

Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej

BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN

Zeszyt 12



Wydawnictwo Politechniki Białostockiej

Białystok 2004

Redaktor naukowy:

prof. nadzw. dr hab. inż. Paweł Lindstedt

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Jerzy Manerowski – 1, 4, 6, 7, 11

prof. zw. dr hab. inż. Stefan Szczeciński – 3, 8, 12, 13

dr hab. inż. Krzysztof Sibilski, prof. PWr – 5, 14, 15, 16

dr hab. inż. Józef Żurek, prof. ITWL – 2, 9, 10

Opracowanie redakcyjne:

Jadwiga Żukowska

© Copyright by Politechnika Białostocka 2004

ISSN 0860-9292

Redakcja techniczna, skład i druk:

Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej

Nakład: 100 egz.

Spis treści

Józef Błachnio, Mariusz Bogdan	
<i>Podstawy termowizji i jej zastosowanie w badaniach medycznych</i>	7
Henryk Borowczyk, Maciej Chmurkowski, Marcin Derlatka	
<i>Projekt koncepcyjny ekspertowego systemu kontrolno-diagnostycznego turbinowego silnika odrzutowego</i>	19
Jerzy Gagan	
<i>Stosowane metody identyfikacji przepływów dwufazowych pary wodnej</i>	33
Krzysztof Jaworek, Mariusz Bogdan	
<i>Kompresja i kodowanie sygnałów biomechanicznych</i>	53
Mirosława Kołodziejczyk	
<i>Przepływ cieczy lepkiej w obszarze prostokątnym z półwyspem</i>	67
Adam Kotowski	
<i>Diagnozowanie elementów maszyn poprzez analizę parametrów funkcji autokorelacji sygnału wibroakustycznego</i>	81
Lindstedt Paweł	
<i>Funkcje wrażliwości w procesie planowania badań diagnostycznych obiektów technicznych</i>	95
Michał Łukaszuk, Waldemar Kołodziejczyk	
<i>Dokładność pomiaru temperatury za pomocą termoelementów</i>	111
Paweł Ostapkowicz	
<i>Diagnozowanie wycieków z rurociągu modelowego przy zastosowaniu metody gradientowej i metody śledzenia czoł fal rozprężeniowych ciśnienia</i>	123
Paweł Ostapkowicz	
<i>Koncepcja wielometodowego systemu diagnozowania wycieków z rurociągów</i>	139
Jolanta Pauk, Krzysztof Jaworek	
<i>Zastosowanie logiki rozmytej Dempstera-Shafera w diagnostyce chodu człowieka</i>	155

Sławomir Poskrobko, Jan Łach	
<i>Modelowanie spalania odpadów drzewnych w kotle rusztowym</i>	167
Sławomir Poskrobko, Jan Łach	
<i>Wspomaganie procesu spalania biomasy</i>	
<i>w ciepłowni poprzez wprowadzenie paliwa konwencjonalnego</i>	195
Tomasz Sienkiewicz	
<i>Tani miniaturowy robot mobilny – budowa i sterowanie</i>	221
Juraj Smrček, Anton Palko, Peter Tuleja	
<i>Biomechanical gripper – new mechanism effector for robots</i>	227
Roman Trochimczuk, Sviatoslav E. Karpovich	
<i>Pozycjoner planarny dla laserowego systemu</i>	
<i>formowania obiektów 3D w szkle</i>	239

Conntens

Józef Błachnio, Mariusz Bogdan <i>BASES OF THERMOVISION AND IT USE IN MEDICAL EXAMINATIONS</i>	17
Henryk Borowczyk, Maciej Chmurkowski, Marcin Derlatka <i>CONCEPTIVE PROJECT OF THE EXPERT DIAGNOSTIC SYSTEM OF TURBINE JET ENGINE</i>	31
Jerzy Gagan <i>SELECTED METHODS OF STEAM WATER TWO PHASE FLOWS IDENTIFICATION</i>	52
Krzysztof Jaworek, Mariusz Bogdan <i>COMPRESSION AND CODING OF BIOMECHANICS SIGNALS</i>	65
Mirosława Kołodziejczyk <i>PLANE FLOW OF VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID IN A RECTANGULAR REGION WITH A DIVISION WALL</i>	80
Adam Kotowski <i>DIAGNOSIS OF ENGINE PARTS BASED ON PARAMETER ANALYSIS OF SELF-CORRELATION FUNCTION OF VIBROACOUSTIC SIGNAL</i>	93
Lindstedt Paweł <i>THE SENSITIVITY FUNCTIONS IN PROCESS OF THE ORGANIZATION OF DIAGNOSTIC RESEARCH OF THE TECHNICAL OBJECTS</i>	109
Michał Łukaszuk, Waldemar Kołodziejczyk <i>ACCURACY OF TEMPERATURE MEASUREMENT WITH THE USE OF THERMOELEMENTS</i>	121
Paweł Ostapkowicz <i>DIAGNOSING OF THE LEAKAGES FROM PIPELINE MODEL BY USING GRADIENT METHOD AND METHOD BASED ON THE INVESTIGATION OF PROPAGATION OF EXPANDED WAVES' FRONTS</i>	138

Paweł Ostapkowicz <i>THE CONCEPTION OF PIPELINES LEAK DETECTION MULTIMETHODS SYSTEM</i>	154
Jolanta Pauk, Krzysztof Jaworek <i>APPLYING DEMPSTER-SHAFER FUZZY LOGIC TO HUMAN APPARATUS DIAGNOSIS</i>	165
Sławomir Poskrobko, Jan Łach <i>MODELLING OF WOOD WASTE BURNING IN STOKER FIRED BOILER</i>	193
Sławomir Poskrobko, Jan Łach <i>CONVENTIONAL FUEL AIDED BURNING OF WOOD WASTE IN HEAT-GENERATING PLANT</i>	219
Tomasz Sienkiewicz <i>INEXPENSIVE MINIATURE MOBILE ROBOT – THE CONSTRUCTION AND THE CONTROL</i>	226
Juraj Smrček, Anton Palko, Peter Tuleja <i>CHWY TAK BIOMECHANICZNY – NOWE ROZWIĄZANIE EFEKTORA ROBOTÓW</i>	238
Roman Trochimczuk, Sviatoslav E. Karpovich <i>PLANAR POSITIONING SYSTEM FOR LASER FORMING 3D OBJECTS INSIDE GLASS</i>	249

Józef Błachnio¹, Mariusz Bogdan²

PODSTAWY TERMOWIZJI I JEJ ZASTOSOWANIE W BADANIACH MEDYCZNYCH

Streszczenie: W niniejszej pracy skupiono się głównie na aspektach związanych z wykorzystaniem termowizji w medycynie. W skrócie omówiono teoretyczne podstawy termowizji z uwzględnieniem prawa Maxa Plancka i stałej Stefana–Boltzmana. W sposób prosty i przejrzysty scharakteryzowano podstawowe zagadnienia związane z pomiarami termowizyjnymi, aparaturą pomiarową oraz pokrótce omówiono parametry kamer termowizyjnych. Przedstawiono praktyczne zastosowanie termografii w diagnostyce zaburzeń krążenia naczyniowego w kończynach górnych i dolnych. W końcowej części artykułu przedstawiono propozycję własnej metody analizy termogramów w środowisku obliczeniowym Matlab.

Słowa kluczowe: termowizja, promieniowanie podczerwone, ciało doskonale czarne, emisyjność, badania medyczne, termogram,

Wprowadzenie

Metody badań nieniszczących są szeroko stosowane w diagnostyce technicznej [1], a zwłaszcza w medycznej. Do głównych metod należy zaliczyć termowizję, zwaną też termografią. Początki termowizji (zobrazowania termicznego), dziedziny techniki współcześnie prężnie się rozwijającej, sięgają wczesnych lat XIX wieku. Zawdzięczamy je angielskiemu astronomowi Williamowi Herschelowi,

¹ Katedra Automatyki i Diagnostyki: Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 C, 15–351 Białystok,

² Absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej (spec. systemy informacyjne w automatyce i diagnostyce–rocznik 2004).

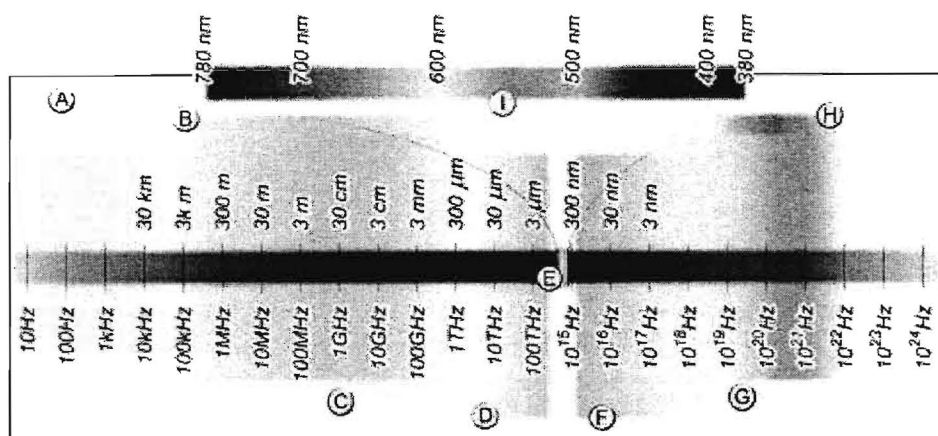
który zbadał skutki promieniowania elektromagnetycznego. Posłużył się on pryzmatem, uzyskując rozszczepienie światła słonecznego na barwne widmo – od fioletu do czerwieni [2,3,4]. W swoich rozważaniach skupił się na badaniu termicznym poszczególnych barw uzyskanego widma. Zaobserwował w paśmie czerwonego (widzialnego) widma podwyższoną temperaturę, która wzrastała nadal poza zakresem widzialnym. Z biegiem czasu zakres ten zaczęto nazywać promieniowaniem podczerwonym. Jednak dopiero wiek dwudziesty okazał się przełomowy w praktycznym zastosowaniu podczerwieni (termowizji). W pierwszym okresie termografia kojarzona była przede wszystkim z wojskiem. Wraz z upływem czasu znalazła zastosowanie w innych dziedzinach życia, tj. w przemyśle, budownictwie, energetyce, medycynie.

I. Podstawy termowizji

Podstawą termowizji jest promieniowanie podczerwone pochodzące z ciała o temperaturze przekraczającej wartość zera absolutnego ($-273,15^{\circ}\text{C}$). Powyżej tej temperatury każde ciało emituje fale elektromagnetyczne, które są źródłem promieniowania. Z punktu widzenia termografii interesujący jest tylko zakres promieniowania podczerwonego, zwanego także (ze względu na właściwości) promieniowaniem cieplnym. Jego intensywność jest proporcjonalna do temperatury ciała, tzn. wraz ze wzrostem temperatury ilość emitowanej energii rośnie proporcjonalnie do czwartej potęgi temperatury (prawo Stefana–Boltzmann)[2,3,4]. Poznanie podstawowych praw promieniowania cieplnego daje teoretyczne podstawy do zrozumienia wpływu wielu czynników na jakość pomiarów termowizyjnych.

W widmie elektromagnetycznym podczerwień obejmuje zakres fal dłuższych, niż promieniowanie widzialne (rys.1), nieprzekraczających jednak $1000\mu\text{m}$. Umownie ustalono też granice podziału pasma podczerwieni na cztery węższe pasma:

- bliska podczerwień ($0,78\div 3\mu\text{m}$),
- średnia podczerwień ($3\div 6\mu\text{m}$),
- daleka podczerwień ($6\div 15\mu\text{m}$),
- bardzo daleka podczerwień (powyżej $15\mu\text{m}$).



Rys. 1. Widmo fal elektromagnetycznych wg [4]

B – fale radiowe, **C** – mikrofae, **D** – podczerwień, **E** – światło widzialne, **F** – ultrafiolet, **G** – promieniowanie gamma, **I** – widmo światła widzialnego. Dla porównania na rysunku zaznaczono także zakres fal akustycznych (niebędących falami elektromagnetycznymi), słyszanych przez ludzkie ucho (**A**)

W rozważaniach na temat zjawisk fizycznych opisujących promieniowanie podczerwone (emitancji, absorpcji) wprowadzono pojęcie promieniowania ciała doskonale czarnego. Ciało czarne to obiekt pochłaniający całkowicie padające na jego powierzchnię promieniowanie, niezależnie od długości fali (dowolny skład widmowy), kąta padania i temperatury ciała promieniującego [2,4,5]. Jest zatem pewną idealizacją, tzn. nie występuje w rzeczywistości. Modelem przybliżonym może być przestrzeń sferyczna, której ścianki są nieprzezroczyste. Prawie całe promieniowanie, wpadające przez niewielki otwór, jest rozpraszane i pochłaniane wskutek wielokrotnych odbić. Tylko niewielka jego ilość wydostaje się na zewnątrz. Promieniowanie modelu jest tym bliższe teoretycznemu, im mniejszy jest w sferze otwór, przez który promieniowanie jest emitowane lub pochłaniane.

Prawa opisujące emisję promieniowania cieplnego (gęstość widmową egzytancji energetycznej – emitancji) ciała czarnego sformułował Max Planck [2]:

$$M_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 (e^{hc_0 / \lambda kT} - 1)} \quad [W / (m^2 \cdot \mu m)] \quad (1)$$

gdzie: h – stała Plancka $\approx 6,626 \cdot 10^{-34} [J \cdot s]$, k – stała Boltzmana $\approx 1,381 \cdot 10^{-23} [J / K]$, T – temperatura bezwzględna ciała czarnego $[K]$, λ – dłu-

gość fali $[\mu m]$, $c_0 = 299,79 \cdot 10^6 [m/s]$ – prędkość rozchodzenia się fal elektromotorycznych w próżni.

Równanie (1) nosi nazwę wzoru Plancka lub prawa Plancka. Wprowadzając oznaczenia:

$c_1 = 2\pi\hbar c_0^2$ – pierwsza stała promieniowania (pierwsza stała Plancka),

$c_2 = \hbar c_0 / k$ – druga stała promieniowania (druga stała Plancka).

Równanie (1) przyjmuje postać:

$$M_\lambda(T) = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (2)$$

przy czym: $c_1 = 3,7417749 \cdot 10^8 [W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^4]$, $c_2 = 4387,69 [\mu m \cdot K]$

Jeżeli składnik $e^{c_2/\lambda T} \gg 1$, to wzór Plancka można uprościć.

$$M_\lambda(T) = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T}} \quad (3)$$

Powyższy wzór dla $\lambda T < 3000 [\mu m \cdot K]$ daje błędy mniejsze od 1% i nazywamy go wzorem Wiena.

Różniczkując (2) względem λ i wyznaczając maksimum pochodnej otrzymujemy:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} [mm] \quad (4)$$

Powyższą zależność nazywa się prawem przesunięć Wiena. Określa ona zmianę położenia maksimum rozkładu natężenia promieniowania cieplnego przy zmianie temperatury. Zgodnie z prawem Wiena, iloczyn $\lambda_{\max} \cdot T$ jest stały, tzn. długość fali światła odpowiadającego maksimum natężenia promieniowania cieplnego ciała doskonale czarnego znajduje się w określonej temperaturze bezwzględnej T ($\lambda_{\max} \cdot T = \text{const}$).

Zatem podstawiając zależność (4) do wzoru Plancka otrzymuje się wzór na gęstość mocy promieniowania ciała doskonale czarnego dla maksymalnej długości fali:

$$M_\lambda(T) = 1,286 \cdot 10^{-15} \cdot T^5 [W/(cm^2 \cdot \mu m)] \quad (5)$$

Na podstawie wzoru (5) można stwierdzić, że gęstość mocy promieniowania dla maksymalnej długości fali jest proporcjonalna do temperatury w piątej potęgde.

Całkując zależność Plancka w granicach długości fali $\lambda = 0$ do $\lambda = +\infty$ wyznacza się całkowitą egzytancję ciała czarnego.

$$M_B = \sigma \cdot T^4 \quad [W / m^2] \quad (6)$$

przy czym :

$$\sigma = \frac{\pi^4}{15} \cdot \frac{c_1}{c_2^4} = 5,66943 \cdot 10^{-8} [W / (m^2 \cdot K^4)] - \text{stała Stefana-Boltzmana} \quad (7)$$

Z wzoru (7) wynika, że całkowita moc emitowana przez ciało czarne jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej.

Przytoczone dotychczas prawa i zależności dotyczyły promieniowania ciała doskonale czarnego. W rzeczywistości ciała, oprócz zdolności do emisji promieniowania, wykazują w mniejszym lub większym stopniu zdolność absorpcji, odbijania lub przepuszczania promieniowania podczerwonego. Emisja, absorpcja, odbicie i transmisja promieniowania zależą od temperatury ciał, stopnia obróbki i są różne dla różnych materiałów [2,5,6]. W celu porównania promieniowania ciała doskonale czarnego z ciałami rzeczywistymi wprowadzono współczynnik, zwany emisyjnością. Charakteryzuje on właściwości promienne ciał rzeczywistych. Wartość emisyjności zależy od parametrów fizykochemicznych.

Rozróżnia się:

- emisyjność całkowitą (półprzestrzenną) ciała

$$\varepsilon = \frac{M(T)}{M_B(T)}; \quad (8)$$

- emisyjność widmową (spektralną) ciała

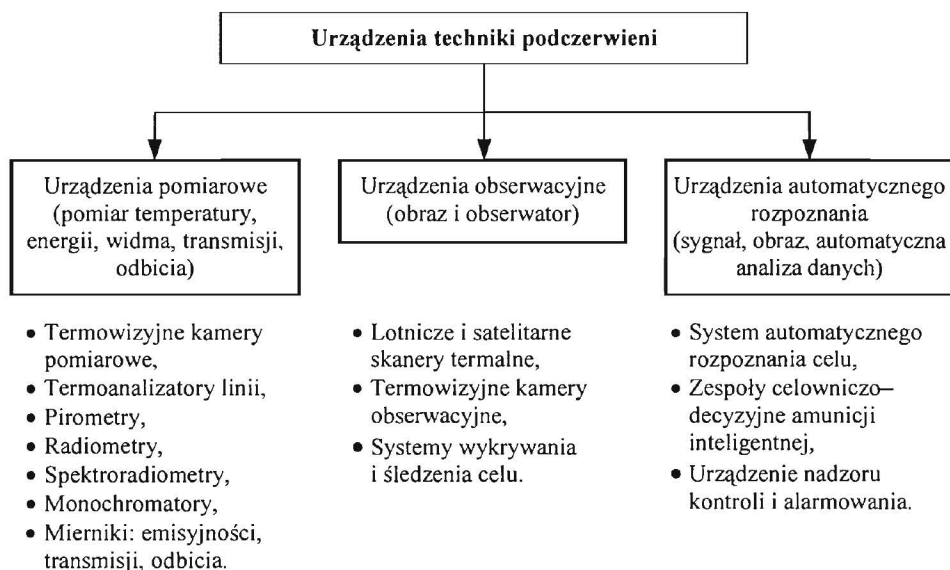
$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda(\lambda, T)}{M_{B\lambda}(\lambda, T)} \quad (9)$$

przy czym: $M(T)$ – egzytancja ciała badanego,
 $M_B(T)$ – egzytancja ciała czarnego.

Ogólnie można stwierdzać, że emisyjność ciała zależy od temperatury, długości fali, kąta obserwacji, składu chemicznego i stanu powierzchni oraz czasu.

2. Aparatura badawcza

W dużym uproszczeniu można przyjąć, że ze względu na przeznaczenie, urządzenia techniki podczerwieni dzielimy na trzy grupy, (rys. 2) [2,5]:



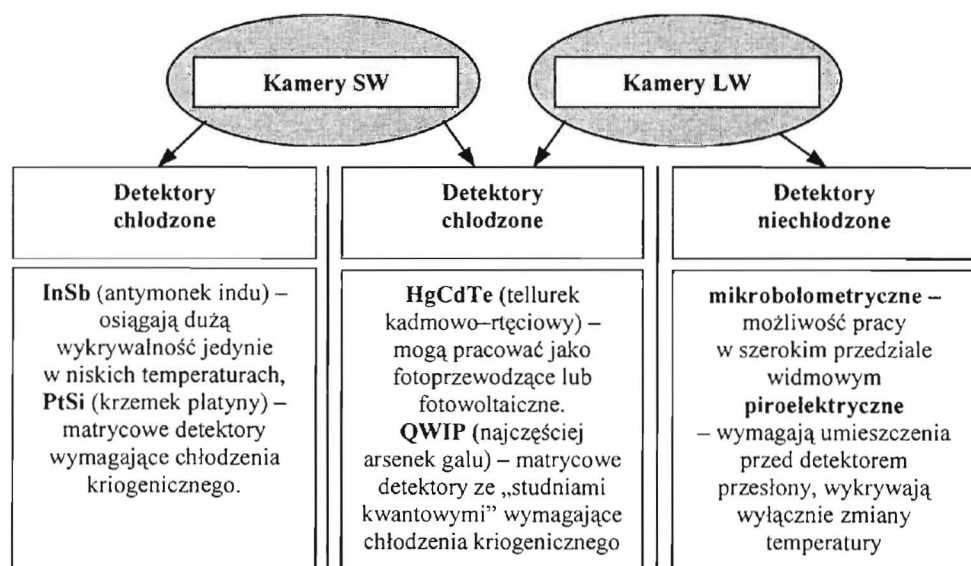
Rys. 2. Podział urządzeń techniki podczerwieni wg [2,5]

Z punktu widzenia zastosowania termografii, w badaniach medycznych interesuje nas pierwsza grupa (urządzenia pomiarowe), a w szczególności termowizyjne kamery pomiarowe. Jak już wcześniej wykazano, urządzenia do prowadzenia pomiarów termowizyjnych wykorzystują zjawisko promieniowania podczerwonego, dokładniej jego natężenia. W związku z tym, że to promieniowanie jest w większości zakresów pochłaniane w atmosferze Ziemi, producenci kamer termowizyjnych wybrali dwa przedziały, w których przepuszczalność widmowa promieniowania podczerwonego jest stosunkowo wysoka, tj. $3\div 5\text{ }\mu\text{m}$ (zakres krótkofalowy) oraz $8\div 14\text{ }\mu\text{m}$ (zakres długofalowy). W ten sposób ustanowili podział wytwarzanych kamer na krótkofalowe (ang. Short Wave – SW) i długofalowe (ang. Long Wave – LW)– rys. 3.

Części optoelektroniczne i mechaniczne tworzą strukturę kamer termowizyjnych. Do typowych elementów możemy zaliczyć: detektor podczerwieni z ukła-

dem chłodzenia, obiektów zakresu podczerwieni (matryca detektorów), zespół elektroniczny toru wzmacnienia i odczytu sygnału z detektora, elektroniczne zespoły rejestracji i analizy sygnału oraz zespół wizualizacji [2,5].

Z wyżej wymienionych podzespołów sprzętu termowizyjnego najbardziej zaawansowany technologicznie jest detektor podczerwieni. Jest najważniejszym elementem kamery, ponieważ określa cechy pomiarowe lub obserwacyjne (rys.3). Na podstawie literatury [6] podzielono detektory na termiczne (piroelektryczne, bolometryczne) i fotonowe (półprzewodnikowe).



Rys. 3. Podział kamer termowizyjnych na krótkofalowe i długofalowe wraz z zastosowanymi w nich detektorami wg [2,6]

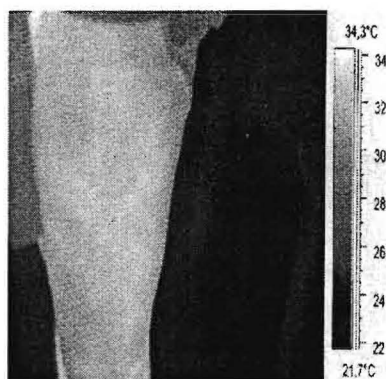
Oto podstawowe wybrane parametry techniczne kamer termowizyjnych podawane w katalogach lub w prospektach firm [7,8]:

Tab. 1. Opis danych eksploatacyjnych.

Specyfikacja techniczna	Opis
<i>jakość obrazu</i>	Określa pole widzenia i czułość układu detekcyjnego (rozdzielczość temperaturowa).
<i>detektor</i>	Typ zastosowanego detektora (np. rodzaj i wymiary matrycy detektora chłodzonego lub niechłodzonego, pasmo jego działania).
<i>prezentacja obrazu</i>	Sposób zobrazowania termicznego (np. monitor LCD (2,5'') o określonej rozdzielczości i nasyceniu kolorów). Możliwość wbudowania dodatkowych funkcji, np. automatycznego dostrajania obrazu.
<i>rejestracja obrazu</i>	Możliwość rejestracji cyfrowej w wbudowanej pamięci (Flash – podanie dostępnych modułów pamięciowych). Zapis obrazu przeważnie w dwóch formatach: standardowym JPG lub mapy bitowej BMP.
<i>pomiary</i>	Parametry pomiarowe, tj. możliwy do określenia zakres temperaturowy przeprowadzanych badań, dokładność wykonania, korekcja emisyjności dodatkowe „nastawy” (data, czas, jednostki temp. (°C, K), wybór języka.

3. Przykładowe wyniki badań medycznych w ortopedii i chirurgii

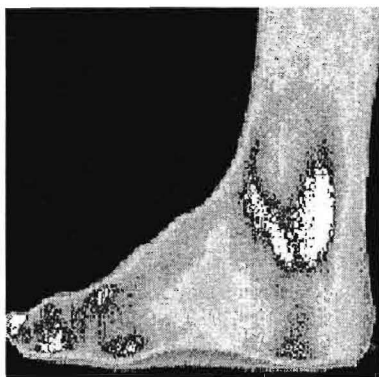
Główną zaletą termografii medycznej jest jej nieinwazyjność i powtarzalność. Dzięki temu, w coraz to większym zakresie wspomaga pracę lekarzy zwłaszcza ortopedów i chirurgów. Przykładowe termogramy medyczne przedstawiono poniżej na rys.4 – rys.7 [2,7,8,9].



Rys. 4. Żyłaki podudzia lewego – widoczne ciepłe zmiany w przebiegu żył (termogram – firma FLIR) [2,7]



Rys. 5. Stan po operacji uda lewego metodą Biofix–„ciepła blizna” w miejscu zrostu (termogram – firma FLIR) [2,7]



Rys. 6. Zwichnięcie kostki nogi prawej (termogram – firma Meditherm) [6]



Rys. 7. 18 miesięcy po złamaniu prawej nogi (termogram – firma Meditherm) [6]

Na rys.5 i rys.7 widać przewlekłe stany pourazowe (rys. 7 – prawa noga jest wyraźnie „zimniejsza” od lewej – słabsze ukrwienie). Natomiast na rys. 6 w okolicach kostki na skutek zwichnięcia wydzielilo się ciepło (świeże miejsce pourazowe – intensywny kolor czerwony). Miejsca, w których pojawiły się żyłaki (rys.4) mają zdecydowanie wyższą temperaturę.

Termowizja medyczna ma jednak pewne ograniczenia i nie zawsze można odpowiednio zdiagnozować stan pacjenta. Jak wiadomo, bazuje ona na własnościach cieplnych (promieniowaniu) skóry. Współczynnik emisyjności ciała ludzkiego jest bliski jedności (0,98 w temp. 32 °C) [10]. Jednak może on ulec zmianie, w przypadku gdy skóra zostanie pokryta maściami, tatuażami lub nawet warstwą brudu bądź tłuszczu. Spowoduje to błędy w termogramach, a tym samym wpłynie na niepoprawną ocenę stanu zdrowia badanego.

4. Analiza obrazów cieplnych

Z punktu widzenia badań naukowych, interesującym zagadnieniem jest ciągła obserwacja zmian termicznych w ciele człowieka podczas ruchu. Zmieniające się obrazy dostarczają informacji na temat pracy poszczególnych partii mięśni i termoregulacji organizmu poddanemu wysiłkowi. Mogą stanowić podstawę np. do analizy sygnałów biomechanicznych [11], uzyskanych w wyniku badań nad lokomocją dwunożną człowieka w ruchu płaskim. Opis fizyczny tych sygnałów, tzn. pomiar mocy chwilowych rozwijanych przez zespoły mięśniowe kończyn dolnych czło-

wieka (staw biodrowy, kolanowy i skokowy) zostałyby zaopatrzone w obraz (rozkład temperaturowy pracujących mięśni). Dałoby to podstawy do rzetelnego opisu praw rządzących ruchem człowieka i przyczyniłoby się w sposób zasadniczy do polepszenia leczenia patologii (rehabilitacji) oraz upośledzenia aparatu ruchu pacjentów.

Ponieważ zapisywane dane są mapą temperatury (obszary o różnym kolorze i nasyceniu barwnym), istnieje możliwość wykreślenia izoterm, określenia rozkładu temperatury i pobrania danych z termogramu z obszarów badanych (tzn. wykazujących jakąś patologię). Świetnym narzędziem to takich celów może okazać się program „Matlab”, a w szczególności jeden z jego toolbox’ów: „Image Processing Toolbox”, przeznaczony do cyfrowej obróbki obrazów. Ciekawym pomysłem wydaje się także możliwość zastosowania kompresji falkowej obrazów cieplnych w „Wavelet Toolbox” za pomocą dwuwymiarowych falek [12]. Należy nadmienić, że obecnie stosowane formaty zapisu termogramów (mapa bitowa BMP i standardowy JPG (transformata cosinusowa)) nie wykorzystują transformat falkowych.

Wnioski

Termografia kliniczna to efektywna i nieinwazyjna metoda pozwalająca obserwować zmiany termiczne w ciele człowieka. Badania termowizyjne cechują się ponadto wysoką czułością. Współczesne kamery termowizyjne mają rozdzielczość temperaturową dochodzącą do $0,018^{\circ}\text{C}$. Łatwo zatem zaobserwować niewielkie zmiany temperatury w ciele (np. przez interpretację jakościową) (rys.7). Gwarantem poprawności pomiaru jest odpowiednio dobrze dobrany współczynnik emisyjności opisany szerzej w punkcie 2.

Możliwości zastosowania technik zobrazowania termicznego są zwiększane z „dnia na dzień”. Powoduje to jeszcze szybszy rozwój technologiczny dziedziny, która jeszcze kilkanaście lat temu była bardzo droga, a dziś jest ogólnie dostępna.

Literatura

- [1] Błachnio J.: Badania nieniszczące w diagnostyce silników turbinowych, 4th International Conference „Exploit Diesel and Gas Turbine”, Międzyzdroje–Kopenhaga (w 2004 oddany do druku).

- [2] Praca zbiorowa pod redakcją H. Madury: Pomiary termowizyjne w praktyce, Agenda wydawnicza PAKu, Warszawa, 2004.
- [3] Multimedialna encyklopedia powszechna – edycja 2000.
- [4] Encyklopedia internetowa: <http://pl.wikipedia.org>.
- [5] Manluha W.: Pomiary termowizyjne: przyrządy i metody, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2004.
- [6] Bielecki Z., Rogalski A.: Detekcja sygnałów optycznych, WNT, Warszawa, 2001.
- [7] Prospekty firmy FLIR SYSTEMS AB.
- [8] Prospekty firmy VIGO SYSTEMS.
- [9] <http://meditherm.com>.
- [10] Wolfe L.W., Ziss G.J.: The Infrared Handbook, Office of Naval Research, Department of Navy, Washington, D.C.
- [11] Jaworek K., Bogdan M.: Kompresja i kodowanie sygnałów biomechanicznych, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn, Białystok (w 2004 r. oddany do druku).
- [12] Wavelet Toolbox, User's Guide – The MathWorks Inc., 2000.

BASES OF THERMOVISION AND IT USE IN MEDICAL EXAMINATIONS

Abstract: The present thesis focuses mainly on aspects related to use of thermovision in medicine. It presents shortly theoretic bases of thermovision, including Max Planck's law and Stefan-Boltzmann constant. The basic issues regarding thermovision measurements and the measurement apparatus are characterized in a simple clear way, including brief description of parameters of thermovision cameras. The thesis gives examples of practical application of thermography in diagnosis of disorders of vascular circulation in upper and lower limbs. The concluding part of the article deals with a proposition of the author's own method of analysis of thermograms in Matlab calculation environment.

Keywords: thermovision, infrared radiation, body full radiator, emissivity, medical research, thermogram

Praca została sfinansowana przez Politechnikę Białostocką – praca zespołowa W/WM/3/03.

Henryk Borowczyk¹, Maciej Chmurkowski², Marcin Derlatka³

PROJEKT KONCEPCYJNY EKSPERTOWEGO SYSTEMU KONTROLNO-DIAGNOSTYCZNEGO TURBINOWEGO SILNIKA ODRZUTOWEGO

Streszczenie: W artykule przedstawiono projekt koncepcyjny ekspertowego systemu kontrolno-diagnostycznego opracowany w ramach magisterskiej pracy dyplomowej na Politechnice Białostockiej. Diagnostowanym obiektem jest turbinowy silnik odrzutowy typu 89, zdekomponowany na instalacje i układy. Rozważania przeprowadzono na przykładzie układu sterowania zwiększaniem prędkości obrotowej wirnika silnika. Źródłem danych są przebiegi czasowe sygnałów diagnostycznych zarejestrowane na oscylogramach podczas badań przeprowadzonych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Podczas realizacji projektu wykorzystano oprogramowanie Matlab do przygotowania danych i identyfikacji modeli dynamicznych oraz PC Shell – szkieletowy system ekspertowy polskiej firmy AITECH.

Słowa kluczowe: turbinowy silnik odrzutowy, system diagnostyczny, system ekspertowy, identyfikacja systemów

Wprowadzenie

Rozwój badań diagnostycznych oraz innowacji wprowadzonych w dzisiejszych metodach pozyskiwania informacji o stanie technicznym obiektu wymusił wykorzystanie najnowszych, skomputeryzowanych środków analizy. Ich zastosowanie w przypadku dużych, złożonych obiektów, do których zaliczyć można turbi-

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

² Absolwent Politechniki Białostockiej – 2004r., admin@epark.pl

³ Politechnika Białostocka, mder@pb.bialystok.pl

nowe silniki odrzutowe, ma szczególne znaczenie ze względu na liczbę symptomów diagnostycznych, mierzonych parametrów pośrednich czy też parametrów procesów fizycznych zachodzących w obiekcie.

System ekspertowy jest programem komputerowym wykorzystującym wiedzę ekspercką pozyskaną na podstawie badań eksperymentalnych. Wykorzystanie dostępnych metod oceny stanu technicznego (począwszy od metod wibroakustycznych, poprzez badania tribologiczne, aż po metody defektoskopowe) oraz digitalizacja otrzymanych wyników przy pomocy programu Matlab stanowi podstawę konstrukcji bazy danych systemu ekspertowego.

Projekt ekspertowego systemu diagnostycznego silnika typu 89 obejmuje następujące podstawowe zagadnienia [3]:

- dekompozycję obiektu na mniejsze instalacje,
- poddanie ich określonej formie badań w zależności od budowy, realizowanych procesów lub występujących uszkodzeń [2],
- określenie struktur niezawodnościowych i bezpieczeństwa,
- opracowanie modelu diagnostycznego,
- opracowanie bazy danych i bazy wiedzy,
- implementację z wykorzystaniem szkieletowego systemu PC Shell.

Opracowany system, wykorzystujący odpowiednio sformułowane reguły (bazę wiedzy), zapewnia wysokie prawdopodobieństwo rozpoznania zdefiniowanych wcześniej uszkodzeń silnika.

I. Diagnostowany obiekt

Obiektem diagnozowania jest turbinowy silnik odrzutowy typu 89, w którym wyróżniono następujące układy i instalacje:

- sprężarka osiowa;
- turbina;
- komora spalania;
- dopalacz;
- dysza wylotowa;
- instalacja paliwowa komory spalania;
- instalacja paliwowa dopalacza;
- instalacja olejowa;
- układ łożyskowania.

Opis silnika tworzą [3]: charakterystyki statyczne i dynamiczne, struktury bezpieczeństwa i niezawodności (uwzględniające wskaźniki i charakterystyki), model matematyczny [1] oraz wskaźniki jakości działania całego układu. Wykaz najczęstszych awarii, przyczyn ich powstawania jak również sposobów zabezpieczania przed nimi silnika [2] umożliwił zdefiniowanie zbioru uszkodzeń, które powinny być rozpoznawane przez ekspertowy system diagnostyczny.

Ze względu na złożoność instalacji i liczbę parametrów opisujących procesy fizyko-chemiczne zachodzące w każdej z nich, system ekspertowy przedstawiony został na podstawie jednego, konkretnego układu – sterowania przyspieszeniem i zmniejszaniem prędkości obrotowej.

Układ sterowania przyspieszaniem podzielony został na trzy podstawowe podukłady [2]:

- układ paliwowy i sterujący sprężarką,
- układ sterujący dyszą wylotową,
- blok dyskretnych sygnałów BDK – jego zadaniem jest podawanie sygnałów elektrycznych do urządzeń znajdujących się w układzie sterującym silnikiem.

Układ paliwowy i sterujący sprężarką kształtuje przebieg wydatku paliwa doprowadzanego do komory spalania, zwiększa zapas statecznej pracy sprężarki przez odpowiednie ustawienie kątów natarcia łopatek aparatów kierujących oraz zabezpiecza silnik przed przekroczeniem wartości dopuszczalnych obrotów zredukowanych i momentu obrotowego.

Na zamknięcie i otwieranie dyszy wylotowej mają wpływ: zawór ciśnienia sterującego, znajdujący się w układzie paliwowym, i suwak blokady zamknięcia dyszy wylotowej. Podczas przyspieszania dysza jest blokowana w położeniu otwartym do momentu osiągnięcia przez silnik zredukowanej prędkości obrotowej ok. 80%, po czym ulega zamknięciu.

Zadaniem bloku dyskretnych sygnałów BDK jest podawanie dwustanowych (włącz/wyłącz) sygnałów elektrycznych do urządzeń znajdujących się w układzie sterującym silnikiem.

2. Projekt ekspertowego systemu diagnostycznego

System ekspertowy jest programem komputerowym zawierającym sformalizowaną wiedzę i reguły jej przetwarzania, pomagającym w analizie informacji i podejmowaniu decyzji. Zalicza się go do dziedziny zwanej „sztuczną inteligencją”. Podzielony jest na niezależne, ale współpracujące ze sobą elementy, których

najważniejszą częścią jest baza wiedzy. Zawiera ona informację z określonej dziedziny, zapisaną za pomocą odpowiedniego języka formalnego, na którą składa się baza faktów oraz baza reguł. Wiedza znajdująca się w bazie wiedzy pochodzi od ekspertów, specjalistów z danej dziedziny.

Problem rozwiązywany jest za pomocą tzw. maszyny wnioskującej, która na podstawie zgromadzonej wiedzy wyszukuje rozwiązanie. Maszyna wnioskująca jest oddzielona od bazy wiedzy, dzięki czemu działa tak samo w systemach ekspertowych dla określonej dziedziny jak i w szkieletowych systemach ekspertowych. Algorytm wyszukiwania rozwiązania zawiera szereg strategii przeszukiwań, heurystyk i metod wnioskowania. Strategie wyznaczają kolejne kroki przeszukiwań, heurystyki pomagają zoptymalizować przestrzeń poszukiwań, a metody decydują o sposobie procesu myślenia (wnioskowanie wstecz, w przód lub mieszane) [9].

W przypadku wnioskowania w przód, proces rozpoczyna się od analizy zbioru faktów podanych na wejściu. W rezultacie zostają wygenerowane wszystkie logiczne konsekwencje tych faktów, stanowiące ostateczne konkluzje systemu.

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 (lub nie) warunki reguł. Zadaniem systemu jest potwierdzenie hipotezy, jej falsyfikacja lub wskazanie niemożliwości znalezienia rozwiązania problemu.

Ze względu na komunikację użytkownika z systemem, obecnie powszechnie stosuje się szkieletowe systemy ekspertowe, zawierające:

- mechanizm formalnej reprezentacji wiedzy;
- narzędzia do strukturyzacji bazy wiedzy;
- interfejs odpowiedni do utworzenia systemu ekspertowego, umożliwiający 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.

W pracy [3] wykorzystano szkieletowy system ekspertowy PC-Shell polskiej firmy AITech. Jest to dziedzicznie niezależny system o właściwościach hybrydowych. Dzięki zastosowaniu architektury tablicowej można bazę wiedzy podzielić na dowolną ilość heterogenicznych źródeł wiedzy.

Baza wiedzy zapisywana jest przy użyciu wyspecjalizowanego języka Sphinx. Integruje on w sobie deklaracyjny język reprezentacji wiedzy oraz strukturalny język programowania. Baza wiedzy podzielona na bloki: opisu źródeł, faset, reguł, faktów i sterowania, zapisywana jest w postaci plików tekstowych poddawanych procesowi translacji na początku każdej sesji konsultacyjnej.

Implementacja szkieletowego systemu ekspertowego polega na opracowaniu skryptu programu zawierającego procedurę importu danych, bazę wiedzy i pozostałe wymagane bloki programowe. Podstawową strukturą reprezentacji wiedzy jest trójka: obiekt-atrybut-wartość. Wartości atrybutu mogą być liczbami typu rzeczywistego, ciągami znaków lub zmiennymi.

2.1. Opracowanie modelu diagnostycznego

Analiza informacji diagnostycznej, zapisanej na oscylogramach zarejestrowanych podczas badań diagnostycznych [4], polega na wyznaczeniu, za pomocą oprogramowania Matlab - System Identification Toolbox [7], modelu dynamicznego typu ARX. Umożliwia to identyfikację uszkodzeń jak również określenie jakości regulacji silnika.

Na podstawie opisu uszkodzeń układu sterowania przyspieszaniem i zmniejszaniem prędkości obrotowej, zidentyfikowanych za pomocą siedmiu oscylogramów (jeden przebieg prawidłowy oraz sześć przebiegów z symulowanymi uszkodzeniami) wyodrębnione zostały sygnały diagnostyczne, umożliwiające ocenę stanu układu:

- P_2 – ciśnienie powietrza za sprężarką;
- P_4 – ciśnienie spalin za turbiną;
- n – prędkość obrotowa wirnika silnika;
- DR – średnica dyszy wylotowej;
- P_w – ciśnienie paliwa w kolektorze komory spalania;
- DSS – położenie dźwigni sterowania silnikiem;
- AKX - ustawienie wylotowych aparatów kierujących sprężarki;
- AKI - ustawienie wlotowych aparatów kierujących sprężarki;
- $wibr$ – wskaźnik drgań silnika;
- pol – ciśnienie oleju;
- $=U$ – napięcie w pokładowej sieci elektrycznej.

Pierwszym etapem identyfikacji obiektu jest digitalizacja oraz skalowanie zarejestrowanych przebiegów sygnałów analogowych. Otrzymuje się w ten sposób macierz sygnałów zawierającą wejścia $u(t)$ i wyjścia $y(t)$ modelu [8], zidentyfikowanego w środowisku Matlab – System Identification Toolbox. Wynikiem identyfikacji przeprowadzonej w pracy [3] jest model parametryczny typu $arx441$, którego parametry stanowią podstawę budowy bazy danych systemu ekspertowego.

2.2. Diagnostyczna baza danych

Diagnostyczną bazę danych układu stanowi zbiór parametrów $a_1 - a_n$ oraz $b_1 - b_n$ modeli uzyskanych dla układu z symulowanymi uszkodzeniami i nieuszkodzonego. Wartości współczynników transmitancji modelu układu przyspieszania poddano normalizacji (tab.2), według następującej zależności:

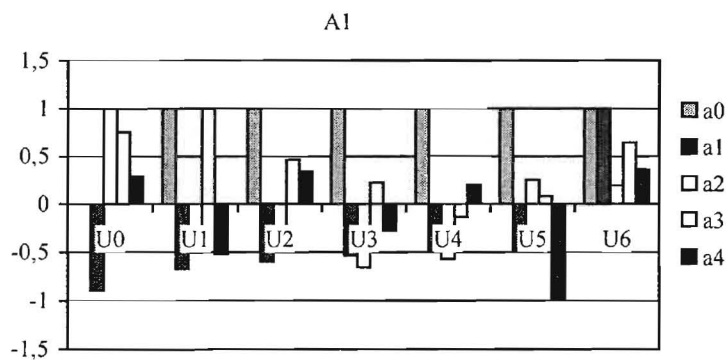
$$S^{N'} = \frac{S^N}{|S^N|_{\max}}$$

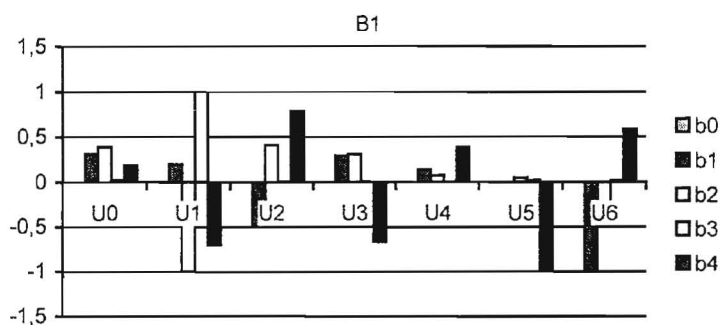
gdzie: S^N – współczynnik transmitancji;

$S^{N'}$ – znormalizowany współczynnik transmitancji;

$|S^N|_{\max}$ – wartość bezwzględna maksymalnego współczynnika transmitancji.

System ekspertowy oprócz normalizacji wymaga również zakodowanych wartości współczynników. Kodowanie polega na porównaniu wartości poszczególnych znormalizowanych współczynników transmitancji, w zależności od uszkodzeń, i na odpowiednim dobraniu ilości stanów (rys.1). Przeprowadza się to na podstawie wykresów zbiorów współczynników A1, B1-B9 w dziedzinie kolejnych uszkodzeń:





Rysunek 1. Rozkład parametrów modelu w zależności od uszkodzeń dla zbiorów współczynników A1 i B1 [3]

Kodowanie bazy danych polega na zastąpieniu liczb z określonego przedziału jedną liczbą całkowitą i przypisanie jej numerowanego stanu.

Tabela 1. Tablica kodowania bazy danych [3]

Przedział	Kod	Stan
$[-1, -\frac{1}{2})$	-2	st1
$[-\frac{1}{2}, 0)$	-1	st2
0	0	st3
$(0, \frac{1}{2}]$	1	st4
$(\frac{1}{2}, 1]$	2	st5

Zakodowana baza danych przedstawia się następująco:

Tabela 2. Baza danych modelu układu przyspieszania przygotowana do użycia w systemie ekspertowym [3]

A1						tablica stanów: A1					
	a0	a1	a2	a3	a4		a0	a1	a2	a3	a4
U0	2	-2	2	2	1	U0	st5	st1	st5	st5	st4
U1	2	-2	-1	2	-2	U1	st5	st1	st2	st5	st1
U2	2	-2	-1	1	1	U2	st5	st1	st2	st4	st4
U3	2	-2	-2	1	-1	U3	st5	st1	st1	st4	st2
U4	2	-1	-2	-1	1	U4	st5	st2	st1	st2	st4
U5	2	-1	1	1	-2	U5	st5	st2	st4	st4	st1
U6	2	2	1	2	1	U6	st5	st5	st4	st5	st4

B1						tablica stanów: B1					
	b0	b1	b2	b3	b4		b0	b1	b2	b3	b4
U0	0	1	1	1	1	U0	st3	st4	st4	st4	st4
U1	0	1	-2	2	-2	U1	st3	st4	st1	st5	st1
U2	0	-2	1	1	2	U2	st3	st1	st4	st4	st5
U3	0	1	1	1	-2	U3	st3	st4	st4	st4	st1
U4	0	1	1	-1	1	U4	st3	st4	st4	st2	st4
U5	0	-1	1	1	-2	U5	st3	st2	st4	st4	st1
U6	0	-2	-1	1	2	U6	st3	st1	st2	st4	st5

2.3. Diagnostyczna baza wiedzy systemu ekspertowego

W skład diagnostycznej bazy wiedzy systemu ekspertowego wchodzi dwie podstawowe części:

- baza faktów
- baza reguł.

Baza faktów jest formowana dynamicznie na podstawie informacji o uszkodzeniach uzyskanych z oscylogramów badań eksperymentalnych. W systemie ekspertowym PC-Shell, w którym przeprowadzone zostanie wnioskowanie, każdy fakt przyjmuje wartości wcześniej zdefiniowanych zmiennych.

Jeżeli tablice faktów oznaczone zostaną zmiennymi w postaci: zA_{1am} i zB_{nbm} , gdzie:

- z – zmienna wykorzystywana w programie PC-Shell
- A_1, B_n – współczynniki transmitancji (n – numer porządkowy współczynnika B transmitancji)
- m – numer porządkowy parametrów a i b transmitancji,

to zdefiniowanie ich w programie PC-Shell będzie wyglądać następująco:

fasets

```
ask yes;
single yes;
```

zA_{1a0} :

```
val oneof { "st1", "st2", "st3", "st4", "st5" };
(...)
```

zA_{1am} :

```
val oneof { "st1", "st2", "st3", "st4", "st5" };

```

zB_{1b0} :

```
val oneof { "st1", "st2", "st3", "st4", "st5" };

```



```
(...)  
zBnbm:  
val oneof { "st1", "st2", "st3", "st4", "st5"};
```

Definiowanie zmiennych przeprowadzono dla wszystkich zmiennych A1, B1-B9 w wydruku programu, zamieszczonym w [3].

Baza reguł zawiera zapisaną w postaci reguł wiedzę eksperta, na podstawie której generowane są nowe fakty. Zdefiniowane w niej zostają wartości poszczególnych stanów parametrów dla prawidłowej pracy i kolejnych uszkodzeń układu sterowania przyspieszeniem. Dzięki tym regułom generowane są konkluzje, które potwierdzają (lub nie) hipotezy dotyczące stanu technicznego obiektu.

Na przykład, reguła definiująca uszkodzenie pierwsze U_1 ma postać:
1002: uszkodzenie = "obniżona przepustowość głównego pakietu dławiącego izodromy serwowłoka zaworu dławiącego " if

```
zA1a0 = "st5"  
&zA1a1 = "st1"  
&zA1a2 = "st2"  
&zA1a3 = "st5"  
&zA1a4 = "st1"  
&zB1b0 = "st3"  
&zB1b1 = "st4"  
(...)  
&zBnbm = "stk"
```

gdzie: k – kolejny numer stanu zawierający się w przedziale <1,5>

Definiowanie reguł przeprowadzono dla wszystkich uszkodzeń oraz dla poprawnej pracy silnika [3].

2.4. Skrypt programu systemu ekspertowego

Program został podzielony, według instrukcji producenta PC-Shell [5], na następujące główne części:

- blok *control*;
- blok *fassets*;
- blok *rules*.

Blok *control* zawiera deklaracje zmiennych używanych w całym skrypcie oraz zbiór instrukcji. Do deklaracji zmiennych wykorzystane zostały dwa typy:

char oraz int. Pierwszy z nich jest deklaracją zmiennych tekstowych: char Z1, Z2, Z3 – ciągów znaków opisujących tytuł aplikacji, nazwisko autora i charakterystykę programu.

Drugi typ zmiennych to zmienne typu całkowitego int:

```
int ID, ID2;  
int A1a0, A1a1, A1a2, A1a3, A1a4;  
int B1b0, B1b1, B1b2, B1b3, B1b4;
```

W bloku **control** następuje również import bazy danych z arkusza kalkulacyjnego programu Excel, na podstawie wskazanej ścieżki do programu oraz ścieżki do pliku. Import poszczególnych wartości parametrów polega na wskazaniu przez program numeru wiersza i kolumny w pliku Excela, z którego dana wartość ma zostać zaimportowana:

```
ddeRequest(ID2, "W3K2", A1a0);  
ddeRequest(ID2, "W3K3", A1a1);  
ddeRequest(ID2, "W3K4", A1a2);  
(...)  
ddeRequest(ID2, "WxKc", Anam);
```

gdzie: ddReguest jest instrukcją pobierania danych

Wz – numerem wiersza

Kc – numerem kolumny

Anam – zainicjowana wcześniej zmienna, której ma być przypisana pobierana wartość

Instrukcja addFacts umożliwia utworzenie i dodanie faktu do bazy wiedzy w sposób dynamiczny, w trakcie wykonywania programu z bloku sterowania – control:

```
addFacts(O, A, W);
```

gdzie: O – symbol lub zmienna typu char lub znak „_”

A – liczba lub zmienna typu char

W – łańcuch znakowy lub dowolna zmienna prosta

W programie dodawanie faktów zostało przeprowadzone za pomocą funkcji „if”, która umożliwia dodanie faktu – numeru stanu, w zależności od wartości zmiennych pobranych z arkusza kalkulacyjnego:

```
if (A1a0 = -2)  
begin  
    addFact(_sA1a0, "st1");  
end;
```

```

if (A1a0 = -1)
    begin
        addFact(_sA1a0,"st2");
    end;
(...)
if (Anam = y)
    begin
        addFact(_sAnam,"stk");
    end;
gdzie: y – wartość stanu zawierająca się w przedziale <-2,2>

```

Blok *fasets* zawiera wykaz wszystkich atrybutów używanych w bazie wiedzy, w tym również zawartych w źródłach wiedzy wraz z przypisanymi do nich zbiorami deklaracji nazywanych fasetami.

```

ask yes;
    single yes;
    sA1a0:
val oneof { "st1", "st2", "st3", "st4", "st5"};
    sA1a1:
val oneof { "st1", "st2", "st3", "st4", "st5"};
(...)
sAnam:
val oneof { "st1", "st2", "st3", "st4", "st5"};

```

Faseta „ask” określa, czy system może stawiać pytania dotyczące danego atrybutu. Natomiast faseta „single” deklaruje, że w bazie wiedzy może wystąpić tylko jeden fakt zawierający atrybut, do którego odnosi się ta faseta.

„Val oneof” jest fasetą deklarującą dozwolony zbiór wartości atrybutu, z którym jest ona związana.

Blok *rules* pełni główną rolę z punktu widzenia reprezentacji wiedzy eksperckiej. Składnia zawartych w nim reguł składa się z konkluzji oraz części warunkowej, które są oddzielone od siebie słowem kluczowym „if”. Warunki natomiast oddzielone są operatorem „and”, niezbędnym do prawidłowego zdefiniowania uszkodzenia za pomocą wszystkich warunków

Ogólny schemat reguł przedstawia się następująco:

konkluzja **jeśli** warunek_1; warunek_2;... ; warunek_n

Natomiast w pracy zrealizowane zostało w następujący sposób:

rules

1001: uszkodzenie = "brak uszkodzenia" if

 sA1a0 = "st5"

 &sA1a1 = "st1"

 &sA1a2 = "st5"

 (...)

 &sAnam = "stk"

Zasada działania programu polega na porównaniu wartości atrybutów (parametrów transmitancji modeli), w przypadku prawidłowego działania i uszkodzeń, z wartościami parametrów podanych w arkuszu kalkulacyjnym. Działanie programu kończy się rozwiązaniem problemu, wskazaniem uszkodzenia lub jego braku.

Podsumowanie

Diagnozowanie złożonego obiektu technicznego, jakim jest turbinowy silnik odrzutowy, wspomagane komputerową analizą informacji diagnostycznej zapewnia szybkie i dokładne rozpoznawanie stanów awaryjnych. Warunkiem efektywnego wykorzystania systemu ekspertowego jest stworzenie odpowiedniej bazy danych (na podstawie dostępnych badań eksperymentalnych i rozpoznanych parametrów) jak również szczegółowe opracowanie reguł bazy wiedzy.

Przedstawiony system ekspertowy [3] identyfikuje sześć uszkodzeń, na podstawie dziewięciu sygnałów z oscylogramów zarejestrowanych na stanowisku diagnostycznym. Duża liczba parametrów lub uszkodzeń nie ma znaczącego wpływu na czas wnioskowania, wydłuża jedynie samo przygotowanie danych.

Wspomaganie analizy badań diagnostycznych przedstawionym systemem eliminuje pomyłki wynikające z błędów popełnianych przez człowieka, pozwala również zautomatyzować proces oceny stanu technicznego.

Literatura

1. Bodner W.A.: Automatyka silników lotniczych, Wydawnictwa Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa, 1958.
2. Borowczyk H., Kącki Cz., Koblański A.: Technologia identyfikacji uszkodzeń turbinowych silników odrzutowych typu 89 przy pomocy stanowiska diagnostycznego KAPSO-17MK, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa, 1991.
3. Chmurkowski M.: Ekspertowy system diagnostyczny silnika turbinowego. Praca magisterska, Politechnika Białostocka, Białystok, 2004
4. Lindstedt P., Borowczyk H., Majewski P., Szymczak R.: z pracy pt. Opracowanie bazy wiedzy turbinowego silnika odrzutowego dostosowanej do wymagań komputerowo wspomaganego systemu ekspertowego (z wykorzystaniem programów przetwarzania KUD/KAPSO), Sprawozdanie nr 51/34/2002, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2002.
5. Michalik K.: Zintegrowany pakiet sztucznej inteligencji Sphinx 2.3 – dokumentacja oprogramowania, AITech, Katowice, 1999.
6. Silnik AŁ-21F3 opis techniczny, Ministerstwo Obrony Narodowej – Dowództwo Wojsk Lotniczych, Poznań, 1978.
7. <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/ident/> – System Identification Toolbox – dokumentacja, The MathWorks, 1990-2004.
8. <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink/> – Simulink – dokumentacja, The MathWorks, 1990-2004.
9. <http://aragorn.pb.bialystok.pl/~radev/ai/se/wykl03a.htm> – Opis Budowy Systemów Ekspertowych

CONCEPTIVE PROJECT OF THE EXPERT DIAGNOSTIC SYSTEM OF TURBINE JET ENGINE

Abstract: A conceptive project of the expert diagnostic system (elaborated within the confines of the master's M.A thesis at the Białystok University of Technology) was re-stated in the article. Turbine jet engine of the type 89 divided into systems is a diagnosed object. Discussion was carried out on the example of the acceleration control system.

Course of diagnostic signals registered in Air Force Institute of Technology is a source of data. Matlab software was utilized for the data preparation and identification of dynamic models. The project was realised on skeleton expert system PC Shell basis (of the Polish AITECH company).

Keywords: turbine jet engine, diagnostic system, expert system, system identification

Jerzy Gagan¹

STOSOWANE METODY IDENTYFIKACJI PRZEPŁYWÓW DWUFAZOWYCH PARY WODNEJ

Streszczenie: W pracy przedstawiono krótką charakterystykę przepływów dwufazowych, przegląd metod identyfikacji charakteru przepływów oraz analizę możliwości zastosowania przedstawionych metod w odniesieniu do pomiaru stopnia suchości pary wodnej.

Słowa kluczowe: para wodna, jakość pary wodnej, przepływ dwufazowy, pomiar jakości pary wodnej

Wprowadzenie

Przepływami dwufazowymi możemy nazwać przepływy płynów mogących przybierać charakter ośrodka ciągłego lub występować jako ośrodek rozproszony w postaci substancji o dowolnym stanie skupienia. Układy składające się z fazy gazowej i fazy ciekłej są znacznie bardziej złożone niż układy zawierające fazę stałą lub wyłącznie jedną z wyżej wymienionych. Faza gazowa i ciekła mogą przybierać różne geometryczne kształty podczas wspólnego przepływu. Jedna z faz może być zdyspergowana (nieciągła), druga zaś ciągła. Mogą też obie być ciągłe bądź nieciągłe.

