języka (języka reprezentacji wiedzy), na który składa się opis faktów (wiedza o charakterze faktograficznym), reguł stosowanych w procesie wnioskowania oraz – w przypadku niektórych systemów – metareguł opisujących strategię rozwiązania danego problemu. Wiedza znajdująca się w bazie wiedzy pochodzi od ekspertów, specjalistów z danej dziedziny.

W odróżnieniu od systemów konwencjonalnych, systemy ekspertowe nie zawierają jawnego opisu sposobu rozwiązania problemu. To system ekspertowy, a ściślej jego część zwana modułem wnioskującym, rozwiązuje problem, wykorzystując wiedzę deklaratywną w bazie wiedzy. Moduł wnioskowania realizowany jest według zasad logiki formalnej. W praktyce wykorzystywane są na ogół dwie metody wnioskowania: wstecz oraz do przodu. Czasami stosowane jest tzw. wnioskowanie mieszane, będące połączeniem, w różnych proporcjach, obu wymienionych metod.

Wnioskowanie wstecz rozpoczyna się od postawienia hipotezy, która ma być potwierdzona w trakcie wnioskowania. W tym przypadku proces wnioskowania przebiega od hipotezy, poprzez reguły, do faktów potwierdzających warunki reguł. Zadaniem systemu jest jej potwierdzenie, zaprzeczenie lub wskazanie niemożliwości rozwiązania danego problemu.

W przypadku wnioskowania do przodu, proces wnioskowania przebiega w kierunku odwrotnym – rozpoczyna się od zbioru faktów podanych na wejściu. W rezultacie zostają wygenerowane wszystkie logiczne konsekwencje tych faktów, stanowiące ostateczne konkluzje systemu.

Unikatową cechą systemów ekspertowych jest ich zdolność do generowania wyjaśnień w trakcie konsultacji z użytkownikiem, w szczególności dotyczących sposobu rozwiązania problemu. Wyjaśnienia tworzone są przez moduł wyjaśniający.

Dogodnym narzędziem do tworzenia systemów ekspertowych jest system szkieletowy zawierający:

- mechanizm dla formalnej reprezentacji wiedzy,
- narzędzia do strukturyzacji bazy wiedzy,

- interfejs odpowiedni do utworzenia systemu ekspertowego, umożliwiającą konstruowanie i rozbudowę bazy wiedzy również przez końcowego użytkownika,
- udogodnienia do tworzenia komponentów systemu objaśniającego,
- narzędzia do sprawdzania poprawności bazy wiedzy,
- narzędzia do pozyskiwania wiedzy.

Posługiwanie się systemem szkieletowym nie wymaga na ogół znajomości języka, w jakim system szkieletowy jest napisany (np. Prolog).

Jednym z systemów szkieletowych jest PC-Shell [5] polskiej firmy AITech. Jest to dziedzicowo niezależny, szkieletowy system ekspertowy o właściwościach hybrydowych. Dzięki zastosowaniu architektury tablicowej, można bazę wiedzy podzielić na dowolną ilość heterogenicznych źródeł wiedzy.

Baza wiedzy systemu zapisywana jest przy użyciu wyspecjalizowanego języka Sphinx. [5] Integruje on w sobie deklaratywny język reprezentacji wiedzy oraz strukturalny język programowania. Podzielona jest na bloki: opisu źródeł, faset, reguł, faktów oraz sterowania. Baza zapisywana jest w postaci pliku (lub plików) tekstowego poddawanego procesowi translacji na początku każdej sesji konsultacyjnej.

W systemie PC-Shell szczególną wagę przywiązuje się do mechanizmu wyjaśnień. Dostarcza on czterech rodzajów wyjaśnień : konkluzji („jak ?”), zapytań („dlaczego ?”), pojęć („co to jest ?”) oraz metafor. Inżynier wiedzy, budując aplikację (bazę wiedzy), może dodać elementy multimedialne jako dodatkowe wyjaśnienia obrazujące rozwiązany problem

4. Założenia projektowe ekspertowego systemu diagnozowania układu sterowania dopalaczem

System ekspertowy [2] przeznaczony jest do diagnozowania układu sterowania dopalaczem silnika turbinowego typu 89. Bazę danych w tym systemie stanowią sygnały diagnostyczne zarejestrowane na stanowisku diagnostycznym [1], a następnie odpowiednio uformowane.

System ekspertowy uwzględnia ustalony, skończony zbiór uszkodzeń. Jego zadaniem jest:

- określanie, na podstawie objawów, czy w układzie występuje uszkodzenie,
- określanie, na podstawie objawów, czy występuje uszkodzenie jednego z układów: paliwowego dopalacza, sterowania dyszą regulowaną, zapłonowego dopalacza,

- informowanie użytkownika o:
 - braku uszkodzenia (układ zdalny),
 - rodzaju uszkodzenia występującego w układzie,
 - braku podstaw do identyfikacji stanu - dany stan nie należy do wcześniej zdefiniowanego zbioru.

Baza wiedzy systemu ekspertowego jest więc ograniczona. Jednak jest ona tak zaprojektowana, by mogła być rozbudowana zarówno na etapie projektowania i konstruowania systemu jak i w trakcie praktycznej eksploatacji. Tworzenie i dodawanie faktu do bazy wiedzy następuje w sposób dynamiczny podczas wykonywania programu z bloku sterowania.

Dzięki zastosowaniu architektury tablicowej, bazę wiedzy można podzielić na pewną liczbę heterogenicznych źródeł wiedzy. Źródła wiedzy stanowią specjalistyczne bazy wiedzy, ujęte w osobne pliki, przeznaczone do rozwiązywania podproblemów wyodrębnionych w problemie głównym. Zapewnia to łatwą rozbudowę zaprojektowanego systemu ekspertowego, utrzymując przy tym niezależność poszczególnych źródeł wiedzy.

System ekspertowy może współpracować z innymi aplikacjami (Microsoft Excel, Microsoft Word), wykorzystując mechanizm dynamicznej wymiany danych DDE. Microsoft Excel pracuje jako serwer DDE i jest źródłem danych, natomiast Microsoft Word stanowi klienta DDE przyjmującego przetworzone dane.

5. Baza danych ekspertowego systemu diagnozowania

W celu wykorzystania w bazie danych systemu ekspertowego zarejestrowanych sygnałów diagnostycznych [1] należy poddać je formowaniu – usuwaniu z poszczególnych sygnałów tych ich cech (przede wszystkim mian wielkości fizycznych), które nie niosą treści informacyjnej, ale utrudniają analizę. Operacja ta może być wykonana przez sprowadzenie sygnałów fizycznych do postaci abstrakcyjnej (bezwymiarowej) [3]. Sygnały bezwymiarowe z fizycznymi związane są następującą zależnością :

$$\bar{x} = \frac{x}{x_{odn}}$$

gdzie: x – sygnał fizyczny, x_{odn} – sygnał odniesienia.

W procesie formowania sygnałów diagnostycznych najważniejszym zagadnieniem jest ustalenie sygnałów odniesienia, posiadających stałą wartość w określonym przedziale czasu (np. eksploatacji). Przyjmuje się, że najwartościowszym

sygnałem odniesienia jest sygnał obliczeniowy [3]. Odpowiednie powiązanie sygnału fizycznego z obliczeniowym daje w rezultacie uformowane, bezwymiarowe sygnały (rys. 1), stosunkowo łatwo poddające się analizie matematycznej, a także komputerowemu przetwarzaniu.

Bezpośrednie wykorzystanie sygnałów uformowanych (przebiegów czasowych) jest jednak niedogodne ze względu na dużą objętość danych. Celowe jest zatem przetworzenie pierwotnego zbioru sygnałów w taki sposób, aby ograniczyć ilość danych, zachowując jednocześnie informację niezbędną do przeprowadzenia efektywnego wnioskowania diagnostycznego. Możliwe są dwa podejścia (stosowane łącznie lub rozdzielnie) [3, 4]:

- przyjęcie ustalonego zbioru chwil charakterystycznych dla czasowego przebiegu sygnału i określenie wartości sygnału w tych chwilach,
- przyjęcie ustalonego zbioru charakterystycznych wartości sygnału i określenie czasów ich osiągnięcia.

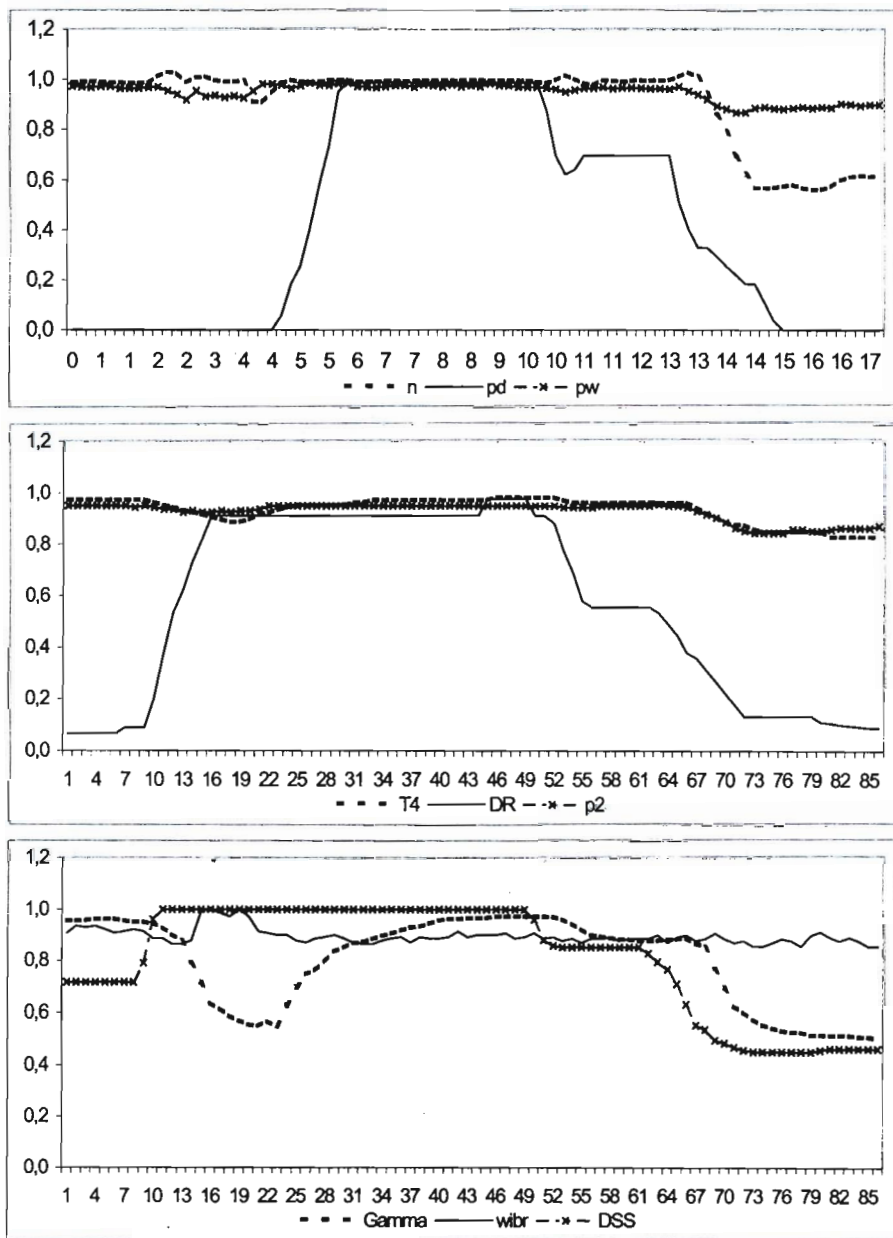
W pierwszym przypadku można mówić o rozrzedzonym próbkowaniu, natomiast w drugim – o rozrzedzonym kwantowaniu sygnałów. W rezultacie rozrzedzonego próbkowania i/lub kwantowania, dla każdego sygnału otrzymuje się zbiór par $[t_i, S_{ji}]$, gdzie t_i – i -ta chwila, S_{ji} – wartość j -tego sygnału w chwili t_i .

W celu przetworzenia przebiegów sygnałów diagnostycznych zarejestrowanych w procesie sprawdzania układu sterowania dopalaczem [1] wprowadzono następujące charakterystyczne wartości sygnałów [2]:

$$\{0,1; 0,5; 0,7; 0,9; 1,0\}$$

oraz czasy charakterystyczne:

- t_0 – początek obserwacji (warunki początkowe rozpatrywanego procesu);
- t_1 – włączenie dopalania (zadziałanie sygnałów automatyki – MWFK, KZFK, AZFK35, AZFK37, PBFK),
- t_2 – wyłączenie sygnałów automatyki (KZFK, AZFK35, AZFK37, PBFK),
- t_3 – ustabilizowany proces dopalania,
- t_4 – wyłączenie dopalania (wyłączenie sygnału automatyki – MWFK).



Rys. 1. Uformowane wzorcowe przebiegi sygnałów diagnostycznych

Wyniki rozrzedzonego próbkowania przedstawiono w tabeli 1, natomiast rozrzedzonego kwantowania – w tabeli 2.

Tabela 1.

	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
t [s]	0,0	2,4	4,6	8,4	13,6
n	0,990	0,989	0,999	0,999	0,860
pd	0,000	0,000	0,183	0,989	0,293
pw	0,973	0,918	0,964	0,975	0,895
T4	0,974	0,936	0,945	0,974	0,907
DR	0,067	0,622	0,911	0,911	0,267
p2	0,951	0,924	0,951	0,951	0,905
Gamma	0,956	0,879	0,626	0,967	0,769
wibr	0,907	0,864	0,900	0,893	0,907
DSS	0,718	1,000	1,000	1,000	0,497
MWFK	0	1	1	1	0
KZFK	0	1	0	0	0
AZFK35	0	1	0	0	0
AZFK37	0	1	0	0	0
PBFK	0	1	0	0	0
		deltat1	deltat2	deltat3	deltat4
deltat		2,4	2,2	3,8	5,2

Tabela 2.

Wartość sygnału	0,1	0,5	0,7	0,9	1,0
	Czas osiągnięcia				
n	-100	-100	-100	-100	1,8
pd	4,6	5,2	5,4	5,6	100
pw	-100	-100	-100	13,6	100
t4	-100	-100	-100	3,2	100
DR	1,8	2,2	2,6	3	100
Gamma	-100	-100	3,0	2,4	100
wibr	-100	-100	-100	1,8	100

W operacji rozrzedzonego kwantowania mogą zaistnieć następujące przypadki:

- określoną wartość sygnał osiągnął przed rozpoczęciem obserwacji,
- sygnał nie osiąga określonej wartości.

Dla zapewnienia jednoznaczności w bazie danych systemu ekspertowego, w pierwszym przypadku można przyjąć jako czas osiągnięcia przez sygnał określonej wartości umowną liczbę ze znakiem ujemnym (np. -100), natomiast w drugim przypadku – umowną liczbę dodatnią, znacznie większą od czasu trwania procesu (np. +100). Liczby (-100) i (+100) mogą być interpretowane, podobnie jak interpretowane są w automatyce, odpowiednio, $t \rightarrow -\infty$. lub $t \rightarrow +\infty$.

Tak jednoznacznie określona informacja może być skutecznie zastosowana w procesie wnioskowania diagnostycznego, realizowanego przez system ekspertowy. W razie potrzeby można zwiększyć, zarówno liczebność zbioru chwil charakterystycznych, jak i liczbę poziomów kwantowania sygnałów.

6. Baza wiedzy ekspertowego systemu diagnozowania

Analiza wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych [1] umożliwiła określenie zakresów dopuszczalnych ("norma") i niedopuszczalnych ("poniżej", "powyżej") dla wartości każdego sygnału w chwilach charakterystycznych. Zatem atrybuty zapisywane jako syg_ti (gdzie syg – oznaczenie sygnału, ti – i -ta chwila) mogą przyjmować jedną z uogólnionych wartości {"poniżej", "norma", "powyżej"}. Konkretna realizacja wartości atrybutu stanowi fakt, który jest umieszczany w bazie faktów.

Reguły tworzone są na podstawie analizy przebiegu sygnałów w układach z symulowanymi uszkodzeniami w porównaniu z przebiegami wzorcowymi (układy zdadne). Poniżej przedstawiono przykładową regułę opisującą warunki przypisania przez system ekspertowy zmiennej *uszkodzenie* wartości "uszkodzenie układu sterowania dyszą regulowaną" [2]:

```
4004: uszkodzenie = "uszkodzenie układu sterowania dyszą regulowaną" if
    (dr_t3 = "powyżej" & dr_t4 = "powyżej"),
    (gamma_t2 = "powyżej" & gamma_t3 = "powyżej"
    & gamma_t4 = "powyżej");
```

Odpowiednio rozbudowany zbiór reguł umożliwia hierarchiczną analizę diagnozowanego obiektu i określanie uszkodzeń na różnych poziomach szczegółowości odwzorowania. Szczególnie użyteczna jest przy tym właściwość systemu PC-Shell, pozwalająca na definiowanie wielu źródeł wiedzy. W pracy [2] zastosowano cztery źródła wiedzy, zadeklarowane w bloku *sources*:

sources

```
uszkodzenie :  
  type kb  
  file "uszkodzenie.zw";  
uszkodzenie_ukladu_zaplonowego_dopalacza2 :  
  type kb  
  file "uszkodzenie_ukladu_zaplonowego_dopalacza2.zw";  
uszkodzenie_ukladu_sterowania_dysza_regulowana :  
  type kb  
  file "uszkodzenie_ukladu_sterowania_dysza_regulowana.zw";  
uszkodzenia_ukladu_paliwowego_dopalacza :  
  type kb  
  file "uszkodzenia_ukladu_paliwowego_dopalacza.zw";  
end;
```

Każde ze źródeł opisuje odpowiednie podukłady badanego obiektu i może być rozwijane niezależnie od pozostałych, w miarę pozyskiwania wiedzy od ekspertów, z uwzględnieniem rezultatów stosowania systemu ekspertowego w procesie eksploatacji diagnozowanego obiektu.

7. Identyfikacja uszkodzeń przez system ekspertowy

W pierwszym etapie zaprojektowany system ekspertowy [2] sprawdza wybrane sygnały diagnostyczne opisane za pomocą czasów charakterystycznych. Jeżeli wartości tych sygnałów w czasach charakterystycznych są zgodne z wzorcowymi, system ekspertowy generuje konkluzję: „**brak uszkodzeń**”. W przeciwnym przypadku sprawdzane są przebiegi sygnałów diagnostycznych, za pomocą których można zidentyfikować uszkodzenie jednego z układów: paliwowego, układu sterowania dyszą regulowaną bądź układu zapłonowego. Następnym etapem jest porównanie przebiegów sygnałów diagnostycznych z przebiegami sygnałów dla typowych uszkodzeń wcześniej określonego układu. Jeżeli możliwe jest zidentyfikowanie uszkodzenia, system ekspertowy prezentuje wygenerowane fakty, charakterystyczne przebiegi sygnałów diagnostycznych oraz opisuje przyczyny powstania tego uszkodzenia. Jeżeli uszkodzenie wystąpiło poza sprawdzanymi układami, bądź gdy dany stan nie należy do wcześniej zdefiniowanego zbioru, to system nie jest w stanie dokonać identyfikacji uszkodzenia i informuje o tym użyt-

kownika. Taka sytuacja stanowi asumpt do podjęcia modyfikacji zaprojektowanego systemu.

8. Podsumowanie

Zaprojektowany system działa bardzo szybko i wymaga od użytkownika niewielkiej wiedzy, co jest istotną zaletą systemów ekspertowych. Uzyskano ten efekt poprzez wykorzystanie modułu dynamicznej wymiany danych, dynamicznego generowania faktów oraz tablicowej budowy systemu.

W celu umieszczenia otrzymanych sygnałów diagnostycznych w bazie danych zaprojektowanego systemu ekspertowego poddano je formowaniu, a następnie rozrzedzonemu próbkowaniu i kwantowaniu. Kolejnym etapem rozwoju systemu, umożliwiającym pełniejsze wykorzystanie zalet płynących z uformowanych sygnałów może być np. zastosowanie funkcji korelacji.

Zaprojektowany ekspertowy system diagnostyczny zapewnia powtarzalność procesu przetwarzania informacji, co ma decydujący wpływ na skuteczność diagnozowania. Dalszy rozwój systemu uwarunkowany jest istnieniem sprzężenia między jego użytkownikiem a projektantem (inżynierem wiedzy). Dotyczy to w szczególności rozszerzania bazy wiedzy w celu minimalizowania liczby sytuacji, w których system nie może zidentyfikować stanu diagnozowanego obiektu.

Literatura

1. **Borowczyk H., Kącki Cz., Koblański A.:** *Technologia identyfikacji uszkodzeń turbinowych silników odrzutowych typu 89 przy pomocy stanowiska diagnostycznego KAPSO-17MK*. ITWL, Warszawa, 1991.
2. **Kwieciński R.:** *System ekspertowy do diagnozowania układu regulacji silnika turbinowego*, Politechnika Białostocka, Białystok, 2002, praca magisterska (pod kier. H. Borowczyka).
3. **Lindstedt P.:** *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*, Wyd. Naukowe ASKON, Warszawa, 2002.
4. **Lindstedt P, Majewski P., Szymczak R.:** *Opracowanie bazy danych turbinowego silnika odrzutowego dostosowanej do wymagań systemu ekspertowego*, Spr. nr 56/34/2001, ITWL, Warszawa, 2001.
5. **Michalik K.:** *PC SHELL 2.3 Szkieletowy system ekspertowy*, AITech (Artificial Intelligence Laboratory), Katowice, 1999.

6. **Manerowski J, Lewitowicz J., Żmudziński Z.** (red).: *Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej*. Tom 4. Wyd. ITWL, Warszawa, 1999.
7. **Mulawka J. J.**: *Systemy ekspertowe*. WNT, Warszawa, 1997.
8. **Pawlak M.**: *Systemy ekspertowe w eksploatacji maszyn*. Wyd. Uczelniane PL, Lublin, 1996.
9. **Powierża L.**: *Systemy ekspertowe w inżynierii eksploatacji*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 3(107). PWN, Warszawa, 1996.
10. **Świątnicki Z., Wantoch-Rekowski R.**: *Systemy ekspertowe*. WAT, Warszawa, 1995.

PROJECT OF EXPERT DIAGNOSTIC SYSTEM OF AFTERBURNER CONTROL SYSTEM OF TURBINE JET ENGINE

Summary: In this paper a project of an expert diagnostic system is presented. The system was developed with a master of science thesis carried out in the Białystok Technical University. The object being diagnosed is an afterburner control system of a turbine jet engine type 89. The necessary data were collected in experimental research carried out in the Air Force Institute of technology. The basis for this expert system is a PC SHELL system of AITECH company.

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/5/98.

Henryk Borowczyk¹, Rafał Szczepanik²

PROJEKT EKSPERTOWEGO SYSTEMU DIAGNOZOWANIA UKŁADU ŁOŻYSKOWANIA TURBINOWEGO SILNIKA ODRZUTOWEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono projekt ekspertowego systemu diagnostycznego, opracowany w ramach magisterskiej pracy dyplomowej w Politechnice Białostockiej. Diagnostycznym obiektem jest układ łożyskowania turbinowego silnika odrzutowego typu 89. Źródłem danych są badania diagnostyczne przeprowadzone w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Podstawę zaprojektowanego systemu ekspertowego stanowi system szkieletowy PC SHELL firmy AITECH.

1. Wprowadzenie

Możliwość dokonania oceny stanu technicznego maszyny podczas pracy, w trakcie wykonywania zadania lub misji bardzo szybko zostało zauważono w technice. Stało się to możliwe przede wszystkim dzięki gwałtownemu rozwojowi elektroniki, który stworzył ogromne możliwości pomiaru i analizy sygnałów diagnostycznych oraz selekcji dowolnego parametru sygnału, a zatem umożliwił rozwój wszystkich metod diagnostycznych.

Proces diagnozowania układu łożyskowania to sekwencja czynności zapewniająca prawidłowe wnioskowanie o stanie technicznym rozpatrywanego obiektu. Aby dokonać miarodajnej diagnozy układu łożyskowania, należy stworzyć model diagnostyczny oparty przede wszystkim na modelu matematycznym. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest wyznaczenie relacji pomiarowych, objawowych i eksploatacyjnych w postaci zależności, które są podstawą procesu diagnozowania. Ważnym etapem opracowania tych zagadnień jest zbadanie i klasyfikowanie niezdatności oraz ustalenie wartości progowych parametrów diagnostycznych określających stan zdatności i niezdatności obiektu [10]. I właśnie w tym momen-

¹ Politechnika Białostocka Wydział Mechaniczny, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych w Warszawie

² Absolwent Politechniki Białostockiej – 2002.

cie pojawia się miejsce dla zastosowania systemu ekspertowego, który gromadzi, przechowuje i analizuje dane statystyczne, aby na ich podstawie określić optymalny program eksploatacji.

2. Diagnozowany obiekt

Obiektem diagnozowania jest układ łożyskowania turbinowego silnika odrzutowego typu 89. Układ łożyskowania w silniku turboodrzutowym jest odpowiedzialny za prawidłową pracę całego zespołu wirnikowego. Zespoły wirnikowe silników odrzutowych obciążone są znacznymi siłami wzdłużnymi, poprzecznymi oraz momentami gnącymi i skręcającymi, dlatego układ łożyskowania silnika wysokoobrotowego powinien charakteryzować się odpowiednimi właściwościami przenoszenia obciążeń bez zakłócania pracy silnika.

W silniku turboodrzutowym typu 89 do łożyskowania zespołu wirnikowego stosowane są łożyska toczne. Łożyska toczne stosuje się z dwóch powodów: dużej prędkości obrotowej łożyskowanych elementów oraz konieczności zmniejszenia tarcia, a zatem także zmniejszenia nagrzewania elementów [5].

Układ łożyskowania jest smarowany olejem w układzie zamkniętym, a do uszczelnienia zastosowano uszczelnienia grafitowe oraz uszczelnienia grzebieniowe.

Niezawodne działanie układu łożyskowania ma decydujące znaczenie dla bezpieczeństwa lotu i wykonania zadania. Bardzo duży wpływ na niezawodność układu łożyskowania ma stan cieczy roboczej, charakteryzowany m.in. klasą czystości. Z badań wynika, że z powodu złego stanu czystości cieczy roboczej występuje około 30% niesprawności i uszkodzeń silnika z grupy wszystkich uszkodzeń układu łożyskowania.

W trakcie procesu eksploatacji mogą wystąpić zjawiska powodujące nieprawidłowe funkcjonowanie układu łożyskowania. W Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych przeprowadzono badania eksperymentalne nad układami zdatnymi i z wprowadzonymi symulowanymi uszkodzeniami. Określono zbiór podstawowych sygnałów diagnostycznych [1, 7]:

- sygnały funkcjonalne – luzy, czas wybiegu,
- sygnały tribologiczne – skład chemiczny, wielkość cząstek, postać fizyko-mechaniczna,
- sygnały wibroakustyczne – wartość szczytowa prędkości i przyspieszenia drgań kadłuba.

Sygnalami funkcjonalnymi układu łożyskowania są luzy i czas wybiegu. Nadmierny luz powoduje obtaczanie i rozwój innych form zużycia – np. ściernego. Czas wybiegu określany jest jako czas, po jakim zatrzymają się elementy wirujące od chwili wyłączenia silnika. Czas wybiegu wiąże się z oporami ruchu łożysk – wraz z rozwojem uszkodzeń na bieżniach łożysk oraz na elementach tocnych opory te wzrastają.

Podczas gdy luzy są wielkością trudno mierzalną w warunkach eksploatacyjnych, czas wybiegu jest parametrem łatwo mierzalnym. Przydatność diagnostyczną tych sygnałów ogranicza jednak fakt, że powstają one w zaawansowanej fazie zużycia łożysk. Tym niemniej znajdują swoje miejsce w kompleksowej metodzie diagnozowania.

W diagnostyce tribologicznej podstawą rozważań są parametry koncentracji produktów zużycia elementów, zbierane w instalacji olejowej. Produkty zużycia gromadzą się w oleju smarującym i są nośnikiem informacji diagnostycznej uśrednionej dla całego układu.

Na podstawie analizy produktów zużycia (skumulowanego zużywania), przez pomiar składu chemicznego, wielkości cząstek oraz postaci fizykomechanicznej (kształt, barwa w różnych temperaturach, wymiary, postać itp.) można wnioskować o lokalizacji (miejscu pochodzenia produktów) par trących będących źródłem produktów zużywania. Ponadto pełna obserwacja produktów różnymi metodami badawczymi umożliwia ocenę zachodzących procesów niszczących (stopień zużycia, stan techniczny). Analiza wyników badań pozwala na znalezienie korelacji i związków przyczynowo-skutkowych pomiędzy warunkami eksploatacji a poziomem zużycia. Ponadto na podstawie analizy oleju smarującego można określić stopień utraty jego właściwości smarnych (poprzez zmianę koncentracji dodatków uszlachetniających) oraz stan jego zanieczyszczenia.

Badanie składu chemicznego można wykonać wieloma metodami. Każda z nich ma swoje wyspecjalizowane zakresy działania i zastosowania – jedne posiadają szeroki zakres pomiarowy w analizie ilościowej inne w analizie jakościowej.

Sygnaty wibroakustyczne mierzone są podczas funkcjonowania obiektu i przetwarzane na zbiór symptomów, które mogą być podstawą do wykrycia rozpoczynającego się procesu podwyższonego zużywania łożysk. Opierając się tylko na podziale widmowym drgań łożyska można zdefiniować cztery prawie niezależne czynniki:

I – defekty koszyka (luzy, bicie),

II – błędy kształtu bieżni ruchomej (bicie),

III – defekty punktowe bieżni ruchomej i częściowo nieruchomej łącznie z falistością,

IV – chropowatość.

Diagnostować te uszkodzenia można przez obserwację widma drgań w pasmach związanych z poszczególnymi rodzajami defektów. Jeśli niezbędne jest zlokalizowanie miejsca, w którym odbywa się podwyższone zużycie, należy przeprowadzić analizę widmową sygnału drganiowego i określić poszczególne składowe. Każde bowiem uszkodzenie generuje sygnał o charakterystycznej częstotliwości.

Spośród wymienionych rodzajów sygnałów diagnostycznych największą czułość na zmiany stanu wynikające ze zużycia łożysk mają metody wibroakustyczna i tribologiczna. Wadą metody tribologicznej jest konieczność opracowania granicznych wartości zawartości produktów zużycia dla określonych stanów maszyny. Wymaga to kompleksowego badania z wykorzystaniem innych metod. Poza tym metoda ta może być stosowana tylko wtedy, gdy węzły łożyskowe smarowane są olejem. Jednak prawidłowo określone progi diagnostyczne pozwalają na wykrywanie uszkodzeń w bardzo wczesnym stadium rozwoju.

Zaletą metody wibroakustycznej jest m.in. to, że są opracowane progi diagnostyczne dla różnego rodzaju maszyn (np. norma PN/N-01358) mające charakter bardziej uniwersalny. Nowoczesne przyrządy pomiarowe umożliwiają ciągłe monitorowanie stanu drganiowego maszyny, wraz z prowadzeniem analizy widmowej. Umożliwia to szybsze podjęcie trafnej decyzji eksploatacyjnej.

Metoda funkcjonalna polegająca na badaniu czasu wybiegu oraz luzów może być metodą uzupełniającą badanie zużycia układu łożyskowania w ramach kompleksowego diagnostowania.

3. Ogólna struktura systemu ekspertowego

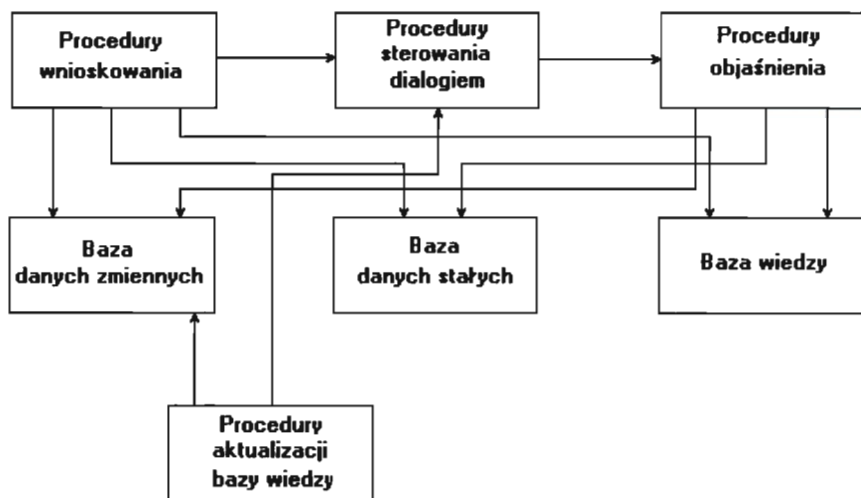
Systemy ekspertowe jako programy są zorganizowane w ten sposób, że wiedza dotycząca danej dziedziny, zwana bazą wiedzy (knowledge base), jest odseparowana od reszty systemu, zawierającej m.in. sterowanie wiedzą. Część systemu zawierająca mechanizmy wnioskowania nazywana jest maszyną wnioskującą (inference engine).

Rozważając bardziej szczegółowo strukturę systemów ekspertowych można w niej wyróżnić następujące podstawowe elementy:

- baza wiedzy (np. zbiór reguł),
- baza danych (np. dane o obiekcie, wyniki pomiarów, hipotezy),
- procedury wnioskowania – maszyna wnioskująca,
- procedury objaśniania – objaśniają strategię wnioskowania,
- procedury sterowania dialogiem – procedury wejścia/wyjścia umożliwiają formułowanie zadań przez użytkownika i przekazywanie rozwiązania przez pro-

gram, procedury umożliwiające rozszerzanie oraz modyfikację wiedzy – pozyskiwanie wiedzy [9].

Uwzględniając powyższe elementy, można strukturę systemu ekspertowego przedstawić w postaci schematu pokazanego na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat systemu ekspertowego [9]

Baza wiedzy systemu ekspertowego stanowi jego główną część i zawiera informacje z określonej dziedziny wiedzy. Baza wiedzy na ogół przyjmuje postać pliku na dysku komputera. Przechowywana w nim wiedza jest zapisana za pomocą określonego języka reprezentacji wiedzy, na który składa się opis faktów, reguł stosowanych w procesie wnioskowania oraz w przypadku niektórych systemów – metareguł, opisujących strategię rozwiązywania danego problemu. Wiedza znajdująca się w bazie wiedzy może pochodzić z różnych źródeł, najczęściej jednak pochodzi od ekspertów, specjalistów z danej dziedziny.

W przeciwieństwie do konwencjonalnych systemów, systemy ekspertowe nie zawierają jawnego opisu sposobu (algorytmu) rozwiązania danego problemu. To system ekspertowy, a ściślej jego moduł wnioskowania, stosując zasady logiki formalnej, rozwiązuje problem, korzystając z wiedzy deklaratywnej zawartej w bazie wiedzy.

W praktyce stosowane są dwie główne metody wnioskowania: do tyłu oraz do przodu. Czasami stosowane jest tzw. wnioskowanie mieszane, będące połączeniem w różnych proporcjach obu wcześniej wymienionych metod.

Wnioskowanie do tyłu rozpoczyna się od postawienia hipotezy, która ma być potwierdzona w trakcie wnioskowania. W tym przypadku proces wnioskowania przebiega od hipotezy, poprzez reguły do faktów, potwierdzających warunki reguł. Zadaniem systemu jest jej potwierdzenie, zaprzeczenie lub wskazanie niemożliwości rozwiązania danego problemu.

W przypadku wnioskowania do przodu, proces wnioskowania rozpoczyna się od zbiorów faktów podanych na wejściu. W rezultacie zostają wygenerowane wszystkie logiczne konsekwencje tych faktów, stanowiące ostateczne konkluzje systemu [9, 10].

Unikatową cechą systemów ekspertowych jest zdolność do automatycznego generowania objaśnień w trakcie konsultacji z użytkownikiem, w szczególności wyjaśnień dotyczących sposobu rozwiązania problemu. Wyjaśnienia tworzone są przez tzw. moduł wyjaśniający.

4. Założenia projektowe systemu diagnozowania układu łożyskowania

Projektowany system ekspertowy opiera się na koncepcji programu, który jest zdolny do współpracy z różnymi źródłami danych wejściowych. Dzięki takiemu rozwiązaniu usprawniony i przyspieszony zostaje proces przeprowadzenia ekspertyzy.

Założenia systemu ekspertowego do diagnozowania układu łożyskowania są następujące [11]:

- możliwość wykrycia i identyfikacji uszkodzenia w układzie łożyskowania,
- określenie stopnia uszkodzenia,
- określenie okresu dopuszczalnej eksploatacji po wystąpieniu uszkodzenia,
- określenie sposobu usunięcia uszkodzenia,
- możliwość przyrostowej budowy bazy wiedzy,
- możliwość uzyskania wyjaśnienia konkluzji wygenerowanej przez system,
- konieczność jawnej reprezentacji wiedzy w postaci zrozumiałej dla użytkownika końcowego [11].

Zaproponowany system ekspertowy zbudowano wykorzystując system szkieletowy PC SHELL firmy AI Tech. Na podstawie tej aplikacji został stworzony system ekspertowy, który dla podjęcia decyzji o stanie technicznym układu łożyskowania korzysta z danych dostarczonych z zewnątrz. Diagnoza dokonywana jest w oparciu o bazę wiedzy i wyniki bieżących badań diagnostycznych. W przypadku badań tribologicznych są to cztery ostatnie badania dokonane w odstępach 50 go-

dzin eksploatacji silnika; w przypadku badań wibroakustycznych i funkcjonalnych brane są pod uwagę wyniki ostatniego badania.

Aby móc poprawnie dokonywać przekazania wyników badań diagnostycznych do systemu, aplikacja musi być wyposażona w obsługę mechanizmu DDE. Mechanizm ten oparty jest na architekturze „klient-serwer” – aplikacja, która udostępni usługi innym jest serwerem DDE. Aplikacja korzystająca z tych usług nazywana jest klientem DDE. Komunikacja DDE opiera się na wykorzystaniu tzw. kanałów komunikacyjnych, przez które pobierana są wymagane informacje. W rozpatrywanym przypadku serwerem DDE jest aplikacja Microsoft Excel, natomiast klientem DDE – system ekspertowy [12]. Pc-Shell po uruchomieniu systemu ekspertowego aktywuje aplikację źródła danych (Excel), a następnie otwiera kanał komunikacyjny. Po pobraniu danych, system przystępuje do wykonania zadania głównego, tj. określenia stanu technicznego układu łożyskowania silnika turbinowego. Wynik pracy wraz z objaśnieniem jest wyświetlany na ekranie komputera i wydrukowany w postaci raportu.

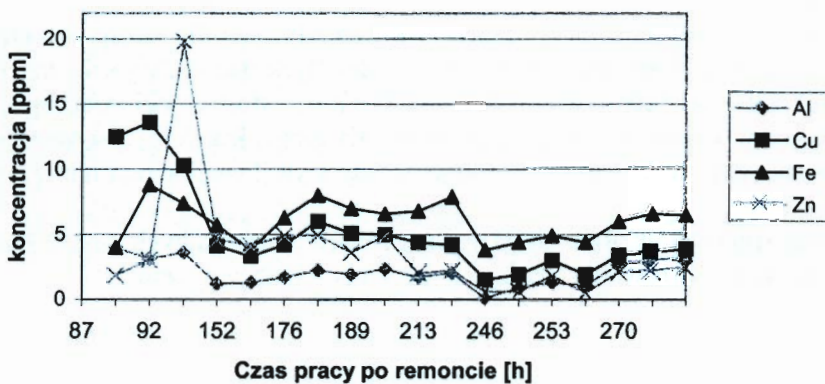
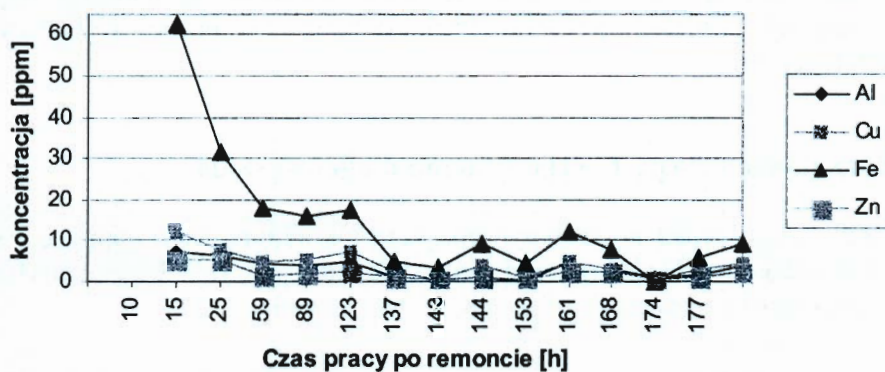
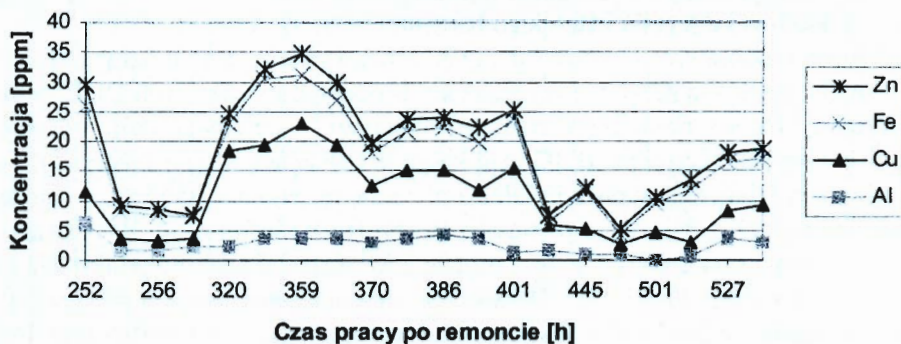
5. Baza danych ekspertowego systemu diagnozowania

Baza danych przechowuje specyficzne, szczegółowe informacje, zapisane w sposób uporządkowany. Typ danych jest przeważnie numeryczny. W bazie danych systemu ekspertowego umieszczone zostały między innymi:

- dane o obiekcie,
- wyniki pomiarów bieżących uzyskanych poszczególnymi metodami diagnostycznymi.

Dane te zostały poddane obróbce charakterystycznej dla każdej z metod diagnozowania [11]. Przykładowe wyniki długotrwałych badań diagnostycznych metodą funkcjonalną przedstawiono w tabeli 1, natomiast przebiegi koncentracji wybranych pierwiastków w produktach zużycia gromadzących się w oleju smarującym – na rysunku 2. Tabela 2 opisuje zasady kwalifikacji symptomów drganiowych.

Opracowane dane umożliwiły wyznaczenie dopuszczalnych i niedopuszczalnych zakresów wartości dla każdego z rozpatrywanych sygnałów.



Rys. 2. Koncentracja wybranych pierwiastków w produktach zużycia

Tabela 1.

Zestawienie wyników pomiaru czasu wybiegu wirnika [6]

Silnik	Czas pracy [h]	Czas pracy po remoncie [h]	Czas pracy na oleju [h]	Wybieg wirnika [s]
Silnik nr 1	778	329	21	75
Silnik nr 2	788	339	31	75
Silnik nr 3	799	350	42	76
Silnik nr 4	815	366	58	76
Silnik nr 5	829	380	72	77

Tabela 2.

Kwalifikacja symptomów drganiowych stanu łożysk tocznych 38-200 mm [8]

Klasyfikacja uszkodzeń Stan	Wartość szczytowa przyspieszenia drgań obudowy \ddot{u}		Prędkość drgań obudowy v
	g	Impulsy g	$Mn \cdot s^{-1}$
AA – Katastrofalny (Awaryjny – wyłącz)	100	200	140,5
A – Groźny (napraw w ciągu 2 dni)	17,8	35	59,25
B – Do planowanej wymiany (w 21 dniach)	3,16	6	25,00
C – Niewielki defekt	0,56	1	10,5
D – Bez uszkodzeń	0,1 – 0,01	0,2	4,5 – 0,25
Uwagi: $g = 981 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$		Impulsy = chwilowe wysoki ponad poziom średni obserwowany na oscyloskopie.	

6. Baza wiedzy ekspertowego systemu diagnozowania

Baza wiedzy zaprojektowanego systemu ekspertowego zawiera:

- parametry progowe wyznaczone podczas kompleksowych badań diagnostycznych w trakcie eksploatacji obiektu. Zastosowano wielokierunkową obserwację – badane obiekty traktowane są z jednej strony indywidualnie, a z drugiej – jako elementy zbiorów obiektów. Takie podejście wymagało zaprojektowania odpowiedniej bazy danych, a po jej stworzeniu pozwoliło wyznaczyć progi diagnostyczne i ustalić okresy pobierania próbek,

- normy eksploatacyjne (m. in. normę ISO 3945 pt. „Drgania mechaniczne dużych maszyn wirnikowych o prędkościach obrotowych 10-200 obr./s. Pomiary i ocena drgań w eksploatacji”),
- reguły dynamicznego tworzenia faktów,
- reguły generowania konkluzji.

Na podstawie dopuszczalnych i niedopuszczalnych zakresów wartości dla każdego z badanych sygnałów określono uogólnione wartości („normalne”, „podwyższone”, „wzmoczone”, „awaria” lub „dobry”, „dostateczny”, „jeszcze tak”, „nie-dopuszczalny”) dla atrybutów *syg_ti* (gdzie *syg* – oznaczenie sygnału, *ti* – i-ta chwila), które potem stanowią fakty umieszczane w bazie faktów.

Poniżej przedstawiono przykład dla atrybutu *p_Al_t1* ("koncentracja aluminium w chwili *t1*") :

```
p_Al_t1 :  
  ask no  
  single yes  
  val oneof  
  {  
    "normalne",  
    "podwyższone",  
    "wzmoczone",  
    "awaria"  
  };
```

Wartości faktów przyjmowane są na podstawie porównania danych wejściowych z regułami faktów umieszczonymi w bazie, a następnie dodawane do zbioru już istniejących faktów.

Przykład reguły faktów:

```
if (P_Al_t1 > 0)  
  begin  
    if (P_Al_t1 < 5)  
      addFact( _, p_Al_t1, "normalne");  
    else  
      if (P_Al_t1 < 7)  
        addFact( _, p_Al_t1, "podwyższone");  
    else  
      if (P_Al_t1 < 9)  
        addFact( _, p_Al_t1, "wzmoczone");
```

```
else  
    addFact( _, p_Al_t1, "awaria");  
end;
```

gdzie:

P_{Al_t1} – zmierzona w chwili $t1$ koncentracja aluminium w produktach zużycia

Analogiczne podejście zastosowano dla pozostałych pierwiastków wykrywanych w produktach zużycia.

Reguły generowania konkluzji tworzone są na podstawie analizy przebiegów sygnałów w układach z symulowanym uszkodzeniem i porównania ich z przebiegami wzorcowymi. Poniżej przedstawiono przykładową regułę opisującą warunki przypisania przez system ekspertowy zmiennej **uszkodzenia_układu_łożyskowania** wartości „niewielki defekt” [11]:

```
1002: uszkodzenia_ukladu_lozyskowania = "niewielki defekt" if  
    p_Al_t1 = "normalne"  
    & p_Al_t2 = "podwyzszone"  
    & p_Al_t3 = "podwyzszone"  
    & p_Al_t4 = "podwyzszone"  
    & p_Cu_t1 = "normalne"  
    & p_Cu_t2 = "podwyzszone"  
    & p_Cu_t3 = "podwyzszone"  
    & p_Cu_t4 = "podwyzszone"  
    & p_Fe_t1 = "normalne"  
    & p_Fe_t2 = "normalne"  
    & p_Fe_t3 = "podwyzszone"  
    & p_Fe_t4 = "podwyzszone"  
    & p_Zn_t1 = "normalne"  
    & p_Zn_t2 = "normalne"  
    & p_Zn_t3 = "normalne"  
    & p_Zn_t4 = "podwyzszone"  
    & t_wyb = "podejrzany"  
    & f_1500 = "dobry"  
    & f_5000 = "dostateczny"  
    & f_10k = "dostateczny"  
    & f_25k = "dobry";
```

gdzie:

p_{XX_ti} – koncentracja pierwiastka XX w chwili ti ,

t_{wyb} – czas wybiegu,

f_{AA} – amplituda drgań dla częstotliwości AA.

Analogiczne reguły opracowano dla konkluzji przypisującej zmiennej **uszkodzenia_układu_łożyskowania** wartości:

- stan normalny,
- wymień olej,
- do planowanej wymiany,
- groźny,
- katastrofalny.

W pracy [11] zastosowana tylko jedno źródło wiedzy. Jest to związane z podobieństwem procesów zużyciowych, występujących w układzie łożyskowania. Źródło wiedzy może być rozwijane w miarę pozyskiwania nowej wiedzy przez ekspertów, z uwzględnieniem rezultatów stosowania systemu ekspertowego w procesie eksploatacji diagnozowanego obiektu.

Należy zauważyć, że według najnowszych specyfikacji systemów szkieletowych baza danych systemu jest umieszczana wewnątrz bazy wiedzy. Dzięki takiemu podejściu, inżynier wiedzy aby zmienić zastosowanie systemu ekspertowego, musi wymienić tylko jeden podstawowy plik – bazę wiedzy [12].

7. Identyfikacja uszkodzeń przez system ekspertowy

System ekspertowy korzysta z danych pomiarowych zawartych w pliku Excel'a za pomocą mechanizmu DDE. Dane pomiarowe obejmują:

- koncentracje pierwiastków produktów zużycia w oleju smarującym,
- czas wybiegu,
- amplitudy drgań dla ustalonych częstotliwości.

Na podstawie analizy danych pomiarowych tworzone są fakty opisujące bieżącą wartość koncentracji pierwiastków, czasu wybiegu i drgań. W rezultacie otrzymujemy się zbiór faktów niezbędnych do generowania konkluzji końcowej.

Poleceniem

goal("uszkodzenia_układu_łożyskowania = X");

uruchamiana jest maszyna inferencyjna, której zadaniem jest wygenerowanie konkluzji dotyczącej uszkodzenia układu łożyskowania na podstawie wygenerowanych wcześniej faktów pomiarowych.

Jeśli możliwe jest wygenerowanie konkluzji, system ekspertowy prezentuje wyznaczone fakty, charakterystyczne przebiegi sygnałów diagnostycznych oraz opisuje przyczyny powstania uszkodzenia. W przypadku gdy poziom parametrów sygnałów diagnostycznych wykracza poza wcześniej zdefiniowane granice, system ekspertowy nie jest w stanie dokonać identyfikacji uszkodzenia i informuje o tym użytkownika. Taka sytuacja stanowi asumpt do podjęcia modyfikacji zaprojektowanego systemu.

8. Podsumowanie

Zaprojektowany system ekspertowy charakteryzuje się bardzo dużą szybkością działania i nie wymaga od użytkownika dużej wiedzy fachowej, co należy niewątpliwie do zalet tego typu rozwiązań. Udało się to osiągnąć dzięki zastosowaniu mechanizmu DDE, który umożliwia aplikacji systemu pobieranie danych wejściowych z zewnątrz, dynamiczne generowanie faktów oraz tablicową budowę systemu.

Zaprojektowany ekspertowy system diagnostyczny wprowadza do procesu diagnozowania powtarzalność przetwarzania informacji, co ma decydujący wpływ na skuteczność diagnozowania. Dalszy rozwój systemu uwarunkowany jest istnieniem sprzężenia między jego użytkownikiem a projektantem (inżynierem wiedzy). Dotyczy to w szczególności rozszerzania bazy wiedzy w celu minimalizowania liczby sytuacji, w których system nie może zidentyfikować stanu diagnozowanego obiektu.

Podsumowując powyższe można przyjąć, że zaprezentowany w pracy system ekspertowy to pierwszy etap w tworzeniu kompleksowego systemu ekspertowego do diagnozowania układu łożyskowania silnika turbinowego, który może być podstawą dalszych prac naukowo-badawczych.

Literatura

1. **Borowczyk H., Kącki Cz., Kobański A.:** *Technologia identyfikacji uszkodzeń turbinowych silników odrzutowych typu 89 przy pomocy stanowiska diagnostycznego KAPSO-17MK*. ITWL, Warszawa, 1991.
2. **Cempel Cz.:** *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, PWN Warszawa, 1989.
3. **Cholewa W.:** *Data processing and reasoning in technical diagnostics*. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.

4. *Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe*. Materiały II krajowej konferencji naukowej, Wrocław, 15-17 czerwca 1993 r. T.1,2 - Instytut Sterowania i Techniki Systemów Politechniki Wrocławskiej, Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk, Oddział PAN we Wrocławiu, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 1993.
5. **Lindstedt P.:** *Sprawozdanie z projektu badawczego nt: Metoda wyznaczania stanów granicznych wysokoobrotowych układów łożyskowania na przykładzie lotniczych silników turbinowych*. ITWL, Warszawa, 1995.
6. **Lindstedt P.:** *Sprawozdanie z projektu nt Opracowanie bazy danych diagnostycznych TSO dostosowanej do wymagań systemu ekspertowego*. ITWL, Warszawa, 2001.
7. **Lindstedt P.:** *Układy i metody diagnozowania statków powietrznych*. ITWL, Warszawa, 1993.
8. *Metody cyfrowej analizy sygnałów wibroakustycznych* – praca zbiorowa: Ossolineum, Wrocław, 1979.
9. **Mulawka J. J.:** *Systemy ekspertowe*. WNT, Warszawa, 1996.
10. **Pawlak M.:** *Systemy ekspertowe w eksploatacji maszyn*. Politechnika Lubelska, Lublin, 1996.
11. **Szczepanik R.:** *System ekspertowy do diagnozowania układu łożyskowania silnika turbinowego*, Politechnika Białostocka, Białystok 2002, praca magisterska (pod kier. H. Borowczyka), Biblioteka Politechniki Białostockiej.
12. *Dokumentacja systemu Pc-Shell firmy AITech*.

PROJECT OF EXPERT DIAGNOSTIC SYSTEM OF BEARING SYSTEM OF TURBINE JET ENGINE

Summary: In this paper a project of an expert diagnostic system is presented. The system was developed with a master of science. thesis carried out in the Białystok Technical University. The object being diagnosed is an bearing system of a turbine jet engine type 89. The necessary data were collected in experimental research carried out in the Air Force Institute of technology. The basis for this expert system is a PC SHELL system of AITECH company.

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/5/98.

Andrzej Celmerowski¹

CHWYTAK DWUSZCZĘKOWY Z NAPĘDEM ŚLIMAKOWYM, Z RÓWNOLEGLYM PROWADZENIEM SZCZĘK

Streszczenie: W pracy przedstawiono modelową konstrukcję dwuszczękowego chwytaka manipulatora robota, zrealizowaną na bazie mechanizmu ślimakowego napędzanego elektrycznie, z równoległym ruchem szczęk, uzyskanym poprzez zastosowanie mechanizmu prostowodowego. Niewątpliwą zaletą urządzenia jest jego prosta konstrukcja oraz osiągnięte parametry eksploatacyjne.

Uzyskany równoległy ruch szczęk zapewnia pewność chwytu dla każdego możliwego położenia przedmiotu chwytanego względem szczęk, co podnosi walory eksploatacyjne rozwiązania. Załączone wyniki obliczeń sprawdzających potwierdzają słuszność przyjętych założeń.

Słowa kluczowe: chwytak, manipulator

1. Wprowadzenie

Na skutek pojawienia się manipulatorów z autonomicznym systemem sterowania, przejmującym kontrolę nad funkcjami do niedawna wykonywanymi przez człowieka, konieczne stało się opracowanie konstrukcji mechanicznych, których efektor wykonuje antropomorficzny, przestrzenny ruch chwytny (Gawrysiak, 1997, Knapczyk, 1990).

Różne kształty i wymiary obiektów manipulacji, materiały, struktura powierzchni obiektu, czy jego masa powodują, że powstaje wiele rozwiązań konstrukcyjnych chwytaków (Knapczyk, 1990). Chwytały stały się chyba najbardziej zróżnicowanym konstrukcyjnie zespołem maszyny manipulacyjnej i jak się ocenia (Olszewski, 1992) jedynie w 35% przypadków możliwe jest użycie chwytaka standardowego. W pozostałych 65% konieczne stało się opracowanie konstrukcji specjalnej.

¹ Katedra Mechatroniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45c, 15-351 Białystok

Parametry chwytaka są ściśle związane z jego strukturą kinematyczną. Za kryterium klasyfikacji mechanizmów chwytaków przyjmuje się liczbę, rodzaj i klasę par kinematycznych, tworzących strukturę mechanizmu chwytaka. Wyróżnia się mechanizmy:

- wyłącznie z parami klasy V – zbudowane np. na bazie siłownika,
- z parami klasy V i IV – zawierające elementy typu: mechanizm krzywkowy albo przekładnia zębata.

Zaletą chwytaków zbudowanych na bazie par V klasy jest ich prosta budowa, wykonanie i obsługa. Wady, to przede wszystkim zależność siły chwytu od położenia końcówek chwytanych.

Zaletą mechanizmów z parami kinematycznymi klasy IV jest nieduża liczba elementów pośredniczących, wadą – występowanie dużych sił tarcia w parze klasy IV.

Ze względów eksploatacyjnych jedną z istotniejszych cech chwytaków jest pewny chwyt w różnych położeniach przedmiotu (dla przedmiotów chwytanych za powierzchnie równoległe). Żeby można było uchwycić przedmioty o pewnym zakresie wymiarów, trzeba zastosować konstrukcję z równoległym prowadzeniem szczęk. Konstrukcje takie tworzone są z reguły na bazie płaskich czworoboków przegubowych (równoległobocznych), zawierających stosunkowo dużą liczbę członów pośredniczących oraz par obrotowych (co wiąże się z koniecznością spełnienia wysokich wymogów materiałowych, wykonawczych oraz - później – z zapewnieniem odpowiednich warunków eksploatacji).

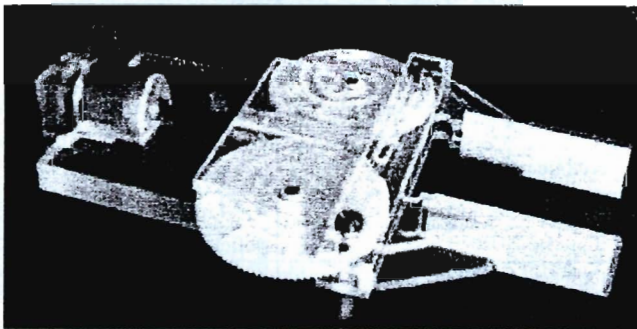
2. Opis chwytaka

W przedstawionej, modelowej koncepcji chwytaka zastosowano:

1. Układ chwytany dwuszcękowy symetryczny (dwie szczęki ruchome), realizujący w najprostszy konstrukcyjnie sposób wymogi eksploatacyjne procesu chwytania.
2. Mechanizm pośredniczący chwytaka na bazie przekładni zębatej (para kinematyczna klasy IV). Przekładnia zębata ślimakowa – symetryczna (dwie ślimacznice), o globoidalnym zarysie ślimaka, samohamowna (samohamowność kosztem pogorszenia sprawności energetycznej urządzenia uniemożliwia cofnięcie się szczęki po uchwyceniu przedmiotu wskutek braku zasilania silnika). Umożliwia redukcję prędkości szczęk w procesie zaciskania oraz zwielokrotnienie siły zacisku.
3. Równoległe, wzajemne względem siebie, prowadzenie szczęk, niezwiązane z podstawą chwytaka, umożliwia pewne chwytanie przedmiotów w określonym zakresie wymiarów.

4. Sworznie szczęk obrotowo zamocowane w ślimacznicach, połączone obrotowo z napędzanymi szczękami oraz suwliwie – z szczękami prowadzonymi. Powierzchnie płaskie sworzni szczęk polepszają warunki współpracy na powierzchniach bocznych kanałków szczęk prowadzonych (styk powierzchniowy);
5. Napęd elektryczny z komutatorowym silnikiem prądu stałego zapewnia łatwość zasilania i sterowania, możliwość pracy w pewnym zakresie prędkości obrotowych z względnie stałym momentem obrotowym, stosunkowo małe wymiary i nieduża masa.

Model chwytaka zbudowano w Katedrze Mechatroniki Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej.



Rys. 1. Model chwytaka – widok ogólny

Przyjęte założenia konstrukcyjno-eksploatacyjne przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.

Założenia konstrukcyjno-eksploatacyjne

Masa chwytanego przedmiotu	$m = 0,05 \text{ kg}$
Średnica chwytanego przedmiotu	$d = 10 + 50 \text{ mm}$
Nominalna odległość chwytania	$A = 80 \text{ mm}$
Przyspieszenie chwytaka z przedmiotem w czasie przenoszenia	$a = g$

Z uwagi na modelowy charakter chwytaka oraz jego wykorzystanie w dydaktyce do wykonania korpusu chwytaka (poz. 1 rys. 2) oraz szczęk (12, 13) użyto szkła organicznego (plexiglasu) o grubości $10 + 3 \text{ mm}$.

Na powierzchniach wewnętrznych szczęk umieszczono nakładki z miękkiej gumy dla zwiększenia pewności chwytu oraz dla podniesienia wartości współczynnika tarcia pomiędzy powierzchnią roboczą szczęki a powierzchnią przedmiotu chwytanego.

Z uwagi na trudności związane z wykonaniem lub znalezieniem gotowej przekładni hipoidalnej w modelu zastosowano zmodyfikowaną przekładnię ślimakową ze ślimakiem walcowym (5), z mechanizmu napędu magnetowidu AKAI V-SF 12, o parametrach przedstawionych w tabeli 2.

Tabela 2.

Parametry użytej przekładni

Ślimak (5)	
moduł	$m = 0,6 \text{ mm}$
liczba zębów	$z_1 = 1$
średnica podziałowa	$d_1 = 5,4 \text{ mm}$
długość	$l = 25 \text{ mm}$
materiał	twardy polietylen
Ślimacznice (6, 7)	
liczba zębów	$z_2 = 98$
średnica podziałowa	$d_2 = 58,6 \text{ mm}$
szerokość zębów	$b = 4 \text{ mm}$
materiał	polietylen
Odległość osi kół	$a = 64 \text{ mm}$
Przełożenie	$i = 1 : 98$
Kąt wzniosu linii zęba	$\gamma \approx 8^\circ$
Współczynnik tarcia polietylen – polietylen (na sucho)	$\mu \approx 0,2$

Wał ślimaka (4), sworznie szczęk (10, 11) i osie ślimacznic (8, 9) wykonano ze stali węglowej wyższej jakości 45.

Do napędu chwytaka w wersji modelowej użyto silnika (2) prądu stałego, komutatorowego, typu 1.16.011.180, firmy Buehler [www.silniki.pl] zamocowanego w korpusie chwytaka. Parametry silnika przedstawiono w tabeli 3.

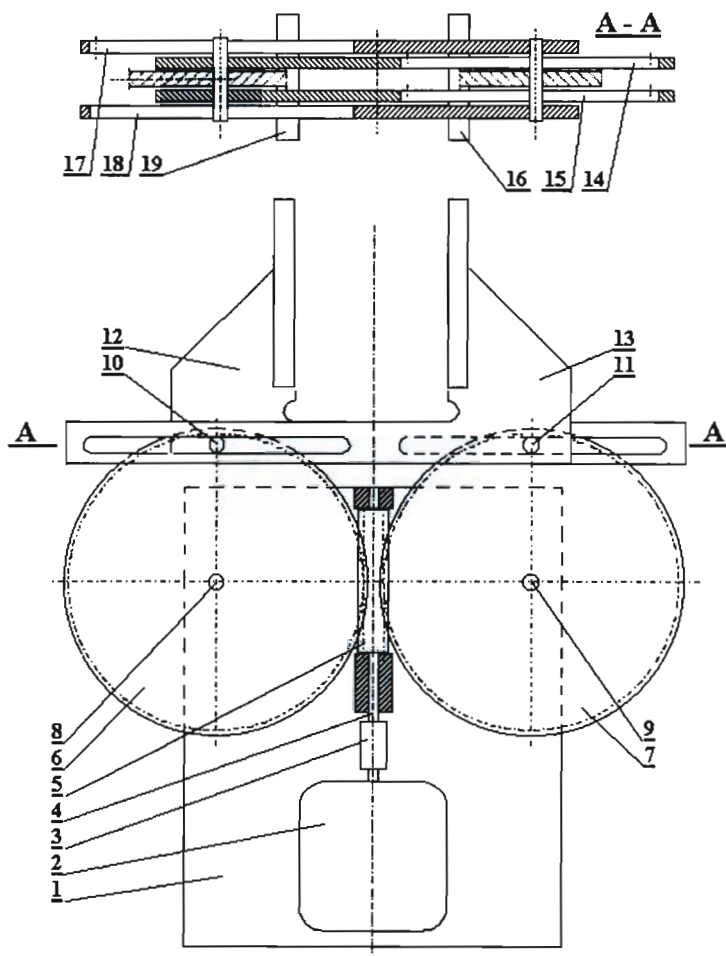
Tabela 3.

Parametry zastosowanego silnika

Napięcie znamionowe	$V_n = 12 \text{ V}$
Prędkość znamionowa	$n = 6850 \text{ obr./min}$
Prąd znamionowy	$I = 0,59 \text{ A}$
Moment znamionowy	$M_0 = 5 \text{ mNm}$
Moc znamionowa	$P = 5 \text{ W}$
Wymiary $D(F) / L / d / x$	23,5 (18) / 30 / 2 / 8 mm

Wał silnika napędowego połączono z wałem ślimaka sprzęgłem elastycznym (3), wykonanym z odcinka przewodu gumowego $\Phi 4 \times 1 \times 15$.

Chwytek przedstawiono na rysunku 1 i na schemacie konstrukcyjnym rysunek 2.

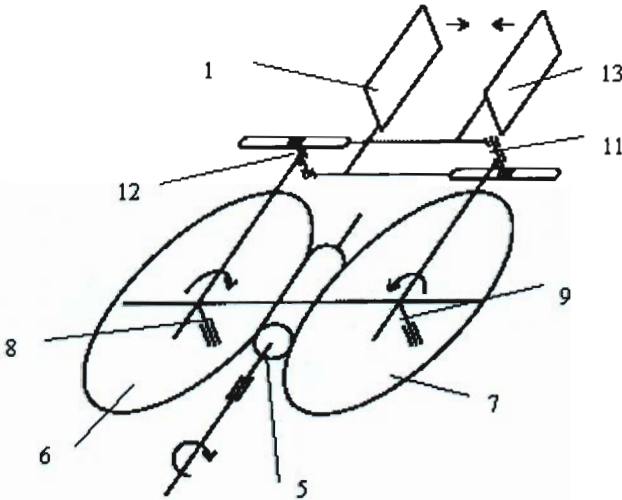


Rys. 2. Schemat konstrukcyjny chwytaka: płyta podstawy (1), silnik napędowy (2), sprzęgło elastyczne (3), wał ślimaka (4), ślimak (5), ślimacznice (6 i 7), sworznie ślimacznic (8 i 9), sworznie szczęk (10 i 11), zespół szczęki lewej (12), zespół szczęki prawej (13), płytki prowadzące szczęk (14, 15 i 17, 18), płytki szczęk (16 i 19)

3. Analiza strukturalna mechanizmu

Chwytek jest od strony strukturalnej mechanizmem płaskim. Zawiera siedem członów ruchomych. Pary kinematyczne zawarte w łańcuchu kinematycznym mechanizmu są to dwie pary klasy IV pomiędzy zębami ślimaka i ślimacznic oraz dziewięć par klasy V – siedem obrotowych i dwie suwliwe.

Strukturalny schemat chwytaka przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat strukturalny chwytaka: 5 – ślimak, 6, 7 – ślimacznice, 8, 9 – sworznie ślimacznic, 10, 11 – sworznie szczęk, 12, 13 – szczęki

Ruchliwość mechanizmu (Olędzki, 1997) obliczono z zależności:

$$w = 3n - p_4 - 2p_5, \quad (1)$$

gdzie: n – liczba członów ruchomych, p_4 – liczba par kinematycznych IV klasy, p_5 – liczba par kinematycznych V klasy.

Ruchliwość łańcucha kinematycznego chwytaka wynosi $w = 1$.

4. Wyniki obliczeń sprawdzających

Dla zadanych i założonych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych chwytaka wykonano obliczenia sprawdzające:

4.1. Sprawność mechaniczna η chwytaka

Całkowitą sprawność mechanizmu (Dietrych, 1973) wyrażono przybliżoną zależnością:

$$\eta \approx \eta_1 \cdot \eta_z \cdot \eta_{z'} \cdot \eta_2 \cdot \eta_2' \cdot \eta_3 \cdot \eta_3' \cdot \eta_4 \cdot \eta_4' \cdot \eta_5 \cdot \eta_5' \cdot \eta_{ol}, \quad (2)$$

gdzie:

$\eta_1 = 0,95$ – sprawność łożysk ślimaka (para łożysk): ślimak – podstawa,

$\eta_z = \eta_{z'} = \text{tg } \gamma / \text{tg}(\gamma + \rho) = 0,408$ – sprawność ząbów przekładni,

$\eta_2 = \eta_2' = 0,95$ – sprawność par łożysk: ślimacznice – podstawa,

$\eta_3 = \eta_3' = 0,95$ – sprawność par łożysk: ślimacznice – sworznie szczęk,

$\eta_4 = \eta_4' = 0,95$ – sprawność par łożysk: szczęki – sworznie szczęk,

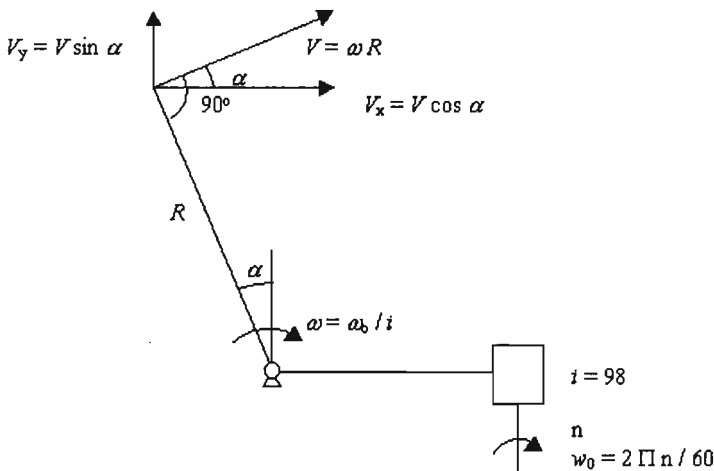
$\eta_5 = \eta_5' = 0,90$ – sprawność par suwliwych: szczęki – sworznie szczęk,

$\eta_{ol} = 1$ – sprawność olejenia (brak smarowania – praca „na sucho”).

Obliczona sprawność przekładni wynosi około $\eta \approx 9,5\%$. Niska wartość sprawności wynika z istoty zastosowanej przekładni ślimakowej oraz niskiej jakości wykonania całego modelu chwytaka.

4.2. Prędkość zwierania (rozwierania) szczęk

Prędkość V ruchu szczęk obliczono zgodnie ze schematem z rysunku 4.



Rys. 4. Schemat do wyznaczenia prędkości szczęk chwytaka

$$V = \frac{\Pi}{30} \left(\frac{nR}{i} \right) \cos \alpha, \quad (3)$$

gdzie:

- n – znamionowa prędkość obrotowa wału silnika,
- R – promień wodzący sworznia szczęki,
- i – przełożenie przekładni chwytnika.

Prędkość szczęki chwytnika (względem podstawy) dla kąta $\alpha = 0^\circ$ (położenie środkowe ślimacznicy) wynosi $V = 0,183$ m/s. Jest to wartość maksymalna w całym cyklu pracy chwytnika, nieodbiegająca od prędkości roboczych w innych tego typu konstrukcjach.

Wartość tej prędkości zależy od położenia kąтового ślimacznicy (szczęki) i zmienia się według funkcji kosinus. Dla założonego zakresu ruchu szczęki (0 – 25 mm) wartość kąta α zmienia się w zakresie $\pm 26^\circ$, co odpowiada zmianie wartości funkcji kosinus α w zakresie 0,899 – 1 – 0,899. Gwarantuje to maksymalnie 10% obniżenie wartości prędkości V w położeniach krańcowych pracy szczęki.

4.3. Siła docisku szczęk chwytnika

Wartość siły określono na podstawie bilansu energetycznego chwytnika. Z porównania mocy włożonej do układu P_{we} (silnik napędowy) z mocą P_{wy} uzyskaną na szczęce chwytnika, dla oszacowanej sprawności energetycznej η , wyznaczono siłę F docisku szczęki chwytnika:

$$\frac{P_{wy}}{P_{we}} = \eta \quad (4)$$

gdzie: $P_{we} = M_0 \omega$, $P_{wy} = .$ Wtedy:

$$F = \frac{\Pi \eta M_0 n}{30V} \quad (5)$$

Ponieważ: $V = \frac{\Pi}{30} (n R / i) \cos \alpha$

$$F = \frac{\eta M_0 i}{R \cos \alpha} \quad (6)$$

gdzie:

η – sprawność chwytnaka,

M_0 – moment nominalny silnika napędowego,

i – przełożenie przekładni chwytnaka,

R – promień wodzący sworznia szczęki,

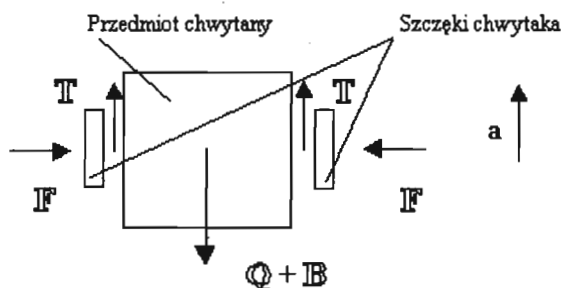
α – kąt określający położenie ślimacznicy (rys. 4).

Siła dla nominalnych parametrów pracy chwytnaka wynosi $F = 1,86$ N.

Siła ta dla położenia $\alpha = 0^\circ$ jest najmniejsza, co zgodne jest z przebiegiem wartości funkcji $1/\cos$.

4.4. Minimalna wartość współczynnika tarcia suchego pomiędzy materiałem okładziny szczęki chwytnaka a materiałem chwytanym

Dla nominalnego obciążenia chwytnaka oraz dla założonej wartości przyspieszenia chwytnaka w czasie ruchu roboczego, przy zgodnym oddziaływaniu siły bezwładności oraz ciężaru przenoszonego przedmiotu minimalną wartość współczynnika tarcia obliczono z warunku równowagi sił (rys. 5):



Rys. 5. Schemat sił działających na przenoszony przedmiot

$$\begin{aligned} Q + B &= T \\ mg + ma &= \mu_{\min} F \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mu_{\min} = \frac{m(g + a)}{F}, \quad (7a)$$

gdzie:

m – masa przedmiotu chwytanego,

a – przyspieszenie w ruchu chwytnaka ($a = g$),

F – siła docisku szczęk.

Obliczona wartość współczynnika tarcia wynosi $\mu = 0,527$. Jest to wartość, jaką osiąga się praktycznie dla każdej pary na bazie gumy i materiałów gumopochodnych.

5. Podsumowanie

Prezentowana w pracy koncepcja chwytaka wykazuje, że można stworzyć w pełni funkcjonalny układ chwytany z równoległym ruchem szczęk bez zastosowania klasycznego układu czworoboku przegubowego. Powyższe rozwiązanie zmniejsza liczbę członów ruchomych w chwytaku oraz liczbę par kinematycznych w stosunku do innych, analogicznych konstrukcji.

Oczywiście dla konkretnych zastosowań należy rozważyć użycie odpowiednich materiałów, przeanalizować zastosowanie innych napędów (np: silnik krokowy), właściwych elementów przekładni (ślimak globoidalny) oraz sprawniejszych łożyskowań.

Przedstawione rozwiązanie wydaje się być w pełni konkurencyjne dla innych, nietanich, profesjonalnych konstrukcji oferowanych przez renomowane firmy.

Literatura

1. **Dietrych J. i inni** (1973): *Podstawy konstrukcji maszyn*. WNT, Warszawa.
2. **Gawrysiak M.** (1997): *Projektowanie mechatroniczne*. Rozprawy Naukowe Politechniki Białostockiej Nr 44. Białystok.
3. **Knappczyk J.** (1990): *Teoria mechanizmów przestrzennych i manipulatorów*. WNT, Warszawa.
4. **Olędzki A.** (1987): *Podstawy teorii maszyn i mechanizmów*. WNT, Warszawa.
5. **Olszewski M.** (1992): *Manipulatory i roboty przemysłowe*. Automatyczne Maszyny Manipulacyjne. WNT, Warszawa.
6. **Rutkowski A.** (1998): *Części maszyn*. WSiP, Warszawa.
7. www.silniki.pl

AN IDEA AND MECHANICS MODELS OF TWO-JAWS GRIPPING DEVICE OF ROBOT MANIPULATOR

Summary: In the paper idea and mechanics models of two-jaws gripping device of robot manipulator are presented.

The gripping device characterized by construction lean on worm gear drives by d.c. motor and parallel motion of jaws system based on straight – line mechanism.

Parallel motion of jaws assures certainty of grasp for every possible positions of gripped object. Indubitable advantage of device is simplicity construction of mechanism.

Marek Jałbrzykowski¹

WPLYW STERYLIZACJI NA NISZCZENIE POWIERZCHNI INSTRUMENTARIUM CHIRURGICZNEGO

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badania zmiany stanu warstwy wierzchniej (WW) instrumentarium chirurgicznego w procesie sterylizacji. Do przeprowadzenia procesu sterylizacji wykorzystano pionowy sterylizator parowy typu ASV. Badaniu poddano narzędzia z WW uzyskaną w procesie wytwarzania i po obróbce wykańczającej.

Stwierdzono zmiany parametrów WW między innymi: chropowatości i mikro-twardości, po kolejnych procesach sterylizacji. Zaobserwowano przebarwienia korozyjne na powierzchni narzędzi, szczególnie w przypadku instrumentów z nieobrobioną warstwą wierzchnią.