Rozpatrując zagadnienia przepływów dwufazowych należy określić pojęcie struktury przepływu, która, w zależności od warunków w jakich odbywa się przepływ, może ulegać zmianie. Matematyczny opis struktur przepływów dwufazo-

¹ Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok. jerzygag@pb.bialystok.pl

wych można przeprowadzić tylko w nielicznych prostych przypadkach, znając dokładnie strukturę przepływu i zakładając, że jest ona niezmienna w czasie. W znacznej większości przypadków struktura może być określona tylko na podstawie wyników badań eksperymentalnych.

Rodzaj struktury w przepływie dwufazowym jest ukształtowany przez siły działające na poszczególne fazy. W grę wchodzi głównie siły bezwładności, ciężkości, wyporu, ciśnienia, lepkości i napięcia powierzchniowego. Wymienione czynniki, mające wpływ na struktury przepływów dwufazowych, tylko ogólnie określają charakter przepływu. Aby móc sprecyzować zagadnienie, należy dodatkowo podzielić je na przepływy adiabatyczne i nieadiabatyczne.

Na charakter struktury dwufazowego przepływu adiabatycznego wywierają wpływ następujące czynniki:

- strumień objętości każdej fazy,
- gęstość i lepkość każdej fazy oraz napięcie powierzchniowe cieczy,
- kąt nachylenia przewodu względem poziomu,
- kierunek sił pola ciężkości,
- prędkość przepływu poszczególnych faz,
- kierunek przepływu poszczególnych faz:
- gaz i faza ciekła do góry (współprąd),
- gaz i faza ciekła do dołu (współprąd),
- gaz do góry, faza ciekła do dołu (przeciwprąd),
- gaz w dół, faza ciekła do góry (przeciwprąd) – nie może zaistnieć w warunkach oddziaływania pola sił grawitacji,
- ciśnienie,
- rozmiary poprzeczne przewodu,
- ukształtowanie wzdłużne przewodu,
- sposób doprowadzenia obu faz do przewodu
- długość wlotowa przewodu.

W dwufazowych przepływach nieadiabatycznych zasadniczy wpływ na charakter przepływu wywiera sposób wymiany ciepła (doprowadzenia lub odprowadzenia). Najczęściej występuje przypadek wymiany ciepła przez ścianę przewodu, w którym wielkością determinującą jest strumień ciepła.

W przepływach dwufazowych nieadiabatycznych znaczącą część stanowią przypadki, w których jedna z faz generowana jest z drugiej na skutek zmian zachodzących w rozpatrywanym procesie. Możemy je ogólnie określić jako procesy wrzenia i kondensacji w przepływie, w których wszystkie wymienione powyżej czynniki mają zasadniczy wpływ na zachodzące procesy.

Wrzenie i kondensacja w przepływie jest szczególnym przypadkiem konwekcyjnej wymiany ciepła. W trakcie trwania takiego procesu ma się do czynienia z więcej niż jedną fazą tego samego czynnika. Doprowadzenie lub odprowadzenie ciepła powoduje przejście jednej fazy w drugą bez zmiany temperatury na granicy rozdziału faz. Z tego względu przepływy takie mają mechanizm bardziej złożony niż przepływy dwufazowe, w których nie zachodzi przemiana fazowa. Wpływają na to cechy hydrodynamiczne przepływu dwufazowego, tworzącego się w ograniczonej przestrzeni na skutek ciągłego generowania fazy parowej z fazy ciekłej lub odwrotnie.

Jak z wynika powyższego, struktura układów gazowo–cieczowych w ogólnym rozumieniu może się zmieniać w zależności od wielu czynników. W tej sytuacji przepływy dwufazowe są z natury rzeczy trójwymiarowe i w większości też nieustalone. Prosty opis matematyczny takich przepływów nie jest możliwy, co zmusza do szukania rozwiązań w ramach ustalonych przepływów jednowymiarowych przy zastosowaniu wielu uproszczeń lub do doświadczalnego wyznaczania żądanych parametrów.

I. Metody identyfikacji charakteru przepływu

Przez identyfikację charakteru przepływów dwufazowych należy rozumieć określenie zawartości poszczególnych faz w przepływie i ich wzajemnego rozmieszczenia w rozpatrywanym przekroju kanału. Istnieje wiele metod identyfikacji, niestety na ogół żadna nie może zagwarantować wysokiej pewności określenia zarówno zawartości poszczególnych faz, jak i ich wzajemnego rozkładu. Z tego też powodu znane metody dotyczące tego zagadnienia można podzielić na dwie grupy. Pierwsza z nich obejmuje sposoby wyznaczania zawartości poszczególnych faz w przepływie (zawartość masy – poszczególnych faz, stopień suchości lub objętość poszczególnych faz – stopień wypełnienia) bez uwzględnienia ich rozkładu, druga – polega na określeniu rozkładu poszczególnych faz w przekroju rozpatrywanego kanału

Poniżej przedstawia się ogólny podział i krótką charakterystykę znanych metod identyfikacji charakteru przepływów dwufazowych.

I.1. Metoda pułapkowa [1]

Zakres stosowalności tej metody jest bardzo wąski. Znajduje zastosowanie tylko w przypadku gdy przepływy umiejscowione są w kanałach pionowych

w których udział poszczególnych faz nie jest zmienny w czasie. Gdzie można chwilowo zamykać dopływ czynnika bez wpływu na zachodzące tam procesy, w których to wymiana ciepła nie ma większego znaczenia.

1.2. Metoda pomiaru przy pomocy sond oporowych [1]

W tej metodzie wykorzystuje się różnicę oporności elektrycznej gazu i cieczy. W badanym przewodzie umieszcza się elektrody, które mierzą opór czynnika znajdującego się między nimi. Zmiany oporu określają, jaka faza znajduje się w danej chwili w obszarze pomiarowym. Zastosowanie stałych elektrod umożliwia pomiar wyłącznie w jednym małym fragmencie przekroju badanego przewodu. Może to dawać zadowalające wyniki tylko w przypadku przepływów symetrycznych w odniesieniu do geometrii przekroju kanału. Nie daje zaś możliwości precyzyjnego określenia rozkładu poszczególnych faz i ich udziału w badanym przepływie.

Rozwinięciem danej metody może być zastosowanie ruchomych elektrod. Umożliwia to określenie udziału rozkładu poszczególnych faz w badanym przekroju. Taki układ można wykorzystać przy założeniu, że przepływy są ustalone z wyraźną granicą rozdziału faz, niezmienną w przestrzeni i czasie. Analizując cechy tej metody można stwierdzić, że jej zastosowanie możliwe jest jedynie w przypadku geometrycznie niezmiennych przepływów dwufazowych. Jeśli wziąć pod uwagę, że przepływy nieadiabaticzne są przepływami burzliwymi, to wówczas nie nadaje się ona do zastosowania. Dyskwalifikuje ją to więc przy określaniu charakteru przepływu nasyconej pary wodnej przy dużych ciśnieniach i temperaturach.

1.3. Metoda pojemnościowa [1]

Metoda pojemnościowa charakteryzuje się podobną techniką pomiaru jak i metoda oporowa. Wykorzystuje elektrody, które spełniają funkcję okładek kondensatora, między którymi rejestruje się zmiany pojemności. Podobieństwo charakteru pomiaru do metody z wykorzystaniem sond oporowych rzutuje na analogiczne, powyżej omówione ograniczenia.

1.4. Metoda anemometryczna [1]

Ta metoda jest głównie wykorzystywana do pomiaru przepływów korkowych. Głównym elementem takiego czujnika jest gorący element pokryty cienką warstwą izolacji. Jego działanie oparte jest na różnej intensywności wymiany ciepła z cieczą i gazem. Powoduje to zmianę temperatury czujnika i jego oporności. Jeśli chodzi o zastosowanie tej metody do pary wodnej, to głównym ograniczeniem jest brak

możliwości określenia stopnia suchości w przepływach dyspersyjnych, które stanowią zasadniczą część przepływów dwufazowych w zastosowaniach utylitarnych.

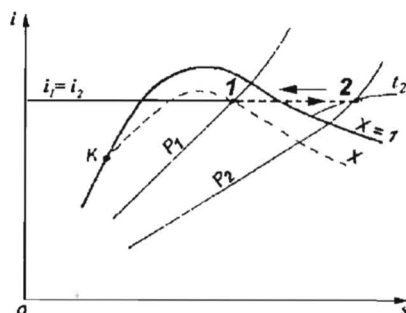
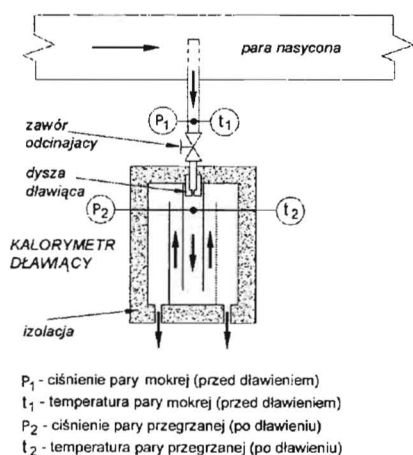
1.5. Metoda akustyczna [1]

Stosując tę metodę pomiarową, wykorzystuje się zależność prędkości dźwięku w mieszaninie dwufazowej od zawartości objętościowej poszczególnych faz. Można ją wykorzystywać jedynie w przypadkach, w których ma się do czynienia z wyraźnym rozdziałem faz.

1.6. Metody kalorymetryczne [3]

• kalorymetr dławiący

Jedna z prostszych metod oznaczania stopnia suchości pary nasyconej opiera się na wykorzystaniu zjawiska dławienia. Z przewodu, którym płynie para mokra o ciśnieniu bezwzględnym p_1 i nieznanym stopniu suchości x_1 , pobierana jest para do kalorymetru przepływowego w sposób ciągły. W kalorymetrze nasycona para mokra zostaje zdławiona tak, aby przy ciśnieniu p_2 powstała para przegrzana. Jest to wykonalne tylko wówczas, gdy $x_1 > 95$ i $p_1 \gg p_2$.



Rys.1. Kalorymetr dławiący i metoda wyznaczania x przy użyciu wykresu $i-s$

Zakłada się, że proces dławienia przebiega w taki sposób, iż entalpia po dławieniu jest taka sama jak przed dławieniem, tzn. $i_2 = i_1$. Parametry pary przegrzanej (p_2 i t_2) opuszczającej kalorymetr jednoznacznie określają położenie punktu 2

na wykresie „i-s”, co umożliwia wyznaczenie wartości entalpii pary przegrzanej i_2 . Tym samym znana jest entalpia nasyconej pary mokrej i_1 (przed dławieniem), gdyż $i_1 = i_2$. Punktem przecięcia izentalpy $i_1 = i_2$ z izobarą dla ciśnienia p_1 zdeterminowany jest poszukiwany stopień suchości pary nasyconej mokrej dopływającej do kalorymetru. Wielkość tę można także wyznaczyć analitycznie. W tym celu wykorzystuje się równanie określające entalpię tej pary:

$$i_1 = i_1' + x_1 \cdot r_1, \quad (1)$$

Skoro $i_1 = i_2$, to:

$$x_1 = \frac{i_2 - i_1'}{r_1}, \quad (2)$$

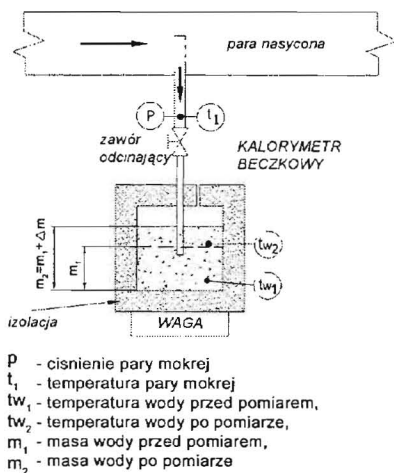
gdzie:

- i_1' – entalpia cieczy w stanie nasycenia; jej wartość odczytuje się z tablic pary nasyconej dla ciśnienia bezwzględnego p_1 ,
- r_1 – ciepło parowania cieczy przy ciśnieniu bezwzględnym p_1 ; odczytuje się je także z tablic pary nasyconej,
- i_2 – entalpia pary przegrzanej przy ciśnieniu bezwzględnym p_2 i w temperaturze t_2 ; jej wartość odczytuje się z tablic pary przegrzanej lub wykresu i-s.

Zasadniczymi cechami tej metody są: prosta konstrukcja urządzeń, okupiona jednak wąskim zakresem stosowalności tej metody oraz problemy z uzyskaniem rozprężania izentalpowego. W efekcie można ją stosować w takich przypadkach, w których spodziewany stopień suchości pary jest stosunkowo wysoki.

• kalorymetr beczkowy

W celu określenia stopnia suchości nasyconej pary mokrej w szerszym zakresie wartości (na ogół w zakresie $0 < x < 1$) stosuje się tzw. kalorymetr beczkowy, którego schemat ideowy przedstawiony jest na rys. 2, zwany także kalorymetrem Greena. Stanowi go doskonale izolowane cieplnie naczynie. W praktyce używa się do tego celu odpowiednio wyposażonego naczynia Dewara.



Rys. 2. Kalorymetr beczkowy Greena

Do kalorymetru beczkowego, w którym znajduje się woda o temperaturze tw_1 , w ilości m_1 , doprowadza się z rurociągu pewną ilość nasyconej pary mokrej o ciśnieniu bezwzględnym p i nieznanym stopniu suchości x . Para, skraplając się w kalorymetrze, oddaje ciepło wodzie, co powoduje przyrost temperatury wody do wartości tw_2 i ilości wody od wielkości m_1 do m_2 .

Kalorymetr beczkowy jest systemem jednostronnie otwartym, a proces w nim zachodzący jest nieustalony w czasie. Do obliczenia stopnia suchości pary mokrej x trzeba więc zastosować zasadę zachowania energii w postaci najogólniejszej:

$$E_d = \Delta E_u + E_w, \quad (3)$$

Energia doprowadzona jest w tym przypadku sumą energii wewnętrznej U doprowadzonej pary i pracy wprowadzenia pV tej pary do systemu, a więc:

$$E_d = U + p \cdot V = I = (m_2 - m_1) \cdot i = (m_2 - m_1) \cdot (i' + x \cdot r), \quad (4)$$

W systemie zmienia się (wzrasta) energia wewnętrzna wody od U_1 do U_2 oraz energia wewnętrzna ścianek kalorymetru o wartość Q_{kal} :

$$\Delta E_u = (U_2 - U_1) + Q_{kal} = m_2 \cdot u_2 - m_1 \cdot u_1 + Q_{kal}. \quad (5)$$

Energia jest wyprowadzana tylko w postaci strat ciepła oddanego do otoczenia:

$$E_w = Q_{ot}, \quad (6)$$

gdzie:

- i – jednostkowa entalpia nasyconej pary mokrej, o ciśnieniu bezwzględnym p i stopniu suchości x , dostarczonej do kalorymetru,
- i' – jednostkowa entalpia cieczy w punkcie pęcherzyków przy ciśnieniu p ,
- r – ciepło parowania cieczy przy ciśnieniu p ,
- $u_1; u_2$ – jednostkowe energie wewnętrzne cieczy w kalorymetrze przed pomiarem i po pomiarze.

Ilość ciepła zużyta do podniesienia temperatury ścianek kalorymetru od t_1 do t_2 obliczyć można ze wzoru:

$$Q_{kal} = m_{kal} \cdot c_{kal} \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (t_2 - t_1) = W_{kal} \cdot (t_2 - t_1). \quad (7)$$

Jednak ze względu na trudności przy wyznaczaniu pojemności cieplnej ścianek kalorymetru W_{kal} , w praktyce pomiarowej wykonuje się szereg zabiegów umożliwiających pominięcie tej ilości ciepła w dalszych obliczeniach. Mianowicie,

tuż przed właściwym pomiarem podgrzewa się ścianki kalorymetru, wlewając i mieszając gorącą wodę. Po chwilowym ustaleniu się temperatury w kalorymetrze wylewa się wodę i natychmiast wykonuje właściwy pomiar. W okresie pomiarowym doprowadza się parę wodną do kalorymetru tak długo, aż znajdującą się w nim woda osiągnie taką temperaturę, do jakiej ogrzano poprzednio ścianki kalorymetru. Wtedy temperatura ścianek na początku i na końcu okresu pomiarowego będzie taka sama, wobec czego nie nastąpi w tym czasie przyrost energii wewnętrznej ścianek kalorymetru, a zatem $Q_{kal} = 0$.

Straty ciepła do otoczenia będą zaś znikome, jeżeli średnia temperatura wody w kalorymetrze w okresie pomiarowym będzie równa (w przybliżeniu) temperaturze otoczenia,

$$\frac{tw_2 + tw_1}{2} \cong t_{ot}, \quad (8)$$

co w praktyce można stosunkowo łatwo osiągnąć. Z tego też względu końcowa temperatura wody tw_2 w kalorymetrze nie przekracza najczęściej 313...323 K (40...50°C). Ponadto, kalorymetr ma bardzo dobrą izolację cieplną, co dodatkowo zmniejsza straty ciepła do otoczenia. Można więc $Q_{ot} = 0$.

Energię wewnętrzną cieczy oblicza się zaś ze znanego wzoru;

$$u = c \int_{273,15K(0^{\circ}C)}^t \cdot t, \quad (9)$$

w którym;

$$c \int_{273,15K(0^{\circ}C)}^t - \text{średnie ciepło właściwe cieczy w zakresie temperatury od } 273,15 \text{ K } (0^{\circ}C) \text{ do } t \text{ (dla cieczy nie ma prawie różnicy między ciepłem właściwym pod stałym ciśnieniem i w stałej objętości; } c_p = c_v = c).$$

Tablice cieplne dla wody nie zawierają średniego ciepła właściwego, a jedynie rzeczywiste ciepło właściwe. Łatwo zauważyć, że rzeczywiste ciepło właściwe wody w zakresie temperatury 273,15...323,15K (0...50°C) zmienia się wraz z temperaturą nieznacznie. Dlatego można przyjąć, że średnie ciepło właściwe jest równe rzeczywistemu ciepłu właściwemu w temperaturze średniej, czyli:

$$c \Big|_{273,15K (0^{\circ}C)}^t = c(t_{sr}), \quad a \quad t_{sr} = \frac{0+t}{2} = \frac{t}{2}. \quad (10)$$

W związku z tym jednostkową energię wewnętrzną wody oblicza się ze wzoru:

$$u = c(t_{sr}) \cdot t. \quad (11)$$

Po uwzględnieniu powyższych uproszczeń otrzymuje się ostatecznie, po prostych przekształceniach, wzór do obliczenia jednostkowej entalpii pary mokrej, płynącej rurociągiem:

$$i = \frac{m_2 c(0,5 \cdot tw_2) \cdot tw_2 - m_1 \cdot c(0,5 \cdot tw_1) \cdot tw_1}{m_2 - m_1}. \quad (12)$$

Entalpia ta, po podstawieniu do znanej zależności:

$$i = i' + x \cdot (i'' - i') = i' + x \cdot r, \quad (13)$$

pozwała wyznaczyć poszukiwany stopień suchości pary:

$$x = \frac{i - i'}{r}. \quad (14)$$

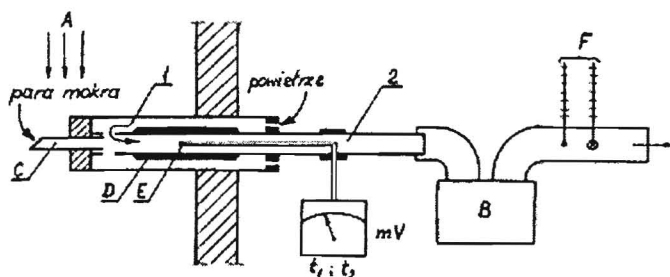
Metoda ta jest prosta, jeżeli chodzi o założenia. Charakteryzuje się szerokim zakresem pomiarowym i prostą konstrukcją urządzeń. Przy jej stosowaniu należy pamiętać, że ma także wady, do których należy zaliczyć: problem z prawidłowym i wystarczająco dokładnym określeniem pojemności cieplnej kalorymetru, zależność od wielu parametrów zmiennych w czasie, znaczne rozmiary urządzenia, praca okresowa, brak możliwości stosowania przy wysokich ciśnieniach.

1.7. Metody złożone [3,4]

• metoda Rögnera

H. Rögner opracował metodę określania stopnia suchości niskoprężnej pary mokrej, co jest szczególnie ważne w turbinach kondensacyjnych. Polega ona na mieszanii niskoprężnej pary mokrej z powietrzem atmosferycznym, a więc na procesie nawilżania powietrza parą mokrą. Pompa próżniowa zasysa z atmosfery powietrze o znanej wilgotności i parę z przewodu, a następnie – w wyniku wzmocnionego działania pompy – powietrze z niewielką domieszką pary mokrej dosasanej z turbiny przemieszczone jest do kanału pomiarowego. Wilgoć (woda) z dosasanej pary mokrej odparowuje do powietrza, co powoduje zwiększone zawilgocenie

powietrza X_2 , będące stosunkiem zwiększonej masy pary do masy suchego powietrza, które określa się przy ciśnieniu atmosferycznym za pomocą psychrometru, umieszczonego na wylocie pompy próżniowej.



Rys. 3. Schemat urządzenia pomiarowego Røgenera

Schemat urządzenia pomiarowego przedstawia rys. 3. Pompa próżniowa B, zasysająca powietrze atmosferyczne, dosysa – przez rurkę C – domieszkę pary mokrej z przestrzeni parowej A, powodując (w wyniku mieszania powietrza z parą) ochłodzenie powietrza o Δt oraz wzrost jego wilgotności o ΔX . Temperaturę powietrza mierzy termopara E, umieszczona w izolowanej rurce D, natomiast wilgotność określana jest psychrometrem F.

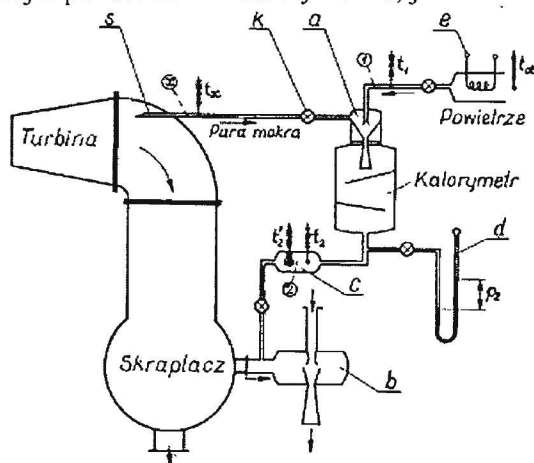
Jest to znany proces nawilżania powietrza parą mokrą, przy czym otrzymana mieszanina musi pozostać nienasycona, aby pomiar psychrometrem był jeszcze możliwy. Z tego powodu wielkość ΔX nie może być większa od ΔX_{max} . W praktyce przyrost wilgotności powietrza pozostaje mały ($\Delta X = 10 \dots 20$ g/kg), tak samo jak niewielki jest spadek temperatury ($\Delta t = 2 \dots 4$ K).

Wyniki pomiarów pozyskiwane przy wykorzystaniu tej metody są w znacznym stopniu uzależnione od drobnych, nieuniknionych wahań temperatury i zawilgocenia powietrza, a przy tym wykazują nadmiernie duży błąd względny. Określanie tą metodą stopnia suchości pary mokrej jest więc bardzo niedokładne. Należy zaznaczyć, że można ją stosować wyłącznie do pary niskoprężnej.

• metoda Kasprzyka

Metoda ta oparta jest, podobnie jak metoda Røgenera, na mieszanii pary mokrej z powietrzem, ale pod znacznie niższym ciśnieniem, co pozwala osiągnąć wielokrotnie większą dokładność wyników. Podstawę tej metody stanowi całkowicie odmienny schemat pomiarowy (rys.4). Para zasysana jest za pomocą samoczynnie działającego małego smoczka „a”, zabudowanego na wlocie do kalorymetru, zasilanego niewielkim strumieniem powietrza atmosferycznego. Powietrze

wraz z doszaną parą przepływa przez kalorymetr do przestrzeni, w której panuje podciśnienie wytworzone pod wpływem głównego smoczka „b”, usuwającego rutynowo ze skraplacza powietrze (szkodliwe) dostające się do niego przez nieuszczelności. Ilość powietrza przepływającego do smoczka „b” przez kalorymetr jest tak mała, że utrzymywanie właściwej próżni w skraplaczu jest zapewnione. Para mokra, zassana z turbiny do kalorymetru przez sondę „s” i przez kurek dławiący „k”, za pomocą smoczka „a”, miesza się w nim z powietrzem i przez psychrometr „c”, zabudowany na wylocie z kalorymetru, odpływa do smoczka „b”. Dzięki temu, że mieszanie pary mokrej z powietrzem w kalorymetrze, jak również pomiar zawilgocenia powietrza za kalorymetrem, przeprowadzane są przy ciśnieniu znacznie niższym od atmosferycznego, można osiągnąć wielokrotnie większe zawilgocenie powietrza X_2 niż przy ciśnieniu atmosferycznym, a w konsekwencji intensywnego odparowania wilgoci uzyskuje się też wielokrotnie większe ochłodzenie powietrza Δt , co oczywiście umożliwia osiągnięcie większej dokładności pomiaru.



Rys. 4. Schemat urządzenia pomiarowego Kasprzyka

$$X_{\max} = 0,622 \cdot \frac{p_s}{p - p_2}, \quad (15)$$

Z zależności (15) wynika, że ze spadkiem ciśnienia p następuje silny wzrost dopuszczalnego zawilgocenia $X_{\max}$, które może osiągnąć wartości z przedziału (100...300g/kg). Natomiast spadek temperatury powietrza dochodzi do (10...30K).

Strumień masy powietrza dopływającego do kalorymetru, określony minimalnym przekrojem przelotowym dyszy smoczka „a”, jest stały, gdyż stosunek ciśnienia p_2/p_1 jest niższy od krytycznego ($\beta = 0,53$), a strumień przepływu pary mokrej doszanej z turbiny można nastawiać za pomocą kurka dławiącego „k” tak, aby przy ruchu ustalonym osiągnąć pełne osuszenie pary zmieszanej z powietrzem oraz nieznaczne jej przegrzanie.

Do kontroli wilgotności powietrza X_2 u wylotu z kalorymetru służy psychrometr próżniowy „c”, składający się z termometru suchego t_2 i mokrego t'_2 . Wypo-

sażony on jest również w czujnik do pomiaru ciśnienia bezwzględnego p_2 . Temperatura t_{ot} powietrza doprowadzonego do kalorymetru powinna być dostatecznie wysoka, aby zapewnić pełne odparowanie wilgoci z domieszki pary mokrej. W tym celu zastosowano wstępne podgrzewanie powietrza z otoczenia za pomocą małego elektrycznego podgrzewacza „e”. Temperatura powietrza t_1 na wlocie osiąga wartość 303,15...313,15 K (30...40°C).

Dla uzyskania zależności na wilgotność pary x przeprowadza się bilans masowy i energetyczny kalorymetru. Izolacja kalorymetru jest tak staranna, że wymianę ciepła z otoczeniem można pominąć. Zakłada się również, że energia kinetyczna strumieni na dopływie i odpływie kalorymetru jest w przybliżeniu taka sama, tak że nie trzeba jej różnicy uwzględniać w bilansie energii. Zatem kalorymetr stanowi otwarty system adiabatyczny, w którym następuje proces nawilżania powietrza przy użyciu nasyconej pary mokrej.

Za podstawę bilansu przyjmuje się schemat przedstawiony na rys. 4. Zakłada się także, że przepływ powietrza i pary przez kalorymetr jest ustalony, a wówczas:

- z bilansu masowego wynika, że

$$m_p / m_g = X_2 - X_1 = \Delta X_k, \quad (16)$$

gdzie: m_p – masa pary, m_g – masa powietrza, X_1 – wilgotność powietrza na wlocie do kalorymetru, X_2 – wilgotność powietrza na wylocie z kalorymetru,

- entalpię powietrza wilgotnego określają równania

$$i_{1+x_1} = c_{pg} \cdot t_1 + (r_o + c_{pp} \cdot t_1) \cdot X_1, \quad (17)$$

$$i_{1+x_2} = c_{pg} \cdot t_2 + (r_o + c_{pp} \cdot t_2) \cdot X_2, \quad (18)$$

gdzie: c_{pg} – ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu, c_{pp} – ciepło właściwe pary przy stałym ciśnieniu, t_1 – temperatura powietrza na dolocie do kalorymetru, t_2 – temperatura powietrza na wylocie z kalorymetru, r_o – utajone ciepło parowania;

- z równania bilansu energetycznego kalorymetru

$$\Delta X_k i_x = i_{1+X_2} - i_{1+X_1}, \quad (19)$$

wynika, że

$$i_x = \frac{i_{1+X_2} - i_{1+X_1}}{\Delta X_k}. \quad (20)$$

Po wstawieniu równań: (17) i (18) do równania (20), otrzymuje się

$$i_x'' = r_o + c_{pp} \cdot t_2 - \frac{(c_{pg} + c_{pp} \cdot X_1)(t_1 - t_2)}{\Delta X_k} \quad (21)$$

Równanie (20) stanowi podstawę do określenia poszukiwanej entalpii pary mokrej na podstawie danych pomiarowych.

Natomiast stopień wilgotności pary mokrej możemy wyznaczyć ze wzoru:

$$1 - x = \frac{i_x'' - i_x}{r_x} \quad (21)$$

Jeżeli entalpię pary nasyconej przy ciśnieniu dolotowym p_x określi się ze wzoru:

$$i_x'' = r_o + c_{pp} \cdot t_x, \quad (22)$$

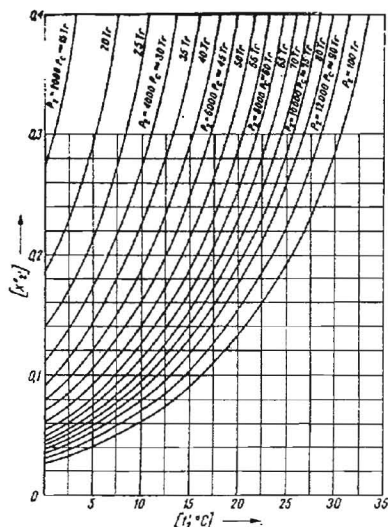
to wówczas otrzymuje się:

$$1 - x = \frac{1}{r_x} \left((t_x - t_2)c_{pp} + \frac{c_{pg} + c_{pp} \cdot X_1}{\Delta X_k} (t_1 - t_2) \right), \quad (23)$$

Pomiar temperatury: t_1 i t_2 nie nastręcza większych trudności, a pomiar stopnia nawilżenia X_1 powietrza dolotowego może być równie łatwo przeprowadzony przy pomocy psychrometru. Natomiast określenie wskaźnika X_2 w warunkach obniżonego ciśnienia p_2 u wylotu z kalorymetru wymaga dokładniejszej analizy. Jest to bowiem szczególnie bardzo istotny. Ponieważ prędkość wylotowa powietrza z kalorymetru w okolicach termometru mokrego jest stosunkowo duża (około 20 m/s), to para osiąga w powietrzu stan nasycenia. Stopień zwilżenia X_2 można wówczas określić ze wzoru:

$$X_2 = X_2'' = \frac{0,622}{\frac{p_2}{p_2''} - 1}, \quad (24)$$

parametr $X_2'' = f(t_2', p_2)$ przedstawiono powyżej w formie wykresu.



Z założenia $t_2 > t_2'$ oraz psychrometrycznego spadku temperatury $\Delta t_2 = t_2 - t_2'$ wynika dodatkowa wilgoć $\Delta X_2 = X_2'' - X_2$ z odparowania z koszulki otaczającej mokry termometr.

Z bilansu energetycznego wody na drodze od termometru suchego do mokrego otrzymuje się:

$$\Delta X_2 r_2' = (c_{pg} + c_{pp} \cdot X_2) \Delta t_2, \quad (25)$$

i na tej podstawie z bilansu masowego otrzymuje się:

$$X_2 = X_2'' - \Delta X_2 = X_2'' - \frac{c_{pg} + c_{pp} X_2}{r_2} \Delta t_2. \quad (26)$$

Wartość ΔX_2 jest znikomo mała w porównaniu z $\Delta X_2''$. W praktyce będzie się ona zawierać w granicach tolerancji pomiaru i będzie ją można zupełnie pominąć, zakładając $X_2 = X_2'' - \Delta X_2 \approx X_2''$.

W rezultacie, by określić entalpię i_x oraz stopień suchości x pary mokrej metodą Kasprzyka mierzy się następujące parametry:

- temperaturę: t_1 i t_2 powietrza na dopływie do kalorymetru i wylocie z niego – w celu określenia ochłodzenia $\Delta t_k = t_1 - t_2$,
- temperaturę t_2' termometru mokrego na wylocie z kalorymetru – w celu określenia cząstkowego ciśnienia p_2'' , pary nasyconej,
- bezwzględne ciśnienie p_2 na wylocie z kalorymetru – w celu określenia stosunku p_2/p_2'' , jak również stopnia zawilżenia $X_2'' \approx X_2$ powietrza dowilżonego,
- stopień zawilżenia X_1 powietrza dolotowego z otoczenia,
- temperaturę t_x zassanej z turbiny pary mokrej, aby dla odpowiadającego jej ciśnienia p_x wyznaczyć stopień suchości x .

Ograniczenia tej metody polegają głównie na wysokim stopniu złożoności konstrukcji, zastosowaniu ograniczonym do pary niskoprężnej.

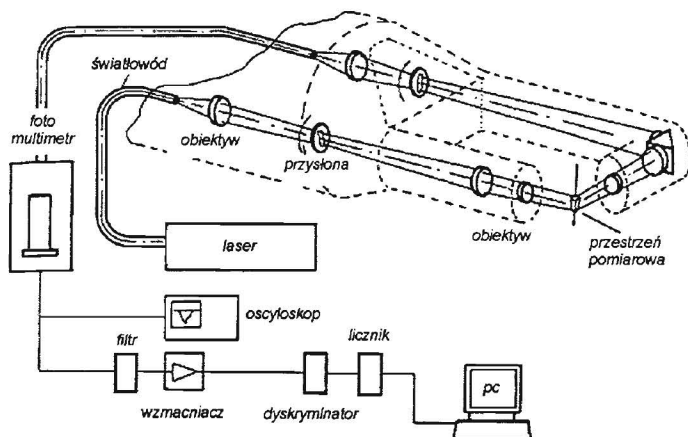
1.8. Metody fotometryczne

Metody te opierają się na badaniach przepływu mieszanin dwufazowych w przezroczystych kanałach. Pomiary polegają na określeniu stopnia rozproszenia światła na cząstkach fazy ciekłej, pomiarze absorpcji światła i wizualnym oszacowaniu struktury przepływu.

- **metoda (D. Bohn, K. Holzenthal)[2]**

Technika pomiaru polega na wyznaczeniu ilości i rozmiaru kroplel fazy ciekłej w parze, wykorzystując rozproszenie światła na tychże kroplach. Budowę urządzenia przedstawia rys. 5. Wiązka światła laserowego, przechodząc przez układ optyczny, zostaje skierowana na przestrzeń pomiarową. Pojawienie się w przestrzeni pomiarowej kroplel wody powoduje rozproszenie światła wiązki lasera na skutek dyfrakcji, refrakcji i odbicia promieni świetlnych na kroplach wody. Stopień rozproszenia światła jest miarą wielkości i ilości kroplel wody, znajdujących się w przestrzeni pomiarowej. Zależności wiążące rozproszenie światła z wielkością i liczbą kroplel w przestrzeni pomiarowej wyznaczyć można za pomocą odpowiedniej teorii. Dodatkowo konieczne jest przeprowadzenie kalibracji pomiarów dokonywanych przy pomocy tej metody.

Światło po stronie odbiorczej urządzenia przechodzi przez system soczewek, pryzmat, szczelinę i światłowodem kierowane jest do urządzenia przetwarzającego sygnał świetlny na sygnał napięciowy. Po odpowiednim wzmacnieniu impulsy sygnałów napięciowych zostają dyskretyzowane, a następnie sklasyfikowane według określonych progów. Taki ściśle określony rozkład amplitud impulsów zostaje przeniesiony do komputera i przetworzony na rozmiar i rozkład kroplel wody w badanym ośrodku.



Rys. 5. Urządzenie pomiarowe wykorzystujące metodę optyczną (D. Bohn, K. Holzenthal)

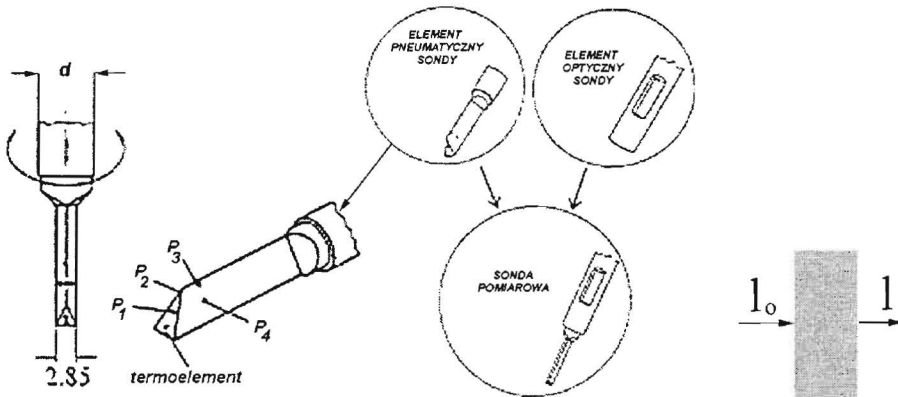
Objętość przestrzeni pomiarowej wykorzystywanej do pomiaru wielkości i koncentracji kroplel powinna być dobrana odpowiednio do ich spodziewanej

wielkości. Małe i wysokie krople wymagają małej objętości pomiarowej, a duże i niskie krople wymagają dużej objętości pomiarowej.

Zasadniczym ograniczeniem większości metod optycznych, a więc również i tej metody, jest brak możliwości zastosowania w przypadkach występowania struktur złożonych, w których rdzeniu może wystąpić przepływ dyspersyjny (np. pierścieniowych, smugowo – pierścieniowych).

• **metoda pneumatyczno – optyczna (M. Renner, H. Stetter, X.-S. Cai)[5]**

Jest to metoda składająca się z części pneumatycznej i optycznej. Część pneumatyczna wykorzystuje otworowo-krawędziową sondę. Część optyczna pomiaru polega na wykorzystaniu zjawiska wygaszania światła. Zjawisko to może być przydatne dla wyznaczenia rozmiaru, rozmieszczenia i koncentracji kropeł. W przypadku, gdy krople tworzą mgłę i prędkość pary mierzy się metodą pneumatyczną, prędkość kropeł można przyjąć za prędkość mieszaniny.



Rys. 6. Pneumatyczno – optyczna sonda pomiarowa

Rys. 6a. Zmiana intensywności światła

Pneumatyczna sonda jest opracowana w sposób, który w niewielkim stopniu wprowadza zaburzenia w przepływie. Taki kształt jest właściwy dla przepływów o dużych liczbach Macha. W głowicy pomiarowej zintegrowany jest czujnik pomiarowy temperatury. Układ jest zbudowany w taki sposób, że zabezpiecza system optyczny przed wysoką temperaturą. Maksymalna temperatura, przy jakiej może pracować głowica pomiarowa, wynosi 373 K.

Rysunek 6a schematycznie pokazuje, jak zostaje osłabiona intensywność światła, na skutek rozproszenia na kroplach fazy ciekłej, przechodzącego przez

obszar pomiarowy sondy optycznej. Zasadę tę można wykorzystywać również w przypadku, gdy wielkość obszaru pomiarowego jest bardzo mała.

Stosunek intensywności światła wnikającego i intensywności światła wychodzącego z obszaru pomiarowego może być opisany przez prawo Beera – Lamberta:

$$\ln(I/I_0) = -\frac{\pi}{4} L \int_0^\infty N(D) D^2 E(\lambda, m, D) dD, \quad (27)$$

gdzie:

L – mierzona grubość warstwy kropeł,

$N(D)$ – wielkość obszaru rozmieszczenia kropeł,

E – współczynnik rozproszenia światła, który jest funkcją kąta padania λ , rozmiaru mierzonych kropeł D i względnego współczynnika załamania światła na kropkach.

Może on być wyznaczony przy pomocy teorii Miesa [8]. Rozwiązanie powyższego równania i modelu możemy znaleźć w pracy [7]. Wykazał on, że człon $N(D)$ można zapisać jako funkcję parametrów: $N(D, \overline{D}, k)$, określaną mianem funkcji Rossiniego – Rammlera.

Biorąc pod uwagę składniki powyższego równania i mierząc rozmiar kropeł dla różnych wartości monochromatycznego światła, otrzymano równanie:

$$\ln(I/I_0) = -\frac{\pi}{4} L \int_0^\infty D^2 N(D, \overline{D}, k) E(\lambda_i, m, D) dD \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (28)$$

które można zapisać w następujący sposób:

$$\frac{\ln(I/I_0)_i}{\ln(I/I_0)_j} = \frac{\int_0^\infty D^2 N(D, \overline{D}, k) E(\lambda_i, m, D) dD}{\int_0^\infty D^2 N(D, \overline{D}, k) E(\lambda_j, m, D) dD} \quad (29)$$

$i \neq j$

Rozwiązując je z optymalizacją algorytmu można określić $N(D, \overline{D}, k)$ [7].

W turbinach parowych można spodziewać się kropeł o różnych wielkościach i różnym rozproszeniu. W związku z tym, rozwiązaniem równania, z uwzględnieniem kilku wartości λ_i , jest przybliżone rozwiązanie metodą numeryczną:

$$\ln(I/I_0) = -\frac{\pi}{4} L \sum_{j=1}^n N(\Delta D_j) D_j^2 E(\lambda_i, m, D_j) \Delta D_j, \quad (30)$$

gdzie $N(\Delta D_j)$ jest liczbą kropeł w jednostce objętości D_j . To równanie jest rozwiązywane przy pomocy algorytmu PMLNLS [7].

Wilgotność pary jest definiowana jako:

$$Y = \frac{V_w \rho_w}{V_w \rho_w + (1 - V_w) \rho_s}, \quad (31)$$

gdzie:

V_w, ρ_w – objętość i gęstość wody,

ρ_s – gęstość pary,

Parametr V_w można wyznaczyć wykorzystując wzór:

$$V_w = -\frac{\pi}{6} \int_0^\infty N(D, \bar{D}, k) D^3 dD. \quad (32)$$

W przypadku przedstawionej wyżej metody, poza ograniczeniami charakterystycznymi dla metod optycznych opisanych poprzednio, jest jeszcze temperatura pracy głowicy (373 K), która eliminuje tę metodę w odniesieniu do pomiaru stopnia suchości pary wodnej, z wyjątkiem pary niskoprężnej

• **metoda pomiaru wilgotności przez pomiar zasolenia**[9]

Metoda oparta jest na pomiarze zasolenia wilgotnej pary i wody. Jeżeli wyznaczanie przeprowadza się metodą pomiaru zasolenia solą o niskiej rozpuszczalności w parze, to wilgotność pary może być wyznaczona na podstawie wzoru:

$$(1 - x) = \frac{c_{wp}}{c_w} \quad (33)$$

gdzie: c_{wp} – koncentracja soli w wilgotnej parze [mg], c_w – koncentracja soli w wodzie [kg]. Przy wysokim ciśnieniu, kiedy znacząca staje się rozpuszczalność soli w suchej nasyconej parze, niezbędne staje się wprowadzenie współczynnika poprawkowego α

$$(1 - x) = \frac{\frac{c_{wp}}{c_w} - \alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = \frac{c_p}{c_w} \quad (34)$$

α – współczynnik rozdzielenia dla danej substancji odnośnie do masowych koncentracji w parze suchej c_p w wodzie c_w .

W związku z tym, że we współczesnych urządzeniach parowych poziom zasolenia czynnika jest niski, wyznaczanie wilgotności przez wyznaczanie zawartości jonów swobodnych w wodzie i w parze jest znacznie utrudnione.

Wnioski

W większości przypadków, metody identyfikacji charakteru przepływu nasyconej pary wodnej i związanego z nim pomiaru stopnia suchości lub stopnia zapełnienia, charakteryzują się szeregiem ograniczeń. Zasadniczy problem tkwi w tym, że pomiary te, jeżeli są stosunkowo proste i dają zadowalające wyniki pod kątem ich zgodności z rzeczywistością, mają bardzo wąski zakres zastosowania. Inne metody pomiaru, charakteryzujące się większym zakresem pomiarowym i dające dokładniejsze wyniki, wymagają skomplikowanych, rozbudowanych i kosztownych stanowisk pomiarowych, a zatem zakres stosowalności tych metod jest obwarowany wieloma ograniczeniami.

Jeżeli rozważymy przedstawione metody pod względem możliwości zastosowania w przepływach dwufazowych pary wodnej, w których należy brać pod uwagę takie parametry, takie jak ciśnienie i temperatura, to paleta możliwych do zastosowania metod zostaje zawężona do kilku. Zasady większości z nich opierają się na kalorymetrowaniu. Jednakże nie ma możliwości ich szerokiego zastosowania w praktyce, z powodu pewnych ich ograniczeń.

LITERATURA

1. Bohdal T.: Pomiary stopnia zapełnienia czynnika w kanale, Chłodnictwo, tom XXVII 1992 r., nr 6.
2. Bohn D., Holzenthal K.: Measurement of The Wetness Fraction and Droplet Size Distribution in A Condensation Turbine, 2-nd European Conference of Turbomachinery – Fluid Dynamics and Thermodynamics, Antwerpia, Marzec 1997.
3. Jasiński W., Ciesliński J., Diłaj P., Madaj T., Rogowski M.: Termodynamika, wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1990.
4. Kasprzyk S.: Kalorymetr do określania stanu niskoprężnej pary mokrej u wylotu turbiny kondensacyjnej, Archiwum Budowy Maszyn, Tom X, Zeszyt 4, 1963.
5. Renner M., Stetter H., Cai X. S.: Flow Field and Wetness Measurement in a Condensation Steam Turbine by using a Combined Pneumatic – Optical Probe, Modeling and Design in Fluid-Flow Machinery 1997, J. Badur, J. Mikieliewicz, Z. Balicki, E. Śliwicki, (Editors), Wydawnictwo IMP PAN.

6. Rögener H.: Versuche zur Bestimmung der Abdampfnässe bei Kondensationsturbinen, Brennstoff, Wärme, Kraft“, Bd. 11 (1959), No 5, s. 216.
7. Cai X., S.: Theoretical and Experimental Study of the Light Extinction Method for Particle Sizing and its Application in wet Steam Measurement, Dissertation, Shanghai Institute of Mechanical Engineering, Shanghai, China 1991.
8. Kreker M.: The Scattering of Light, Academic Press, New York, USA, 1969,
9. Исаченко В.П.: Теплобмен при конденсации, ЭНЕРГИЯ, Москва 1977.

SELECTED METHODS OF STEAM WATER TWO PHASE FLOWS IDENTIFICATION

Abstract: The paper presents a general reviews of two-phase – flows characteristics with respect to steam quality. Analysis of some selected methods for use is also presented.

Keywords: steam, steam quality, two phase flow, measurement, steam quality

Pracę wykonano w ramach realizacji pracy statutowej S/WM/02/01.

Krzysztof Jaworek¹, Mariusz Bogdan²

KOMPRESJA I KODOWANIE SYGNAŁÓW BIOMECHANICZNYCH

Streszczenie: W pracy przedstawiono i omówiono wybrane problemy związane z wykorzystaniem współczesnych dalekosiężnych łącz telekomunikacyjnych, które dotyczą przesyłania i ochrony przed zakłóceniami sygnałów biomechanicznych pochodzących z głównych zespołów mięśniowych kończyn dolnych astronautów.

Do przesyłania sygnałów biomechanicznych zastosowano kompresję falkową i kodowanie kodem Hamminga.

Słowa kluczowe: kompresja stratna, współczynniki DWT, dekompozycja, progowanie, rekonstrukcja, współczynniki jakości kompresji, kodowanie, kod Hamminga

Wprowadzenie

Wykorzystane w niniejszej pracy sygnały biomechaniczne uzyskano w wyniku badań nad lokomocją dwunożną człowieka w ruchu płaskim. Są one wynikiem pomiaru mocy chwilowych rozwijanych przez zespoły mięśniowe kończyn dolnych człowieka. Pomiaru dokonano dla trzech stawów: biodrowego, kolanowego i skokowego u osób bez upośledzenia narządu ruchu. Wartości mocy chwilowych znormalizowano do masy ciała badanego człowieka.

¹ Zespół diagnostycznego przetwarzania sygnałów biomechanicznych, Katedra Automatyki i Diagnostyki: Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 C, 15–351 Białystok,

² Absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej (spec. systemy informatyczne w automatyce i diagnostyce – rocznik 2004).

Sygnaly biomechaniczne niosą informacje, które odpowiednio zinterpretowane mogą dawać wymierne korzyści, np. mogą być podstawą do poprawnego opisu chodu człowieka lub też dostarczać przesłanek do wykrycia czynników wpływających na ruch człowieka. Dane pomiarowe będą przesyłane na znaczne odległości, dlatego dążność do minimalizacji zapisu (kompresji) jest jak najbardziej naturalna. Stąd uzyskana reprezentacja powinna wydobywać określone cechy charakterystyczne biosygnalów, aby stanowić wiarygodne źródło informacji o badanym zjawisku. Dlatego zdecydowano się na kompresję falkową i kodowanie z korekcją błędów (zastosowano kod Hamminga [5]). Falki znajdują zastosowanie w coraz to nowszych dziedzinach. Są one bardzo użyteczne w analizie sygnałów i biosygnalów. Szczególna uwaga zostanie jednak zwrócona na zagadnienia związane z kompresją. Opisany zostanie interfejs graficzny „Wavelet 1-D” [4], przeznaczony do wielorozdzielczej (dyskretnej) analizy falkowej sygnałów jednowymiarowych pod kątem kompresji rozpatrywanych sygnałów biomechanicznych. Proponuje się także formę kodowania skompresowanych współczynników falkowych przeznaczoną do dalekosiężnych transmisji radiowych.

I. Kompresja

W technice kompresji falkowej dopuszczamy pewną stratę informacji (kompresja stratna). Dane, które zostały skompresowane, różnią się po dekompresji od danych pierwotnych. W zamian za dopuszczenie do zniekształceń otrzymujemy zazwyczaj lepszy stopień kompresji niż w przypadku kompresji bezstratnej. Zniekształcenia wynikają w tym wypadku z pewnego uproszczenia i założenia, że sygnał może być reprezentowany przez zmniejszoną liczbę współczynników aproksymacji (na odpowiednio dobranym poziomie) i zmniejszoną liczbę współczynników detali. Innymi słowy pozbedziemy się niektórych, nieistotnych z punktu widzenia rekonstrukcji sygnału, współczynników DWT (ang. discrete wavelet transform). Procedura kompresji składa się z trzech kroków:

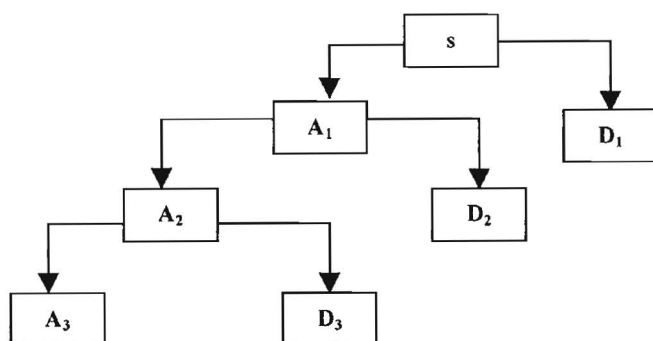
- dekompozycji sygnału,
- eliminacji progowej,
- rekonstrukcji.

I.1. Dekompozycja sygnału

Pierwszym krokiem do dekompozycji jest wybór falki, za pomocą której chcemy dokonać rozkładu sygnału. Na ogół im bardziej postać falki przypomina

kształt obrabianego sygnału, tym rezultaty przeprowadzonej kompresji są lepsze. Problem polega na odpowiednim doborze bazy falkowej (zbudowanej z wcześniej „wybranej” falki podstawowej), tak aby stopień podobieństwa sygnału był z jak najmniejszą liczbą falek bazowych. Dekompozycja jest niczym innym jak rozłożeniem sygnału na zespół falek bazowych, zatem pożądanym jest, aby przebiegi tych sygnałów były jak najbardziej podobne.

Na poniższym rysunku pokazano trójpoziomową dekompozycję. Sygnał s „rozpada” się na składową, zwaną aproksymacją, będącą reprezentacją sygnału o mniejszej rozdzielczości, i składową, zwaną detalem, opisującą szczegóły sygnału.



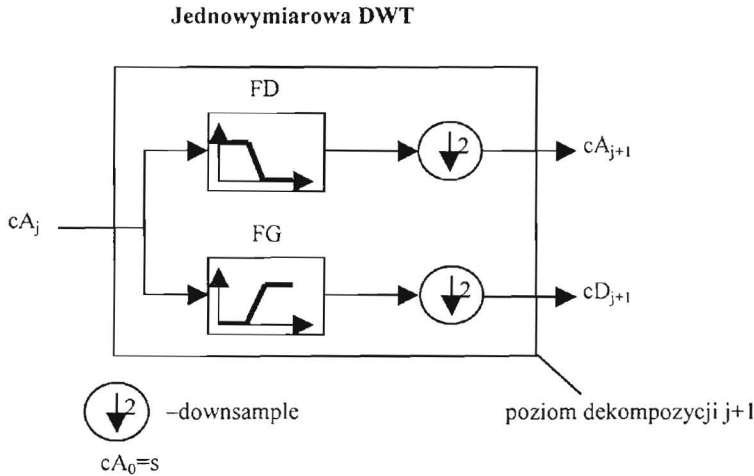
Rys. 1. Drzewo dekompozycji sygnału wg [1,4]

Na podstawie rys. 1 można stwierdzić, że sygnał oryginalny możemy odtworzyć na podstawie aproksymacji najniższego poziomu i wszystkich detali występujących w rozwinięciu ($s = A_3 + D_3 + D_2 + D_1$). Rola detali w reprezentacji maleje wraz ze zwiększaniem poziomu rozwinięcia. Zauważyć można, że proces dekompozycji sygnału jest procesem iteracyjnym wielopoziomowym, przy czym kolejne aproksymacje podlegają kolejnej dekompozycji. W ten sposób sygnał zostaje rozłożony na wiele składowych o mniejszej rozdzielczości.

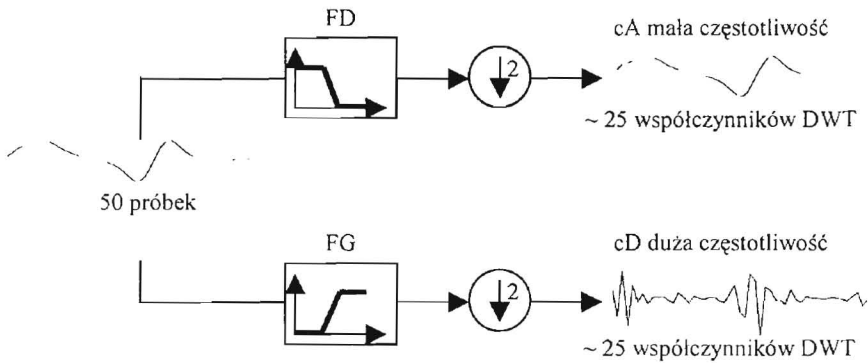
Implementacja dekompozycji w „Wavelet Toolbox” [4] sprowadza się do algorytmu wykorzystującego zespół filtrów: dolnoprzepustowy (FD) i górnoprzepustowy (FG) – przedstawiony na rysunku nr 2.

Sygnał (na rys. 2 cA_0) po jednopoziomowej dekompozycji „rozpada” się na dwie składowe: składową, zwaną aproksymacją (cA_{j+1}) i składową zwaną detalem (cD_{j+1}) – dekompozycja jednopoziomowa ($j=0$). Dekompozycja wielopoziomowa jest krotnością dekompozycji jednopoziomowej: dalszej dekompozycji ulega aproksymacja (cA_{j+1}) będąca reprezentacją zgrubną badanego sygnału; na każdym poziomie zmniejszamy dwukrotnie liczbę jego próbek (operacja *dawnsample* –

rys. 2). Usunięcie „w przybliżeniu” co drugiej próbki nie wnosi modyfikacji w przenoszoną informację.



Rys. 2. Jednowymiarowa dekompozycja sygnału przy użyciu filtrów wg [4]



Rys. 3. Jednopoziomowa dekompozycja sygnału dla stawu biodrowego przy użyciu filtrów wg [1,4]

I.2. Progowanie

Progowanie jest operacją mającą na celu wyeliminowanie (w praktyce wyzerowanie) współczynników falkowych, których wartość bezwzględna jest mniejsza od wartości ustalonego progu. Ma to decydujący wpływ na parametry jakości

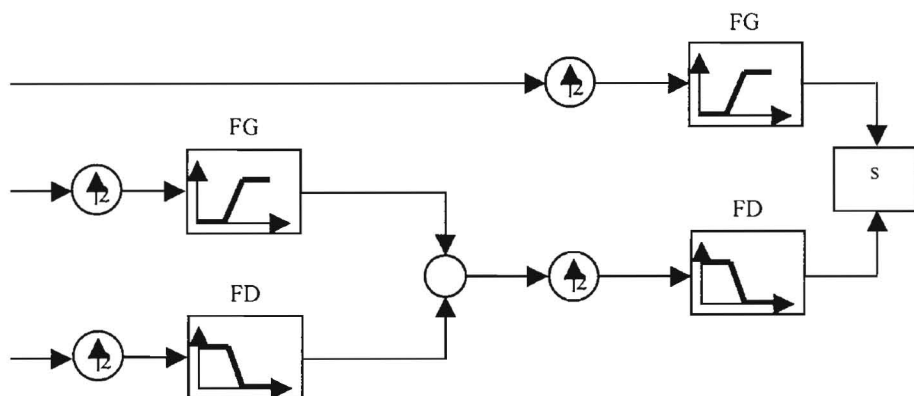
kompresji: energię zachowanego sygnału (falki ortogonalne), stosunek energii (falki biortogonalne) – (miara podobieństwa sygnałów) i liczbę wyzerowanych współczynników (miara stopnia kompresji). W „Wavelet-1D” mamy dwa tryby ustalania wartości progu:

- global thresholding – automatycznie ustawiana wartość progu na wszystkich poziomach z podopcjami:
 - remove near 0 – odrzucenie współczynników, których wartość jest bliska 0,
 - balance sparsity–norm – metoda doświadczalna (automatyczna) określenia wartości progu, kompromis pomiędzy liczbą wyzerowanych współczynników a miarą podobieństwa sygnałów,
- by level thresholding – manualny dobór progu na każdym poziomie rozwinięcia.

W ramach powyższych trybów pracy istnieje możliwość ustawiania progu w określonym zakresie (scarce high, scarce medium, scarce low, remove near 0, balance sparsity–norm).