Słowa kluczowe: proces sterylizacji, instrumentarium chirurgiczne, proces technologiczny, korozja, parametry warstwy wierzchniej

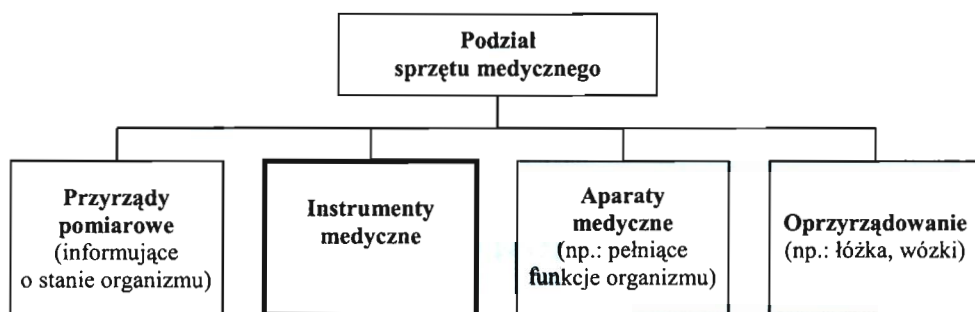
1. Wprowadzenie

Właściwa jakość opieki medycznej jest determinantą poprawnego leczenia. Jako kryterium tej jakości przyjmuje się właściwy przebieg procesu leczenia oraz bezpieczeństwo pacjenta [1]. Mając na uwadze to kryterium, w procesie diagnostyczno-leczniczym można wyróżnić dwa zasadnicze „ogniwa” decydujące o jakości opieki medycznej:

- kwalifikacje personelu medycznego,
- rodzaj i jakość sprzętu medycznego.

Wykorzystywany w szpitalach sprzęt medyczny jest tak zróżnicowany, że trudno jest jednoznacznie go sklasyfikować oraz ocenić jego procentowy udział w procesie leczenia. Na rysunku 1 przedstawiono podział sprzętu medycznego.

¹ Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Materiałoznawstwa, ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok, e-mail: kolec@pb.bialystok.pl

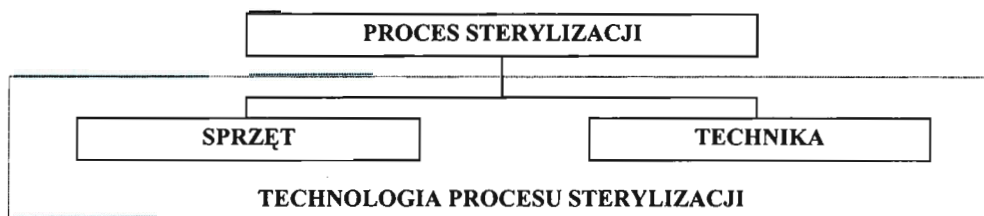


Rys. 1. Podział sprzętu medycznego ze względu na miejsce w procesie diagnostyczno-leczniczym [5]

Podział ten stanowi specyficzny łańcuch. Każde z ogniw tego łańcucha może decydować o jakości i przebiegu procesu leczenia.

Rozważając zamieszczony podział można powiedzieć, że jakość sprzętu medycznego zależy m.in. od jakości instrumentów medycznych. Na wspomnianą jakość wpływa sposób postępowania z tymi instrumentami. Przez sposób postępowania rozumie się tu czynności mające na celu właściwe przygotowanie instrumentarium do ponownego użycia, tj. sterylizację.

Proces sterylizacji zależy przede wszystkim od dwóch czynników: sprzętu, za pomocą którego wykonuje się sterylizację oraz od techniki jej wykonywania (metody sterylizacji). Czynniki te określane są mianem technologii procesu sterylizacji i decydują o końcowym efekcie tego procesu (rys. 2).



Rys. 2. Czynniki wpływające na końcowy efekt procesu sterylizacji

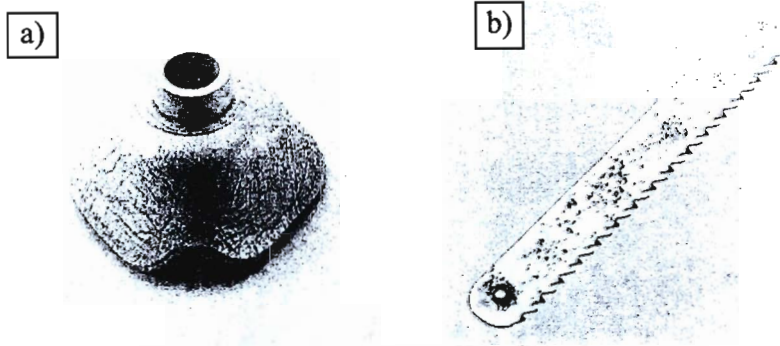
Mając na uwadze metodę sterylizacji, warto wspomnieć, że powszechnie znane metody sterylizacji można podzielić na: sterylizację parową, sterylizację w wodzie lub parze wodnej, sterylizację suchym gorącym powietrzem, sterylizację formaldehydem, sterylizację radiacyjną, sterylizację tlenkiem etylenu.

Najbardziej skuteczną i rozpowszechnioną, w placówkach służby zdrowia i w przemyśle, termiczną metodą sterylizacji jest sterylizacja parowa. Metodę tę

można stosować do różnego typu materiałów, np. takich jak: tekstylia, stal nierdzewna, szkło, guma. Stosowana jest do sterylizacji bielizny, materiałów opatrunkowych, narzędzi chirurgicznych, materiałów gumowych, rękawic chirurgicznych.

Należy pamiętać o tym, że oprócz właściwej metody wyjaławiania, bardzo ważnym czynnikiem, nieuwzględnionym na rysunku 2, jest odpowiednie przygotowanie powierzchni sterylizowanego sprzętu. Dotyczy to przede wszystkim zabrudzeń wszystkich rodzajów przyrządów i narzędzi niezależnie od materiału, z którego są wykonane. W szczególności odnosi się to do dających się łatwo usunąć pozostałości, a więc pozostałości pooperacyjnych lub innych zanieczyszczeń. Można je całkowicie, bez obawy uszkodzenia przyrządów, usunąć poprzez gruntowne czyszczenie, za pomocą specjalnych środków czyszczących.

Wszystkie opisane powyżej czynniki w stopniu jednakowo istotnym decydują o przebiegu procesu sterylizacji.



Rys. 3. Zdjęcia powierzchni sterylizowanych elementów: a) rysy powstałe na skutek starzenia się spowodowane zbyt wysoką temperaturą suszenia podczas sterylizacji, b) pokrycia rdzy powstałe w procesie sterylizacji na niewłaściwie przygotowanym ostrzu piły

Jak się okazuje w praktyce [5], niewłaściwie przeprowadzony proces sterylizacji (rys. 3a) lub np.: niewłaściwe przygotowanie narzędzi do tego procesu (rys. 3b), może wpłynąć na niekorzystne zmiany warstwy wierzchniej (a nawet całej objętości materiału) oraz sterylność, a tym samym na tymczasową nieprzydatność instrumentarium do praktyki lekarskiej. Jednorazowe, nieświadome, błędne działanie jest tylko, oczywiście, zaczątkiem do degradacji jakości użytkowanego sprzętu. Dopiero wielokrotne niewłaściwe postępowanie podczas przygotowywania narzędzi do sterylizacji oraz często przypadkowe dobieranie parametrów procesu (dotyczy to szczególnie sterylizatorów obsługiwanych ręcznie) doprowadza do zniszczenia instrumentarium.

W niniejszej pracy przeprowadzono badania w celu oceny wpływu procesu sterylizacji na powierzchnię instrumentarium chirurgicznego.

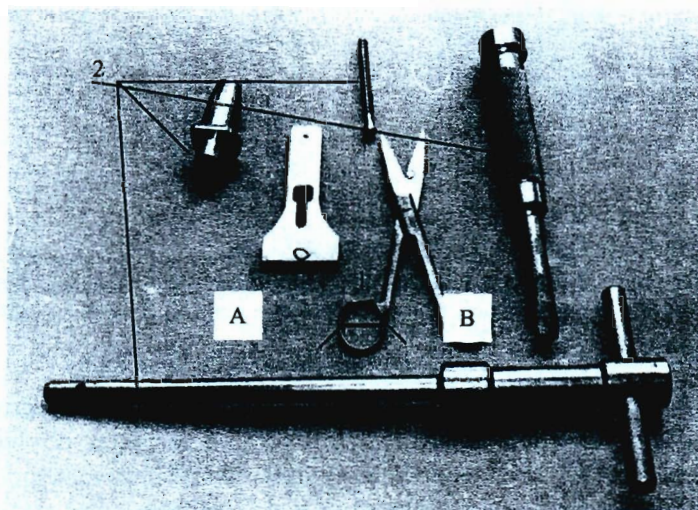
2. Materiały i metodyka badań

Materiały użyte do badań

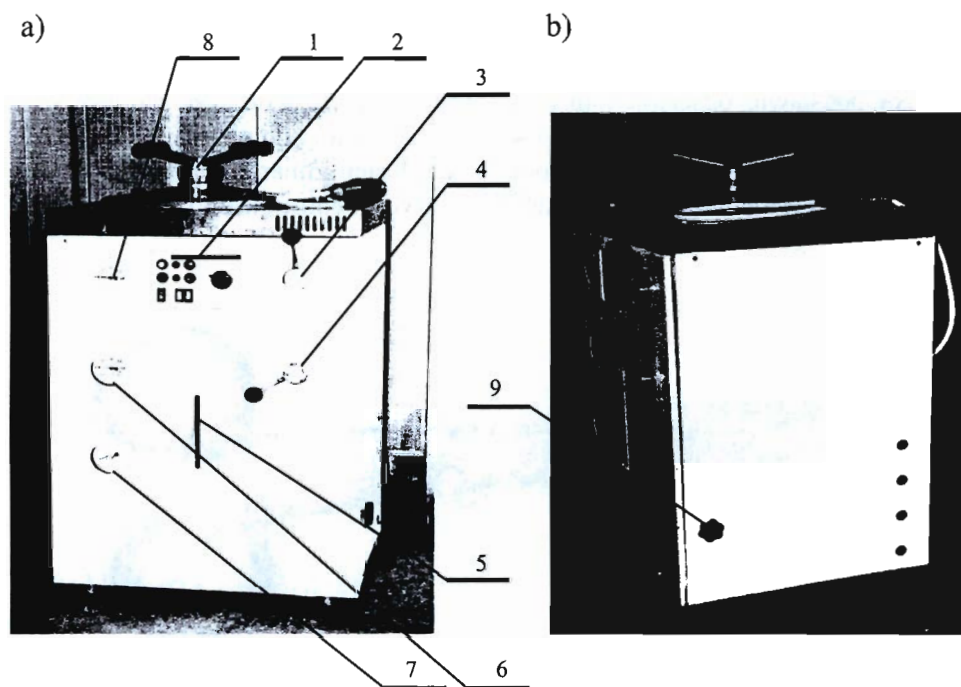
Do badań wykorzystano instrumentarium chirurgiczne ze stali 4H14. Wybrano elementy z nieobrobioną WW oraz elementy z uszlachetnianą WW (po obróbce cieplnej, polerowaniu i kulowaniu). Na rysunku 4 przedstawiono elementy użyte do badań.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono za pomocą sterylizatora parowego typu ASV (rys. 5). Na potrzeby badań laboratoryjnych oraz ze względów bezpieczeństwa ograniczono możliwości pracy sterylizatora do cyklu napełniania, ekspozycji i chłodzenia. Pozostałe cykle pracy sterylizatora zablokowano.



Rys. 4. Instrumentarium chirurgiczne poddane procesowi sterylizacji: A – element opisywany jako „łyżka”, B – nożyczki chirurgiczne; kółkami zaznaczono miejsca gdzie badano chropowatość i mikrotwardość powierzchni po kolejnych procesach sterylizacji: 1 – elementy z nieobrobioną warstwą wierzchnią, 2 – elementy po pełnym procesie technologicznym



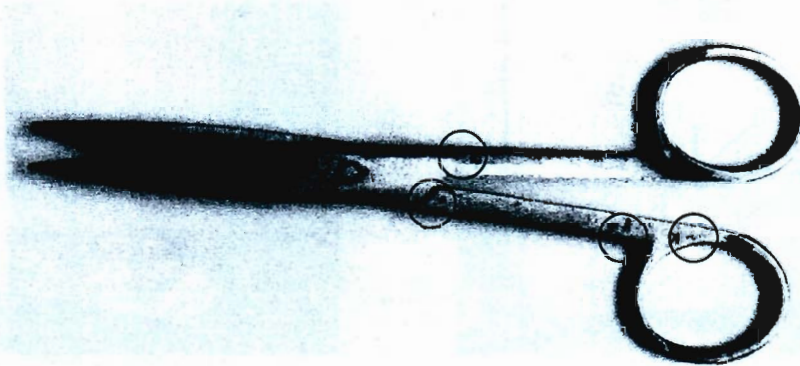
Rys. 5. Widok sterylizatora parowego typu „ASV”: a) od przodu, b) z boku: 1 – pokrywa zamykająca, 2 – pulpit sterowniczy, 3 – dźwignia cykli sterylizacji, 4 – dźwignia „CIECZE - OPATRUNKI I NARZĘDZIA”, 5 – wskaźnik poziomu wody, 6 – wskaźnik ciśnienia pod płaszczem komory sterylizacyjnej, 7 – wskaźnik temperatury pary, 8 – wskaźnik ciśnienia w komorze sterylizacyjnej, 9 – zawór „KONDENSAT” [2]

Badania przeprowadzono dla cyklu 135°C, przy czym po fazie napełniania przyjęto sześćdziesięciminutową fazę ekspozycji i piętnastominutową fazę chłodzenia. Koniec czasu ekspozycji sygnalizowany był przez dzwonek alarmowy. Fazę chłodzenia kończono niezależnie od temperatury próbek po piętnastu minutach. Cykl sterylizacji powtórzono 6 razy.

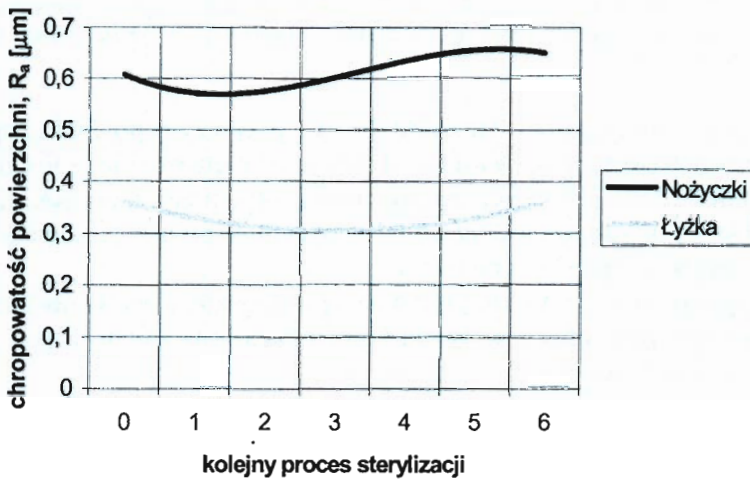
Jako czynnik roboczy wykorzystano wodę z miejskiej sieci wodociągowej. Za miarę zużycia przyjęto obecność zmian korozyjnych oraz zmiany takich parametrów WW jak: mikrotwardość i chropowatość.

3. Wyniki badań i dyskusja

Na podstawie obserwacji makroskopowych stwierdzono, że na wszystkich elementach oznaczonych na rysunku 4 cyfrą 2 (elementy po pełnym procesie technologicznym), nie wystąpiły po procesie sterylizacji zmiany korozyjne. W przypadku dwóch elementów (A – „łyżka”, B – nożyczki chirurgiczne) zaobserwowano zmiany korozyjne.



Rys. 6. Widok nożyczek chirurgicznych po 6 cyklach sterylizacji; kółkami zaznaczono wyraźnie widoczne rdzawe przebarwienia powierzchni



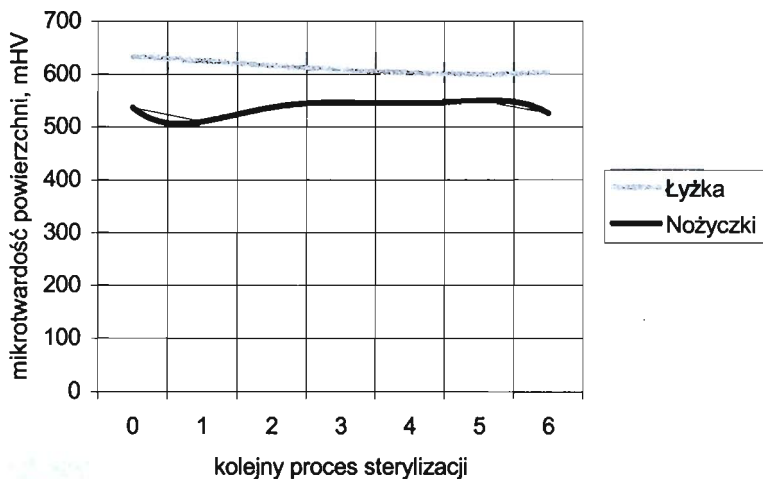
Rys. 7. Wyniki badań pomiaru chropowatości powierzchni po kolejnych cyklach sterylizacji elementu A – nożyczki chirurgiczne i B – „łyżka”

Należy nadmienić, że wspomniane elementy zostały wycofane z produkcji przed obróbką wykańczającą.

W przypadku tych dwóch elementów przeprowadzono dodatkowe badania WW (badania chropowatości i mikrotwardości).

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań chropowatości elementów A i B (rys. 4). Jak widać z wykresu, w przypadku obu elementów zaobserwowano początkowo nieznaczny spadek, po czym wzrost chropowatości w końcowym etapie procesu badawczego. Spadek chropowatości może być spowodowany „rozpuszczaniem się” wierzchołków nierówności i przechodzeniem ich w postaci jonów do powierzchniowych warstewek skroplonej pary wodnej. Natomiast późniejszy wzrost parametru R_a w końcowym etapie badawczym może być wynikiem powstawania ognisk korozyjnych.

Badania mikrotwardości (rys. 8) powierzchni wykazały spadek mikrotwardości w przypadku nożyczek chirurgicznych oraz jej wzrost w przypadku „łyżki”. Spadek mikrotwardości może być spowodowany niszczeniem warstwy wierzchniej i „odkrywaniem” głębiej położonych warstw materiału o mniejszej mikrotwardości. Wzrost mikrotwardości może świadczyć o powstawaniu na powierzchni warstewek twardych tlenków.

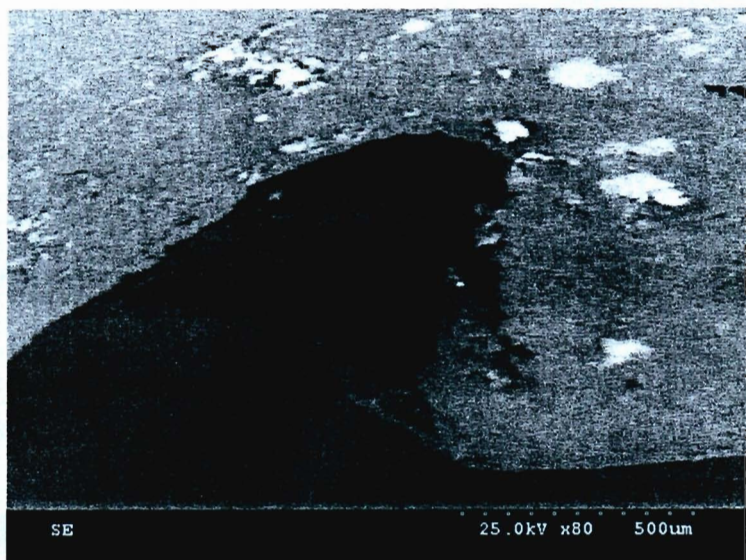


Rys. 8. Wyniki badań mikrotwardości powierzchni elementów A i B

a)



b)



Rys. 9. Mikrofotografie wybranych obszarów powierzchni „łyżki”: a) wżery korozyjne, pow. $\times 30$, b) wyraźne białe przebarwienia powierzchni „łyżki”, pow. $\times 80$

Po obserwacjach makroskopowych wykonano badania mikroskopowe powierzchni narzędzi za pomocą mikroskopu skaningowego Hitachi S3000N. Wyniki tych obserwacji ilustruje rysunek 9.

Na rysunku 9a przedstawiono widok powierzchni „łyżki” z wyraźnymi wżerami korozyjnymi (powiększenie $\times 30$). Rysunek 9b ilustruje ten sam obszar lecz przy powiększeniu $\times 80$. Widać tu oprócz dziury korozyjnej wyraźne zmiany strukturalne (białe przebarwienia) powierzchni elementu. Widoczne białe skupiska mogą świadczyć o utlenianiu się powierzchni narzędzi oraz braku odporności korozyjnej.

4. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki pilotażowych badań wpływu sterylizacji na zmiany stanu WW instrumentarium chirurgicznego. Do badań wybrano elementy z WW po procesie wytwarzania oraz z WW po obróbce wykańczającej. Badania przeprowadzono za pomocą pionowego sterylizatora parowego typu ASV.

Stwierdzono obecność rdzawych przebarwień oraz zmiany mikrotwardości i chropowatości dla elementów z nieobrobioną WW. Zarówno rodzaj materiału, stan WW instrumentarium chirurgicznego, jak też parametry procesu sterylizacji mogą wpływać na wyjściową jakość WW narzędzi chirurgicznych po sterylizacji. Rodzaj i jakość obróbki uszlachetniającej WW instrumentarium chirurgicznego mogą decydować w procesie sterylizacji o odporności korozyjnej instrumentarium. Rdzawe przebarwienia powierzchni instrumentów medycznych pojawiające się w procesie sterylizacji, świadczące o braku sterylności, tymczasowo dyskwalifikują przydatność narzędzia do praktyki lekarskiej.

Należy dodać, że pełne merytoryczne wnioskowanie w zakresie wpływu sterylizacji na stan warstwy wierzchniej instrumentarium medycznego, można przeprowadzić po bardziej szczegółowych badaniach z wykorzystaniem narzędzi z różnych materiałów i po różnej obróbce uszlachetniania warstwy wierzchniej.

Literatura

1. Materiały konferencyjne: II Międzynarodowa Konferencja – Zarządzanie Technologiami Medycznymi, Kraków 24-26 września 1996.
2. Dokumentacja techniczno ruchowa Parowego sterylizatora typu ASV.

3. **Bielicka A.:** *Sterylicacja narzędzi i materiałów medycznych*, PZWL, MZiOS, Warszawa, 1984.
4. **Suchoboków E.:** *Autoklawy sterylizacyjne*, IWZZ, Warszawa, 1981.
5. Materiały własne.

THE INFLUENCE OF THE STERILISATION ON THE DECAY OF THE SURFACE OF SURGICAL INSTRUMENTATIONS

Summary: This paper presents the results of investigations of change of the top layer (TL) of the surgical instrumentations in process of sterilisation. To execution of process of sterilisation the steriliser of type ASV was used. The tools with TL in process of production and after finish processing were examined.

Change of parameters of the TL among others such as: roughness and microhardness, after next processes of sterilisation were detected. Corrosive discolouring was observed on surface of the tools, particularly in the case of instruments with unfinished top layer.

Key words: process of sterilisation, surgical instrumentations, technological process, corrosion, parameters of top layer

Krzysztof Jaworek¹, Jolanta Pauk¹

METODA DIAGNOZOWANIA CHODU CZŁOWIEKA

Streszczenie: Przedmiotem pracy jest zaprojektowanie stacji diagnostycznej, która stanie się dostępna dla wielu ośrodków klinicznych w kraju i za granicą. Jej podstawowymi elementami są: elektrogoniometr, mata chodu oraz pakiet programów do filtrowania sygnałów biomechanicznych, szacowania chwilowej wartości mocy oraz do identyfikacji modelu dynamiki lokomocji człowieka.

1. Wprowadzenie

Badania nad lokomocją kończynową ziemskich ssaków lądowych trwają już od 2300 lat. Rozpoczął je Arystoteles, który opublikował wspaniałe traktaty pt: „O ruchu zwierząt”, „O przestrzennym poruszaniu się zwierząt”. Do roku 1873 badacz francuski E. Marey opracował aparaturę fotograficzną do rejestracji lokomocji ryb, ssaków lądowych i ptaków. Następnie przełomu w badaniach nad lokomocją dwunożną człowieka dokonał w 1916 roku Francuz Amar, który opracował, jako pierwszy, platformę dynamometryczną do rejestracji reakcji podłoża podczas chodu człowieka. W ten sposób możliwe stało się śledzenie dynamiki lokomocji człowieka. Wynalazek ten był związany z wystąpieniem bardzo licznej grupy kalek – ofiar I wojny światowej. Na początku lat osiemdziesiątych XX wieku, w Centrum Bioinżynierii w Mediolanie powstała myśl zbudowania komputerowego systemu do rejestracji ruchu wybranych znaczników (markerów) umieszczonych na ciele osób badanych i składowych sił reakcji podłoża za pomocą piezoelektrycznych platform dynamometrycznych szwajcarskiej firmy Kistler. Wieloletni wysiłek badaczy włoskich z ośrodka mediolańskiego pod kierunkiem Antonio Pedottiego, doprowadził do zbudowania systemów Elite – 2D do rejestracji ruchu dwuwymiarowego i Elite – 3D do rejestracji ruchu trójwymiarowego. Wersja Elite – 3D umożliwia przestrzenną rejestrację ruchu człowieka, rejestrację trzech składowych reakcji podłoża oraz przede wszystkim odtworzenia przebiegów mocy chwilowych rozwijanych przez zespoły mięśniowe, obsługujące trzy główne sta-

¹ Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Diagnostyki.

wy nogi człowieka, zarówno podczas chodu jak i podczas biegu, w normie i patologii. System Elite – 3D ma jedną „wadę”, kosztuje 130.000USD. Ośrodki kliniczne nie mogą sobie pozwolić na zakup tego typu aparatury badawczo-diagnostycznej. Powstała zatem myśl budowy systemu do rejestracji ruchu człowieka nie tylko w warunkach laboratoryjnych, ale również polowych, który byłby tańszy od Elite. Tego typu prace rozpoczęto w Polsce, w zespole naukowym prof. A. Moreckiego z Politechniki Warszawskiej. Badania te doprowadziły do opracowania nowej, dotychczas **niestosowanej** w biomechanice lokomocji dwunożnej człowieka metody wskaźnikowej [1]. Jednakże stosowanie pierwszej wersji tej metody, w dalszym ciągu wymagało stosowania optoelektronicznego systemu rejestracji ruchu człowieka. Weryfikację doświadczalną metody wskaźnikowej wykonano po raz pierwszy w ośrodku mediolańskim. Rozpoczęto dalsze intensywne – teoretyczne badania w zakresie połączenia metody wskaźnikowej z metodą płaszczyzny fazowej H. Poincarego. Udało się także znaleźć związki (początkowo dla fazy podporowej nogi z podłożem) dla stawu biodrowego, kolanowego i skokowo-goleniowego. Okazało się, że istnieje związek między średnią mocą rozwijaną przez główne zespoły mięśniowe, obsługujące te trzy stawy, a polem małej pętli na odpowiednich wykresach fazowych. Ten wynik umożliwił wyeliminowanie z badań nad lokomocją dwunożną człowieka:

- kosztownych platform dynamometrycznych (cena około 15.000USD),
- systemu optycznego np. Elite – 3D.

Zdecydowano się wyprodukować elektrogoniometry w firmie BaRTS w Warszawie. Jako czujniki przemieszczeń względnych zastosowano tzw. „Mechanizmy Turyńskie” opracowane początkowo przez badaczy – biomechanika amerykańskiego L. Lamoreux i włoskiego M. Goli. W 1993 roku elektrogoniometr był gotowy do prób, w warunkach krajowych. Wtedy to przystąpiono do intensywnych badań nad lokomocją człowieka. W 1995 roku zastosowano ten elektrogoniometr w Centrum Bioinżynierii w Mediolanie. Przeprowadzono cykl wspólnych badań (stosując polski elektrogoniometr i system Elite – 3D). Częstotliwość próbkowania sygnałów analogowych w obu systemach była taka sama i wynosiła 100 Hz. Badacze włoscy wyznaczyli przebiegi mocy chwilowych rozwijanych przez główne zespoły mięśniowe nogi człowieka za pomocą oprogramowania systemu Elite – 3D. Wielkości te posłużyły do wyznaczenia energetycznych wskaźników oceny lokomocji. Z kolei za pomocą polskiego elektrogoniometru i metody wskaźnikowej, wyznaczono energetyczne wskaźniki oceny dla fazy podporowej chodu człowieka, na podstawie związku metody wskaźnikowej z metodą płaszczyzny fazowej. Z porównania obu badań wynikało, że maksymalne różnice (w wyznaczaniu energetycznych wskaźników oceny) wynosiły poniżej 15% [6] [4]. Uzyskane do

tej pory wyniki ze skutecznego połączenia metody wskaźnikowej z metodą płaszczyzny fazowej umożliwiły wyeliminowanie z badań nad lokomocją:

- równań ruchu człowieka,
- kosztownych optycznych systemów rejestracji ruchu.

Niestety, metoda wskaźnikowa w połączeniu z płaszczyzną fazową była początkowo skuteczna tylko w przypadku uśrednionej mocy chwilowej, rozwijanej przez zespoły mięśniowe, zarówno w fazie podporowej jak i wymachu. Powstała myśl uzyskania mocy chwilowych tylko z wielkości kinematycznych chodu na podstawie przemieszczeń względnych głównych biomechanizmów nogi. Stało się to możliwe za pomocą sztucznych sieci neuronowych [3].

2. Własny projekt stacji diagnostycznej

Wyposażenie laboratoriów lokomocji jest bardzo kosztowne i wymaga fachowej obsługi. Jednakże nieliczne ośrodki szpitalne mogą pozwolić sobie na zakup drogiego sprzętu i na fachowy personel. Ostatnimi czasy, powszechne przekonanie badających lokomocję człowieka o nieodzowności systemów rejestracji ruchu i platform dynamometrycznych zostało zachwiane. Istniejące systemy rejestracji kinematyki i dynamiki ruchu człowieka umożliwiają wyznaczenie wartości wszystkich wielkości fizycznych, które z kolei pozwalają na wyciągnięcie odpowiednich wniosków co do postępów w rehabilitacji kończyn dolnych człowieka, w rozwoju lub zaniku choroby oraz oceny sprawności chodu. Codzienna identyfikacja ruchu człowieka może stanowić cenną wskazówkę dla lekarza, trenera, kinezyterapeuty oraz osoby badanej.

Przy zastosowaniu metod oceny chodu coraz częściej dąży się do poszukiwania minimalnej liczby parametrów, charakteryzujących w sposób pożądaný i zadowalający stan pacjenta. Z punktu widzenia praktyki szkoleniowej, dla której jednym z zasadniczych celów jest szybkie podejmowanie trafnych decyzji, korzystna jest tendencja zmierzająca do prowadzenia oceny z wykorzystaniem minimalnej liczby takich parametrów. Przedstawiona metoda [5] daje takie możliwości. W procesie identyfikacji metodą funkcji regresji, uzyskujemy dla całej kończyny dolnej, trzy parametry charakteryzujące ruch danego obiektu.

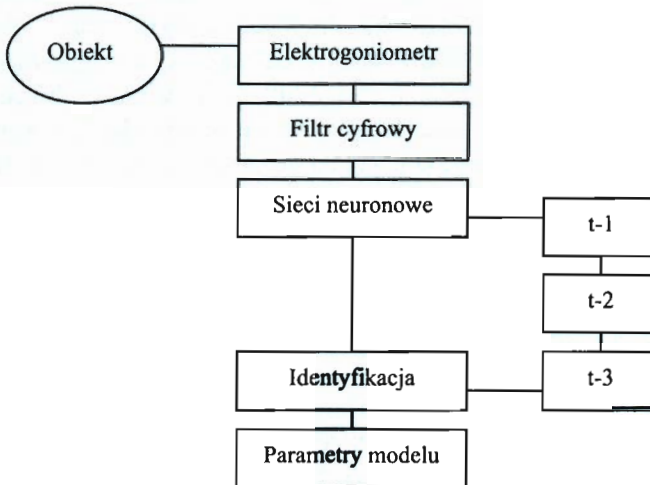
Dla badania tą metodą zaproponowano własną stację diagnostyczną do wyznaczania parametrów chodu (rys. 1). W jej skład wchodzi następujące zespoły:

- elektrogoniometr (np. firmy Penny & Giles),
- buty z wkładkami piezoelektrycznymi,
- waga miernicza,

- ciśnieniomierz,
- stacja robocza z pakietem programów:
 - do szacowania mocy średniej (sieci neuronowe [3]),
 - do identyfikacji (toolbox Identyfikacja w Matlabie),
 - do filtracji danych pomiarowych (własny cyfrowy filtr wielomianowy [2]).

Elektrogoniometr jest urządzeniem względnie tanim i prostym w obsłudze. Zbudowany jest z trzech potencjometrów zamocowanych na trzech głównych osiach ruchu kończyny dolnej: zginanie – prostowanie; odwodzenie – przywodzenie; rotacja wewnętrzna – rotacja zewnętrzna. Umożliwia pomiar wartości kątów względnych pomiędzy dwoma segmentami nogi.

Zasada działania sprowadza się do pomiaru napięcia wyjściowego, którego zmiana jest proporcjonalna do zmiany położenia kąтового w stawie. Mając wartości kątowe uzyskane przy użyciu elektrogoniometru, możemy za pomocą sztucznych sieci neuronowych obliczyć moc chwilową, rozwijaną przez poszczególne zespoły mięśniowe obsługujące stawy kończyny dolnej. Dane uzyskane z sieci poddawane są procesowi identyfikacji metodą funkcji regresji. Przed przystąpieniem do identyfikacji dane z elektrogoniometru poddawane są filtracji przy użyciu wielomianowego filtra cyfrowego.



Rys. 1. Schemat stacji diagnostycznej

Prowadzenie pomiarów i gromadzenie ich wyników wspomagane jest komputerowo, zatem oprogramowanie stanowi nadrzędną rolę w stosunku do stacji diagnostycznej. Jest zintegrowanym systemem zapewniającym przeprowadzenie

procesu identyfikacji, umożliwia diagnostykę pracy oraz realizuje następujące funkcje:

- umożliwia określenie parametrów ruchu,
- odwzorowuje chód człowieka,
- weryfikuje model.

3. Podsumowanie

Metoda wskaźnikowa okazała się po wielu latach badań doskonałym narzędziem do diagnostyki i monitorowania aparatu lokomocyjnego człowieka. W wyniku kilkunastu lat badań (przy współpracy z Centrum Bioinżynierii w Mediolanie) zauważono szczególną przydatność współczynnika ruchu człowieka $k_{v-/+}$ w diagnostyce patologii chodu (szczególnie dobrze zweryfikowano jego przydatność w hemiplegii). Można udoskonalić badania nad lokomocją, stosując metody identyfikacji. Opracowanie modelu dynamiki lokomocji człowieka metodą funkcji regresji umożliwia znalezienie różnicowego równania stanu dla mocy chwilowych rozwijanych przez zespoły mięśniowe [5]. Proponowana stacja diagnostyczna (wraz ze wskazanym oprogramowaniem) będzie doskonałym narzędziem w badaniach i ocenie chodu człowieka.

Literatura

1. **Jaworek K.:** *Metoda wskaźnikowa oceny lokomocji człowieka na przykładzie chodu i biegu*, Warszawa, 1992.
2. **Pauk J.:** *Mikrokontroler Ziloga jako wielomianowy filtr cyfrowy położenia, prędkości i przyspieszenia*, praca dyplomowa, Białystok, 2000.
3. **Derlatka M.:** *Metoda oceny energetycznej lokomocji dwunożnej człowieka*, rozprawa doktorska, Instytut Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, Warszawa, 2002.
4. **Jaworek K.:** *Energetyka w lokomocji kończynowej ssaków lądowych – w polu grawitacyjnym Ziemi* (w przygotowaniu do druku).
5. **Pauk J., Jaworek K.:** *Identyfikacja modelu dynamiki lokomocji dwunożnej człowieka na przykładzie jego chodu*”, Zeszyty Naukowe PB, nr 10, Białystok, 2002.

THE METHOD OF HUMAN GAIT DIAGNOSICS

Summary: There is presented a new diagnostic station to measuring kinematic data of human gait in this paper. The station is building from electrogoniometer, gaitrate, and software to filtering biomechanical data, estimating power developed by muscle joints, identification human gait model. The advantages of this station are simplicity and low coast.

Praca finansowana z pracy statutowej W/WM/5/98.

Krzysztof Jaworek¹, Jolanta Pauk¹

IDENTYFIKACJA MODELU DYNAMIKI LOKOMOCJI DWUNOŻNEJ CZŁOWIEKA NA PRZYKŁADZIE JEGO CHODU

Streszczenie: Przedmiotem pracy są zagadnienia poszukiwania, a następnie wykorzystania modelu matematycznego chodu człowieka. Model został opracowany na podstawie przebiegów czasowych (chwilowych wartości mocy rozwijanych przez poszczególne zespoły mięśniowe, obsługujące główne stawy kończyny dolnej). Badania wykazały, że identyfikacja modelu dynamiki lokomocji metodą funkcji regresji pozwala na wyznaczenie modelu matematycznego, który dokładnie odwzorowuje rzeczywisty proces w zakresie umożliwiającym ocenę aparatu ruchu pacjenta.

1. Wprowadzenie

Złożoność układu ruchu człowieka wymaga prowadzenia badań teoretycznych za pomocą uproszczonych modeli. Wybór właściwego modelu opiera się na doborze odpowiedniej liczby stopni swobody, ustaleniu jego kinematyki i dynamiki [9]. Klasyczna procedura układania równań ruchu staje się mało efektywna przy dużej liczbie stopni swobody modelu, dlatego też do ich generowania stosuje się obecnie programy komputerowe (np. komputerowy model lokomocji stanowi zestaw programów opracowanych w Matlabie).

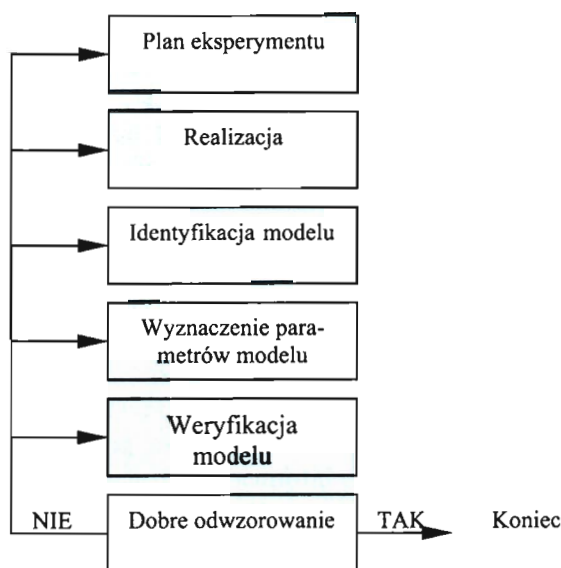
Identyfikacja obiektów i procesów biomechanicznych ma szczególne znaczenie (m.in. do określenia możliwości ruchowych układu mięśniowo-szkieletowego, w procesie monitorowania i korygowania chodu pacjentów oraz przy projektowaniu protez kończyn dolnych) wobec faktu, że własności dynamiczne układu ruchu człowieka są słabo poznane, a praw rządzących sterowaniem motorycznością ludzką dotychczas do końca nie odkryto. Wszędzie tam, gdzie postawione jest zadanie sterowania za pomocą komputera, informacje o badanym obiekcie powinny być ujęte w formę modelu matematycznego. Nie stworzono dotąd pełnej teorii mode-

¹Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Diagnostyki.

lowania, niemniej jednak okazało się, że szczególnie skutecznymi metodami identyfikacji układów biologicznych są metody wywodzące się z cybernetyki [6,8].