1.3. Rekonstrukcja

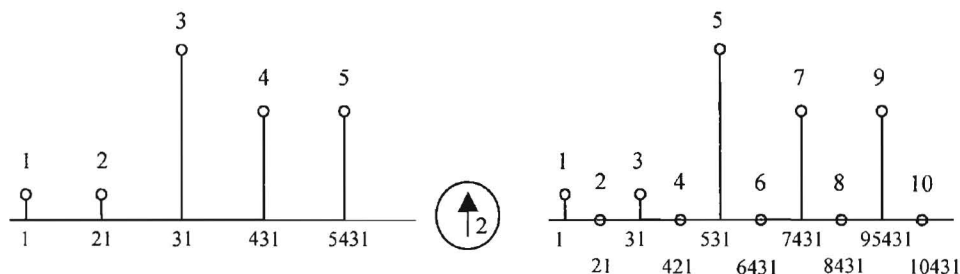
Rekonstrukcja jest procesem odwrotnym do procesu dekompozycji. Polega ona na złożeniu sygnału z aproksymacji najniższego rzędu i detali każdego poziomu, określonych za pomocą współczynników falkowych.



Rys. 4. Rekonstrukcja sygnału na podstawie jego współczynników falkowych wg [1,4]

W procesie rekonstrukcji dokonujemy operacji zwiększenia częstotliwości po przez wprowadzenie zer pomiędzy próbkami (operacja upsampling [4]– rys. 4) na każdym poziomie rozdzielczości. Następnie sygnały są filtrowane: filtrem dolno-

przepustowym (FD) i filtrem górnoprzepustowym (FG), po czym następuje operacja sumowania odpowiednich składowych.



Rys. 5. Składowa sygnału poddana operacji podwojenia częstotliwości

2. Prezentacja i omówienie wyników kompresji

Kompresji dokonano w „Wavelet Toolbox” w dostępnym interfejsie graficznym „Wavelet 1-D” przeznaczonym do analizy sygnałów dyskretnych jednowymiarowych.

Analizy dokonano dla różnych rodzin falek (na różnych rzędach) dostępnych w „Wavelet Toolbox”[4]. Brano pod uwagę dwa parametry jakości kompresji. Pierwszy określa liczbę wyzerowanych współczynników falkowych. Drugim parametrem dla falek ortogonalnych jest zachowana energia (ang. retained energy [%]). W przypadku falek biortogonalnych posługujemy się pojęciem stosunku energii (ang. energy ratio [%]) i parametrem „dostrajającym”, zwanym (ang. norm cfs recovery)[4]. Różnice w opisie tych parametrów wynikają z charakteru falek biortogonalnych, które wymagają „dwóch” falek (jednej do rozkładu sygnału, drugiej do jego rekonstrukcji). Oznacza to, że dekompozycja sygnału dokonywana jest w jednej bazie falkowej, natomiast rekonstrukcja w drugiej.

Prezentacja wyników kompresji

metoda progowania: balance sparsity–norm

falka: daubechies [2db7]

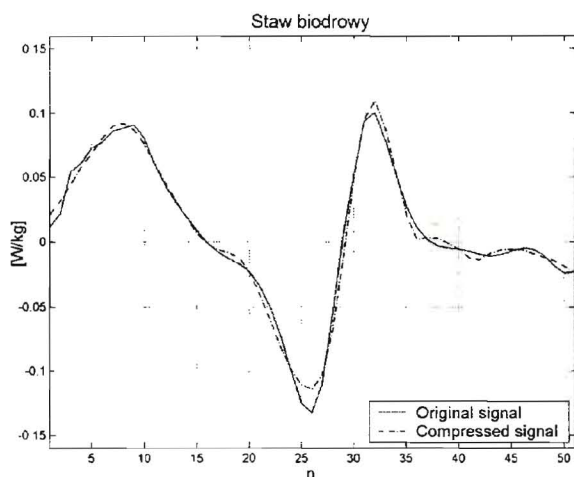
poziom dekompozycji: 2

rzęd: 7

zachowana energia– 99.50[%]

eliminacja współczynników:

71.05% – [54/76]–[wyzerowanych współczynników / do całkowitej ich liczby]



Rys. 6. Staw biodrowy – porównanie przebiegów sygnału biomechanicznego [2dbf7]

metoda progowania: balance sparsity–norm

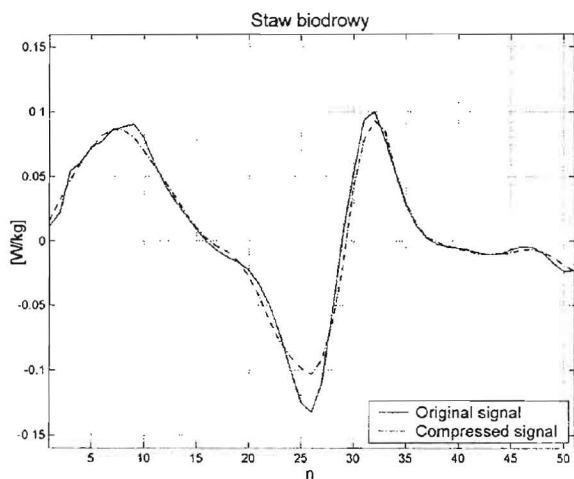
falka: biorthogonal [2bior3.1]

poziom dekompozycji: 2

rzęd: 3.1

stosunek energii– 99.16[%]

eliminacja współczynników: 73.68% – [42/57]



Rys. 7. Staw biodrowy – porównanie przebiegów sygnału biomechanicznego[2bior3.1]

metoda progowania: balance sparsity–norm

falka: daubechies [2db7]

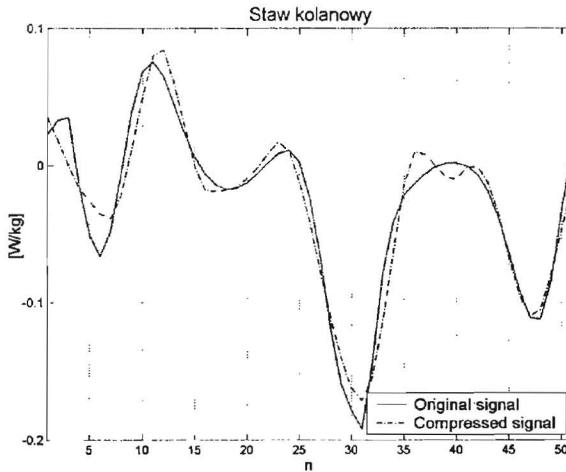
poziom dekompozycji: 2

rzęd: 7

zachowana energia– 91.88[%]

eliminacja współczynników:

71.05% – [54/76]–[wyzerowanych współczynników / do całkowitej ich ilości]



Rys. 8. Staw kolanowy – porównanie przebiegów sygnału biomechanicznego[2db7]

metoda progowania: balance sparsity–norm

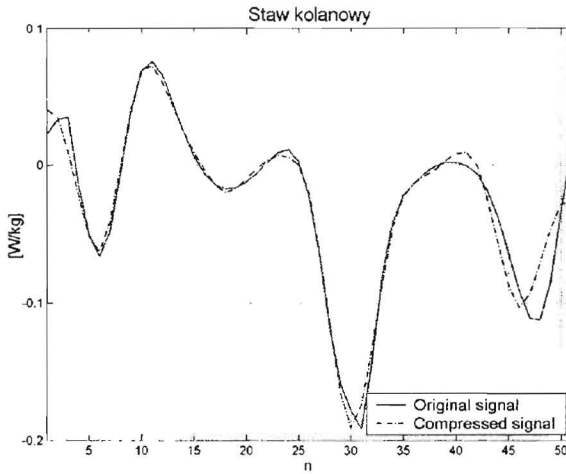
falka: biorthogonal [2bior5.5]

poziom dekompozycji: 2

rzęd: 5.5

stosunek energii– 94.98[%]

eliminacja współczynników: 71.23% – [52/73]



Rys. 9. Staw kolanowy – porównanie przebiegów sygnału biomechanicznego[2bior5.5]

metoda progowania: balance sparsity–norm

falka: daubechies [2db6]

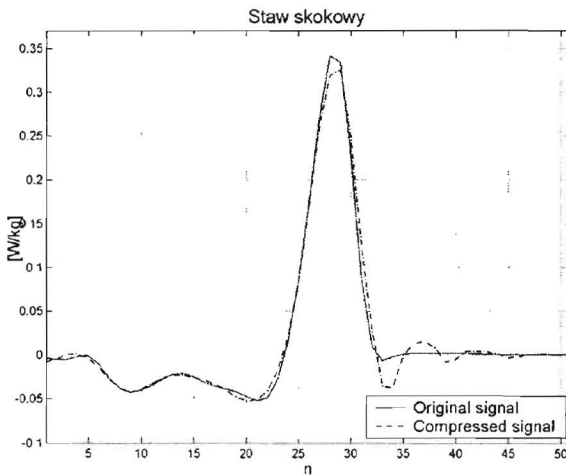
poziom dekompozycji: 2

rząd: 6

zachowana energia– 98.53 [%]

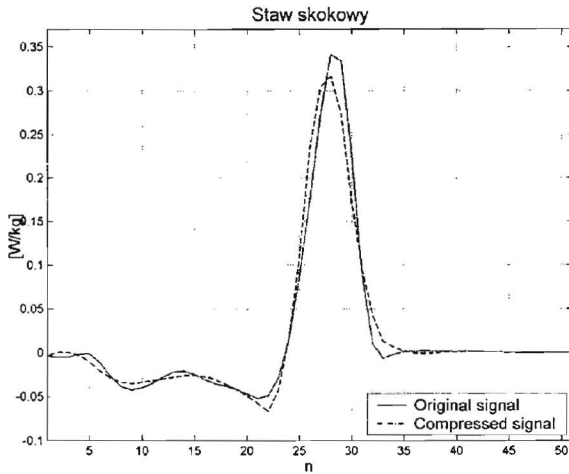
eliminacja współczynników:

71.23% – [52/73]–[wyzerowanych współczynników / do całkowitej ich liczby]



Rys. 10. Staw skokowy – porównanie przebiegów sygnału biomechanicznego[2db6]

metoda progowania: balance sparsity–norm
falka: biorthogonal [2bior3.5]
poziom dekompozycji: 2
rzęd: 3.5
stosunek energii– 94.45[%]
eliminacja współczynników: 71.23% – [52/73]



Rys. 11. Staw skokowy – porównanie przebiegów sygnału biomechanicznego [2bior3.5]

We wszystkich przypadkach wybrano metodę progowania „balance sparsity–norm”, czyli automatycznego ustalenia wartości progu dla wszystkich detali rozwinięcia i aproksymacji sygnału najniższego poziomu. Algorytm w szacowaniu wartości progu bierze pod uwagę współczynniki jakości kompresji, dzięki czemu sygnał reprezentowany jest przez stosunkowo małą liczbę współczynników falkowych przy jednoczesnym zachowaniu podobieństwa do sygnału oryginalnego (procentowo duża wartość zachowanej energii – falki ortogonalne lub stosunku energii – falki biortogonalne). Ocena wizualna również pozwala stwierdzić, że sygnały skompresowane zachowują cechy charakterystyczne przebiegów źródłowych. Najlepsze wyniki dają dwie rodziny falek: biorthogonal i daubechies na drugim poziomie rozwinięcia. Dalsza dekompozycja nie wpływa na jakość kompresji. W zestawieniu wyników celowo pominięto parametr „dostrajający” (ang. norm cfs recovery), gdyż z założenia musi on mieć wysoką wartość, ażeby parametr stosunku energii (miary podobieństwa sygnału oryginalnego i skompresowanego) wahał się w granicach 90–100%.

3. Kodowanie i korekcja błędów metodą Hamminga

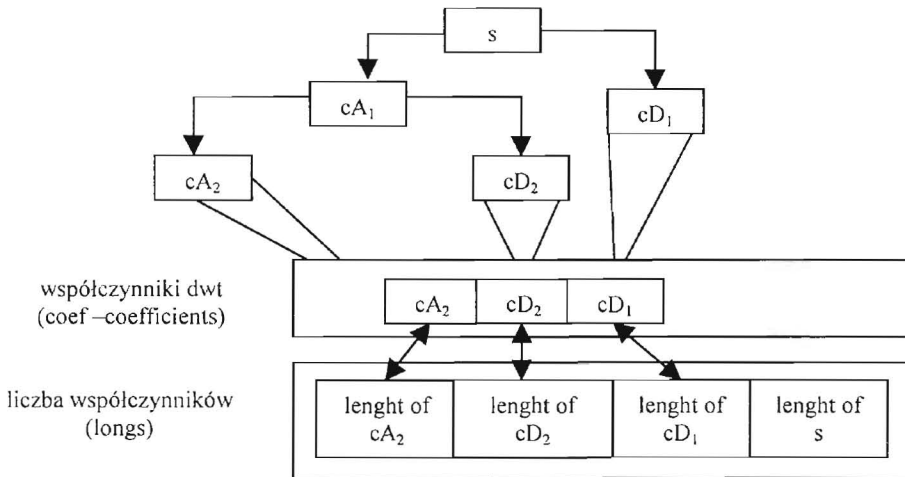
W związku z tym, że skompresowane współczynniki falkowe sygnałów biomechanicznych będą przesyłane na znaczne odległości (dalekosiężna transmisja radiowa), należy zakodować z możliwością korekcji błędów, czyli uodpornić w pewnym stopniu przed zakłóceniami. Zdecydowano się na kod Hamminga z pojedynczą korekcją błędów.

Kompresja falkowa sygnałów biomechanicznych daje bardzo znaczący stosunek liczby wyzerowanych współczynników falkowych do całkowitej ich liczby. Dlatego nie należy przysyłać wyzerowanych współczynników, ale przesłać tylko informację o ich liczbie, co w znaczący sposób zwiększa niezawodność dalekosiężnego łącza telekomunikacyjnego. Liczba niezerowych współczynników falkowych, w najgorszym przypadku, sięga zaledwie około 30%. W znaczący sposób skraca to czas transmisji. Prawdopodobieństwo wystąpienia, co najmniej dwóch przekłamań jest wtedy niewielkie. Niezawodność dalekosiężnego łącza radiowego można podwyższyć przysyłając informację co najmniej dwa razy, a to w znaczący sposób wyeliminuje podwójne przekłamanie w urządzeniu odbiorczym. Dlatego też zdecydowano się na kod Hamminga z pojedynczą korekcją błędów. Kodowanie za pomocą kodów Hamminga przebiega wedle określonego algorytmu [2,5]. Wprowadza on pewną nadmiarowość (wynikającą z twierdzeń o kodzie Hamminga) do bitów informacyjnych, która posłuży do oceny odebranej wiadomości i ewentualnie do korekty pojedynczego przekłamania.

W naszym przypadku dane, które zostaną poddane kodowaniu i transmisji pochodzą z jednego ze skompresowanych sygnałów biomechanicznych. Posłużą do odtworzenia sygnału w miejscu jego odbioru. Opis zmiennych wykorzystywanych do rekonstrukcji znajduje się w tabeli 1, szczegółowa charakterystyka macierzy *coefs* i *long* przedstawiona jest na rysunku 11.

Tab. 1. Opis zmiennych zapisanych „Wavelet I–D”[4] skompresowane sygnału biomechanicznego

Zmienna	Status	Opis
coefs	wymagana	wektor współczynników DWT
longs	wymagana	wektor określający długości elementów <i>coefs</i> i oryginalnego sygnału
valTHR	nie wymagana	współczynnik progu (global thresholding)
wname	wymagana	Ciąg znaków wyszczególniający nazwę falki użytej do dekompozycji (np. db3)



Rys. 12. Budowa macierzy coefs i long wg [4]

Uzyskanie wysokiej eliminacji współczynników falkowych (70–80 %) powoduje, że sygnały rekonstruowane są na podstawie tylko aproksymacji na najniższym poziomie rozdzielczości. Detale (D_1 , D_2), czyli reprezentacja szczegółowa, są wyzerowane (wartości współczynników falkowych mniejsze są co do wartości bezwzględnej od wartości ustalonego progu) i pomijane w procesie syntezy. Dlatego funkcją kodera nie będzie tylko kodowanie danych, ale również kompresja (zliczanie wyzerowanych współczynników falkowych i umieszczenie informacji w pierwszej wyzerowanej komórce). Prowadzi to do znacznego zmniejszenia rozmiaru macierzy coefs, a tym samym danych przeznaczonych do transmisji. Natomiast wiąże się z procedurą rekonstrukcji (dekompresji) oryginalnego rozmiaru macierzy w dekodzie.

Wnioski i podsumowanie

Wiadomo, że automatyczne systemy pomiarowe do szacowania mocy chwilowych rozwijanych przez główne zespoły mięśniowe człowieka były już stosowane w kosmosie. System do automatycznej rejestracji ruchu człowieka – ELITE-D (produkowanych przez mediolańską firmę BTS) był zainstalowany i testowany przez astronautów–konstruktorów w rosyjskiej stacji kosmicznej MIR [6].

W wypadku dysfunkcji aparatu ruchu astronauty, wywołanej dłuższym czasem przebywania w mikrograwitacji, można dane biomechaniczne przesłać na

Ziemię dla dokonania oceny stanu aparatu ruchu astronautów (np. stosując metodę wskaźnikową [6]) lub przesłania drogą radiową sposobu jego poprawy (z ziemskich centrów diagnostycznych ruchu człowieka). Na Ziemi istnieją już takie centra [6], gdzie grupa specjalistów (biocybernetyków i biomechaników) jest w stanie dokonać takiej oceny. Oddzielnym zagadnieniem jest przesyłanie takich informacji na drodze setek milionów kilometrów – przestrzeni międzyplanetarnej. Szczególnie ważna jest ich kompresja i ochrona przed zakłóceniami (np. przed szumem kosmicznym). Zdaniem autorów pracy znakomicie nadają się do tego falki (biorthogonal i daubechies) i korekcja błędów w transmisji skompresowanych sygnałów biomechanicznych metodą Hamminga.

Wykaz piśmiennictwa

- [1] Białasiewicz J.T.: Falki i aproksymacje, WNT, Warszawa, 2000.
- [2] Haykin S.: Systemy telekomunikacyjne część II: tłumaczenie; Galijski B., Hahn G. WKŁ, Warszawa, 1998.
- [3] Sayood K.: Kompresja danych. Wprowadzenie, READ ME, Warszawa, 2002.
- [4] Wavelet Toolbox: User's Guide – The MathWorks Inc., 2000.
- [5] Hamming R.W.: Error Detecting and Error Correcting Codes. Bell System, Tech. J., vol. 29, 1950.
- [6] Jaworek K.: Metoda wskaźnikowa oceny lokomocji człowieka na przykładzie chodu i biegu, Prace Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomechanicznej, zeszyt 32, Warszawa, 1992.

COMPRESSION AND CODING OF BIOMECHANICS SIGNALS

Abstract: In this paper the selected problems of a very long distance radiocommunication connection for sending and protecting biomechanical signal are presented. Biosignals are collected from main groups of muscles of a man during walking. For long distance sending biomechanical signals: wavelet compressing and Hamming coding are proposed.

Keywords: loser compression, DWT factors, decomposition, thresholding, reconstruction, compression quality factors, coding, Hamming's code.

Mirosława Kołodziejczyk¹

PRZEPŁYW CIECZY LEPKIEJ W OBSZARZE PROSTOKĄTNYM Z PÓŁWYSEPEM

Streszczenie: Tematem pracy jest wyznaczenie nieustalonego przepływu cieczy lepkiej w obszarze prostokątnym z ruchomą ścianką oraz wewnętrzną przegrodą. Zastosowana w pracy metoda obliczeniowa pełnych, nieuproszczonych równań Naviera-Stokesa oparta jest na sposobie eliminowania ciśnienia drogą wyznaczenia całki po konturze zamkniętym z różniczki zupełnej ciśnienia. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń dla $Re = 600$ przy różnych ustawieniach przegrody wewnątrz obszaru przepływu.

Słowa kluczowe: przepływy cieczy lepkiej, równania Naviera-Stokesa, eliminacja ciśnienia

Wprowadzenie

W pracy Prosnaka i Kosmy (1991) przedstawiono metodę obliczeniową rozwiązywania równań opisujących przepływ cieczy lepkiej, opartą na pewnym sposobie eliminowania ciśnienia, opisanym w dalszej części niniejszego artykułu. W pracy tej przedstawiono również pierwsze wyniki liczbowe, osiągnięte opisaną metodą, dla przepływu w jamie z ruchomym brzegiem. Metoda ta jest ciągle jeszcze nierozpoznana, zarówno pod względem teoretycznym, jak i pod względem zastosowań. Zastosowano ją dotychczas do wyznaczenia przepływu w niewielu przypadkach. Nieliczne obliczenia przepływu w obszarach o prostej geometrii (jama z ruchomym brzegiem, kanał z uskokiem ścianki) i przy niewielkiej liczbie Reynoldsa przedstawiono w pracach Elszkowskiego (1992), Kołodziejczyk (1995

¹ Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

i 1997) oraz Klonowskiej i Kołodziejczyk (1999). W pracach Kołodziejczyk (1995) oraz Klonowskiej i Kołodziejczyk (2002) zawarte są wyniki obliczeń dla opływu profilu (z zastosowaniem przekształcania obszarów) przy niewielkiej liczbie Reynoldsa. Metoda ta wymaga, dla określenia jej możliwości oraz zakresu stosowalności, dalszych badań, zarówno teoretycznych jak i obliczeniowych.

Niniejsza praca jest kontynuacją badań numerycznych autorki i ma na celu przedstawienie wyników obliczeń w obszarach o bardziej skomplikowanym kształcie: dla przepływu w jamie z ruchomą ścianką i wewnętrzną przegrodą. Jest etapem wstępnym wyznaczenia koncentracji chlorofilu w płaskim, niestacjonarnym polu prędkości dla przepływu w zatoce morskiej. Jama z ruchomym brzegiem i wewnętrzną przegrodą jest prostym modelem geometrii przepływu w zatoce z półwyspem. W celu wyznaczenia struktury przepływu w tego typu obszarach przeprowadzono obliczenia pola prędkości przy różnej długości przegrody i przy różnym jej położeniu wewnątrz jamy.

I. Metoda rozwiązania

Przedmiotem badań jest płaski ruch cieczy lepkiej o stałej lepkości i gęstości, opisany przez zamknięty układ równań, zawierający równanie ciągłości (1) oraz równania Naviera – Stokesa (2) ÷ (3):

$$u_x + v_y = 0; \quad (1)$$

$$u_t + (u^2)_x + (uv)_y = -p_x + \frac{1}{\text{Re}} \Delta u; \quad (2)$$

$$v_t + (uv)_x + (v^2)_y = -p_y + \frac{1}{\text{Re}} \Delta v, \quad (3)$$

z niewiadomymi funkcjami: składowymi wektora prędkości $u(x,y,t)$ i $v(x,y,t)$ oraz ciśnieniem $p(x,y,t)$. Do powyższego układu równań należy dołączyć warunki początkowe i brzegowe – zostaną one sformułowane podczas omawiania przykładów obliczeniowych.

Równania (1)-(3), opisujące przepływ cieczy lepkiej, charakteryzują się pewnego rodzaju niesymetrią ze względu na występujące w nim niewiadome funkcje: składowe wektora prędkości i ciśnienie. Występują w nich drugie pochodne składowych wektora prędkości i pierwsze - ciśnienia. Wymagają więc również różnego

rodzaju warunków brzegowych. Prędkość musi być zadana na liniach brzegowych, natomiast ciśnienie może być znane jedynie w jednym punkcie obszaru przepływu.

Ze względu na wspomnianą niesymetrię, metody obliczeniowe dla równań Naviera-Stokesa dążą zwykle do wyeliminowania ciśnienia z równań wyjściowych. Dokonuje się tego na dwa sposoby: na etapie modelowania przepływu albo na etapie konstruowania schematu numerycznego. Pierwszy sposób łączy się zwykle z przejściem w opisie przepływu na inne zmienne, np. wirowość i funkcję prądu. W sposobie drugim występuje wiele odmian postępowania. Ciśnienie jest w rozmaity sposób eliminowane z równań zawierających prędkość (lub jego wartość jest zakładana jako znana) i następnie wyznaczane (korygowane) w dalszych etapach obliczeń poprzez rozwiązanie różnego rodzaju dodatkowych równań korekcyjnych. Najczęściej tego typu postępowanie prowadzi do utworzenia równań zawierających wyższe pochodne ciśnienia (czasami prędkości) i wymagające w związku z tym wprowadzenia dodatkowych warunków brzegowych, niewystępujących w zagadnieniu wyjściowym (1) ÷ (3).

Zastosowana w pracy metoda rozwiązywania pozbawiona jest tego rodzaju niedogodności. Sprowadza się ona do wyeliminowania ciśnienia z równań Naviera – Stokesa drogą wyznaczenia całki po konturze zamkniętej z różniczki zupełnej ciśnienia. W pracy przedstawionej przez Prosnaka i Kosmę (1991) zaproponowano wykorzystanie równań pędu do obliczeń całki ciśnienia po konturze zamkniętej. Całka ta równa jest zeru ze względu na jednowartościowość funkcji $p(x,y,t)$:

$$\int_{\Gamma} (p_x dx + p_y dy) = 0. \quad (4)$$

Po podstawieniu z równań (2) i (3) pochodnych cząstkowych ciśnienia p_x i p_y otrzymuje się równanie następujące:

$$\int_{\Gamma} \left[\frac{1}{\text{Re}} \Delta u - u_t - (u^2)_x - (vu)_y \right] dx + \left[\frac{1}{\text{Re}} \Delta v - v_t - (uv)_x - (v^2)_y \right] dy = 0. \quad (5)$$

Powyższe równanie wraz z równaniem ciągłości zróżniczkowanym względem czasu:

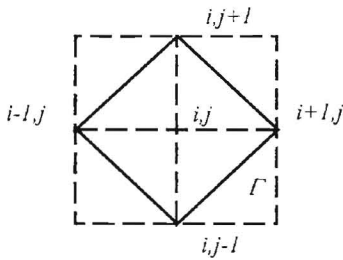
$$(u_t)_x + (v_t)_y = 0 \quad (6)$$

tworzy zamknięty układ równań z niewiadomymi funkcjami $u(x,y,t)$ i $v(x,y,t)$, opisujący ruch cieczy lepkiej o stałej lepkości i gęstości. Służą one będą wraz z warunkami brzegowymi i warunkiem początkowym do wyznaczenia składowych

prędkości w dowolnym punkcie obszaru przepływu, a w konsekwencji do wyznaczenia ciśnienia zgodnie z całką:

$$p(x, y, t) = p(x_0, y_0, t) + \int_{x_0, y_0}^{x, y} \left[\frac{1}{\text{Re}} \Delta u - u_t - (u^2)_x - (vu)_y \right] dx + \left[\frac{1}{\text{Re}} \Delta v - v_t - (uv)_x - (v^2)_y \right] dy, \quad (7)$$

gdzie t jest parametrem, a $p(x_0, y_0, t)$ – znaną funkcją czasu w punkcie (x_0, y_0) .



Rys. 1. Kontur zamknięty Γ

Zagadnienie opisane pierwotnie przez układ równań różniczkowych cząstkowych drugiego rzędu zostało przekształcone do zagadnienia początkowego dla układu równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu. Układ równań zwyczajnych uzyskiwany jest przez zastosowanie metody różnic skończonych do prostokątnego obszaru obliczeniowego.

Dyskretyzację zagadnienia opisanego równaniami (5) i (6) przeprowadzono w sposób następujący: przybliżonego całkowania w całce ciśnienia dokonano metodą trapezów. Rysunek 1 przedstawia fragment siatki obliczeniowej oraz drogę całkowania wzdłuż rombu wokół węzła siatki (i, j) . Pochodne cząstkowe w równaniu ciągłości, zróżniczkowanym względem czasu, aproksymowano różnicami centralnymi wewnątrz obszaru, a jednostronnymi na brzegu – przy czym aproksymacji dokonano jedynie dla zmiennych przestrzennych.

W wyniku tych operacji otrzymuje się układ $2NM$ równań liniowych na pochodne prędkości:

$$A_i \frac{h_x}{h_y} \left[\dot{u}_{i,j-1} - \dot{u}_{i,j+1} \right] + B_j \left[\dot{v}_{i+1,j} - \dot{v}_{i-1,j} \right] = w_{i,j}; \quad (8)$$

$$A_i \left[\dot{u}_{i+1,j} - \dot{u}_{i-1,j} \right] + B_j \frac{h_x}{h_y} \left[\dot{v}_{i,j+1} - \dot{v}_{i,j-1} \right] = 0, \quad (9)$$

gdzie

$$w_{i,j} = \frac{h_x}{h_y} \left[G_{i,j-1} - G_{i,j+1} \right] + \left[H_{i+1,j} - H_{i-1,j} \right]; \quad (10)$$

$$G = \frac{1}{\text{Re}} \Delta u - (u^2)_x - (uv)_y; \quad (11)$$

$$H = \frac{1}{\text{Re}} \Delta v - (uv)_x - (v^2)_y. \quad (12)$$

Symbole h_x , h_y oznaczają „oczko” siatki odpowiednio w kierunku x lub y ; N – liczbę węzłów wewnętrznych siatki w kierunku x , M – w kierunku y . Kropka nad symbolem u i v oznacza pochodną względem czasu. Układ równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu całkowany był metodą Rungego-Kutty-Gilla.

Zastosowany w metodzie sposób eliminowania ciśnienia drogą całkowania nie powoduje podwyższenia rzędu równań. Nie ma więc potrzeby tworzenia warunków brzegowych, niewystępujących w wyjściowych równaniach (1) ÷ (3). Unika się w ten sposób wprowadzania dodatkowych błędów obliczeniowych.

2. Przepływ w obszarze prostokątnym z półwyspem

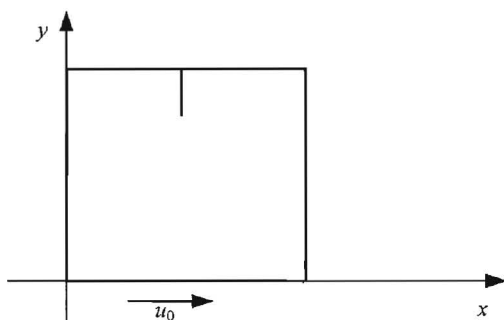
Obliczenia wykonane zostały dla kwadratowego obszaru przepływu: jamy z ruchomym dolnym brzegiem i z nieskończenie cienkim półwyspem prostopadłym do boku przeciwnego ruchomemu. Geometrię obszaru przedstawia rysunek 2.

Dolny brzeg jamy wypełnionej cieczą lepką został wprowadzony w ruch w taki sposób, że prędkość na tym brzegu rośnie skokowo od zera do wartości maksymalnej u_0 . Liczba Reynoldsa $\text{Re} = 600$.

Warunki brzegowe wynikają z postulatu nieprzenikalności ścianki i braku poślizgu. Warunek początkowy oznaczał bezruch cieczy dla $t \leq 0$.

Obliczenia przeprowadzono dla trzech długości półwyspu równych $1/4$, $1/2$ i $3/4$ długości boku oraz dla trzech różnych położań półwyspu w odległości $1/4$, $1/2$ i $3/4$ długości boku od $x = 0$, a więc dla dziewięciu różnych przypadków przepływu.

Bezpośrednim wynikiem obliczeń numerycznych były składowe wektora prędkości w węzłach wewnętrznych siatki.



Rys. 2. Obszar przepływu. Jama z ruchomym brzegiem i półwyspem

Wynikiem pośrednim są wartości funkcji prądu i wirowości, uzyskane w węzłach siatki na podstawie znajomości składowych prędkości, według procedury opisaną poniżej.

Funkcję prądu Ψ i wirowość Ω wyznaczono na podstawie ich wzorów definicyjnych:

$$\Omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (13)$$

oraz

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} = u \quad \text{ i } \quad \frac{\partial \Psi}{\partial x} = -v. \quad (14)$$

Zróóżniczkowanie wzorów (14), pierwszego względem zmiennej y , drugiego względem x , prowadzi do równania Poissona dla funkcji prądu:

$$\nabla^2 \Psi = -\Omega. \quad (15)$$

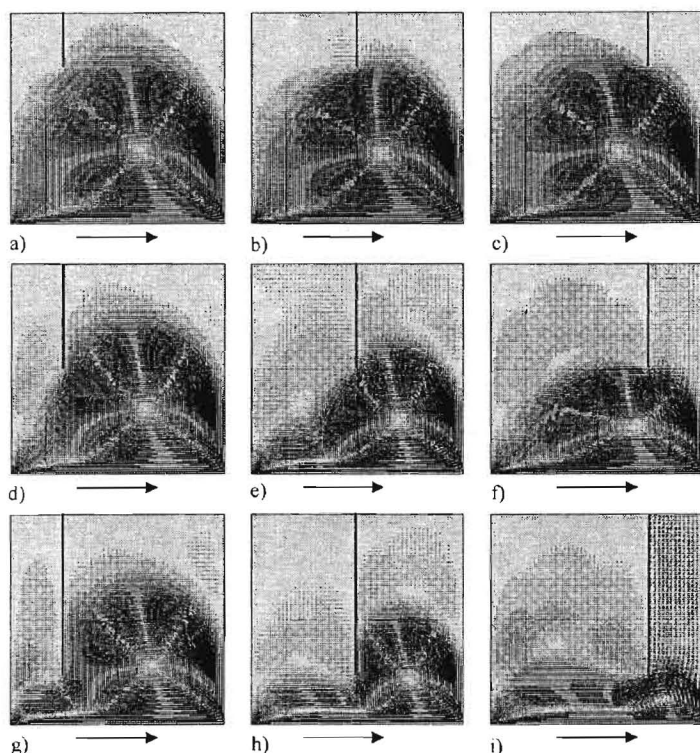
Ostatecznie wirowość wyznaczono według wzoru (13), po aproksymowaniu pochodnych prędkości różnicami skończonymi, centralnymi wewnątrz obszaru i jednostronnymi na brzegu, a funkcję prądu po obliczeniu wirowości, rozwiązując równanie Poissona (15) metodą Liebmann.

Wykreślane wartości stałych parametrów: funkcji prądu i wirowości pozwolą na lepszą wizualizację badanego przepływu. Linie prądu i linie stałej wirowości, rysowane są metodą cieniową, w której izoliniami są linie oddzielające pola jaśniejsze od ciemniejszych. Konieczne w tej metodzie wizualizacji przepływu wartości funkcji prądu i wirowości pomiędzy punktami siatki uzyskano z wykorzystaniem aproksymacji danego parametru funkcją sklejaną z powierzchni, które w przekroju dają linie ugięcia (Prosnak, Elszkowski i Prońska, 1991).

W pracy zastosowano następującą konwencję rysowania obszarów o dodatniej i ujemnej wartości kreślonego parametru. Punkty o dodatniej wartości parametru rysowane są na przemian kolorem białym i ciemnoszarym, natomiast punkty o wartości ujemnej – kolorem czarnym i jasnoszarym.

3. Wyniki obliczeń. Podsumowanie

Obliczenia niniejsze wykonano dla liczby Reynoldsa równej 600 oraz siatki równomiernej 100x100. Rysunek 3 pokazuje pola prędkości dla opisanych uprzednio przypadków usytuowania przegrody w chwili czasowej $t = 7.5$.



Rys. 3. Pola prędkości dla różnych przypadków położenia przegrody; $t = 7.5$

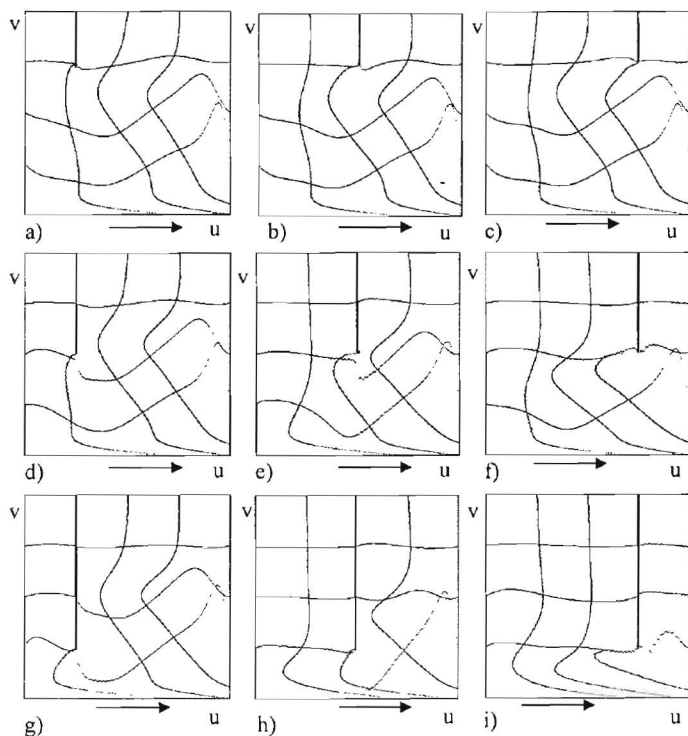
Obrazują one już praktycznie stan ustalony. Oznacza to, że średnia różnica prędkości pomiędzy kolejnymi chwilami czasowymi była nie większa niż 10^{-5} , a obrazy przepływu - takie same.

Uzyskane pola prędkości pozwalają określić wpływ obecności i rozmiarów przegrody na kształtowanie się przepływu w kwadratowej zatoce. W pobliżu ruchomej ścianki można zaobserwować wir główny wzbudzony jej ruchem. Jego rozmiary maleją wraz z powiększaniem się długości przegrody i jej przesuwaniem w kierunku ruchu ścianki.

Ilustrowanie przepływu w formie rozkładów wektorów prędkości w obszarze obliczeniowym niesie ze sobą pewną niewygodę. Związana jest ona z faktem występowania dużych różnic pomiędzy wartościami prędkości w różnych miejscach jamy. Przepływy wtórne, wzbudzone przez wir główny, rozwijający się w pobliżu ruchomej ścianki, mogą być pokazane tylko przy znacznym powiększeniu wektorów prędkości. Fakt ten, łącznie z dużym zagęszczeniem punktów, powoduje po-

wstanie pozornych obszarów „wygaszenia” przepływu, widocznych na rysunku 3 w postaci jasnych „pajawczków”, mających początek w środku wiru głównego. Jest to jedynie efekt wizualny, związany ze sposobem ilustrowania przepływu i nie świadczy ani o fizyce zjawiska, ani o wynikach obliczeń.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkłady składowych prędkości (dla przypadków przepływu z rysunku 3): składowej u – w kierunku pionowym w odległości $1/4$, $1/2$ i $3/4$ długości boku poziomego; składowej v – wzdłuż kierunku poziomego w odległości $1/4$, $1/2$ i $3/4$ długości boku pionowego. Skalę wykresu ustalono w sposób następujący: prędkość maksymalna występująca na ruchomym brzegu jest równa połowie długości boku.

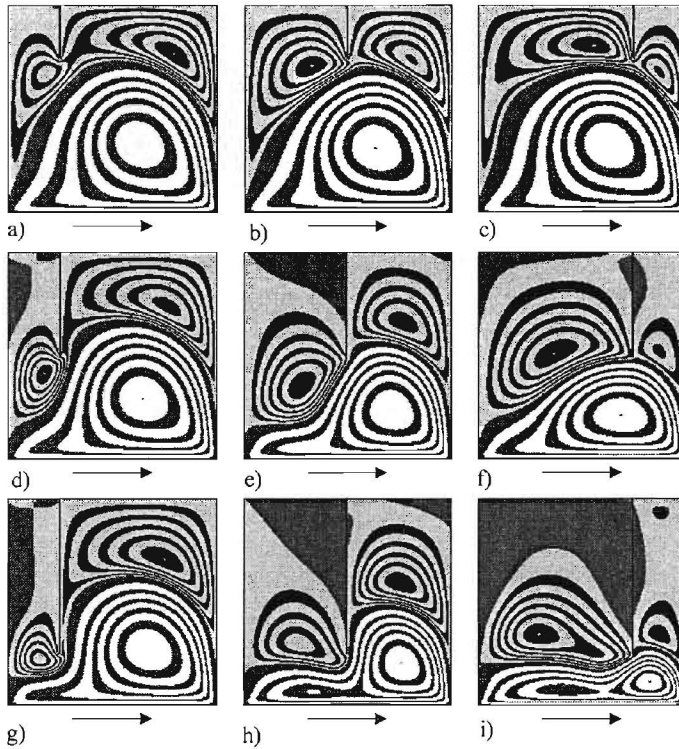


Rys. 4. Rozkłady składowych prędkości: u – w kierunku pionowym w odległości $1/4$, $1/2$ i $3/4$ długości boku poziomego; v – wzdłuż kierunku poziomego w odległości $1/4$, $1/2$ i $3/4$ długości boku pionowego; $t = 7.5$

Przedstawione wykresy pozwalają określić podobszary, w których wartość prędkości jest porównywalna z prędkością ruchomego brzegu. Można również zaobserwować, wpływ umiejscowienia przegrody na wyrównanie przepływu w zatoce, przypadek w którym prędkości przepływu w jamie są najmniejsze, czyli określić własności „wygaszające” przegród. Przegroda 4i) ogranicza zaburzenie wprowadzone ruchomą ścianką praktycznie do wąskiego obszaru pomiędzy nią a przegrodą. Odsunięcie przegrody w stronę środka jamy (pozycja 4h) działa mniej stabilizująco. W około czwartej części zatoki zostaje wzbudzony przepływ o znacznych prędkościach. Pozostałe przypadki umiejscowienia przegrody mają mniejszy wpływ na formowanie się i rozwój wiru głównego.

W celu lepszego zobrazowania struktury przepływu w jamie zostały wykonane wykresy linii prądu i linii stałej wirowości metodą opisaną w poprzednim rozdziale. Pomiedzy sąsiednimi izoliniami występuje stała różnica danego parametru. W przypadku funkcji prądu zastosowano jednak różne przyrosty wartości funkcji prądu w obszarach Ψ dodatniego (wir główny) i w obszarach Ψ ujemnego (wiry wtórne). Postępowanie takie spowodowane było chęcią ukazania kształtu izolinii w obszarach o małej wartości parametru (Ψ ujemne), które w innym przypadku byłyby niewidoczne.

Rysunek 5 pokazuje obrazy linii prądu odpowiadające polom prędkości przedstawionym na rysunku 3. Ruchoma ścianka wywołuje wewnątrz jamy powstanie struktur wirowych o różnym kształcie i rozmiarach, w zależności od położenia przegrody. W pobliżu ruchomej ścianki tworzy się wir główny, który z kolei indukuje w dalszych obszarach powstanie wirów pobocznych o przeciwnym kierunku przepływu (i o przeciwnym znaku funkcji prądu). Wir główny ma o wiele większą intensywność niż wiry wtórne. Maksymalna wartość bezwzględna funkcji prądu występowała w środku wiru głównego i wahała się w granicach: $0.0432 \div 0.0707$, w zależności od położenia przegrody (wartość największa odpowiada usytuowaniu przegrody jak na rysunku 5d; najmniejsza – rysunkowi 5i). Natomiast dla wirów pobocznych była ona nie większa niż 0.0135 (rysunek 5e – wir położony po lewej stronie przegrody). Wartości te pozwalają ocenić intensywność przepływu w poszczególnych podobszarach. Maksymalna funkcja prądu jest miarą natężenia przepływu cieczy objętej wirem. Analizując więc obrazy linii prądu na rysunku 5, należy pamiętać o różnej intensywności ruchu w obrębie wiru głównego i w obszarze wirów wtórnych.

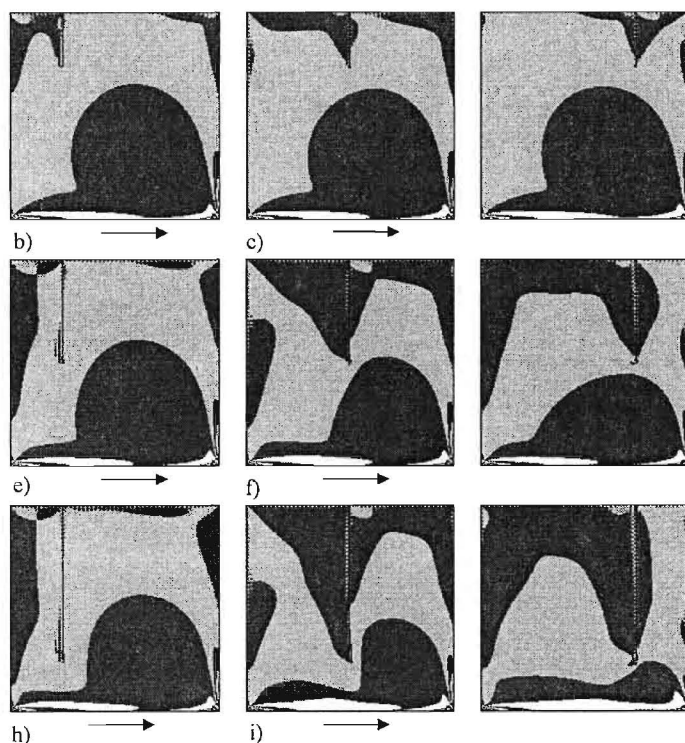


Rys. 5. Linie prądu dla różnych przypadków położenia przegrody; $t = 7.5$

Na rysunku 6 przedstawione zostały z kolei wykresy linii stałej wirowości, odpowiadające polom prędkości z rysunku 3. Obszary dodatniej wirowości położone są głównie w okolicy ruchomej, dolnej ścianki i mają kształt greckiej litery Ω . Niewielkie obszary o dodatnim Ω występują również w pobliżu przegrody oraz przeciwległego brzegu. Wnętrze jamy wypełnione jest płynem o wirowości ujemnej. Największa co do wartości dodatnia wirowość, rzędu $\Omega \approx 135$, występuje w okolicy ruchomej ścianki w pobliżu naroży. Największa ujemna wartość wirowości (Ω równe ok. -80) występuje przy prawym brzegu jamy w pobliżu brzegu ruchomego.

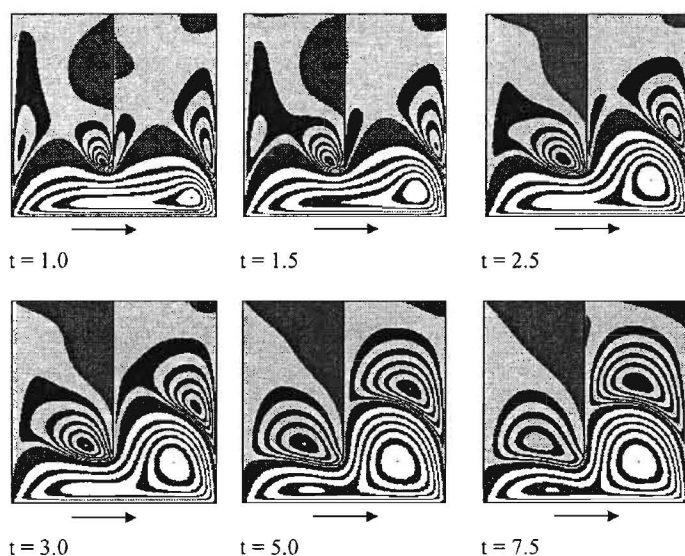
Wartości te nie zależą na ogół od rodzaju przegrody.

W chwili początkowej ciecz w jamie pozostawała w bezruchu. Przesuwanie się ruchomej ścianki wprowadziło ją w ruch, początkowo nieustalony, który po pewnym czasie się ustalił. Rysunki 3,4,5 i 6 pokazują właśnie takie ustalone warunki przepływu.



Rys. 6. Linie stałej wirowości dla różnych przypadków położenia przegrody; $t = 7.5$

Chwilowe obrazy linii prądu uzyskane dla wcześniejszych chwil czasowych obrazują stan nieustalony przepływu. Kolejno wyświetlane, na przykład w postaci animowanych gifów, pozwalają obserwować tworzenie się i rozwój struktur wirowych w obrębie jamy; są pewnego rodzaju animacją czy wizualizacją przepływu, niemożliwą do przedstawienia w niniejszym artykule, ale bardzo przydatną przy analizowaniu struktury przepływu. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe obrazy przepływu w jamie z przegrodą 5h) dla kilku wybranych chwil czasowych, aż do stanu ustalenia. Liczba Reynoldsa $Re = 600$ jest jeszcze zbyt mała, by zaobserwować w jamie jakiegokolwiek inne struktury wirowe oprócz wiru głównego i wirów wtórnych. Niemniej jednak można prześledzić poszczególne fazy formowania się ich kształtu.



Rys. 7. Linie prądu dla kilku wybranych chwil czasowych

W niniejszej pracy przedstawione zostały wyniki obliczeń przepływu w kwadratowej jamie z ruchomym brzegiem dla liczby Reynoldsa $Re = 600$. Autorka nie dysponuje danymi, z którymi mogłaby wyniki obliczeń porównać ilościowo lub jakościowo, jednakże dobra zgodność wyników obliczeń dla jamy bez przegrody z wynikami uzyskanymi przez innych autorów pozwala przypuszczać, że również wyniki przedstawione w niniejszej pracy są prawidłowe.

Wyniki obliczeń dla przepływu w jamie bez przegrody i przy mniejszych liczbach Reynoldsa, wykonane tą samą metodą obliczeniową, wykazały dobrą zgodność z danymi literaturowymi, zawartymi m.in. w pracach Ghii V., Ghii K.N. i Shina C.T. (1982) oraz Bozemana J.D. i Daltona C. (1973). Porównanie ilościowe dostępne jest w pracy Kołodziejczyk (1995).

Literatura

1. Bozeman J.D., Dalton C. (1973): Numerical study of viscous flow in a cavity, *J. Comput. Phys.* 12.
2. Elszkowski J.M. (1992): „Wyznaczenie ruchu cieczy lepkiej w prostokątnej jamie i w kanale z uskokiem”, *Zeszyty Naukowe IMP-PAN w Gdańsku*, 363/1332/92.
3. Ghia V., Ghia K.N., Shin C.T. (1982): High - Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method, *J. Comput. Phys.* 48.
4. Klonowska-Prosnak M.E., Kołodziejczyk M. (1999): Tests on a new method for numerical solution to the Navier-Stokes equations. Part I: plane unsteady flow in finite, rectangular domains, *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*, vol. 4, No. 2, pp. 311-340.
5. Klonowska-Prosnak M.E., Kołodziejczyk M. (2002): Tests on a new method for numerical solution to the Navier-Stokes equations. Part II: plane unsteady flow around curvilinear contours, *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*, vol. 7, No. 2, pp.619-652.
6. Kołodziejczyk M. (1995): „Zastosowanie nowej metody rozwiązywania równań Naviera-Stokesa do płaskich przepływów cieczy”, *rozprawa doktorska, dostępna w bibliotece IMP-PAN w Gdańsku*.
7. Kołodziejczyk M. (1997): „Przepływ cieczy lepkiej w prostokątnej jamie”, *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Nauki Techniczne*, Nr 112, Mechanika, Zeszyt 18, s. 77-89.
8. Prosnak W.J., Elszkowski J.M., Prońska A.M. (1991): „Interpolowanie funkcji jednej i dwu zmiennych”, *Zeszyty Naukowe IMP-PAN w Gdańsku*, 353/1311/91.
9. Prosnak W.J., Kosma Z.J. (1991): „On a New Method for Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations”, *Acta Mechanica* 89, Springer Verlag.

PLANE FLOW OF VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID IN A RECTANGULAR REGION WITH A DIVISION WALL

Abstract: A numerical simulation of the flow of viscous incompressible fluid in a rectangular cavity with a division wall is a subject of this paper ($Re = 600$). The simulation has been done applying the method of elimination of the pressure from the Navier-Stokes equations by determination of the contour integral of the total differential of the pressure.

Keywords: flow of viscous incompressible fluid, Navier-Stokes equation, elimination of pressure

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

Adam Kotowski¹

DIAGNOZOWANIE ELEMENTÓW MASZYN POPRAZEC ANALIZĘ PARAMETRÓW FUNKCJI AUTOKORELACJI SYGNAŁU WIBROAKUSTYCZNEGO

Streszczenie: W pracy przedstawiono specjalny sposób obróbki sygnału wibroakustycznego (WA), który jest odpowiedzią maszyny lub jej elementu na zewnętrzne wymuszenia od otoczenia w warunkach stacjonarnych lub podczas pracy. Przedstawione podejście polega na wstępnym wyselekcjonowaniu czasu obserwacji sygnału (T) a następnie na wyborze funkcji analitycznej właściwej dla opisu przebiegu jego funkcji autokorelacji. Takie postępowanie pozwoliło wyznaczyć parametry diagnostyczne, których wartości dla różnego czasu eksploatacji obiektu Θ dają obraz zmian stanu technicznego i wskazują na zaistniałe uszkodzenia. Analiza sygnału WA możliwa jest tu przy zastosowaniu numerycznych przekształceń zarejestrowanego sygnału czasowego.

Słowa kluczowe: diagnostyka łopatk, sygnał wibroakustyczny, funkcja autokorelacji, parametry diagnostyczne

Wstęp

Diagnozowanie elementów maszyn realizowane jest często z wykorzystaniem metody wibroakustycznej. Zarejestrowane sygnały, będące odpowiedzią na zadane wymuszenia (w czasie postoju lub podczas pracy maszyny) poddawane są wstępnej obróbce i szczegółowej analizie w specjalizowanych systemach komputerowych. Często jednak opcje oprogramowania tych systemów nie spełniają w pełni zadań postawionych przez użytkownika. Lukę tę wypełniają istniejące na rynku dodatkowe programy, będące pomocnym narzędziem w realizacji szczególnych

¹ Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, adamk@pb.bialystok.pl

zadań, w tym również nowatorskich podejść do głębszej i wykazującej nowe właściwości analizy sygnałowej.

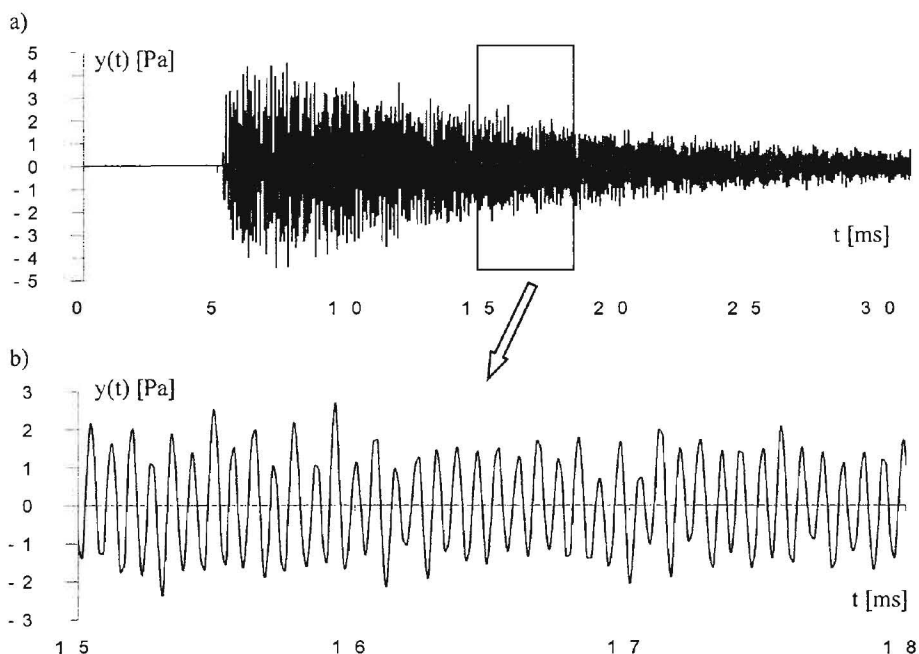
W pracy podjęto temat wykorzystania funkcji autokorelacji do analizy sygnału wibroakustycznego, przetwarzając go na parametry diagnostyczne. W celu właściwego odwzorowania przebiegów funkcji autokorelacji poddano je wstępnej ocenie przy pomocy transformaty Fouriera i w konsekwencji dobrano takie postacie analityczne opisujące te przebiegi, aby uzyskać zadowalające wyniki. Kryterium oceny dopasowania był współczynnik dopasowania R^2 .

Obliczenia przedstawiono na przykładzie sygnału odpowiedzi akustycznej łopatkii maszyny wirnikowej zarejestrowanego w warunkach stacjonarnych. Taka odpowiedź niesie ze sobą informację o złożonych drganiach własnych (giętnych, skrętnych i wzdłużnych), a analiza sygnału tej odpowiedzi pozwala uzyskać pełny obraz dynamiki łopatkii.

Taki sposób badania w warunkach stacjonarnych można zastosować również do innych elementów maszyn, dla ustalonych warunków ich zamontowania w układzie mocującym i do analizy całych maszyn w czasie pracy.

I. Wstępna selekcja sygnału

Wstępną selekcję sygnału wibroakustycznego wprowadzono, aby uzyskać przebieg czasowy, którego funkcja autokorelacji będzie łatwo dopasowywalna do ustalonej analitycznej postaci tej funkcji. Polega to na tym, że wybiera się tylko najbardziej charakterystyczną część z całego sygnału. Poniżej, na rys. 1., przedstawiono sygnał odpowiedzi akustycznej – $y(t)$, pobudzonej do drgań łopatkii maszyny wirnikowej (czas rejestracji sygnału 31,5 ms, liczba próbek 2048, sygnał pobudzenia wystąpił w czasie $t=5$ ms). Pokazano cały zarejestrowany sygnał – rys. 1a. i jego fragment o czasie trwania 3 ms – rys. 1b. Uwzględniając dalsze etapy analizy warto wybrać ten drugi, ponieważ liczba danych (liczba próbek numerycznej postaci sygnału) całego sygnału jest na tyle duża, że utrudni to dopasowanie analitycznej postaci funkcji autokorelacji do przebiegu tej funkcji, uzyskanego programowo z przebiegu czasowego.



Rys. 1. Sygnał odpowiedzi akustycznej pobudzonej do drgań łopatkki wirnikowej: a) cały zarejestrowany sygnał ($T=31,5$ ms), b) wydzielony fragment sygnału z punktu a. ($T=3$ ms)

Dodatkowo przy wyborze sygnału do dalszej analizy uwzględniono ten fragment przebiegu czasowego, w którym zachowanie się badanego obiektu odpowiada założonym poszukiwaniom zmian parametrów diagnostycznych przy ustalonych warunkach obserwacji sygnału; w omawianym przypadku są to drgania własne. W przykładowym badaniu łopatkki wirnikowej uwzględniono właśnie takie drgania i wybrano taki fragment zarejestrowanego sygnału, gdzie procesy przejściowe od wymuszenia impulsowego zanikły lub są zanikające (zakres 15–18 ms, liczba próbek 197).

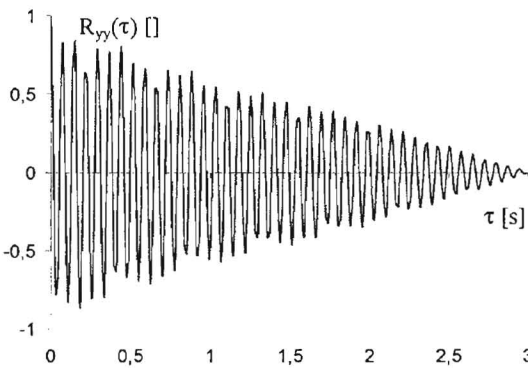
2. Wyznaczenie funkcji korelacji własnej

Na podstawie numerycznej postaci zarejestrowanego wyselekcjonowanego sygnału wibroakustycznego dokonuje się przekształcenia go do postaci przebiegu funkcji korelacji. Przekształcenie to realizowane jest przy wykorzystaniu odpo-

wiedniego, specjalistycznego oprogramowania. Tutaj autor posłużył się programem Matlab (wersja 5) i dołączonym do niego pakietem Signal Processing. Warto tutaj zauważyć, że wynikiem działania funkcji *xcorr* będzie przebieg funkcji korelacji o długości $2N-1$ (N – liczba próbek sygnału czasowego do analizy) i jak wiadomo symetryczny względem osi OY. Dla uproszczenia dalszej analizy tego przebiegu wystarczy wydzielić prawą część sygnału (dla dodatnich wartości na osi

OX). Na podstawie danych z rys. 1.b. na rys. 2. pokazano efekt działania funkcji *xcorr* w programie Matlab.

Jak można zauważyć, przebieg z rys. 2. można opisać przy pomocy sparametryzowanej funkcji analitycznej. Przykładowa postać analityczna funkcji korelacji własnej sygnału $y(t)$ – $R_{yy}(\tau)$ jest sumą kosinusoid malejących wykładniczo. Ogólny zapis takiej funkcji można wyrazić następująco:



Rys. 2. Wyznaczony przebieg funkcji autokorelacji

$$R_{yy}(\tau) = \sum_{i=1}^n a_i \cos(c_i \tau) e^{-b_i \tau} \quad (1)$$

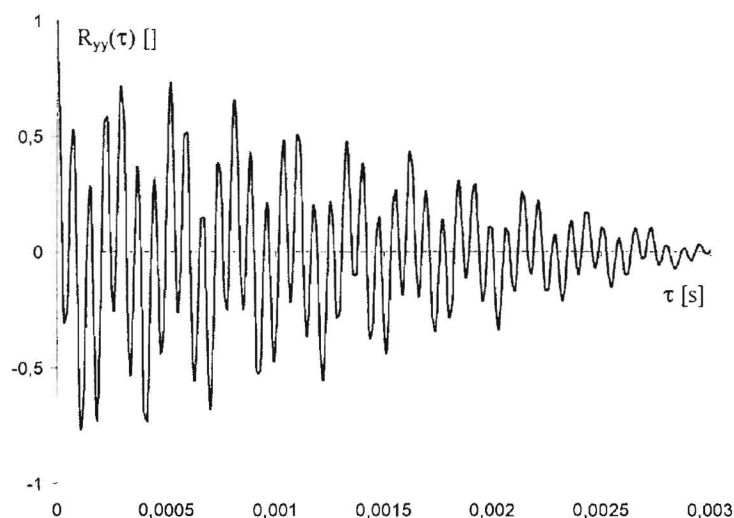
Parametry a_i , b_i i c_i zależą od składowych zawartych w sygnale $y(t)$, a zatem od własności dynamicznych obiektu (elementu maszyny). Tak więc stanowią one informację diagnostyczną wyrażoną liczbowo i zależną od stanu technicznego badanego obiektu.

3. Wyznaczenie wartości parametrów funkcji autokorelacji

W celu wyznaczenia wartości parametrów funkcji autokorelacji (1) sygnału wibroakustycznego uzyskanego z pomiarów można użyć metody dopasowywania krzywych (*curve fit*), która jest dostępna w wielu specjalizowanych programach komputerowych. Poniżej przedstawione zostanie przykładowe dopasowanie przebiegu z rys. 3. do przebiegu opisanego zależnością (1), a pomocne w tym zakresie

okazało się oprogramowanie *Origin 7.0* firmy OriginLab oraz *Matlab* firmy MathWorks.

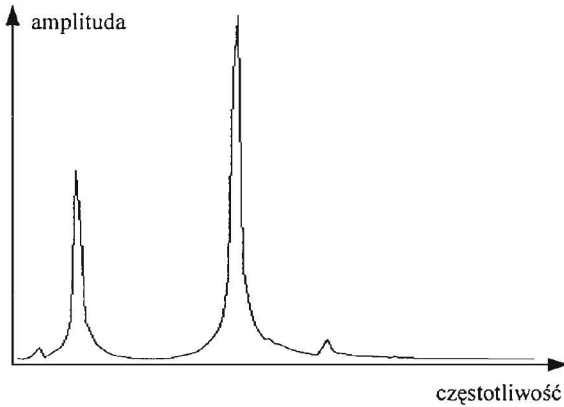
Po wczytaniu danych przebiegu funkcji autokorelacji (dwie kolumny danych – czas opóźnienia τ , wartości funkcji $R_{yy}(\tau)$) wybrano opcję *Analysis/Non-linear Curve Fit/Advanced Fitting Tool*. Ustawiono odpowiednie granice (ograniczenia) przeszukiwania parametrów funkcji (1), np. tylko w obszarze dodatnich ich wartości. Wprowadzono właściwą postać funkcji i uruchomiono proces dopasowywania. Zakończenie tego procesu określone jest uzyskaniem odpowiedniej dokładności dopasowania lub wykonaniem ustalonej liczby powtórzeń procesu.



Rys. 3. Przebieg funkcji autokorelacji z pomiarów

Do dopasowania wybrano funkcję składającą się z dwóch składowych kosinusoidalnych (2). Wybór ten padł na taką postać w wyniku przeanalizowania widma Fouriera funkcji autokorelacji z rys. 3. Jak widać na rys. 4., występują tutaj dwie charakterystyczne częstotliwości dominujące, a zatem dwie dominujące składowe harmoniczne. Pozostałe mają niewielkie znaczenie w przebiegu funkcji korelacji i dlatego je pominięto.

$$R_{yy}(\tau) = a_1 \cdot \cos(b_1\tau)e^{-c_1\tau} + a_2 \cdot \cos(b_2\tau)e^{-c_2\tau} \quad (2)$$

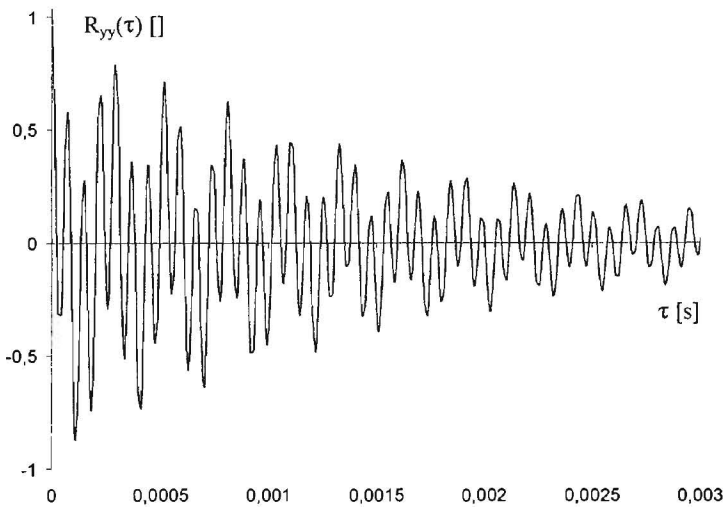


Rys. 4. Widmo Fouriera funkcji autokorelacji z rys. 3

W procesie dopasowywania krzywych wyznaczono wartości parametrów a_1 , b_1 , c_1 i a_2 , b_2 , c_2 , które wynoszą:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,679; & b_1 &= 85177,9; \\ c_1 &= 601,9; & a_2 &= 0,350; \\ b_2 &= 23234,3; & c_2 &= 600,4 \end{aligned}$$

a odpowiadający im przebieg funkcji (2) przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przebieg funkcji (2) dla wartości parametrów: $a_1=0,679$; $b_1=85177,9$; $c_1=601,9$; $a_2=0,350$; $b_2=23234,3$; $c_2=600,4$

Przy powyższym dopasowaniu uzyskano współczynnik dopasowania $R^2=0,984$. Zatem można powiedzieć, że opisana metoda stwarza podstawy do opracowania metody diagnozowania elementów maszyn na podstawie zarejestrowanego sygnału wibroakustycznego. Dalsza analiza zmian parametrów funkcji

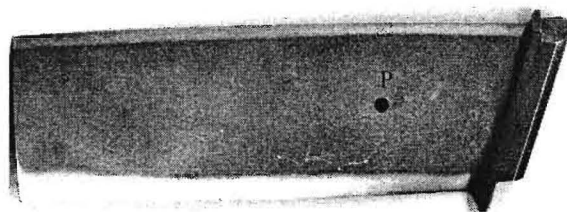
analitycznej wskaże, czy zaistniały zmiany znaczne lub czy nie zaistniały w ogóle w stanie technicznym badanego obiektu.

4. Diagnozowanie łopatki wirnikowej po przez analizę parametrów funkcji autokorelacji

Odpowiednio pobudzona łopatka maszyny wirnikowej generuje do otoczenia ściśle określony, mierzalny sygnał wibroakustyczny (WA). Powstaje on od jej drgań: giętnych, skrętnych i wzdluznych i jest zależny od kształtu łopatki, materiału, z którego została wykonana i stanu jej zamocowania. Zatem można założyć, że jednoznacznie określona zmiana sygnału wibroakustycznego (zmiana parametrów diagnostycznych wyznaczanych z sygnału WA) może być przetworzona na poszukiwane zmiany jej stanu technicznego (kształtu, uszkodzenia i zamocowania).

Obecnie wibroakustyczna metoda diagnozowania łopatek bazuje na analizie widma sygnału (jednego lub kilku prążków) od jednokrotnego pobudzenia łopatki do drgań, wykonanego przeważnie przy jej wierzchołku. Dostrzega się, że metoda ta może być rozwinięta w zakresie wnioskowania diagnostycznego (analizy sygnału WA z wykorzystaniem jego funkcji korelacji).

Przydatność pomiaru w diagnostyce stanu technicznego łopatki oceniono na podstawie przebiegów czasowych i zmian funkcji autokorelacji poszczególnych sygnałów. Badaną łopatkę przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Łopatka z zaznaczonym punktem uderzenia (pobudzenia do drgań)

Podczas badania łopatki sprężarki (I stopnia) silnika lotniczego SO-3 rozpatrzono kilka punktów pobudzenia jej do drgań. Wybrano dwa punkty [14], a jednym z nich jest punkt zaznaczony na rys. 6. a leżący w odległości $\frac{1}{4}L$ od krawędzi zamka łopatki (L – długość pióra łopatki).

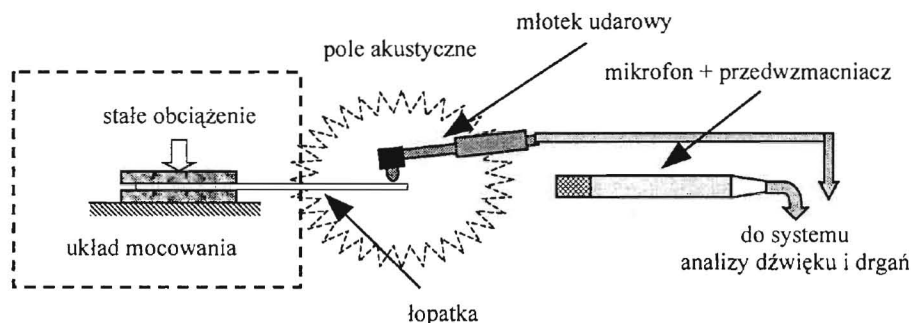
Ocena stanu technicznego łopatki bazuje tutaj na wnioskowaniu na podstawie zmian parametrów funkcji autokorelacji. Takie postępowanie prowadzi do wyrażonych liczbowo parametrów i stanowi dodatkowe źródło informacji o stanie łopatki. Względne zmiany tych parametrów w relacji: łopatka nieuszkodzona – ło-

patka uszkodzona wskazują na zmiany stanu technicznego łopatk. Stanowią zatem dodatkową informację do postawienia diagnozy i decyzji o dalszej pracy łopatk.

W warunkach laboratoryjnych diagnozowanie łopatk polega na jej wzbudzeniu do drgań uderzeniem za pomocą młotka udarowego z jednoczesną rejestracją czasowego przebiegu siły uderzenia oraz przebiegu sygnału akustycznego towarzyszącego temu uderzeniu (sygnał odpowiedzi akustycznej).

Układ do eksperymentalnych badań łopatk wirnikowej przedstawiono na rys. 7. Układ pomiarowy składa się z następujących elementów:

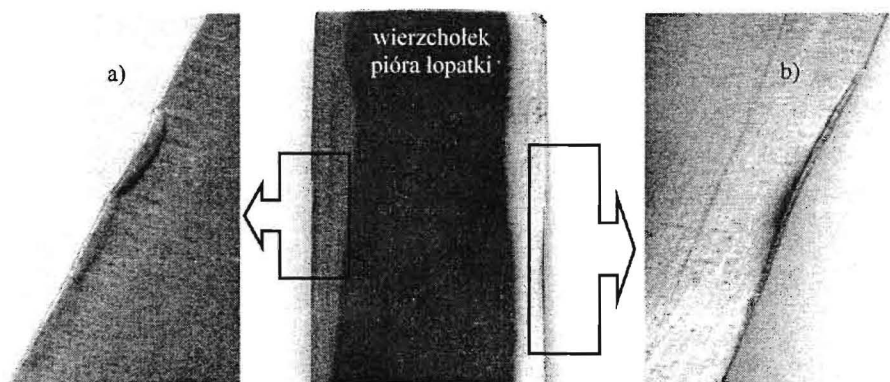
- analizatora dźwięku i drgań PULSE firmy Brüel&Kjær,
- mikrofonu pola swobodnego 1/2" typ 4189 firmy Brüel&Kjær wraz z akcesoriami,
- młotka udarowego firmy ENDEVCO typ 2301.



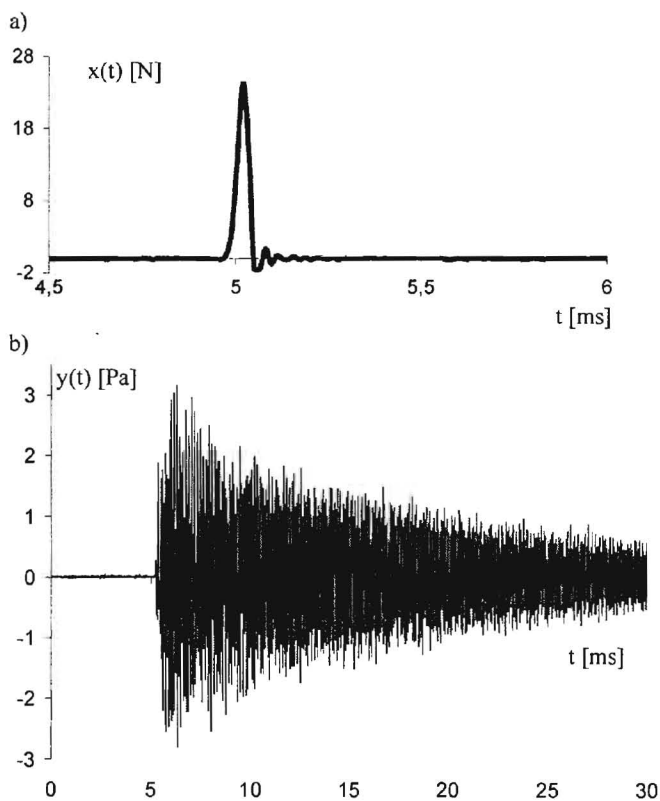
Rys. 7. Stanowisko do wykonania badań diagnostycznych

Odpowiednie warunki pomiaru zapewniała praska hydrauliczna z pomiarem siły docisku oraz dopasowany do zamka łopatk uchwyt mocujący. Badano łopatkę nieuszkodzoną i z zasymulowanym uszkodzeniem w postaci deformacji krawędzi natarcia i spływu (rys.8).

Wykonano pomiary sygnału wzbudzenia łopatk do drgań (sygnał wejściowy) – rys.9.a. i sygnału odpowiedzi akustycznej (sygnał wyjściowy) – rys.9.b. Pomiary wykonano przy uderzeniu łopatk w ściśle określonym punkcie – rys.6.



Rys. 8. Zasymlowane uszkodzenie łopatk: a) na krawędzi natarcia, b) na krawędzi spływu



Rys. 9. Przebiegi czasowe: a) $x(t)$ – impuls wzbudzenia łopatk do drgań, b) $y(t)$ – odpowiedź akustyczna łopatk

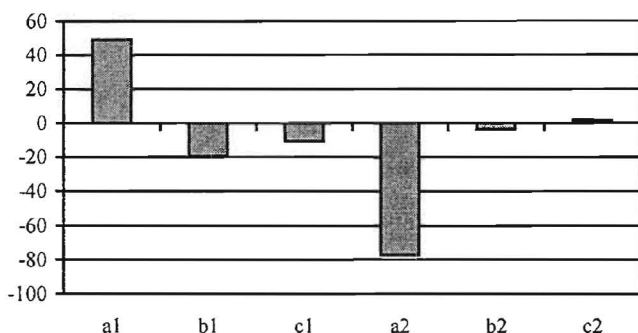
Podczas badań wyznacza się przebiegi czasowe sygnału odpowiedzi akustycznej – $y(t)$ przy stałym wzbudzeniu $x(t)$ i zamocowaniu łopatki. Sygnały te są podstawą do wyznaczenia funkcji autokorelacji, która umożliwia przejście od przebiegu sygnału czasowego do parametrów diagnostycznych. Jak zauważono funkcja autokorelacji sygnału wzbudzenia łopatki młotkiem udarowym jest bardzo powtarzalna i nie zależy od zmiany stanu badanej łopatki. Zrealizowano natomiast pełne badanie zmian parametrów diagnostycznych, zależnych od zarejestrowanego sygnału odpowiedzi akustycznej łopatki. Badanie przeprowadzone jest w następującej kolejności:

- wyznaczenie funkcji autokorelacji sygnału $y(t) - R_{yy}(\tau)$,
- na podstawie widma Fouriera funkcji $R_{yy}(\tau)$ wybór postaci funkcji analitycznej odwzorowania zmian przebiegu autokorelacji $R_{yy}(\tau)$,
- wyznaczenie parametrów funkcji autokorelacji przy użyciu specjalnej metody dopasowywania krzywych.

Pobudzenie łopatki do drgań wykonano trzykrotnie. Dopasowanie krzywych pozwoliło na otrzymanie wartości parametrów funkcji autokorelacji sygnału $y(t)$ a zatem parametrów diagnostycznych. W tabeli 1 podano wartości tych parametrów i wartość współczynnika determinacji R^2 , określający dokładność dopasowania. Zmiany tych parametrów w relacji łopatka nieuszkodzona – łopatka uszkodzona przedstawiono na rys. 10.

Tabela 1. Wartości parametrów funkcji $R_{yy}(\tau)$

Numer uderzenia		Wartości parametrów funkcji $R_{yy}(\tau)$						R^2
		a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	
przed uszkodzeniem	1	0,48	609,9	85178,6	0,41	587,5	23228,2	0,951
	2	0,56	605,8	85227,9	0,28	613,6	23265,2	0,901
	3	0,68	601,9	85177,9	0,35	600,4	23234,3	0,984
	wartość średnia	0,57	605,9	85194,8	0,35	600,5	23242,6	0,945
po uszkodzeniu	1	0,29	689,7	96647,1	0,68	620,4	22817,2	0,969
	2	0,15	686,4	84945,5	0,70	622,6	22809,8	0,953
	3	0,44	794,7	101063,1	0,47	624,9	22790,5	0,933
	wartość średnia	0,29	723,6	94218,6	0,62	622,6	22805,8	0,952



Rys. 10. Procentowe zmiany parametrów funkcji autokorelacji w relacji łożpatka nieuszkodzona – łożpatka uszkodzona

Z rys. 10 widać, że niektóre zmiany parametrów są znaczne i dochodzą do kilkudziesięciu procent. Wielkość ich zmian zależy zapewne od charakteru zmian cech konstrukcyjnych obiektu (zgniot, pęknięcie, ubytek materiału). Proponuje się, aby przy określaniu stanu technicznego były brane pod uwagę tylko parametry o najwyższych zmianach. Z tego względu należy tu również ustalić próg, powyżej którego dany parametr ma być brany pod uwagę.

Wnioski

Przedstawiona wibroakustyczna metoda diagnozowania elementów maszyn na przykładzie łożpatki sprężarki (I stopnia) silnika lotniczego SO-3 wskazuje na dodatkowe możliwości analizy sygnału wibroakustycznego. Badanie zmian parametrów funkcji autokorelacji jest dodatkowym i niesprawiającym dużych problemów podejściem do identyfikacji uszkodzeń. Otrzymana tutaj informacja diagnostyczna stanowi kolejny fragment całego procesu diagnozowania elementów maszyn i staje się pomocna w identyfikacji zmian konstrukcji elementów, szczególnie tych, które są badane w warunkach stacjonarnych.

Zaletą przedstawionej metody jest to, że do badań wystarczy użyć jednokanałowego systemu rejestracji sygnału wibroakustycznego, bez konieczności rejestracji i gromadzenia danych o przebiegu funkcji wzbudzenia obiektu do drgań. Wzbudzenie zadane tym samym narzędziem (młotek uderowy lub inne) jest powtarzalne a zatem zawsze wywoła ten sam sygnał pobudzenia. Badanie tylko sygnału wyjściowego (odpowiedzi akustycznej) jest wystarczające do analizy dynamiki obiektu.

Przeprowadzenie w przyszłości większej liczby badań dla wielu różnych typowych uszkodzeń łopatk wirnikowej pozwoli na bardziej szczegółowe wnioskowanie co do powiązania stanu technicznego (zmian stanu) z uzyskanymi zmianami parametrów funkcji autokorelacji.

Literatura

1. Baskakow S.I.: *Sygnały i układy radiotechniczne*, PWN, Warszawa, 1991.
2. Cempel Cz.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*, WNT, Warszawa, 1982.
3. Cempel Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1985.
4. Cempel Cz.: *Wibroakustyka stosowana*, PWN, Warszawa, 1989.
5. Cholewa W., Moczulski W.: *Diagnostyka techniczna maszyn*, Skrypty Uczelniane Politechniki Śląskiej Nr 1758, Gliwice, 1993.
6. Dimarogonas A. D.: *Vibration of cracked structures: a state of the art review*, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 55, No. 5, 1996, pp. 831–857.
7. Gelman L., Gorpinich S.: *Non-linear vibroacoustical free oscillation method for crack detection and evaluation*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14, No. 3, 2000, pp. 343–351.
8. Kotowski A., Lindstedt P.: *Metoda wibroakustyczna w procesie oceny stanu technicznego maszyn*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn, Z.10, 2002, s. 99–115.
9. Kotowski A.: *Diagnozowanie elementów maszyn w oparciu o parametry funkcji kwadratu wzmocnienia amplitudowego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej Budowa i Eksploatacja Maszyn, Z.11, 2003, s. 95–106.
10. Kotowski A., Lindstedt P.: *Ocena stanu technicznego łopatk wirnikowej w oparciu o analizę parametrów funkcji kwadratu wzmocnienia amplitudowego*, V Krajowa Konferencja Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów DIAG'2003, Ustroń, 2003.
11. Kurowski W.: *Dyskretnie widmo Fouriera w diagnostyce wibroakustycznej*, Skrypt Politechniki Białostockiej, Wydaw. Politechniki Białostockiej, Białystok, 1997.
12. Lindstedt P.: *Formowanie sygnałów diagnostycznych*, ZEM PAN, Z. 2, PWN, Warszawa, 1997.
13. Lindstedt P.: *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*, Wydaw. Nauk. ASKON, Warszawa, 2002.

14. Lindstedt P., Kotowski A.: *Basics for innovations in vibroacoustic diagnostics of transport machines rotor blades*, The Archives of Transport, Vol. XVII, No 3. (2004).
15. Łączkowski R.: *Drgania elementów turbin ciepłych*, WNT, Warszawa, 1974.
16. Łączkowski R.: *Wibroakustyka maszyn i urządzeń*, WNT, Warszawa, 1983.
17. Szabatin J.: *Podstawy teorii sygnałów*, WKiŁ, Warszawa, 2000.
18. Żółtowski B., Ćwik Z.: *Leksykon diagnostyki technicznej*, Wyd. Uczel. ATR, Bydgoszcz, 1996.

DIAGNOSIS OF ENGINE PARTS BASED ON PARAMETER ANALYSIS OF SELF-CORRELATION FUNCTION OF VIBROACOUSTIC SIGNAL

Abstract: In this paper a special case of vibroacoustic signal analysis was presented. Analysed signal is a response of engine part at external excitation from environment by stationary condition or during operation. The presented approach based on pre-selection of observation time of signal and then a analytic suitable function for describing course of self-correlation is chosen. That way with use of curve fitting diagnostic parameters was calculated. The values of these parameters are different for different using time of engine according to the state condition and existing failures. The self-correlation course was calculated using a numerical analysis of recorded acoustic response of rotor blade.

Keywords: blade diagnosis, vibroacoustic signal, self-correlation function, diagnostic parameters

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

Lindstedt Paweł¹

FUNKCJE WRAŻLIWOŚCI W PROCESIE PLANOWANIA BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

Streszczenie: W planowaniu czynnego eksperymentu w procesie badań diagnostycznych istotną rolę odgrywają funkcje wrażliwości konstrukcyjnej i parametrycznej. Wyznaczono funkcje wrażliwości konstrukcyjnej i parametrycznej dla układu hydraulicznego. Na podstawie analizy przebiegu otrzymanych funkcji wrażliwości ustalono, że podczas eksperymentu biernego diagnozowanie będzie nieskuteczne oraz że podczas eksperymentu czynnego instalację należy obserwować w chwili wprowadzania zakłóceń i gdy sygnał harmoniczny wyjściowy względem sygnału harmonicznego wejściowego jest przesunięty o 45° .

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, badania diagnostyczne, funkcje wrażliwości

Wstęp

Podczas użytkowania maszyna ulega ciągłemu niszczeniu. Pojawiają się takie złożone zjawiska jak: rozregulowanie, zmiana stanu technicznego, zwiększenie liczby uszkodzeń i niebezpiecznych zdarzeń, a stąd pogorszenie charakterystyk niezawodności i bezpieczeństwa maszyny. Wymienione zjawiska opisywane są w różnie zdeterminowanych przestrzeniach i stąd dotyczące ich problemy mogą być rozwiązywane według zasad różnych dyscyplin naukowych, takich jak: automatyka (regulacja), diagnostyka techniczna (ocena, geneza i prognoza stanu technicznego) oraz niezawodność i bezpieczeństwo maszyn. Teoria i praktyka ww. dyscy-

¹ Politechnika Białostocka

plin naukowych są podstawą systemu utrzymywania zdolności (obsługi) maszyn. Szczególną rolę w systemie obsługi odgrywa diagnostyka techniczna. Wynika to stąd, że badania diagnostyczne realizowane są w czasie dynamicznym (newtonowskim) i są ściśle powiązane z regulacją maszyny, a wnioskowanie diagnostyczne w czasie eksploatacji (bergsonowskim) jest związane z niezawodnością i bezpieczeństwem maszyny. Ten fakt sprawia, że obecnie tak dużo uwagi poświęca się diagnostyce technicznej, której głównymi elementami są: ujęcie maszyny jako obiektu diagnozowania w otoczeniu; charakterystyki statyczne, dynamiczne, niezawodnościowe i charakterystyki wrażliwości oraz modele diagnostyczne maszyny, środki diagnozowania, i wreszcie metody diagnozowania oraz realizujące je systemy diagnostyczne.

Diagnostyka techniczna jest tym głównym elementem systemu utrzymywania zdolności maszyny, który decyduje o możliwości eksploatacji maszyn według stanu technicznego.

I. Zasady praktycznej diagnostyki technicznej

Dotychczas prowadzona działalność diagnostyczna pozwoliła dostrzec, że wszystkie procesy diagnozowania realizowane są według następujących stałych zasad [2, 3]:

- Diagnostyka techniczna w szczególny sposób ujmuje obiekt techniczny. Szczegółność ta wyraża się:
 - indywidualizacją każdego pojedynczego obiektu,
 - założeniem, że obiekt techniczny znajduje się określonym otoczeniu, a badania dotyczą zarówno obiektu jak i jego otoczenia,
 - tym że, obiekt charakteryzuje się odpowiednią jakością działania (funkcjonowania) oraz określonym stanem technicznym (nie ma uszkodzeń) a także jest niezawodny i bezpieczny,
 - właściwością, że uszkodzenia (zmiany stanu technicznego) generują do otoczenia wrażliwe i dostępne sygnały,
 - tym, że obiekt ma swoją historię, którą przetwarza się na zmiany jego stanu technicznego.
- Diagnostyka techniczna łączy rzeczywistość fizyczną z modelową abstrakcją. Stan techniczny obiektu zapisywany i zapamiętywany jest na modelach diagnostycznych, które są zależnościami między sygnałami diagnostycznymi a zmianami jego stanu technicznego. Model wyznacza się w czasie dynamicznym (t) a następnie obserwuje się w czasie eksploatacyjnym θ .

- Diagnostyka techniczna operuje specjalnym aparatem pojęciowym i szczególną metodologią działania. Na podstawie diagnozy w czasach θ_1 θ_2 θ_3 może przewidywać (prognozować) stany w czasach następnych θ_4 θ_5 i odtwarzać (genezować) stany w czasach poprzednich θ_0 .
- Badania diagnostyczne i wnioskowanie diagnostyczne powinny być identyczne w całym okresie eksploatacji obiektu technicznego. Identyczność diagnozowania w dużym stopniu decyduje o skuteczności diagnostycznej.

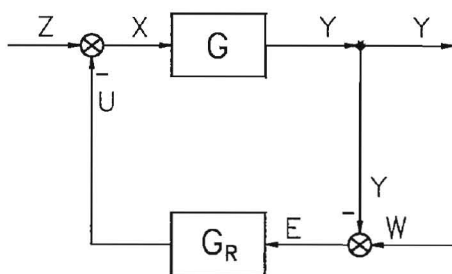
W procesie diagnozowania szczególną rolę odgrywają funkcje wrażliwości (konstrukcyjnej, parametrycznej i zakłóceniuwej) obiektu (układu), które są podstawą do właściwego jego zorganizowania.

2. Przesłanki do oceny użyteczności sygnałów diagnostycznych

Uszkodzenie (inna zmiana stanu technicznego) obiektu w jego otoczeniu generuje sygnały diagnostyczne. Otoczenie może być reprezentowane przez kilka sygnałów, także jedno uszkodzenie może generować kilka sygnałów diagnostycznych. Wszystkie wyselekcjonowane dostępne sygnały powinny być zmierzone, zarejestrowane, zakodowane w bazie danych, a następnie odpowiednio wykorzystane w procesie wnioskowania diagnostycznego. Okazuje się jednak, że poszczególne dostępne sygnały niosą różną ilość informacji diagnostycznej, a także to, że jej praktyczna wartość jest także zależna od chwili i częstotliwości jej pobrania.

Istnieje zatem poważny problem wartościowania przydatności sygnałów, który może być rozwiązany przez odpowiednie wykorzystanie funkcji konstrukcyjnej i parametrycznej wrażliwości obiektu.

Spotykane obiekty techniczne (układy, instalacje) można sprowadzić do abstrakcyjnego układu automatycznej regulacji (rys. 1).



Rys. 1. Układ automatycznej regulacji równoważny diagnostowanemu zjawiskom, procesom, obiektom: G – obiekt układu automatycznej regulacji; G_R – regulator; Z – zakłócenie; X – sygnał wejściowy; Y – sygnał wyjściowy; W – wartość zadana; E – uchyb regulacji; U – sygnał sterowania

Działanie układu w otoczeniu opisuje się następującymi relacjami między sygnałami–transmitancjami:

$$H_Z = \frac{Y}{Z} = \frac{G}{1 + GG_R} = \frac{b_m s^m + \dots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (1)$$

$$H_W = \frac{Y}{W} = \frac{GG_R}{1 + GG_R} = \frac{c_l s^l + \dots + c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (2)$$

gdzie dodatkowo: H_Z – transmitancja zakłóceń obiektu; H_W – transmitancja nadążeniowa obiektu; Y – transformata sygnału wyjściowego (użytkowego) obiektu; Z – transformata zakłócenia; W – transformata wielkości (wartości) zadanej; $a_{0+n}, b_{0+m}, c_{0+l}$ – parametry transmitancji; s – zmienna zespolona (operator czasu i częstotliwości).

Przedstawione transmitancje (1), (2), które są szczególnie skuteczną formą opisu obiektu, stają się podstawą do wyznaczenia różnych funkcji wrażliwości obiektu, ilościowo wyrażających wpływ zmian rozwiązania konstrukcyjnego i zmian parametrów obiektu na jego funkcjonalne własności w różnych etapach życia i różnych warunkach jego działania.

Związek zmian rozwiązań konstrukcyjnych układu w otoczeniu z jakością jego funkcjonowania w dziedzinie „s” ocenia się na podstawie funkcji wrażliwości konstrukcyjnej:

$$W_G^{H_Z} = \frac{\frac{dH_Z}{H_Z}}{\frac{dG}{G}} = \frac{G}{H_Z} \frac{dH_Z}{dG} \quad (3)$$

$$W_{G_R}^{H_Z} = \frac{\frac{dH_Z}{H_Z}}{\frac{dG_R}{G_R}} = \frac{G_R}{H_Z} \frac{dH_Z}{dG_R} \quad (4)$$

$$W_G^{H_W} = \frac{\frac{dH_W}{H_W}}{\frac{dG}{G}} = \frac{G}{H_W} \frac{dH_W}{dG} \quad (5)$$

$$W_{G_R}^{H_W} = \frac{\frac{dH_W}{H_W}}{\frac{dG_R}{G_R}} = \frac{G_R}{H_W} \frac{dH_W}{dG_R} \quad (6)$$

gdzie np.: $W_G^{H_Z}$ – funkcja wrażliwości układu opisanego H_Z od zmian obiektu opisanego G itp.

Związek zmian parametrów układu z jakością jego funkcjonowania w dziedzinie „s” ocenia się na podstawie funkcji wrażliwości parametrycznej:

$$W_{b_k}^{H_Z} = \frac{b_k}{H_Z} \frac{dH_Z}{db_k} \quad (b_k = b_0 \div b_m \rightarrow m+1 \text{ funkcji wrażliwości}) \quad (7)$$

$$W_{a_k}^{H_Z} = \frac{a_k}{H_Z} \frac{dH_Z}{da_k} \quad (a_k = a_0 \div a_n \rightarrow n+1 \text{ funkcji wrażliwości}) \quad (8)$$

$$W_{c_k}^{H_W} = \frac{c_k}{H_W} \frac{dH_W}{dc_k} \quad (c_k = c_0 \div c_l \rightarrow c+1 \text{ funkcji wrażliwości}) \quad (9)$$

$$W_{a_k}^{H_W} = \frac{a_k}{H_W} \frac{dH_W}{da_k} \quad (a_k = a_0 \div a_n \rightarrow n+1 \text{ funkcji wrażliwości}) \quad (10)$$

gdzie np.: $W_{b_k}^{H_Z}$ – funkcja wrażliwości układu opisanego H_Z od zmian parametru b_k itp.

Jak widać z zależności (3÷10), do opisu wrażliwości konstrukcyjnej i parametrycznej układu wyznacza się wiele $4+2n+m+1+4=8+2n+m+1$ funkcji operatorowych. Zatem pełne rozwiązanie tego problemu może nastąpić wtedy, gdy odpowiednio zostanie wykorzystana dostępna technika komputerowa.

Interpretacja fizyczna funkcji wrażliwości $W(s)$ może być przeprowadzona według zasad, jakie stosuje się w automatyce do interpretacji transmitancji $H_Z(s)$ lub $H_W(s)$. Zatem otrzymuje się:

$$L^{-1}W(s) = W(t) \quad (11)$$

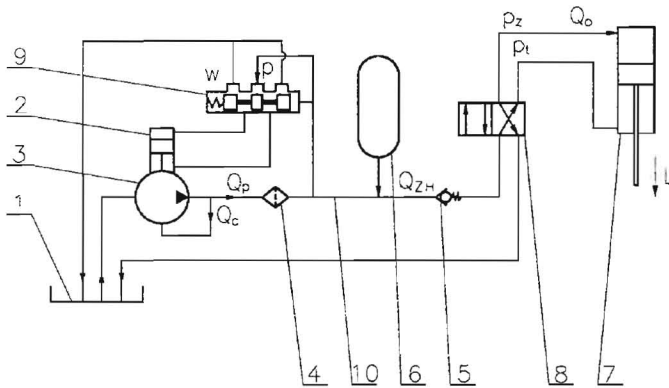
$$s = j\omega$$

$$W(s) = W(j\omega) = P_W(\omega) + jQ_W(\omega) = A_W(\omega)e^{j\varphi_W(\omega)} \quad (12)$$

Odpowiednie wykorzystanie zależności (11) i (12) pozwoli oceniać wrażliwość układu od pojawiających się w procesie eksploatacji zmian konstrukcyjnych i parametrycznych układu, w zmiennym otoczeniu reprezentowanym przez sygnały Z i W (rys. 1).

3. Funkcje wrażliwości układu hydraulicznego

Typowy układ hydrauliczny z pompą-regulatorem o zmiennej wydajności i z tłokowym siłownikiem pokazano na rysunku 2 [2, 3, 4].



Rys. 2. Schemat układu hydraulicznego: 1 – zbiornik; 2 – element wykonawczy regulatora pompy; 3 – pompa; 4 – filtr; 5 – zawór zwrotny; 6 – zasobnik hydrauliczny; 7 – siłownik; 8 – rozdzielacz; 9 – zawór suwakowy regulatora pompy; 10 – przewody ciśnieniowe; Q_p – natężenie przepływu z pompy; Q_{zh} – natężenie przepływu z zasobnika; Q_o – natężenie przepływu do odbiornika; Q_c – natężenie przepływu na przecieki i chłodzenie wewnętrzne; p , p_t , p_z – ciśnienie w przewodach układu w linii tłoczenia i zlewu; w – ciśnienie zadane; L – przemieszczenie tłoka siłownika

Układ ten można opisać następującymi równaniami [2, 3]:

$$z - Q_C - Q_{ZH} - Q_O - Q_P = k_i \frac{dp}{dt} \quad (13)$$

$$Q_O = k_O p \quad (14)$$

$$Q_{ZH} = k_{ZH} \frac{dp}{dt} \quad (15)$$

$$Q_C = k_C p \quad (16)$$

$$Q_P = \frac{k_R}{T_i} \int (w - p) dt \quad (17)$$

gdzie dodatkowo: k_i , k_O , k_{ZH} , k_C , k_R – współczynniki wzmocnienia układu hydraulicznego; T_i – stała czasowa regulatora; z – zakłócenie od otoczenia (np. gwałtowna zmiana prędkości obrotowej).

Z równań (13÷17) opisujących rozpatrywany układ hydrauliczny wyznacza się transmitancje:

$$G_i = \frac{P}{Z - Q_C(s) - Q_{ZH}(s) - Q_O(s) - Q_P(s)} = \frac{k_i}{s} \quad (18)$$

$$G_O = \frac{Q_O(s)}{P} = k_O \quad (19)$$

$$G_{ZH} = \frac{Q_{ZH}(s)}{P} = k_{ZH} s \quad (20)$$

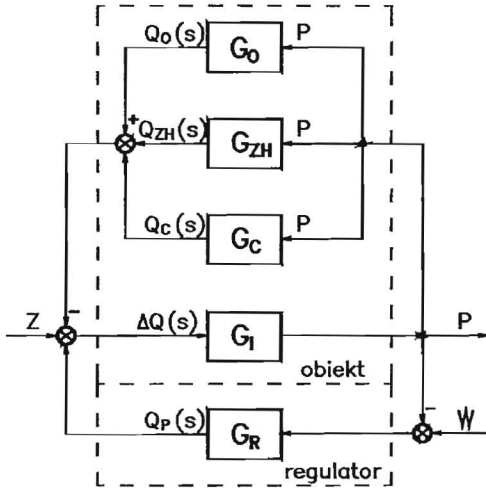
$$G_C = \frac{Q_C(s)}{P} = k_C \quad (21)$$

$$G_R = \frac{Q_P(s)}{W - P} = \frac{k_R}{T_i s} \quad (22)$$

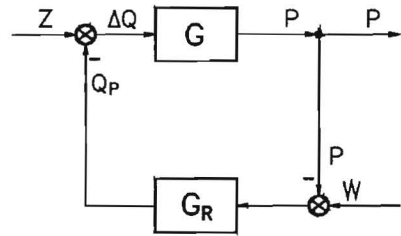
gdzie: G_i – transmitancja instalacji (przewodów) układu hydraulicznego; G_O – transmitancja odbiornika; G_{ZH} – transmitancja zasobnika hydraulicznego; G_C – transmitancja przecieków; G_R – transmitancja pompy-regulatora; W , P , Z – transformaty sygnałów w , p i z ; s – zmienna zespolona.

Na podstawie schematu funkcjonalnego układu przedstawionego na rysunku 2 oraz zależności (13÷17) a także transmitancji (18÷22) można zbudować schemat blokowy układu – rys. 3.

Układ z rysunku 3 można sprowadzić do układu regulacji o postaci z rys. 1 – rys. 4.



Rys. 3. Schemat blokowy układu hydraulicznego



Rys. 4. Układ regulacji układu hydraulicznego

Transmitancję G (rys. 4) w prosty sposób wyznacza się z transmitancji G_I (tor główny) i równoległe połączonych transmitancji G_C , G_{ZH} i G_O (tor sprzężenia zwrotnego), (rys. 3).

Przyjmie ona postać:

$$G = \frac{G_I}{1 + G_I(G_O + G_{ZH} + G_C)} \quad (23)$$

i dalej:

$$G = \frac{b_0}{s + a_0} \quad (24)$$

Transmitancja G_R pompy-regulatora (rys. 4) ma postać:

$$G_R = \frac{b_{0R}}{s} \quad (25)$$

gdzie dla wzorów (24) i (25) jest:

$$b_0 = \frac{k_i}{1 + k_i k_{ZH}}$$

$$a_0 = b_0(k_C + k_O)$$

$$b_{0R} = \frac{k_R}{T_i}$$

Ostatecznie poszukiwane transmitancje układu H_Z i H_W i wynoszą:

$$H_Z = \frac{G}{1 + GG_R} = \frac{b_0 s}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \quad (26)$$

$$H_W = \frac{GG_R}{1 + GG_R} = \frac{b_0 b_{0R}}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \quad (27)$$

Następnie zgodnie z wzorami (3÷6) wyznacza się funkcje wrażliwości konstrukcyjnej:

$$W_G^{H_Z} = \frac{G}{H_Z} \frac{d}{dG} H_Z = \frac{G}{H_Z} \frac{1}{(1 + GG_R)^2} = \frac{1}{1 + GG_R} = \frac{s(s + a_0)}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} W_{G_R}^{H_Z} &= \frac{G_R}{H_Z} \frac{d}{dG_R} H_Z = \frac{G_R}{H_Z} \frac{-G^2}{(1 + GG_R)^2} = -\frac{GG_R}{1 + GG_R} = \\ &= -\frac{b_0 b_{0R}}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \end{aligned} \quad (29)$$

$$W_G^{H_W} = \frac{G}{H_W} \frac{d}{dG} H_W = \frac{G}{H_W} \frac{G_R}{(1 + GG_R)^2} = \frac{1}{1 + GG_R} = \frac{s(s + a_0)}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} W_{G_R}^{H_W} &= \frac{G_R}{H_W} \frac{d}{dG_R} H_W = \frac{G_R}{H_W} \frac{G}{(1 + GG_R)^2} = \frac{1}{1 + GG_R} = \\ &= \frac{s(s + a_0)}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \end{aligned} \quad (31)$$

Z wzorów (28÷31) wynika, że dla rozpatrywanego układu wrażliwość konstrukcyjna na zakłócenia jest różna od zmian regulatora i obiektu, a wrażliwość na wielkość zadaną jest identyczna ze zmianami regulatora i obiektu. Daje to zatem możliwość selekcji sygnałów otoczenia.

Dalej z transmitancji H_Z i H_W wyznacza się funkcje wrażliwości parametrycznej kolejno od zmiany a_0 , b_0 i b_{0R} . Dla rozpatrywanego układu przyjmują one postać:

$$W_{a_0}^{H_Z} = \frac{a_0}{H_Z} \frac{d}{da_0} H_Z = \frac{a_0}{H_Z} \frac{-b_0 s^2}{(s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R})^2} = \frac{-a_0 s}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \quad (32)$$

$$W_{b_0}^{H_Z} = \frac{b_0}{H_Z} \frac{d}{db_0} H_Z = \frac{b_0}{H_Z} \frac{s^2(s + a_0)}{(s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R})^2} = \frac{s(s + a_0)}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \quad (33)$$

$$W_{b_{0R}}^{H_Z} = \frac{b_{0R}}{H_Z} \frac{d}{db_{0R}} H_Z = \frac{b_{0R}}{H_Z} \frac{-b_0^2 s}{(s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R})^2} = \frac{-b_0 b_{0R}}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \quad (34)$$

$$W_{a_0}^{H_W} = \frac{a_0}{H_W} \frac{d}{da_0} H_W = \frac{a_0}{H_W} \frac{-b_0 b_{0R} s}{(s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R})^2} = \frac{-a_0 s}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \quad (35)$$

$$W_{b_0}^{H_W} = \frac{b_0}{H_W} \frac{d}{db_0} H_W = \frac{b_0}{H_W} \frac{s(b_{0R} s + a_0 b_{0R})}{(s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R})^2} = \frac{s(s + a_0)}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \quad (36)$$

$$W_{b_{0R}}^{H_W} = \frac{b_{0R}}{H_W} \frac{d}{db_{0R}} H_W = \frac{b_{0R}}{H_W} \frac{b_0 s(s + a_0)}{(s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R})^2} = \frac{s(s + a_0)}{s^2 + a_0 s + b_0 b_{0R}} \quad (37)$$

Z wzorów (32÷37) wynika, że dla tego rozpatrywanego układu wrażliwość parametryczna na zakłócenia jest różna od zmian poszczególnych parametrów obiektu i regulatora, a wrażliwość na wielkość zadaną jak się okazuje może być odpowiednio wyrażona wrażliwością od zakłóceń.

W danym szczególnym przypadku (gdy obiekt jest inercyjny, a regulator całkujący) do oceny wrażliwości konstrukcyjnej i parametrycznej układu wystarczy wyznaczyć jej przebiegi w przestrzeni czasu i częstotliwości tylko dla wybranych jej operatorowych postaci – będą to wrażliwości opisane wzorami (29), (30) i (32).

Dla układu hydraulicznego z rysunku 2, który jest częścią składową instalacji hydraulicznej samolotu MIG-21, wartości parametrów a_0 , b_0 i b_{0R} podano w tablicy 1.

Tablica 1. Parametry obiektu i regulatora układu hydraulicznego (kg, daN, cm, cm³, s) [2, 3]

Lp	a_0	b_0	b_{0R}
1 (data1)	0,15	9,4	0,03
2 (data2)	0,15	9,4	0,0096
3 (data3)	0,15	60,0	0,03
4 (data4)	0,015	9,4	0,03

Funkcje wrażliwości układu hydraulicznego w przestrzeni czasu i częstotliwości przedstawiono na rysunkach 5, 6 i 7.

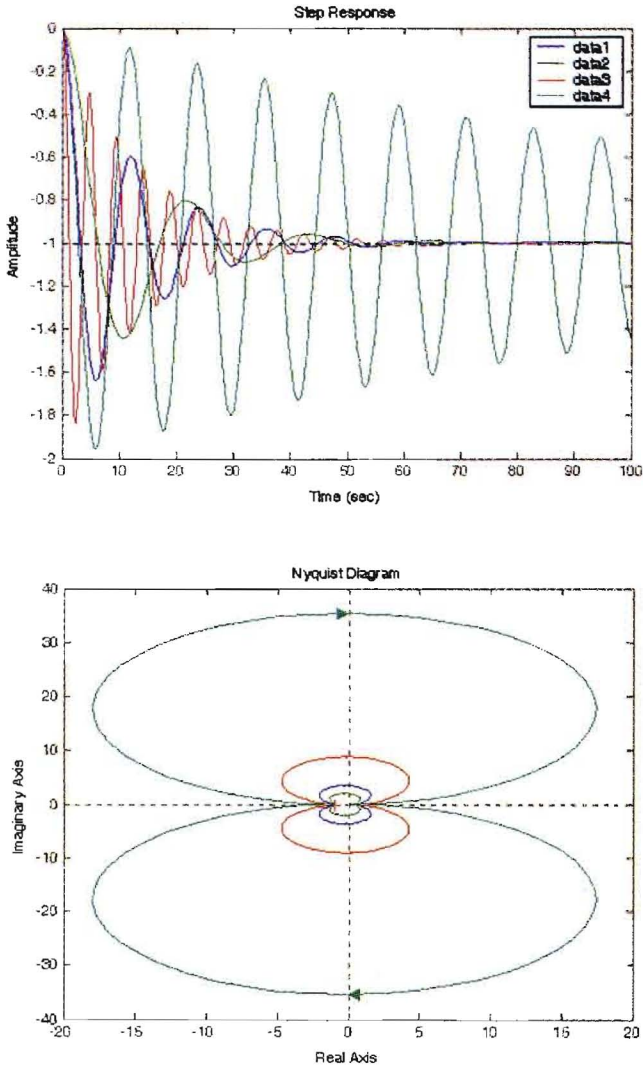
Analizę otrzymanych funkcji wrażliwości przeprowadza się wg ściśle określonych zasad:

- funkcja wrażliwości ma zawsze znak dodatni [5, 6],
- rozpatruje się różnice funkcji wrażliwości dla danego czasu (lub częstotliwości) (porównuje się wartości danej funkcji z innymi funkcjami wrażliwości,
- ważna informacja do planowania procesu diagnozowania jest tam, gdzie jest duża (bezwzględna) wartość różnic funkcji wrażliwości.

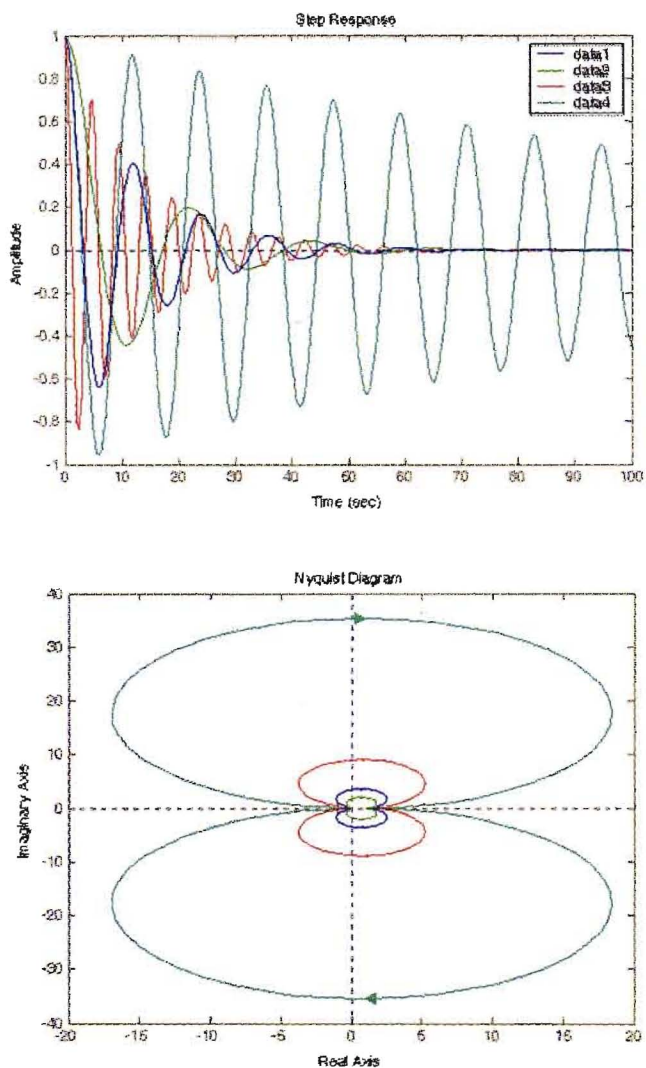
Z przebiegu funkcji wrażliwości (rys. 5, 6 i 7) widać, że:

- badania diagnostyczne powinny być realizowane podczas czynnego zdeterminowanego zakłócania obiektu lub podczas wprowadzania zdeterminowanych zmian wartości zadanej (dla układu hydraulicznego łatwiej jest zrealizować jej odpowiednie zakłócanie),
- w stanach ustalonych zmiany funkcji wrażliwości są równe zero, co świadczy o tym, że wtedy podatność diagnostyczna obiektu jest niedostateczna. Wystąpią zasadnicze problemy w procesie identyfikacji zmian parametrów a_0 , b_0 i b_{0R} ,
- najlepsza podatność diagnostyczna występuje wtedy, gdy funkcja harmoniczna wyjściowa jest przesunięta względem funkcji harmonicznej zakłóceniewej o 45°.

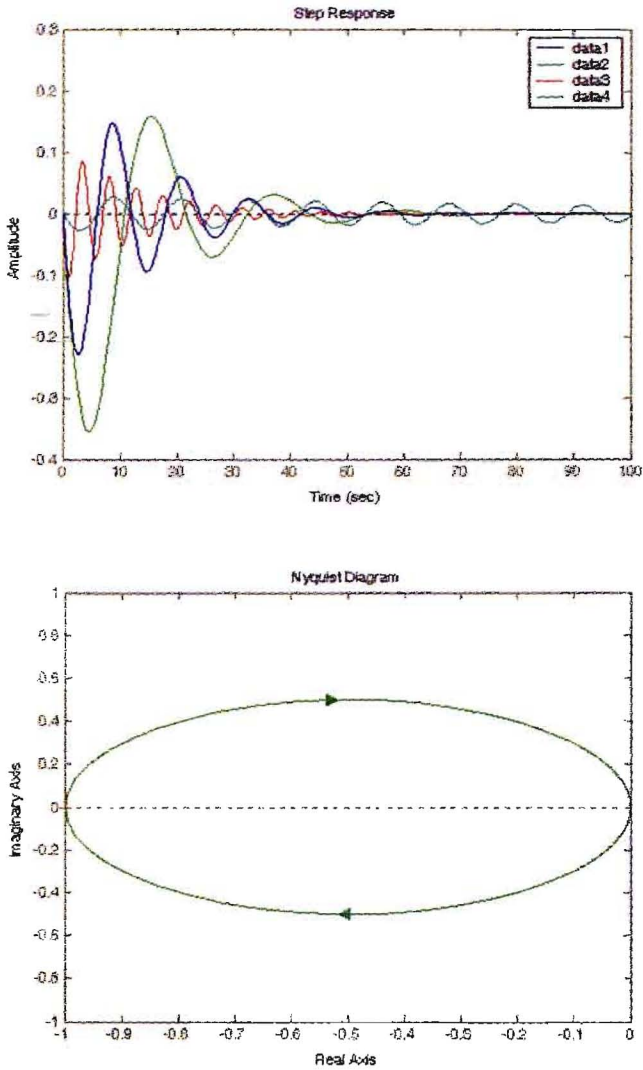
Wiedza wynikająca z przebiegu funkcji wrażliwości pozwala odpowiednio zaplanować przebieg badań diagnostycznych.



Rys. 5. Rzeczywiste postacie funkcji wrażliwości opisanej wzorem (29) dla danych opisanych w tabeli I



Rys. 6. Rzeczywiste postacie funkcji wrażliwości opisanej wzorem (30) dla danych opisanych w tabeli I



Rys. 7. Rzeczywiste postacie funkcji wrażliwości opisanej wzorem (32) dla danych opisanych w tabeli I

Podsumowanie

Istotnym elementem procesu diagnozowania są badania diagnostyczne. Prawidłowo zaplanowane i zrealizowane badania diagnostyczne decydują o efektywności całego procesu diagnozowania. Stąd dużo uwagi poświęca się przeprowadzaniu badań diagnostycznych. Dostrzeżono, że w procesie tym szczególną przydatność wykazują funkcje wrażliwości konstrukcyjnej i parametrycznej. Na przykładzie układu hydraulicznego pokazano sposób wykorzystania funkcji wrażliwości do zorganizowania eksperymentu czynnego będącego główną częścią badań diagnostycznych. Zasygnalizowano też, że podczas eksperymentu biernego (brak zmian funkcji wrażliwości) diagnozowanie układu będzie nieskuteczne.

Literatura

1. Antoniewicz J.: Automatyka, WNT, Warszawa, 1973.
2. Lindstedt P.: Diagnozowanie lotniczych układów hydraulicznych i silników turbinowych w aspekcie antropomorficznym. Prace Naukowe ITWL 321/94, Wydawnictwa ITWL, Warszawa, 1994.
3. Lindstedt P.: Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy, Wydawnictwo Naukowe ASKON, Warszawa, 2002.
4. Lipski J.: Napędy i sterowanie hydrauliczne, WKŁ, Warszawa, 1977.
5. Łukomski B.: Wrażliwość parametryczna układu automatycznej regulacji prędkości obrotowej dwuwirnikowego lotniczego turbinowego silnika odrzutowego w aspekcie diagnostyki technicznej, ZEM PAN, Zeszyt 2, PWN, 1976.
6. Pełczewski W.: Teoria sterowania, WNT, Warszawa, 1980.

THE SENSITIVITY FUNCTIONS IN PROCESS OF THE ORGANIZATION OF DIAGNOSTIC RESEARCH OF THE TECHNICAL OBJECTS

Abstract: In the process of organization of the active experiment in the process of diagnostic research, fundamental part take the constructional and parametric sensitivity functions. The constructional and parametric sensitivity functions for hydraulic system has been evaluated. From the analysis of course obtained sensitivity functions was determined, that during passive experiment the diagnosing will be ineffective and that during

active experiment hydraulic system must be observed at the moment when the disturbance is introduced and when output harmonic signal related to input harmonic signal is displaced about 45° .

Keywords: engineering diagnostics, diagnostic research, sensitivity functions

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

Michał Łukaszuk¹, Waldemar Kołodziejczyk²

DOKŁADNOŚĆ POMIARU TEMPERATURY ZA POMOCĄ TERMoeLEMENTÓW

Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono metodę pomiaru temperatury za pomocą termoelementów. Zaprezentowano wielopunktowy układ pomiarowy, wyspecyfikowano podstawowe właściwości metrologiczne przyrządu pomiarowego i termoelementów oraz podano źródła zakłóceń i błędów pomiarowych. Zaproponowana metoda kalibracji termoelementów umożliwia zmniejszenie błędu pomiarowego. W pracy oszacowano graniczny błąd pomiaru temperatury przed kalibracją i po kalibracji termoelementów.