2. Metoda identyfikacji modelu dynamiki chodu człowieka

Celem identyfikacji badanego układu jest określenie modelu matematycznego. Wybór struktury i postaci modelu jest w praktyce podyktowany jego planowanym zastosowaniem i własnościami obiektu. Rzeczywiste obiekty mogą być w dużej mierze modelowane za pomocą liniowych modeli określonego rzędu. Metody „poprawnego” wyznaczenia modelu opierają się na założeniu statystycznym, że dane pochodzą z obiektu rzeczywistego, mieszczą się w rozważanej klasie modeli. Pierwszy etap procedury identyfikacyjnej polega na zgromadzeniu danych doświadczalnych, dotyczących badanego układu. Na wejście układu podaje się wymuszenia czy zakłócenia w postaci standardowych sygnałów próbnych i jednocześnie przeprowadza się rejestrację sygnałów wyjściowych, które niosą informacje, pozwalające zidentyfikować badany układ (rys. 1). Rozpatrywany w pracy model przyjęto w postaci różnicowych równań ruchu, opisujących związki pomiędzy chwilowymi wartościami mocy rozwijanymi przez poszczególne zespoły mięśniowe kończyn dolnych człowieka.



Rys. 1. Identyfikacja procesu

Współczynniki uzyskane z modelu umożliwiają przeprowadzenie klasyfikacji osób badanych do jednej z dwóch grup: normy i patologii. Wykorzystane dane pochodzą z Centrum Bioinżynierii w Mediolanie (z laboratorium lokomocji S.A.F.Lo). Przebadano 15 osób w normie i 30 osób z hemiplegią.

Identyfikację przeprowadzono metodą funkcji regresji [2]. Model procesu rzeczywistego (chodu człowieka) można zatem przedstawić dla n -tego pomiaru następującą zależnością:

$$Y_n = \underline{U}_n \cdot \underline{a}, \quad (2.1)$$

$$\underline{U}_n = [Y_{n-1} Y_{n-2} \dots Y_{n-k}] \quad (2.2)$$

$$\underline{a} = [a_1 a_2 \dots a_k]^T \quad (2.3)$$

Przy wykorzystaniu metody regresji parametry modelu (dla $n = 0, 1, 2, \dots, 152$) określone są równaniem [2]:

$$\underline{a} = (\underline{U}^T \cdot \underline{U})^{-1} \cdot (\underline{U}^T \cdot \underline{Y}) \quad (2.4)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} \quad \underline{U} = \begin{bmatrix} Y_2 & Y_1 & Y_0 \\ Y_3 & Y_2 & Y_1 \\ Y_4 & Y_3 & Y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_N & Y_{N-1} & Y_{N-3} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

gdzie:

N – liczba pomiarów,

Y_n – wartość wielkości wyjściowej (moc chwilowa rozwijana przez poszczególne zespoły mięśniowe obsługujące staw biodrowy, kolanowy i skokowo-goleniowy),

\underline{a} – macierz kolumnowa poszukiwanych współczynników,

\underline{U}_n – macierz wierszowa wielkości wejściowych (analogicznie jak Y_n wyrazy są chwilowymi wartościami mocy rozwijanych przez poszczególne zespoły mięśniowe).

3. Uzyskane wyniki

W wyniku przeprowadzonej identyfikacji metodą funkcji regresji uzyskano model matematyczny odwzorowujące chód człowieka, w płaszczyźnie strzałkowej, w polu grawitacyjnym Ziemi. Dzięki uzyskanym parametrom chodu możliwe jest zakwalifikowanie badanych osobników do normy i patologii. Poniżej przedstawiono parametry charakteryzujące poszczególne stawy kończyny dolnej.

Tabela 1.

Wyniki identyfikacji modelu ruchu człowieka – norma (± 0.006)

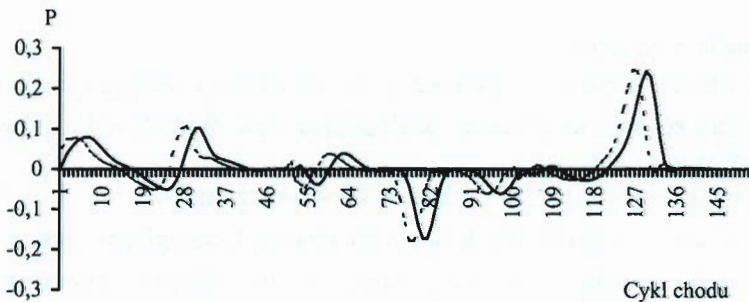
	Faza podporowa			Faza wymachu		
	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
Biodrowy	1.0478	0.1698	-0.4084	1.6001	-0.6118	-0.0276
Kolanowy	0.6134	0.6731	-1.0551	1.6601	-1.0003	0.2317
Skokowy	0.0073	3.7363	-3.7269	1.2447	-0.5914	0.1444

Tabela 2.

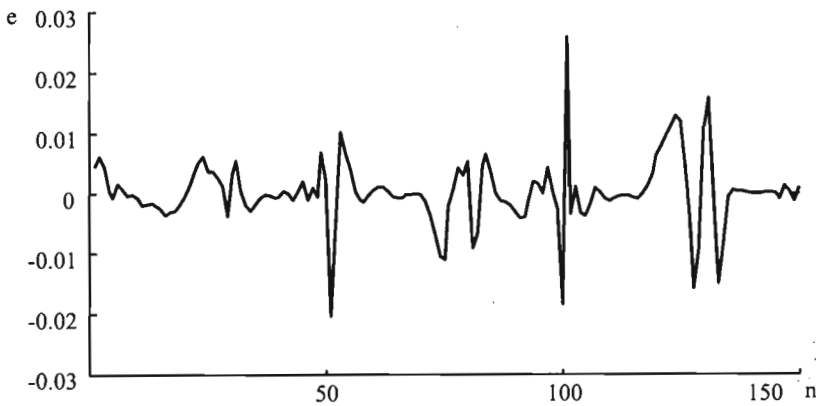
Wyniki identyfikacji modelu ruchu człowieka – hemiplegia (± 0.05)

	Faza podporowa			Faza wymachu		
	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
Biodrowy	0.8469	0.2145	-0.4270	0.5312	0.0818	-0.0673
Kolanowy	0.7141	0.1028	-0.4677	1.9321	-1.5223	0.4755
Skokowy	0.1158	2.7211	-3.7812	0.8572	-0.4797	0.1267

Poniższy wykres przedstawia porównanie przebiegów czasowych otrzymane z eksperymentu biernego i identyfikacji modelu. Linia ciągła przedstawia dane uzyskane z pomiarów, linia przerywane – dane z identyfikacji. Błąd odwzorowania wynosi około 2%.



Rys. 2. Odwzorowanie wyników rzeczywistych przez model (norma)



Rys. 3. Błąd odwzorowania pomiarów rzeczywistych przez model

4. Wskaźniki jakości identyfikacji modelu

Stosowane metody identyfikacji [2, 3, 8] pozwalają na określenie ilościowej i jakościowej dokładności odwzorowania rzeczywistości. W pracy przedstawiono wskaźniki oceny jakości identyfikacji. Jednym z bardzo istotnych jest współczynnik korelacji R , który określa stopień powiązań pomiędzy sygnałami. W przypadku, gdy $|R| = 1$, sygnały są liniowo zależne. Inne to wariancja resztkowa S^2 oraz odchylenie wartości współczynnika obiektu ($\Delta a, \Delta b, \Delta c$) z prawdopodobieństwem 0,95 (przedział ufności współczynników obiektu). Zależności umożliwiające wyznaczenie tych wskaźników określono na podstawie identyfikacji obiektów oraz wyników podanych w literaturze probabilistyki [10]. Poniższe tabele zawierają zestaw wskaźników do oceny identyfikacji.

Tabela 3.

Wskaźniki jakości identyfikacji modelu

	R	S^2	Δa	Δb	Δc
Norma	0.9957	2.8837e-005	0.0327	0.0326	0.0326
Hemiplegia	0.9962	2.1318e-006	0.0311	0.0311	0.0311

Wskaźniki jakości identyfikacji wyznaczono przyjmując, że zakłócenia charakteryzują się rozkładem normalnym, prawie pełną korelacją, zerową wartością średnią i są stochastycznie niezależne. Poprawność przyjętych założeń można ocenić na podstawie różnic pomiędzy wartościami wyjść modelu i obiektu e_n . Powyższe wartości decydują o poprawności przyjętego modelu oraz o adekwatności wyników z przeprowadzonego eksperymentu do poszukiwanego modelu.

Obliczenia wartości wymienionych wielkości mogą być przydatne do określenia stopnia dopuszczalnych uproszczeń rozpatrywanego modelu.

5. Podsumowanie

Znajomość modelu matematycznego wraz z wynikami eksperymentu i wykorzystaniem metod identyfikacji pozwala na wyznaczenie współczynników równania. Przedstawione w pracy wyniki, otrzymane z modelu i pomiarów na rzeczywistym obiekcie, wskazują na dobre odwzorowanie chodu człowieka przez opracowany model. Warto tu podkreślić, że w zakresie odpowiadającym wykorzystywanym danym z eksperymentu (co jest istotą przyjętej metodologii) otrzymane parametry chodu człowieka mogą być stosowane do oceny postępów rehabilitacji. W przyszłości przedstawiona metoda identyfikacji będzie rozszerzona na badania dotyczące zastosowania jej także do oceny doboru protez.

Literatura

1. **Jaworek K.:** *Metoda wskaźnikowa oceny lokomocji człowieka na przykładzie chodu i biegu*, Warszawa, 1992.
2. **Manerowski J.:** *Identyfikacja modeli dynamiki ruchu sterowanych obiektów latających*, Warszawa, 1999.
3. **Lewitowicz J., Manerowski J., Żmudziński Z.:** *Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej 1*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa, 1993.
4. **Lewitowicz J., Manerowski J., Żmudziński Z.:** *Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej 4*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa, 1999.
5. **Soderstrom T., Stoica P.:** *Identyfikacja systemów*, Wydawnictwa Naukowe PWM, 1997.
6. **Tadeusiewicz R.:** *Problemy Biocybernetyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1994.
7. **Pauk J.:** *Mikrokontroler Ziloga jako wielomianowy filtr cyfrowy położenia, prędkości i przyspieszenia*, praca dyplomowa (promotor K. Jaworek), Biały-stok, 2000.
8. **Derlatka M.:** *Metoda*, rozprawa doktorska, Instytut Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, Warszawa, 2002.

9. **Bober T., Zawadzki J.:** *Biomechanika układu ruchu człowieka*, Wydawnictwo BK, Wrocław, 2001.
10. **Mańczak K, Nahorski Z.:** *Komputerowa identyfikacja obiektów dynamicznych*, PWN, Warszawa, 1983.

**THE IDENTIFICATION OF DYNAMICS MODEL
OF HUMAN LOCOMOTION ON THE EXAMPLE OF GAIT**

Summary: The paper presents a new method, which could be used in bioengineering as assessment of walking recovery. The method is based on identification's model, using regression function. Method very accurately reflects real data from experiment by model.

Praca finansowana z pracy własnej W/WM/9/02.

Marcin Jermołaj, Michał Kuciej

BADANIA DRGAŃ PRZEKŁADNI ZĘBATEJ MASZyny DZIEWIARSKIEJ TERROT TYP MP - 2

Streszczenie. Celem pracy jest badanie drgań napędowej przekładni zębatej maszyny dziewiarskiej, cylindrycznej Terrot, typu MP-2. Badania przeprowadzono w warunkach przemysłowych pracy przekładni w temperaturze pokojowej. Drgania mierzone były przy pomocy piezoelektrycznych przetworników drgań typu CP- 03(2,3), umieszczonych na obudowie przekładni w punktach podparcia wałków, na poziomej osi x i pionowej y . W pracy przedstawiono charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe drgań przekładni mechanicznej oraz wykonano ich analizę widmową.

Słowa kluczowe: drgania, charakterystyki częstotliwościowe i amplitudowe, analiza widmowa

Wstęp

Wibracje występujące w układach konstrukcji maszyn są realnym zagrożeniem niezawodności maszyn, wytrzymałości składowych elementów konstrukcyjnych i bezpieczeństwa obsługi tych maszyn. Ważnym jest zatem obecnie problem diagnostyki wibromaszyn i prognozowanie wymaganego poziomu drgań i hałasu. Procesy wibracji, tj. drgania i hałas występują w układach materialnych jednocześnie. Pierwsze z nich zachodzą w ciele stałym, hałas zaś rozprzestrzenia się w środowisku płynnym lub gazowym. Drgania i hałas, jako złożone procesy drganiowe, przedstawiane są obecnie w pracach badawczych nad wibracją [1, 2, 3] w postaci harmonicznego ruchu drgającego. Średnie kwadratowe przemieszczenie podczas drgań [4] opisuje wyrażenie w postaci

$$X = \left[\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (1.1)$$

gdzie:

$$X(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi_0);$$

$X(t)$ – przemieszczenie punktu w ruchu harmonicznym,

A – amplituda przemieszczenia,

f – częstotliwość drgań,

φ_0 – kąt przesunięcia fazowego.

Okresowa powtarzalność procesu drgań w czasie daje możliwość rozwinięcia funkcji $X(t)$ w szereg Fouriera [4] w postaci

$$X(t) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (1.2)$$

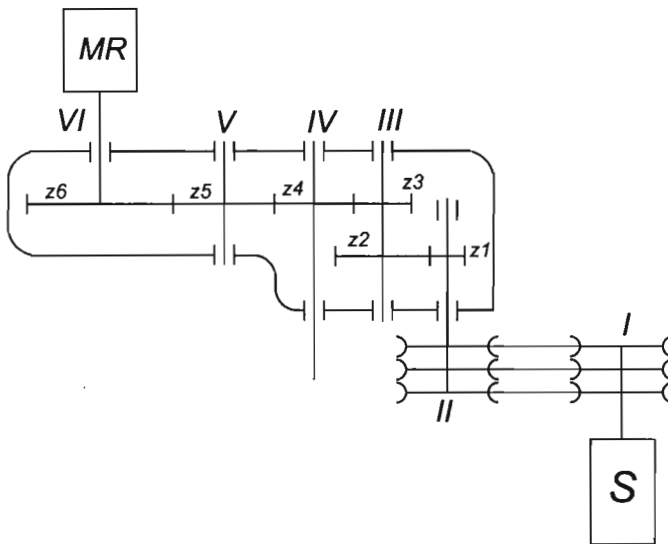
Średnia kwadratowa $X(t)$ dla takiego procesu daje możliwość przedstawienia jej w postaci dyskretnych składowych drgań harmonicznym.

Na uwagę zasługuje generacja drgań w przekładniach zębatych [5]. Każdy element przekładni zębatej, jako ciało sprężyste, daje się pobudzać do drgań, przy czym nie wydaje on jednego czystego tonu o ściśle określonej częstotliwości, lecz dość szerokie widmo. Największa moc wydzielana jest w kołach zębatych przy częstotliwości zazębienia i jej harmonicznym. Charakter drgań występujących w przekładniach zależy znacznie od ich rodzaju, dlatego bada się koła zębate zarówno na stanowiskach laboratoryjnych, jak też kompletne przekładnie na stanowiskach przemysłowych. Zarówno niewyważenie kół, jak też ich mimośrodowe osadzenie na wale, a także odchyłka kinematyczna zazębienia, są przyczyną powstawania drgań o niskiej częstotliwości lub modulowania drgań o wysokiej częstotliwości. Podczas pracy przekładni występują, energetycznie istotne częstotliwości nośne drgań, które mogą być wykorzystane jako częstotliwości środkowe pasm diagnostycznie informacyjnych. Drgania te mogą być wymuszone przez zazębienie pary kół zębatych oraz elementy łożysk tocznych.

1. Cel pracy, eksperyment i metoda pomiarów drgań

Celem pracy jest badanie drgań przekładni zębatej, maszyny dziewiarskiej TERROT typu MP -2, wyznaczenie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych i analiza widmowa.

Pomiary drgań wykonano dla napędowej przekładni zębatej, zamontowanej na maszynie dziewiarskiej cylindrycznej Terrot typ MP-2 w warunkach przemysłowych. Schemat kinematyczny przekładni przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat kinematyczny przekładni napędowej maszyny dziewiarskiej

Badania zrealizowano w roboczych warunkach pracy przekładni, przy prędkości obrotowej wałka II wejściowego (rys. 1), wynoszącej 2122 obr./min. Drgania mierzone były przy pomocy piezoelektrycznych przetworników drgań typu CP-03(2,3), umieszczonych na obudowie przekładni w punktach podparcia wałów, na poziomej osi x i pionowej y . Analizę częstotliwości i amplitud dla różnych harmonicznych przeprowadzono za pomocą analizatora drgań typu KSD – 400. Pomiary wykonano w temperaturze pokojowej.

W metodzie badań wykorzystano program „ATLAS” oraz program „Częstotliwości” do obliczania częstotliwości ząbienia się poszczególnych par współpracujących kół zębatach oraz częstotliwości drgań łożysk, które obejmują częstotliwości uszkodzenia pierścienia zewnętrznego i wewnętrznego łożyska oraz częstotliwości odkształconych elementów tocznych łożyska.

Wymienione częstotliwości obliczano (przy pomocy programu o nazwie „ATLAS”, napisanego dla firmy SKF BEARING), według następujących wzorów [5]:

– częstotliwość ząbienia f_z oraz częstotliwości harmoniczne ząbienia f_{zk}

$$f_z = \frac{n_1 z_1}{60} = \frac{n_2 z_2}{60} = f_1 z_1 \quad (1.3)$$

$$f_{zk} = n f_z \quad (1.4)$$

gdzie:

$$f_1 = n_1/60,$$

z_1, n_1 – liczba zębów i obroty małego koła,

z_2, n_2 – liczba zębów i obroty dużego koła,

n – kolejne harmoniczne,

– częstotliwość wirowania koszyka f_{ks}

$$f_{ks} = \frac{1}{2} f_w \left(1 - \frac{d}{D_{sr}} \cos \beta\right) \quad (1.5)$$

– częstotliwość bieżni zewnętrznej f_{zb}

$$f_{zb} = \frac{1}{2} f_w z \left(1 - \frac{d}{D_{sr}} \cos \beta\right) \quad (1.6)$$

– częstotliwość bieżni wewnętrznej f_{wb}

$$f_{wb} = \frac{1}{2} f_w \left(1 + \frac{d}{D_{sr}} \cos \beta\right) \quad (1.7)$$

– częstotliwość obrotowa kulki f_k

$$f_k = \frac{1}{2} f_w \frac{D_{sr}}{d} \left[1 - \left(\frac{d}{D_{sr}} \cos \beta\right)^2\right] \quad (1.8)$$

– częstotliwość przetaczania odkształconej kulki po obu bieżniach f

$$f = 2f_k = f_w \frac{D_{sr}}{d} \left[1 - \left(\frac{d}{D_{sr}} \cos \beta\right)^2\right] \quad (1.9)$$

– częstotliwość drgań własnych pierścienia zewnętrznego f_{wz}

$$f_{wz, k-1} = \frac{k(k^2 - 1)}{\sqrt{(k^2 + 1)}} \frac{1}{(D_{sr} + d)^2} \sqrt{\frac{EI_z}{\rho F}} \quad (1.10)$$

– częstotliwość drgań własnych kulki f_{wk}

$$f_{wk} = \frac{0,848}{d} \frac{E}{2\rho} \quad (1.11)$$

gdzie:

I_z – moment bezwładności,

ρ – gęstość materiału,

$k = 2, 3 \dots$ odpowiednio przy obliczaniu kolejnych harmonicznych,

f_w – względna częstota obrotowa obu pierścieni,

d – średnica otworu,

D – średnia średnica bieżni łożyska,

z – liczba elementów tocznych,

β – kąt styku,

F – pole przekroju,

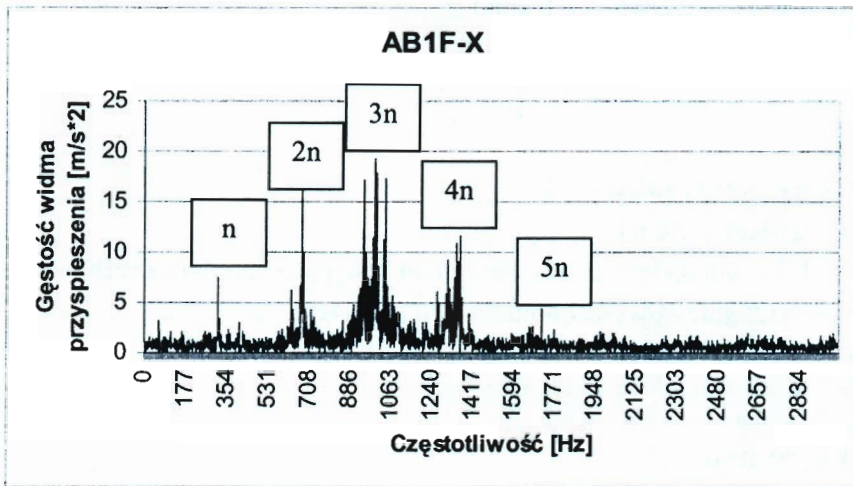
E – moduł Younga.

Obliczeniowe wartości częstotliwości wyznaczano na każdym wale przekładni zębatej. Kolejno obliczano częstotliwość zazębienia, według wzorów (1.3÷1.4), oraz częstotliwość wymuszenia w łożyskach tocznych (pierścienia zewnętrznego i wewnętrznego koszyczka elementów tocznych), według wzorów (1.5÷1.11). Do analizy brano wartość wyższą spośród częstotliwości zazębienia i drgań łożysk.

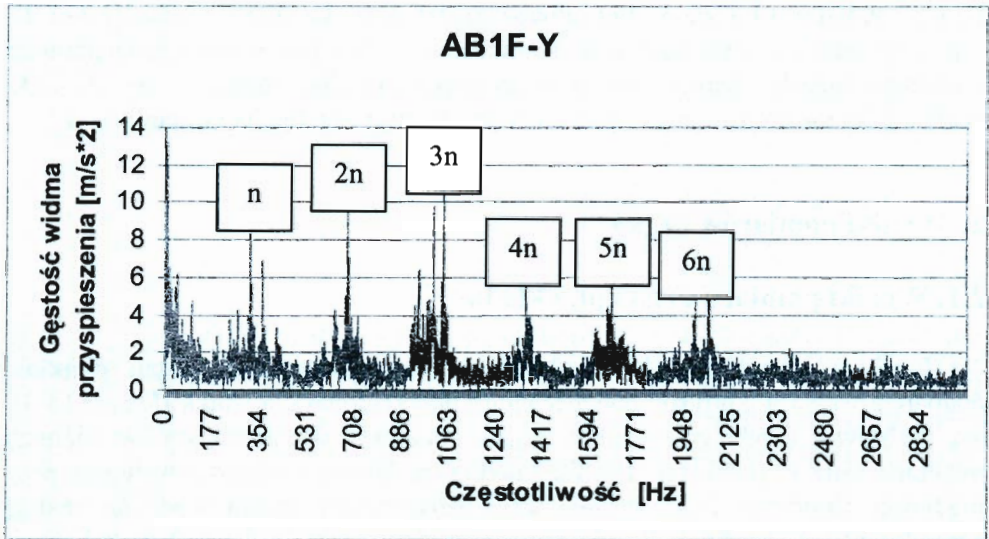
2. Wyniki pomiarów drgań

2.1. Wyniki pomiaru drgań przekładni

Przebieg charakterystyki częstotliwościowo-amplitudowej drgań punktów podparcia wałka w korpusie przedstawiono przykładowo dla wałka II (rys. 2 i 3). Na podstawie przebiegów widma drgań obudowy, wyznaczonych w różnych punktach badanej przekładni (tj. dla punktów podparcia każdego z wałków), przy prędkości obrotowej 2122 obr/min wału wejściowego, przeprowadzono analizę częstotliwości i amplitud dla pierwszych sześciu częstości drgań, tj. kolejnych harmonicznych $n \div 6n$. Wartości pomiarowe częstotliwości widmowej, odpowiadające największym wartościom amplitudy oraz wartości gęstości widmowej przyspieszenia dla różnych punktów podparcia wałków w obudowie zestawiono w tabelach 1 i 2.



Rys. 2. Zależność gęstości widmowej przyspieszenia od częstotliwości w płaszczyźnie prostopadłej do osi wałów, wzdłuż osi poziomej x



Rys. 3. Zależność gęstości widmowej przyspieszenia od częstotliwości w płaszczyźnie prostopadłej do osi wałów, wzdłuż osi pionowej y

Tabela 1.

Wartości pomiarowe i obliczeniowe częstotliwości drgań [Hz]

częstość częstotliwość		n	$2n$	$3n$	$4n$	$5n$	$6n$
		Obliczeniowa		350,00	700.0	1050.0	1400.0	1750.0	2100.00
Pomiarowa	AB1F-x	324.00	680.0	998.0	1360.0	1730.0	—
	AB1F-y	317.00	677.3	1001.6	1354.0	1675.0	1986.43
	CD1F-x	313.30	672.5	977.7	1355.9	1656.6	2028.20
	CD1F-y	303.90	673.8	940.0	1336.8	1650.3	—
	CD2F-x	313.55	672.5	995.7	1355.9	1659.9	2020.00
	CD2F-y	320.50	673.7	931.1	1336.8	—	—
	EF1F-x	308.80	663,0	1031.6	1353.5	—	—
	EF1F-y	305.20	625.9	939.4	1353.5	—	—
	EF2F-x	303.90	672.6	1038.2	1366.7	—	—

Tabela 2.

Wartości pomiarowe amplitud przyspieszeń drgań [m/s^2]

częstość amplituda		n	$2n$	$3n$	$4n$	$5n$	$6n$
		Pomiarowa	AB1F-x	3.42	9.80	19.30	10.4	1.76	—
AB1F-y	7.80		9.50	10.70	5.8	5.67	5.28
CD1F-x	5.47		13.78	8.35	6.55	5.28	8.06
CD1F-y	5.96		5.42	12.36	5.18	2.25	—
CD2F-x	5.47		12.7	5.23	6.55	6.45	4.25
CD2F-y	7.52		5.57	9.20	5.18	—	—
EF1F-x	6.40		12.60	19.79	27.6	—	—
EF1F-y	0.59		10.16	16.70	17.9	11.30	—
EF2F-x	4.30		21.50	19.80	21.3	—	—

W tabelach 1, 2 wprowadzono oznaczenia, gdzie: $n, 2n, \dots, 6n$ – kolejne harmoniczne, tj. kolejne częstotliwości drgań; AB1F, CD1F.....EF2F – nazwy plików z zapisem danych pomiarowych drgań punktów podparcia w obudowie kolejnych wałków przekładni zębatej, odpowiednio w kierunku x i y .

Częstotliwości obliczeniowe wyznaczano odpowiednio ze wzorów (1.3÷1.11). W zestawieniach podano wyższą wartość, spośród częstotliwości ząbienia i drgań łożysk.

2.2. Analiza wyników pomiaru drgań

Z zestawienia wartości amplitud przyspieszeń drgań w kierunkach x, y (tab. 2) wynika, że małe amplitudy przyspieszeń występują przy wyższych harmonicznym w różnych punktach obudowy przekładni. Maksymalna wartość wypadkowej amplitudy drgań obudowy, z dwóch kierunków x, y punktów podparcia poszczególnych wałków przekładni, występuje przy różnych harmonicznym (tab. 3).

Tabela 3.
Maksymalne wartości amplitud wypadkowych i ich harmoniczne

Numer wałka	Maksymalna amplituda [m/s^2]	Kolejna harmoniczna
II	22	3
III	15	3
IV	13.9	2
V	32.9	4

3. Wnioski

1. Badania wykazały, że małe wartości amplitudy przyspieszeń występują przy wyższych harmonicznym w kolejnych punktach obudowy przekładni zębatej.
2. Maksymalna wartość amplitudy wypadkowej drgań występuje przy czwartej harmonicznym w punktach podparcia wałka V, z którym skojarzone jest koło zębate, zazębiające się z kołami dwóch sąsiednich wałków.
3. Porównanie najniższej wartości częstotliwości pomiarowej z wartością obliczeniową częstotliwości zazębienia wykazuje, że wartość pomiarowa częstotliwości, dla harmonicznym $2n \div 6n$, jest mniejsza od obliczeniowej o około 5%.

Literatura

1. Cempel C.: *Wibroakustyka stosowana*. PWN, Warszawa – Poznań, 1978.
2. Cempel C.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. WNT, Warszawa, 1982.
3. Osiński Z.: *Tłumienie drgań*. PWN, Warszawa, 1997.

4. **Hwingia M. V., Zviadauri V. S., Kopaliani N. D.:** *Genierirovanie kolebanii i akustičeskaja diagnostika v vibracionnyh mašinach*. Mecniereba, Tbilisi, 1982.
5. **Muller L.:** *Przekładnie zębate badania*. WNT, Warszawa, 1984.

INVESTIGATIONS OF VIBRATION OF TOOTHED GEAR KNITTING TERROT MACHINE OF TYPE MP – 2

Summary: The aim of paper is examining of vibration of toothed gear knitting TERROT machine of type MP – 2. Investigations were made in industrial work conditioned of gear in room temperature. Measurement of vibrations carried out by two acceleration transducers placed on casing of gear in surface perpendicular to axis of shafts along horizontal axis x and perpendicular y . In this paper was executed analysis of spectral vibrations and amplitude - frequency characteristics of mechanical gear vibrations.

Waldemar Kołodziejczyk¹, Michał Łukaszuk²

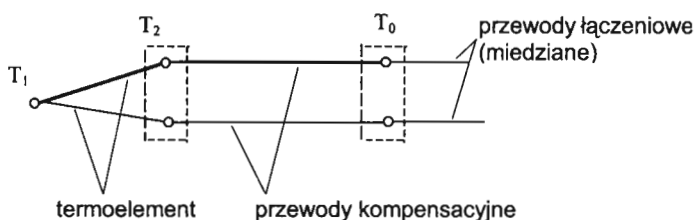
STABILIZACJA TEMPERATURY ODNIESIENIA PODCZAS DŁUGOTRWAŁYCH POMIARÓW TEMPERATURY

Streszczenie: W pracy przedstawiono urządzenie do stabilizacji temperatury odniesienia (punktu topnienia lodu) przy długotrwałych pomiarach temperatury czujnikami termoelektrycznymi.

Słowa kluczowe: pomiary temperatury, temperatura odniesienia, termoelementy

1. Wprowadzenie

Pomiary temperatury są pomiarami podstawowymi w wielu badaniach eksperymentalnych. Spośród różnych czujników temperatury stosowanych w praktyce laboratoryjnej szczególne znaczenie, ze względu na ich małe rozmiary, mają termoelementy umożliwiające wyznaczenie rozkładów temperatury.



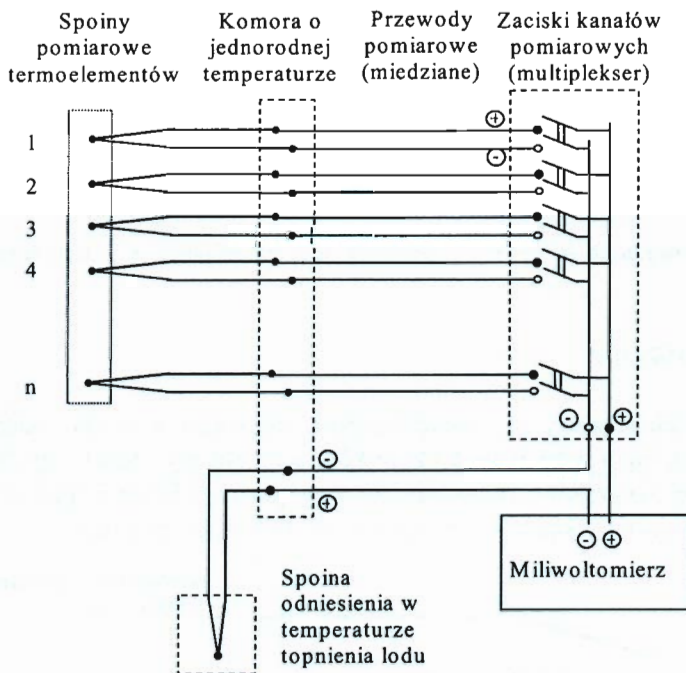
Rys. 1. Termoelement z przewodami kompensacyjnymi

Stosowanie metody pomiarowej opartej na termoelementach wymaga przygotowania źródła temperatury odniesienia o znanej wartości, stałej w czasie.

¹ Katedra Mechatroniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45C, 15-351, Białystok.

² Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok.

Podstawowy (jednopunktowy) układ pomiarowy buduje się w ten sposób, że wolne końce termoelementu przedłuża się przewodami kompensacyjnymi (dobieranymi do używanego typu termoelementu, zgodnie z zaleceniami producenta), te zaś łączy się przewodami miedzianymi, jak na rysunku 1, tworząc spoiny odniesienia. Końce przewodów kompensacyjnych ze spoinami umieszcza się w stałej i znanej temperaturze odniesienia T_0 .



Rys. 2. Układ wielu termopar ze wspólną spoiną odniesienia [1, 2]

W przypadku pomiaru wielopunktowego istnieje problem dużej wiązki przewodów kompensacyjnych, których końce należy umieścić w miejscu o stałej temperaturze odniesienia T_0 . Stosuje się wtedy układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 2, w którym wiele spoin odniesienia zastępuje się jedną [1]. Musi być ponadto spełniony dodatkowy warunek, polegający na tym, że wszystkie złącza przewodów kompensacyjnych i miedzianych znajdowały się w jednakowej temperaturze. W praktyce wystarczającym zabiegiem jest umieszczenie wszystkich tych złączy w izolowanym pojemniku.

Dokładność pomiaru w układach z termoelementami jest ściśle uzależniona od stałości temperatury odniesienia T_0 . Ma to szczególne znaczenie w pomiarach niewielkich różnic temperatury. Za wartość temperatury T_0 najczęściej przyjmuje się fizyczne punkty stałe, takie jak punkt potrójny wody $0,01^\circ\text{C}$ lub punkt topnienia lodu -0°C . W tym ostatnim przypadku, eliminując konieczność uzupełniania lodu w termosie, buduje się układy samoczynne z wykorzystaniem elementów chłodzących i dokładnej regulacji opartej na zmianie objętości mieszaniny wody z lodem [2]. W praktyce przemysłowej stosuje się również automatycznie stabilizowane źródła temperatury, zbudowane z regulatora temperatury i grzałki elektrycznej.

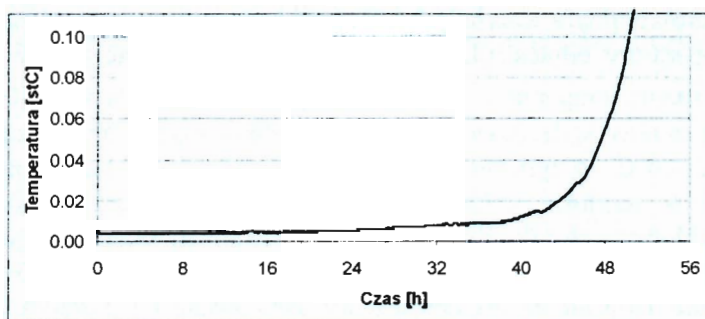
Istnieją również rozwiązania techniczne oparte na modułach termoelektrycznych i precyzyjnych regulatorach temperatury, pozwalające utrzymywać poziom 0°C z dokładnością $\pm 0.05^\circ\text{C}$ i stabilnością $\pm 0.01^\circ\text{C}/10\text{min}$. [4]. W ostatnich latach do stabilizacji temperatury odniesienia stosuje się termostaty z ciepłowodem (0°C). Charakteryzują się one stabilnością temperatury $\pm 0.03^\circ\text{C}$ w czasie 24 godzin lub $\pm 0.05^\circ\text{C}$ w ciągu trzech miesięcy [3].

2. Potrzeba stabilizacji temperatury odniesienia

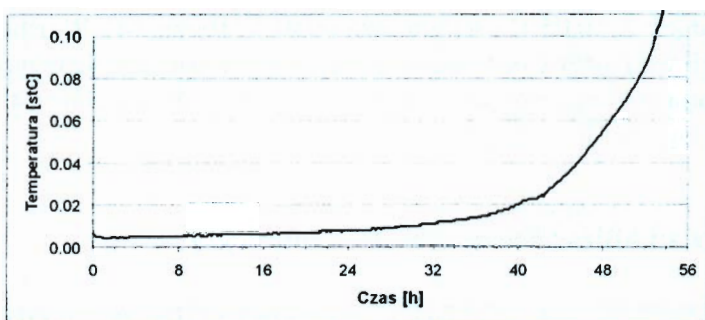
W pomiarach laboratoryjnych jako temperaturę odniesienia stosuje się najczęściej punkt topnienia lodu, czyli temperaturę odpowiednio przygotowanej mieszaniny wody destylowanej z drobno potłuczonym lodem. Końce przewodów ze spinami odniesienia zanurza się w probówce wypełnionej olejem [2], umieszczonej w termosie z tak przygotowaną mieszaniną.

Opisane rozwiązanie jest wystarczające w pomiarach krótkotrwałych. W pomiarach kilkudziesięciogodzinnych ma miejsce wzrost temperatury mieszaniny wraz z upływem czasu na skutek wymiany ciepła z otoczeniem. Szybkość tych zmian zależy m.in. od temperatury otoczenia, wielkości naczynia, sposobu izolacji. Na rysunku 3 pokazano przyrost temperatury mieszaniny umieszczonej w nieizolowanym termosie o pojemności 1l w zależności od czasu.

Rysunek 4 natomiast przedstawia zmiany temperatury mieszaniny w tym samym termosie izolowanym w sposób pokazany na rysunku 5. Termos z mieszaniną wody z lodem umieszczony został w dodatkowym pojemniku. Pojemnik wykonano w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 23 cm 23 cm 30 cm ze szkła organicznego o grubości 10 mm. Na zewnątrz obłożony został płytami ze styropianu o grubości 50 mm.



Rys. 3. Zmiana temperatury mieszaniny w termosie nieizolowanym, średnia temperatura otoczenia 19.8°C

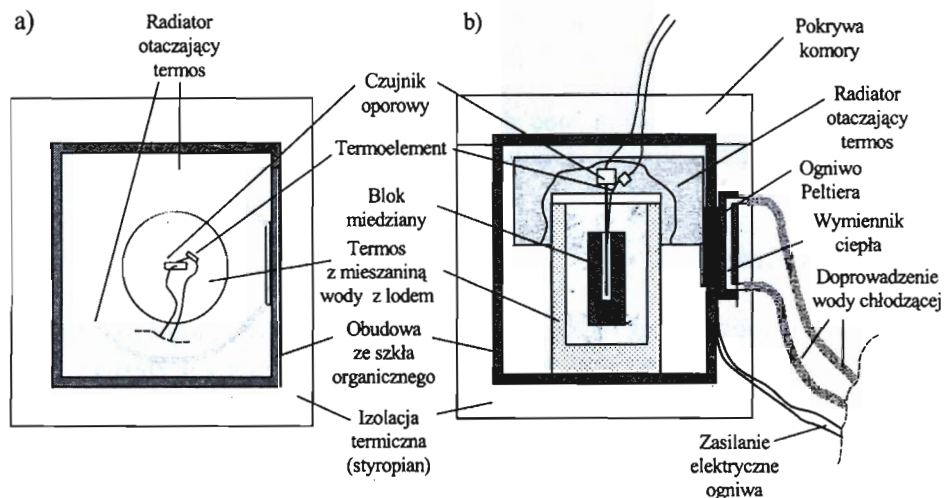


Rys. 4. Zmiany temperatury mieszaniny w termosie izolowanym, średnia temperatura otoczenia 20.1°C

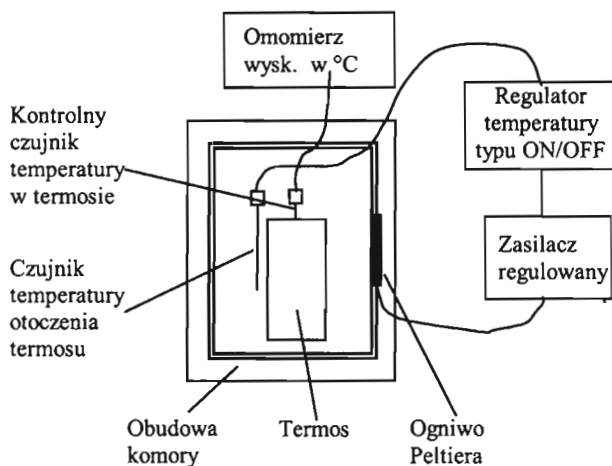
Obydwa pomiary wykazują istotne zmiany temperatury odniesienia po upływie kilkudziesięciu godzin. Izolacja termosu spowodowała jedynie wolniejszy wzrost temperatury po 40 godzinach pomiaru. Otrzymane wyniki wskazują więc na potrzebę dodatkowej stabilizacji temperatury odniesienia w pomiarach długotrwałych.

3. Koncepcja urządzenia do stabilizacji temperatury odniesienia

W niniejszej pracy przedstawiono urządzenie, którego zasada działania oparta jest na minimalizacji wpływu temperatury otoczenia na temperaturę mieszaniny wody z lodem.



Rys. 5. Budowa komory izolacyjnej wraz z układem chłodzącym, a) widok z góry bez pokrywy, b) przekrój



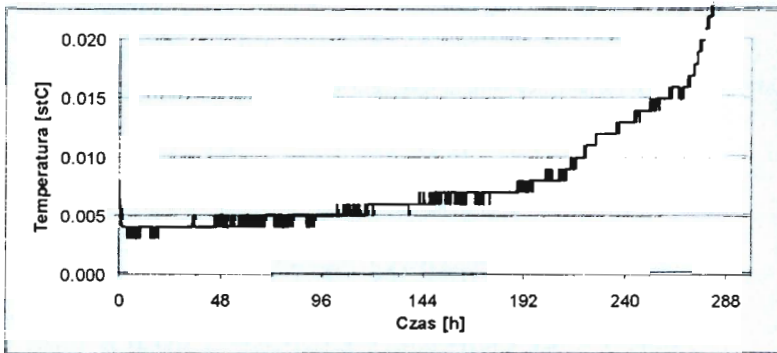
Rys. 6. Schemat układu regulacji

Regulacji podlega temperatura powietrza otaczającego termos w komorze izolacyjnej (rys. 5). Jako element chłodzący zastosowano ogniwo Peltiera o mocy 54 W [5]. Do strony chłodzącej ogniwa przymocowano odpowiednio wyciętą i ukształtowaną blachę aluminiową (radiator). Ponieważ temperatura strony grzejnej ogniwa osiąga 80°C, zaistniała konieczność jej chłodzenia. W tym celu zamo-

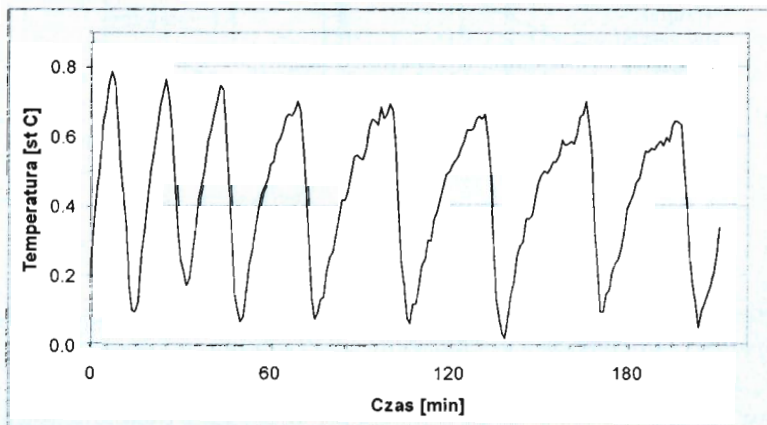
cowano po stronie grzejnej specjalną chłodnicę, wykonaną z płyty miedzianej chłodzonej wodą. Do regulacji temperatury powietrza w komorze izolacyjnej zastosowano regulator dwupołożeniowy. Steruje on odpowiednio zaprojektowanym zasilaczem doprowadzającym moc do ogniwa Peltiera. Schemat ideowy układu automatycznej regulacji przedstawiono na rysunku 6.

4. Uwagi końcowe

W wyniku przeprowadzonych prób z użyciem zaprojektowanego urządzenia otrzymano przebiegi temperatury mieszaniny wody z lodem w zależności od czasu. Przykładowy wykres zmian temperatury w czasie przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Przebieg zmian temperatury mieszaniny



Rys. 8. Temperatura powietrza w komorze

Pomiary były wykonywane przy zastosowaniu tego samego termosu oraz tej samej komory izolacyjnej z włączonym układem chłodzącym. Podczas prób zastosowano następujące nastawy regulatora: temperatura zadana 0.5°C , histereza 0.2°C . Fragment uzyskanego przebiegu temperatury powietrza w komorze izolacyjnej przedstawiono na rysunku 8.

Inspiracją do budowy opisanego urządzenia była potrzeba uzyskania stabilnej temperatury odniesienia w długotrwałych pomiarach temperatury podczas wizualizacji zjawiska topnienia. Z tego punktu widzenia oceniano jego przydatność. Może być ono jednak stosowane w badaniach innych zjawisk fizycznych, wszędzie tam gdzie wymagany jest pomiar temperatury trwający kilkadziesiąt godzin.

Opisany sposób minimalizacji wpływu temperatury otoczenia na temperaturę mieszaniny okazał się skuteczny. W pokazanym przykładzie przyrost temperatury mieszaniny wyniósł mniej niż 0.01°C w okresie około 200 godz. Czas utrzymywania stabilnej temperatury odniesienia okazał się wystarczający do wspomnianych wcześniej badań. W związku z tym nie wykonywano prób dla innych nastaw regulatora niż opisane wyżej. Długi czas trwania pomiarów był w tym przypadku również czynnikiem istotnym, decydującym o zaniechaniu dodatkowych prób. Wydaje się uzasadnione przeprowadzenie takich badań w celu sprawdzenia wpływu nastaw regulatora na temperaturę mieszaniny. Pozwoli to przypuszczalnie na dalsze wydłużenie czasu utrzymywania stabilnej temperatury odniesienia w długotrwałych pomiarach z zastosowaniem termoelementów.

Literatura

1. **Bakinowska K. i inni** (1995): *Pomiary cieplne t.1*, WNT, Warszawa.
2. **Michalski L., Eckersdorf K.** (1986): *Pomiary temperatury*, WNT, Warszawa.
3. **Michalski L., Eckersdorf K., J. Kucharski** (1998): *Termometria: przyrządy i metody*, Politechnika Łódzka, Łódź.
4. 9101 Zero point dry-well, User manual, Hart Scientific.
5. Thermoelectric Cooling Systems Design Guide, Marlow Industries, inc.

STABILIZATION OF ICE BATH REFERENCE TEMPERATURE FOR LONG-TIME TEMPERATURE MEASUREMENT

Summary: The purpose of this paper is to present a control system to slow down a drift often experienced in ice baths as melting occurs.

Waldemar Kołodziejczyk*

URZĄDZENIE DO STEROWANIA PROCESEM NAPEŁNIANIA KOMORY WIZUALIZACYJNEJ

Streszczenie: W artykule przedstawiono układ umożliwiający zautomatyzowanie procesu napełniania pojemników o przezroczystych ściankach. Pojemniki takie są wykorzystywane m.in. do wizualizacji procesu topnienia w badaniach zjawiska konwekcji naturalnej.

Słowa kluczowe: czujnik poziomu, sterowanie

1. Wprowadzenie

Badania eksperymentalne procesu topnienia przeprowadzane są z wykorzystaniem zasobników wypełnionych odpowiednim medium. Zwykle są to pojemniki wykonane z przezroczystych materiałów, spełniające rolę komory wizualizacyjnej. Poważnym problemem występującym podczas tego typu doświadczeń jest szczelne napełnienie zbiornika, w przypadku gdy medium stanowi krzepnąca w temperaturze otoczenia ciecz. Napełnianie zasobnika odbywa się warstwami, ponieważ zapobiega to powstawaniu jam skurczowych. Jest to więc proces długotrwały i niektóre czynności są często powtarzane. Zasadne staje się podjęcie próby zautomatyzowania tego procesu.

Sterowanie procesem napełniania zamkniętego pojemnika wymaga uzyskania informacji o poziomie cieczy w tym zbiorniku. Niewielkie rozmiary prostopadłościennego zasobnika (długość boku około 10 cm) w istotny sposób utrudniają zaprojektowanie układu pomiarowego. Dostępne na rynku czujniki mają zbyt duże gabaryty albo wymagają bezpośredniego kontaktu z cieczą. W przypadku niektórych typów czujników niezbędne jest montowanie ich wewnątrz naczynia lub w jego ściankach. Dodatkowe problemy stwarza zastosowane medium – stopiony n-octadecan. Jest to ciecz absorbująca gazy. Napełnianie zbiornika musi być prze-

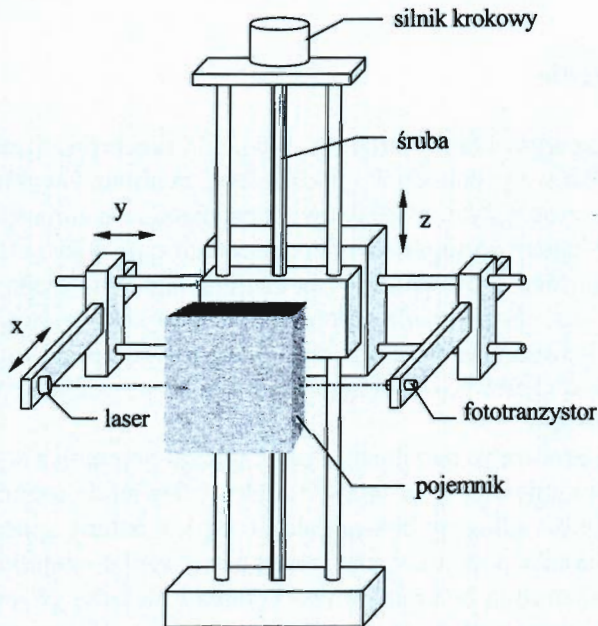
* Katedra Mechatroniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45c, 15-351 Białystok,

prowadzone w warunkach próżni. Cały proces wymaga zastosowania szczelnego układu, w tym również zbiornika. Z powodu wyżej opisanych ograniczeń podjęto próbę stworzenia urządzenia, którego zastosowanie nie powoduje ingerencji w ścianki zbiornika.

2. Opis urządzenia

2.1. Budowa czujnika

Podczas konstruowania opisanego niżej czujnika wykorzystano fakt, że ścianki napełnianego cieczą naczynia wykonane są z materiału przezroczystego. Elementem czujnika wykrywającym i reagującym na osiągnięcie zadanego poziomu cieczy jest zespół dioda laserowa – fototranzystor.



Rys. 1. Widok ogólny

Działanie tego układu oparte jest na zjawisku odchylenia promienia świetlnego w chwili napotkania menisku cieczy. W przypadku, gdy promień nie napotyka

menisku, jego droga do fototranzystora nie jest zakłócona. Odchylenie promienia lasera spowoduje przerwę w oświetleniu fototranzystora, a więc również przerwę w przepływie prądu. Sygnał ten może być wykorzystany do sterowania układem napełniającym, np. zamknięciem zaworu.

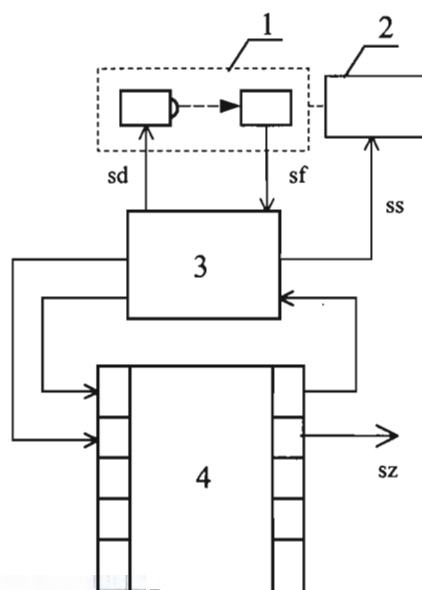
Urządzenie przedstawione na rysunku 1 ma dwa ramiona, na których umieszczono naprzeciw diodę laserową i fototranzystor. Ramiona te można przesuwając tak, aby urządzenie mogło współpracować z pojemnikami o różnych rozmiarach. Istnieje również możliwość przesuwu obu ramion w pionie, co pozwala napełniać zbiornik do dowolnie zadanego poziomu.

2.2. Układ sterowania

W celu rozszerzenia możliwości zastosowania wyżej opisanego urządzenia wyposażono je w dodatkowe elementy, takie jak silnik krokowy, programowalny sterownik silnika krokowego [2] oraz sterownik PLC (Programmable Logic Controller). Utworzony w ten sposób układ umożliwia sterowanie procesem napełniania. Zastosowanie sterownika PLC pozwala na realizację złożonych procedur, np. napełnianie naczyń warstwami. Nadzoruje on przebiegi czasowe podczas nalewania i zestalania poszczególnych warstw.

W układzie tym silnik krokowy przesuwa w pionie zespół diod laserowa – fototranzystor do kolejnych poziomów wyznaczających grubość warstw. Współpracuje on z programowalnym sterownikiem, w którym można zadać między innymi wielkość przesuwu zespołu.

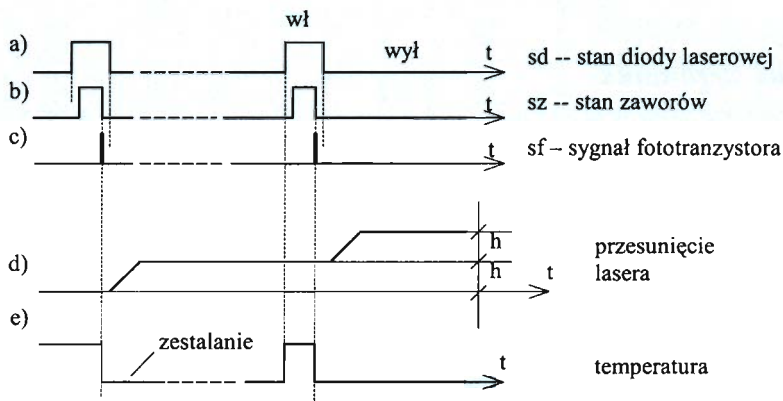
Połączenia sygnałowe opisanego układu sterowania przedstawiono schematycznie na rysunku 2. Znaczenie niektórych sygnałów jest następujące: sd – stan diody, sf – sygnał fototranzystora, ss – sygnał włączający silnik krokowy, sz – sygnał włączający zawory.



Rys. 2. Schemat połączeń sygnałowych. Elementy: 1 – zespół diod laserowa – fototranzystor, 2 – silnik krokowy, 3 – programowalny sterownik silnika krokowego, 4 – sterownik PLC

3. Przykład procesu napełniania komory wizualizacyjnej

Rysunek 3 prezentuje fragment procedury napełniania komory wizualizacyjnej krzepnącą cieczą (dwie pierwsze warstwy), przedstawiony w postaci przebiegów czasowych wybranych sygnałów. Komora napełniana jest warstwami o jednakowej grubości h . Każda z warstw zestalana jest przez określony, zadany czas. Dopiero po upływie tego czasu możliwe jest dolanie kolejnej porcji medium. Dioda laserowa włączana jest tylko na czas napełniania kolejną warstwą. Postępowanie takie spowodowane jest szybkim jej zużyciem przy wielogodzinnej ciągłej pracy.



Rys. 3. Fragmenty przebiegów czasowych niektórych sygnałów

Początkiem cyklu jest włączenie diody (rys. 3a), a następnie otwarcie zaworu (rys. 3b), umożliwiające napływ cieczy do zbiornika (widoczne na rys. 3. wielkości odstępów czasowych pomiędzy zmianami stanu sygnałów nie są w opisanym procesie istotne). Po osiągnięciu przez powierzchnię cieczy poziomu wyznaczonego przez promień świetlny (rys. 3c) zawór jest zamykany. Potem następuje wyłączenie diody laserowej i przesunięcie jej do nowego położenia przez silnik krokowy (rys. 3d). Sygnał fototranzystora, przedstawiony umownie na rys. 3c jako impuls, w rzeczywistości jest rozciągnięty w czasie. Zależy on od rodzaju cieczy (kształtu menisku) i szybkości zmiany jej poziomu. Przedstawiony na rysunku 3e wykres temperatury pokazuje tylko umownie przebiegi temperaturowe, m.in. schładzanie kolejnej warstwy w celu zestalenia.

Skala czasu na powyższym rysunku nie jest zachowana, ponieważ czas zestalania warstwy cieczy trwa minimum kilkadziesiąt minut, podczas gdy czas napełniania wynosi kilkanaście sekund.

Prezentowaną procedurę napełniania napisano dla sterownika OMRON CPM1A z użyciem programu Syswin, przy wykorzystaniu materiałów z literatury [3, 4].

4. Uwagi końcowe

W celu sprawdzenia działania czujnika przeprowadzono próbę pracy zespołu dioda-fototranzystor. Pomiedzy dioda a fototranzystorem umieszczono naczynie wypełnione wodą tak, aby poziom wody znajdował się poniżej promienia świetlnego. Następnie opuszczano zespół dioda-fototranzystor aż do momentu, gdy na wyjściu układu pojawił się sygnał. Położenie zespołu mierzono czujnikiem zegarowym. Kilkakrotne pomiary położenia wykazały powtarzalność powstawania sygnału sterującego na wyjściu z dokładnością do 0.03 mm.

Podczas przygotowania urządzenia do pracy należy mieć na uwadze, że ścianki naczyń powinny być ustawione prostopadle do promienia świetlnego. Trzeba również pamiętać, że poziom cieczy może przekroczyć poziom wyznaczony przez promień diody laserowej z uwagi na bezwładność samego procesu napełniania, wynikającą między innymi z opróżniania przewodów po zamknięciu zaworu.

Napełnianie komory wizualizacyjnej krzepnącą cieczą jest jednym z etapów przygotowania stanowiska do badań eksperymentalnych procesów topnienia [1]. Przedstawiona w pracy koncepcja automatyzacji procesu napełniania jest jego istotnym usprawnieniem z uwagi na długotrwałość i uciążliwość tego typu operacji. Dodatkową zaletą zastosowanego czujnika jest brak ingerencji w ścianki zbiornika mogącej spowodować rozszczelnienie układu próżniowego komory.

Literatura

1. **Gościak J., Kołodziejczyk W.:** (1999): *An experimental investigation of melting of the subcooled pure nonmetallic material*. The Second International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Multiphase Systems, Kielce.
2. **Sienkiewicz T.:** *Programowalny sterownik silnika krokowego*. Opracowanie wewnętrzne KM PB Nr 1/2001.
3. *Programmable Controllers, Programming Manual*. Omron.
4. *ABC programowania*. Omron.

A SYSTEM FOR FILLING PROCESS CONTROL

Summary: A system for filling process control of the rectangular enclosure is presented. A rectangular cavity filled with the solid phase change material (PCM) is used in experimental observation of the solid-liquid interface motion in the material during phase transformation.

Adam Kotowski¹, Paweł Lindstedt¹

METODA WIBROAKUSTYCZNA W PROCESIE OCENY STANU TECHNICZNEGO MASZYN

Streszczenie: Diagnostowanie złożonych maszyn (obiektów) oparte jest na odpowiednim wykorzystywaniu następujących metod diagnozowania: funkcjonalnej, wibroakustycznej, zużyciowej, defektoskopowej i termograficznej. W pracy zwraca się szczególną uwagę na metodę wibroakustyczną (WA). Sygnały wibroakustyczne są uniwersalne, bo pozwalają określić stan działania maszyny i jej stan techniczny podczas ruchu i spoczynku. Omówiono sposoby przeprowadzenia pomiaru, odkłócania i formowania tych sygnałów. Przedstawiono także ogólne założenia do wnioskowania diagnostycznego. Podkreślono, że wnioskowanie w metodzie WA opiera się na identyfikacji modelu diagnostycznego podczas badań maszyny i algorytmu porównywania go w czasie eksploatacji według zasad diagnostyki. Stwierdza się też, że diagnozowanie maszyny metodą WA powinno być potwierdzone (weryfikowane) innymi metodami.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, sygnały diagnostyczne, metody diagnozowania

1. Wstęp

W stosowanej obecnie kompleksowej diagnostyce złożonych maszyn odpowiednio zastosowanie znajduje pięć podstawowych metod diagnozowania. Są to [1,2]:

- metoda funkcjonalna,
- metoda wibroakustyczna,
- metoda zużyciowa (tribologiczna),
- metoda defektoskopowa,
- metoda termograficzna.

Każda z wymienionych metod jest autonomiczna i specjalizowana do określonych celów. Praktyka eksploatacyjna niejednokrotnie wykazała, że nie zawsze działalność diagnostyczna oparta tylko na jednej metodzie była skuteczna.

¹ Katedra Automatyki i Diagnostyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45c, 15-351 Białystok.

Dlatego wiele ośrodków diagnostycznych stosuje jednocześnie kilka metod diagnozowania (w zależności od potrzeb dwu, trzech, czterech) do tej samej pojedynczej maszyny (modułu) technicznego. Diagnozowanie pojedynczej maszyny kilkoma metodami polega na tym, że każda diagnoza otrzymana wybraną metodą powinna być wielokrotnie zweryfikowana innymi metodami.

Stąd wniosek, że diagnozowanie przeprowadzone np. metodą wibroakustyczną powinno być potwierdzone innymi metodami (np. funkcjonalną i zużyciową).

2. Wibroakustyczna diagnostyka lotniczego silnika turbinowego

Podczas funkcjonowania maszyny (obiektu) występują dwa rodzaje procesów: pierwsze to procesy użytkowe (wytwarzające odpowiednią wartość ciągu silnika) i drugie – to procesy towarzyszące (drżania mechaniczne, akustyczne, tarcie, zużycie, powstawanie luzów, korozja, erozja itp.). Obserwacja procesów użytkowych i towarzyszących pozwala jednoznacznie określić stan działania (wg zasad automatyki) i stan techniczny (wg zasad diagnostyki) maszyny. Zatem informacja wynikająca z procesów użytkowych i towarzyszących jest też poszukiwaną informacją diagnostyczną, która może być ujęta w postaci: sygnałów diagnostycznych, symptomów diagnostycznych i parametrów diagnostycznych. Do sygnałów diagnostycznych, które pozwalają określić stan działania i następnie stan techniczny obiektu należą sygnały wibroakustyczne. Są one wynikiem różnych zmian w działaniu i w stanie technicznym maszyny. Wśród tych zmian można wyróżnić [7,14,15]:

- strukturalne; wynikające ze zmian konstrukcji maszyny, określone wzajemnym oddziaływaniem elementów o określonej masie i sztywności, wywołane wpływem czynników roboczych, zmiennością pól elektrycznych itp.,
- kinematyczne; związane z przemieszczaniem się, prędkością, przyspieszeniem liniowym i kątowym elementów maszyny (np. elementów siłowników, kół zębatach, łożysk itp.),
- dynamiczne; takie jak: niewyrównoważenia elementów wirujących, zderzenia w parach kinematycznych; zmiany, będące rezultatem zużycia powierzchniowego w parach kinematycznych i objawiające się wykruszeniem, zwiększeniem chropowatości itp. oraz zużycia objętościowego powodującego zniekształcenie pierwotnego kształtu elementu,
- korozyjne; będące rezultatem oddziaływania środowiska (otoczenia) na dany element maszyny (wilgoć, temperatura),

- erozyjne; wynikające z oddziaływania strumienia płynów lub gazów (zanieczyszczonych) oraz produktów zużycia powierzchni na narażone na takie działanie elementy maszyny (przewody instalacji hydraulicznej, kanał przepływowy silnika, łopatki),
- zmęczeniowe; wynikające ze zmiennych obciążeń mechanicznych i termicznych (pęknięcia łopatek, komór spalania itp.),
- przypadkowe; wynikające z ewentualnych uszkodzeń przez zderzenie np. z ptakiem lub zassanym z powierzchni lotniska „ciałem obcym”.

Pojawiające się przypadkowe i stałe zmiany stanu technicznego (uszkodzenia) generują sygnał wibroakustyczny o złożonej stochastycznej postaci. Z twierdzenia Shannona wynika, że właśnie taki sygnał niesie dużą ilość informacji. W praktyce oznacza to, że pojedynczy sygnał wibroakustyczny może być wykorzystany do identyfikacji wielu różnych uszkodzeń części silnika. Stąd wynikają szczególne przesłanki do realizacji trudnego procesu badania diagnostycznego i wnioski o realizację diagnostycznego w wibroakustycznej diagnostyce dowolnego obiektu technicznego.

3. Badania diagnostyczne przy zastosowaniu wibroakustycznej metody diagnozowania

Zgodnie z PN-90/N-04002 badania diagnostyczne są podstawowym elementem diagnozowania. W znacznym stopniu (dotyczy to w szczególności diagnostyki wibroakustycznej) decydują one o jego skuteczności. Dlatego dużo uwagi należy poświęcić właśnie tej formie działalności diagnostycznej. Badania diagnostyczne dotyczą pomiarów i rejestracji sygnałów diagnostycznych. Opierają się na zasadach metrologii i miernictwa dynamicznego [4,7,14,15].

Badania diagnostyczne dzieli się przeważnie na kilka jakościowo różnych etapów, którymi są:

I. Poznanie obiektu (maszyny). W tej fazie badań diagnostycznych zdobywa się szeroko rozumianą wiedzę o obiekcie. Stanowią ją:

- formalny opis obiektu, budowa i opis działania (w tym równania ruchu), technologia i produkcja obiektu, charakterystyki bezpieczeństwa i niezawodności a w tym zbiór typowych uszkodzeń i generowanych przez nie sygnałów diagnostycznych (także wibroakustycznych),
- opis sygnałów diagnostycznych, ich natura fizyczna i stopień zakłócania. Należy zauważyć, że wszystkie generowane przez silnik sygnały wibroakustyczne i te, które są sygnałami innej natury fizycznej mogą się wzajemnie zakłócać. Stwarza

to dodatkowe problemy w procesie badań diagnostycznych. Dlatego właśnie prawie zawsze oprócz sygnałów podstawowych, wibroakustycznych należy dodatkowo mierzyć inne sygnały, np. funkcjonalne,

- formalny opis otoczenia i jego wpływ na sygnały wibroakustyczne, generowane przez obiekt,
- wybrane modalne charakterystyki struktury mechanicznej silnika; stanowią je częstotliwości własne oraz deformacje modalne.

II. Pomiar sygnałów diagnostycznych. W tej działalności diagnostycznej wybiera się odpowiednie środki pomiarowe. Następnie należy opracować precyzyjną metodę wykonania pomiarów. Metoda ta powinna uwzględniać następujące założenia:

- pomiar należy wykonywać kompleksowo. Oznacza to, że jednocześnie wykonuje się pomiary sygnałów użytkowych (prędkość obrotowa) i towarzyszących (drżania maszyny i charakterystyki modalne) a także otoczenia (temperatura),
- środki do pomiaru sygnałów akustycznych (mikrofony) i sygnałów wibracji (akcelerometry) powinny być w sposób jednoznaczny ustawione względem badanego obiektu podczas badań modalnych i pomiaru drgań (wibracji). Dotyczy to również pomiaru sygnału otoczenia. Mikrofony umieszcza się w specjalnych statywach lub lepiej na stałe w obiekcie. Należy je jednoznacznie rozmieścić i zorientować w przestrzeni. Akcelerometry umieszcza się na specjalnych podstawkach. Mogą być do nich przykręcone na czas próby lub na stałe. Akcelerometry związane na stałe z obiektem powinny być do nich przyklejone lub przykręcone,
- metoda pomiarów oraz zastosowane środki pomiarowe powinny obowiązywać w niezmienionej formie przez cały czas życia obiektu. Tym stwierdzeniem podkreśla się szczególne znaczenie zapewnienia powtarzalności (identyczności) ustawiania środków pomiarowych względem obiektu podczas kolejnych badań diagnostycznych.

Wibroakustyczne środki pomiarowe mają jedno wejście użyteczne i jedno wyjście. Wymaga się, aby odpowiadająca im charakterystyka statyczna była wystarczająco (wysoko) reprezentatywna, o zdeterminowanej dokładności, rozdzielczości i liniowości. Dodatkowo wymaga się także minimalizacji oddziaływań wejść nieużytkowych, reagujących na temperaturę, pole magnetyczne i inne wielkości zakłócające. Zatem środki te powinny charakteryzować się odpowiednią jakością statyczną i dynamiczną.

Do badań wibroakustycznych należy wykorzystać czujniki 1. klasy jakości, znanych firm specjalizujących się w produkcji tego typu czujników.

III. Odkłócanie sygnałów diagnostycznych. Proces ten realizowany jest przez zastosowanie odpowiednich filtrów (dolnoprzepustowych, pasmowych i wąskopasmowych) lub (co jest bardziej efektywne) przez przetworzenie zmierzonego sygnału (w czasie dynamicznym t), za pomocą specjalnych korektorów, na przebiegi funkcji korelacji (w czasie przesunięcia τ) a następnie na funkcję gęstości widmowej mocy (zależnej od częstotliwości ω). Sygnały wibroakustyczne, ze względu na swoją złożoność, są trudne do odkłócenia, dlatego często (w celu uproszczenia problemu) są bezpośrednio przesyłane do przetwarzania; w czasie, gdy dysponuje się nowoczesną szybką techniką komputerową i specjalistycznymi oprogramowaniami, zwyczaj ten powinien być w zasadzie zaniechany, a filtrowanie tego sygnału powinno stać się obowiązkowe. Do filtrowania sygnałów wibroakustycznych zaleca się [4, 14, 15]:

- filtrowanie oparte na przejściu z czasu t na czas przesunięcia τ a więc wykorzystujące funkcje korelacji,
- filtrowanie oparte na przekształceniu falkowym.

Dodatkowe zniekształcenie (zakłócenie) wprowadza ograniczony czas (okno) obserwacji sygnału. Uwzględnienie wpływu tego zjawiska na mierzony sygnał wibroakustyczny może być zrealizowane przez korelację sygnału zmierzonego z czasowym oknem obserwacji.

IV. Formowanie sygnałów diagnostycznych. [13, 15] Czynność ta ma za główne zadanie sprowadzenie wszystkich zamierzonych sygnałów, w tym sygnałów wibroakustycznych, do unormowanej postaci bezwymiarowej. Proces ten jest bardzo trudny ze względu na ograniczenie możliwości jednoznacznego zdefiniowania sygnału odniesienia. Można tego dokonać z wykorzystaniem funkcji gęstości widmowej mocy sygnału wibroakustycznego. Algorytm formowania sygnału wibroakustycznego można sprowadzić do wykonania następujących czynności:

1) w pierwszym etapie:

- a) Zarejestrować sygnały wibroakustyczne (np. x i y) w postaci cyfrowej w czasie dynamicznym t zapamiętać go w czasie eksploatacyjnym – θ_0 (czas długi) na początku eksploatacji .
- b) Określić okno pomiarowe (dla sygnału wibroakustycznego należy przyjąć okno prostokątne lub Hanninga).
- c) Wyznaczyć wypadkowe funkcje korelacji własnej i wzajemnej danych sygnałów z uwzględnieniem przyjętego okna pomiarowego.
- d) Wyznaczyć funkcję gęstości widmowej mocy sygnału dla wyznaczonych funkcji korelacji sygnałów np. S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} dla $\theta_0 = 0$.

- e) Wyznaczone wartości gęstości widmowej mocy sygnału oznaczyć jako S_{xoxo} , S_{yoyo} oraz S_{xoyo} (przy czym „o” oznacza początek procesu obsługiwanego danego obiektu) mogą być przyjęte za sygnał odniesienia.
- 2) w drugim etapie:
- a) Początkową wartość mocy sygnału wibroakustycznego w zadanym stałym „oknie” obserwacji przyjmując za początkową wartość sygnału odniesienia.
- b) Dokonać formowania sygnału według następujących zależności:

$$\bar{S}_{xx} = \frac{S_{xx}}{S_{xoxo}} \quad (1)$$

$$\bar{S}_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_{xoyo}} \quad (2)$$

gdzie:

- \bar{S}_{xx} – uformowana postać gęstości widmowej mocy sygnału x ;
- S_{xx} – gęstość widmowa mocy sygnału x ;
- S_{xoxo} – początkowa gęstość widmowa mocy sygnału x ;
- \bar{S}_{xy} – uformowana postać gęstości widmowej mocy sygnałów x i y ;
- S_{xy} – gęstość widmowa mocy wzajemnej sygnałów x i y ;
- S_{xoyo} – początkowa gęstość widmowa mocy wzajemnej sygnałów x i y .

W procesie diagnozowania należy w miarę możliwości operować tylko sygnałem uformowanym. Takie nowatorskie podejście pozwoli później realizować zasadę diagnostyki sprowadzoną do stwierdzenia że:

„stan techniczny, także reprezentowany przez sygnał wibroakustyczny, zależy od jego historii czyli stanu początkowego”.

Stan początkowy „o” może być przyjęty jako stan: „po wyprodukowaniu”, „po zabudowaniu np. silnika na samolocie” a także „po obsłudze okresowej”.

V. Opracowanie bazy danych. Bazę danych stanowią tabele wskaźników jakości przebiegów uformowanych funkcji gęstości mocy sygnałów. Przyjęte wskaźniki jakości powinny swoją naturą nawiązywać do „czasu regulacji” i „przeregulowania” stosowanych w ocenie jakości działania układów automatycznej regulacji. Ważnym elementem jednoznaczności wskaźników jest usytuowanie „okna pomiarowego” w charakterystycznych chwilach pracy obiektu, np. dla turbinowego sil-

nika odrzutowego, chwilami tymi powinny być okresy między zadziałaniem elementów dwustanowych układu regulacji. Widać zatem, że diagnostyka wibroakustyczna musi być ściśle powiązana z diagnostyką funkcjonalną.

4. Wnioskowanie diagnostyczne przy zastosowaniu wibroakustycznej metody diagnozowania

Zgodnie z PN-90/N-04002 wnioskowanie diagnostyczne jest kolejnym (po badaniach diagnostycznych) bardzo ważnym elementem procesu diagnozowania. Polega na ściśle sformalizowanym przetworzeniu wyników badania diagnostycznego (bazy danych) oraz innych informacji o obiekcie i otoczeniu (bazy wiedzy) na diagnozę, genezę czy prognozę. We wnioskowaniu diagnostycznym wyróżnia się kilka jakościowo różnych faz, którymi są:

I. Opracowanie modelu diagnostycznego. Polega na powiązaniu (na podstawie posiadanej wiedzy) różnych postaci sygnałów ze zmianami stanu technicznego ($U_1 + U_n$).

W zależności od zakresu badań wibroakustycznych (liczby uszkodzeń podlegających identyfikacji) należy tworzyć kilka i więcej modeli diagnostycznych. Wibroakustyczne modele diagnostyczne mogą przyjąć następujące postacie:

- przebiegi sygnałów wibroakustycznych X_n w czasie dynamicznym t w różnych chwilach czasu eksploatacyjnego θ :

$$X_n(t, \theta) = f(U_1; \dots; U_i; \dots; U_K) \quad (6)$$

gdzie dodatkowo: U_1, U_i, U_K – uszkodzenia (zmiany stanu) wyselekcjonowane ze zbioru wszystkich identyfikowanych uszkodzeń,

- przebiegi funkcji korelacji sygnałów wibroakustycznych: własnej R_{xnxn} i wzajemnej R_{xnyy} ; w czasie przesunięcia τ w różnych chwilach czasu eksploatacyjnego θ .

$$\begin{aligned} R_{xnxn}(\tau, \theta) &= f(U_1; \dots; U_i; \dots; U_n) \\ R_{xnyy}(\tau, \theta) &= f(U_2; \dots; U_i; \dots; U_K) \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie dodatkowo:

U_n, U_2, U_K – kolejne uszkodzenia (zmiany stanu) ze zbioru wszystkich identyfikowanych uszkodzeń,

- przebiegi funkcji gęstości widmowej mocy sygnałów wibroakustycznych własnej S_{xnxn} i wzajemnej S_{xnyn} w dziedzinie zmiennej ω w różnych chwilach czasu eksploatacyjnego θ .

$$\begin{aligned} S_{xnxn}(\omega, \theta) &= f(U_1; \dots; U_i; \dots; U_n) \\ S_{xnyn}(\omega, \theta) &= f(U_2; \dots; U_i; \dots; U_L; \dots; U_K) \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie dodatkowo:

U_L – uszkodzenie (zmiana stanu) wybrane ze zbioru wszystkich identyfikowanych uszkodzeń,

- transmitancje i parametry tych wielu transmitancji wyznaczone z relacji między mierzonymi sygnałami wibroakustycznymi [4,13,14,15,17]:

$$\begin{aligned} G_n(j\omega, \theta) &= \frac{S_{xnyn}}{S_{xnxn}} = \frac{b_m(j\omega)^m + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(\theta)(j\omega)^n + \dots + a_1(\theta)(j\omega) + a_0(\theta)} \\ G_n(s, \theta)|_{s=j\omega} &= \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n(\theta)^n + a_1(\theta)s + a_0(\theta)} \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie:

$G(j\omega, \theta)$, $G(s, \theta)$ - transmitancja widmowa i operatorowa;

$b_0 \div b_m$ – parametry od oddziaływania otoczenia na badany obiekt;

$a_0(\theta) \div a_n(\theta)$ – parametry od zmian stanu technicznego (uszkodzeń) obiektu,

- przebieg funkcji korelacji wzajemnej sygnałów wibroakustycznych i funkcjonalnych $R_{xnW, xkF}$ – wynikające ze skorelowania dowolnego sygnału wibroakustycznego X_{nW} z dowolnym sygnałem funkcjonalnym X_{kF} w czasie τ w dowolnych chwilach θ :

$$R_{xnW, xkF}(\tau; \theta) = f(U_1; \dots; U_2; \dots; U_i; \dots; U_k) \quad (10)$$

- przebiegi funkcji wzajemnej gęstości mocy widmowej sygnału wibroakustycznego i dowolnego sygnału funkcjonalnego:

$$S_{x_n W, y_k F}(j\omega, \theta) = f(U_2; \dots U_n; \dots U_i; \dots U_K) \quad (11)$$

- transmitancje i parametry tych wielu transmitancji, wyznaczone z relacji między sygnałami wibroakustycznymi i funkcjonalnymi [2,11,15]:

$$G_K(s, \theta) \Big|_{s=j\omega} = \frac{S_{x_n W, y_k F}}{S_{x_n W, x_n W}} \quad (12)$$

- widmo drgań $X_n(f)$ dowolnego sygnału wibroakustycznego $x_n(t); x_m(t)$ [5, 8, 12, 14, 15]:

$$\begin{aligned} X_n(f, \theta) &= \mathfrak{F}\{x_n(t)\} \\ X_n \cdot X_m &= \mathfrak{F}\{x_n * x_m\} \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie dodatkowo:

$X_n(f), X_m(f)$ – transformata Fouriera sygnału wibroakustycznego.