Słowa kluczowe: pomiar temperatury, termoelement, błąd pomiaru, kalibracja

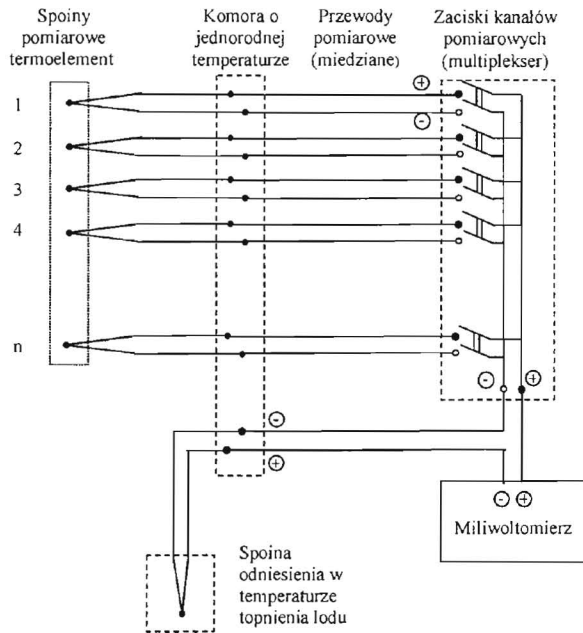
Wprowadzenie

W wielu dziedzinach nauki i techniki realizowane są badania eksperymentalne, w których kluczową rolę odgrywa precyzyjny pomiar temperatury. Okazuje się, że w laboratoriach, także w diagnostyce maszyn i urządzeń powszechnie stosuje się termoelementy, ponieważ charakteryzują się one takimi zaletami, jak np. niewielkie wymiary, mała stała czasowa. Nie oznacza to jednak, że te czujniki są pozbawione jakichkolwiek wad. Oprócz dużej podatności sygnału na zakłócenia, wadą jest niedokładny pomiar temperatury porównywalnej z temperaturą otoczenia, co jest konsekwencją odchyłki termoelementu dopuszczonej przez Polską

¹ Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, ul. Wiejska 45C, 15–351 Białystok.

² Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej, Katedra Mechatroniki, ul. Wiejska 45C, 15–351 Białystok.

Normę PN-EN 60584 [1]. Analizę błędów pomiarowych przeprowadzono na przykładzie wielopunktowego układu pomiaru temperatury przy użyciu termoelementów z jedną, wspólną spoiną odniesienia [2], [3], jak to pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat wielopunktowego układu do pomiaru temperatury [2]

W tej pracy, ze względu na wygodę i powszechność występowania jednostki w publikacjach, temperaturę podawano w $^{\circ}\text{C}$.

Przedstawiony wyżej układ przeznaczony jest m.in. do badania procesów topnienia i zestalania ciał stałych w przestrzeniach zamkniętych (pomiar strumienia ciepła dostarczonego i odebranego, temperatury powierzchni ścianek grzejnych i chłodzących). Temperatura przemiany fazowej badanej substancji wynosi ok. $28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Układ pomiarowy powinien dokonywać pomiarów z małym błędem pomiarowym – w przedziale $18 - 49\text{ }^{\circ}\text{C}$. Wartość napięcia odpowiadająca temu zakresowi temperatury oraz przyjętej temperaturze odniesienia $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ mieści się w przedziale od 0.718 do 1.98 mV . Przyjmując dopuszczony przez Polską Normę błąd czujnika ok. 0.061 mV ($1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) w zakresie temperatury od -40 do $375\text{ }^{\circ}\text{C}$) uzyskujemy błąd względny odpowiednio od 8.5 do $3.1\text{ }\%$. Poprawę dokładności

można osiągnąć dokonując kalibracji termoelementów względem źródła temperatury przyjętego za wzorzec. Dla uzyskania możliwie największej dokładności pomiarów postawione zadanie wymagało przeanalizowania właściwości metrologicznych przyrządu pomiarowego oraz zastosowanych termoelementów.

I. Właściwości układu pomiarowego

Pomiar temperatury w układzie przedstawionym na rysunku 1 polega na pomiarze napięcia elektrycznego (siły elektromotorycznej SEM – w dalszej części artykułu nazywanej napięciem) będącego miarą różnicy temperatury badanej i temperatury odniesienia. Źródło temperatury odniesienia musi charakteryzować się dokładnie znaną i stałą w czasie temperaturą (zwykle jest to temperatura topnienia lodu). Do stabilizacji temperatury odniesienia przy długotrwałych pomiarach zastosowano układ opisany w pracy [4]. Przyrost temperatury odniesienia w okresie 7 dni wynosi 0.004 [°C]. Do pomiaru napięcia wykorzystano odpowiednio skonfigurowany multimetr. Rolę układu przełączającego pełnił multiplekser.

I.1. Właściwości metrologiczne przyrządu pomiarowego

Do pomiaru napięcia elektrycznego zastosowano przyrząd na bazie systemu VXI E1421B (main frame) z multimetrem E1412A [5] i multiplekserem E1476A [6]. Niepewność wskazań multimetru w wykorzystywanym zakresie pomiarowym 100 [mV] w temperaturze otoczenia 23 ± 5 [°C] oblicza się z zależności podanej przez producenta: $\pm(0.005 [\%] \text{ wartości odczytanej} + 0.0035 [\%] \text{ wartości zakresu})$ dla okresu od 90 dni do roku po kalibracji. Ze względu na pośredni pomiar temperatury w postaci sygnału napięciowego rzędu kilku miliwoltów należy bardzo starannie dobrać parametry pracy przyrządu pomiarowego, mając na uwadze dokładny pomiar. Na dokładność pomiaru małych napięć mają wpływ następujące parametry konfigurujące multimetr:

- NPLC (z ang. Number Power Line Cycle) – całkowita wielokrotność okresu przebiegu sinusoidalnego napięcia zasilającego (w Polsce 1/50 [s]). Wartość ta ma wpływ na czas pomiaru oraz stopień eliminowania zakłóceń pochodzących z sieci zasilającej i występujących na wejściu przyrządu pomiarowego. Duże wartości NPLC wydłużają czas pomiaru, zwiększając jednak zarazem dokładność odczytu. Dla przykładu: parametr 100 NPLC ustala czas pomiaru: $100 \times 1/50$ [s] = 2 [s], oraz wprowadza tłumienie zakłóceń 100 [dB]. Należy

przy tym pamiętać, że wahania częstotliwości sieci zasilającej mają negatywny wpływ na dokładność pomiaru.

- Input R (impedancja wewnętrzna przyrządu pomiarowego). Ze względu na pomiar małej wartości SEM (0.718 do 1.98 [mV]) dokładność pomiaru poprawia się poprzez ustawienie bardzo dużej impedancji wewnętrznej multimetru (> 10 [G Ω]).
- Auto zero – parametr umożliwiający automatyczne zerowanie napięcia występującego na wejściu pomiarowym multimetru przed każdym pomiarem lub jednorazowo przed serią pomiarów. Uruchomienie tej opcji wydłuża dwukrotnie czas pomiaru.

1.2. Właściwości termoelementów

W skład badanego toru pomiarowego wchodzi trzy termoelementy o charakterystyce typu K o długości 100 [mm] wykonane w 1 klasie dokładności. Czujniki są wykonane przez firmę Czaki Thermo-Product z Raszyna [7] i oznaczone symbolem TP-201K-1b-100-1,0. Norma dopuszcza błąd czujnika 1.5 [°C] w zakresie temperatury od -40 do 375 [°C] w 1 klasie dokładności.

2. Źródła zakłóceń i niepewności przy pomiarze termoelementami

Ze względu na niski poziom, sygnał napięciowy otrzymywany z termoelementów jest podatny na zakłócenia zewnętrzne. Na dokładność odczytu mierzonego napięcia ma również wpływ niepewność pomiaru, która zależy od parametrów metrologicznych wykorzystanego przyrządu pomiarowego.

2.1. Niepewności wskazania przyrządu pomiarowego

Niepewności wyniku otrzymanego za pomocą przyrządu pomiarowego można podzielić na dwie grupy, przy czym kryterium podziału stanowi sposób, w jaki szacowane są wartości tych niepewności, które mogą być wyznaczone metodą typu A oraz typu B [8], [9]. Pierwszy typ niepewności jest szacowany za pomocą metod statystycznych na podstawie serii pomiarów powtarzanych w tych samych warunkach. Należy tu dodać, że niepewność wyznaczona metodą typu A zmniejsza się wraz z liczbą pomiarów w serii. Niepewność wyznaczona metodą typu B nie posiada tej cechy i wyznacza się ją innymi sposobami. Zwykle producent sprzętu

podaje granice zmienności tej niepewności w zależności m. in. od czasu po ostatniej kalibracji i zakresu pomiarowego. Niepewność ta zależy również od temperatury otoczenia.

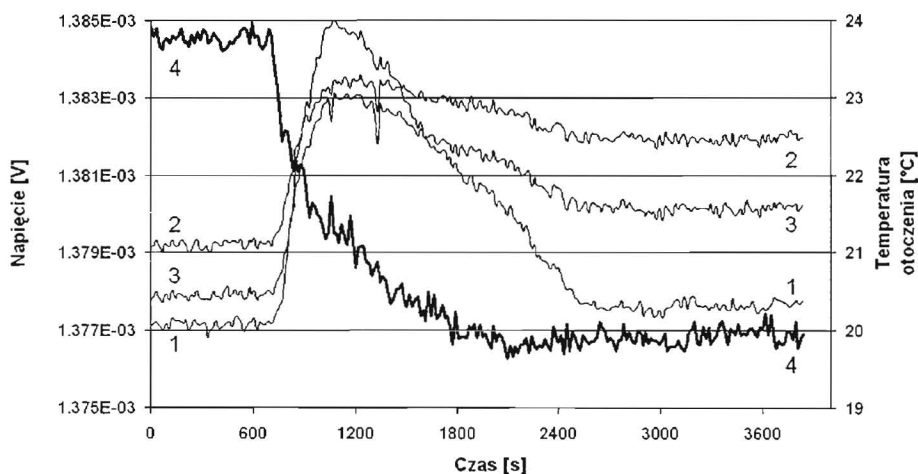
2.2. Źródła zakłóceń i innych niedokładności

Podstawowym źródłem zakłóceń przy pomiarze temperatury za pomocą termoelementów są sprzężenia z siecią elektryczną o częstotliwości 50[Hz].

Kolejny czynnik to wszelkie odbiorniki mocy elektrycznej emitujące zakłócenia elektromagnetyczne, które – poprzez pętle utworzone z przewodów sygnałowych i prowadzone z czujników do przyrządu pomiarowego – dostają się na wejście pomiarowe. Nie do pominięcia jest wpływ pasożytniczych napięć występujących na stykach elektrycznych w całym torze pomiarowym, które są funkcją temperatury otoczenia.

Na rysunku 2 zobrazowano wpływ zmiany temperatury otoczenia o około $\Delta t = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ na odczyty wartości napięcia na badanych termoelementach. Na podstawie tego wykresu można wyciągnąć wniosek, że dokonując pomiarów temperatury (szczególnie niedużych jej wartości), należy zapewnić stabilność temperatury otoczenia.

Jako zakłócenie można również traktować odchyłkę źródła temperatury odniesienia oraz źródła temperatury przyjętych do kalibracji.



Rys. 2. Wpływ temperatury otoczenia na wartość napięcia zarejestrowanego na termoelementach: 1, 2, 3 – odczyty z termoelementów, 4 – temperatura otoczenia

3. Oszacowanie błędu granicznego pomiaru temperatury

Korzystając z podanych poprzednio danych dotyczących niedokładności pomiaru napięcia przez multimetr oraz niedokładności termoelementu, można oszacować błąd graniczny pomiaru temperatury w podanym zakresie wg zależności:

$$\Delta_{\max} t = \Delta_{\max} \bar{V} \cdot K + \Delta_{\max} t_{tc} \quad (1)$$

$$\Delta_{\max} \bar{V} = \Delta_{s \max} \bar{V} + \Delta_{R \max} \bar{V}, \quad (2)$$

$$\Delta_{s \max} \bar{V} = 0.005\% \cdot V_w + 0.0035\% \cdot V_{zp}, \quad (3)$$

$$\Delta_{R \max} = 4 \cdot s(\bar{V}), \quad (4)$$

gdzie: $\Delta_{\max} t$ – błąd graniczny pomiaru temperatury [$^{\circ}\text{C}$],

$\Delta_{\max} \bar{V}$ – graniczny błąd pomiaru napięcia (na poziomie ufności 99.99%) [V],

K – czułość termoelementu w temperaturze mierzonej wg PN-EN 60584 [$^{\circ}\text{C}/\text{V}$],

$\Delta_{\max} t_{tc}$ – graniczny błąd termoelementu [$^{\circ}\text{C}$],

$s(\bar{V})$, $\Delta_{R \max} \bar{V}$ – odchylenie standardowe wyznaczone metodą typu A i błąd graniczny (na poziomie ufności 99.99%) [V],

$\Delta_{s \max} \bar{V}$ – błąd graniczny pomiaru napięcia wyznaczony metodą typu B (na poziomie ufności 99.99%) [V],

V_w , V_{zp} – napięcie odpowiadające temperaturze spiny pomiarowej oraz zakres pomiarowy multimetru [V].

Wyznaczony w ten sposób błąd graniczny pomiaru temperatury przyjmuje wartość:

$$\Delta_{\max} t = 0.1 + 1.5 \text{ } [^{\circ}\text{C}], \quad (5)$$

która składa się z błędu granicznego przyrządu pomiarowego o wartości 0.1 [$^{\circ}\text{C}$] oraz błędu granicznego termoelementu – 1.5 [$^{\circ}\text{C}$]. Oznacza to, że błąd względny w zakresie pomiarowym ma odpowiednio wartość od 8.9 do 3.3 [%]. Taki rezultat może być satysfakcjonujący w przypadku dokonywania pomiarów mniej dokładnych. Chcąc jednak poprawić dokładność pomiaru temperatury w wymienionym przedziale należałoby przeprowadzić kalibrację termoelementów ze względu na to, że graniczny błąd termoelementu $\Delta_{\max} t_{tc}$ ma największy udział w granicznym błędzie pomiaru temperatury (5).

Na podstawie wartości wyliczonego błędu granicznego $\Delta_{\max} t$ można również wyciągnąć wniosek, że dokonując pomiarów wyższych temperatur niż założono, można uzyskać dużo mniejsze wartości niepewności względnych.

4. Kalibracja termopar

Ze względu na duży błąd wykonania dopuszczony przez wymienioną tu już Normę, poprawa dokładności pomiaru temperatury w zakresie od 18 do 49 [°C] wymaga przeprowadzenia kalibracji termoelementów z wykorzystaniem dostępnych źródeł temperatury o dużej dokładności.

4.1. Przebieg kalibracji i analiza wyników

W celu przeprowadzenia kalibracji termopar wykorzystano ultratermostat Haake F6-35 o dokładności stabilizacji temperatury równej 0.01 [°C]. W dalszej analizie błędów zakłada się pomijalnie mały błąd bezwzględny źródła temperatury. Badane termoelementy zanurzono w termostatowanej wodzie na długości około 80[mm]. Do kalibracji wykorzystano opisany poprzednio układ pomiarowy złożony z trzech termoelementów w temperaturze otoczenia 20 ± 0.2 [°C]. Kalibracji dokonano dla 13 wartości w podanym zakresie temperatury. We wszystkich przypadkach rejestrowano 30 próbek, przy czym dla każdej temperatury w stanie ustalonym. Z otrzymanych doświadczalnie zależności: temperatura kalibracji – napięcie ($t = f(V)$) wyznaczono krzywe aproksymujące w postaci wielomianu drugiego stopnia, które – wraz z granicznym błędem aproksymacji oraz granicznym błędem pomiaru temperatury – zostały przedstawione w tabeli 1. Otrzymane równania służą do wyznaczenia temperatury poprzez pomiar wartości napięcia termoelementów.

Tabela 1. Wyznaczone równania krzywych aproksymujących zależność temperatury od napięcia termoelementów ($t = f(V)$) wraz z błędami aproksymacji i granicznym błędem pomiaru temperatury

Numer termoelementu	Równania krzywej	Graniczny błąd aproksymacji	Graniczny błąd pomiaru temperatury
		[°C]	[°C]
1	$t(V) = -234461 \cdot V^2 + 25323 \cdot V + 0.5308$	0.047	0.14
2	$t(V) = -241851 \cdot V^2 + 25334 \cdot V + 0.4517$	0.032	0.12
3	$t(V) = -241685 \cdot V^2 + 25347 \cdot V + 0.4701$	0.036	0.13

Graniczny błąd pomiaru temperatury w przypadku kalibracji termoelementów wyznaczono przy założeniu, że: (1).wyznaczone współczynniki wielomianu są podane z zerowym błędem; (2).błąd przyjętego źródła temperatury jest do pominięcia. Stosowny wzór przybiera wtedy postać:

$$\Delta_{\max} t = \left| \frac{dt}{dV} \right| \cdot \Delta_{\max} \bar{V} + \Delta_{\max} t_{apr}, \quad (6)$$

gdzie: $\Delta_{\max} t$ – błąd graniczny pomiaru temperatury [°C],

$\frac{dt}{dV}$ – pochodna temperatury względem napięcia termoelementu,

$\Delta_{\max} \bar{V}$ – błąd graniczny pomiaru napięcia (na poziomie ufności 99.99%) [V],

$\Delta_{\max} t_{apr}$ – graniczny błąd aproksymacji [°C].

Wartość granicznego błędu aproksymacji wyznaczono na podstawie odchylenia standardowego $s(\Delta t)$ różnicy wartości temperatury wyliczonej z równania aproksymującego i temperatury wzorca dla każdego termoelementu na poziomie ufności 99.99%:

$$\Delta t_{apr} = 4 \cdot s(\Delta t), \quad (7)$$

gdzie: Δt_{apr} – graniczny błąd aproksymacji [°C],

$\Delta t = t(V) - t_{wz}$ – różnica wartości temperatury wyliczonej z równania aproksymującego i temperatury wzorca,

$t(V)$ – wartość temperatury liczona z równania krzywej aproksymującej [°C],

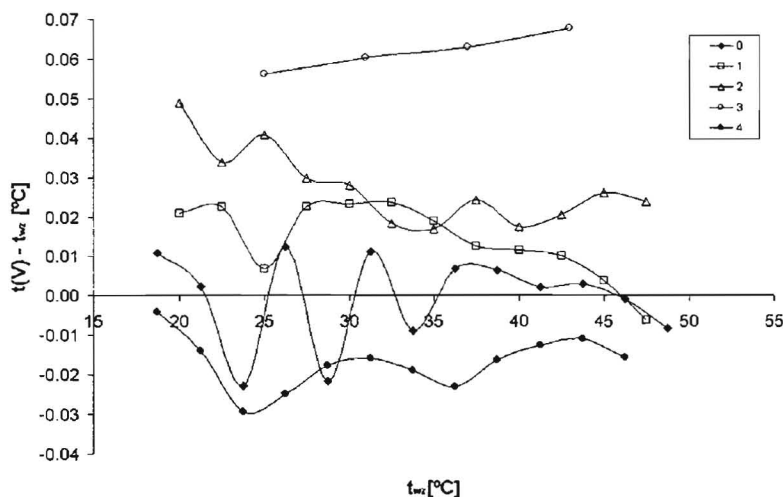
t_{wz} – temperatura wzorca [°C].

Graniczny błąd pomiaru temperatury po kalibracji termoelementów przyjmuje – średnio dla trzech termoelementów – wartość 0.13[°C]. Otrzymano więc błędy względne z przedziału od 0.72 do 0.27[%] odpowiednio dla zakresu mierzonej temperatury. Należy przypomnieć, że wyliczone błędy zostały wyznaczone przy założeniu pomijalnie małego błędu bezwzględnego źródła temperatury.

4.2. Sprawdzenie kalibracji

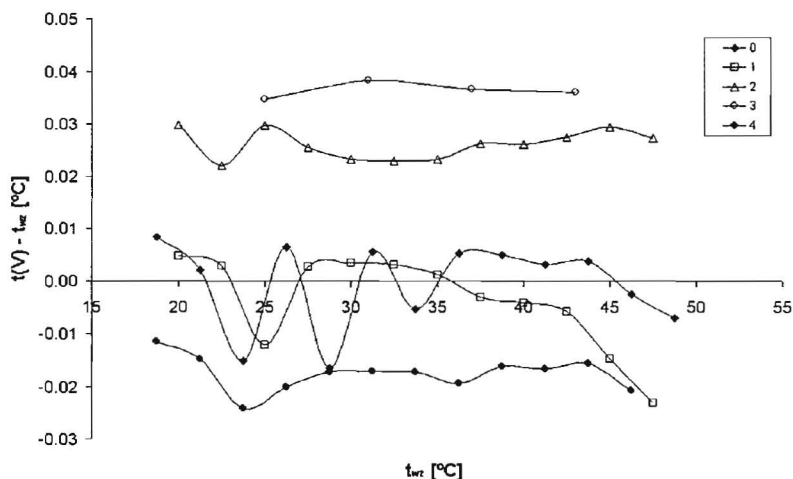
Sprawdzenie wyznaczonych równań kalibracyjnych (tabela 1) badanych termoelementów przeprowadzono po kilku dniach (seria 1, 2, 3) oraz po 30 dniach (seria 4) w różnych punktach krzywej kalibracyjnej.

Termoelement 1



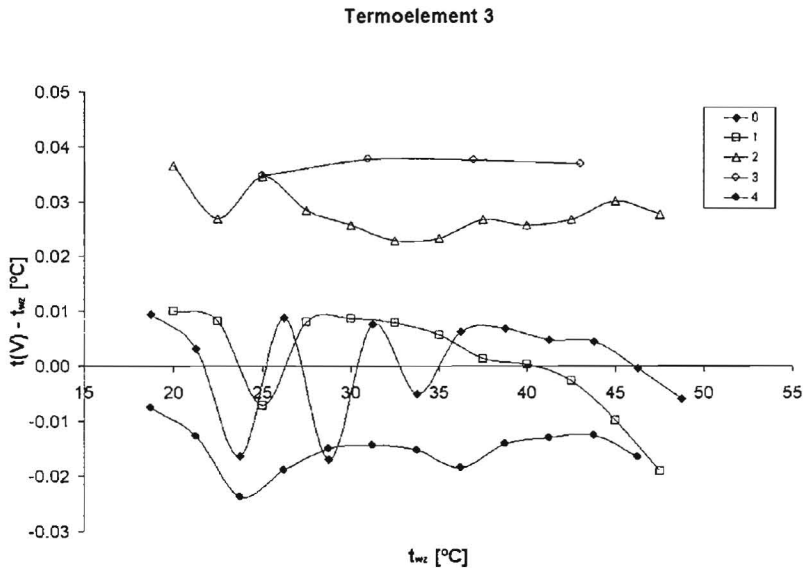
Rys. 3. Weryfikacja krzywej kalibracyjnej termoelementu 1: t_{wz} – temperatura wzorcowania, $t(V)$ – temperatura wyliczona z krzywej kalibracyjnej na podstawie pomiaru napięcia termoelementu, 0 – seria pomiarów użyta do kalibracji, 1, 2, 3, 4 – kolejne realizacje pomiarów temperatury

Termoelement 2



Rys. 4. Weryfikacja krzywej kalibracyjnej termoelementu 2: t_{wz} – temperatura wzorcowania, $t(V)$ – temperatura wyliczona z krzywej kalibracyjnej na podstawie pomiaru napięcia termoelementu, 0 – seria pomiarów użyta do kalibracji, 1, 2, 3, 4 – kolejne realizacje pomiarów temperatury

Celem sprawdzenia było zbadanie poprawności oszacowania błędów pomiarowych stosowanej metody pomiaru temperatury po krótkim i dłuższym okresie eksploatacji. Na rysunkach od 3 do 5 przedstawiono błędy pomiaru temperatury wyrażone różnicą $t(V) - t_{wz}$ w funkcji temperatury wzorcowania. Seria punktów o numerze 0 przedstawia błędy wyznaczone z równania kalibracyjnego w punktach użytych do kalibracji. Serie punktów (1, 2, 3) otrzymano jako błędy w kolejnych realizacjach pomiaru temperatury skalibrowanymi termoelementami.



Rys. 5. Weryfikacja krzywej kalibracyjnej termoelementu 3: t_{wz} – temperatura wzorcowania, $t(V)$ – temperatura wyliczona z krzywej kalibracyjnej na podstawie pomiaru napięcia termoelementu, 0 – seria pomiarów użyta do kalibracji, 1, 2, 3, 4 – kolejne realizacje pomiarów temperatury

Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że przeprowadzenie kalibracji termoelementów pozwala dziesięciokrotnie zmniejszyć błąd graniczny pomiaru temperatury. Przeprowadzona weryfikacja eksperymentalna potwierdziła poprawność oszacowanego błędu granicznego. Błąd otrzymany w kolejnych realizacjach pomiaru temperatury nie przekroczył wartości granicznej $\Delta_{max}t$. Należy

podkreślić, że błędy zostały wyznaczone na poziomie ufności 99.99% oraz dla zakresu temperatury otoczenia 23 ± 5 [°C]. Wszystkie serie pomiarów sprawdzających zostały przeprowadzone w temperaturze otoczenia 20 ± 0.2 [°C] równej temperaturze otoczenia przy kalibracji termoelementów. Błędy graniczne pomiaru temperatury zostały wyznaczone w odniesieniu do właściwości przyjętego wzorca temperatury. W przedstawionym materiale założono, że temperatura nastawiona w ultratermostacie i użyta jako wzorcowa nie jest obciążona błędem.

Literatura

1. Polska Norma PN-EN 60584.
2. Michalski L., Eckersdorf K.: *Pomiary temperatury*. WNT, Warszawa, 1986.
3. Terpiłowski J. i inni: *Termodynamika. Pomiary cieplne*. WAT, Warszawa, 1994.
4. Kołodziejczyk W., Łukaszuk M.: *Stabilizacja temperatury odniesienia podczas długotrwałych pomiarów temperatury*, Zeszyty Naukowe PB, Budowa i eksploatacja maszyn 10, Białystok, 2002.
5. HP E1312A/E1412A User's Manual and SCPI Programming Guide, Hewlett-Packard Company 1998.
6. E1476A 64-Channel, 3-Wire Multiplexer Module User's Manual, Agilent Technologies, Inc, 2000.
7. Czaki Thermo – Product, Katalog, Wydanie 4.
8. Piotrowski J., Kostyrko K.: *Wzorcowanie aparatury pomiarowej*, PWN, Warszawa, 2000.
9. *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Przewodnik, Główny Urząd Miar, Warszawa, 1999.

ACCURACY OF TEMPERATURE MEASUREMENT WITH THE USE OF THERMOELEMENTS

Abstract: Temperature measurement method with the use of thermoelements has been described in this paper. The presentation involves multipoint measure system, basic metrological properties of measuring instrument and thermoelements as well as sources of disturbances and measuring errors. The method of calibration of thermoelements makes

possible significant reduction of measuring error. Estimation of maximum temperature measurement error has been made before and after calibration.

Keywords: temperature measurement, thermocouple, measuring error, calibration

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

Paweł Ostapkowicz

DIAGNOZOWANIE WYCIEKÓW Z RUROCIĄGU MODELOWEGO PRZY ZASTOSOWANIU METODY GRADIENTOWEJ I METODY ŚLEDZENIA CZÓŁ FAL ROZPRĘŻENIOWYCH CIŚNIENIA

Streszczenie: Praca dotyczy diagnozowania wycieków z rurociągów. Celem pracy jest poznanie możliwości stosowanych obecnie metod diagnozowania wycieków, tj. metody gradientowej i metody opartej na śledzeniu czół fal rozprężeniowych na przykładzie ich użycia na obiekcie modelowym rurociągu. Prezentowane są ogólne charakterystyki obu metod oraz uzyskane przy ich zastosowaniu wyniki badań diagnostycznych z symulowanymi wyciekami. Badania były prowadzone na specjalnym stanowisku badawczym, z rurociągiem o długości 380 metra.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, rurociągi, wycieki, badania modelowe

Wstęp

Stosowane obecnie metody detekcji wycieków mają wiele wad. Pozwalają identyfikować jedynie znaczne wycieki i lokalizować je ze zgrubną dokładnością.

Poszukuje się zatem bardziej efektywnych rozwiązań i opracowuje nowe metody. Zanim każda nowo opracowana metoda zostanie wdrożona, wymaga przeprowadzenia licznych badań, w tym weryfikacji. Rozwiązaniem optymalnym jest przeprowadzenie takiej weryfikacji na obiekcie typu rzeczywistego. W przypadku rurociągów sprawa się jednak bardzo komplikuje, a to ze względu na ich duże

rozmiary, pracę przy wysokich ciśnieniach i znacznych wielkościach przepływu. Symulowanie wycieków w takich warunkach staje się przedsięwzięciem bardzo kosztownym, skomplikowanym i niebezpiecznym.

Alternatywę stanowią zatem badania modelowe i symulacje komputerowe. Szczególnie cenne mogą okazać się badania modelowe. Badania takie, pomimo trudności z odniesieniem ich wyników uzyskanych na obiekcie modelowym o pewnym stopniu podobieństwa do obiektu rzeczywistego, posiadają wiele zalet. Pozwalają dowolnie wybrać miejsca i wielkości symulowanych wycieków. Cechują je o wiele mniejsze koszty niż badania na obiekcie rzeczywistym, a także możliwość stosowania wielu metod porównawczych, dzięki czemu istnieje możliwość odnoszenia opracowywanej metody do rozwiązań już istniejących.

Skuteczne użycie w badaniach modelowych metod porównawczych wymaga jednak przeprowadzenia serii badań, dzięki którym możliwe będzie ustalenie porównawczych wartości wzorcowych i progowych. Dodatkowo serie takich badań pozwalają osobom budującym i obsługującym systemy diagnostyczne zdobyć cenne doświadczenia.

W niniejszej pracy zostały zaprezentowane wyniki serii takich badań dla wybranych metod porównawczych, tj.: metody gradientowej i metody opartej na śledzeniu czoł fali rozprężeniowych. Metody te są obecnie dość często stosowane w praktyce diagnostycznej, stąd też zostaną wykorzystane jako metody porównawcze w procesie weryfikacji opracowywanej metody słabych interakcji międzyobiektowych, opisaną w [2–9]. Ponadto planowane jest użycie obu metod jako elementów systemu diagnostycznego, którego koncepcja została opisana w innym artykule, zamieszczonym w tym zeszycie.

I. Charakterystyka metody gradientowej i metody opartej na śledzeniu czoł fali rozprężeniowych

Metoda gradientowa i metoda oparta na śledzeniu czoł fali rozprężeniowych należą do grupy metod wewnętrznych (analitycznych). Metody te funkcjonują w oparciu o pomiar podstawowych parametrów procesu przepływu (ciśnienia, natężenia przepływu i temperatury). Stąd opanowanie tych metod wymaga dysponowania niezbędną wiedzą z zakresu przepływu płynu przez kanały zamknięte, a w szczególności dysponowania opisami zjawisk towarzyszących wyciekom i ich wpływu na zmiany parametrów przepływu.

Na istniejących obiektach rurociągowych pomiar wspomnianych wielkości standardowo dokonywany jest na początku i na końcu rurociągu. W przypadku pomiaru ciśnienia i temperatury wskazane jest ponadto rozlokowanie kilku punktów pomiarowych wzdłuż obiektu. W praktyce punkty takie lokalizuje się przed wybranymi stacjami zasuw, które przy długości rurociągów dochodzącej do 200 km (pomiędzy kolejnymi stacjami pomp) rozmieszczone są zazwyczaj w odległości $20 \div 30$ km lub mniejszej, na odcinkach szczególnie narażonych na uszkodzenia.

W przypadku normalnej pracy rurociągu w warunkach stabilnego przepływu i tłoczenia jednego medium wartości ciśnienia i natężenia przepływu są w miarę stabilne. Dla przykładu wahania ciśnienia w punktach pomiarowych przy poziomie sygnału $3 \div 4$ Mpa wynoszą zazwyczaj około $30 \div 50$ kPa. Mogą one jednak osiągać wyższe wartości. Powodem wzrostu są zaburzenia przepływu medium wskutek zwiększenia chropowatości ścianek rurociągu, wahań średnicy, występowania osadów lub pęcherzy powietrznych, naporu hydrostatycznego oraz nierównomiernej pracy pomp. Dodatkowo sygnały mogą być zakłócanie szumami pomiarowymi, np. w przypadku przebiegu trasy rurociągu obok linii kolejowych, czy też występowania w pobliżu źródeł drgań lub działania czynników atmosferycznych.

Kolejnym istotnym parametrem jest temperatura medium. Jej rozkład wzdłuż rurociągu ustala się po kilku lub kilkunastu pierwszych kilometrach trasy i osiąga poziom temperatury gruntu. Temperatura wpływa bezpośrednio na obliczaną gęstość, której wahania wzdłuż rurociągu sięgają zazwyczaj $2 \div 4\%$.

1.1. Opis wycieku

Zakładając, że poziomo ułożony rurociąg ma na całej swej długości l jednakoową średnicę wewnętrzną $d(z)=const$ i że płynie w nim jeden czynnik, którego przepływ charakteryzuje stała wartość współczynnika tarcia $\lambda(z)=const$, natężenia strumienia $Q(z)=const$ i gęstości $\rho(z)=const$, a także, że ciśnienie i natężenie przepływu na początku rurociągu wynoszą odpowiednio p_{0p} i Q_{0p} – dla stanu ustalonego bez wycieku – wartość ciśnienia $p_0(z)$ wzdłuż rurociągu zmienia się liniowo według zależności (1) do wartości p_{0k} na końcu rurociągu (rys. 1a). Wartość natężenia przepływu dla końcowego przekroju rurociągu, zgodnie z założeniami, wyniesie $Q_{0k}=Q_{0p}$.

$$p_0(z) = p_{0p} - g_0 \cdot z \quad (1)$$

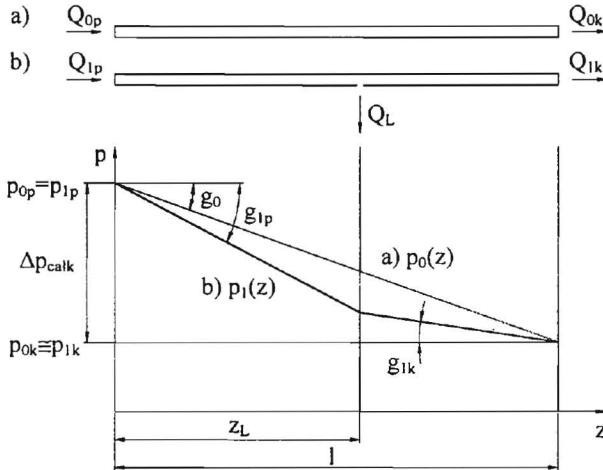
przy czym:

$$g_0 = -\frac{dp}{dz} = -\left(\frac{p_{0k} - p_{0p}}{l}\right) > 0$$

gdzie:

g_0 – średni gradient ciśnienia,

z – współrzędna wzdłuż długości określonego punktu rurociągu.



Rys. 1. Wykres spadku ciśnienia dla rurociągu: a) bez wycieku, b) z wyciekiem w punkcie z ; gdzie: Q_{0p} , Q_{0k} – natężenie przepływu na początku i na końcu rurociągu dla stanu bez wycieku; Q_{1p} , Q_{1k} – natężenie przepływu na początku i na końcu rurociągu dla stanu z wyciekiem; Q_L – natężenie wycieku; p_{0p} , p_{0k} – ciśnienie na początku i na końcu rurociągu dla stanu bez wycieku; p_{1p} , p_{1k} – ciśnienie na początku i na końcu rurociągu dla stanu z wyciekiem; z_L – miejsce wycieku; l – długość rurociągu

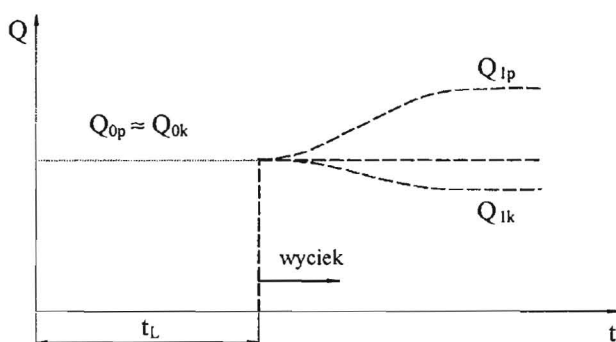
W przypadku pojawienia się wycieku o natężeniu Q_L w odległości z_L (rys. 1b) obserwuje się dwa zjawiska.

Pierwsze zjawisko polega na zmianie wartości ciśnienia wzdłuż rurociągu. W miejscu wycieku następuje spadek ciśnienia od wartości p_{0L} (przed wyciekiem) do wartości p_{1L} . Zmianie ulega także wartość ciśnienia p_{0p} do wartości p_{1p} , przy czym $p_{1p} - p_{0p} < 0$ (wielkość różnicy zależy głównie od charakterystyki pompy oraz natężenia i miejsca wycieku). Jeżeli się przyjmie, że posiada się pompę, której charakterystyka umożliwia utrzymanie stałej wartości ciśnienia $p_{1p} = p_{0p}$, a na końcu rurociągu utrzymane zostanie ciśnienie $p_{1k} = p_{0k}$, wykres spadku ciśnienia wzdłuż całego rurociągu dla stanu ustalonego z wyciekiem $p_1(z)$ będzie linią łamaną, którą tworzą dwie proste – rys. 1b.

Pojawienie się wycieku spowoduje także zmianę wartości natężenia przepływu medium (rys. 2). Dla stanu ustalonego z wyciekaniem na odcinku od początku rurociągu do miejsca wycieku natężenie przepływu wyniesie Q_{lp} , a na odcinku od miejsca wycieku do końca rurociągu będzie równe $Q_{lk} = Q_{lp} - Q_l$, przy czym $Q_{lp} > Q_{op}$, $Q_{lk} < Q_{ok}$, co wynika z pojawienia się wycieku i charakterystyki pracy pompy – zależności (2) i (3).

$$\text{dla } z < z_L : Q_l(z) = Q_{lp} \quad (2)$$

$$\text{dla } z > z_L : Q_l(z) = Q_{lp} - Q_l \quad (3)$$



Rys. 2. Wykres zmian natężenia przepływu; gdzie: Q_{op} , Q_{ok} – natężenie przepływu na początku i na końcu rurociągu dla stanu bez wycieku; Q_{lp} , Q_{lk} – natężenie przepływu na początku i na końcu rurociągu dla stanu z wyciekem; t_L – czas początku wycieku

Drugim obserwowanym zjawiskiem jest powstawanie i rozchodzenie się fal rozprężeniowych ciśnienia. Fale te powstają wskutek szybkiego spadku ciśnienia w miejscu, w którym nastąpił wyciek i rozchodzą się od tego miejsca w obu kierunkach rurociągu z prędkością dźwięku.

1.2. Metoda gradientowa

Metoda korzysta z opisanego zjawiska zmiany wartości ciśnienia wzdłuż rurociągu. Lokalizacji miejsca wycieku dokonuje się na podstawie wyznaczonych gradientów ciśnienia w stanach ustalonych przed i po zaistnieniu wycieku. Stąd należy dysponować przynajmniej czterema punktami pomiaru ciśnienia, z których po dwa powinny być usytuowane w początkowym i w końcowym odcinku rurociągu.

Dla przyjętych założeń w punkcie 2.1 oraz zgodnie z rysunkiem 1b – wykres spadku ciśnienia wzdłuż całego rurociągu dla stanu ustalonego z wyciekem $p_l(z)$ – opisują poniższe zależności:

$$\text{dla } z < z_L : p_l(z) = p_{lp} - g_{lp} \cdot z \quad (4)$$

$$\text{dla } z > z_L : p_l(z) = p_{lk} - g_{lk} \cdot (z - l) \quad (5)$$

gdzie:

g_{lp} – średni gradient ciśnienia na odcinku od początku rurociągu do miejsca wystąpienia wycieku,

g_{lk} – średni gradient ciśnienia na odcinku od miejsca wystąpienia wycieku do końca rurociągu,

przy czym:

$$\text{dla } z < z_L : g_{lp} > g_0$$

$$\text{dla } z > z_L : g_{lk} < g_0$$

Wiedząc, że wyznaczenie miejsca wycieku z_L sprowadza się do dokładnego określenia punktu przecięcia obu prostych opisanych zależnościami (4) i (5) otrzymuje się:

$$z_L = \frac{\Delta p_{calc} - g_{lk} \cdot l}{g_{lp} - g_{lk}} \quad (6)$$

przy czym:

$$\Delta p_{calc} = p_{lp} - p_{lk}$$

Ze względu jednak na to, że poszukuje się punktu przecięcia dwóch prostych o zbliżonych nachyleniach, w celu uniknięcia wrażliwości obliczeń na błędy pomiarowe zamiast gradientów używa się ich przyrostów, definiowanych następująco:

$$\text{dla } z < z_L : dg_p = g_{lp} - g_0 \quad (7)$$

$$\text{dla } z > z_L : dg_k = g_{lk} - g_0 \quad (8)$$

Zatem miejsce wycieku, który wystąpił pomiędzy początkowymi i końcowymi parami punktów pomiaru ciśnienia, może być wyznaczone z zależności:

$$z_L = l \left(1 - \frac{dg_p}{dg_k} \right)^{-1} + \frac{dp_p - dp_k}{dg_p - dg_k} \quad (9)$$

gdzie: z_L – miejsce wycieku; l – długość rurociągu; dg_p , dg_k – średni przyrost gradientu ciśnienia na odcinku od początku rurociągu do miejsca wystąpienia wycieku i na odcinku od miejsca wystąpienia wycieku do końca rurociągu; dp_p , dp_k – średnie przyrosty ciśnienia dla początkowego i końcowego przekroju rurociągu.

1.3. Metoda oparta na śledzeniu czoł fali rozprężeniowych

Metoda wykorzystuje opisane zjawisko powstawania i rozchodzenia się fali rozprężeniowych ciśnienia. Określenie miejsca wycieku przeprowadza się na podstawie obserwacji zmian wartości ciśnienia, pojawiających się najpierw w punktach pomiaru najbliższych położonych od miejsca wycieku, a następnie z pewnym opóźnieniem w kolejno odległych punktach pomiarowych.

Zgodnie z poczynionymi założeniami w punkcie 2.1, miejsce wycieku można wyznaczyć z zależności (10).

$$z_L = \frac{c_p z_{cz} - t_{cz} c_c c_k}{c_p + c_k} + z_{pcz} \quad (10)$$

gdzie: c_p , c_k – wyznaczona średnia prędkość dźwięku w transportowanym medium, dla części rurociągu położonych po obu stronach wycieku; z_{cz} – odległość między skrajnymi wewnętrznymi punktami pomiaru ciśnienia wzdłuż rurociągu, położonymi po obu stronach wycieku; t_{cz} – różnica czasu pomiędzy momentami przejścia czoł fali rozprężeniowych przez te punkty; z_{pcz} – współrzędna wspomnianego skrajnego punktu pomiaru ciśnienia, położonego w części rurociągu do miejsca wycieku.

W przypadku tej metody należy szczególnie zwrócić uwagę na częstość próbkowania sygnałów ciśnienia, która decyduje o błędzie, z jakim śledzone jest położenie czoła fali rozprężeniowej. Stąd należy przyjmować odpowiednio wysokie częstości próbkowania, rzędu kilkudziesięciu a nawet paru setek na sekundę.

Obie opisane metody służą do lokalizacji miejsca wycieku. Natężenie wycieku Q_L można natomiast określić na podstawie dokonywanej w czasie obserwacji zmian natężenia przepływu na początku i na końcu rurociągu:

$$Q_L = Q_{lp} - Q_{lk} \quad (11)$$

lub na podstawie pewnego modelu matematycznego rurowości [11], korzystając z obliczonych wartości średnich parametrów:

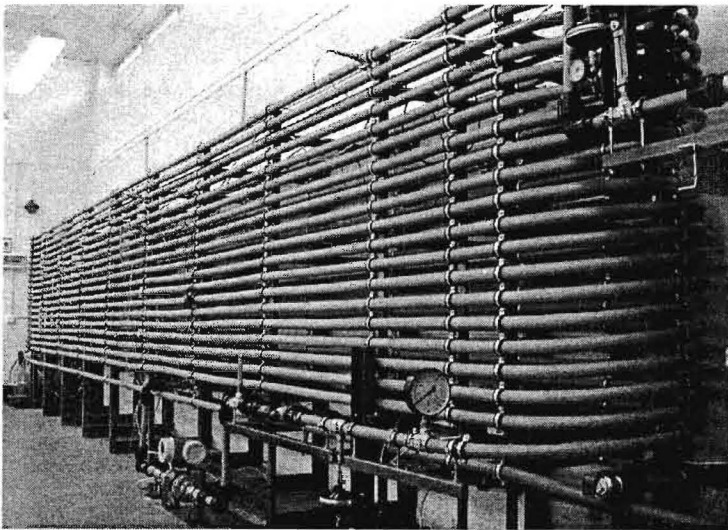
$$Q_L = Q_{lp} \left(1 - \sqrt{\frac{1 + dg_k / g_{so}}{1 + dg_p / g_{so}}} \right) \quad (12)$$

gdzie: m_3 – natężenie wycieku; m_p – natężenie przepływu na odcinku od początku rurowości do miejsca wycieku; g_{so} – gradient definiowany jako:

$g_{so} = \frac{p_p - p_k}{l}$, gdzie: p_p , p_k – wartości ciśnienia w początkowym i końcowym przekroju rurowości dla stanu z wyciekiem.

2. Badania modelowe

Badania modelowe prowadzone były na specjalnym stanowisku badawczym z rurowością modelową. Rurowość miał 380 m długości i średnicę wewnętrzną $d = 34$ mm, (rys. 3). Dokładny opis stanowiska można znaleźć w pracach [6, 8].



Rys. 3. Ogólny widok rurowości modelowej

Na rurociągu zainstalowano standardowe dla tego typu obiektu przyrządy i czujniki pomiarowe, umożliwiające pomiar natężenia przepływu, ciśnienia i temperatury. Dane o rozmieszczeniu czujników zamieszczono w tablicy 1.

Tab. 1. Rozmieszczenie przyrządów i czujników pomiarowych

pomiar	współrzędna długości[m]
przepływ objętościowy (przepływomierze elektromagnetyczne klasy 0,2)	-2,5; 380,5
ciśnienie (czujniki ciśnienia klasy 0,1)	1; 75; 141; 281; 335; 378
temperatura (termometry klasy 0,5)	wlot; wylot

W ramach badań z użyciem metody gradientowej i metody opartej na śledzeniu czoł fal rozprężeniowych przeprowadzono serie symulowanych wycieków, przy pracy obiektu z 90% wydatkiem pompy oraz następującymi wartościami parametrów przepływu:

- ciśnienie na wlocie rurociągu – około 6,5 bar,
- ciśnienie na wylocie rurociągu – około 0,5 bar,
- natężenie przepływu – około 125 l/min,
- temperatura medium – w przedziale 14÷19°C.

Wycieki były symulowane w kilku punktach wzdłuż rurociągu za pomocą układu kraniku upustowego, wyposażonego w dwupołożeniowy zawór oraz przelot z wymiennymi kryzami. Stąd natężenie wycieku regulowane było skokowo. Ponadto zawór dwupołożeniowy wyposażony był w czujniki krańcowe umożliwiające określenie momentu początku wycieku oraz czasu otwarcia zaworu. Do pomiaru wycieku użyto układu z menzurką.

3. Wyniki badań

Lokalizacji i identyfikacji symulowanych wycieków z zastosowaniem metody gradientowej i metody opartej na śledzeniu czoł fal rozprężeniowych dokonywano przy użyciu zależności i procedur podstawowych. W tabeli 2, 3, 4 i 5 przedstawiono wyniki uzyskane dla przypadku symulowania różnej wielkości wycieków w dwóch przykładowych punktach rurociągu, tj. o współrzędnej 155 m i 275 m, przy określonych częstościach próbkowania sygnałów pomiarowych. Oba punkty znajdowały się pomiędzy trzema pierwszymi i trzema ostatnimi punktami pomiaru ciśnienia. Obliczenia dla obu metod przeprowadzano mierząc ciśnienie dwoma

parami czujników. W pierwszym wariancie były to pary zewnętrzne, utworzone przez czujnik pierwszy i trzeci oraz czwarty i szósty, w drugim wariancie zaś pary wewnętrzne, utworzone przez czujnik drugi i trzeci oraz czwarty i piąty.

Tab 2. Wyniki lokalizacji symulowanych wycieków

miejsce wycieku [m]	próbkowanie [Hz]	przesunięcie przedziału po wycieku [s]	Lokalizacja miejsca wycieku [m]								
			A – metodą gradientową								
			B – metodą opartą na śledzeniu czoł fal rozprężeniowych								
			wielkość symulowanego wycieku [l/min] (% Q ₀)								
			17,98 (14,62)		9,18 (7,45)		5,54 (4,51)		1,90 (1,54)		
z zastosowaniem czujników zewnętrznych	z zastosowaniem czujników wewnętrznych	z zastosowaniem czujników zewnętrznych	z zastosowaniem czujników wewnętrznych	z zastosowaniem czujników zewnętrznych	z zastosowaniem czujników wewnętrznych	z zastosowaniem czujników zewnętrznych	z zastosowaniem czujników wewnętrznych				
155	20	A	1	152,9	155,6	153,3	156,6	150,5	147,3	146,3	167,5
			2	154,1	153,6	152,8	154,2	153,6	148,6	145,8	163,6
			3	154,2	153,5	152,6	154,4	153,7	148,4	149,7	161,9
			4	154,0	153,5	152,9	155,1	155,1	150,9	148,9	161,2
			5	154,0	153,6	153,1	156,0	155,4	153,1	148,7	161,7
			10	153,6	152,7	152,8	152,4	154,5	150,7	149,5	164,5
		B		152,2	156,3	152,2	156,3	152,2	158,6	152,2	132,7
	50	A	1	152,6	154,4	153,6	157,8	150,0	148,2	151,2	161,5
			2	154,2	152,6	153,6	155,6	152,4	148,8	151,3	162,0
			3	154,1	152,3	152,8	154,5	152,3	148,6	153,2	161,3
			4	154,0	152,3	153,0	155,2	153,4	150,5	152,2	160,3
			5	154,0	152,6	152,7	154,9	153,2	152,3	154,2	159,3
			10	154,0	153,1	153,2	154,8	152,4	150,0	151,3	161,2
		B		153,8	156,6	149,7	152,2	149,7	152,8	154,6	152,2
	100	A	1	152,5	154,1	153,2	157,5	150,1	149,1	148,8	157,5
			2	154,2	152,7	153,3	155,3	152,5	149,7	150,0	160,5
			3	154,1	152,5	152,7	154,4	152,3	149,3	152,9	160,4
			4	154,0	152,7	152,9	154,8	153,4	151,4	152,4	159,9
			5	154,1	152,8	152,7	154,7	153,4	152,3	154,1	160,0
			10	153,9	153,0	153,2	153,9	152,6	151,9	150,8	162,6
		B		151,7	150,2	149,7	152,5	154,2	155,1	154,6	148,0
	200	A	1	152,1	153,4	153,1	156,8	150,8	150,6	149,3	158,4
			2	154,0	152,5	153,3	154,6	153,2	151,3	151,0	161,4
			3	154,0	152,4	152,6	153,7	152,9	151,2	153,8	161,4
			4	154,1	152,8	152,9	154,2	154,0	153,3	153,7	160,6
			5	154,1	153,0	152,7	154,3	154,1	153,7	155,8	160,9
			10	154,0	153,0	153,4	153,9	153,2	153,2	152,1	164,5
		B		153,0	152,3	150,6	153,6	155,4	155,1	154,6	148,1

Tab 3. Wyniki lokalizacji symulowanych wycieków

miejsce wycieku [m]	próbkowanie [Hz]	przesunięcie przedziału po wycieku [s]	Lokalizacja miejsca wycieku [m]									
			A – metodą gradientową									
			B – metodą opartą na śledzeniu czoł fal rozprężeniowych									
			wielkość symulowanego wycieku [l/min] (% Q ₀)									
			13,42 (10,84)		6,19 (5,00)		4,30 (3,48)		1,54 (1,25)			
z zastosowaniem czujników zewnętrznych	z zastosowaniem czujników wewnętrznych	z zastosowaniem czujników zewnętrznych	z zastosowaniem czujników wewnętrznych	z zastosowaniem czujników zewnętrznych	z zastosowaniem czujników wewnętrznych	z zastosowaniem czujników zewnętrznych	z zastosowaniem czujników wewnętrznych	z zastosowaniem czujników zewnętrznych	z zastosowaniem czujników wewnętrznych			
275	20	A	1	273,3	275,4	274,0	283,3	274,1	275,6	263,8	270,1	
			2	272,8	273,1	272,4	278,7	273,8	270,3	268,5	274,7	
			3	272,5	272,5	272,5	279,6	273,6	269,8	267,4	277,7	
			4	272,1	273,3	272,8	278,5	273,8	268,6	265,3	277,7	
			5	272,5	274,1	272,6	278,0	271,7	269,2	268,3	279,3	
			10	272,5	273,7	272,1	274,9	275,9	274,2	268,6	280,4	
	50	A	1	273,6	274,6	273,5	279,9	273,6	277,7	271,6	271,3	
			2	272,8	272,1	271,9	275,3	272,9	272,2	272,6	271,1	
			3	272,9	272,1	272,3	275,1	272,7	272,5	272,6	273,0	
			4	272,5	272,3	272,8	275,3	273,7	272,6	271,4	269,4	
			5	272,6	272,2	272,8	275,1	271,7	270,7	271,0	269,0	
			10	273,0	272,0	271,6	274,3	274,3	273,1	269,8	257,5	
	100	A	1	273,8	275,0	273,7	280,1	274,0	278,3	273,4	272,4	
			2	272,8	272,1	271,9	275,2	273,1	272,6	274,5	273,8	
			3	272,9	272,0	272,3	274,9	273,0	272,2	273,6	273,4	
			4	272,5	272,1	272,7	275,0	273,8	273,5	272,4	271,8	
			5	272,5	272,2	272,5	274,5	271,8	271,9	273,1	274,9	
			10	272,9	272,5	271,6	273,8	274,4	274,8	272,8	265,5	
	200	A	1	274,0	275,2	274,0	280,7	274,4	278,5	274,3	269,9	
			2	272,9	272,1	272,1	275,7	273,7	273,3	275,5	271,9	
			3	273,1	271,9	272,4	275,4	273,5	272,4	274,8	270,6	
			4	272,6	271,9	273,0	275,5	274,3	273,3	273,4	269,1	
			5	272,7	272,0	272,6	274,8	272,6	271,7	273,9	272,5	
			10	272,9	272,4	271,8	274,7	274,6	274,4	273,9	265,7	
	200	B	1	268,6	270,6	269,3	267,9	269,0	266,0	269,4	268,6	
			2	268,6	270,6	269,3	267,9	269,0	266,0	269,4	268,6	
			3	268,6	270,6	269,3	267,9	269,0	266,0	269,4	268,6	
			4	268,6	270,6	269,3	267,9	269,0	266,0	269,4	268,6	
			5	268,6	270,6	269,3	267,9	269,0	266,0	269,4	268,6	
			10	268,6	270,6	269,3	267,9	269,0	266,0	269,4	268,6	

W przypadku metody gradientowej wartości średnie poszczególnych parametrów przepływu przed wyciekami i po wyciekach były określane dla przyjętych 5-sekundowych przedziałów czasu. Koniec 5-sekundowego przedziału przed wyciekami dzielił 1-sekundowy odstęp do momentu wycieku, a początki przedziałów po

wycieku były przyjmowane z odstępami 1, 2, 3, 4, 5 i 10–sekundowymi względem momentu wycieku.

W przypadku metody śledzenia czoł fali rozprężeniowych moment przejścia czoła fali przez dany punkt pomiarowy ciśnienia określany był na podstawie przekroczeń wartości progowych, które ustalono na 1 kPa.

Tab. 4. Wyniki identyfikacji wielkości symulowanych wycieków

miejsce wycieku [m]	próbkowanie [Hz]	przesunięcie przedziału po wycieku [s]	Identyfikacja wielkości wycieku [l/min]							
			wielkość symulowanego wycieku [l/min] (% Q_0)							
			17,98 (14,62)		9,18 (7,45)		5,54 (4,51)		1,90 (1,54)	
			z zastosowaniem różnicy przepływu	z zastosowaniem modelu przepływu	z zastosowaniem różnicy przepływu	z zastosowaniem modelu przepływu	z zastosowaniem różnicy przepływu	z zastosowaniem modelu przepływu	z zastosowaniem różnicy przepływu	z zastosowaniem modelu przepływu
155	20	1	14,58	17,90	7,68	8,60	5,15	5,01	1,28	1,76
		2	17,23	17,55	9,06	8,37	5,85	4,96	2,53	1,67
		3	18,19	17,51	9,53	8,31	6,11	4,96	2,66	1,76
		4	18,49	17,53	9,62	8,35	6,23	5,02	2,74	1,69
		5	18,58	17,56	9,66	8,36	6,32	5,01	2,77	1,66
		10	18,93	17,49	9,85	8,38	6,53	5,02	2,77	1,71
	50	1	14,63	17,85	7,74	8,64	5,18	5,04	2,07	1,77
		2	17,27	17,54	9,08	8,43	5,86	4,98	2,54	1,70
		3	18,20	17,47	9,53	8,37	6,14	4,97	2,66	1,77
		4	18,49	17,50	9,62	8,40	6,25	5,00	2,73	1,70
		5	18,59	17,53	9,66	8,40	6,33	4,98	2,76	1,72
		10	18,80	17,48	9,85	8,41	6,54	4,96	2,79	1,70
	100	1	14,65	17,85	7,76	8,63	5,18	5,02	2,08	1,74
		2	17,28	17,54	9,09	8,42	5,86	4,97	2,54	1,68
		3	18,21	17,48	9,54	8,38	6,13	4,96	2,66	1,76
		4	18,50	17,51	9,63	8,40	6,23	4,99	2,73	1,69
		5	18,59	17,54	9,67	8,40	6,31	4,97	2,77	1,70
		10	18,81	17,49	9,85	8,42	6,53	4,96	2,81	1,69
	200	1	14,69	17,83	7,78	8,61	5,19	5,04	2,10	1,73
		2	17,30	17,55	9,11	8,41	5,86	4,99	2,54	1,68
		3	18,21	17,49	9,54	8,37	6,13	4,98	2,67	1,77
		4	18,50	17,52	9,63	8,40	6,24	5,01	2,73	1,71
		5	18,59	17,56	9,67	8,40	6,31	5,00	2,76	1,73
		10	18,82	17,52	9,86	8,42	6,53	5,00	2,81	1,71

Tab. 5. Wyniki identyfikacji wielkości symulowanych wycieków

miejsce wycieku [m]	próbkowanie [Hz]	przesunięcie przedziału po wycieku [s]	Identyfikacja wielkości wycieku [l/min]							
			wielkość symulowanego wycieku [l/min] (% Q_0)							
			13,42 (10,84)		6,19 (5,00)		4,30 (3,48)		1,54 (1,25)	
			z zastosowaniem różnicy przepływu	z zastosowaniem modelu przepływu	z zastosowaniem różnicy przepływu	z zastosowaniem modelu przepływu	z zastosowaniem różnicy przepływu	z zastosowaniem modelu przepływu	z zastosowaniem różnicy przepływu	z zastosowaniem modelu przepływu
275	20	1	11,60	11,97	5,85	5,39	4,41	3,73	1,02	1,35
		2	13,19	12,11	6,56	5,54	5,14	3,76	1,31	1,33
		3	13,83	12,04	6,82	5,54	5,24	3,76	1,36	1,34
		4	14,01	12,07	6,96	5,52	5,28	3,77	1,33	1,38
		5	13,98	12,03	7,04	5,53	5,23	3,83	1,25	1,39
	50	10	13,98	12,09	6,89	5,54	5,19	3,78	1,40	1,30
		1	11,63	12,00	5,83	5,38	4,44	3,75	1,05	1,31
		2	13,20	12,14	6,58	5,49	5,14	3,79	1,34	1,35
		3	13,82	12,08	6,84	5,48	5,24	3,78	1,42	1,36
		4	14,01	12,10	6,96	5,49	5,32	3,77	1,43	1,38
	100	5	14,00	12,06	7,05	5,53	5,32	3,84	1,35	1,39
		10	13,99	12,09	6,87	5,51	5,26	3,80	1,40	1,36
	200	1	11,68	11,96	5,87	5,39	4,43	3,75	1,04	1,32
		2	13,23	12,11	6,60	5,49	5,12	3,80	1,34	1,34
		3	13,83	12,06	6,86	5,49	5,21	3,78	1,42	1,35
		4	14,01	12,09	6,98	5,50	5,27	3,77	1,41	1,37
		5	14,00	12,04	7,06	5,54	5,27	3,84	1,33	1,38
275	100	10	13,99	12,08	6,88	5,50	5,26	3,80	1,39	1,35
		1	11,70	11,97	5,87	5,39	4,44	3,75	1,04	1,32
		2	13,24	12,12	6,60	5,48	5,12	3,79	1,34	1,34
		3	13,84	12,08	6,86	5,48	5,21	3,79	1,41	1,34
		4	14,01	12,11	6,98	5,48	5,27	3,77	1,40	1,35
	200	5	14,00	12,07	7,06	5,52	5,27	3,83	1,33	1,36
		10	13,99	12,10	6,88	5,49	5,26	3,79	1,39	1,33

4. Analiza wyników

Uzyskane wyniki przedstawiają średnio zadowalający poziom. Potwierdzają istnienie problemów związanych z dokładnym oszacowaniem wielkości i miejsca wycieku.