Model ten jest praktycznie zawsze stosowany w wibroakustycznej diagnostyce maszyn. Jest on uniwersalny. Zbiór ciągów wielu prążków może być wiązany z uszkodzeniami:

$$\{X_i \cdot X_m \cdot \dots \cdot X_n\}(f, \theta) = f(U_1; U_2 \dots U_n) \quad (14)$$

Należy jednak zauważyć, że zawsze podczas badań eksperymentalnych mamy do czynienia z iloczynem różnorodnych prostych widm (i, m, l, n itp.). Ta właściwość widma sygnału wibroakustycznego utrudnia rozłożenie go na widma proste a stąd powiązania jego elementów(prążków) (często rozłożonych w dużym zakresie częstotliwości f) z konkretnymi zmianami stanu technicznego. Fakt ten podkreślają wszyscy badacze wykorzystujący tę metodę diagnozowania. Model ten podlega (oprócz dotychczasowych) także (dotąd niestosowanym) innym oryginalnym algorytmom porównywania modeli.

– modele z wykorzystaniem sygnału odniesienia $x_{dm}(t)$. Sygnał odniesienia $x_{dm}(t)$ o zmiennym przebiegu pozwala przetwarzać pojedyncze sygnały wibroakustyczne w różnych relacjach z sygnałem odniesienia. Ten sposób przetwarzania (oparty na demodulacji częstotliwościowej) sygnałów wibroakustycznych wymaga dodatkowych badań i wykracza poza zakres tej pracy.

II. Opracowanie algorytmów porównania modeli

Obejmuje porównanie modelu diagnostycznego z bieżącego diagnozowania z modelami poprzednimi (z historii) a następnie przetworzenie tak otrzymanych różnic modeli i ich parametrów na zmianę stanu technicznego obiektu. Można to zapisać w następujący sposób.

$$ZS = BW(BD) \quad (15)$$

gdzie:

ZS – zbiór zmian stanu technicznego (uszkodzeń),

BW – baza wiedzy wynikająca z modelu diagnostycznego i progowych wskaźników jakości i parametrów z niego wyznaczonych,

BD – baza danych wyznaczona z badań diagnostycznych.

ZS – zbiór stanu technicznego (uszkodzeń) wynika z charakterystyk niezawodnościowych. Należy przyjąć ściśle określoną liczbę zmian stanu technicznego (uszkodzeń) wywierających decydujący wpływ na bezpieczeństwo lotu. BW – (baza wiedzy) jest zbiorem ilościowych i jakościowych zależności między uszkodzeniami a sygnałami diagnostycznymi. Obejmuje progi diagnostyczne. Relacje logiczne – zdalny lub niezdatny w ujęciu rozmytym (prawie zdalny, prawie niezdatny, zdalny, niezdatny itp.). BD – (baza danych) jest końcowym efektem badań diagnostycznych. Jest zbiorem wartości wskaźników, jakości przebiegu sygnałów (w czasie t i τ i w funkcji częstotliwości f) oraz cech charakterystycznych widma sygnału. Zbiór ten jest bardzo liczny i zależy od liczby okresów obserwacji, od liczby mierzonych sygnałów wibroakustycznych, od liczby sygnałów wibroakustycznych skorelowanych z jawnymi sygnałami wibroakustycznymi z dowolnymi sygnałami funkcjonalnymi i z tzw. sygnałami odniesienia, których liczba praktycznie jest nieograniczona.

III. Komputerowe wspomaganie wnioskowania diagnostycznego

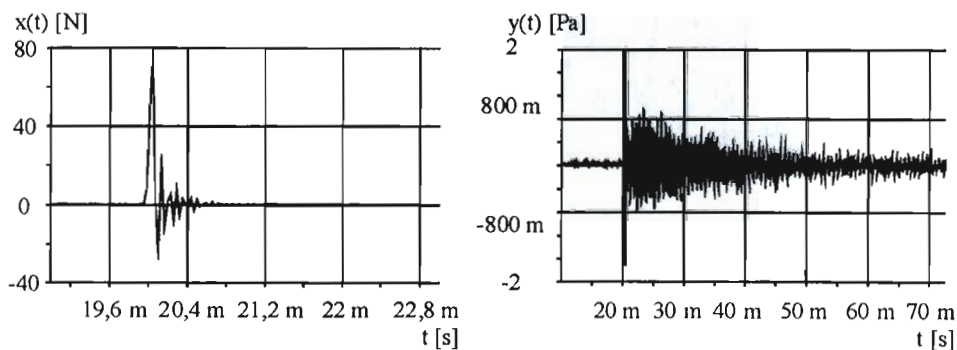
Działalność ta podejmuje problematykę eliminowania z całego procesu wnioskowania diagnostycznego subiektywnego działania diagnosty i zastąpienie go obiektywnym (zawsze identycznie działającym) „Systemem ekspertowym”. Oka-

zuje się bowiem, że komputerowo zapewniona „identyczność” wnioskowania ma większą wagę niż „inteligencja” diagnosty.

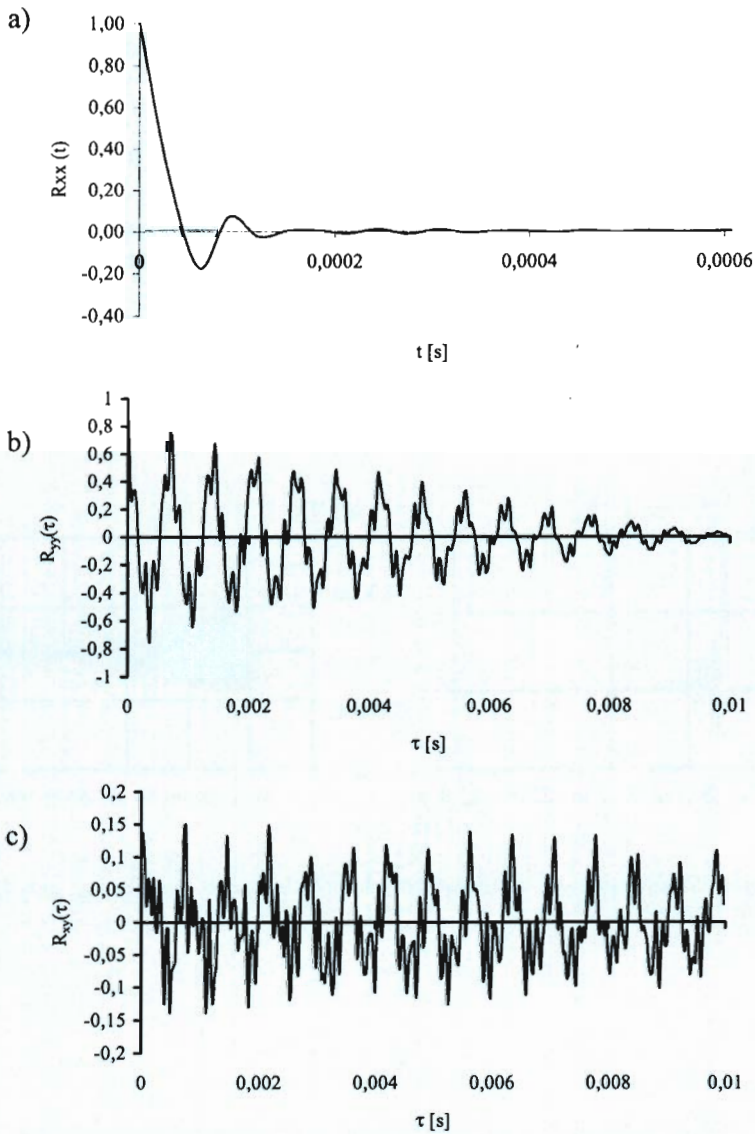
5. Przykłady sygnałów diagnostycznych łopatki maszyny wirnikowej

Dla pobudzonej do drgań łopatki pomiar sygnałów diagnostycznych (uzyskanych na drodze analizy numerycznej) może się opierać na rejestracji następujących przebiegów [5, 8, 14, 17]:

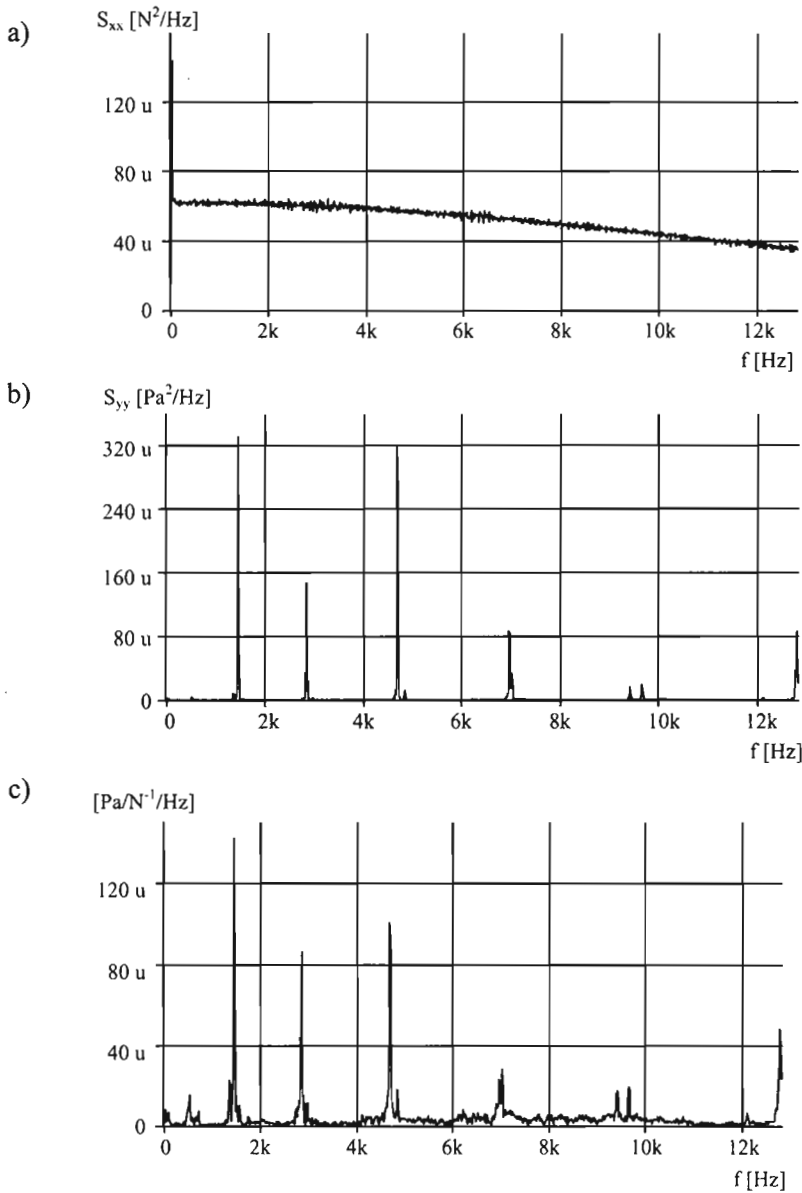
- przebiegu czasowego wzbudzenia – $x(t)$ i odpowiedzi – $y(t)$; (rys. 1),
- funkcji korelacji własnej i wzajemnej sygnałów $x(t)$ i $y(t)$; (rys. 2),
- funkcji gęstości widmowej mocy własnej i wzajemnej sygnałów $x(t)$ i $y(t)$; (rys. 3).



Rys. 1. Przebiegi czasowe sygnałów diagnostycznych łopatki maszyny wirnikowej: a) wzbudzenia – $x(t)$, b) odpowiedzi akustycznej – $y(t)$



Rys. 2. Przebiegi sygnałów diagnostycznych łopatki maszyny wirnikowej: a) funkcja autokorelacji fragmentu sygnału $x(t)$ dla $t^* = 0.6$ ms – $R_{xx}(\tau)$, b) funkcja autokorelacji sygnału $y(t)$ dla $t^* = 10 t^*$ ms – $R_{yy}(\tau)$, c) funkcja korelacji wzajemnej fragmentów sygnału $x(t)$ i $y(t)$ dla $t^* = 10 t^*$ ms – $R_{xy}(\tau)$; t^* – czas obserwacji sygnału, τ – argument funkcji korelacji (przesunięcie czasowe).



Rys. 3. Przebiegi sygnałów diagnostycznych łopatki maszyny wirnikowej: a) funkcja gęstości widmowej mocy własnej sygnału $x(t) - S_{xx}(f)$, b) funkcja gęstości widmowej mocy własnej sygnału $y(t) - S_{yy}(f)$, c) moduł funkcji gęstości widmowej mocy wzajemnej sygnałów $x(t)$ i $y(t) - S_{xy}(f)$; t – czas obserwacji sygnału, f – częstotliwość

Funkcje autokorelacji (rys. 2a i 2b) i funkcja korelacji wzajemnej (rys. 2c) charakteryzują się zmianami wynikającymi ze złożenia przebiegów sinusoidalnych i kosinusoidalnych. Można je zatem wyrazić w postaci funkcji analitycznej (tab. 1).

Tabela 1.

Typ przebiegu	Funkcja analityczna (dla $\tau \geq 0$)
Przebieg, którego funkcja autokorelacji sygnału $x(t) - R_{xx}(\tau)$ jest kosinusoidą malejącą wykładniczo	$R_{xx}(\tau) = ae^{-b\tau} \cos(\omega_o\tau)$
Przebieg, którego funkcja autokorelacji sygnału $y(t) - R_{yy}(\tau)$ jest sumą kosinusoidy i sinusoid malejących wykładniczo	$R_{yy}(\tau) = ae^{-b\tau} \cos(\omega_o\tau) + \sum_{i=1}^n c_i e^{-d_i\tau} \sin(\omega_i\tau)$
Przebieg, którego funkcja korelacji wzajemnej sygnałów $x(t)$ i $y(t) - R_{xy}(\tau)$ jest sumą kosinusoidy i sinusoid malejących wykładniczo	$R_{xy}(\tau) = ae^{-b\tau} \cos(\omega_o\tau) + \sum_{i=1}^n c_i e^{-d_i\tau} \sin(\omega_i\tau)$

Parametry a, b, c i d funkcji opisanych analitycznie powinny być tak dobrane aby z najmniejszym błędem przybliżyć je do przebiegów funkcji otrzymanych przy zastosowaniu systemu pomiarowego.

Znając analityczny zapis funkcji autokorelacji i korelacji wzajemnej można na podstawie zależności (16) wyznaczyć funkcję własnej i wzajemnej gęstości widmowej mocy (tablica 2).

$$S_{xx(xy)} = \int_0^T R_{xx(xy)} e^{-j\omega\tau} d\tau \tag{16}$$

Tabela 2.

Funkcja	Postać analityczna funkcji
1	2
Funkcja własnej gęstości widmowej mocy sygnału $x(t) - S_{xx}(j\omega)$	$S_{xx}(j\omega) \Big|_{j\omega=s} = \frac{C_1 e^{-sT} (A_1 s + B_1)}{s^2 + 2bs + (b^2 + \omega_o^2)}$
Funkcja własnej gęstości widmowej mocy sygnału $y(t) - S_{yy}(j\omega)$	dla $i=1$ (patrz tablica 1.) mamy ^(*) $S_{yy}(j\omega) \Big|_{j\omega=s} = \frac{C_2 e^{-sT} (A_2 s + B_2)}{s^2 + 2bs + (b^2 + \omega_o^2)} + \frac{D_2 + E_2 e^{-sT} (F_2 s + G_2)}{s^2 + 2d_1 s + (d_1^2 + \omega_1^2)}$

1	2
Funkcja wzajemnej gęstości widmowej mocy sygnałów $x(t)$ i $y(t) - S_{xy}(j\omega)$	dla $i=1$ (patrz tablica 1.) mamy ^(*) $S_{xy}(j\omega) \Big|_{j\omega=s} = \frac{C_3 e^{-sT} (A_3 s + B_3)}{s^2 + 2bs + (b^2 + \omega_o^2)} + \frac{D_3 + E_3 e^{-sT} (F_3 s + G_3)}{s^2 + 2d_1 s + (d_1^2 + \omega_1^2)}$

* $A_{1,2,3}, B_{1,2,3}, C_{1,2,3}, D_{1,2,3}, E_{1,2,3}, F_{1,2,3}, G_{1,2,3}$ – wielkości stałe zależne od $a, b, c_1, d_1, \omega_o, \omega_1$ i T (okresu obserwacji sygnału)

Na podstawie wzorów (9) i (12) można wyznaczyć model diagnostyczny łopatkki w postaci transmitancji operatorowej. Jej parametry są źródłem informacji diagnostycznej do identyfikacji stanu technicznego badanej łopatkki. Zastosowanie przekształceń z użyciem odpowiednich zależności pomiędzy poszczególnymi sygnałami pozwala wprowadzić do procesu wnioskowania diagnostycznego wielu modeli diagnostycznych, a stąd w sposób znaczący rozszerzyć wibroakustyczną metodę diagnozowania.

6. Podsumowanie

W przypadku zastosowania wibroakustycznej metody diagnozowania podstawą do oceny stanu technicznego jest obecnie widmo drgań. Okazuje się jednak, że operowanie w celach diagnostycznych tylko widmem $X(f)$, a szczególnie jego dyskretną postacią $X(n)$, jest skomplikowane i często nieskuteczne. Dlatego proponuje się, ażeby w procesie analizy drgań dodatkowo użyć funkcji gęstości widmowej mocy sygnału S_{xx} i S_{xy} , tym bardziej że funkcje S_{xx}, S_{xy} mają te szczególne własności, że pozostają w prostych relacjach z dowolnymi sygnałami wibroakustycznymi a także innymi sygnałami np. funkcjonalnymi.

Literatura

1. **Borowczyk H. i inni** (1997): *Model zintegrowanego systemu diagnostycznego zespołu napędowego statków powietrznych*, Opracowanie ITWL Nr 12020/I, ITWL, Warszawa.

2. **Borowczyk H., Lewitowicz J., Lindsted P.** (1998): *The neural diagnostic method and complex system of diagnostic airframe and powerplant*, 21. ICAS Congress, Melbourne, Australia.
3. **Borowczyk H.** (1997): *Model kompleksowego systemu diagnostycznego płatowca i zespołu napędowego statku powietrznego*, V Międzynarodowa Konferencja AIRDIAG'97, ITWL, Warszawa.
4. **Hagel R., Zakrzewski J.** (1984): *Miernictwo dynamiczne*, WNT, Warszawa.
5. **Kotowski A.** (2001): *Wibroakustyczna metoda diagnozowania łopatek wirnikowych oparta na analizie drgań własnych o wysokiej częstotliwości*, 7th International Conference AIRDIAG 2001, ITWL, Warszawa.
6. **Kotowski A., Lindstedt P.** (2001): *Metoda wyznaczania parametrów diagnostycznych na podstawie mierzonych sygnałów diagnostycznych oparta na rekurencyjnych neuronach*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej Nr 8, Wyd. Politech. Białostockiej, Białystok.
7. **Kurowski W.** (1994): *Podstawy teoretyczne komputerowego miernictwa systemów mechanicznych*, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok.
8. **Kurowski W.** (1997): *Dyskretne widmo Fouriera w diagnostyce wibroakustycznej*, Rozprawa Naukowa Politechniki Białostockiej, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok.
9. **Lewitowicz J.** (1997): *Model rozwijania funkcjonalnych systemów w diagnostyce samolotów i śmigłowców*, V Międzynarodowa Konferencja AIRDIAG'97, Warszawa.
10. **Lindstedt P., Borowczyk H., Lewitowicz J. i inni** (1997): *Kompleksowy system diagnostyczny płatowca i zespołu napędowego statku powietrznego (środki i metody) umożliwiający eksploatację według stanu technicznego*, Wniosek racjonalizatorski, ITWL, Warszawa.
11. **Lindstedt P., Borowczyk H.** (1998): *Kompleksowy system diagnostyczny statków powietrznych*, Problemy Badań i Eksploatacji Techniki Lotniczej. T. IV rozdz. 7, ITWL, Warszawa.
12. **Lindstedt P., Gębura A.** (1998): *Diagnozowanie napędów lotniczych w oparciu o analizę parametrów napięcia prądnic*, V Międzynarodowa Konferencja AIRDIAG'97, ITWL, Warszawa.
13. **Lindstedt P.** (1997): *Formowanie sygnałów diagnostycznych*, ZEM PAN, Z. 2, PWN, Warszawa.
14. **Lindstedt P., Szczepanik R.** (2001): *Identyfikacja stosowanych metod i technologii pomiaru drgań turbinowych silników odrzutowych*, Sprawozdanie ITWL nr 415/50, Wyd. ITWL, Warszawa.

15. **Lindstedt P.** (2002): *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*, Wydawnictwo Naukowe ASKON, Warszawa.
16. **Łączkowski R.** (1983): *Wibroakustyka maszyn i urządzeń*. WNT, Warszawa.
17. **Szabatin J.** (2000): *Podstawy teorii sygnałów*, WKŁ, Warszawa.
18. **Szczeciński S.** (1971): *Dwuwirnikowe i dwuprzepływowe lotnicze silniki turbiny: konstrukcje i eksploatacja*, WKŁ, Warszawa.
19. **Szczeciński S.** (1988): *Technika lotnicza*, WKŁ, Warszawa.

VIBROACOUSTIC METHOD IN PROCESS OF ESTIMATE ENGINE'S TECHNICAL CONDITION

Summary: Diagnostics of complex engines is based on appropriate usage of diagnostic methods such as: functional, vibroacoustic, wear away, defectoscope, thermography. In this paper the authors pay attention to the vibroacoustic method particularly. Vibroacoustic signals are universal because of possibility to determine engine functioning and technical condition during an operation and a rest. The ways of carrying out measurements as well as the ways of noise suppression and vibroacoustic signals formation are discussed. General assumptions to diagnostic conclusion are also presented. It is emphasized that conclusion in vibroacoustic method is based on both the identification of diagnostic model during engine investigation and comparison algorithm during operation according to the principles of diagnostics. Engine diagnostics by vibroacoustic method should be confirmed by other methods.

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/5/98.

Paweł Lindstedt, Paweł Ostapkowicz

ŚLABE MIĘDZYOBIEKTOWE INTERAKCJE W PROCESIE DIAGNOZOWANIA WYCIEKÓW Z DŁUGICH RUROCIĄGÓW

Streszczenie: W praktyce eksploatacyjnej spotyka się często obiekty techniczne niepodatne diagnostycznie. Powstał zatem problem polepszania podatności diagnostycznej badanego obiektu. Podatność ma podstawowy wpływ na skuteczność realizowanej działalności diagnostycznej. W pracy przedstawiono uniwersalny sposób polepszania podatności diagnostycznej obiektów. Polega on na dołączeniu do obiektu badanego dodatkowego korekcyjnego obiektu badawczego. Wykazano, że słabe interakcje, jakie występują między obiektami: badanym i badawczym stanowią wartościową informację diagnostyczną, pozwalającą badać diagnostycznie niepodatne obiekty techniczne.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, informacja diagnostyczna, obiekt diagnozowania, podatność diagnostyczna, słabe interakcje

1. Wstęp

Długie rurociągi, ze względu na duże rozmiary, są obiektami technicznymi diagnostycznie niepodatnymi. Ich diagnozowanie, w tym lokalizacja i identyfikacja wycieków, jest trudne i często zawodne. Zapewne dlatego powstało wiele specjalnych metod diagnozowania wycieków z długich rurociągów. Wśród nich wymienia się:

- metodę gradientów ciśnienia,
- metodę funkcji korelacji gradientów ciśnienia,
- metodę obserwacji czoła fali ciśnienia.

Metody te stosowane są często jednocześnie. Wzajemnie się uzupełniają i weryfikują. Mimo to okazuje się, że pozwalają one identyfikować jedynie znaczne wycieki i lokalizować je ze zgrubną dokładnością.

Poszukuje się zatem nowych (dokładniejszych) metod diagnozowania długich rurociągów. Efektem tych poszukiwań jest metoda diagnozowania oparta na pomiarze słabych międzyobiektowych interakcji, które powstają między obiektem badanym (rurociągiem) a specjalnym obiektem badawczym (korektorem).

2. Słabe międzyobiektywne interakcje jako informacja diagnostyczna

W praktyce eksploatacyjnej mają często miejsce sytuacje, w których proces diagnozowania nie może być zrealizowany ze względu na brak dostatecznej aktualnej informacji o obiekcie (jego parametrach) i otoczeniu (zakłóceniach działających na obiekt). Sytuację taką przedstawiono na rysunku 1.



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

Z rysunku 1 otrzymuje się następującą zależność, opisującą obiekt w otoczeniu:

$$H = \frac{P}{z} \quad (1)$$

W zależności (1) transmitancja diagnozowanego obiektu H jest nieznana, a zakłócenie od otoczenia z jest także nieznane.

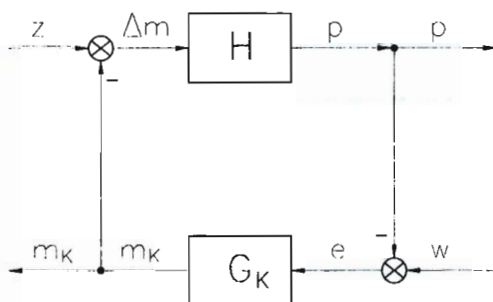
Zatem ma się do dyspozycji tylko jedno równanie z dwiema niewiadomymi. W takim przypadku proces diagnozowania nie może być dostatecznie skutecznie zrealizowany.

W celu rozwiązania tego problemu, często spotykanego w praktyce, opracowano nową metodę pozyskiwania informacji, opierającą się na wywoływaniu słabych interakcji między obiektem badanym o transmitancji H i obiektem badawczym (korektorem) opisanym transmitancją G_K . Układ złożony z obiektu H i korektora G_K przyjmuje następującą postać (rys. 2). Z rysunku 2 otrzymuje się następujące zależności:

$$p = H(z - m_K) \quad (2)$$

$$m_K = G_K w - G_K H z + G_K H m_K \quad (3)$$

Jeśli wiemy, że sygnałem zadany do korektora w jest wartość sygnału wyjściowego p w chwili poprzedniej, to układ równań (2) i (3) jest rozwiązywalny. Można zatem wyeliminować nieznane zakłócenie z , a następnie określić zmiany zachodzące w obiekcie H na podstawie zmian parametrów w korektorze G_K .



Rys. 2. Podatny diagnostycznie obiekt techniczny: G_K – obiekt badawczy (korektor); w – wartość zadana do korektora; e – uchyb regulacji; m_K – sygnał wyjściowy z korektora

Takie podejście, polegające na wywoływaniu słabych interakcji między obiektem badanym i korektorem, a następnie mierzeniu nowych sygnałów diagnostycznych, może być także zastosowane w procesie diagnozowania rurociągów (wcześniej z pozytywnym skutkiem stosowano to podejście do diagnozowania instalacji hydraulicznej) [9].

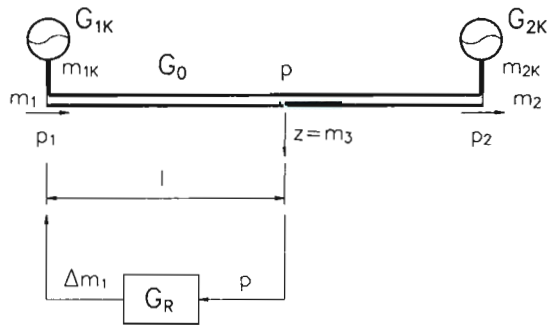
3. Założenia do diagnozowania długich rurociągów z wykorzystaniem słabych międzyobiektywnych interakcji

Schemat rurociągu z korektorami do wywoływania słabych międzyobiektywnych interakcji pokazano na rysunku 3.

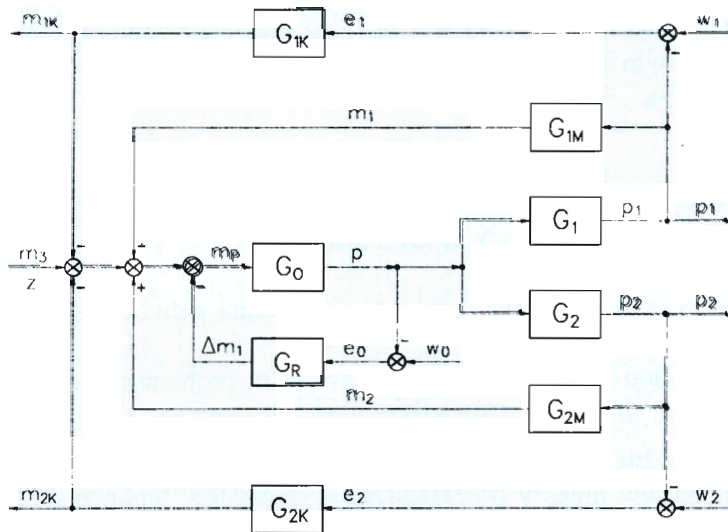
W procesie obsługiwanego rurociągu podstawowym problemem jest identyfikacja wycieku (wartość m_3) oraz lokalizacja wycieku (wartość l).

Rurociąg można sprowadzić do układu automatycznej regulacji (rys. 4).

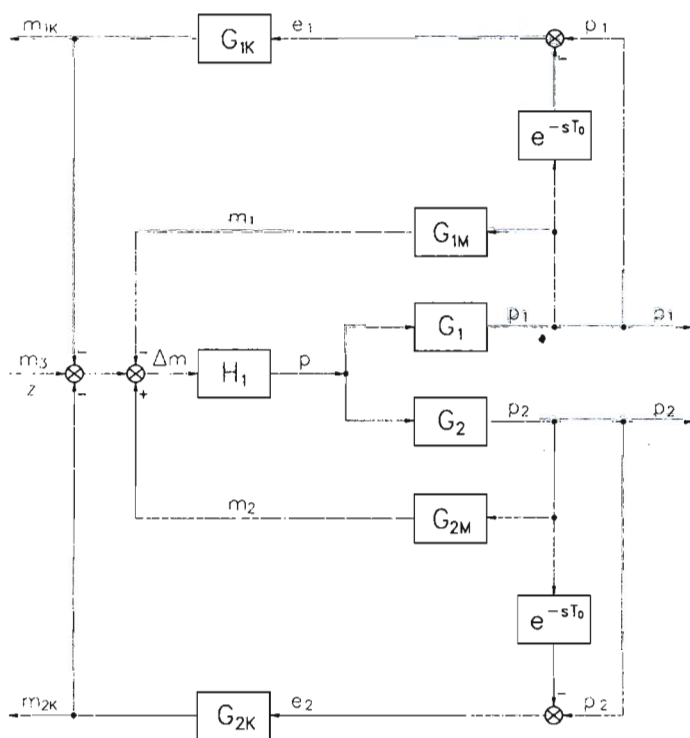
Stosując zasady algebry przekształcania schematów blokowych, układ z rysunku 4 można sprowadzić do następującej postaci (rys. 5).



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; Δm_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



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 identyfikowany 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.

4. Wyznaczenie wycieku m_3

Z modelu symulacyjnego wyznacza się:

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

$$m_3 = \Delta m + m_1 + m_{1K} - m_2 + m_{2K} \quad (5)$$

$$m_3 = p \frac{1}{H_1} + p_1 G_{1M} + m_{1K} - p_2 G_{2M} + m_{2K} \quad (6)$$

Gdy rozpatruje się układ od strony nadającej, to otrzymuje się:

$$m_3 = p_1 \frac{1}{H_1 G_1} + p_1 G_{1M} + m_{1K} - p_2 G_{2M} + m_{2K} \quad (7)$$

$$e_1 = p_1 - p_1 e^{-sT_0} \quad (8)$$

$$(p_1 - p_1 e^{-sT_0}) G_{1K} = m_{1K} \quad (9)$$

$$p_1 = \frac{m_{1K}}{G_{1K}(1 - e^{-sT_0})} \quad (10)$$

$$p_2 = \frac{m_{2K}}{G_{2K}(1 - e^{-sT_0})} \quad (11)$$

Ostatecznie funkcja operatorowa opisująca wyciek, wyznaczona na bazie informacji od strony nadającej, przyjmie postać:

$$m_3 = \frac{m_{1K}}{G_{1K}(1 - e^{-sT_0})H_1 G_1} + \frac{m_{1K} G_{1M}}{G_{1K}(1 - e^{-sT_0})} + m_{1K} - \frac{m_{2K} G_{2M}}{G_{2K}(1 - e^{-sT_0})} + m_{2K} \quad (12)$$

lub

$$m_3 = \frac{m_{1K}}{G_{1K}(1 - e^{-sT_0})H_1 G_1} + \frac{m_{1K} m_1}{G_{1K}(1 - e^{-sT_0})p_1} + m_{1K} - \frac{m_{2K} m_2}{G_{2K}(1 - e^{-sT_0})p_2} + m_{2K} \quad (13)$$

Gdy rozpatruje się układ od strony odbierającej, to otrzymuje się:

$$m_3 = p_2 \frac{1}{H_1 G_2} + p_1 G_{1M} + m_{1K} - p_2 G_{2M} + m_{2K} \quad (14)$$

$$e_2 = p_2 - p_2 e^{-sT_0} \quad (15)$$

$$(p_2 - p_2 e^{-sT_0}) G_{2K} = m_{2K} \quad (16)$$

$$p_2 = \frac{m_{2K}}{G_{2K} (1 - e^{-sT_0})} \quad (17)$$

$$p_1 = \frac{m_{1K}}{G_{1K} (1 - e^{-sT_0})} \quad (18)$$

Ostatecznie funkcja operatorowa opisująca wyciek, wyznaczona na bazie informacji od strony odbierającej rurociągu, przyjmie postać:

$$m_3 = \frac{m_{2K}}{G_{2K} (1 - e^{-sT_0}) H_1 G_2} + \frac{m_{1K} G_{1M}}{G_{1K} (1 - e^{-sT_0})} + m_{1K} - \frac{m_{2K} G_{2M}}{G_{2K} (1 - e^{-sT_0})} + m_{2K} \quad (19)$$

lub

$$m_3 = \frac{m_{2K}}{G_{2K} (1 - e^{-sT_0}) H_1 G_2} + \frac{m_{1K} m_1}{G_{1K} (1 - e^{-sT_0}) p_1} + m_{1K} - \frac{m_{2K} m_2}{G_{2K} (1 - e^{-sT_0}) p_2} + m_{2K} \quad (20)$$

Jeśli wiemy, że m_3 wyznaczone na podstawie (13) i (20) jest identyczne, to:

$$\frac{m_{1K}}{G_{1K} (1 - e^{-sT_0}) H_1 G_1} = \frac{m_{2K}}{G_{2K} (1 - e^{-sT_0}) H_1 G_2} \quad (21)$$

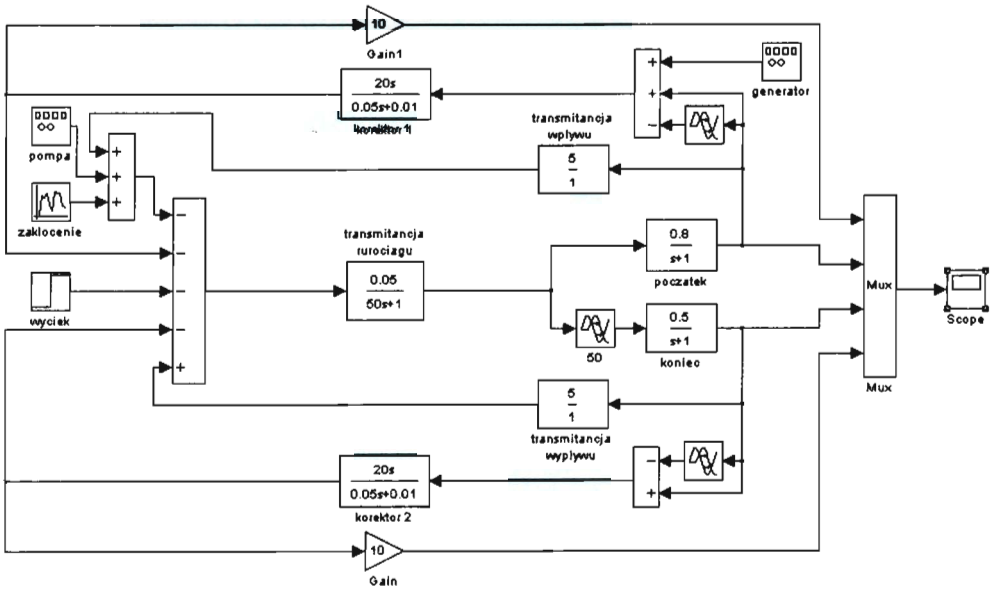
Otrzymane równanie można stronami pomnożyć przez:

$$(1 - e^{-sT_0}) H_1 \quad (22)$$

Oznacza to, że wyciek m_3 może być określony przy dowolnym założeniu transmitancji H_1 (może to być np. obiekt statyczny) i dowolnym czasie opóźnienia sygnału $w_1 = p_1(t + T_0)$ względem sygnału p_1 (dotyczy to w takim samym stopniu sygnały w_2 i p_2). Z zależności (12), (13), (19) i (20) wynika ponadto, że wyciek m_3 da się określić z wykorzystaniem dostępnych sygnałów m_{1K} , m_{2K} , p_1 , p_2 , m_1 , m_2 .

5. Model symulacyjny ropociągu

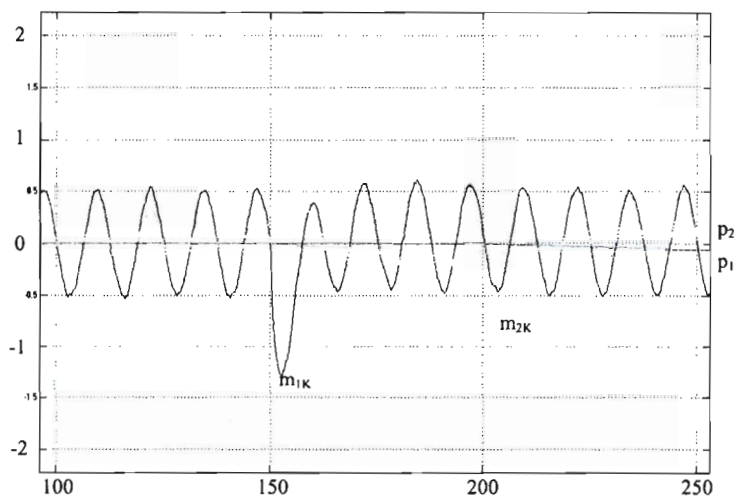
Model symulacyjny ropociągu z wyciekem zaimplementowanym w środowisku MATLAB-SIMULINK przedstawiono na rysunku 6.



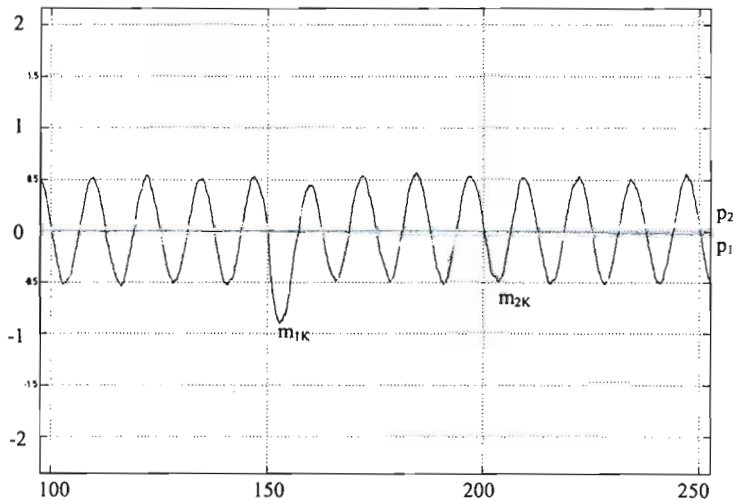
Rys. 6. Schemat modelu symulacyjnego

Model symulacyjny może być wykorzystany do oceny przebiegu sygnałów m_{1K} , m_{2K} , p_1 , p_2 , m_1 , m_2 na wymuszenia harmoniczne $m_3 = 2 \cdot \sin(\omega t)$, $m_3 = 3 \cdot \sin(\omega t)$ itd. oraz wymuszenia impulsowe $m_3 = \Delta(t)$, $m_3 = 2 \cdot \Delta(t)$, $m_3 = 3 \cdot \Delta(t)$.