W przypadku obu metod problemy lokalizacji miejsc wycieków zauważalne są zwłaszcza przy mniejszych wyciekach, przy czym metodą gradientową uzyska-

no lepsze wyniki niż metodą śledzenia czoł fal rozprężeniowych. Na dokładność wpływają także warianty par czujników. Przy wariancie czujników zewnętrznych lokalizacja miejsca wycieku jest dokonywana ze wskazaniem na mniejsze wartości od współrzędnej rzeczywistego miejsca wycieku, a przy wariancie czujników wewnętrznych na wartości większe, co wskazuje na konieczność opracowania procedury ich wagowego uśredniania.

Metoda gradientowa nie wykazuje bezpośredniej zależności od częstości próbkowania sygnału, wpływa na nią natomiast czas początku oraz długość przedziału obliczania wartości średnich po wycieku, który powinien znajdować się już w zakresie pracy ustalonej. Stąd chcąc poprawić dokładność wyników należałoby sprawdzić inne długości przedziałów niż przyjęte pięciosekundowe oraz mniejsze odstępów początków przedziałów względem momentu początku wycieku.

W przypadku metody śledzenia czoł fal rozprężeniowych, zgodnie z opisem, wpływ częstości próbkowania na uzyskiwane wyniki jest znaczący. Dla przyjętych niższych częstości lokalizacja wycieku znacznie się pogarsza, a maksymalna przyjęta częstość 200 Hz jest niewystarczająca. Stąd należy wprowadzić wyższe częstości, pamiętając jednak, że będą one powodowały opóźnienie działania systemu.

W przypadku identyfikacji wycieków okazuje się ona zwłaszcza mało skuteczna na podstawie różnicy wskazań przepływomierzy, natomiast przy użyciu modelu jest w miarę poprawna. Ewentualny poziom błędów może być skutkiem działania przepływomierzy i systemu pomiarowego, który generował duży poziom szumów.

Wnioski

Należy pamiętać, że otrzymane wyniki dotyczą badań prowadzonych na rurociągu modelowym, gdzie nie występowały żadne zakłócenia zewnętrzne oraz, że rurociąg został wyposażony w dobrej klasy czujniki i sprzęt pomiarowy. W przypadku rzeczywistych rurociągów byłyby one na jeszcze niższym poziomie.

Zatem w przypadku obu metod, po uwzględnieniu uwag zawartych w analizie wyników, należy stwierdzić, że będzie można je zastosować jako metody porównawcze.

Literatura

- [1] Billman L., Isermann R.: Leak detection methods for pipelines, *Automatica*, vol. 23, no. 3, 1987.
- [2] Lindstedt P.: Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy, Wydawnictwo Naukowe Askon, Warszawa, 2002.
- [3] Lindstedt P.: Element korekcyjny jako źródło informacji diagnostycznej, *ZEM PAN*, Zeszyt 2, 1995.
- [4] Lindstedt P.: Słabe interakcje w procesie diagnozowania długich rurociągów naftowych i gazowych, 6th International Conference AIRDIAG'99, ITWL, Warszawa, 2000.
- [5] Lindstedt P.: Słabe interakcje w procesie diagnozowania wycieków z układów hydraulicznych, *Prace Naukowe ITWL*, Zeszyt 10, Warszawa, 2000.
- [6] 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.
- [7] Lindstedt P., Ostapkowicz P.: Słabe między obiektowe interakcje w procesie diagnozowania wycieków z długich rurociągów, *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn z. 10*, Białystok, 2002.
- [8] Lindstedt P., Ostapkowicz P.: Sygnały słabych interakcji między obiektowych jako nowa informacja w procesie diagnozowania wycieków z rurociągów, *Zeszyty Naukowe PB, Budowa i Eksploatacja Maszyn z. 11*, Białystok, 2003.
- [9] Lindstedt P., Ostapkowicz P.: Diagnosing of the leakages from pipelines based on signals of weak interobjects interactions, *Archiwum Transportu, Komitet Transportu PAN*, tom 2, Warsaw 2004.
- [10] Michałowski W.S., Trzop S.: Rurociągi dalekiego zasięgu, Wydawnictwo Fundacji Odysseum, Warszawa, 1996.
- [11] Niederliński A.: Systemy komputerowe automatyki przemysłowej tom 2., WNT, Warszawa, 1985.
- [12] Sobczak R.: Detekcja wycieków z rurociągów magistralnych cieczy, *Nafta Gaz nr 2*, 2001.
- [13] Sobczak R.: Lokalizacja wycieków z rurociągów, *Pomiary Automatyka Robotyka nr 3*, 1999.
- [14] Żółtowski B., Ćwik Z.: Leksykon diagnostyki technicznej, Wyd. Uczel. ATR, Bydgoszcz, 1996.

DIAGNOSING OF THE LEAKAGES FROM PIPELINE MODEL BY USING GRADIENT METHOD AND METHOD BASED ON INVESTIGATION OF PROPAGATION OF EXPANDED WAVES' FRONTS

Abstract: This work concerns diagnosing of leakages from pipelines. The aim of this work is knowledge of possibilities of presently using methods, gradient method and method based on investigation of propagation of expanded waves' fronts, for example their using on pipeline model station. The general characteristics of both methods and results diagnostic researches with simulated leakages, conducted on special model station with a 380-meter long pipeline, and by using of both methods has been presented.

Keywords: engineering diagnostics, pipelines, leakages, model tests

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

Paweł Ostapkowicz

KONCEPCJA WIELOMETODOWEGO SYSTEMU DIAGNOZOWANIA WYCIEKÓW Z RUROCIĄGÓW

Streszczenie: Praca dotyczy diagnozowania rurociągów, a w szczególności detekcji wycieków. W pracy został przedstawiony opis infrastruktury rurociągów i ich otoczenia, omówiono przyczyny powstawania uszkodzeń oraz zagadnienia związane z diagnozowaniem stanu technicznego rurociągów. W kwestii diagnozowania wycieków przedstawiono ogólną charakterystykę stosowanych metod diagnozowania oraz zadań stawianych systemom ich diagnozowania. Ponadto zaprezentowano koncepcję wielometodowego systemu diagnostycznego wycieków, opartego na opracowywanej metodzie słabych interakcji międzyobiektowych.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, rurociągi, stan techniczny, system wykrywania wycieków

Wstęp

Transport rurociągowy w dobie wciąż rosnącego zapotrzebowania na różne surowce, w tym na surowce i paliwa energetyczne (ropę naftową i jej produkty, gaz ziemny), odgrywa istotną rolę. Znaczne oddalenie źródeł surowców od odbiorców i centrów przemysłowych oraz topografia rozlokowania rafinerii powodują, że rurociąg jest nadal najbardziej efektywnym i ekonomicznym środkiem przesyłu na bardzo duże odległości. Odznacza się przy tym małą wrażliwością na warunki atmosferyczne oraz brakiem kolizyjności z innymi środkami transportu, co jest szczególnie ważne ze względu na konieczność zapewnienia ciągłości dostaw. Na całym świecie w skali roku rurociągami na setki i tysiące kilometrów przetłacza się miliony ton ropy naftowej i jej produktów, miliardy metrów sześciennych gazu

ziemnego oraz tysiące ton i hektolitry innych mediów (w tym wody, koncentratów rud i węgla).

Mając na uwadze zalety tego typu transportu, pamiętać też należy o problemach i zagrożeniach z nim związanych. Dotyczą one stanów awaryjnych z wyciekami, które mogą być szczególnie groźne w przypadku rurociągów naftowych, gdzie wycieki mogą prowadzić do powstawania dużych strat ekonomicznych związanych z utratą tłoczonego medium i usuwaniem skutków skażenia środowiska oraz powodować zagrożenie życia ludzkiego.

Nawet po uwzględnieniu zastosowania w projektowaniu i budowie rurociągów naftowych nowych technik obliczeniowych, technologii i materiałów (wpływających korzystnie na niezawodność rurociągów) – zagrożenie wyciekami nadal występuje. Nie można bowiem do końca wyeliminować destruktywnego działania sił przyrody i otoczenia rurociągów oraz ustrzec ich przed celowymi uszkodzeniami dokonywanymi w celu kradzieży medium lub przeprowadzenia ataku terrorystycznego (do których dochodzi o wiele częściej niż w przypadku awarii, np. wskutek korozji, pęknięć zmęczeniowych). Wzrasta także liczba użytkowanych rurociągów. Wysokie koszty budowy powodują, że okres ich funkcjonowania powinien trwać nawet do 50 lat.

Zagadnienie eksploatacji rurociągów staje się zatem bardzo ważne. Nieodłączną częścią eksploatacji jest diagnostyka stanu technicznego obiektu, która w przypadku rurociągów musi być w szczególności poszerzona o diagnozowanie wycieków. Obecnie diagnostyka wycieków jest już unormowana prawnie, a w niektórych krajach istnieje obowiązek wyposażania rurociągów w dwa niezależne systemy lokalizacji i identyfikacji wycieków.

Praktyczna realizacja procesu diagnozowania rurociągów, w tym diagnozowania wycieków jest trudna i skomplikowana. Stawianie tego typu obiektom coraz wyższych wymogów powoduje konieczność poszukiwania nowych rozwiązań sposobów ich diagnozowania (a w tym systemów diagnostycznych). Przy poszukiwaniu takiego rozwiązania niezbędne jest posiadanie odpowiedniej wiedzy o rurociągach oraz o występujących zagrożeniach. Dużych szans należy upatrywać w rozwiązaniach o charakterze kompleksowym, opartych na zastosowaniu różnych grup metod i środków diagnozowania, w tym nowo opracowywanych, jak i już istniejących. Koncepcja takiego rozwiązania systemu diagnostycznego wykorzystującego nowo opracowywaną metodę, nazywaną metodą słabych interakcji międzyobiektowych, prezentowana jest w niniejszej pracy.

I. Obiekt i jego otoczenie

I.1. Definicja i zasada działania rurociągu

Rurociąg naftowy, zgodnie z definicjami podanymi w [12], jest to przewód utworzony przez szereg szczelnie połączonych ze sobą rur, kształtek rurowych, zaworów i czujników. Służy do transportu medium pomiędzy wydzielonymi obiektami nadania, odbioru lub rozdziału (stacjami pomp, zbiornikami magazynowania).

Transport rurociągowy odbywa się dzięki posiadanej przez medium energii ciśnienia, dostarczanej przez agregat pompowy lub układy pomp, które nadają także medium określoną prędkość. W trakcie przepływu przez rurociąg energia ciśnienia medium ulega osłabieniu, głównie wskutek występowania zjawisk tarcia, co powoduje ograniczenia w zasięgu przesyłu. W praktyce w przypadku rurociągów naftowych oznacza to konieczność stosowania co kilkadziesiąt kilometrów kolejnych stacji pomp.

I.2. Opis rurociągu i jego infrastruktury

Rurociągi naftowe powstają na lądzie, na dnie mórz i oceanów. Ich budowa, oparta na zastosowaniu rur stalowych o dużych średnicach (nawet do 1500 mm), jest przedsięwzięciem bardzo kosztownym, złożonym organizacyjnie i skomplikowanym technicznie.

Realizacja kompletnego obiektu rurociągowego obejmuje [12]:

- obiekty liniowe – rurociąg wraz armaturą (zasuwę, odpowietrzniki i odwadniaki, komory wysyłania i odbioru czyszczaków) i z przejściami przez przeszkody sztuczne i naturalne, sieć ochrony katodowej, sieć telemechaniki i łączności oraz systemy kontrolno-pomiarowe,
- obiekty punktowe – przepompownie, tłocznie, bazy awaryjno–remontowe, stacje rozdzielcze oraz inne obiekty niezbędne do zapewnienia normalnej eksploatacji obiektu,
- budownictwo towarzyszące – obiekty inżynieryjne, chroniące środowisko przed skażeniami i rozlewami medium, oraz drogi dojazdowe.

Z powodu tak dużej odpowiedzialności konstrukcji przy budowie rurociągów obowiązuje stosowanie atestowanych rur i armatury (wykonanych z jak najlepszych materiałów i o ściśle określonych parametrach jakościowych, a zarazem spełniających kryteria ekonomiczne) oraz wymagane są wysoce niezawodne technologie, w szczególności w zakresie montażu (obejmującego m.in. roboty spawal-

nicze oraz układanie i zasypywanie rur w wykopach lub ich kotwiczenie na dnie wód) i kontroli (obejmującej badania odbioru technicznego, w tym próby szczelności i wytrzymałości rurociągu).

1.3. Podstawowe parametry rurociągu

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi dany rurociąg są:

- średnica wewnętrzna rurociągu – [cale] lub [mm],
- całkowita długość nitki rurociągu – [km],
- nominalne natężenie przepływu medium [m^3/h] lub przepustowość rurociągu – [tony/rok],
- ciśnienie na wlocie i wylocie rurociągu – [Mpa],

a dodatkowo:

- moc przesyłowa rurociągu i jej ograniczenia ze względu na zainstalowany rodzaj urządzeń przesyłowych – [kW],
- maksymalne i minimalne ciśnienie eksploatacyjne – [Mpa],
- maksymalna i minimalna temperatura eksploatacyjna – [$^{\circ}\text{C}$].

1.4. Standardowe sygnały pomiarowe

Standardowymi dla rurociągów sygnałami pomiarowymi są wielkości podstawowych parametrów przepływu:

- ciśnienia,
- natężenia przepływu,
- temperatury.

Na obiektach rzeczywistych pomiar tych wielkości (szczególnie zaś ciśnienia i temperatury) dokonywany jest w obrębie stacji zasuw dzielących rurociąg na kilkunastokilometrowe odcinki lub przeprowadzany jedynie na początkowym i końcowym odcinku rurociągu.

1.5. Otoczenie rurociągów

Poszczególne elementy rurociągów biegnących na lądzie umieszczane są z reguły albo w ziemi, albo na powierzchni. W przypadku rurociągów podmorskich spoczywają one na dnie morza. Trasy rurociągów lądowych często pokonują przejścia przez linie kolejowe, drogi, autostrady, ciekły wodne, bagna, torfowiska, tereny zalesione, a nawet formacje skalne.

Rurociągi pracują zatem w środowiskach średnio agresywnych, o dużych wahanach temperatury, wilgotności i ciśnienia, co przyspiesza szybkość ich korozji. Ponadto występowanie takich czynników, jak drgania i prądy błądzące, powoduje, oprócz negatywnego wpływu na trwałość obiektu, powstawanie problemów związanych z poprawnym działaniem i obsługą urządzeń sterujących i systemów kontrolno-pomiarowych zamontowanych na rurociągu, a w szczególności występowanie zakłóceń i szumów pomiarowych.

2. Awarie rurociągów

2.1. Definicja stanu awaryjnego

Awaria rurociągu ma miejsce wówczas, gdy w czasie tłoczenia występuje nagły, nieprzewidziany wyciek medium z rurociągu, spowodowany naruszeniem ciągłości ścianki rury lub połączeń rurowych albo uszkodzeniem armatury. Zaistniały wyciek może powodować ograniczenie zdolności (np. kontynuację pracy rurociągu przy obniżonym ciśnieniu) lub całkowitą niezdatność obiektu. Wycieki ze względu na ich wielkość dzieli się na: małe, średnie i duże. Duże charakteryzują wyciek rzędu od kilku metrów sześciennych do tysiąca metrów sześciennych i więcej, co w konsekwencji może oznaczać degradację biologiczną gleb i wód na sporym obszarze oraz ewentualność ogromnego pożaru.

2.2. Przyczyny uszkodzeń rurociągów

Przyczyn uszkodzeń rurociągów może być bardzo wiele. Powołując się na teksty źródłowe [12, 14] można je poklasyfikować następująco:

- oddziaływanie środowiska zewnętrznego
 - A1 – oddziaływania obciążeniami środowiskowymi takimi jak: ciężar własny rurociągu, transportowanego medium i przykrywającej rurociąg warstwy ziemi, parcie wody, lodu, wiatru, oblodzenie oraz temperatura,
 - A2 – oddziaływania podłoża w postaci: osiadań, niestabilności (osuwisk), szkód górniczych oraz oddziaływań sejsmicznych,
 - A3 – oddziaływania korozyjne i chemiczne od środowiska zewnętrznego (podłoża gruntowego, wód i atmosfery) oraz elektrochemiczne od prądów błądzących (powstałych wskutek oddziaływania sieci elektroenergetycznych i promieniowania elektromagnetycznego),
 - A4 – oddziaływania spowodowane incydentalnym uderzeniem pioruna,

- oddziaływanie transportowanego medium, powodowane przez
 - B1** – pulsację ciśnienia powodującą zmęczenie materiału elementów rurociągu,
 - B2** – propagację uderzeniowej fali ciśnieniowej (zwanej dodatnią falą uderzeniową lub uderzeniem hydraulicznym) przy tzw. przepływach nieustalonych, powodującej kruche pękanie,
 - B3** – zjawisko kawitacji,
 - B4** – zjawisko erozji,
 - B5** – oddziaływanie korozyjne transportowanego medium,
- wady elementów rurociągu
 - C1** – wady złącz, tj. wady spoin i połączeń kołnierzowych,
 - C2** – zastosowanie elementów rurociągu wykonanych ze stali o nieodpowiedniej udarności do warunków eksploatacji,
 - C3** – wady geometrii przekroju poprzecznego rur i kolan, powodujące powstawanie spawalniczych naprężeń montażowych, bądź turbulencji przepływu transportowanego medium,
 - C4** – wady osi podłużnych rur (sfałowanie), powodujące powstawanie turbulencji,
 - C5** – wady materiałowe i konstrukcyjne osprzętu obsługującego rurociąg,
- działalność człowieka
 - D1** – błędy projektowe polegające na niedoszacowaniu nośności przewodu i jego konstrukcji wsporczych w stosunku do obciążeń zewnętrznych,
 - D2** – błędy projektu technologicznego, polegające na niewłaściwym doborze parametrów osprzętu technologicznego, tj. charakterystyk układów pomp, zasuw, filtrów, ochrony katodowej, itp.,
 - D3** – przypadkowe uszkodzenia przewodu oraz jego izolacji podczas prowadzonych prac w pobliżu rurociągu,
 - D4** – celowe uszkodzenia rurociągu w celu dokonania kradzieży transportowanego medium lub przeprowadzenia ataku terrorystycznego,
 - D5** – niedostateczna kontrola jakości prac budowlanych,
 - D6** – niedostateczna kontrola (monitoring) oraz błędy obsługi podczas eksploatacji rurociągu.

Biorąc pod uwagę, że trudno jest określić prawdopodobieństwo i charakterystykę rozkładu poszczególnych zagrożeń oraz fakt występowania oczywistych korelacji pomiędzy nimi (choćby na przykładzie zagrożeń: A3, B1, B2, C1, D5, D6), powyższy rodzajowy podział zagrożeń często się zastępuje tzw. podziałem modelowym, który wyróżnia następujące zagrożenia:

- zagrożenia uszkodzeniami o charakterze impulsowym
Awaryje o charakterze impulsowym są skutkiem nagłego przekroczenia nośności (odporności) przewodu rurociągu na obciążenie, np. przy uderzeniu pioruna (A4), zadziaływanie obciążeń wewnętrznych i zewnętrznych o nieprzewidywalnej projektem wartości (A1, A2, B2, D1, D2) lub uszkodzenia przewodu wskutek celowej i przypadkowej działalności ludzkiej (D3, D4),
- zagrożenia uszkodzeniami o charakterze kumulacyjnym
Awaryje o charakterze kumulacyjnym występują wskutek występowania w czasie eksploatacji rurociągu pewnych oddziaływań i obciążeń powodujących stopniowe jego zużycie (starzenie), co objawia się obniżeniem wartości parametrów charakterystycznych, np. nośności, z powodu korozji (A3, B4, B5) lub zjawisk zmęczenia (B1, B3, C1, C2, C3, C4, C5).
- zagrożenia uszkodzeniami o charakterze relaksacyjnym
Awaryje o charakterze relaksacyjnym pojawiają się w miarę starzenia się rurociągu, wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa jego uszkodzenia. Ich przyczyną jest spadek nośności rurociągu w czasie (powstały wskutek kumulacyjnego oddziaływania obciążeń zewnętrznych i wewnętrznych) i wystąpienie tych oddziaływań oraz łączne występowanie zjawisk impulsowej utraty nośności (odporności) konstrukcji rurociągu.

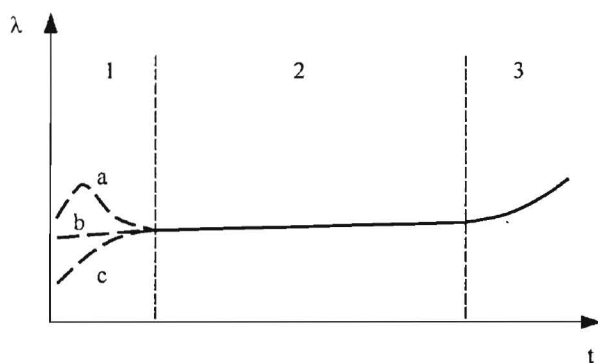
Na podstawie opisów stanowiących analizę przyczyn awarii zaistniałych na określonych czynnych rurociągach, jako główne przyczyny uszkodzeń należy wymienić [12, 16]:

- korozję zewnętrzną, wewnętrzną i naprężeniową,
- niewystarczającą nośność lokalną rurociągu w stosunku do wzrastających obciążeń dynamicznych i przeciążeń (zwłaszcza w miejscu ukrytych wad i tzw. koncentratów naprężeń), powstawanie kruchych pęknięć inicjowanych w obecności karbów strukturalnych, geometrycznych i występowania uderzeniowych fal ciśnienia (których nie można do końca uniknąć, można je jednak kontrolować) i kavitacji,
- oddziaływanie zjawisk przyrodniczych (np. uderzenie pioruna, drgania sejsmiczne, wstrząsy górotworu) oraz utratę stateczności rurociągu wskutek osiadania i parcia gruntu,
- działalność ludzką (celowe i przypadkowe uszkodzenia rurociągów, tj. wysadzanie i nawiercanie rurociągów w celu przzerwiania tłoczenia lub kradzieży tłoczonego medium oraz mechaniczne uszkodzenia wynikające z przeprowadzanych prac na rurociągu lub w jego pobliżu, a ponadto błędy obsługi).

2.3. Funkcja intensywności uszkodzeń

Ogólny przebieg funkcji intensywności uszkodzeń rurociągów został pokazany na rysunku 1. Podobnie, jak dla innych obiektów technicznych, można w nim wyróżnić trzy podstawowe okresy, odpowiadające poszczególnym przedziałom czasowym użytkowania.

W okresie pierwszym rozpoczynającym się, tuż po uruchomieniu rurociągu (nazywanym początkowym okresem eksploatacji lub okresem adaptacji obiektu), intensywność uszkodzeń jest znaczna. Występującym wówczas awariom można przypisać impulsowy charakter uszkodzeń. Uszkodzenia te są głównie skutkiem błędów ludzkich popełnionych na etapie projektowania, budowy oraz nauki obsługi rurociągu, a także ujawnienia się ukrytych wad materiałowych i konstrukcyjnych, w tym wad osprzętu obsługującego rurociąg, które nie zostały wykryte na poszczególnych etapach kontroli.



Rys. 1. Ogólny przebieg funkcji intensywności uszkodzeń rurociągów: 1 – okres adaptacji; 2 – okres normalnej eksploatacji; 3 – okres przyspieszonego zużycia; a, b, c – możliwe przebiegi funkcji w okresie adaptacji

Okres drugi charakteryzuje normalną eksploatację obiektu. Uszkodzenia pojawiają się sporadycznie. Mają one najczęściej charakter impulsowy.

W okresie trzecim (nazywanym końcowym okresem eksploatacji lub okresem przyspieszonego starzenia się obiektu) intensywność uszkodzeń rurociągu wzrasta. Jej wzrost, powodowany starzeniem się obiektu, charakteryzuje się ujawnianiem się uszkodzeń o charakterze typowo relaksacyjnym, wywołanych np. przez procesy korozji i procesy zmęczenia materiałów. W tym okresie, podobnie jak w okresie

początkowym i w okresie normalnej eksploatacji, mogą występować także uszkodzenia impulsowe.

2.4. Sygnały generowane przez wyciek

Powstaniu wycieku, np. wskutek uszkodzenia przewodu rurociągu, towarzyszy wystąpienie następujących sygnałów:

- zmiany ciśnienia medium na początku rurociągu,
- zmiany ciśnienia medium na końcu rurociągu,
- zmiany natężenia przepływu medium na początku rurociągu,
- zmiany natężenia przepływu medium na końcu rurociągu.

W przypadku dużego wycieku obserwuje się:

- spadek ciśnienia na wyjściu stacji pomp,
- spadek ciśnienia podporowego na stacji za uszkodzeniem,
- raptowny wzrost natężenia przepływu na odcinku przed uszkodzeniem,
- raptowny spadek natężenia przepływu na odcinku za uszkodzeniem.

3. Diagnostyka rurociągów, w tym diagnozowanie wycieków

3.1. Diagnostyka stanu technicznego obiektu [12]

Oddawany do eksploatacji rurociąg powinien cechować nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne, wysoka wartość użytkowa i niezawodność eksploatacyjna. Ze względu na bezpieczeństwo najbardziej istotna jest niezawodność eksploatacyjna. Jest ona bezpośrednio powiązana ze stanem technicznym obiektu.

Osiągnięcie wysokiej niezawodności eksploatacyjnej rurociągów równoznaczne jest z podjęciem wielu działań i z wydatkowaniem znacznych środków finansowych. Większą część tych działań stanowią badania kontrolne, prowadzone już od momentu wytopu surowców w hutach, poprzez etap produkcji rur, armatury i osprzętu, etap montażu i badań w momencie przekazywania obiektu do eksploatacji, a skończywszy na badaniach prowadzonych w czasie eksploatacji obiektu.

Na etapie budowy i przekazywania rurociągu do eksploatacji są to głównie badania nieniszczące ze swobodnym dostępem do badanych powierzchni. Wymienić tu należy:

- badania wizualne,
- badania radiograficzne,
- badania ultradźwiękowe,
- badania penetracyjne,
- badania magnetyczne.

Ponadto przeprowadzane są badania szczelności, drożności i stanu wewnętrznego rurociągu oraz kontrola poziomu naprężeń. Celem wymienionych badań jest wykrycie wad i nieprawidłowości montażu (z których część może zostać usunięta). Dokonywana jest także klasyfikacja wykrytych wad z podaniem ich dokładnych lokalizacji i wymiarów. Następnie przyjmując normatywne wartości dopuszczalne, określa się jakość wykonania obiektu i prognozuje się jego trwałość. Ze względów ekonomicznych badania takie nie obejmują jednak kontroli stuprocentowej. Stąd też oddany do eksploatacji rurociąg może mieć wady ukryte, które nie zostały ujawnione na kolejnych etapach kontroli, a które mogą stanowić zagrożenie w czasie użytkowania.

Nieco inaczej przedstawiają się zagadnienia związane z prowadzeniem badań diagnostycznych na etapie eksploatacji rurociągu. Rurociąg przysypyany jest wówczas ziemią lub znajduje się w wodzie, a ze względów ekonomicznych niewskazane jest jego wyłączanie. Występują zatem pewne ograniczenia co do możliwości stosowania niektórych metod kontroli. Pamiętać też należy, że pomimo posiadania wiedzy oraz umiejętności przewidywania i zapobiegania wystąpieniu części z wymienionych w rozdziale 2 zagrożeń, wszystkich do końca wyeliminować się nie da. Kontrola nie może być zatem pominięta. Celem wykonywanych badań diagnostycznych powinno być więc ciągłe lub okresowe monitorowanie stanu technicznego ze śledzeniem rozwoju uszkodzeń, ocena struktury materiałów oraz pomiar geometrii rurociągu (wpływającej na jego działanie). Szczególnej uwagi wymagają na przykład procesy korozji, a to ze względu na to, że grubość ścianki rurociągu przy tak dużej stalochłonności konstrukcji i kosztach budowy dobierana jest jedynie pod kątem wytrzymałościowym bez naddatków na ubytki korozyjne. Oznacza to, przy przyjmowanych dla rurociągów okresach eksploatacji sięgających do 50 lat, konieczność dokładnego kontrolowania starzenia korozyjnego, które powinno być mniejsze od starzenia funkcjonalnego. Okresowo należy także sprawdzać poziom naprężeń, co może jednak wymagać wyłączenia rurociągu.

W praktyce do wykonywania nieniszczących badań diagnostycznych przy zachowanym tłoczeniu i braku dostępu do obiektu od zewnątrz wykorzystuje się tłoki inteligentne. Stanowią one rozwinięcie powszechnie stosowanych czyszczaków i kalibraków. Poruszają się wewnątrz rurociągu popychane przez tłoczone medium.

Wyposażone są w komplety głowic ultradźwiękowych lub magnetycznych oraz urządzenia rejestrujące sygnały pomiarowe i położenie tłoka. Tłoki umożliwiają kontrolę wewnętrznego stanu przewodu, w tym lokalizację ubytków korozyjnych i pęknięć oraz określenie ich wielkości, a także pozwalają wykrywać powstałe owalizacje, zagięcia ścianek i zmiany średnicy.

W badaniach diagnostycznych korzysta się także z metod funkcjonalnych i wibroakustycznych. Sygnałami funkcjonalnymi są standardowe dla rurociągów sygnały pomiarowe podstawowych wielkości parametrów przepływu: ciśnienia, natężenia przepływu i temperatury.

3.2. Diagnozowanie wycieków

Diagnozowanie wycieków stanowi zagadnienie odrębne, o dużej złożoności i stopniu skomplikowania. Wymaga ono dysponowania odpowiednimi metodami i środkami diagnozowania, oraz opracowania i budowy systemu diagnostycznego wycieków (LDS – leak detection system). System taki powstaje na bazie metod diagnozowania. Powinien on być systemem czasu rzeczywistego z czasem wnioskowania θ (czasem eksploatacyjnym) pokrywającym się z czasem badania t (czasem dynamicznym). LDS może funkcjonować jako oddzielny element lub jako część systemu kontrolno-pomiarowego, stanowiącego zazwyczaj standardowe wyposażenie rurociągów [3, 15].

3.2.1. Metody lokalizacji i identyfikacji wycieków

Stosowane obecnie metody diagnozowania wycieków z rurociągów można podzielić na dwie grupy:

- grupę metod zewnętrznych – pozwalających na bezpośrednie wykrycie miejsca wycieku. W metodach tych korzysta się ze specjalizowanych urządzeń (wykorzystujących np.: techniki akustyczne, dielektryki, światłowodów, termografię). Mogą to być także badania organoleptyczne (np. regularne patrole z psami wzdłuż rurociągu),
- grupę metod wewnętrznych (funkcjonalnych, analitycznych) – wykrywających miejsce i wielkość wycieku w sposób pośredni (analityczny), na podstawie pomiaru wewnętrznych parametrów procesu przepływu (np. ciśnienia, natężenia przepływu, temperatury).

3.2.2. Zadania systemu diagnozowania wycieków

Podstawowym zadaniem systemu diagnozowania wycieków jest wykrycie wycieku, następnie zaś dokładne określenie jego miejsca i wielkości (natężenia i ilości wycieku). System taki charakteryzują ponadto takie parametry, jak:

- wrażliwość na wyciek – wielkość najmniejszego wycieku oraz minimalny czas jego trwania, tak aby mógł on być wykryty przez system,
- szybkość systemu – czas od zaistnienia wycieku do jego wykrycia, dokładnego zlokalizowania i oszacowania przez system,
- odporność na błędy – umiejętność odróżniania przez system fałszywych alarmów, powodowanych przez różne sytuacje, niemające jednak związku z wyciekami,
- łatwość realizacji – możliwość użycia jak najprostszych rozwiązań oraz ewentualnej adaptacji infrastruktury istniejącej już na rurociągu,
- koszty systemu – rozumiane jako wydatki poniesione na jego zainstalowanie oraz obsługę w trakcie eksploatacji rurociągu,
- solidność – rozumiana jako stopień zaufania osób obsługujących system.

3.2.3. Możliwości istniejących systemów diagnozowania wycieków

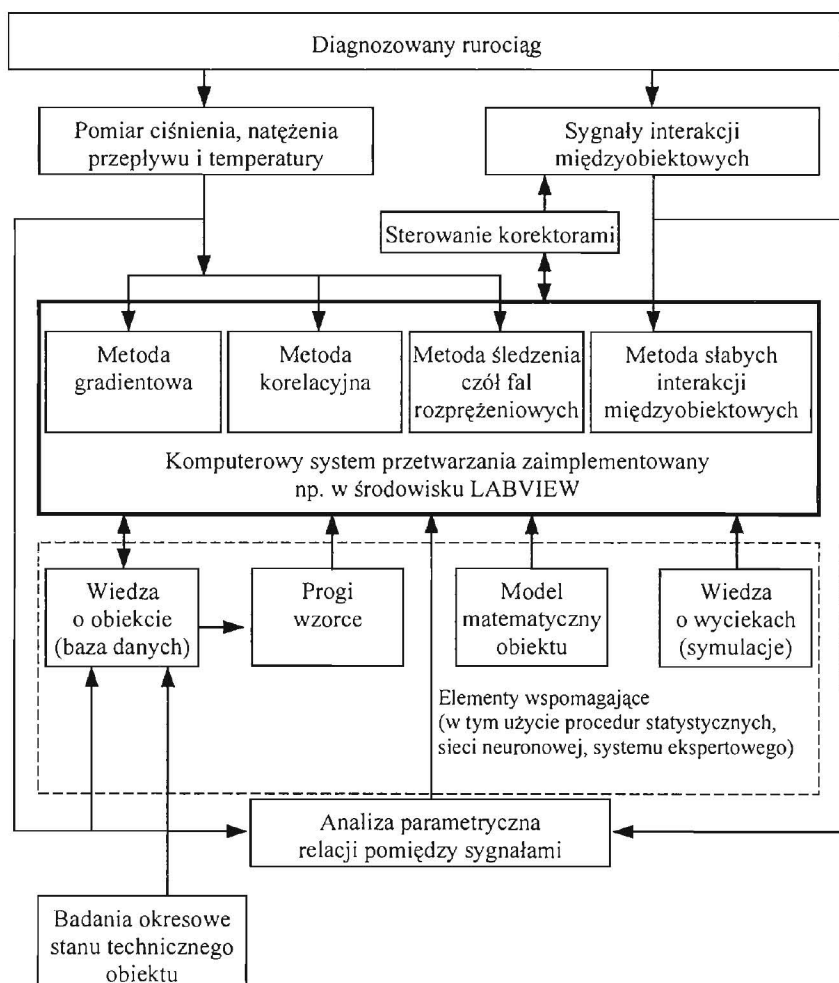
Stosowane obecnie systemy detekcji wycieków są mało efektywne. Nawet po zastosowaniu bardzo skomplikowanych procedur obliczeniowych, pozwalają jedynie zidentyfikować znaczne wycieki (średnio od 5÷7 % wartości przepływu) i lokalizować je ze zgrubną dokładnością. Jest to spowodowane m.in. małą podatnością diagnostyczną rurociągów (objawiającą się niedoborem informacji diagnostycznych), wynikającą z dużych rozmiarów tego typu obiektów i złożonej dynamiki procesu tłoczenia.

Operatorzy takich użytkowanych systemów twierdzą, że często generują one fałszywe alarmy, są trudne do obsługiwania oraz drogie w utrzymaniu. Dlatego obserwuje się tendencje do ignorowania przez obsługę alarmów o wyciekach, a nawet wyłączanie takich systemów.

4. Koncepcja systemu diagnostycznego

Na wstępie założono, że opracowywany system diagnozowania wycieków będzie ukierunkowany na rozwiązania kompleksowe. Będzie to system czasu rzeczywistego o strukturze wielometodowej, oparty na stosowanej obecnie metodzie

gradientowej, metodzie korelacyjnej i metodzie opartej na śledzeniu czoł fali rozprężeniowych, opisane w [1, 13, 15]. Metody te zostaną użyte równocześnie. Ich uzupełnieniem będzie nowo opracowywana metoda, nazwana metodą słabych interakcji między obiektami, z nową informacją diagnostyczną w postaci jej sygnałów, opisana w [5–11]. Ogólna koncepcja systemu została przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Koncepcja systemu diagnostycznego

Bazę wiedzy systemu stanowić będą m.in. wyniki badań diagnostycznych stanu technicznego rurociągu. W systemie wykorzystany zostanie model matematyczny obiektu, wiedza na temat wycieków (w tym pozyskana w trakcie modelowych badań symulacyjnych) oraz dodatkowo informacje pozyskane dzięki parametrycznej analizie relacji pomiędzy sygnałami diagnostycznymi. Działanie systemu zostanie wsparte narzędziami typu wielowarstwowej sieci neuronowej oraz systemem ekspertowym. Implementacja systemu zostanie prawdopodobnie wykonana w środowisku LABVIEW.

Praktyczna realizacja systemu zostanie ukierunkowana na jego efektywność, z maksymalnym ograniczeniem stopnia skomplikowania, zachowując jednocześnie istotne parametry co do dokładności, szybkości i wrażliwości na błędy. W celu minimalizacji kosztów systemu i jego obsługi zakłada się, że zostaną użyte nowe technologie oraz zaadaptowana infrastruktura istniejąca już na rurociągach.

Zgodnie z przyjętymi założeniami, na początku system zostanie uruchomiony i przetestowany na własnym stanowisku badawczym z rurociągiem modelowym, opisanym w [8], a następnie będzie on mógł być przygotowywany do instalacji na obiekcie typu rzeczywistego.

Przypuszcza się, że opracowywany system pozwoli zidentyfikować wyciek na poziomie 3% wielkości przepływu i umożliwi poprawę stopnia lokalizacji, względem obecnie stosowanych metod.

Wnioski

Diagnozowanie rurociągów, a w tym diagnozowanie wycieków jest zagadnieniem bardzo złożonym.

Prezentowany w pracy system diagnostyczny jako rozwiązanie wielometodowe będzie mógł stanowić alternatywę dla stosowanych obecnie rozwiązań.

Uruchomienie prezentowanego systemu na rurociągu modelowym pozwoli na jego wielowariantowe przetestowanie. Pozytywne wyniki dadzą zaś podstawę do podjęcia prac nad przygotowaniem systemu do wdrożenia na rzeczywistych obiektach.

Literatura

- [1] Billman L., Isermann R.: Leak detection methods for pipelines, *Automatica*, vol. 23, no. 3, 1987, pp. 381–385.
- [2] Chądzyński M.A.: „Wielka rura” w Polsce, *Rurociągi* nr 1–2, 2001.
- [3] Lindstedt P.: Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy, Wydawnictwo Naukowe Askon, Warszawa, 2002.
- [4] Lindstedt P.: Formowanie sygnałów diagnostycznych, *ZEM PAN, Zeszyt 2*, 1997.
- [5] Lindstedt P.: Element korekcyjny jako źródło informacji diagnostycznej, *ZEM PAN, Zeszyt 2*, 1995.
- [6] Lindstedt P.: Słabe interakcje w procesie diagnozowania długich rurociągów naftowych i gazowych, 6th International Conference AIRDIAG'99, ITWL, Warszawa, 2000.
- [7] Lindstedt P.: Słabe interakcje w procesie diagnozowania wycieków z układów hydraulicznych, *Prace Naukowe ITWL, Zeszyt 10*, Warszawa, 2000.
- [8] 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, s. 311–322.
- [9] Lindstedt P., Ostapkowicz P.: Słabe międzyobiektywne interakcje w procesie diagnozowania wycieków z długich rurociągów, *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn z. 10*, Białystok, 2002.
- [10] Lindstedt P., Ostapkowicz P.: Słabe międzyobiektywne 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.: Diagnosing of the leakages from pipelines based on signals of weak interobjects interactions, *Archiwum Transportu, Komitet Transportu PAN, tom 2*, Warsaw 2004. pp. 17–31.
- [12] Michałowski W.S., Trzop S.: *Rurociągi dalekiego zasięgu*, Wydawnictwo Fundacji Odysseum, Warszawa, 1996.
- [13] Niederliński A.: *Systemy komputerowe automatyki przemysłowej tom 2.*, WNT, Warszawa, 1985.
- [14] Rządowski J.: Polityka ubezpieczeń rurociągów, *Rurociągi* nr 1–2, 2002, s. 20–23.
- [15] Sobczak R.: Detekcja wycieków z rurociągów magistralnych cieczy, *Nafta Gaz* nr 2, 2001, s. 97–107.

- [16] Trzop S.: Wybrane zagadnienia z konstruowania rurociągów w aspekcie niezawodności ich pracy, IV Krajowa konferencja techniczna Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów, Płock, 2001.
- [17] Żółtowski B., Ćwik Z.: Leksykon diagnostyki technicznej, Wyd. Uczel. ATR, Bydgoszcz, 1996.

THE CONCEPTION OF PIPELINES LEAK DETECTION MULTIMETHODS SYSTEM

Abstract: This work concerns diagnosing of pipelines, in particular leakages detection. The description of infrastructure of pipelines and their environment has been presented. The causes of pipelines failure and problems connected with diagnosing of maintenance status of pipelines is also discussed. In the question of diagnosing of leakages, the general characteristic of using diagnostic methods and tasks of the leak detection systems are also showed. Moreover the conception of leak detection multimethods system, based on the elaborated method of weak interobjects interactions has been presented.

Keywords: engineering diagnostics, pipelines, maintenance status, leak detection system

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

Jolanta Pauk, Krzysztof Jaworek

ZASTOSOWANIE LOGIKI ROZMYTEJ DEMPSTERA-SHAFERA W DIAGNOSTYCE CHODU CZŁOWIEKA

Streszczenie: W ramach poszukiwania rozwiązań własnych w diagnostyce chodu człowieka opracowano modele matematyczne chodu z wykorzystaniem metody funkcji regresji. Uzyskane współczynniki modelu oraz zbiory ropyte Dempstera-Shafera posłużyły do budowy systemu wspomagania decyzji w biomechanice chodu człowieka.

Słowa kluczowe: logika rozmyta Dempstera-Shafera, identyfikacja.

Wstęp

Proces decyzyjny w biomechanice chodu człowieka jest bardzo złożony. Na początku należy przyjąć pewne założenia, które muszą być stosowne do rozpatrywanych zagadnień. Następnie na podstawie wyniku wstępnej analizy określa się zakres danych potrzebnych do dalszych badań. Niezbędne jest narzędzie, które zaprezentuje dane w przystępny sposób [1].

Podejmowanie decyzji w biomechanice chodu człowieka jest procesem wyboru. Z pewnego zbioru elementów należy wybrać najlepszy z możliwych wariantów. Procesowi decyzyjnemu najczęściej towarzyszą takie czynniki jak: niedokładność, niepewność, niejednoznaczność itd. Niepewność utożsamia się zazwyczaj z przypadkowością występowania określonych zdarzeń, dlatego więc dla celów modelowania niepewności wykorzystuje się metody teorii prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej [1]. Niedokładność opisuje się za pomocą logiki rozmytej, która wiąże precyzyjny aparat matematyczny z nieprecyzyjnie opisywanym światem

rzeczywistym. Wygenerowanie optymalnego zbioru reguł dla systemów rozmytych nie jest zadaniem prostym, gdyż wymaga rozpatrzenia wielu przypadków [1,2].

Złożoność problemów medycznych zmusza do sięgnięcia po metody, które umożliwiają uporządkowanie nawału informacji, ujmując dane o pacjentach w systemy komputerowe. Chodzi tu przede wszystkim o wspomaganie lekarza w pracy diagnostycznej i leczniczej. Diagnostyka chorób należy do podstawowych czynności lekarza. Jest ona jednak obciążona znacznym ryzykiem błędu (nawet do 40%).

Lekarze praktycy, którzy zaakceptowali komputer jako urządzenie pomocnicze w dokumentacji i wyszukiwaniu informacji, powinni mieć także możliwość wykorzystania go jako narzędzia wspomagającego diagnozę. Ułatwiłoby to w znaczny sposób klasyfikację przypadków chorobowych. Istnieją co prawda przykłady systemów gromadzących wiedzę medyczną, ale nie wchodzi one do bezpośredniej praktyki, gdyż są kosztowne i zbudowane z myślą o licznych przypadkach chorobowych. Mniejsze bazy danych mogą przyczynić się do upowszechnienia idei komputerowego wspomaganie decyzji wśród lekarzy ze względu na ich niski koszt oraz prosty sposób obsługi.

I. Opis komputerowego systemu do wspomaganie oceny stanu aparatu ruchu człowieka

Celem systemu jest opracowanie metodologii wspomaganie wnioskowania diagnostycznego w biomechanice chodu człowieka, która umożliwiłaby przetwarzanie wieloparametrowych zależności dotyczących oceny stanu zdrowia pacjenta, identyfikację choroby oraz ułożenie planu leczenia usprawniającego.

W Centrum Bioinżynierii w Mediolanie i Glenrose Rehabilitation Hospital w Edmonton zgromadzono dane opisujące chód człowieka w normie oraz ze zmianami zwyrodnieniowymi stawu kolanowego i uszkodzeniem więzadła krzyżowego przedniego. Zebrany w Centrum Bioinżynierii w Mediolanie materiał empiryczny (77 osób) stanowił ciąg uczący, będący podstawą do opracowania algorytmu klasyfikującego pacjentów do poszczególnych grup patologii oraz umożliwiającego wybór metody usprawnienia ruchowego. Ciąg testujący stanowiły dane zebrane w Glenrose Rehabilitation Hospital w Edmonton (46 osób).

Do opracowania systemu wspomaganie oceny stanu aparatu ruchu człowieka wykorzystano pakiet oprogramowania MATLAB 6.5 oraz Borland C++ Builder, a także model rozmyty klasyfikatora Dempstera–Shafera (FDS). Model ten oferuje

wiele ważnych korzyści metodologicznych, takich jak: zdolność do reprezentowania ignorancji w sposób prosty i bezpośredni, spójność z klasyczną teorią prawdopodobieństwa, zgodność z logiką boolowską oraz złożoność obliczeniową opracowanych metod wnioskowania w tzw. strukturach hiperdrzew. Teoria DS może służyć jako narzędzie do reprezentacji niekompletnej wiedzy statystycznej [3]. Ułatwia i uporządkowuje wnioskowania diagnostyczne dla lekarzy, którzy nie są specjalistami w danej dziedzinie oraz wskazuje na ile ich diagnoza jest niepewna.

Celem wygenerowania reguł rozmytych użyto kwadratowej funkcji przynależności w postaci (1) [3]

$$y = 1 - \frac{(X - x_i)^2}{(x_i - x_{i+1})^2}, \quad (1)$$

gdzie:

y – funkcja przeliczająca,

X – zmienna decyzyjna,

x_i – i -te ognisko,

x_{i+1} – ognisko $i+1$.

Podstawę generowania reguł rozmytych stanowiły, uzyskane z identyfikacji metodą regresji, wartości współczynników modelu matematycznego [4,5]. W celu określenia rodzaju dysfunkcji ruchowej użyto wartości współczynników modelu (a_1, a_2, a_3) dla fazy podporowej i fazy wymachu kończyny dolnej człowieka uzyskanych według wzorów (2,3)

$$\hat{Y}_n = \underline{U}_n \cdot \underline{a}, \quad (2)$$

$$\underline{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_k]^T, \quad (3)$$

gdzie:

$\hat{Y}_n$ – wartość wielkości wyjściowej (moce rozwijane przez poszczególne zespoły mięśniowe obsługujące staw biodrowy, kolanowy i skokowo – goleniowy),

$\underline{a}$ – wektor poszukiwanych współczynników modelu,

$\underline{U}_n$ – macierz wierszowa wielkości wejściowych (wyrazy są wielkościami charakteryzującymi parametry chodu człowieka)

Kryterium wyboru postępowania usprawniającego stanowi złożony problem. Ma to związek z tym, że ze względu na przyjęty w pracy sposób wyznaczania postaci ogólnej modelu chodu człowieka, zidentyfikowane wartości współczynników modelu nie reprezentują rzeczywistych wielkości fizycznych. Po drugie, z teorii

układów dynamicznych wynika, że o własnościach współczynników decydują nie bezwzględne ich wartości, lecz w głównej mierze proporcje między nimi. Uwzględniając przedstawione wnioski, sformułowano postulat, że miarodajnymi wskaźnikami umożliwiającymi wybór odpowiedniego usprawnienia ruchowego aparatu ruchu pacjenta są wartości proporcji między współczynnikami modelu chodu człowieka (a_I , a_2 , a_3), uzyskanymi w procesie identyfikacji. Na podstawie analizy różnych proporcji ustalono następujące wskaźniki oceny

$$\begin{bmatrix} a_I \\ a_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{a_3} \\ \frac{a_2}{a_3} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

gdzie:

a_I , a_2 , a_3 – współczynniki modelu matematycznego chodu człowieka

Istotną rolę w trafności diagnozy pełni operator dopasowania próbki danych do istniejących reguł [3]. Podczas generowania reguł użyto funkcji przynależności o postaci (1) oraz operatora dopasowania – iloczynu w postaci

$$\text{Max}(0, x \cdot y), \quad (5)$$

gdzie:

x – nowa reguła,

y – reguła, na której działa operator dopasowania.

Maksimum operatora dopasowania (3) zostało określone w następujący sposób:

- Przyjęto liczbę reguł bazowych, niezbędnych do nauki systemu, równą pięć. Testowano wartość operatora dopasowania, w granicach $\langle 0; 1 \rangle$, w ognisku dodawanej reguły. Jeżeli została przekroczona wartość progowa (na podstawie analizy wartość progowa równa jest 0,75) dla danego atrybutu, wówczas zwiększano liczbę trafnie dobranych reguł (dodanie reguły do relacji wymagało 50%+1 atrybutów przekraczających zadaną wartość progową). W przeciwnym razie wykonywano punkt b);
- metodą złotego podziału szukano maksimum wartości operatora dopasowania działającego na testowanych regułach. Metoda ta umożliwiła szybkie uzyskanie pożądanej zbieżności. Okazała się najbardziej adekwatna w procesie budowy systemu.

Podczas uczenia systemu rozpatrzono pięć relacji, odpowiadających badanym grupom osób. Dla poszczególnych relacji określono reguły:

- relacja – osoby zdrowe – 30 reguł,
- relacja – osoby ze zmianami zwyrodnieniowymi stawu kolanowego – 20 reguł,
- relacja – osoby z uszkodzeniem więzadła krzyżowego przedniego – 27 reguł.

Liczba podanych reguł odpowiada liczbie przebadanych osób, które zostały ujęte w zbiorze uczącym.

W pracy rozważano następujące zestawy atrybutów:

- w celu określenia rodzaju patologii – 18 atrybutów (trzy stawy kończyny dolnej, dwa przedziały identyfikacji, trzy wartości współczynników modelu w każdym przedziale),
- w celu wyboru metody usprawnienia ruchowego – 14 atrybutów (siedem przedziałów identyfikacji, dwie wartości współczynników modelu w każdym przedziale).

Tabela 1. Wygenerowane reguły dla osób zdrowych

Staw	Przedział identyfikacji	Współczynnik	Zakres wartości współczynnika
biodrowy	I	a_1	$1,395 \div 2,534$
		a_2	$-2,319 \div -0,185$
		a_3	$0,017 \div 0,389$
	II	a_1	$1,071 \div 2,053$
		a_2	$-0,313 \div 1,495$
		a_3	$0,090 \div 0,270$
kolanowy	I	a_1	$1,489 \div 2,578$
		a_2	$-2,299 \div -0,703$
		a_3	$0,241 \div 0,687$
	II	a_1	$1,387 \div 2,281$
		a_2	$-1,761 \div -0,613$
		a_3	$0,087 \div 0,493$
skokowo–goleniowy	I	a_1	$1,229 \div 2,289$
		a_2	$-1,808 \div -0,528$
		a_3	$0,182 \div 0,470$
	II	a_1	$0,639 \div 1,364$
		a_2	$-0,372 \div 0,052$
		a_3	$-0,054 \div 0,177$

Jeden atrybut odpowiada wartości jednego współczynnika uzyskanego w procesie identyfikacji modelu. W tabelach 1 – 3 przedstawiono zestawy reguł, które umożliwiają przeprowadzenie klasyfikacji osób do różnych przypadków patologicznych.

W trakcie uczenia systemu została odrzucona jedna reguła dla relacji osoby zdrowe, co stanowi 3,3% wszystkich przebiegów poddanych uczeniu.

Natomiast dla relacji osoby ze zmianami zwyrodnieniowymi stawu kolanowego, system odrzucił 2 reguły (10,0% wszystkich reguł), dla osób z uszkodzeniem więzadła krzyżowego przedniego jedną regułą (3,7% wszystkich reguł).

Tabela 2. Wygenerowane reguły dla osób ze zmianami zwyrodnieniowymi stawu kolanowego

Staw	Przedział identyfikacji	Współczynnik	Zakres wartości współczynnika
biodrowy	I	a_1	$1,625 \div 2,517$
		a_2	$-2,234 \div -0,565$
		a_3	$0,112 \div 0,526$
	II	a_1	$0,890 \div 2,224$
		a_2	$-1,527 \div -0,484$
		a_3	$0,082 \div 0,358$
kolanowy	I	a_1	$1,165 \div 2,397$
		a_2	$-1,705 \div -0,439$
		a_3	$0,125 \div 0,345$
	II	a_1	$1,767 \div 2,485$
		a_2	$-2,212 \div -1,109$
		a_3	$0,261 \div 0,709$
skokowo–goleniowy	I	a_1	$1,459 \div 2,389$
		a_2	$-2,166 \div -0,552$
		a_3	$0,252 \div 0,550$
	II	a_1	$1,105 \div 1,718$
		a_2	$-1,069 \div -0,235$
		a_3	$0,053 \div 0,093$

Tabela 3. Wygenerowane reguły dla osób z uszkodzeniem więzadła krzyżowego przedniego

Staw	Przedział identyfikacji	Współczynnik	Zakres wartości współczynnika
biodrowy	I	a_1	$1,344 \div 2,405$
		a_2	$-1,415 \div -0,253$
		a_3	$0,114 \div 0,394$
	II	a_1	$1,080 \div 2,274$
		a_2	$-0,972 \div -0,654$
		a_3	$0,055 \div 0,571$
kolanowy	I	a_1	$1,070 \div 2,514$
		a_2	$-1,441 \div -0,591$
		a_3	$0,034 \div 0,061$
	II	a_1	$1,768 \div 2,538$
		a_2	$-1,012 \div -0,196$
		a_3	$0,194 \div 0,754$
skokowo–goleniowy	I	a_1	$1,366 \div 2,467$
		a_2	$-2,260 \div 0,567$
		a_3	$0,078 \div 0,768$
	II	a_1	$0,704 \div 1,541$
		a_2	$-0,481 \div -0,049$
		a_3	$-0,092 \div -0,062$

W tabelach 4 – 5 przedstawiono reguły określające metody usprawnienia aparatu ruchu pacjenta (rehabilitacja, interwencja chirurgiczna itp.).

Przedstawione rozważania stanowią niepełną analizę obszernej problematyki dotyczącej klasyfikacji, oceny i usprawnienia aparatu ruchu człowieka, co jest wynikiem ograniczonej liczby danych pomiarowych. Jednak uzyskane wyniki naukowe uzasadniają wniosek, że metody identyfikacji mogą być wykorzystane do oceny własności dynamicznych chodu człowieka, a w konsekwencji do oceny aparatu ruchu pacjenta.

Tabela 4. Wygenerowane reguły określające zastosowanie interwencji chirurgicznej jako metody usprawnienia ruchowego dla osób ze zmianami zwyrodnieniowymi stawu kolanowego i uszkodzeniem więzadła krzyżowego przedniego

Przedział identyfikacji	Współczynnik	Zakres wartości współczynnika
I	a_I	$-600,000 \div 151,602$
	a_{II}	$-2,984 \div 87,002$
II	a_I	$-40,750 \div 77,747$
	a_{II}	$-4,435 \div 7,425$
III	a_I	$-11,306 \div 56,572$
	a_{II}	$-12,500 \div 1,944$
IV	a_I	$-90,011 \div 266,101$
	a_{II}	$-25,998 \div 6,008$
V	a_I	$-125,010 \div 25,717$
	a_{II}	$-8,659 \div 45,062$
VI	a_I	$-67,990 \div 95,002$
	a_{II}	$-10,996 \div 5,154$
VII	a_I	$-80,445 \div -5,529$
	a_{II}	$0,628 \div 3,000$

Tabela 5. Wygenerowane reguły określające zastosowanie rehabilitacji jako metody usprawnienia ruchowego dla osób ze zmianami zwyrodnieniowymi stawu kolanowego i uszkodzeniem więzadła krzyżowego przedniego

Przedział identyfikacji	Współczynnik	Zakres wartości współczynnika
I	a_I	$-85,426 \div 1,810$
	a_{II}	$-5,027 \div 41,912$
II	a_I	$-62,691 \div 239,000$
	a_{II}	$-29,807 \div 3,702$
III	a_I	$-141,602 \div 5,549$
	a_{II}	$-3,300 \div 62,000$
IV	a_I	$-11,295 \div 1,179$
	a_{II}	$-1,453 \div 3,986$
V	a_I	$-15,073 \div 244,267$
	a_2	$-19,941 \div 6,043$
VI	a_I	$-22,574 \div 37,048$
	a_{II}	$-5,297 \div 2,222$
VII	a_I	$-92,007 \div -6,915$
	a_{II}	$-6,000 \div 4,012$

Należy podkreślić, że kryteria dotyczące klasyfikacji pacjentów do różnych przypadków patologicznych oraz wyboru właściwej metody usprawnienia ruchowego mogą być również określone dla wartości współczynników uzyskanych innymi metodami.

2. Weryfikacja komputerowego systemu do wspomaganie oceny stanu aparatu ruchu człowieka

System do wspomaganie oceny stanu aparatu ruchu człowieka został zbudowany na podstawie opracowanego w procesie identyfikacji modelu lokomocji dwunożnej człowieka. W tego rodzaju systemach wymaga się sprawdzenia zgodności wyników uzyskanych z eksperymentu z wynikami z zaprojektowanego systemu. Zgodność w rozpatrywanym przypadku dotyczy identyczności zakwalifikowania badanych osób do poszczególnych przypadków patologicznych oraz identyczności postępowania usprawniającego, wskazanego przez klinicystów z Glenrose Rehabilitation Hospital.

Weryfikację systemu przeprowadzono na podstawie danych pochodzących z Glenrose Rehabilitation Hospital w Edmonton. Wyniki weryfikacji systemu przedstawiono w tab. 6 – 7.

Tabela 6. Wyniki weryfikacji systemu do wspomaganie oceny stanu aparatu ruchu człowieka (klasyfikacja pacjentów do różnych przypadków patologicznych)

Grupa badana	Procent prawidłowo sklasyfikowanych pacjentów
Norma	100,0
Zmiany zwyrodnieniowe stawu kolanowego	88,2
Uszkodzenie więzadła krzyżowego przedniego	92,8

Tabela 7. Wyniki weryfikacji systemu do wspomaganie oceny stanu aparatu ruchu człowieka (wybór metody usprawnienia aparatu ruchu pacjenta)

Metoda usprawnienia ruchowego	Procent prawidłowo wskazanej metody usprawnienia aparatu ruchu pacjenta
Interwencja (zmiany zwyrodnieniowe stawu kolanowego, uszkodzenie więzadła krzyżowego przedniego)	84,2
Rehabilitacja (zmiany zwyrodnieniowe stawu kolanowego, uszkodzenie więzadła krzyżowego przedniego)	83,3

System do wspomagania oceny stanu aparatu ruchu człowieka zweryfikowano na podstawie wyników badań uzyskanych dla: 15 zdrowych osób, 17 pacjentów ze zmianami zwyrodnieniowymi stawu kolanowego oraz 14 pacjentów z uszkodzeniem więzadła krzyżowego przedniego.

Podsumowując należy stwierdzić, że skuteczność systemu klasyfikującego osoby badane do różnych przypadków patologicznych wynosi średnio 93,6% poprawnych klasyfikacji. W przypadku wyboru metody usprawnienia aparatu ruchu pacjenta, system właściwie określił metodę średnio w 83,8%. Wyniki przeprowadzonej doświadczalnie weryfikacji systemu są zadowalające.

Wnioski

Weryfikacja systemu do wspomagania oceny stanu aparatu ruchu człowieka przeprowadzona na pacjentach znajdujących się w Glenrose Rehabilitation Hospital dowodzi, że metody identyfikacji parametrycznej są dobrym narzędziem w diagnostyce chodu człowieka. Zaproponowany system wprawdzie nie zastąpi pracy specjalistów, ale ułatwi pracę lekarzy i fizjoterapeutów.

Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do dalszych prac związanych z klasyfikacją pacjentów do różnych przypadków patologicznych oraz z wyborem innej metody usprawnienia ruchowego.

Literatura

1. Czogała E.: Teoria zbiorów rozmytych i probabilistycznych dla wspomagania podejmowania decyzji w medycynie, Informatyka medyczna, WKiŁ, Warszawa 1990, s.124–148.
2. Chau T.: A review of analytical techniques for gait data. P. 1, Fuzzy, statistical and fractal methods, Gait a. Posture Vol.13, No.1, 2001, pp.49–66.
3. Bianaghi E., Madella P.: Inductive and deductive reasonic techniques for fazzzy Dampeste Shafer classifiers, 7th IFSA World Congress, Prague, 1997, pp. 197–302.
4. Pauk J.: Identification of human gait model, Conference Proceedings Biomechanics of man, Čejkovice 2002, pp.127–129.
5. Pauk J, Jaworek K.: Parametric identification of lower limbs during walking of a man, Design a. Nature, WET Press, Southampton 2000, pp.361–366.

APPLYING DEMPSTER-SHAFER FUZZY LOGIC TO HUMAN APPARATUS DIAGNOSIS

Abstract: This paper surveys the utilization of Dempster-Shafer fuzzy logic in biomechanics of human gait. An experimental study in healthy children, in gonarthrosis and in were performed. In this paper I would like to discuss how fuzzy set theory can Anterior Cruciate ligaments be used for building a system to support clinical-decision making in biomechanics.

Keywords: Dempster-Shafera fuzzy logic, identification

Sławomir Poskrobko, Jan Łach¹

MODELOWANIE SPALANIA ODPADÓW DRZEWNYCH W KOTLE RUSZTOWYM

Streszczenie: Konieczność ochrony środowiska naturalnego doprowadziła m.in. do zwiększenia zainteresowania wykorzystaniem lokalnych zasobów paliw odnawialnych. W ostatnich latach wiele zainwestowano w kraju w związku z budową kotłowni, których celem jest zaspokojenie lokalnych potrzeb energetycznych. Często jednak okazuje się, że wytwarzana ilość energii cieplnej nie pokrywa się, szczególnie w okresach szczytowych, z ilością przewidzianą na etapie formułowania założeń projektowych, co jest powodem braku akceptacji społecznej zrealizowanej inwestycji. Przyczyną takiego stanu rzeczy może być np. błędnie sporządzony bilans zapotrzebowania na ciepło, zły stan techniczny systemu rozprowadzania ciepła ze źródła do odbiorców itp., ale zazwyczaj jest nią brak szczegółowej analizy możliwości pracy zainstalowanych kotłów w określonych warunkach zapotrzebowania na ciepło. Niezależnie od aspektu ekologicznego, należy więc położyć stosowny nacisk, i to już w ramach prac koncepcyjnych, na konieczność zapewnienia uzasadnionego ekonomicznie bezpieczeństwa energetycznego, tzn. na szczegółową i rzetelną analizę efektywności pracy systemu „napaliwiania” ciepłowni oraz wytwarzania i przesyłu ciepła, co pozwoli uniknąć groźnych w skutkach błędów podczas eksploatacji. W niniejszej pracy przedstawiono kluczowe zagadnienia związane z modelowaniem wytwarzania energii cieplnej z odpadów (zrębów) drzewnych. Ich efektywne rozwiązanie umożliwia planowanie gospodarki paliwowo-energetycznej w konkretnych warunkach zapotrzebowania na ciepło. W szczególności udokumentowano zależność wielkości bilansowych kotła, a tym samym efektywności jego pracy, od takich podstawowych parametrów, jak: wilgotność paliwa w postaci zrębów drzewnych, współczynnik nadmiaru powietrza oraz temperatura powietrza doprowadzanego do komory spalania. Analizę efektywności procesu spalania przeprowadzono na przykładzie typowego kotła wodnego z rusztem schodkowym o mocy nominalnej około 5,8 MW. Zwrócono w niej uwagę na doświadczenia zebrane w trakcie eksploatacji ciepłowni miejskiej na Podlasiu o mocy 12 MW, opalanej w całości zrębkami drzewnymi i trocinami.

Słowa kluczowe: spalanie, odpady drzewne, kocioł rusztowy, ciepłownia

¹ Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, ul. Wiejska 45C, 15–311 Białystok

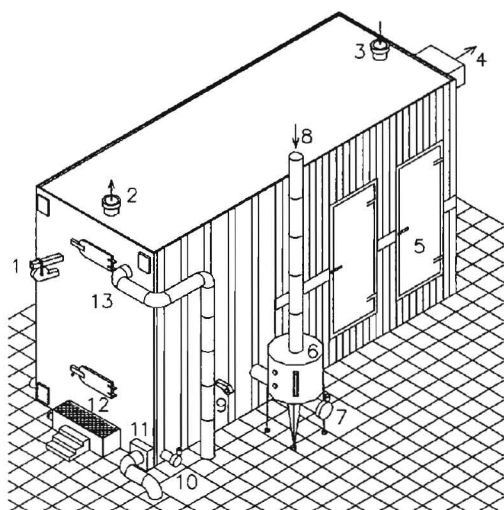
Wstęp

Racjonalizacja gospodarki paliwowo–energetycznej w Polsce wymusza ekonomiczne gospodarowanie paliwami i energią, uwzględniające ochronę środowiska naturalnego. Jest prawdopodobne, że już w niedalekiej przyszłości poważną rolę odgrywać będą paliwa alternatywne, w tym paliwa z odpadów bądź odpady, aczkolwiek pełnić one będą ciągle jeszcze rolę komplementarną w globalnym bilansie paliwowym. Węgiel kamienny będzie bowiem w naszym kraju jeszcze dość długo paliwem podstawowym. W warunkach krajowych uzasadnione wydają się np. technologie współspalania węgla z odpadami. Zasadnicze znaczenie mogą w nich mieć odpady drzewne, które są bardzo rozpowszechnioną formą biomasy i w wielu krajach (np. w Szwecji) wykorzystywaną do celów energetycznych. Najbardziej popularnym rodzajem drewna odpadowego, które spala się w kotłach, są zręby. Mniejszym zainteresowaniem cieszą się trociny, które w postaci brykietów są jednak stosunkowo drogie. Zręby drzewne to paliwo o właściwościach w miarę jednorodnych. Niskie koszty przygotowania oraz stosunkowo znaczne wartości opałowe biomasy drzewnej powodują, że – niezależnie od postaci – może się ona stać paliwem poszukiwanym na rynku. W elektrowniach lub elektrociepłowniach odpady drzewne mogą być poddane przemianom termicznym w komorach przedpaleniskowych współpracujących np. z kotłami pyłowymi. Chociaż udział tych odpadów w bilansie paliwowym elektrowni jest niewielki, to jednak dają się zauważyć określone efekty ekonomiczne i ekologiczne. W warunkach lokalnych, na szczeblu gmin, odpady drzewne mogą często odgrywać rolę podstawowego źródła energii. Jeśli wziąć pod uwagę akceptację tego rodzaju działań przez społeczności lokalne, a także przychylność dysponentów funduszami ekologicznymi, to można stwierdzić, że dla ciepłowni o niewielkich mocach (ok. 10–20MW) opalanym odpadową biomasą drzewną zapalono zielone światło. Mimo zrozumienia rangi problemu i akceptacji szeregu racjonalnych działań, w kraju praktycznie nie istnieje zintegrowany system paliwowo–energetyczny w zakresie zagospodarowania odpadów drzewnych. Ważne elementy tego systemu, to: (a).rozeznanie i określenie – metodą bilansu – rzeczywistych lokalnych potrzeb energetycznych oraz miejscowych zasobów paliwowych i ich dostępności, a także rynku paliwowego; (b).dobór efektywnej technologii wytwarzania energii po możliwie niskiej cenie za 1 GJ, przy czym istotnym czynnikiem wpływającym na tę cenę, czyli na koszty wytwarzania energii, jest umiejętne skojarzenie technologii spalania z infrastrukturą ciepłowni. W szczególności dotyczy to możliwości oddziaływania na parametry pracy kotła, mające wpływ na jego bilans energii. Wymiernym efektem stosownych przedsięwzięć jest przede wszystkim zmniejszenie zużycia paliwa. System dokonywania

opłat za paliwo dostarczane do kotłowni opalanej biomasą w postaci odpadów drzewnych (zrębów, trocin, itp.) opiera się najczęściej na ustaleniach z dostawcami, dotyczących ceny jednego metra przestrzennego (1 *mp.*) dostarczonego paliwa. System ten, choć prosty w realizacji, ma wiele wad, które niekorzystnie wpływają na ekonomikę wytwarzania energii cieplnej w ciepłowni. Istotną, a zarazem i podstawową wadą tego systemu rozliczeń jest ustalenie ceny za 1 *mp.* paliwa, niezależnie od jego jakości. O jakości takiego paliwa jak zręby drzewne decyduje zaś ich wielkość, zawartość zanieczyszczeń i przede wszystkim ich wilgotność. Określone wymiary zrębów stwarzają mniejsze lub większe problemy transportowe oraz wymagają właściwego rozwiązania systemu ich podawania do kotłów, natomiast wilgotność zrębów drzewnych ma kluczowy wpływ na wartość opałow, która stanowi o skali produkcji energii cieplnej w kotłach. Ten kluczowy parametr powinien więc także decydować o cenie zrębów drzewnych dostarczanych do ciepłowni bądź elektrociepłowni. Wiadomo, że wartość opałowa wilgotnych zrębów jest mniejsza niż zrębów suchych, a odstępstwa od zalecanych przez producenta wartości opałowych w istotny sposób wpływają na obciążenia cieplne kotła, które z kolei rzutują na jego wydajność, sprawność, itd. Zmiany wydajności, a więc i sprawności, decydują o ilości wyprodukowanej energii użytecznej, przeznaczonej do sprzedaży. Niewłaściwie przygotowane paliwo powoduje znaczny spadek produkcji ciepła oraz wzrost kosztów wytwarzania, o ile nie dysponuje się dodatkowym źródłem energii, jakim mogą być kotły opalane paliwem konwencjonalnym (węglem, olejem, gazem). Kwestia ta jest szczególnie ważna i uciążliwa zarówno dla wytwórcy jak i dla odbiorców w okresach szczytowego zapotrzebowania na ciepło. Następnymi, równie istotnymi czynnikami, wpływającymi na koszty wytwarzania energii cieplnej, są parametry technologiczne, związane bezpośrednio z procesem spalania w kotle. Należą do nich: temperatura dostarczanego powietrza oraz jego ilość określana współczynnikiem nadmiaru powietrza. Parametry te są zasadniczo zależne od producenta kotłów, dlatego też należy zwracać baczna uwagę na ich wartości w trakcie formułowania zapytania ofertowego. Duża konkurencyjność na rynku wytwarzania energii zmusza do wnikliwej analizy kosztów już na etapie przygotowywania założeń projektowych. Decyzja co do wyboru technologii powinna więc być poparta m.in. rzetelną analizą takich zagadnień, jak: możliwość przygotowania odpowiedniej jakości paliwa (biomasy) oraz wpływ temperatury dostarczanego powietrza oraz jego ilości na proces wytwarzania ciepła. Zagadnienia te są przedmiotem prezentowanych poniżej rozważań, w których analizuje się przebieg spalania odpadów drzewnych w kotle rusztowym o mocy około 5,8MW. W przeprowadzonej dyskusji uwypuklono związek między zmianami wartości takich podstawowych parametrów bilansowych, jak: wilgotność paliwa, współ-

czynnik nadmiaru oraz temperatura powietrza a bilansem energetycznym kotła, a w szczególności: zmniejszeniem zużycia paliwa. Rzeczywistym obiektem obserwacji była gminna ciepłownia o mocy około 12MW, całkowicie opalana odpadami drzewnymi. Obiekt zlokalizowano obok dużego kompleksu leśnego w województwie podlaskim, w środowisku stosunkowo dobrze rozwiniętego drobnego przetwórstwa drzewnego.

1. Modelowanie procesu spalania odpadów drzewnych w kotle rusztowym



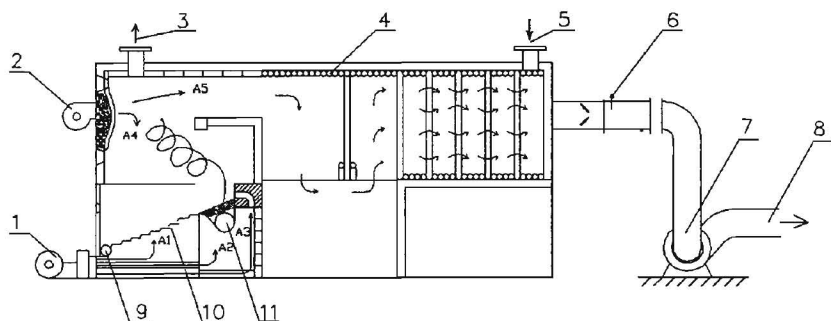
Rys.1. Typowy kocioł opalany rozdrobnionym paliwem drzewnym: 1 – palnik główny, 2 – woda gorąca, 3 – woda zasilająca, 4 – spaliny, 5 – drzwi do powierzchni ogrzewalnych kotła, 6 – zasobnik przykottowy, 7 – przenośnik ślimakowy paliwa, 8 – paliwo, 9 – palnik pilotażowy, 10 – przenośnik ślimakowy popiołu, 11 – powietrze pierwotne spalania, 12 – kłapa otwierana do paleniska, 13 – powietrze wtórne spalania.

Modelowanie procesu spalania rozdrobnionych odpadów drzewnych (zrębów, trocin) demonstruje się na przykładzie kotła wodnego z rusztem schodkowym, którego schemat przedstawiono na rys. 1 i 2.

Jest to typowy kocioł rusztowy z ruchomym rusztem schodkowym i trójciągową komorą konwekcyjną, w której zainstalowano powierzchnie ogrzewalne. Stanowi je płaszcz wodny, okalający górną część kotła, połączony z wodnorurkowym wymiennikiem ciepła. Parametry pracy kotła przedstawiono w tablicy 1. Kotły rozważanego typu są przystosowane do spalania rozdrobnionych paliw drzewnych, tj. zrębów i trocin. Paliwo podawane jest na ruszt przez przenośnik ślimakowy napędzany za pomocą reduktora, który napędza także ruszt schodkowy. Ruchy rusztowin powodują, że paliwo, przesypujące się w dół rusztu, przewraca się, dzięki czemu

uzyskuje się dobre wymieszanie paliwa z powietrzem, co poprawia efektywność spalania. Prędkość poruszania się rusztowin jest zsynchronizowana z ilością poda-

wanego paliwa. Powietrze pierwotne dostarczane jest od spodu rusztu, natomiast powietrze wtórne dostarcza się do górnej części kotła w celu spalania związków lotnych uwolnionych z paliwa. Powstałe spaliny przepływają do części konwekcyjnej kotła, w której przekazują ciepło powierzchniom ogrzewalnym, które podgrzewają wodę przepływającą przez kocioł.



Rys. 2. Schemat rozważanego kotła: 1 – powietrze pierwotne, 2 – powietrze wtórne, 3 – woda gorąca, 4 – powierzchnie ogrzewalne, 5 – woda zasilająca, 6 – sonda spalin, 7 – wentylator spalin, 8 – spaliny, 9 – przenośnik ślimakowy popiołu, 10 – ruszt kotła, 11 – przenośnik ślimakowy paliwa, A1, A2, A3, A4, A5 – strumienie powietrza

Tablica 1. Parametry pracy kotła

Parametr	Jednostka	Wartość
Moc nominalna	<i>kW</i>	5815
Moc paleniska	<i>kW</i>	7268
Nadciśnienie robocze	<i>MPa</i>	1,2
Pojemność wodna	<i>dm³</i>	4150
Zapotrzebowanie paliwa	<i>kg / h</i>	3050
Wilgotność paliwa	%	50
Temperatura wody na wyjściu z kotła	°C	110
Temperatura wody na wejściu do kotła	°C	70
Temperatura spalin	°C	250
Sprawność	%	80

Należy nadmienić, że dla zapewnienia właściwego przebiegu procesu spalania rozdziela się dostarczane do kotła powietrze na dwa zasadnicze strumienie (rys.2): powietrze pierwotne 1 i wtórne 2. Strumień powietrza pierwotnego rozgałęzia się zaś na: powietrze (A1) doprowadzane pod ruszt, tzw. powietrze zasilające (A2) i powietrze pierwotne paleniska (A3). Natomiast powietrze wtórne, doprowadzane

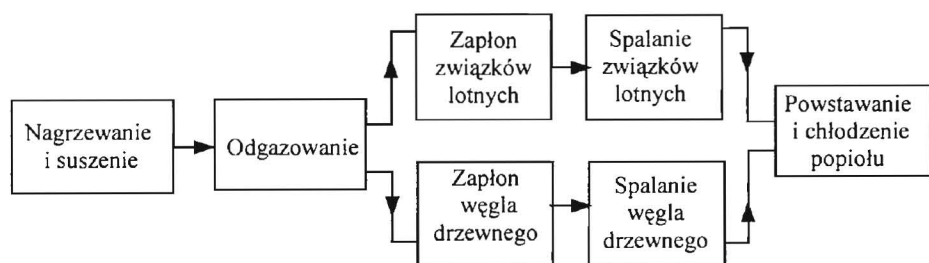
nad palenisko, rozdziela się na strumień powietrza wtórnego kierowanego nad ruszt (A4) i strumień powietrza komory wtórnej (A5). Powietrze (pierwotne i wtórne) jest dostarczane do kotła za pomocą promieniowych wentylatorów powietrza, które zasysają powietrze z przestrzeni nad kotłem za pomocą specjalnych czerpni i tłoczą je rurami stalowymi do kotła.

Kotły rusztowe opalane rozrobionym paliwem drzewnym to najliczniejsza grupa kotłów zainstalowanych w ciepłowniach na biomasę. Różnią się one od kotłów węglowych m.in. tym, że mają znacznie większą objętość komory spalania. Wynika to z faktu, że odpady drzewne charakteryzują się dużą zawartością związków lotnych (sięgającą 85%), będących gazami organicznymi, które uwalniają się w czasie ogrzewania paliwa (rozkładu substancji palnych zawartych w paliwie) i unoszą nad warstwę paliwa. Kotły takie są oferowane przez wielu producentów na całym świecie. Rozważane kotły jednostopniowe to tylko jedno z przykładowych rozwiązań kotłów rusztowych opalanych zrębami drzewnymi, które jest wynikiem przyjętej technologii spalania. Jeśli chodzi o krajowych producentów kotłów do efektywnego spalania drewna i odpadów (np. zrębów) drzewnych, to można tu wymienić takie kotły, jak np.: *Moderator* (produkowany w Hajnówce) i *FUWI* (produkowany w Elblągu).

1.1. Przebieg procesu spalania drewna

Na przebieg procesu spalania drewna w postaci rozdrobnionych odpadów drzewnych składa się wiele zjawisk fizycznych, fizykochemicznych i chemicznych, które występują równocześnie lub w pewnej sekwencji na granicy ziarna i gazu [1], [2]. W zjawiskach tych można wyodrębnić następujące procesy składowe (rys.3):

- *nagrzewanie i suszenie* ($t = 60 + 100^{\circ}\text{C}$) w celu odparowania wilgoci z powierzchni i wnętrza drewna, przy czym: (a) szybkość suszenia zależy od temperatury w komorze spalania i szybkości nagrzewania paliwa; (b) duża wilgotność paliwa powoduje absorpcję znacznej ilości ciepła na odparowanie wilgoci;



Rys.3. Procesy składowe spalania drewna

- *odgazowanie* ($t = 300 \div 400^{\circ}\text{C}$), czyli rozkład termiczny drewna połączony z uwalnianiem: związków lotnych (zawierających przede wszystkim: CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , H_2), składników ciekłych (wody, metanolu, kwasu octowego, aldehydu octowego i smoły) oraz pozostałości stałej (węgla drzewnego, składającego się z pierwiastka węgla, części mineralnych i nieodgazowanych węglowodorów), przy czym: (a) stopień odgazowania zależy od: temperatury w komorze spalania, szybkości nagrzewania paliwa i udziału tlenu; (b) im wyższa temperatura i im łatwiejszy dostęp powietrza, tym większa ilość uwalnianych związków lotnych; (c) w niskiej temperaturze i przy niedoborze tlenu powstaje mniej związków lotnych, a więcej koksu (węgla drzewnego);
- *zapłon* mieszanki gazowo-powietrznej, *zapłon* produktów ciekłych, *zapłon* ziarna paliwa stałego ($t = 400 \div 600^{\circ}\text{C}$);
- *spalanie* ($t = 700 \div 1500^{\circ}\text{C}$): (a) związków lotnych (proces homogeniczny przebiegający nad paleniskiem); (b) pozostałości koksowej (proces heterogeniczny na powierzchni węgla drzewnego obejmujący: utlenianie pierwiastka węgla, redukcję dwutlenku węgla oraz utlenianie tlenku węgla i wodoru);
- *chłodzenie popiołu* ($t = 1500^{\circ}\text{C} \rightarrow$ temperatura otoczenia), będącego pozostałością po spalaniu węgla drzewnego i zawierającego: związki mineralne, zanieczyszczenia oraz nieutleniony węgiel drzewny, przy czym: (a) mała zawartość takich pierwiastków, jak sodu i potasu, odpowiedzialnych za mięknięcie popiołu, powoduje, że popiół jest w zasadzie usuwany w stanie sypkim, a tylko jego niewielka część odpływa wraz ze spalinami (popiół lotny); (b) czynnikiem chłodzącym popiół przed usunięciem go z kotła jest najczęściej powietrze spalania.

Składowymi procesami fizykochemicznymi zachodzącymi w ziarnach podczas spalania są:

- odparowanie wody z ich materiału,
- dyfuzja tlenu w kierunku powierzchni,
- dyfuzja produktów utleniania od powierzchni do gazu,
- wymiana ciepła między gazem a ziarnem,
- wydzielanie ciepła podczas reakcji chemicznych.

Podstawowe procesy chemiczne, to:

- termiczny rozkład węglowodorów i uwolnienie części lotnych (piroliza),
- utlenianie pozostałości po pirolizie w postaci węgla drzewnego (karbonizatu),
- redukcja dwutlenku węgla do tlenku węgla,
- utlenianie produktów gazowych, w tym tlenku węgla.

W przypadku paliw stałych o dużej zawartości wilgoci pojawiają się poważne trudności związane z ustaleniem jednoznacznych kryteriów stabilnego spalania. Najczęściej stosowanym kryterium autotermicznego procesu spalania jest osiągnięcie takiej temperatury, w której proces ten będzie przebiegał stabilnie. Jednak wartość tej temperatury może być wyznaczona, jak podaje Nadziakiewicz [1], jedynie na drodze eksperymentalnej, i to dla konkretnego paliwa spalanego w ściśle określonym kotle. Pomimo tych ograniczeń i trudności przyjmuje się określoną temperaturę bądź wartość opałową, która powinna zapewniać stabilny przebieg procesu. Określając warunki autotermicznego spalania można oprzeć się na różnych przesłankach, a mianowicie na wartościach takich parametrów, jak:

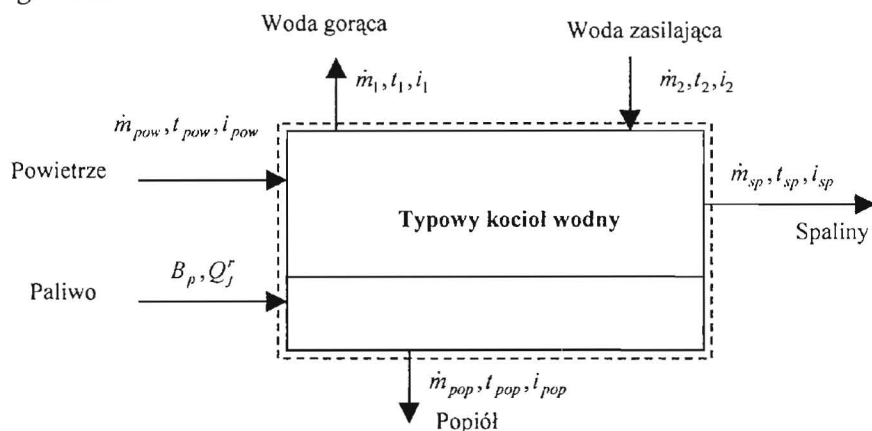
- temperatura zapłonu paliwa,
- zawartość części mineralnych w paliwie,
- minimalna wartość opałowa paliwa,
- temperatura spalania z uwzględnieniem strat ciepła do otoczenia,
- minimalna temperatura spalania, wyznaczona w praktyce,
- minimalna temperatura spalania, zalecana przez przepisy ochrony powietrza.

Zakres autotermicznego spalania określa się w praktyce za pomocą wykresu Tannera [3]. Rolę współrzędnych odgrywają: zawartość części palnych (*cz.p*), zawartość części mineralnych (*p*) i zawartość wilgoci (*w*), przy czym ich suma jest równa jedności. Taka analiza jest szczególnie przydatna przy spalaniu paliw odpadowych, dla których trudno jest a priori określić warunki spalania. W prezentowanej analizie efektywności spalania odpadów drzewnych procedura ta została pominięta ze względu na jednorodny skład paliwa. Zagadnienie to może być

przedmiotem szczegółowej analizy w przypadku współspalania, np. węgla z odpadami drzewnymi i inną biomasą.

1.2. Obliczenia cieplne procesu spalania w kotle rusztowym

Przedmiotem analizy jest spalanie biomasy w postaci odpadów (zrębów) drzewnych w palenisku typowego kotła wodnego z rusztem schodkowym. Zasadniczym celem obliczeń jest weryfikacja proponowanego modelu danego procesu, w którym uwzględnia się rzeczywiste parametry pracy kotła. Na rys.4 przedstawiono jego schemat, który stanowi graficzną ilustrację równań bilansowych. W tabelcy 2 wyspecyfikowano zaś zestaw zadanych wartości określonych parametrów eksploatacyjnych, wykorzystywanych w zestawionych tu równaniach. Proces spalania zrębów drzewnych opisuje się następującymi równaniami bilansu masy i energii kotła:



Rys.4. Schemat typowego kotła wodnego

$$B_p + \dot{m}_{pow} + \dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_{pop} + \dot{m}_{sp}, \quad (1)$$

$$B_p \cdot Q_f^r + \dot{m}_{pow} \cdot i_{pow} + \dot{m}_2 \cdot i_2 = \dot{m}_1 \cdot i_1 + \dot{m}_{pop} \cdot i_{pop} + \dot{m}_{sp} \cdot i_{sp} + \dot{Q}_{ot} + \dot{Q}_c + \dot{Q}_z, \quad (2)$$

które uzupełnia się szeregiem dodatkowych zależności, wiążących wielkości fizyczne istotne dla przebiegu badanego zjawiska, w tym równaniami stechiometrycznymi procesu spalania [4], [5]. Równania te determinują:

- wartość opałową zrębów drzewnych o wilgotności W^r :

$$Q_j^r = Q_{jsuch}^r \cdot \left(\frac{100 - W^r}{100} \right) - \frac{2,442 \cdot W^r}{100} \text{ [kJ/kg]}; \quad (3)$$

- teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze spalania:

$$V_{pow}^t = \left[0,2412 \cdot \frac{(Q_j^r + 2303)}{1000} - \frac{(A^r - 6)}{196} \right] - \left[\frac{S_c \cdot Q_j^r}{3383 \cdot 10^3} \cdot \frac{22,4}{12 \cdot 0,21} \right] \text{ [m}^3\text{/kg]}; \quad (4)$$

- rzeczywiste zapotrzebowanie na powietrze spalania:

$$V_{pow}^{rz} = \lambda \cdot V_{pow}^t \text{ [m}^3\text{/kg]}; \quad (5)$$

- objętościowe natężenie przepływu powietrza spalania:

$$\dot{V}_{pow}^{rz} = B_p \cdot V_{pow}^{rz} \text{ [m}^3\text{/s]}; \quad (6)$$

- masowe natężenie przepływu powietrza spalania:

$$\dot{m}_{pow} = \rho_{pow} \cdot \dot{V}_{pow}^{rz} \text{ [kg/s]}; \quad (7)$$

- objętościowe natężenie przepływu spalin wilgotnych:

$$\dot{V}_{sp} = \frac{\dot{m}_{sp}}{\rho_{sp}} \text{ [m}^3\text{/s]}; \quad (8)$$

- rzeczywistą objętość spalin wilgotnych:

$$V_{sp}^{rz} = \frac{\dot{V}_{sp}}{B_p} \text{ [m}^3\text{/kg]}; \quad (9)$$

- teoretyczną objętość spalin wilgotnych:

$$V_{sp}^t = V_{sp}^{rz} - (\lambda - 1) \cdot V_{pow}^t \text{ [m}^3\text{/kg]}; \quad (10)$$

- teoretyczną objętość pary wodnej w spalinach:

$$V_w^t = 0,111 \cdot H^r + 0,0124 \cdot W^r + 0,0161 \cdot V_{pow}^t \text{ [m}^3\text{/kg]}; \quad (11)$$

- rzeczywistą objętość pary wodnej w spalinach:

$$V_w = V_w^t + (\lambda - 1) \cdot 0,0161 \cdot V_{pov}^t \text{ [m}^3\text{/kg];} \quad (12)$$

- rzeczywistą objętość spalin suchych:

$$V_{ss}^{r'} = V_{sp}^{r'} - V_w \text{ [m}^3\text{/kg];} \quad (13)$$

- teoretyczną objętość spalin suchych:

$$V_{ss}^t = V_{ss}^{r'} - (\lambda - 1) \cdot V_{pov}^t \text{ [m}^3\text{/kg];} \quad (14)$$

- entalpię właściwą spalin wilgotnych:

$$i_{sp} = t_{sp} \cdot c_{sp} \text{ [kJ/kg];} \quad (15)$$

- masowe natężenie przepływu popiołu:

$$\dot{m}_{pop} = \frac{(A^r/100) \cdot B_p}{\left(1 - \frac{C_p}{100}\right)} \text{ [kg/s];} \quad (16)$$

- masowe natężenie przepływu wody gorącej:

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{Q}_d}{c_w \cdot (t_1 - t_2)} \text{ [kg/s];} \quad (17)$$

- masowe natężenie przepływu wody zasilającej:

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{Q}_d}{c_w \cdot (t_1 - t_2)} \text{ [kg/s];} \quad (18)$$

- entalpię właściwą wody gorącej:

$$i_1 = c_w \cdot t_1 \text{ [kJ/kg];} \quad (19)$$

- entalpię właściwą wody zasilającej:

$$i_2 = c_w \cdot t_2 \text{ [kJ/kg];} \quad (20)$$

Tablica 2. Zestawienie zadanych wartości określonych parametrów eksploatacyjnych

Wielkość		Symbol	Jednostka	Wartość
Paliwo	Wartość opałowa suchej masy zrębów	Q_{jsuch}^r	[kJ / kg]	19,594
	Wilgotność zrębów	W^r	[%]	50
	Zawartość popiołu w paliwie	A^r	[%]	1,0
	Zawartość wodoru w paliwie	H^r	[%]	6,2
Powietrze	Współczynnik nadmiaru powietrza	λ	—	1,25
	Temperatura powietrza spalania	t_{pow}	[°C]	25
	Gęstość powietrza spalania	ρ_{pow}	[kg / m ³]	1,176
	Entalpia właściwa powietrza spalania	i_{pow}	[kJ / kg]	55
	Wilgotność względna powietrza	φ_{pow}	[%]	60
Spaliny	Temperatura spalin wilgotnych	t_{sp}	[°C]	250
	Gęstość spalin wilgotnych	ρ_{sp}	[kg / m ³]	1,235
	Ciepło właściwe spalin wilgotnych	c_{sp}	[kJ / (kg · K)]	1,150
	Maksymalna zawartość CO ₂ w spalinach	CO_{2max}	[%]	20,5
	Zawartość tlenku węgla w spalinach	CO	[%]	0,55
Popiół	Entalpia właściwa gorącego popiołu	i_{pop}	[kJ / kg]	924
	Zawartość części palnych w popiele	C_p	[%]	20,0
Woda	Temperatura wody gorącej	t_1	[°C]	130
	Temperatura wody zasilającej	t_2	[°C]	90
	Ciepło właściwe wody	c_w	[kJ / (kg · K)]	4,1868
Kocioł	Moc nominalna kotła	$\dot{Q}_n$	[kW]	5815
	Moc paleniska kotła	$\dot{Q}_b$	[kW]	7268
	Strumień ciepła tracony do otoczenia	$\dot{Q}_{ot}$	[kW]	218

- ograniczenia odnośnie do wartości temperatury wody zasilającej i wody gorącej:

$$t_1(p_1, i_1) \leq t_{1max}, \quad (21)$$

$$t_{2min} \leq t_2(p_2, i_2) \leq t_{2max}, \quad (22)$$

przy czym: p_1 – ciśnienie wody gorącej a p_2 – ciśnienie wody zasilającej;

- ograniczenia odnośnie do wartości ciśnienia wody zasilającej i wody gorącej:

$$p_1 - p_s(i_1) \geq \Delta p_{1zn}, \quad (23)$$

$$p_2 \leq p_{2\max}, \quad (24)$$

gdzie Δp_{1zn} – znamionowe straty ciśnienia;

- procentową wartość straty do otoczenia:

$$S_{ot} = \frac{\dot{Q}_{ot}}{B_p \cdot Q_j^r} \cdot 100 \quad [\%]; \quad (25)$$

- stratę wylotową:

$$\dot{Q}_{wyl} = (\dot{m}_{sp} \cdot i_{sp}) - (\dot{m}_{pow} \cdot i_{pow}) \quad [\text{kW}]; \quad (26)$$

- procentową wartość straty wylotowej:

$$S_{wyl} = \frac{\dot{Q}_{wyl}}{B_p \cdot Q_j^r} \cdot 100 \quad [\%]; \quad (27)$$

- stratę niecałkowitego spalania:

$$\dot{Q}_c = \frac{\dot{m}_{pop} \cdot C_p \cdot 33829}{100} \quad [\text{kW}]; \quad (28)$$

- procentową wartość straty niecałkowitego spalania:

$$S_c = \frac{\dot{Q}_c}{B_p \cdot Q_j^r} \cdot 100 \quad [\%]; \quad (29)$$

- procentową wartość straty niezupełnego spalania:

$$S_z = \frac{V_{ss} \cdot 12644 \cdot [CO]}{Q_j^r} \quad [\%]; \quad (30)$$

- stratę niezupełnego spalania:

$$\dot{Q}_z = \frac{B_p \cdot Q_j^r \cdot S_z}{100} \quad [\text{kW}]; \quad (31)$$

stratę gorącego popiołu:

$$\dot{Q}_{pop} = \dot{m}_{pop} \cdot i_{pop} \quad [\text{kW}]; \quad (32)$$

Tablica 3. Zestawienie obliczonych wartości określonych parametrów dla nominalnych warunków pracy kotła

	Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartość
1	2	3	4	5
Czynnik roboczy	Strumień masowy wody gorącej	$\dot{m}_1$	[kg/s]	34,72
	Strumień masowy wody zasilającej	$\dot{m}_2$	[kg/s]	34,72
	Entalpia właściwa wody gorącej	i_1	[kJ/kg]	544,3
	Entalpia właściwa wody zasilającej	i_2	[kJ/kg]	376,8
Powietrze	Teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze	V'_{pow}	[m ³ /kg]	2,627
	Rzeczywiste zapotrzebowanie na powietrze	V'^{rz}_{pow}	[m ³ /kg]	3,284
	Strumień objętościowy powietrza	$\dot{V}^{rz}_{pow}$	[m ³ /s]	2,783
	Strumień masowy powietrza	$\dot{m}_{pow}$	[kg/s]	3,273
Paliwo	Wartość opałowa zrębków drzewnych	Q'_f	[kJ/kg]	8576
	Zużycie paliwa	B_p	[kg/s]	0,8474
Kocioł	Moc chwilowa kotła	$\dot{Q}_d$	[kW]	5845
	Moc paleniska kotła	$\dot{Q}_0$	[kW]	7267
	Sprawność cieplna kotła	η_k	[kW]	80,0
Straty cieplne kotła	Strata do otoczenia	$\dot{Q}_{ot}$	[kW]	218,0
		S_{ot}	[%]	3,0
	Strata wylotowa	$\dot{Q}_{wyl}$	[kW]	1001,5
		S_{wyl}	[%]	13,78
	Strata gorącego popiołu	$\dot{Q}_{pop}$	[kW]	9,8
		S_{pop}	[%]	0,13
	Strata niecałkowitego spalania	$\dot{Q}_c$	[kW]	71,7
		S_c	[%]	0,99
	Strata niezupełnego spalania	$\dot{Q}_z$	[kW]	151,4
		S_z	[%]	2,08
	Suma strat cieplnych	$\dot{Q}_{str}$	[kW]	1234,4
		S_{str}	[%]	16,99

Spaliny	Entalpia właściwa spalin wilgotnych	i_{sp}	$[kJ/kg]$	287,5
	Strumień masowy spalin wilgotnych	$\dot{m}_{sp}$	$[kg/s]$	4,110
	Strumień objętościowy spalin wilgotnych	$\dot{V}_{sp}$	$[m^3/s]$	3,328
	Objętość rzeczywista spalin wilgotnych	V_{sp}	$[m^3/kg]$	3,927
	Objętość rzeczywista spalin suchych	V_{ss}	$[m^3/kg]$	2,566
Spaliny	Teoretyczna objętość pary wodnej w spalinach	V_w^t	$[m^3/kg]$	1,350
	Rzeczywista objętość pary wodnej w spalinach	V_w	$[m^3/kg]$	1,361
	Teoretyczna objętość spalin suchych	V_{ss}^t	$[m^3/kg]$	1,909
	Teoretyczna objętość spalin wilgotnych	V_{sp}^t	$[m^3/kg]$	3,270
Popiół	Strumień masy popiołu	$\dot{m}_{pop}$	$[kg/s]$	0,01059

- procentową wartość straty gorącego popiołu:

$$S_{pop} = \frac{\dot{Q}_{pop}}{B_p \cdot Q_j^r} \cdot 100 \quad [\%]; \quad (33)$$

- sumę strat cieplnych kotła:

$$\sum \dot{Q}_{str} = \dot{Q}_{wyl} + \dot{Q}_c + \dot{Q}_z + \dot{Q}_{pop} + \dot{Q}_{ot} \quad [kW]; \quad (34)$$

- procentową wartość strat cieplnych kotła:

$$S_{str} = \frac{\sum \dot{Q}_{str}}{B_p \cdot Q_j^r} \cdot 100 \quad [\%]; \quad (35)$$

- moc cieplną kotła:

$$\dot{Q}_d = \dot{m}_1 \cdot c_w \cdot (t_1 - t_2) \quad [kW]; \quad (36)$$

- ograniczenie mocy cieplnej kotła:

$$\dot{Q}_{d \max} \geq \dot{Q}_d \geq \dot{Q}_{d \min} \quad [kW]; \quad (37)$$

- moc paleniska kotła:

$$\dot{Q}_b = B_p \cdot Q_j^r \quad [kW]; \quad (38)$$

- sprawność kotła:

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_d}{B_p \cdot Q_j} [\%], \quad (39)$$

która często bywa obliczana z zależności:

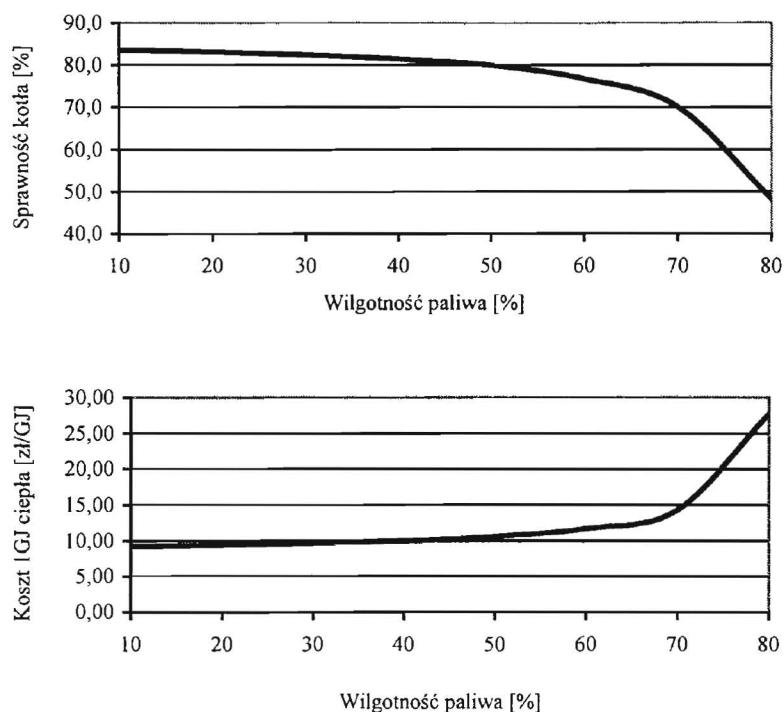
$$\eta_k - f(\dot{Q}_d) = 0, \quad (40)$$

gdzie funkcja $f(\dot{Q}_d)$ jest na ogół aproksymowana wielomianem [6].

Dodajmy tu, że operuje się jedynie bezwzględnymi ilościami ciepła (tzn. abstrahuje się od ich znaku ustalanego w termodynamice technicznej). Ponadto, zakłada się, że chwilowa moc cieplna kotła $\dot{Q}_d$ jest równa jego mocy nominalnej Q_n . Przedstawiony model obliczeniowy może stanowić punkt wyjścia do szczegółowej analizy pracy kotła w zależności od zadanych wartości poszczególnych parametrów eksploatacyjnych. W tablicy 3 zestawiono wyniki obliczeń dla znamionowych warunków pracy analizowanego kotła wodnego z rusztem schodkowym.

2. Wpływ wilgotności paliwa, współczynnika nadmiaru i temperatury powietrza na efektywność pracy kotła

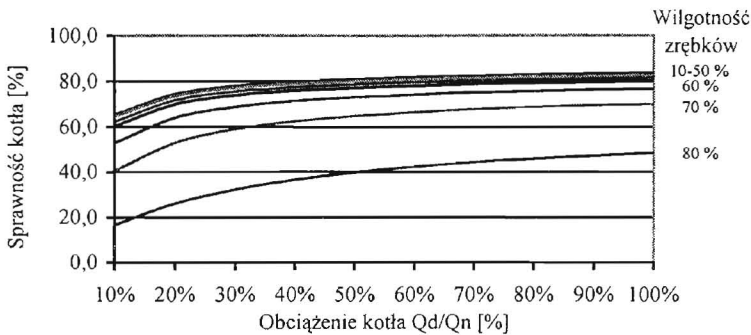
Zasadniczymi parametrami, które w sposób istotny wpływają na przebieg procesu spalania zrębów drzewnych, są przede wszystkim: ich wilgotność W^r , współczynnik nadmiaru powietrza λ i temperatura powietrza t_{pow} doprowadzanego do komory spalania.



Rys. 5. Sprawność kotła oraz koszt produkcji 1 GJ energii cieplnej w zależności od wilgotności zrębów drzewnych

Tablica 4. Wpływ wilgotności zrębów drzewnych na podstawowe parametry kotła i koszt produkcji 1 GJ energii cieplnej

Wilgotność zrębów	Wartość opałowa zrębów	Maksymalna moc cieplna kotła	Zużycie paliwa	Sprawność kotła	Koszt produkcji 1 GJ ciepła
W^r	Q_j^r	$\dot{Q}_{d \max}$	B_p	η_k	K_{GJ}
[%]	[kJ/kg]	[kW]	[kg/h]	[%]	[PLN/GJ]
10	17 390	6843	1694	83,6	9,23
20	15 187	6682	1907	83,1	9,42
30	12 983	6476	2179	82,4	9,67
40	10 780	6201	2542	81,5	10,03
50	8576	5815	3051	80,0	10,60
60	6372	4146	4146	76,8	11,71



Rys. 6. Charakterystyka kotła w zależności od wilgotności zrębów drewnych W^r

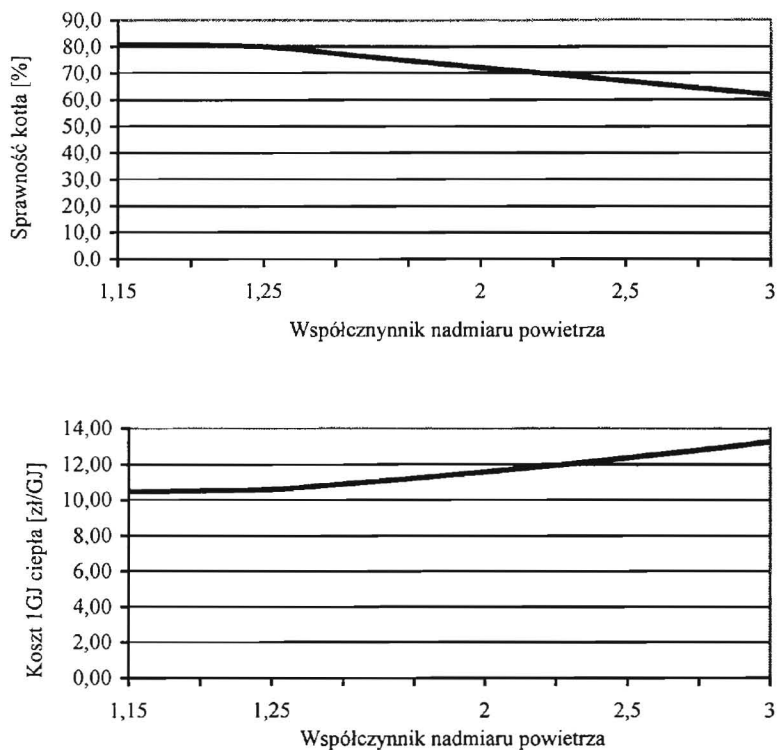
Należy tu także wymienić: rozdrobnienie zrębów, zawartość związków lotnych oraz zawartość i skład chemiczny popiołu w zrębach (tzn. ich rodzaj i gatunek odpadów drewnnych). Wiadomo, że ze wzrostem wilgotności zrębów drewnych W^r maleje ich wartość opałowa Q_j^r . Część ciepła, wywiązującego się podczas spalania wilgotnego paliwa, jest bowiem zużywana na odparowanie zawartej w nim wilgoci. Dlatego też ze wzrostem wilgotności paliwa W^r rosną straty ciepła i zużycie paliwa, a więc sprawność kotła η_k ulega znacznemu obniżeniu i następuje wzrost kosztu jednostkowego produkcji 1 GJ energii cieplnej. Fakty te znajdują ilościowe odzwierciedlenie w tabelicy 4, w której zamieszczono wyniki obliczeń pozyskane na podstawie sformułowanego wyżej modelu matematycznego procesu spalania odpadów drewnnych. Zasadnicze rezultaty zilustrowano także graficznie na rys.5. Na rys. 6 przedstawiono charakterystykę kotła w zależności od wilgotności W^r . Uwidoczniona sytuacja czyni produkcję energii cieplnej przedsięwzięciem wymagającym znacznych nakładów finansowych. W warunkach dużej wilgotności paliwa, ciepłownia nie jest w stanie pokryć w pełni lokalnego zapotrzebowania odbiorców na energię ciepłą, przy czym szczególnie w okresach szczytowych.

W tabelicy 5 zaprezentowano zaś wpływ wilgotności paliwa W^r na koszt jego zakupu. Należy jednak zauważyć, że w ciepłowniach są powszechnie stosowane odpady drewnne o wilgotności $W^r \approx 50\%$. W takim przypadku trudno mówić o wymiernych zyskach, osiąganych na podstawie analizy przedstawionych wyników obliczeń. W ramach racjonalnej gospodarki paliwowo-energetycznej należa-

łoby kondycjonować paliwo dostarczane do ciepłowni. Wybór technologii kondycjonowania winien być poprzedzony rzetelną kalkulacją ekonomiczną.

Zręby drzewne przeznaczone do spalania powinny być maksymalnie rozdrobnione, albowiem uzyskuje się wtedy większą powierzchnię kontaktu paliwa i omywającego go powietrza. Spalanie przebiega więc bardziej równomiernie i intensywniej niż w przypadku jedynie niewielkiego rozdrobnienia odpadów drzewnych, co ułatwia pracę systemu sterującego pracą kotła. Niedokładne wymieszanie cząstek paliwa z powietrzem spalania oraz niedoskonałość paleniska kotła sprawiają jednak, że niezbędne jest dostarczanie do kotła większej ilości powietrza niż to wynika ze stechiometrii procesu spalania. Spalanie rozdrobnionych zrębów drzewnych należy przeprowadzać przy optymalnej wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ [7, 8], która dla rozważanego kotła mieści się w przedziale od 1,20 do 1,30, albowiem suma jego podstawowych strat cieplnych jest wtedy najmniejsza, a tym samym sprawność kotła jest najwyższa. Zbyt mała wartość tego współczynnika powoduje, że spalanie staje się niezupełne i niecałkowite, a więc pojawiają się straty niezupełnego i niecałkowitego spalania, które powodują obniżenie sprawności kotła η_k . Nadmiar powietrza nie może być również zbyt duży, gdyż wraz ze wzrostem λ spada temperatura spalania w komorze paleniskowej, a więc zwiększa się strata wylotowa S_{wy} oraz zmniejsza się sprawność kotła η_k .

Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza λ na zużycie paliwa B_p , a tym samym na koszty wytwarzania energii cieplnej, przedstawiono w tablicy 6. W tablicy 7 pokazano zależność parametrów pracy kotła od wartości współczynnika λ . Rysunek 7 ilustruje zaś sprawność kotła η_k i koszt produkcji 1 GJ ciepła K_{GJ} w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza λ . Z analizy powyższych wyników wyłaniają się widoczne spadki sprawności kotła η_k oraz wyraźny wzrost zużycia paliwa B_p . Jeśli zaś ma się do czynienia ze wzrostem wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ , to kocioł nie osiąga zaplanowanej mocy nominalnej Q_n . Oznacza to, że istotną kwestią w ciepłowni jest zapewnienie przebiegu spalania z właściwą wartością λ . Jednak w wielu ciepłowniach realizuje się ten proces z wartością λ znacznie większą od wartości optymalnej, a to w celu zabezpieczenia się przed wystąpieniem niezupełnego i niecałkowitego spalania. Reasumując powyższe stwierdzamy, że przedstawione powyżej wyniki obliczeń pokazują, iż nadmierne zwiększanie współczynnika λ jest niekorzystne. Wraz ze wzrostem współczynnika λ spada bowiem sprawność kotła i jego maksymalna moc cieplna, natomiast wzrasta koszt produkcji 1 GJ ciepła.



Rys. 7. Sprawność kotła η_k i koszt produkcji 1 GJ ciepła K_{GJ} w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza λ

Tablica 5. Wpływ wilgotności paliwa W^r na wskaźniki ekonomiczne pracy kotła

Lp.	Wielkość	Symbol	Jednostka	Wilgotność paliwa W^r				
				50 %	40%	30%	20%	10%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Nominalne zużycie paliwa	B_p	[kg/h]	3050,7	2392,4	1967,1	1670,4	1451,7
2	Średnia gęstość nasypowa	ρ_n	[kg/mp]	250,0	208,4	178,6	156,3	138,9
3	Objętość paliwa	V_f	[mp]	12,20	11,48	11,01	10,69	10,45
4	Procentowa oszczędność paliwa	O_f	[%]	0	5,93	9,74	12,42	14,35
5	Średnie roczne zużycie paliwa przez ciepłownię	$B_{sr/a}$	[mp]	30000	28222	27077	26274	25694
6	Średnia cena 1 mp. zrębów i trocin	P	[PLN/mp]	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
7	Średni roczny koszt zakupu paliwa	K_f	[PLN/a]	450000	423331	406157	394110	385497
8	Objętość zaoszczędzonego paliwa	$V_{f,z}$	[mp]	0	1777,9	2922,9	3726,0	4306,2
9	Zysk roczny	Z_a	[PLN/mp]	0	26669	43843	55890	64593
10	Sprawność kotła	η_k	[%]	80,0	81,2	82,0	82,5	82,9

Tablica 6. Wpływ współczynnika nadmiaru powietrza λ na sprawność kotła η_k , stratę wylotową S_{wyl} i zużycie paliwa B_p

Lp.	Wielkość	Symbol	Jednostka	Współczynnik nadmiaru powietrza λ			
				1,25	2,00	2,50	3,00
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Chwilowa moc cieplna kotła	Q_d	[kW]	5815	5355	5048	4741
2	Zużycie paliwa do wyprodukowania $Q_d = 5815 MW$	$B_{p,n}$	[kg/h]	3050,7	3313,0	3515,5	3742,0
3	Sprawność kotła	η_k	[%]	80,1	73,7	69,5	65,2
4	Strata wylotowa	S_{wyl}	[%]	16,4	24,2	29,4	34,7
5	Moc paleniska	Q_b	[kW]	7268	7268	7268	7268
6	Procentowy wzrost zużycia paliwa	$\frac{B_p}{B_{p,n}} \cdot 100$	[%]	0	7,92	13,20	18,47

Tablica 7. Parametry pracy kotła i koszt produkcji 1GJ energii cieplnej w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza λ

Współczynnik nadmiaru powietrza	Maksymalna moc kotła	Strata wylotowa	Sprawność Kotła	Koszt produkcji 1GJ ciepła
λ	$\dot{Q}_{J\max}$	S_{wyl}	η_k	K_{GJ}
[-]	[kW]	[kg/s]	[%]	[PLN/GJ]
1,15	5890	12,9	81,1	10,48
1,2	5853	13,4	80,5	10,54
1,25	5815	13,8	80,0	10,60
1,5	5627	15,9	77,4	10,90
2	5250	20,1	72,2	11,58
3	4496	28,4	61,9	13,27

Obliczenia efektywności pracy kotła przeprowadzono także przy zmienianiu wartości temperatury powietrza t_{pow} , co wpłynęło na zmianę jego entalpii właściwej i_{pow} oraz gęstości ρ_{pow} . Otrzymane wyniki przedstawiono w tablicach: 8 i 9 oraz na rys.8.