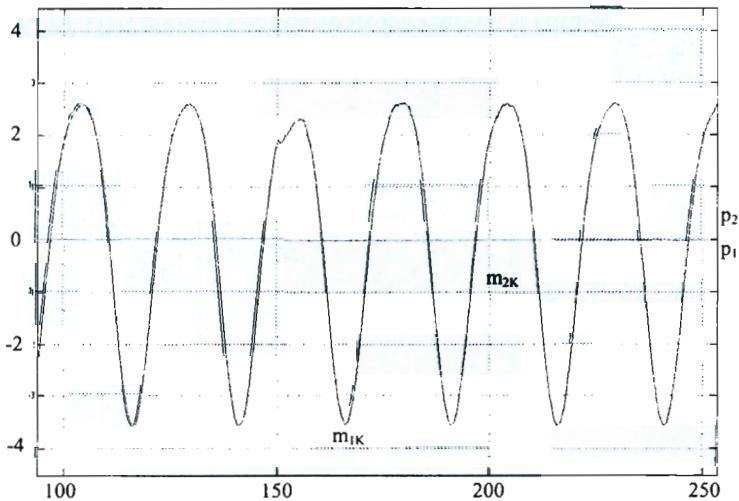
Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rysunkach 7, 8, 9, 10.



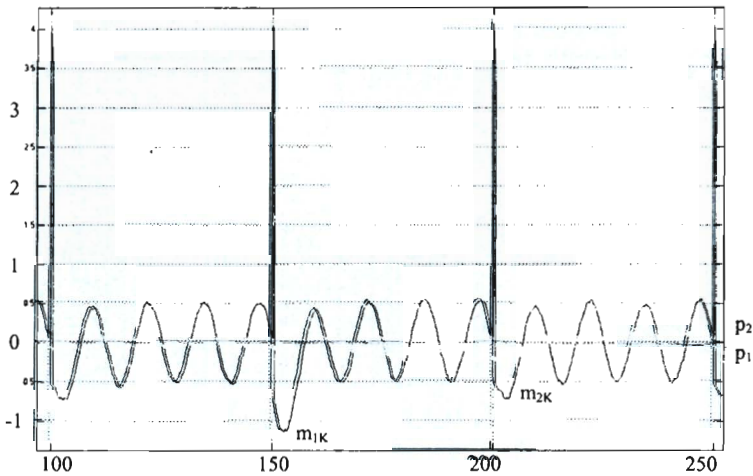
Rys. 7. Przebieg sygnałów p_1, p_2, m_{1K}, m_{2K} dla wycieku m_3 z początkiem w 150 [s]



Rys. 8. Przebieg sygnałów p_1, p_2, m_{1K}, m_{2K} dla wycieku m_3 o wartości o poziomę mniejszej niż na rysunku 7 z początkiem w 150 [s]



Rys. 9. Przebieg sygnałów p_1, p_2, m_{1K}, m_{2K} dla wycieku m_3 o wartości jak na rysunku 7 przy pobudzeniu korektora 1 sygnałem sinusoidalnym



Rys. 10. Przebieg sygnałów p_1, p_2, m_{1K}, m_{2K} dla wycieku m_3 o wartości jak na rysunku 7 przy pobudzeniu korektora 1 sygnałem impulsowym

Z analizy przebiegów $m_3 = f(m_{1K}, m_{2K}, p_1, p_2)$ na rysunku 7 i 8 widać, że przy coraz mniejszych wyciekach dochodzi do zatarcia różnicy w przebiegu pomiędzy sygnałami p_1 i p_2 , co utrudnia identyfikację wystąpienia wycieku. Iden-

tyfikacja ta jest nadal możliwa dzięki sygnałom m_{1K} i m_{2K} , które wyraźnie zmieniają się od zmiany m_3 .

Rysunki 9 i 10 przedstawiają przebiegi $m_3 = f(m_{1K}, m_{2K}, p_1, p_2)$ przy wymuszeniu podawanym na korektor 1, który staje się korektorem nadawczym. W obu przypadkach sygnały m_{1K} i m_{2K} mogą być wykorzystane jako cenna informacja, zwłaszcza po ustaleniu się nowego stanu ustalonego tuż po wycieku i problemów związanych z obserwacją rozchodzenia się fali rozprężeniowej.

Podsumowanie

Stosowane obecnie metody diagnozowania długich ropociągów mogą być uzupełnione o nową metodę, opartą na informacji, którą są sygnały wynikające ze słabych interakcji zachodzących między obiektem badanym (ropociągiem) a obiektem badawczym (korektorem).

Dołączone do ropociągu obiekty badawcze (korektory) do wywołania słabych interakcji między nimi a eksploatowanym ropociągiem nie wpływają na jakość jego funkcjonowania i są łatwe do zrealizowania. Słabe interakcje są mierzalne i stanowią nową informację diagnostyczną, która, jak to wyżej wykazano, może stać się podstawą do identyfikacji i lokalizacji wycieków z ropociągów. Już teraz można stwierdzić, że sygnały m_{1K} i m_{2K} stanowią uzupełnienie do dotychczas wykorzystywanej informacji w procesie diagnozowania niepodatnych diagnostycznie ropociągów.

Literatura

1. **Antoniewicz J.:** *Automatyka*, WNT, Warszawa, 1975.
2. **Grabarczyk Cz.:** *Przepływy cieczy w przewodach*, Envirotech, Warszawa, 1997.
3. **Hegel R., Zakrzewski J.:** *Miernictwo dynamiczne*, WNT, Warszawa, 1984.
4. **Kowalczyk Z., Gunawickrama K.:** *Metoda korelacyjno-modelowa wykrywania przecieków z estymacją współczynnika tarcia*, II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Łągów k/ Zielonej Góry, 1997.
5. **Lindstedt P.:** *Formowanie sygnałów diagnostycznych*, ZEM PAN, Zeszyt 2, 1997.

6. **Lindstedt P.:** *Element korekcyjny jako źródło informacji diagnostycznej*, ZEM PAN, Zeszyt 2, 1995.
7. **Lindstedt P.:** *Antropomorficzne układy badawcze w diagnostyce technicznej*, Prace Naukowe ITWL, Zeszyt 4, Warszawa, 1999.
8. **Lindstedt P.:** *Slabe interakcje w procesie diagnozowania długich rurociągów naftowych i gazowych*, 6th International Conference AIRDIAG'99, ITWL, Warszawa, 2000.
9. **Lindstedt P.:** *Slabe interakcje w procesie diagnozowania wycieków z układów hydraulicznych*, Prace Naukowe ITWL, Zeszyt 10, Warszawa, 2000.
10. **Lindstedt P, Ostapkowicz P.:** *Slabe między obiektowe interakcje w procesie polepszania podatności diagnostycznej długich rurociągów*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej nr 139, Budowa i Eksploatacja Maszyn z. 8, Białystok, 2001.
11. **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, Białystok, 2001.
12. **Niederliński A.:** *Systemy komputerowe automatyki przemysłowej*, tom 2, WNT, Warszawa, 1985.
13. **Ostapkowicz P.:** *Weryfikacja metody lokalizacji wycieków z rurociągów opartej na słabych między obiektowych interakcjach z wykorzystaniem stanowiska modelowego*, 7th International Conference: Airplanes and helicopters diagnostics: AIRDIAG'2001, Ameliówka, 16-19 października 2001.
14. **Sobczak R.:** *Lokalizacja wycieków z rurociągów*, Pomiar Automatyka Robotyka nr 3, 1999.
15. **Żółtowski B., Ćwik Z.:** *Leksykon diagnostyki technicznej*, Wyd. Uczel. ATR, Bydgoszcz, 1996.

THE WEAK INTEROBJECTS INTERACTION IN PROCESS OF DIAGNOSIS EFFLUENTS FROM LONG PIPELINES

Summary: The technical objects impervious to diagnosis are often met in operation practice. Therefore there is a problem with improving diagnostics susceptibility of tested object. The susceptibility has basic influence for efficacy of executed diagnostics activity. There is an universal way of improving diagnostics susceptibility of objects is presented in this work. It works by joining to tested object the additional corrector object. It is showed that weak interobjects interactions, which occur between tested objects and researched, to present valuable diagnostics information. This information permits to test objects impervious to diagnosis.

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/5/98.

Jan Łach*, Jerzy Gagan*

ZUNIFIKOWANE PODEJŚCIE DO ANALIZY RÓWNAŃ BILANSOWYCH REGENERATORÓW NIERUCHOMYCH I OBROTOWYCH

Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono stosunkowo proste, zunifikowane podejście do konstrukcji rozwiązania równań bilansowych, opisujących pola temperatury w regeneratorach cieplnych o przeciwnym przepływie gazów z wypełnieniem nieruchomym. Proponowana procedura została zilustrowana wynikami obliczeń numerycznych, które pozostają w dobrej zgodności z rezultatami znanymi z literatury, ale otrzymanymi za pomocą bardziej złożonych metod.

Oznaczenia

- a, b – stałe współczynniki;
 c – ciepło właściwe, $[J/(kg \cdot K)]$;
 h – wysokość wypełnienia, $[m]$;
 NTU – $= \alpha \cdot Y \cdot h / (\varepsilon \cdot \rho \cdot c_p \cdot v)$, liczba jednostek wymiany dla gazu;
 $NTU_{m,j}$ – liczba jednostek wymiany dla wypełnienia w j -tym okresie (zob. tab. 1);
 NTU_0 – $= [1/NTU_2 + (NTU_{m,2}/NTU_2) \cdot (NTU_1/NTU_{m,1})/NTU_1]^{-1}$, globalna liczba jednostek wymiany;
 t – temperatura wypełnienia, $[K]$;
 T – temperatura gazu $[K]$;
 u – czas $[s]$;
 U_j – czas trwania j -tego okresu $[s]$;

* Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok.

- v – prędkość gazu [m/s];
 Y – pole powierzchni wymiany ciepła wypełnienia przypadająca na jednostkę jego objętości [m^2/m^3];
 z – $= \zeta/h$, bezwymiarowa współrzędna wzdłuż kierunku przepływu gazu.

Symbole greckie

- α – współczynnik przejmowania (wnikania) ciepła [$W/(m^2 \cdot K)$];
 ε – porowatość;
 ζ – współrzędna w kierunku przepływu gazu [m];
 η – $= (\tilde{T}_2'' - T_2')/(T_1' - T_2')$, efektywność regeneratora;
 ϑ – $= (t - T_2')/(T_1' - T_2')$, bezwymiarowa temperatura wypełnienia;
 θ – $= (T - T_2')/(T_1' - T_2')$, bezwymiarowa temperatura gazu;
 ρ – gęstość [kg/m^3];
 τ – czas w ujęciu bezwymiarowym;
 φ – bezwymiarowa współrzędna w kierunku obrotu wirnika regeneratora;
 ϕ – współrzędna w kierunku obrotu wirnika regeneratora;
 ψ_j – kąt j -tej strefy;
 ω – prędkość obrotowa wirnika regeneratora [s^{-1}].

Indeksy dolne

- j – = 1(2), okres grzania (chłodzenia) wypełnienia regeneratora nieruchomego; strefa grzania (chłodzenia) regeneratora obrotowego
 m – dotyczy wypełnienia;
 p – przy stałym ciśnieniu.

Indeksy górne

- ' – w przekroju wlotowym;
" – w przekroju wylotowym;
~ – średnia wartość.

1. Wstęp

Uproszczonym modelem transportu ciepła w urządzeniach takich, jak np. regeneratory cieplne o przeciwprądowym przepływie gazów, zarówno z wypełnieniem nieruchomym jak i z wypełnieniem obrotowym, jest często następujący układ równań bilansowych:

$$\frac{\partial \vartheta_j}{\partial \tau} = a_j \cdot (\theta_j - \vartheta_j), \quad \frac{\partial \theta_j}{\partial z} = b_j \cdot (\vartheta_j - \theta_j), \quad j = 1, 2, \quad (1)$$

któremu przyporządkowuje się odpowiednie warunki brzegowe i początkowe. W przypadku regeneratorów z wypełnieniem nieruchomym zakłada się regularnie periodyczny stan ich pracy, w przypadku regeneratorów obrotowych przyjmuje się stacjonarny stan ich działania. Rozwiązanie tak sformułowanego zagadnienia pozyskiwane jest w oparciu o podejścia: analityczne, numeryczne i mieszane. Wśród metod analitycznych należy przede wszystkim wskazać na zasadnicze znaczenie propozycji Nusselta [1,2] i Hausena [3]. Istota pierwotnego podejścia Nusselta [1] sprowadzała się do redukcji powyższego układu równań różniczkowych cząstkowych pierwszego rzędu do równania różniczkowego cząstkowego typu hiperbolicznego i jego rozwiązania metodą Riemanna. Odmienny tryb postępowania, polegający na sprowadzeniu równań (1) do układu równań całkowych Volterry i poszukiwaniu ich rozwiązania metodą kolejnych przybliżeń, został przedstawiony przez Nusselta [2] w jednej z jego publikacji poświęconej regeneratorom. Hausen zaś [3] znalazł rozwiązanie układu równań różniczkowych (1) za pomocą metody rozdzielania zmiennych, przy czym jego rozważania były ukierunkowane na analizę symetrycznych regeneratorów stacjonarnych.

Jeśli chodzi o zasadnicze podejścia numeryczne, to należy przede wszystkim wskazać na prace: Saundersa i Smolenieca [4], Lambertsona [5] oraz Hilla i Willmotta [6].

Metody mieszane były zaś stosowane bądź bezpośrednio do układu równań różniczkowych (1) bądź do ekwiwalentnego mu układu równań całkowych Volterry, jak to miało miejsce w przypadku podejścia Iliffe [7]. Ponadto, należy nadmienić, iż Romie [8] otrzymał rozwiązanie równań (1) poprzez założenie, że może być ono *a priori* wyrażone w postaci wielomianów z nieznanymi współczynnikami, które zostały przez niego wyznaczone z odpowiedniego układu równań algebraicznych, czyniącego zadość stosownym warunkom brzegowym i początkowym.

Różnorodność metod, wykorzystywanych do pozyskania rozwiązania powyższego problemu, skłoniła nas do adaptacji podejścia bazującego na konstrukcji rozwiązania ogólnego układu równań różniczkowych (1) przytoczonego w [9]

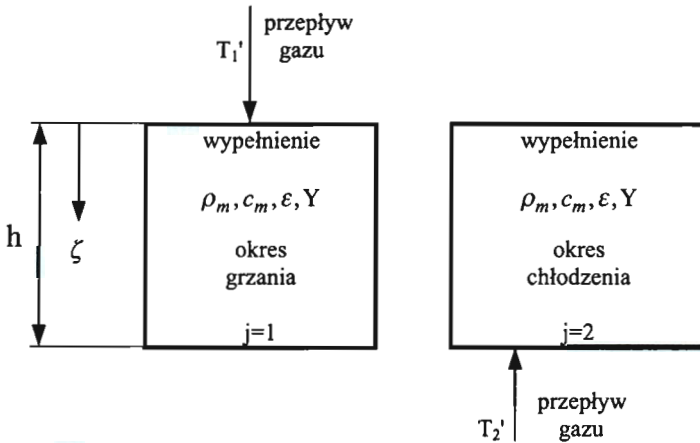
i wyrażonego za pomocą funkcji specjalnych dwóch zmiennych: $Bes_n(x, y)$ i $Bs_n(x, y)$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, o których bliżej w Dodatku do niniejszej pracy.

2. Sformułowanie problemu

Jeśli weźmie się pod uwagę znane na ogół założenia upraszczające i wprowadzi się bezwymiarowe wielkości, wyszczególnione w zestawieniu oznaczeń i pokazane na rys.1, to dochodzi się do następującej postaci wyjściowego układu równań bilansowych (1):

$$\frac{\partial \vartheta_j}{\partial \tau} = NTU_{m,j} \cdot (\theta_j - \vartheta_j), \quad \frac{\partial \theta_j}{\partial z} = NTU_j \cdot (\vartheta_j - \theta_j), \quad j = 1, 2, \quad (2)$$

opisujących pola temperatury w regeneratorach stacjonarnych i obrotowych. W tabeli 1 wskazano na odpowiedniość między parametrami, zwykle stosowanymi do opisu obu tych wymienników ciepła z wypełnieniem.



Rys. 1. Współrzędne i niektóre oznaczenia w odniesieniu do regeneratora o nieruchomym wypełnieniu

W odniesieniu do regeneratorów obrotowych rozważania dotyczą stacjonarnego stanu ich działania; w przypadku regeneratorów z wypełnieniem nieruchomym – regularnie periodycznego stanu, charakteryzującego się powtarzalnością ilościowych własności procesu wymiany w tych samych okresach pracy. Równaniom

różniczkowym (2) przyporządkowuje się więc następujące warunki brzegowe i początkowe:

$$\theta_1(\tau, z = 0) = 1, \quad (3)$$

$$\theta_2(\tau, z = 0) = 0, \quad (4)$$

$$\vartheta_1(\tau = 0, z) = \vartheta_2(\tau = 1, 1 - z), \quad (5)$$

$$\vartheta_1(\tau = 1, z) = \vartheta_2(\tau = 0, 1 - z). \quad (6)$$

Tabela 1.

Odpowiedniość parametrów w opisie regeneratorów stacjonarnych i obrotowych

Regenerator stacjonarny	u	U_j	$\tau = \frac{u}{U}$	$NTU_{m,j} = \alpha_j \cdot Y \cdot U_j \cdot [(1-\varepsilon) \cdot \rho_m \cdot c_m]^{-1}$
Regenerator obrotowy	ϕ	Ψ_j	$\varphi = \frac{\phi}{\Psi}$	$NTU_{m,j} = \alpha_j \cdot Y \cdot \Psi_j \cdot [(1-\varepsilon) \cdot \rho_m \cdot c_m \cdot \Psi]^{-1}$

Chociaż ograniczamy się tu do przypadku regeneratora stacjonarnego, to jednak otrzymane wyniki mogą być także wykorzystane do analizy regeneratora obrotowego. W tym celu należy uwzględnić powyżej przyjęte założenia i uwagi oraz informacje zawarte w tabeli 1.

3. Rozwiązanie problemu

Konstrukcja rozwiązania powyżej sformułowanego zagadnienia początkowo-brzegowego (2)÷(6) bazuje na rozwiązaniu ogólnym układu równań różniczkowych cząstkowych pierwszego rzędu, które przytoczono w pracy [9]. Jest ono wykorzystywane w trakcie wyznaczania pól temperatury zarówno w okresie grzania jak i chłodzenia wypełnienia. Można pokazać, że rozkłady temperatury w pierwszym z tych okresów są opisane następującymi wyrażeniami:

$$\begin{aligned} \vartheta_1(\tau, z) = & \vartheta_1(0, z) \cdot \exp(-NTU_{m,1} \cdot \tau) + \int_0^z \vartheta_1(0, \mu) \cdot \exp\{-[NTU_{m,1} \cdot \tau + \\ & + NTU_1 \cdot (z - \mu)]\} \cdot Bes_1(NTU_{m,1} \cdot NTU_1 \cdot \tau, z - \mu) \cdot d\mu + \\ & + \exp[-(NTU_{m,1} \cdot \tau, NTU_1 \cdot z)] \cdot Bs_1(NTU_{m,1} \cdot \tau, NTU_1 \cdot z), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \theta_1(\tau, z) = & \exp[-(NTU_{m,1} \cdot \tau + NTU_1 \cdot z)] \cdot Bs_0(NTU_{m,1} \cdot \tau, NTU_1 \cdot z) + \\ & + NTU_1 \cdot \int_0^z \vartheta_1(0, \delta) \cdot \exp\{-[NTU_{m,1} \cdot \tau + NTU_1 \cdot (z - \delta)]\} \cdot \\ & \cdot Bes_0[NTU_{m,1} \cdot NTU_1 \cdot (z - \delta), \tau] \cdot d\delta . \end{aligned} \quad (8)$$

Natomiast rozkłady temperatury w okresie chłodzenia wypełnienia są określone zależnościami:

$$\begin{aligned} \vartheta_2(\tau, z) = & \vartheta_2(0, z) \cdot \exp(-NTU_{m,2} \cdot \tau) + \int_0^z \vartheta_2(0, \mu) \cdot \exp\{-[NTU_{m,2} \cdot \tau + \\ & + NTU_2 \cdot (z - \mu)]\} \cdot Bes_1(NTU_{m,2} \cdot NTU_2 \cdot \tau, z - \mu) \cdot d\mu, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \theta_2(\tau, z) = & NTU_2 \cdot \int_0^z \vartheta_2(0, \delta) \cdot \exp\{-[NTU_{m,2} \cdot \tau + NTU_2 \cdot (z - \delta)]\} \cdot \\ & \cdot Bes_0[NTU_{m,2} \cdot NTU_2 \cdot (z - \delta), \tau] \cdot d\delta \end{aligned} \quad (10)$$

Nieznane funkcje: $\vartheta_1(0, z)$ i $\vartheta_2(0, z)$ mogą być wyznaczone na podstawie warunków: (5) i (6). Jeśli przy tym uwzględni się rozwiązania ogólne: (7) i (9), to dochodzi się do następującego układu równań całkowych Volterry:

$$\begin{aligned} \vartheta_1(0, z) \cdot \exp(-NTU_{m,1}) + \int_0^z \vartheta_1(0, \mu) \cdot \exp\{-[NTU_{m,1} + NTU_1 \cdot (z - \mu)]\} \cdot \\ \cdot Bes_1(NTU_{m,1} \cdot NTU_1, z - \mu) \cdot d\mu = \vartheta_2(0, 1 - z) - \exp[-(NTU_{m,1} + NTU_1 \cdot z)] \cdot \\ \cdot Bs_1(NTU_{m,1}, NTU_1 \cdot z), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_1(0, z) - \vartheta_2(0, 1 - z) \cdot \exp(-NTU_{m,2}) - \int_0^{1-z} \vartheta_2(0, \mu) \cdot \exp\{-[NTU_{m,2} + \\ + NTU_2 \cdot (1 - z - \mu)]\} \cdot Bes_1(NTU_{m,2} \cdot NTU_2, 1 - z - \mu) \cdot d\mu = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Tabela 2.

Rozkład wylotowej temperatury gazu w okresie chłodzenia wypełnienia*

$$\left(\frac{NTU_{m,2} \cdot NTU_1}{NTU_{m,1} \cdot NTU_2} = 1., \quad \frac{NTU_2}{NTU_1} = 1. \right)$$

θ_2	NTU_0	$NTU_{m,2} / NTU_2$			
		.25	.5	.75	1.
$\theta_2(0,1)$	.5	.360	.385	.410	.434
		.3593	.3852	.4100	.4347
	1.	.553	.602	.648	.689
		.5530	.6028	.6484	.6890
	2.	.744	.810	.862	.901
		.7442	.8097	.8616	.9006
$\theta_2(1,1)$	.5	.307	.281	.255	.230
		.3070	.2808	.2550	.2301
	1.	.445	.391	.337	.286
		.4454	.3906	.3372	.2864
	2.	.582	.495	.407	.323
		.5823	.4947	.4074	.3234

* Wyniki Romie'go [8] przytoczono w górnych wierszach, a otrzymane za pomocą proponowanej przez nas metody – w dolnych.

Układ ten może być rozwiązany metodą kolejnych przybliżeń. Procedura taka jest jednak uciążliwa z punktu widzenia jej analitycznej realizacji. Prostsza konstrukcja rozwiązana sprowadza się do zastosowania metody kollokacji. W ten sposób równania (11) i (12) można zredukować do następującego układu liniowych równań algebraicznych:

$$\exp(-NTU_{m,1}) \cdot \vartheta_1(0, z_1) - \vartheta_2(0, z_n) = P(z_1), \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^{i-1} C_k \cdot \vartheta_1(0, z_k) \cdot K_1(z_i, z_k) + [\exp(-NTU_{m,1}) + C_i \cdot K_1(z_i, z_i)] \cdot \vartheta_1(0, z_i) + \vartheta_2(0, z_{n-i+1}) = P(z_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (14)$$

$$\vartheta_1(0, z_i) - \sum_{k=1}^{i-1} C_k \cdot \vartheta_2(0, z_k) \cdot K_2(z_i, z_k) - [\exp(-NTU_{m,2}) + C_i \cdot K_2(z_i, z_{n-i+1})] \cdot \vartheta_2(0, z_{n-i+1}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (15)$$

gdzie:

$$K_1(z, \mu) = \exp\{-[NTU_{m,1} + NTU_1 \cdot (z - \mu)]\} \cdot Bes_1(NTU_{m,1} \cdot NTU_1, z - \mu), \quad (16)$$

$$K_2(z, \mu) = \exp\{-[NTU_{m,2} + NTU_2 \cdot (1 - z - \mu)]\} \cdot Bes_1(NTU_{m,2} \cdot NTU_2, 1 - z - \mu), \quad (17)$$

$$P(z) = \exp[-(NTU_{m,1} + NTU_1 \cdot z)] \cdot Bs_1(NTU_{m,1}, NTU_1 \cdot z), \quad (18)$$

$$C_k = \Delta z, \quad k = 2, \dots, i-1; \quad C_1 = C_i = \Delta z/2, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (19)$$

Tabela 3.

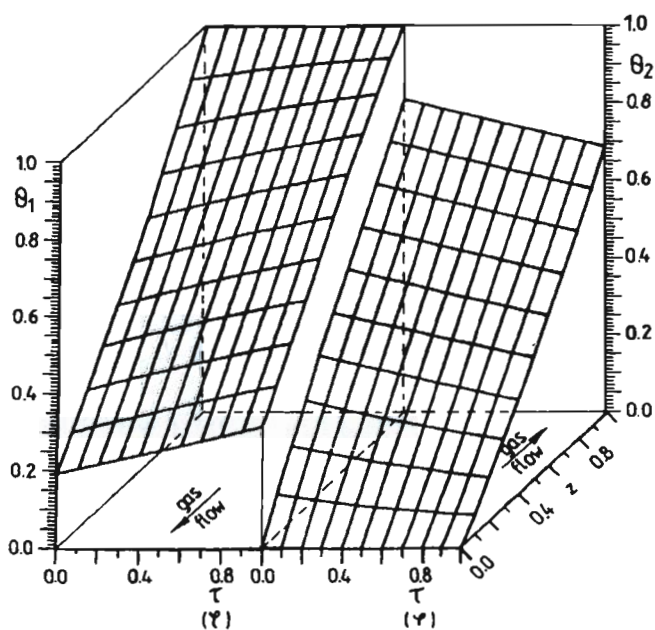
Efektywność regeneratora (w %) wg różnych autorów

$$\left(\frac{NTU_{m,2} \cdot NTU_1}{NTU_{m,1} \cdot NTU_2} = 1., \quad \frac{NTU_2}{NTU_1} = 1. \right)$$

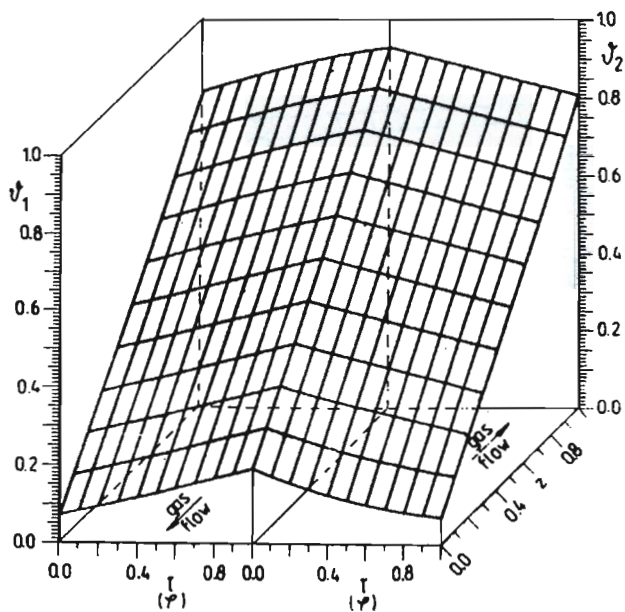
$\frac{NTU_{m,2}}{NTU_2}$	.5			1.		
	NTU_0	.5	1.	2.	.5	1.	2.
Wyniki własne	33.1	49.2	64.9	32.3	46.9	60.2
Hausen [3]	30.3	47.1	62.8	29.0	44.1	57.5
Saunders i Smoleniec [4]	33.1	49.7	64.8	29.2	45.5	59.5
Kays i London [10]	33.0	49.1	64.9	32.2	46.7	60.1
Romie [8]	33.0	49.1	64.9	32.2	46.7	60.1

Ich rozwiązanie metodą eliminacji Gaussa daje wartości nieznanych dotąd funkcji: $\vartheta_1(0, z_i)$ i $\vartheta_2(0, z_i)$ w każdym punkcie ($i = 1, 2, \dots, n$) kollokacji w przedziale $[0, 1]$. Wprowadzenie ich do zależności od (7) do (10) prowadzi już do rozwiązania rozważanego problemu.

Na rysunku 2 i rysunku 3 pokazano przykładowe rozkłady temperatury gazu i wypełnienia, a w tabelach: 2 i 3 zamieszczono porównanie otrzymanych wyników z rezultatami znanymi z powszechnie cenionej literatury przedmiotu. Zwracamy uwagę na fakt, że zaproponowane podejście jest niewątpliwie prostsze od dotychczasowych sposobów pozyskiwania rozwiązania rozważanego problemu; daje przy tym poprawne wyniki i nie wymaga wyboru a priori postaci funkcji do aproksymacji poszukiwanych pól temperatury. Przekonująca jest także pod tym względem analiza podobnego zagadnienia, przedstawiona w [11].



Rys. 2. Rozkład temperatury gazu ($NTU_{m,1} = NTU_{m,2} = 1$, $NTU_1 = NTU_2 = 6$)



Rys. 3. Rozkład temperatury wypełnienia ($NTU_{m,1} = NTU_{m,2} = 1$, $NTU_1 = NTU_2 = 6$)

4. Porównanie wyników obliczeń z danymi pomiarowymi

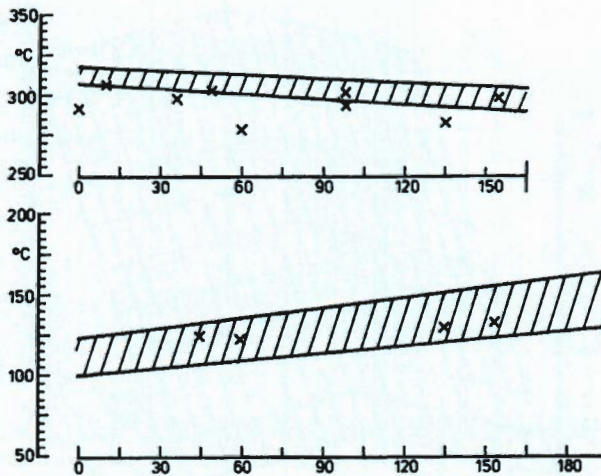
Wyniki obliczeń pól temperatury w badanych regeneratorach i ich porównanie z danymi uzyskanymi na drodze eksperymentalnej przedstawiono w formie graficznej. Na rysunku 4 zaprezentowano wyniki obliczeń rozkładów temperatury gazów w przekrojach wylotowych regeneratora, przy czym uwzględniono niepewność określoną wzorem:

$$\Delta T = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial NTU_{m,1}} \cdot \Delta NTU_{m,1} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial NTU_{m,2}} \cdot \Delta NTU_{m,2} \right)^2}.$$

Niepewności: $\Delta NTU_{m,1}$ oraz $\Delta NTU_{m,2}$ wyznaczono jako odchylenie standardowe

$$\Delta \delta = \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{\partial \delta}{\partial x_j} \cdot \Delta x_j \right)^2},$$

w którym $\delta = \delta(x_1, \dots, x_M)$, przy czym Δx_j jest odchyleniem standardowym zmiennej x_j .



Rys. 4. Rozkłady temperatury gazów w przekrojach wylotowych badanego regeneratora, wyznaczone na podstawie danych pomiarowych: a) temperatura powietrza, b) temperatura spalin

Znakiem x naniesiono wartości temperatur otrzymane w pomiarach bezpośrednich (zaznaczenie niepewności pomiarowych temperatur pominięto, a to ze względu na małe wartości tych niepewności).

Analiza przedstawionych wyników umożliwi sformułowanie następujących wniosków:

- tendencje zmian temperatury odzwierciedlone są prawidłowo,
- przedział obliczeniowych wartości temperatur spalin w przekroju wylotowym regeneratora (wynikający z niepewności ich wyznaczenia) obejmuje $\cong 75\%$ wyników doświadczalnych,
- przedział obliczeniowych wartości temperatur gorącego powietrza w przekroju wylotowym regeneratora (wynikający z niepewności wyznaczenia) obejmuje $\cong 40\%$ wyników pomiarowych,
- niepewność obliczonych wartości wylotowych temperatur spalin jest znacznie większa niż powietrza, co bezpośrednio wynika z większej niepewności wyznaczenia strumienia masy spalin niż strumienia masy powietrza.

Uwagi końcowe

Zaprezentowane porównanie wyników obliczeń numerycznych i własnych danych pomiarowych, uzyskanych bezpośrednio na wielkogabarytowych obiektach rzeczywistych, dowodzi, że przedstawiony opis przenoszenia ciepła w regeneratorsze obrotowym, oparty na równaniach bilansu energii wewnętrznej uzupełnionych korelacjami doświadczalnymi określającymi współczynniki przejmowania ciepła, daje wyniki zadowalająco zbieżne z rezultatami eksperymentalnymi.

Oceniając opis modelowy rozważanego procesu, należy również mieć na uwadze także założenia upraszczające, które przyjęto przy formułowaniu opisu. Założenia te z pewnością deformują rzeczywisty obraz rozważanego procesu, aczkolwiek – jak to wynika z przedstawionej analizy – nie wypaczają istoty zjawisk rzeczywistych.

Literatura

- [1] **Nusselt W.:** *Die Theorie des Winderhitzer*, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Band 71, Heft 3 (1927), s. 85-91.
- [2] **Nusselt W.:** *Der Beharrungszustand im Winderhitzer*, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Band 72, Heft 30 (1928), s. 1052-1054.

- [3] **Hausen H.:** *Über die Theorie des Wärmeaustausches in Regeneratoren*, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Band 9, Heft 3 (1929), s. 173-200.
- [4] **Saunders O. A, Smoleniec S.:** *Heat Regenerators*, Proceedings of the 7th International Congress for Applied Mechanics, Vol. 3 (1948), s. 91-105.
- [5] **Lambertson T. J.:** Performance factors of a periodic-flow heat exchanger, Trans. ASME, Vol. 80, (1958), s. 586-592.
- [6] **Hill A., Willmott A. J.:** *A robust method for regenerative heat exchanger calculations*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 2 (1978), s. 241-249.
- [7] **Iliffe C. E.:** *Thermal analysis of the contra-flow regenerative heat exchanger*, The Institution of Mechanical Engineers, Applied Mechanics, Vol. 159 (1948), s. 363-372.
- [8] **Romie F. E.:** *Periodic thermal storage: The regenerator*, Trans. ASME (J. Heat Transfer), Vol. 101 (1979), s.726-731.
- [9] **Łach J., Pieczka W.:** *On the general solution to a certain class of heat and /or mass transfer problems*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No.10 (1985), s.1976-1981.
- [10] **Kays W. M., London A. L.:** *Compact heat exchangers*, 3rd ed., McGraw-Hill Book Co., New York (1984).
- [11] **Łach J., Żyszkowski W.:** *Application of some special functions to the counterflow heat exchanger analysis*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences (Technical Sciences), Vol.34, No.11-12 (1986), s. 719-730.
- [12] **Корольков Б. П.:** *Специальные функции для исследования динамики нестационарного теплообмена*, Наука, Москва (1976).

UNIFORM APPROACH TO CONSTRUCTION OF BALANCE EQUATIONS FOR FIXED MATRIX HEAT REGENERATORS

Summary: The paper presents a simplified uniform approach to construction of balance equations and a solution describing temperature fields for fixed matrix heat regenerators of the countercurrent flow arrangement. The proposed procedure is illustrated with results of numerical solutions data which remain in good agreements with well-known results from literature.

DODATEK

Wykorzystywane w pracy funkcje specjalne dwóch zmiennych są zdefiniowane za pomocą następujących szeregów potęgowych:

$$Bes_n(x, y) \stackrel{df}{=} \sum_{m=\max(-n,0)}^{\infty} \frac{x^{m+n} \cdot y^m}{(m+n)!m!}, \quad n = 0, \pm 1, \dots, \quad (D1)$$

$$Bs_n(x, y) \stackrel{df}{=} \sum_{m=\max(0,n)}^{\infty} \frac{x^m}{m!} \sum_{k=0}^{m-n} \frac{y^k}{k!}, \quad n = 0, \pm 1, \dots \quad (D2)$$

Funkcje te spokrewnione są z funkcjami Bessela, ponieważ

$$Bes_n(x, y) = \begin{cases} (x/y)^{n/2} \cdot I_n(2\sqrt{xy}), & x > 0, \quad y > 0 \\ (-x/y)^{n/2} \cdot I_n(-2\sqrt{-xy}), & x < 0, \quad y > 0, \\ (x/y)^{n/2} \cdot I_n(-2\sqrt{xy}), & x < 0, \quad y < 0, \\ (-x/y)^{n/2} \cdot I_n(2\sqrt{-xy}), & x > 0, \quad y < 0, \end{cases} \quad (D3)$$

Ponadto, funkcje specjalne (D1) i (D2) pozostają w określonej relacji do funkcji specjalnych wprowadzonych przez Korolkowa [12]. Zachodzą bowiem następujące tożsamości:

$$U(x, y) \equiv Bs_0(y, x), \quad (D4)$$

$$V_{i,o}(x, y) \equiv e^{-(x+y)} \cdot Bes_{i-1}(y, x) \equiv e^{-(x+y)} \cdot Bes_{1-i}(x, y), \quad (D5)$$

$$V_i(x, y) \equiv e^{-(x+y)} \cdot \sum_{k=i-1}^{\infty} \binom{k}{i-1} Bes_k(y, x) \equiv e^{-(x+y)} \cdot \sum_{k=i-1}^{\infty} \binom{k}{i-1} Bes_{-k}(x, y), \quad (D6)$$

$$V_{i,k}(x, y, c_k) \equiv \frac{1}{c_k^{i-1}} e^{-(x+y)} \sum_{n=i-1}^{\infty} \binom{n}{i-1} Bes_n(c_k y, x/c_k), \quad (D7)$$

$$f_i(x, y) \equiv \frac{y^{i-1}}{(i-1)} - e^{-(x+y)} \cdot \sum_{k=i-1}^{\infty} \binom{k}{i-1} Bes_k(y, x), \quad (D8)$$

$$f_{i,k}(x, y, c_k) \equiv e^{-(1-c_k)y} \cdot Bes_{i-1}(y, 0) - \frac{1}{c_k^{i-1}} e^{-(x+y)} \times \sum_{n=i-1}^{\infty} \binom{n}{i-1} Bes_n(c_k y, x/c_k). \quad (D9)$$

Eugeniusz Sajewicz*, Jarosław Sidun*, Tomasz Koronkiewicz**

ZACHOWANIE SIĘ KRĘGOSŁUPA ŁĘDŹWIOWEGO PODDANEGO KOMPRESJI ZE ZGINANIEM W WARUNKACH STABILIZACJI TRANSPEDIKULARNEJ

Streszczenie: Przedstawiono wyniki badań przemieszczeń odcinka lędźwiowego kręgosłupa, poddanego jednocześnie kompresji i zginaniu (tzw. mimośrodowe ściskanie). Badano przemieszczenia kręgu L3 dla dziewięciu preparatów ustabilizowanych za pomocą systemów *Socon*, *Omega* oraz *Bial-Stab*, a następnie pomiary powtarzano po wykonaniu korporektomii na poziomie L3. Wyniki badań porównywano z uzyskanymi na preparatach niestabilizowanych. Wykazano, że brak ciągłości przedniej kolumny kręgosłupa nie wpływa na biomechaniczną jakość stabilizacji w zakresie stosowanych obciążeń.

Wstęp

Stosowana od kilkudziesięciu lat metoda stabilizacji transpedikularnej kręgosłupa znajduje zastosowanie przede wszystkim w odcinku lędźwiowo-krzyżowym, gdzie nasady łuków kręgów mają większe przekroje, ponadto znaczne obciążenia oraz ruchomość tego odcinka wymagają stabilnego zespolenia. W piśmiennictwie istnieją rozbieżności co do zachowania się ustabilizowanego segmentu kręgosłupa poddanego obciążeniu w warunkach nieciągłości przedniej kolumny. Według Harmsa [1] uszkodzenie trzonu pomiędzy łączonymi segmentami powoduje przejście około 90% obciążenia przez stabilizator. Vorr i współpracownicy [2] podkreślają natomiast, że przy braku trzonu szczególnie istotne znaczenie ma zachowanie więzadeł podłużnych przednich, nawet w przypadku trwałego odkształcenia stabilizatora.

Celem pracy jest ocena biomechanicznych parametrów układu stabilizator transpedikularny-lędźwiowy odcinek kręgosłupa w przypadku pełnej przedniej kolumny oraz symulowanego jej uszkodzenia (korporektomia).

* Katedra Materiałoznawstwa Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej.

** Klinika Ortopedii Akademii Medycznej w Białymstoku.

Material i metoda badań

Badania przeprowadzono na 9 preparatach odcinka lędźwiowego (L1-L5) pobranych ze zwłok. Przeznaczone do badań odcinki zostały ostrożnie wyizolowane 1-3 dni po śmierci, z zachowaniem integralności więzadeł. Preparaty przechowywano w temperaturze -20°C w podwójnych torbach polietylenowych, owiniętych ręcznikiem nasączonym roztworem 0,9% NaCl, w celu uniknięcia wysuszenia. Przed badaniami preparaty rozmrażano do temperatury $+5^{\circ}\text{C}$ i do momentu rozpoczęcia testów utrzymywano w wilgotnym środowisku (bawełniana gaza nasączana 0,9% NaCl). Tkanki miękkie usuwano z pozostawieniem nienaruszonych więzadeł, torebek stawowych, krążków i elementów kostnych. Podobna metoda pobierania i przechowywania preparatów stosowana jest przez innych autorów [3, 4].

Badania biomechaniczne wykonano na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej INSTRON, w Katedrze Materiałoznawstwa Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej. Badany preparat mocowano w kłach przyrządu (rys. 1), zaprojektowanego specjalnie do wykonania niniejszych badań. Taki sposób mocowania umożliwia przemieszczenie preparatu w kierunku osiowym, a ponadto w płaszczyźnie strzałkowej i poprzecznej. Istotne jest również, że dzięki temu możliwe jest zachowanie swobody ruchu kręgów L1 i L5 (jednak bez przemieszczeń poprzecznych), a tym samym zbliżenie warunków badań do fizjologicznych. Preparaty ze stabilizacją odcinka L2-L4 pokazano na rysunku 2.

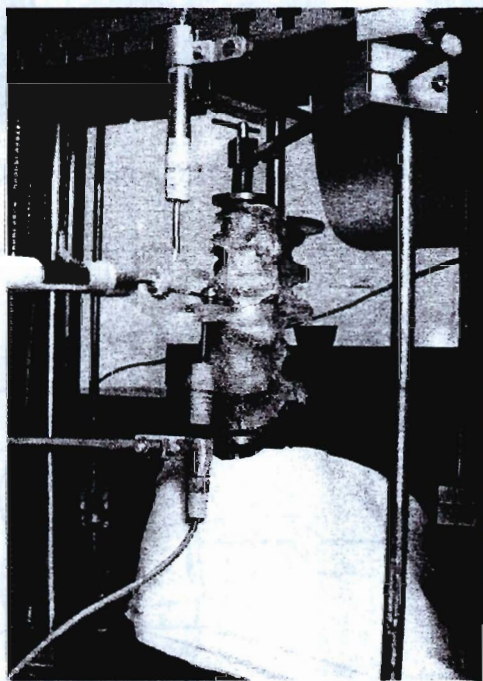
Program badań przewidywał pomiary przemieszczeń liniowych oraz kątowych kręgu L3 w płaszczyźnie strzałkowej i czołowej, w warunkach tzw. mimośrodowego ściskania. W tym celu przykładano obciążenie do wyrostka kolczystego kręgu L1 w odległości 5cm od środka trzonu (rys. 3). Przesunięcie wektora siły względem środka trzonu pozwala na uzyskanie, oprócz ściskania, również zginania preparatu (pojawia się moment gnący). Pomiary wykonano przy zastosowaniu następujących wartości momentów: 3,75; 5,0; 7,5; 10,0 Nm, przy czym szybkość przesuwu trawersy maszyny wytrzymałościowej wynosiła 1 mm/min. 0,5 cm poniżej górnej powierzchni trzonu kręgu L3 umieszczano sztywny pręt z kulkami, zgodnie ze schematem na rysunku 3.

Czujniki indukcyjne zakończone talerzykami oporowymi, stykającymi się z kulkami, pozwalały na pomiar przemieszczenia liniowego (w kierunku tylnoprzodnym – wymiar x), a także pośrednio na wyznaczenie przemieszczenia kąтового (rotacji w płaszczyźnie strzałkowej – wymiary y_1, y_2). Każdy preparat był poddawany trzem wariantom badań:

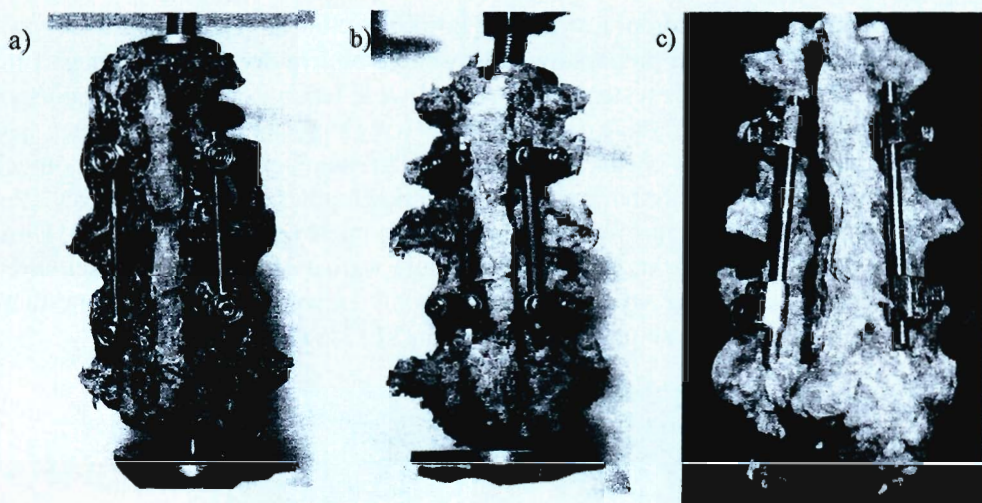
- bez stabilizacji
- z założonym stabilizatorem

- z założonym stabilizatorem i wykonaną korporektoomią na poziomie L3.

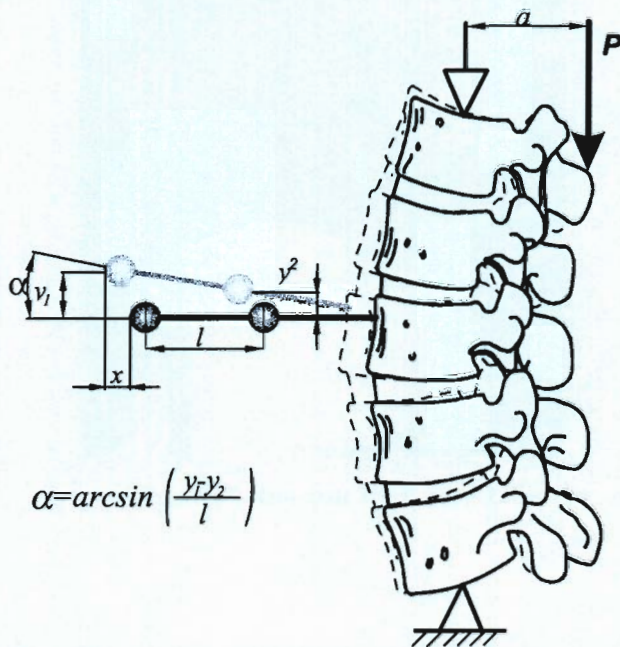
Do stabilizacji badanych preparatów stosowano stabilizatory Socon, Omega oraz Bial-Stab. Zróżnicowanie systemów daje możliwość lepszej oceny przyjętego sposobu stabilizacji, zmniejszając przypadkowy wpływ systemu. Celem pracy jest bowiem biomechaniczna ocena stabilizacji przeznasadowej, a nie poszczególnych systemów. Porównanie systemów jest przedmiotem dalszej pracy autorów. Ponadto, zrezygnowano ze stosowania poprzeczek, ponieważ, jak donoszą Lim, Dick, Kostuik, dodanie wiązań krzyżowych powoduje wzrost jedynie sztywności skrętnej [4, 6, 7, 8]. Uzyskane wyniki poddano ocenie statystycznej z zastosowaniem analizy wariancji. Użyto do tego celu programu *STATISTICA PL*.



Rys. 1. Ogólny widok stanowiska badawczego



Rys. 2. Widok preparatów ze stabilizacją odcinka L2-L4 : a- Bial-Stab, b- Omega, c- Socon



Rys. 3. Schemat pomiaru przemieszczeń na odkształconym odcinku kręgosłupa

Wyniki badań i ich omówienie

Przemieszczenie kątowe pręta z kulkami związane z rotacją kręgu powoduje pewien błąd pomiaru przemieszczenia liniowego. W celu oszacowania tego błędu obliczano kąt α . Otrzymane wartości nie przekraczają 2° , co powoduje błąd około 1%. Z tego względu wartości przemieszczeń kątowych w dalszej analizie nie uwzględniano.

Zmierzone wartości przemieszczeń liniowych przedstawia tabela 1. Zakres zmian waha się od 0 do ponad 4 mm, zwraca przy tym uwagę fakt, że o ile w przypadku braku stabilizacji wszystkie przemieszczenia występują w kierunku powiększenia lordozy (przednim), to preparaty, po ustabilizowaniu, w niektórych przypadkach odkształcają się w kierunku przeciwnym (tylnym). Uzyskane wyniki poddano dwuczynnikowej analizie wariancji na 3 poziomach (1 czynnik – obciążenie, 2 czynnik – wariant pomiarów, tj. bez stabilizacji, ze stabilizacją oraz ze stabilizacją i korporektomią) [5] Użyto do tego celu modułu ANOVA/MANOVA programu *STATISTICA PL*. Przedstawione w tabeli 2 wyniki analizy wskazują, że zarówno obciążenie badanych preparatów, jak też wariant badań mają istotny statystycznie wpływ na wartość mierzonych przemieszczeń. Najbardziej istotny wpływ ma jednak interakcja tych czynników ($p = 0,0006$). Graficzne przedstawienie interakcji zawiera rysunek 4. Wynika z niej, że przemieszczenia nieustabilizowanych preparatów istotnie wzrastają wraz ze wzrostem obciążenia, natomiast preparaty ustabilizowane wykazują przemieszczenia o mniejszych wartościach (zarówno z korporektomią, jak i bez). Preparaty ustabilizowane są ponadto mało podatne na wzrost obciążenia; nie stwierdzono też istotnego wpływu korporektomii na mierzone przemieszczenia. Sugeruje to przejmowanie obciążenia przedniej i środkowej kolumny przez tylne instrumentarium.

Tabela 1.

Wyniki pomiarów przemieszczeń liniowych (wymiar x według rys. 3)

Nazwa przypadku	BEZ3	BEZ5	BEZ7	BEZ10	ST3	ST5	ST7	ST10	K3	K5	K7	K10
Przemieszczenia [mm]	0,16	0,28	0,47	0,55	0,33	0,55	1,10	0,03	0,70	1,20	1,64	1,79
	0,73	1,44	2,78	4,11	0,53	1,05	1,42	1,64	0,34	0,56	0,97	1,13
	0,48	0,84	1,28	1,92	0,52	0,60	0,89	1,27	0,33	0,52	0,79	1,08
	0,59	1,09	1,52	2,09	0,30	0,53	0,77	0,89	0,20	0,33	0,01	-0,78
	0,74	1,39	1,77	1,73	0,00	-1,49	-2,21	-4,08	0,17	0,14	-0,84	-1,94
	0,34	0,76	1,57	2,04	-0,04	-0,08	-1,07	-3,37	0,25	0,46	0,74	0,92
	0,66	1,09	1,68	2,52	0,08	0,40	0,80	1,17	-1,02	-1,49	-2,55	
	0,09	0,23	0,99		0,15	0,15	-0,03		0,29	0,26	-1,28	
	0,91	1,74	2,81	3,52	0,31	0,52	0,74	0,88	0,23	0,23	0,22	-0,86
	0,52	0,98	1,65	2,31	0,24	0,25	0,27	-0,20	0,17	0,25	-0,03	0,19
Odchylenie stand.	0,27	0,51	0,76	1,10	0,21	0,72	1,18	2,23	0,47	0,72	1,31	1,38

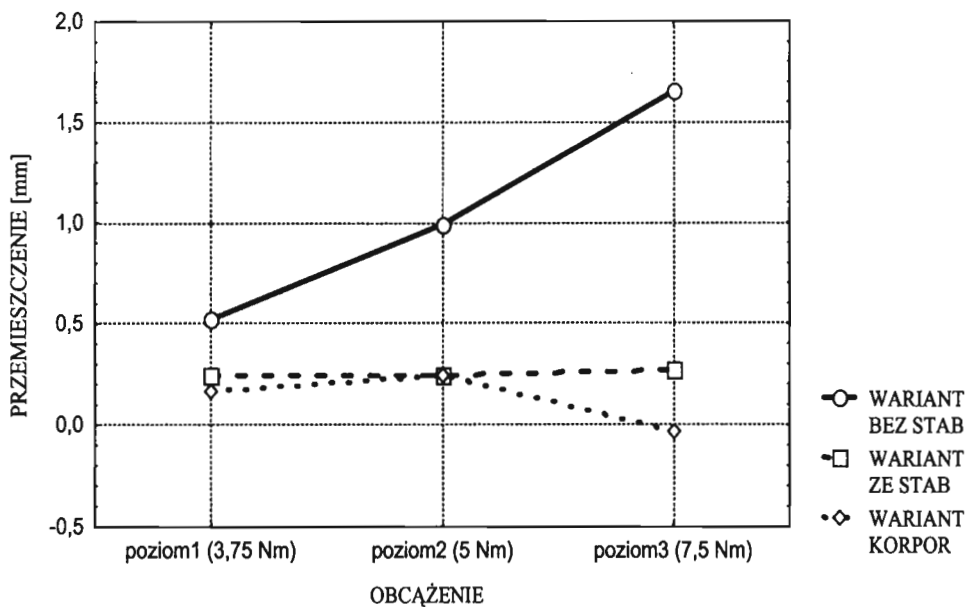
Oznaczenia: BEZ – bez stabilizacji, ST – ze stabilizacją, K – ze stabilizacją i korektornią, 3 – 3,75 Nm, 5 – 5 Nm, 7 – 7,5 Nm, 10 – 10 Nm. Ujemne wartości oznaczają przemieszczenia w kierunku tylnym (zmniejszające lordozę).

Tabela 2.

Wyniki analizy wariancji (istotność wpływu czynnika na przemieszczenia preparatu, $p < 0,05$ istotne statystycznie)

Lp.	Efekt	Osiągnięty poziom istotności p
1	Wariant pomiarów	0,0150
2	Obciążenie	0,0423
3	Interakcja wariant-obciążenie	0,0006

Wykres średnich
2czynnikowa inter
 $F(4,48)=5,85; p<,0006$



Rys. 4. Wykres przedstawiający interakcję pomiędzy obciążeniem a przemieszczeniem preparatu

Wnioski

- Obciążenie przedniej i środkowej kolumny kręgosłupa lędźwiowego poddanego ściskaniu mimośrodowemu (kompresja osiowa z jednoczesnym zginaniem) w warunkach stabilizacji transpedikularnej przejmowane jest przez tylną instrumentację.
- Stabilizacja transpedikularna kręgosłupa lędźwiowego powoduje istotne zmniejszenie przemieszczenia stabilizowanego segmentu w płaszczyźnie strzałkowej, przy czym w niektórych przypadkach następuje przesunięcie w kierunku zmniejszenia lordozy,
- Jakość stabilizacji nie zmienia się w przedziale stosowanych obciążeń.

Literatura

1. **Harms J.:** *Screw-Threaded Rod System in Spinal Fusion Surgery*. Spine, Vol. 6, No 3, September 1992.
2. **Vorr M.J., Roberts C.S., Rose S.M., Glassman S.D.:** *Biomechanics of In Situ Rod Contouring of Short-Segment Pedicle Screw Instrumentation in the Thoracolumbar Spine*. *J. of Spinal Disorders*, Vol. 10, No 2, pp. 106 -116.
3. **Moroney S., at al.:** *Load-displacement properties of lower cervical motion segments*. *J. Biomechanics* Vol.21, No. 9, pp. 769-779,1988.
4. **Dick J.C., at al.:** *A Biomechanical Comparison Evaluating the Use of Intermediate Screws and Cross-Linkage in Lumbar Pedicle Fixation*. *Journal of Spinal Disorders*. Vol.7, No. 5, pp. 402-407, 1994.
5. **STATISTICA PL dla Windows (Tom I):** *Ogólne konwencje i statystyki* I. StatSoft Polska, Kraków, 1997.
6. **Lim T., at. al.:** *Biomechanics of Transfixation in Pedicle Screw Instrumentation*. *Spine* 21. pp. 2224, 1996.
7. **Kostuik J. P., at. al.:** *Biomechanical Analysis of Screw Load Sharing in Pedicle Fixation of the Lumbar Spine*. *J. Spine J. Spinal Disord* 7, pp. 394, 1994.
8. **Živčák J., Hudák R.:** *Biomechanizmy. Edicia vedeckej a odbornej literatury – Strojnicka Fakulta TU v Košcach. Košce, 2001.*

**OBSERVATION OF THE LUMBAR SPINE SUBJECTED TO ECCENTRIC
COMPRESSION DURING TRANSPENDICULAR STABILIZATION**

Summary: Authors described results of examinations in lumbar spine displacements during compression and flexion - eccentric compression. Displacements were measured at the level L3 in nine lumbar spine specimens stabilized with Socon, Omega or Bial-Stab System. Measurements were repeated after corporectomy at the level L3 and compared with results obtained on lumbar spine specimens without stabilization. The authors proved that break of continuity of anterior spine column had no influence on biomechanical quality of stabilization in the range of used loading.

Roman Trochimczuk*, Swiatosław Ewgieniewicz Karpowicz**

WYBRANE ASPEKTY FORMOWANIA OBIEKTÓW 3D W SZKLE I INNYCH PRZEZROCZYSTYCH DIELEKTRYKACH ZA POMOCĄ LASERA

Streszczenie: Publikacja niniejsza jest próbą syntetycznej prezentacji systemu laserowego ELS-02, opracowanego przez firmę LOTIS TII i Białoruski Państwowy Uniwersytet Informatyki i Radioelektroniki w Mińsku, przeznaczonego do tworzenia trójwymiarowych obrazów w szkle oraz innych przezroczystych dielektrykach. Przedstawiono aspekty związane z przygotowaniem obiektów, scharakteryzowano parametry procesu oraz przedstawiono wytyczne do badań nad algorytmami używanymi do generowania trajektorii ruchu lasera w procesie obróbki.

1. Wprowadzenie

W wyniku dynamicznego rozwoju optyki elektronowej i techniki laserów znacznie rozszerzyło się pole ich możliwych zastosowań w takich dziedzinach, jak metrologia i diagnostyka, obróbka i mikroobróbka różnych materiałów (frezowanie, cięcie, grawerowanie i znakowanie), medycyna. Rosnące wymagania związane z wykorzystaniem mocy generowanych impulsów przez lasery sprawiają, że należało podnieść poziom mechatronicznych urządzeń pozycjonujących używanych do prowadzenia wiązki laserowej. W przypadku obróbki materiałów skupiona wiązka laserowa powoduje powstanie lokalnego defektu w strukturze materiału obrabianego. Powstały defekt może być jednym z elementów tworzonego trójwymiarowego obrazu, których duża liczba, przy zapewnieniu odpowiedniego rozmieszczenia, uformuje obłoczek albo obrys dający zobrazowanie obiektu. Jakość grawerowania oraz wydajność samego stanowiska obróbczego zależy przede wszystkim od rodzaju i samego charakteru procesu dyskretyzacji rastrowych trójwymiarowych

* Katedra Mechatroniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok.

** Katedra Techniki Automatykacji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok.

obiektów. Realizuje się to dzięki algorytmowi zamiany powierzchni na punkty oraz przez dobór odpowiedniego algorytmu sortowania tak powstałego punktowego obrazu, aby na jego podstawie wygenerować trajektorię ruchu, po której prowadzona jest skupiona wiązka lasera.

2. Elementy składowe laserowego systemu ELS-02

Aby zapewnić wysoki poziom odwzorowania przez laser w materiale, zamodelowanych komputerowo obiektów, system powinien spełniać następujące warunki:

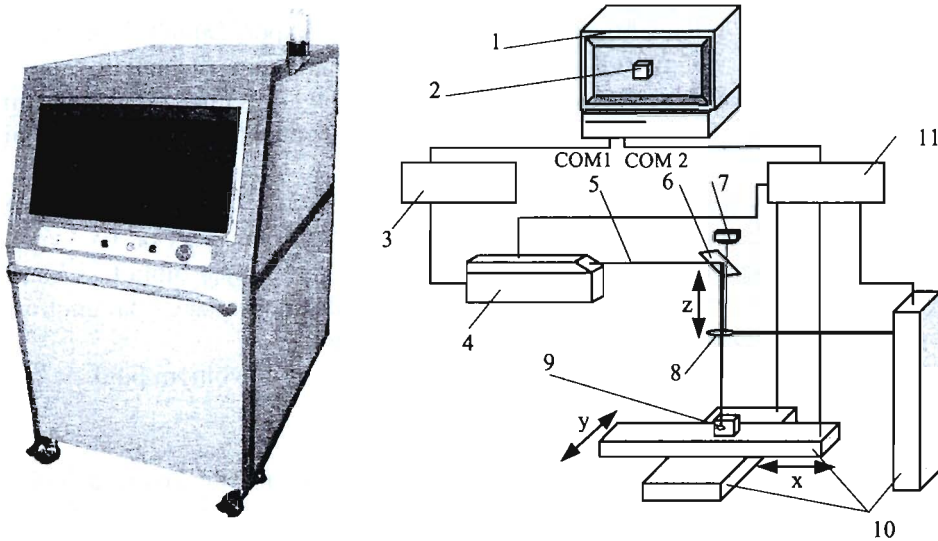
- umożliwiać dyskretyzację płaskich rastrowych obrazów oraz trójwymiarowych odwzorowań, transformując je do wektorowych, przy pomocy geometrycznej zamiany obiektu na punkty, uwzględniając współczynniki jaskrawości obszarów,
- pozwalać na zmianę parametrów odwzorowania oraz edycję uzyskanego obiektu (np. obroty wokół osi geometrycznych, przeskalowanie, przesunięcie w obszarze roboczym) przez operatora obsługującego kompleks laserowy,
- dawać możliwość ewentualnej elastycznej modernizacji sprzętu, uwzględniając również wykorzystanie środowiska programowego do innych projektów,
- operator musi mieć wpływ na zadawanie parametrów sterowania, trzyosiowym systemem pozycjonującym, w trakcie procesu technologicznego.

2.1. Struktura systemu laserowego do formowania trójwymiarowych obiektów

Stanowisko do formowania wielopunktowych struktur 3D i 2D, złożonych z defektów, w przezroczystych dielektrykach składa się z następujących elementów składowych:

- lasera (włączając w to blok zasilania, system chłodzenia, źródło promieniowania),
- optycznego systemu dzielenia wiązki formującej,
- czujnika optycznego i karty formowania sygnałów sprzężenia zwrotnego dla sterowania rozmieszczeniem defektów,
- kontrolera systemu sterowania,
- pozycjonującego 3 osiowego stołu współrzędnościowego,
- komputera klasy PC,
- obudowy, w której rozmieszczone są wszystkie wyżej wymienione bloki.

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie strukturę systemu laserowego z uwzględnieniem najistotniejszych elementów składowych wraz z fotografią.



Rys. 1. Struktura sytemu laserowego ELS-02 wraz z fotografią kompletnego stanowiska obróbczego: 1 – komputer klasy PC wraz z oprogramowaniem „Sculptor”, 2– przygotowany w komputerze obiekt do formowania, 3 – kontroler sterujący systemem laserowym, 4 – laser, 5 – skupiona wiązka lasera, 6 – dielektryczne lustro odbiciowe, 7 – sensor odległości zliczający i odfiltrujący informację o ilości i wysokości umiejscowienia defektów, 8 – soczewka skupiająca wiązkę laserową, 9 – punktowy defekt, powstały w obiekcie na skutek lokalnego impulsowego, podgrzania materiału do temperatury plazmy, 10 – współrzędnościowy system pozycjonujący, 11 – kontroler sterujący współrzędnościowym systemem pozycjonującym.

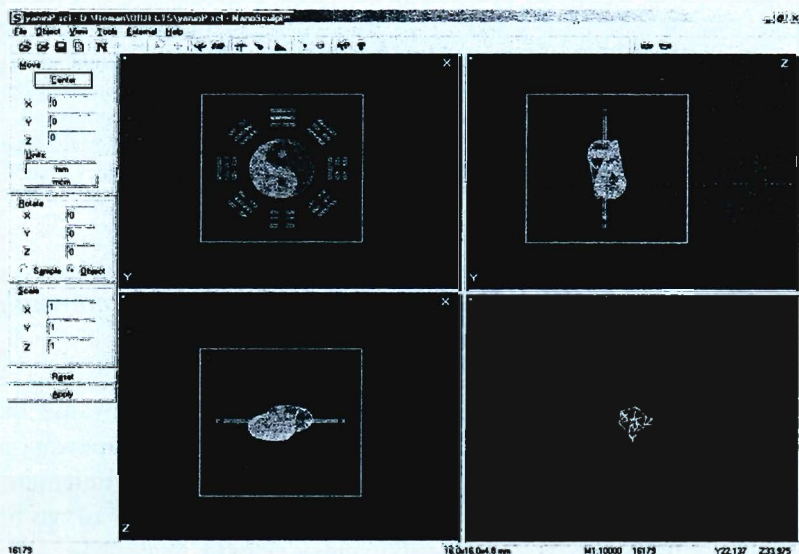
2.2. Oprogramowanie SCULPTOR sterujące procesem formowania trajektorii obróbki obiektów 3D i 2D

Dostępne na stanowisku do obróbki laserowej oprogramowanie można podzielić na dwa zasadnicze rodzaje, tj. oprogramowanie, które zapewnia przygotowanie obiektu do procesu grawerowania laserowego, z uwzględnieniem obróbki i wytworzenia komend sterujących kontrolerem stanowiska laserowego oraz oprogramowanie sterujące bezpośrednio całym urządzeniem, włączając w to zmianę parametrów procesu obróbki. Przygotowanie dwuwymiarowych obiektów realizuje się przy pomocy typowych programów graficznych, np. Corel PhotoPaint, Adobe PhotoShop itp., z uwzględnieniem warunku, że musi być przygotowany obraz, za-

pisany jako czarno-biały w standardowym formacie pliku BMP dla systemu Windows. Obiekty trójwymiarowe przygotowuje się używając pakietu 3D Studio MAX, w wersji co najmniej 2.6. Oprogramowanie powinno posiadać specjalnie napisane skrypty („Divide Curves”, „Divide Meshes”, „Export Data”), które przekształcają obiekt na warstwy, na których następnie nanoszone są punkty z uwzględnieniem warunku zapewnienia odpowiedniej odległości między warstwami i punktami tworzącymi obiekt oraz odwzorowania przez punkty tylko powierzchni tworzących obiekt.

Program Sculptor steruje procesem formowania obrazów 3D i 2D w szkle i innych przezroczystych dielektrykach. Stworzono go na platformie języka C++ pod Win32 API (Application Programming Interface), wykorzystując biblioteki klasy MFC (Microsoft Foundation Classes). Program pozwala na zmianę parametrów przygotowanego wcześniej obrazu w następujących sferach:

- zmiana rozmiaru i możliwość rozmieszczenia obiektu w dowolnym punkcie obrabianego materiału,
- obrotu według dowolnej osi o zadany wcześniej kąt,
- dokładnego wyśrodkowania, przy uwzględnieniu warunku jednakowej odległości od zewnętrznych punktów tworzących obiekt od ścian obrabianego dielektryka.



Rys. 2. Interfejs użytkownika programu Sculptor

Okno główne Sculptor pokazuje operatorowi na ekranie komputera widoki zamodelowanego obiektu w płaszczyznach (XY, XZ, YZ) oraz pozwala na obserwację w widoku izometrycznym lub perspektywie, z uwzględnieniem skali odwzorowania. Na rysunku 2 zamieszczono widok okna interfejsu użytkownika programu. Przy sterowaniu procesem formowania trójwymiarowego obiektu na stanowisku do obróbki laserowej ELS-02, oprogramowanie ma za zadanie ustalić punkt zero współrzędnościowego układu pozycjonującego, obszar roboczy oraz prędkość i przyspieszenie, z jaką się ma przemieszczać stół obróbkowy oraz sterować współrzędną Z na podstawie sygnałów sensora zliczającego defekty w kryształach szkła. Poza tym wbudowane algorytmy sortowania pozwalają na wyznaczenia trajektorii, po której realizowany jest proces formowania z zachowaniem warunku optymalizacji pod względem minimalnych przebiegów (ograniczenie czasowo-energetyczne) i maksymalnego wykorzystania częstotliwości lasera do punktowej zmiany struktury kryształu.

3. Sterowanie przyspieszeniem i prędkością współrzędnościowych układów pozycjonujących w procesie laserowego formowania obrazów

Przy optymalizacji warunku osiągnięcia maksymalnej liczby punktów wykonywanych przez laser, w stałym przedziale czasowym, zauważono, że różnie rozkłada się liczba osiąganych na stanowisku punktów trójwymiarowego obiektu tworzonych w strukturze szkła, bądź też innego dielektryka. Poniżej przedstawione są dane z przeprowadzonego eksperymentu (tab. 1 i tab. 2), zbadane dla obiektu stworzonego z 16179 punktów. Dane uzyskano zmieniając wartość przyspieszenia współrzędnościowych układów pozycjonujących, przy założonej prędkości, odpowiednio dla częstotliwości użytego lasera 50 Hz i 100 Hz. Na podstawie danych zamieszczonych w tabelach sporządzono wykresy, które pokazano na rysunku 3. Z wykresów wynika, że przy laserze 50 Hz zwiększenie prędkości współrzędnościowego urządzenia pozycjonującego w osiach XYZ nie ma praktycznie wpływu na czas obróbki. Podobnie jak porównamy liczbę punktów wykonywanych przez laser w ciągu 1 sekundy, widzimy że sterowanie prędkością praktycznie nie wpływa na efektywność procesu obróbki. Zmieniając wartości przyspieszenia obserwuje się wzrost ilości obrabianych punktów wykonywanego obrazu 3D. Chociaż widać, że wzrost przyspieszenia, od wartości 2000 mm/s^2 do 7500 mm/s^2 , daje możliwość wykonania około 4 punktów obiektu więcej to jednak skraca się czas procesu obróbki.

Tabela 1.

Wpływ prędkości i przyspieszenia na częstotliwość dla lasera 50 Hz

Liczba punktów	Prędkość [mm/s]	Częstotliwość lasera [Hz]
16179	80	50
Przyspieszenie [mm/s ²]	Czas [s]	Częstotliwość [punkty/s]
2000	365	44,33
2500	354	45,70
3000	347	46,63
3500	342	47,31
4000	337	48,01
4500	335	48,30
5000	331	48,88
5500	332	48,73
6000	331	48,88
6500	330	49,03
7000	330	49,03
7500	329	49,18

Liczba punktów	Prędkość [mm/s]	Częstotliwość lasera [Hz]
16179	100	50
Przyspieszenie [mm/s ²]	Czas [s]	Częstotliwość [punkty/s]
2000	365	44,33
2500	353	45,83
3000	347	46,63
3500	341	47,45
4000	337	48,01
4500	334	48,44
5000	332	48,73
5500	331	48,88
6000	330	49,03
6500	329	49,18
7000	329	49,18
7500	329	49,18

Tabela 2.

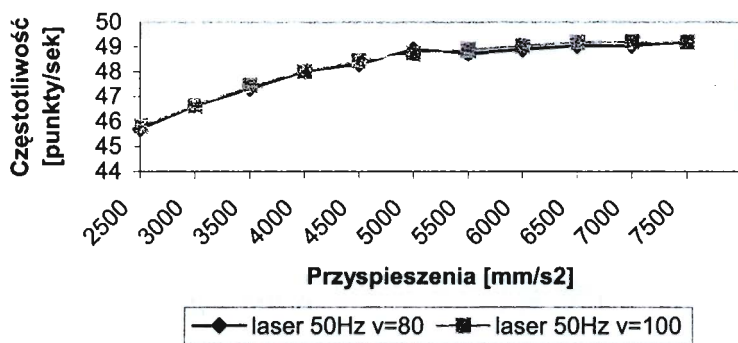
Wpływ prędkości i przyspieszenia na częstotliwość dla lasera 100 Hz

Liczba punktów	Prędkość [mm/s]	Częstotliwość lasera [Hz]
16179	100	100
Przyspieszenie [mm/s ²]	Czas [s]	Częstotliwość [punkty/s]
2000	281	57,58
2500	260	62,23
3000	249	64,98
3500	238	67,98
4000	230	70,34
4500	221	73,21
5000	214	75,60
5500	207	78,16
6000	204	79,31
6500	199	81,30
7000	195	82,97
7500	189	85,60

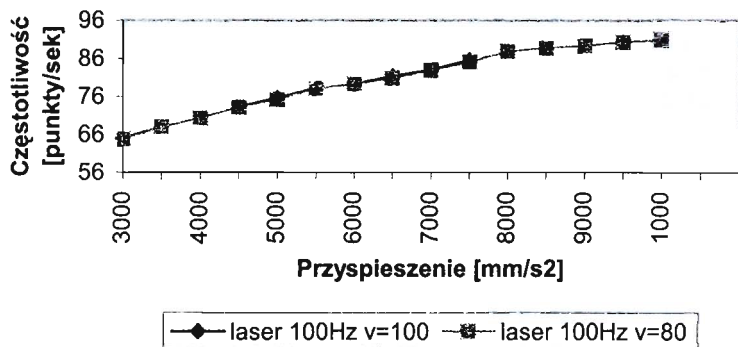
Liczba punktów	Prędkość [mm/s]	Częstotliwość lasera [Hz]
16179	80	100
Przyspieszenie [mm/s ²]	Czas [s]	Częstotliwość [punkty/s]
2000	282	57,37
2500	260	62,23
3000	250	64,72
3500	238	67,98
4000	230	70,34
4500	221	73,21
5000	215	75,25
5500	207	78,16
6000	204	79,31
6500	200	80,90
7000	195	82,97
7500	190	85,15
8000	184	87,93
8500	182	88,90
9000	181	89,39
9500	179	90,39
10000	178	90,89

Przy laserze pracującym na częstotliwości 100 Hz zaobserwowano, że podobnie jak w przypadku urządzenia pracującego na częstotliwości 50Hz, zmiana prędkości praktycznie nie ma wpływu na zwiększenie efektywności procesu obróbki. Sterując przyspieszeniem do 10000 mm/s^2 , jesteśmy w stanie uzyskać na 100 Hz laserze około 91 punktów w czasie sekundy. Okazuje się jednak przy tym, że całe urządzenie wprawiane jest w dość znaczące wibracje. Stabilny reżim pracy uzyskuje się przy założonej wartości przyspieszenia około 7500 mm/s^2 , gdzie jesteśmy w stanie uzyskać około 85 punktów na sekundę.

Wpływ prędkości i przyspieszenia na liczbę robionych punktów przez laser



Wpływ prędkości i przyspieszenia na liczbę robionych punktów przez laser



Rys. 3. Wpływ prędkości i przyspieszenia na efektywność wykorzystania lasera

3. Koncepcje badań

Jeśli wziąć pod uwagę czynniki mające wpływ na efektywność procesu formowania trójwymiarowych obiektów w szkłe i innych przezroczystych dielektrykach, widoczna staje się niedoskonałość algorytmów sortujących punkty, z których tworzone są obiekty, a zatem generowana jest również trajektoria obróbki materiału przez laser. Wartość przyspieszenia pozycjonujących układów współrzędnościowych, przy wyborze kryteriów ograniczających, powinno się ustalić na poziomie 7500 mm/s^2 . Pisząc algorytmy sterujące, należałoby poszukiwać przybliżających profili rozkładu prędkości (profil trójkątny, profil trapezowy, splajn) i wykorzystywać je w algorytmie odwzorowującym i sterującym procesem tworzenia obiektu.

Literatura

1. Pod redakcją **S. E. Karpowicza**: *Technologia i technika precyzyjnowo lazernowo modyfikowania twierdotielnych struktur*, Technoprint, Mińsk, 2002.
2. Materiały firmy LOTIS T II: *Instruction manual for engraving laser system ELS-02*, Mińsk, 2002.
3. Materiały firmy LOTIS T II: *Sculptor software user's guide*, Mińsk, 2002.

SELECT ASPECTS OF 3D OBJECTS FORMATION INSIDE GLASS AND OTHER TRANSPARENT DIELECTRICS BY MEANS OF LASER

Summary: The present article is a synthetic presentation attempt of laser system ELS-02 worked out by firm LOTIS TII and Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics in Minsk, which is used for the creations three-dimensional images inside the glass and other transparent dielectrics. The article presents the object preparation aspects, characterizes the parameters of process and shows the searching instruction on the algorithms, which the used for the trajectory generation of the tooling process.