Tablica 8. Wpływ temperatury powietrza t_{pow} doprowadzanego do kotła na parametry pracy kotła

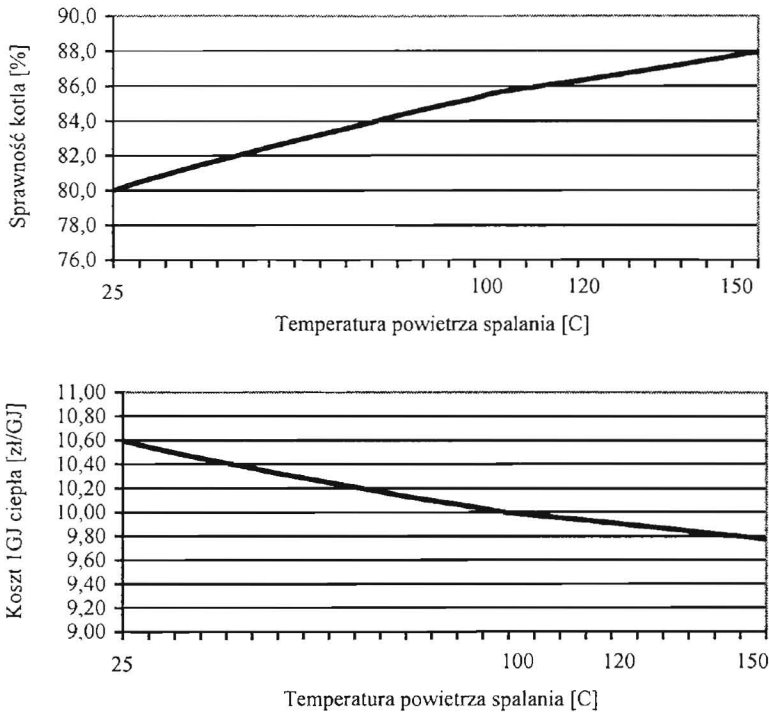
Lp.	Wielkość	Symbol	Jednostka	Bez podgrzania powietrza	Z podgrzaniem powietrza
1	2	3	4	5	6
1	Temperatura powietrza	t_{pow}	[°C]	25	100
2	Entalpia właściwa powietrza	i_{pow}	[kJ/kg]	55	134
3	Gęstość powietrza	ρ_{pow}	[kg/m³]	1,176	0,915
4	Zużycie paliwa	B_p	[kg/h]	3050,7	2866,7
5	Średnie roczne zużycie paliwa	B_{sr}	[mp]	30000	28191
6	Sprawność kotła	η_k	[%]	80,0	85,1
7	Średni roczny koszt zakupu paliwa	K_f	[PLN/a]	450000	422863
8	Procentowa oszczędność paliwa	O_f	[%]	6,03	
9	Zysk roczny	Z_a	[PLN/a]	27134	

Powietrze spalania może być dostarczane z przestrzeni nad kotłem dzięki specjalnym czerpniom podłączonym do wentylatorów powietrza. W takim przypadku powietrze ma temperaturę około 25–30 °C. Powietrze spalania może być również podgrzewane przed wprowadzeniem do kotła w podgrzewaczach. W przypadku rozważanych kotłów, w których nominalna temperatura spalin wylotowych wynosi 250 °C, możliwe jest bowiem zainstalowanie podgrzewacza w kanale spalinowym. Wiąże się to jednak z koniecznością zwiększenia mocy wentylatorów spalin.

Tablica 9. Parametry pracy kotła i koszt produkcji 1 GJ ciepła w zależności od temperatury powietrza spalania

Temperatura powietrza	Entalpia powietrza	Gęstość powietrza	Maksymalna moc kotła	Sprawność kotła	Koszt produkcji 1 GJ ciepła
t_{pow}	i_{pow}	ρ_{pow}	$\dot{Q}_{d\ max}$	η_k	K_{GJ}
[°C]	[kJ / kg]	[kg / m ³]	[kW]	[%]	[PLN/GJ]
25	55	1,176	5815	80,0	10,60
40	71	1,119	5911	81,3	10,46
60	92	1,054	6022	82,8	10,30
80	113	0,984	6128	84,2	10,13
100	134	0,915	6226	85,7	10,00
120	153	0,889	6288	86,5	9,91
150	184	0,828	6392	88,0	9,77

Zaprezentowane rezultaty jednoznacznie wskazują na determinujący wpływ temperatury dostarczanego powietrza t_{pow} na efektywność pracy kotła. Podgrzanie powietrza przed dostarczeniem go do strefy spalania wyraźnie polepsza bilans energetyczny kotła, co w ostatecznym efekcie daje zmniejszenie zużycia paliwa B_p , albowiem na skutek wzrostu entalpii właściwej i_{pow} powietrza wyraźnie rośnie sprawność kotła η_k . Jednak przeprowadzając czynności modernizacyjne, zmierzające do podwyższenia temperatury powietrza t_{pow} , należy roztropnie dobrać stosowne źródło ciepła. Proces ten powinien bowiem odbywać się bez uszczerbku dla bilansu energetycznego kotła.



Rys. 8. Sprawność kotła η_k oraz koszt produkcji 1 GJ ciepła K_{GJ} w zależności od temperatury powietrza spalania t_{pow}

Wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy efektywności pracy typowego kotła o mocy około 5,8MW, opalanego zrębami i trocinami drzewnymi, przy czym w zależności od: wilgotności paliwa W^r , współczynnika nadmiaru λ oraz temperatury powietrza t_{pow} doprowadzanego do komory spalania. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników obliczeń z rzeczywistymi wartościami parametrów pracy kotła zainstalowanego w jednej z ciepłowni miejskich.

Przedstawiona analiza pozwala stwierdzić, że cena zakupu paliwa (odpadów drzewnych) – w odniesieniu do kosztów wytworzenia 1GJ energii cieplnej – ściśle zależy od jego wilgotności. Każda dostawa zrębów drzewnych, określana w me-

trach przestrzennych lub w tonach, powinna więc być przeliczana na jednostkę ciepła (np. GJ), jaką można wyprodukować z dostarczonego paliwa. Pobieranie próbek z poszczególnych dostaw byłoby jednak uciążliwe. Ciepłownie lub elektrociepłownie powinny więc szacować wartość opałową w sposób przybliżony, jednak na tyle dokładny, aby nie ponosić z tego tytułu zbyt dużych strat.

Istotny wpływ na efektywność ekonomiczną wytwarzania energii cieplnej wywiera współczynnik nadmiaru λ oraz temperatura powietrza t_{pow} . Zmniejszanie λ , jak wykazują obliczenia, powoduje mniejsze zużycie paliwa w przeliczeniu na 1 GJ wyprodukowanej energii oraz wzrost sprawności kotła η_k . Należy jednak pamiętać, że trudno jest osiągnąć stechiometryczną równowagę procesu spalania, dlatego też istnieje minimalna wartość współczynnika nadmiaru λ dla paliwa o określonych właściwościach i dla określonej konstrukcji kotła. Tak więc ocena efektywności w zależności od tej wielkości pozwala porównać poziom rozwiązań konstrukcyjnych oraz dowiedzieć, że jeśli np. $\lambda \approx 3$, to koszty wytwarzania energii cieplnej są nadmiernie wysokie, albowiem ma się do czynienia ze znacznym obniżeniem sprawności kotła η_k . Trudno więc oczekiwać aprobaty rynku dla tego typu propozycji. Ważną rolę w doborze optymalnej wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ dla określonych warunków pracy paleniska odgrywa zastosowany system pomiarowy sprzężony z systemem sterującym pracą kotła. Od wielu lat dla zoptymalizowania procesu spalania, mierzy się powszechnie zawartość tlenu w spalinach wylotowych. Okazało się, że proces może przebiegać bardziej efektywnie, jeśli dodatkowo – obok pomiaru zawartości tlenu – odbierane są sygnały pomiarowe CO [9]. Dobre rezultaty daje także prowadzenie ciągłego monitoringu części palnych w popiele lotnym [8]. Zastosowanie tych metod kontroli procesu umożliwia dobór najkorzystniejszego stosunku nadmiaru powietrza w różnych warunkach pracy, ograniczając przy tym do minimum stratę wylotową $\dot{Q}_{wyl}$.

Temperatura powietrza dostarczanego do komory spalania ściśle zależy od konstrukcji systemu dystrybucji powietrza pierwotnego i wtórnego w kotle. Możliwie wysoka temperatura przyczynia się do wzrostu sprawności kotła, albowiem wpływa na zmniejszenie zużycia paliwa, co z kolei powoduje obniżenie kosztów produkcji ciepła. Należy jednak przeprowadzić procedury bilansowe dla kotła, ponieważ powietrze może być podgrzewane przez źródło ciepła bezpośrednio związane z kotłem. Najczęściej spotyka się bowiem rozwiązanie, w którym podgrzewanie powietrza jest realizowane w kanałach spalinowych. Istotne dla procesu spalania jest umiejętne dozowanie powietrza (tzw. stopniowanie) do różnych stref procesu. Zabieg ten wpływa przede wszystkim na prowadzenie procesu w strefie

spalania (strefa egzotermiczna) w warunkach bardzo zbliżonych do stechiometrycznych. Natomiast możliwie wysoka temperatura dostarczanego powietrza do strefy suszenia, pirolizy i gazyfikacji wyraźnie usprawnia przebieg tych procesów jako endotermicznych. W takim przypadku, oszacowanie efektywności procesu wymaga jednak weryfikacji eksperymentalnej, przy czym dotyczy to określenia wpływu zarówno temperatury powietrza t_{pow} jak i współczynnika jego nadmiaru λ .

Istotny wpływ na koszt wytworzenia jednostki energii cieplnej, szacowany na kolektorze odbiorczym, ma organizacja pracy w ciepłowni i współpracujących z nią jednostkach. Nowe technologie związane z pozyskiwaniem odpadów drzewnych, ich transportem, magazynowaniem itp. znacznie obniżają koszty produkcji ciepła. W niniejszym opracowaniu nie przedstawiono jednak analizy pracy kotła w zakresie polepszania warunków spalania poprzez zmianę temperatury oraz stopniowanie powietrza dostarczanego do różnych stref procesu spalania. Nie przedstawiono także istotnego dla bilansu kotła wpływu temperatury spalin wylotowych na koszty wytwarzania energii cieplnej w ciepłowniach. Natomiast sposób postępowania przedstawiony w niniejszej pracy pozwala – z wystarczającym przybliżeniem – dokonywać wstępnej oceny efektywności wytwarzania energii cieplnej w kotłach oraz – co jest bardzo istotne – porównywać i weryfikować parametry pracy kotłów oferowanych przez różnych producentów. Opisana procedura może być również pomocna na etapie formułowania zapytań ofertowych.

Bibliografia

1. Nadziakiewicz J.: Spalanie stałych substancji odpadowych, Wydawnictwo Gnome, Katowice, 2001.
2. Kordylewski W.: Spalanie i paliwa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2001.
3. Wandrasz J.W., Zieliński J.: Procesy fluidalne utylizacji odpadów, Ossolineum, Wrocław, 1984.
4. Pomiary cieplne – część I, Praca zbiorowa, WNT, Warszawa, 1995.
5. Pomiary cieplne – część II, Praca zbiorowa, WNT, Warszawa, 1995.
6. Radwański E., Skowroński P., Twarowski A.: Problemy modelowania systemów energetycznych ITC P.W., Warszawa, 1993.
7. Laudyn D., Strzelczyk F.: Elektrownie, WNT, Warszawa, 1990.
8. Pronobis M.: Modernizacja kotłów energetycznych, WNT, Warszawa, 2002.

9. Bettles N.D., Stuart D.D.: Rola pomiarów CO w optymalizacji procesów spalania, Materiały informacyjne firmy LAND Combustion, www.landist.pl/products/produkts/html.

MODELLING OF WOOD WASTE BURNING IN STOKER FIRED BOILER

Abstract: Necessity of protection of natural environment resulted in enlargement of utilization of local resources of renewable fuels. In last years, my investigations were located in our country in construction of many boiler rooms assigned for satisfying local thermal energy needs. Often yet it turns out, that developed quantity of thermal energy does not agree, particularly in peak periods, with forecast demand determined on stage of brief foredesign, what it is reason of lack of social acceptance of realized investments. Such state of affairs can be caused e.g. by incorrect balance of heat demand or bad technical conditions of heat distribution system from source to recipients, but usually by lack of detailed analysis of possibility of work of installed boilers in definite conditions of heat demand. Independently of ecological aspect, one should to lay emphasis in frames of conception on assurance of economically justifiable covering of heat demand, i.e. on detailed and reliable analysis of efficiency of work of fuel delivery system in heat-generating plant as well as production and heat transmission. This way it is possible to avoid undesirable and often dangerous mistakes in service conditions. In the paper, fundamental questions connected with production of thermal energy from wood waste have been taken into account. Their effective solution makes possible planning of fuel policy and energy management. In particular, dependence of boiler balance quantities on such basic parameters, as: fuel (i.e. wood waste) humidity, excess air coefficient as well as temperature of air leading to combustion chamber, has been demonstrated. Analysis of efficiency of burning process was based on example of typical water heater with step grate with heating power about 5,8MW. Results obtained have been evaluated based on experience connected with exploitation of municipal heating plant on Podlasie with wood waste as a fuel and with heating power about 12 MW.

Keywords: combustion, wood waste, stoker fired boiler, heat-generating plant

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

Sławomir Poskrobko, Jan Łach¹

WSPOMAGANIE PROCESU SPALANIA BIOMASY W CIEPŁOWNI POPRZECZ WPROWADZENIE PALIWA KONWENCJONALNEGO

Streszczenie: Niniejsza praca poświęcona jest analizie wspomagania wytwarzania energii cieplnej w procesie spalania biomasy (zrębków drzewnych – paliw odtwarzalnych, łatwo dostępnych i o dużych walorach ekologicznych) w ciepłowni poprzez wprowadzenie do systemu paliwa konwencjonalnego (miału węgla kamiennego). Paliwa te spalane są w paleniskach odrębnych kotłów, przy czym gorąca woda kierowana jest do wspólnego kolektora, z którego zasila sieć ciepłą. Celem analizy jest porównanie parametrów pracy ciepłowni w kilku przypadkach, różniących się ilością ciepła wyprodukowanego ze spalania biomasy i węgla kamiennego, chociaż w każdym z nich są jednakowe: moc zainstalowana, wykres obciążenia cieplnego oraz roczne zapotrzebowanie na ciepło. Oszacowano także koszty eksploatacyjne i koszt produkcji 1 GJ ciepła oraz zwrócono uwagę na związek między kosztem emisji zanieczyszczeń a zakresem spalania biomasy.

Słowa kluczowe: biomasa, węgiel kamienny, współspalanie, ciepłownia

Wstęp

Poprawne funkcjonowanie ciepłowni opalanej wyłącznie drewnem wymaga zagwarantowania systematycznych dostaw tego paliwa o odpowiedniej jakości. Drewno jest zaś paliwem, które może być opłacalnie pozyskiwane przez ciepłownię jedynie od dostawców lokalnych. Dostarczane do ciepłowni paliwa drzewne odznaczają się często dużą zawartością wilgoci, a przez to małą wartością opałową.

¹ Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, ul. Wiejska 45C, 15–311 Białystok

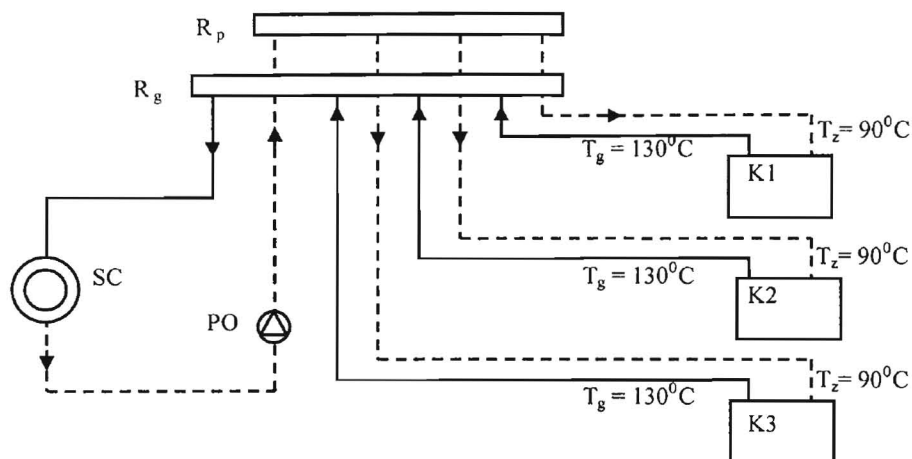
wą. Wydaje się więc, że celowe może być zastosowanie współspalania biomasy i paliwa kopalnego (np. węgla kamiennego). Pojęcie to oznacza tu spalanie drewna i węgla kamiennego w paleniskach oddzielnych kotłów, przy czym gorąca woda kierowana jest do wspólnego kolektora, z którego zasila sieć ciepłą. Paliwo kopalne zwiększa bezpieczeństwo energetyczne ciepłowni oraz umożliwia pokrycie szczytowego zapotrzebowania na ciepło w okresie dostaw gorszej jakościowo biomasy. Powstaje więc pytanie: w jakim zakresie realizować współspalanie biomasy i paliwa kopalnego? Niniejsza praca ma za zadanie udzielenie pobieżnej odpowiedzi co do opłacalności ekonomicznej i ekologicznej, na podstawie analiz o charakterze inżynierskim, odniesionej do przykładowej ciepłowni miejskiej.

I. Przedmiot analizy

Przedmiotowej analizie poddaje się ciepłownię o łącznej mocy zainstalowanej $\dot{Q}_z = 14,5 \text{ MW}$, produkującą gorącą wodę na potrzeby ogrzewania pomieszczeń i ciepłą wodę użytkową (c.w.u.). Jej podstawowe parametry pracy zawiera tablica 1, a schemat blokowy pokazany jest na rys. 1.

Tablica 1. Parametry pracy ciepłowni

Parametr	Symbol	Jednostka	Wartość
Moc zainstalowana	$\dot{Q}_z$	[MW]	14,5
Maksymalne zapotrzebowanie na ciepło	$\dot{Q}_{\max}$	[MW]	12
Minimalne zapotrzebowanie na ciepło	$\dot{Q}_{\min}$	[MW]	1,2
Temperatura wewnętrzna pomieszczeń	T_w	[°C]	20
Minimalna temperatura zewnętrzna (IV strefa)	$T_{z \min}$	[°C]	-22



Rys. 1. Schemat blokowy ciepłowni: $K1$, $K2$, $K3$ – kotły; R_g – rozdzielacz wody grzejnej; R_p – rozdzielacz wody powrotnej; SC – sieć ciepłownicza; PO – pompa obiegowa, T_g , T_z – temperatura wody grzejnej i zimnej w obiegu

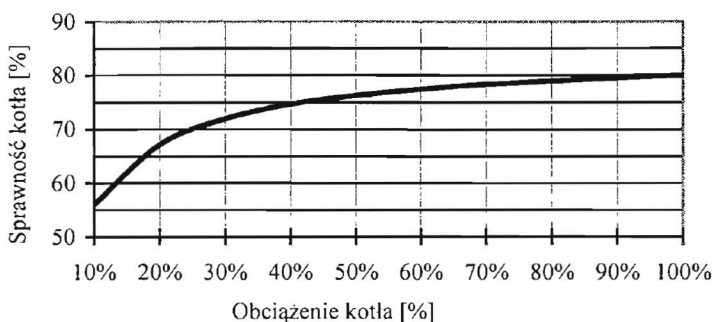
Celem analizy jest porównanie parametrów pracy ciepłowni w ośmiu przypadkach, różniących się ilością ciepła wyprodukowanego ze spalania drewna i miału węgla kamiennego. Zakłada się, że w każdym z wariantów są jednakowe: moc zainstalowana, wykres obciążenia cieplnego ciepłowni oraz roczne zapotrzebowanie na ciepło. W tabelicy 2 zestawiono stosowne dane ze wskazaniem, rodzaju kotłów użytkowanych w poszczególnych przypadkach, przy czym: kocioł BI 5000 o mocy 5,8MW i kocioł BI 2500 o mocy 2,9MW są opalane zrębkami drzewnymi, a kocioł WR-5 o mocy 5,8MW i kocioł WR-2,5 o mocy 2,9MW są opalane miałem węgla kamiennego. Łatwo zauważyć, że moc cieplna jednostek kotłowych: $K1$, $K2$ i $K3$ wynosi odpowiednio: 5,8MW, 5,8MW i 2,9MW. Ich dane charakterystyczne zamieszczono w tabelicy 3. Charakterystykę kotłów WR-2,5 i WR-5, tzn. wykres ilustrujący ich sprawność cieplną w funkcji obciążenia, przedstawiono na rys.2. Jeśli zaś chodzi o kotły typu BI, opalane rozdrobnionym paliwem drzewnym, to przebieg ich charakterystyki jest zależny od wilgotności spalanych zrębków drzewnych, co ilustruje rys.3.

Tablica 2. Zestawienie danych dla wariantowych analiz warunków pracy ciepłowni (B – biomasa; W – węgiel kamienny)

Numer wariantu	Symbol wariantu	Kotły			Moc zainstalowana kotłów na biomasę	Moc zainstalowana kotłów na węgiel	Łączna moc zainstalowana kotłów
		K1	K2	K3	[MW]	[MW]	[MW]
1	BBB	BI 5000	BI 5000	BI 2500	14,5	0	14,5
2	BBW	BI 5000	BI 5000	WR-2,5	11,6	2,9	14,5
3	BWB	BI 5000	WR-5	BI 2500	8,7	5,8	14,5
4	BWW	BI 5000	WR-5	WR-2,5	5,8	8,7	14,5
5	WBB	WR-5	BI 5000	BI 2500	8,7	5,8	14,5
6	WBW	WR-5	BI 5000	WR-2,5	5,8	8,7	14,5
7	WWB	WR-5	WR-5	BI 2500	2,9	11,6	14,5
8	WWW	WR-5	WR-5	WR-2,5	0	14,5	14,5

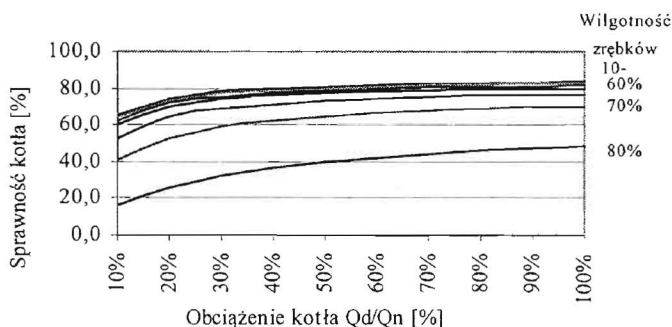
Tablica 3. Dane charakterystyczne poszczególnych kotłów

Parametr	Jednostka	Kocioł			
Rodzaj kotła	–	BI 5000	BI 2500	WR-5	WR-2,5
Rodzaj rusztu	–	Schodkowy	Schodkowy	Taśmowy	Taśmowy
Moc nominalna kotła	[MW]	5,815	2,907	5,815	2,907
Moc paleniska	[MW]	7,268	3,633	7,270	3,635
Temperatura wody zasilającej	[°C]	130	130	130	130
Temperatura wody powrotnej	[°C]	90	90	90	90
Paliwo	–	zrębki drzewne	zrębki drzewne	miał węgla kamiennego	miał węgla kamiennego
Nominalna wartość opałowa paliwa	[kJ/kg]	8576	8576	21000	21000
Zużycie paliwa	[kg/h]	3051	1525	1246	623
Sprawność kotła	[%]	80	80	80	80
Temperatura spalin wylotowych	[°C]	250	250	180	180



Rys. 2. Charakterystyka kotłów (na miat węglowy): WR-5 i WR-2,5

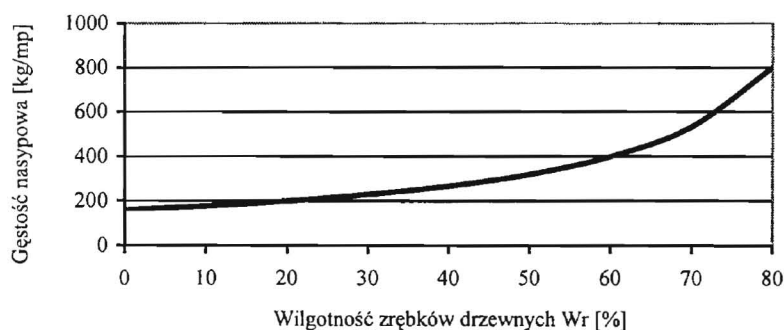
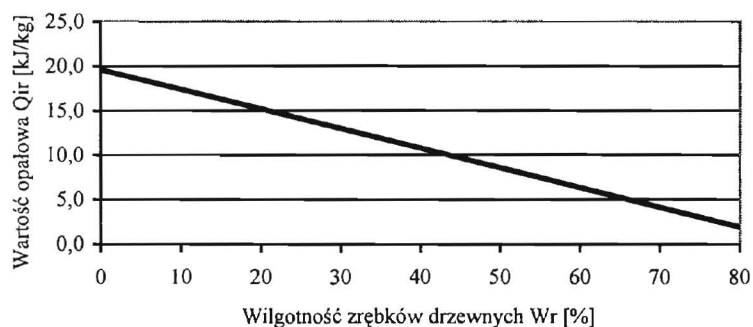
W ciepłowni spalane są więc dwa rodzaje paliw: zrębki drzewne i miat węgla kamiennego. Ich podstawowe właściwości zestawiono w tablicy 4. Zakłada się, że węgiel kamienny dostarczany do ciepłowni ma stałą wartość opałową w ciągu roku, równą $Q_f^r = 21 \text{ [MJ/kg]}$, a wilgotność dostarczanych zrębków drzewnych zmienia się w ciągu roku, co jest spowodowane ich pochodzeniem i rodzajem oraz wpływem warunków atmosferycznych (opady, temperatura). Wilgotność zrębków dostarczanych do ciepłowni w poszczególnych miesiącach ilustruje tablica 5. Zmienność tego parametru paliwa pociąga za sobą zmienność wartości opałowej Q_f^r [kJ/kg] oraz gęstości nasypowej γ_z [kg/ *mp*], co ilustruje rys.4.



Rys. 3. Charakterystyki kotłów (na zrębki drzewne): BI 5000 i BI 2500

Tablica 4. Podstawowe właściwości zrębków drzewnych i węgla kamiennego [1], [2]

Wielkość		Symbol	Jednostka	Zrębki drzewne	Miał węgla kamiennego
Skład elementarny	Węgiel	C^r	[%]	50	60
	Wodór	H^r	[%]	6,2	4,3
	Tlen	O^r	[%]	43	8,0
	Azot	N^r	[%]	0,3	1,1
	Siarka	S^r	[%]	0,05	1,0
	Chlor	Cl^r	[%]	0,02	0,08
	Popiół	A^r	[%]	1	20
Wilgotność paliwa		W^r	[%]	(30÷60)	15
Wartość opałowa		Q_f^r	[kJ/kg]	(6372÷12983)	21 000



Rys. 4. Zależność wartości opałowej i gęstości nasypowej zrębków od ich wilgotności

Tablica 5. Wilgotność zrębków drzewnych dostarczanych w poszczególnych miesiącach

Wilgotność zrębków	Miesiące dostaw paliwa
[%]	–
30	VI, VII, VIII
40	V, IX
50	III, IV, X, XI
60	I, II, XII

2. Koszty eksploatacyjne ciepłowni

Zakłada się, że na koszty eksploatacyjne ciepłowni składają się: koszt pozyskania paliwa K_p , płace pracowników K_{pp} , koszt energii elektrycznej K_{el} , koszt wody K_{wody} pobieranej z sieci wodociągowej i opłaty za emisję zanieczyszczeń do środowiska (w tym za składowanie odpadów) K_z , przy czym w każdym z rozważanych wariantów: $K_{pp} = 120000$ PLN/rok, $K_{el} = 140000$ PLN/rok a $K_w = 6000$ PLN/rok. Koszty pozyskania paliwa oraz opłaty za emisję zanieczyszczeń będą zaś odmienne w każdym z analizowanych przypadków. Przyjmuje się, że koszt pozyskania 1 *mp* zrębków drzewnych wynosi 20 PLN, a jednej tony miału węgla kamiennego – 350 PLN. Koszt ten obejmuje nie tylko koszt zakupu paliwa od dostawcy, ale i koszt jego transportu do ciepłowni. W tablicy 6 przytoczono wskaźniki emisji zanieczyszczeń W_e przy spalaniu drewna i węgla kamiennego oraz jednostkowe opłaty za wprowadzanie zanieczyszczeń do środowiska.

Tablica 6. Wskaźniki emisji zanieczyszczeń przy spalaniu drewna i węgla kamiennego oraz opłaty za wprowadzanie zanieczyszczeń do środowiska [1], [3], [4]

Rodzaj emisji	Wskaźniki emisji W_e [g/GJ]		Opłata
	Spalanie drewna	Spalanie węgla kamiennego	
CO ₂	85 000	90 240	0,21 [PLN/t]
CO	150	120	0,105 [PLN/kg]
SO _x	15	750	0,40 [PLN/kg]
NO _x	90	150	0,40 [PLN/kg]
Pył	50	500	0,26 [PLN/kg]
Składowanie żużla i popiołu			14,42 [PLN/t]

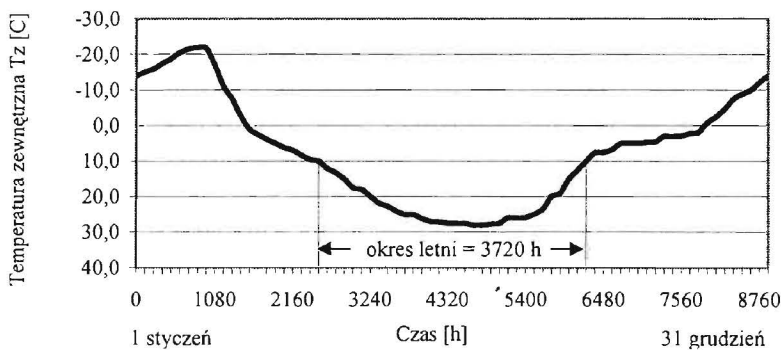
3. Metoda obliczeń współspalania biomasy i paliwa kopalnego

W celu udzielenia odpowiedzi na pytanie, dotyczące zakresu współspalania biomasy i paliwa kopalnego, proponuje się prezentowaną poniżej metodę obliczeń, które mają charakter inżynierski i odnoszą się do przykładowej ciepłowni miejskiej.

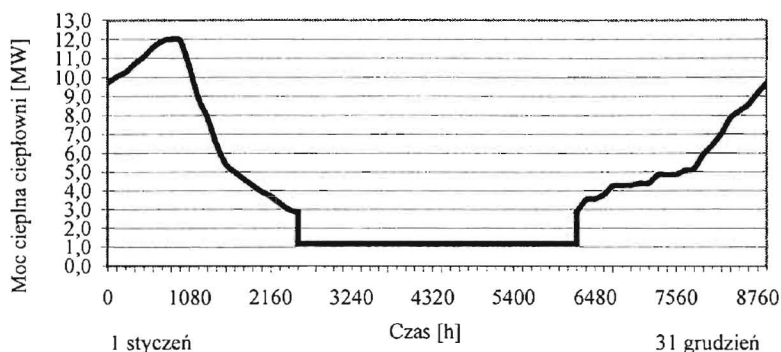
Jeśli znany jest rozkład temperatury zewnętrznej w ciągu roku, który może być pozyskany np. z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (rys. 5), to można wyznaczyć rozkład obciążenia cieplnego ciepłowni w ciągu roku (rys. 6). W tym celu korzysta się ze wzoru [5]:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_g + \dot{Q}_{cwu} = \dot{Q}_{g\max} \cdot \frac{T_w - T_z}{T_w - T_{z\min}} + \dot{Q}_{cwu}, \quad (1)$$

gdzie: $\dot{Q}$ – moc cieplna ciepłowni, $\dot{Q}_g$ – moc cieplna na potrzeby ogrzewania, $\dot{Q}_{cwu}$ – moc cieplna na potrzeby pozyskiwania ciepłej wody użytkowej, T_w – obliczeniowa temperatura wewnątrz pomieszczeń ($T_w = 20^\circ\text{C}$), T_z – temperatura zewnętrzna (wg rozkładu temperatury zewnętrznej), $T_{z\min}$ – minimalna obliczeniowa temperatura zewnętrzna ($T_{z\min} = -22^\circ\text{C}$, IV strefa), $\dot{Q}_{g\max}$ – maksymalne zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania ($\dot{Q}_{g\max} = 10,8\text{MW}$).

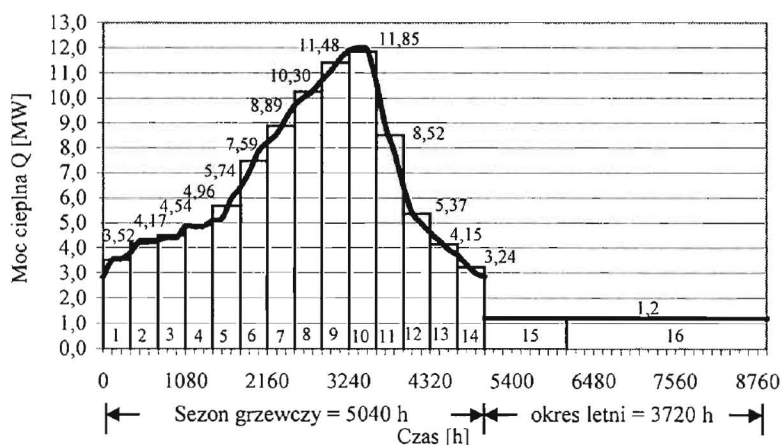


Rys. 5. Rozkład temperatury zewnętrznej w ciągu roku



Rys. 6. Rozkład obciążenia cieplnego ciepłowni w ciągu roku

Przyjmuje się, że sezon grzewczy rozpoczyna się i kończy z chwilą osiągnięcia temperatury zewnętrznej $T_z = 10^\circ\text{C}$. Na podstawie rozkładu temperatury zewnętrznej można wtedy wyznaczyć: czas trwania sezonu grzewczego $\tau_s = 5040\text{h}$ i czas trwania okresu letniego $\tau_l = 3720\text{h}$. Następnie rozkład obciążenia cieplnego ciepłowni przekształca się do postaci jak na rysunku 7 i sezon grzewczy dzieli się na 14 okresów, z których każdy trwa 360h. Natomiast okres letni dzieli się na dwa okresy: 15 – trwający 1080h i 16 – trwający 2640h.



Rys. 7. Rozkład obciążenia cieplnego z podziałem na 16 okresów

Tablica 7. Wilgotność zrębków spalanych w poszczególnych okresach sezonu grzewczego i letniego

Wilgotność zrębków	Numery okresów
30%	16
40%	1, 15
50%	2, 3, 4, 5, 12, 13, 14
60%	6, 7, 8, 9, 10, 11

Jeśli odwołać się do tablicy 5, to każdemu okresowi można przyporządkować określoną wilgotność spalanych zrębków drzewnych (tablica 7) i średnią wartość obciążenia cieplnego (rysunek 7). Ilość ciepła wyprodukowanego w każdym i -tym okresie można wyznaczyć ze wzoru [5]:

$$Q_i = \frac{\dot{Q}_{i, sr} \cdot \tau_{i, o} \cdot 3600}{1000} \text{ [GJ]}, \quad (2)$$

gdzie: Q_i – ilość ciepła wyprodukowana w i -tym okresie [GJ], $\dot{Q}_{i, sr}$ – średnia moc cieplna ciepłowni w i -tym okresie [MW], $\tau_{i, o}$ – czas trwania i -tego okresu [h].

Jeśli znane są wartości średniej mocy cieplnej $\dot{Q}_{i, sr}$ ($i = 1, 2, \dots, 16$), to każdemu okresowi można przyporządkować: liczbę kotłów pracujących w danym okresie, ich procentowe obciążenia i średnie sprawności η_k (na podstawie ich charakterystyk). Średnie zużycie paliwa $B_{i, sr}$ przez dany kocioł w i -tym okresie można obliczyć według wzoru [6]:

$$B_{i, sr} = \frac{\dot{Q}_{i, sr} \cdot 10^3}{(\eta_k / 100) \cdot Q_j^r} \text{ [kg/s]}, \quad (3)$$

gdzie: η_k – sprawność cieplna danego kotła [%], Q_j^r – wartość opałowa paliwa w i -tym okresie [kJ/kg], $\dot{Q}_{i, sr}$ – średnie obciążenie cieplne (średnia moc cieplna) [MW].

To zaś oznacza, że zużycie paliwa w i -tym okresie B_i przez dany kocioł wynosi:

$$B_i = B_{i, sr} \cdot \tau_{i, o} \cdot 3600 \text{ [kg]}, \quad (4)$$

gdzie: $B_{i\,sr}$ – średnie zużycie paliwa w i -tym okresie, [kg/s] τ_{i0} – czas trwania i -tego okresu [h].

Natomiast ilość ciepła doprowadzonego do danego kotła w paliwie (tzn. pod postacią energii chemicznej) w i -tym okresie jest dana zależnością:

$$Q_{pal\,i} = \frac{B_i \cdot Q_j^r}{10^6} \text{ [GJ]} \quad (5)$$

gdzie: B_i – zużycie paliwa przez kocioł w i -tym okresie [kg], Q_j^r – wartość opałowa paliwa spalanego w i -tym okresie [kJ/kg].

Ilość ciepła wyprodukowanego przez ciepłownię w ciągu roku wynosi:

$$Q_c = \sum_{i=1}^k Q_i \text{ [GJ]}, \quad (6)$$

gdzie: Q_i – ilość ciepła wyprodukowanego w i -tym okresie [GJ], k – liczba okresów.

Natomiast ilość ciepła doprowadzonego w paliwie (tzn. pod postacią energii chemicznej), spalany przez ciepłownię w ciągu roku, jest określona wzorem:

$$Q_{pal} = \sum_{i=1}^k Q_{pal\,i} \text{ [GJ]}. \quad (7)$$

Średnią sprawność kotłów w ciepłowni w ciągu roku określa zaś związek:

$$\eta_c = \frac{Q_c}{Q_{pal}} \cdot 100 \%, \quad (8)$$

gdzie: Q_c – ilość ciepła wyprodukowana przez ciepłownię w ciągu roku [GJ], Q_{pal} – ilość ciepła doprowadzonego w paliwie w ciągu roku [GJ].

Natomiast zużycie paliwa przez ciepłownię jest dane wzorem:

$$B_{pal} = \sum_{i=1}^k B_i \text{ [kg]}. \quad (9)$$

Roczny koszt pozyskania przez nią paliwa określają zaś zależności:

$$K_w = \frac{B_{pal} \cdot c_w}{1000} \text{ [PLN/rok]} \text{ i } K_{zr} = \frac{B_{pal}}{\gamma_z} \cdot c_{zr} \text{ [PLN/rok]}, \quad (10)$$

gdzie: c_w – jednostkowy koszt pozyskania węgla kamiennego [PLN/t], γ_z – gęstość nasypowa zrębków drzewnych [kg/mp], c_{zr} – jednostkowy koszt pozyskania zrębków drzewnych [zł/mp].

Jeśli zaś chodzi o koszty emisji zanieczyszczeń K_z do środowiska, to można je wyrazić w postaci sumy:

$$K_z = K_{CO_2} + K_{CO} + K_{SO_2} + K_{NO_x} + K_{pyl} + K_{pop} \text{ [PLN/rok]}, \quad (11)$$

gdzie: K_{CO_2} – koszt emisji CO_2 , K_{CO} – koszt emisji CO, K_{SO_2} – koszt emisji SO_2 , K_{NO_x} – koszt emisji NO_x , K_{pyl} – koszt emisji pyłów, K_{pop} – koszt składowania popiołu na składowisku. Koszty te można oszacować na podstawie następujących zależności:

$$K_{CO_2} = Q_c \cdot W_{CO_2} \cdot C_{CO_2} \cdot 10^{-6} \text{ [PLN/rok]}, \quad (12)$$

$$K_{CO} = Q_c \cdot W_{CO} \cdot C_{CO} \cdot 10^{-3} \text{ [PLN/rok]}, \quad (13)$$

$$K_{SO_2} = Q_c \cdot W_{SO_2} \cdot C_{SO_2} \cdot 10^{-3} \text{ [PLN/rok]}, \quad (14)$$

$$K_{NO_x} = Q_c \cdot W_{NO_x} \cdot C_{NO_x} \cdot 10^{-3} \text{ [PLN/rok]}, \quad (15)$$

$$K_{pyl} = Q_c \cdot W_{pyl} \cdot C_{pyl} \cdot 10^{-3} \text{ [PLN/rok]}, \quad (16)$$

$$K_{pop} = \frac{(A^r/100) \cdot B_{pal}}{1000} \cdot C_{pop} \text{ [PLN/rok]}, \quad (17)$$

gdzie: Q_c – ilość ciepła wyprodukowanego w ciągu roku [GJ/rok], W_{CO_2} – wskaźnik emisji CO_2 [g/GJ], W_{CO} – wskaźnik emisji CO [g/GJ], W_{SO_2} – wskaźnik emisji SO_2 [g/GJ], W_{NO_x} – wskaźnik emisji NO_x [g/GJ], W_{pyl} – wskaźnik emisji pyłu [g/GJ], A^r – zawartość popiołu w paliwie [%], B_{pal} – zużycie paliwa [kg/s], C_{CO_2} – opłata za emisję CO_2 [PLN/t], C_{CO} – opłata za emisję CO [PLN/kg], C_{SO_2} – opłata za emisję SO_2 [PLN/kg], C_{NO_x} – opłata za emisję NO_x [PLN/kg], C_{pyl} – opłata za emisję pyłu [PLN/kg], C_{pop} – opłata za składowanie popiołu [PLN/t].

Koszt produkcji 1 GJ ciepła jest więc dany wzorem:

$$K_{GJ} = \frac{K_{ekspl}}{Q_c} \text{ [PLN/GJ]}, \quad (18)$$

w którym koszty eksploatacyjne ciepłowni określa poniższy związek:

$$K_{ekspl} = K_p + K_z + K_{el} + K_{wody} + K_{pp} \text{ [PLN/rok]}. \quad (19)$$

4. Wyniki obliczeń współspalania biomasy i paliwa kopalnego

Wyniki obliczeń – tytułem przykładu i z uwagi na ograniczoną objętość pracy – przedstawiono jedynie dla pięciu wariantów pracy ciepłowni (por. tablica 2): a) wariantu 1 (BBB), wariantu 2 (BBW), wariantu 6 (WBW), wariantu 7 (WWB) i wariantu 8 (WWW). Zawierają one odpowiednie zestawienia: parametrów pracy ciepłowni w poszczególnych szesnastu okresach, ilości ciepła doprowadzonego do kotłów z paliwem i wyprodukowanego przez kotły w ciągu roku, koszty pozyskania paliwa (zrębków drzewnych i węgla kamiennego) w ciągu roku i koszty emisji zanieczyszczeń przez ciepłownię w ciągu roku. Dane zawarte w tablicach od 8 do 11 dotyczą wariantu 1 (BBB), w tablicach od 12 do 15 – wariantu 2 (BBW), w tablicach od 16 do 19 – wariantu 6 (WBW), w tablicach od 20 do 23 – wariantu 7(WWB) a w tablicach od 24 do 27 – wariantu 8 (WWW).

Tablica 8. Zestawienie wyników obliczeń dla poszczególnych okresów pracy ciepłowni (wariant WI – BBB)

Nr okresu	Czas trwania okresu	Kocioł	Paliwo	Wilgotność paliwa	Wartość opałowa paliwa	Moc zapotrzebowana	Maksymalna moc kotła	Moc chwilowa kotła	Obciążenie kotła	Sprawność kotła	Zużycie paliwa	Ilość ciepła wyprodukowanego	Ilość ciepła doprowadzonego z paliwem	Sprawność ciepłowni
–	[h]	–	–	[%]	[kJ/kg]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[kg/h]	[GJ]	[GJ]	[%]
1	360	K1	B	40	10780	3520	6191	3520	56,9	79,3	1482	4562	5753	79,3
2	360	K1	B	50	8576	4170	5815	4170	71,7	78,9	2219	5404	6850	78,9
3	360	K1	B	50	8576	4540	5815	4540	78,1	79,2	2406	5884	7429	79,2
4	360	K1	B	50	8576	4960	5815	4960	85,3	79,5	2619	6428	8086	79,5
5	360	K1	B	50	8576	5740	5815	5740	98,7	80,0	3011	7439	9299	80,0
6	360	K1	B	60	6372	7590	4158	3795	91,3	76,6	2799	4918	6421	76,6
		K2	B	60	6372		4158	3795	91,3	76,6	2799	4918	6421	
7	360	K1	B	60	6372	8890	4158	3556	85,5	76,3	2633	4609	6040	76,3
		K2	B	60	6372		4158	3556	85,5	76,3	2633	4609	6040	
		K3	B	60	6372		2078	1778	85,5	76,3	1317	2304	3020	
8	360	K1	B	60	6372	10300	4158	4120	99,1	77,0	3023	5340	6934	77,0
		K2	B	60	6372		4158	4120	99,1	77,0	3023	5340	6934	
		K3	B	60	6372		2078	2060	99,1	77,0	1524	2670	3467	
9	360	K1	B	60	6372	11480	4158	4158	100,0	77,0	3051	5389	6998	77,0
		K2	B	60	6372		4158	4158	100,0	77,0	3051	5389	6998	
		K3	B	60	6372		2078	2078	100,0	77,0	1525	2693	3498	
10	360	K1	B	60	6372	11850	4158	4158	100,0	77,0	3051	5389	6998	77,0
		K2	B	60	6372		4158	4158	100,0	77,0	3051	5389	6998	
		K3	B	60	6372		2078	2078	100,0	77,0	1525	2693	3498	
11	360	K1	B	60	6372	8520	4158	3408	82,0	76,2	2527	4417	5796	76,2
		K2	B	60	6372		4158	3408	82,0	76,2	2527	4417	5796	
		K3	B	60	6372		2078	1704	82,0	76,2	1263	2208	2898	
12	360	K1	B	50	8576	5370	5815	5370	92,3	79,8	2825	6960	8721	79,8
13	360	K1	B	50	8576	4150	5815	4150	71,4	78,9	2208	5378	6817	78,9
14	360	K1	B	50	8576	3240	5815	3240	55,7	77,8	1748	4199	5397	77,8
15	1080	K3	B	40	10780	1200	3095	1200	38,8	77,2	519	4666	6044	77,2
16	2640	K3	B	30	12983	1200	3229	1200	37,2	77,9	427	11405	14640	77,9

Tablica 9. Ilość ciepła doprowadzonego do kotłów z paliwem i wyprodukowanego przez kotły w ciągu roku (wariant WI – BBB)

	Parametr	Symbol	Jednostka	Kotły na biomasę	Kotły na węgiel	Suma
Produkcja	Ilość ciepła wyprodukowanego przez kotły	Q_c	[GJ]	135015	0	135015
	Ilość ciepła doprowadzonego do kotłów z paliwem	Q_{pal}	[GJ]	173792	0	173792
	Sprawność kotłów	η_k	[%]	77,7	–	77,7

Tablica 10. Koszty pozyskania paliwa (zrębków drzewnych i węgla kamiennego) przez ciepłownię w ciągu roku (wariant WI – BBB)

Koszt paliwa	Wilgotność zrębków	W^r	[%]	30	40	50	60
	Zużycie zrębków	B_{zr}	[t/rok]	1128	1094	6133	14870
	Koszt zrębków	K_{zr}	[PLN/rok]	98656	82063	383325	743497
	Wilgotność węgla	W^r	[%]	15			
	Zużycie węgla	B_w	[t/rok]	0			
	Koszt węgla	K_w	[PLN/rok]	0			
	Całkowity koszt paliwa	K_p	[PLN/rok]	1 307 541			

Tablica 11. Koszty emisji zanieczyszczeń przez ciepłownię w ciągu roku (wariant WI – BBB)

Emisja	Rodzaj zanieczyszczenia	–	CO ₂	CO	SO ₂	NO _x	Pył	Po-piół	Suma
	Kotły na biomasę	[PLN/rok]	2410	2126	810	4861	1755	4186	16149
	Kotły na węgiel	[PLN/rok]	0	0	0	0	0	0	0
	Suma kosztów emisji	[PLN/rok]	16149						

Tablica 12. Zestawienie wyników obliczeń dla poszczególnych okresów pracy ciepłowni (wariant W2 – BBW)

Nr okresu	Czas trwania okresu	Kocioł	Paliwo	Wilgotność paliwa	Wartość opałowa paliwa	Moc zapotrzebowana	Maksymalna moc kotła	Moc chwilowa kotła	Obciążenie kotła	Sprawność kotła	Zużycie paliwa	Ilość ciepła wyprodukowanego	Ilość ciepła doprowadzonego z paliwem	Sprawność ciepłowni
–	[h]	–	–	[%]	[kJ/kg]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[kg/h]	[GJ]	[GJ]	[%]
1	360	K1	B	40	10780	3520	6191	3520	56,9	79,3	1482	4562	5753	79,3
2	360	K1	B	50	8576	4170	5815	4170	71,7	78,9	2219	5404	6850	78,9
3	360	K1	B	50	8576	4540	5815	4540	78,1	79,2	2406	5884	7429	79,2
4	360	K1	B	50	8576	4960	5815	4960	85,3	79,5	2619	6428	8086	79,5
5	360	K1	B	50	8576	5740	5815	5740	98,7	80,0	3012	7439	9299	80,0
6	360	K1	B	60	6372	7590	4158	3795	91,3	76,6	2799	4918	6421	76,6
		K2	B	60	6372		4158	3795	91,3	76,6	2799	4918	6421	
7	360	K1	B	60	6372	8890	4158	3295	79,2	76,0	2449	4270	5619	76,8
		K2	B	60	6372		4158	3295	79,2	76,0	2449	4270	5619	
		K3	W	15	21000		2907	2300	79,1	79,0	499	2981	3773	
8	360	K1	B	60	6372	10300	4158	3815	91,8	76,7	2810	4944	6446	77,4
		K2	B	60	6372		4158	3815	91,8	76,7	2810	4944	6446	
		K3	W	15	21000		2907	2670	91,8	79,6	575	3460	4347	
9	360	K1	B	60	6372	11480	4158	4158	100,0	77,0	3051	5389	6998	77,8
		K2	B	60	6372		4158	4158	100,0	77,0	3051	5389	6998	
		K3	W	15	21000		2907	2907	100,0	80,0	623	3767	4709	
10	360	K1	B	60	6372	11850	4158	4158	100,0	77,0	3051	5389	6998	77,8
		K2	B	60	6372		4158	4158	100,0	77,0	3051	5389	6998	
		K3	W	15	21000		2907	2907	100,0	80,0	623	3767	4709	
11	360	K1	B	60	6372	8520	4158	3157	75,9	75,8	2353	4091	5398	76,6
		K2	B	60	6372		4158	3157	75,9	75,8	2353	4091	5398	
		K3	W	15	21000		2907	2206	75,9	78,8	480	2859	3628	
12	360	K1	B	50	8576	5370	5815	5370	92,3	79,8	2825	6960	8721	79,8
13	360	K1	B	50	8576	4150	5815	4150	71,4	78,9	2208	5378	6817	78,9
14	360	K1	B	50	8576	3240	5815	3240	55,7	77,8	1748	4199	5397	77,8
15	1080	K3	W	15	21000	1200	2907	1200	41,3	74,9	275	4666	6229	74,9
16	2640	K3	W	15	21000	1200	2907	1200	41,3	74,9	275	1140 5	1522 7	74,9

Tablica 13. Ilość ciepła doprowadzonego do kotłów z paliwem i wyprodukowanego przez kotły w ciągu roku (wariant W2 – BBW)

Produkcja	Parametr	Symbol	Jednostka	Kotły na biomasę	Kotły na węgiel	Suma
	Ilość ciepła wyprodukowanego	Q_c	[GJ]	104 258	32 905	137 163
	Ilość ciepła doprowadzonego z paliwem	Q_{pal}	[GJ]	134 112	42 623	176 735
	Sprawność kotłów	η_k	[%]	77,7	77,2	77,6

Tablica 14. Koszty pozyskania paliwa (zrębków drzewnych i węgla kamiennego) przez ciepłownię w ciągu roku (wariant W2 – BBW)

Koszt paliw	Wilgotność zrębków	W^r	[%]	30	40	50	60
	Zużycie zrębków	B_z	[t/rok]	0	534	6 133	11 889
	Koszt zrębków	K_z	[zł/rok]	0	40 020	383 325	594 444
	Wilgotność węgla	W^r	[%]	15			
	Zużycie węgla	B_w	[t/rok]	2 030			
	Koszt węgla	K_w	[zł/rok]	466 823			
	Całkowity koszt paliwa	K_{pal}	[zł/rok]	1 484 612			

Tablica 15. Koszty emisji zanieczyszczeń przez ciepłownię w ciągu roku (wariant W2 – BBW)

Emisja	Rodzaj zanieczyszczenia	–	CO ₂	CO	SO _x	NO _x	pył	popiół	Suma
	Kotły na biomasę	[zł/rok]	1861	1642	626	3753	1355	3345	12582
	Kotły na węgiel	[zł/rok]	624	415	9872	1974	4278	7052	24214
	Suma kosztów emisji	[zł/rok]	36 796						

Tablica 16. Zestawienie wyników obliczeń dla poszczególnych okresów pracy ciepłowni (wariant W6 – WBW)

Nr okresu	Czas trwania okresu	Kocioł	Paliwo	Wilgotność paliwa	Wartość opałowa paliwa	Moc zapotrzebowana	Maksymalna moc kotła	Moc chwilowa kotła	Obciążenie kotła	Sprawnność kotła	Zużycie paliwa	Ilość ciepła wytworzonego	Ilość GJ spalonego paliwa	Sprawnność ciepłowni
–	[h]	–	–	[%]	[kJ/kg]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[kg/h]	[GJ]	[GJ]	[%]
1	360	K1	W	15	21000	3520	5815	3520	60,5	77,6	778	4562	5879	77,6
2	360	K1	W	15	21000	4170	5815	4170	71,7	78,5	911	5404	6884	78,5
3	360	K1	W	15	21000	4540	5815	4540	78,1	78,9	986	5884	7457	78,9
4	360	K1	W	15	21000	4960	5815	4960	85,3	79,3	1072	6428	8106	79,3
5	360	K1	W	15	21000	5740	5815	5740	98,7	79,9	1232	7439	9310	79,9
6	360	K1	W	15	21000	7590	5815	4425	76,1	78,8	963	5735	7278	77,5
		K2	B	60	6372		4158	3165	76,1	75,8	2359	4102	5411	
7	360	K1	W	15	21000	8890	5815	5184	89,1	79,5	1118	6718	8451	78,2
		K2	B	60	6372		4158	3706	89,1	76,5	2737	4803	6278	
8	360	K1	W	15	21000	10300	5815	4650	80,0	79,0	1009	6026	7628	78,0
		K2	B	60	6372		4158	3325	80,0	76,0	2472	4309	5670	
		K3	W	15	21000		2907	2325	80,0	79,0	505	3013	3814	
9	360	K1	W	15	21000	11480	5815	5182	89,1	79,5	1117	6716	8448	78,5
		K2	B	60	6372		4158	3707	89,2	76,5	2738	4804	6280	
		K3	W	15	21000		2907	2591	89,1	79,5	559	3358	4224	
10	360	K1	W	15	21000	11850	5815	5350	92,0	79,7	1151	6934	8700	78,7
		K2	B	60	6372		4158	3825	92,0	76,7	2817	4957	6463	
		K3	W	15	21000		2907	2675	92,0	79,7	575	3467	4350	
11	360	K1	W	15	21000	8520	5815	4968	85,4	79,3	1074	6439	8119	78,0
		K2	B	60	6372		4158	3552	85,4	76,3	2630	4603	6033	
12	360	K1	W	15	21000	5370	5815	5370	92,3	79,7	1155	6960	8732	79,7
13	360	K1	W	15	21000	4150	5815	4150	71,4	78,5	906	5378	6851	78,5
14	360	K1	W	15	21000	3240	5815	3240	55,7	77,1	720	4199	5446	77,1
15	1080	K3	W	15	21000	1200	2907	1200	41,3	74,9	275	4666	6229	74,9
16	2640	K3	W	15	21000	1200	2907	1200	41,3	74,9	275	11405	15227	74,9

Tablica 17. Ilość ciepła doprowadzonego do kotłów z paliwem i wyprodukowanego przez kotły w ciągu roku (wariant W6 – WBW)

Produkcja	Parametr	Symbol	Jednostka	Kotły na biomasę	Kotły na węgiel	Suma
	Ilość ciepła wytworzona	Q_c	[GJ]	25 579	110 730	138 309
	Ilość GJ spalonego paliwa	Q_{pal}	[GJ]	36 136	141 134	177 270
	Sprawnność kotłów	η_k	[%]	76,3	78,5	78,0

Tablica 18. Koszty pozyskania paliwa (zrębków drzewnych i węgla kamiennego) przez ciepłownię w ciągu roku (wariant W6 – WBW)

Koszt paliw	Wilgotność zrębków	W^r	[%]	30	40	50	60
	Zużycie zrębków	B_z	[t/rok]	0	0	0	5 671
	Koszt zrębków	K_z	[zł/rok]	0	0	0	283 537
	Wilgotność węgla	W^r	[%]	15			
	Zużycie węgla	B_w	[t/rok]	6 721			
	Koszt węgla	K_w	[zł/rok]	1 545 753			
	Całkowity koszt paliwa	$K_{\text{cał}}$	[zł/rok]	1 829 291			

Tablica 19. Koszty emisji zanieczyszczeń przez ciepłownię w ciągu roku (wariant W6 – WBW)

Emisja	Rodzaj zanieczyszczenia	–	CO ₂	CO	SO _x	NO _x	pył	popiół	Suma
	Kotły na biomasę	[zł/rok]	492	434	165	993	359	1 022	3 466
	Kotły na węgiel	[zł/rok]	2 098	1 395	33 219	6 644	14 395	23 352	81 104
	Suma kosztów emisji	[zł/rok]	84 569						

Tablica 20. Zestawienie wyników obliczeń dla poszczególnych okresów pracy ciepłowni (wariant W7 – WWB)

Nr okresu	Czas trwania okresu	Kocioł	Paliwo	Wilgotność paliwa	Wartość opałowa paliwa	Moc zapotrzebowana	Maksymalna moc kotła	Moc chwilowa kotła	Obciążenie kotła	Sprawność kotła	Zużycie paliwa	Ilość ciepła wytworzonego	Ilość GJ spalonego paliwa	Sprawność ciepłowni
–	[h]	–	–	[%]	[kJ/kg]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[kg/h]	[GJ]	[GJ]	[%]
1	360	K1	W	15	21000	3520	5815	3520	60,5	77,6	778	4562	5879	77,6
2	360	K1	W	15	21000	4170	5815	4170	71,7	78,5	911	5404	6884	78,5
3	360	K1	W	15	21000	4540	5815	4540	78,1	78,9	986	5884	7457	78,9
4	360	K1	W	15	21000	4960	5815	4960	85,3	79,3	1072	6428	8106	79,3
5	360	K1	W	15	21000	5740	5815	5740	98,7	79,9	1232	7439	9310	79,9
6	360	K1	W	15	21000	7590	5815	3795	65,3	78,0	834	4918	6306	78,0
		K2	W	15	21000		5815	3795	65,3	78,0	834	4918	6306	
7	360	K1	W	15	21000	8890	5815	4445	76,4	78,8	967	5761	7311	78,8
		K2	W	15	21000		5815	4445	76,4	78,8	967	5761	7311	
8	360	K1	W	15	21000	10300	5815	5150	88,6	79,5	1111	6674	8395	79,5
		K2	W	15	21000		5815	5150	88,6	79,5	1111	6674	8395	
9	360	K1	W	15	21000	11480	5815	4870	83,7	79,2	1054	6312	7969	78,7
		K2	W	15	21000		5815	4870	83,7	79,2	1054	6312	7969	
		K3	B	60	6372		2078	1740	83,7	76,3	1288	2255	2955	
10	360	K1	W	15	21000	11850	5815	5027	86,4	79,4	1085	6515	8205	78,9
		K2	W	15	21000		5815	5027	86,4	79,4	1085	6515	8205	
		K3	B	60	6372		2078	1796	86,4	76,4	1328	2328	3047	

11	360	K1	W	15	21000	8520	5815	4260	73,3	78,6	929	5521	7024	78,6
		K2	W	15	21000		5815	4260	73,3	78,6	929	5521	7024	
12	360	K1	W	15	21000	5370	5815	5370	92,3	79,7	1155	6960	8732	79,7
13	360	K1	W	15	21000	4150	5815	4150	71,4	78,5	906	5378	6851	78,5
14	360	K1	W	15	21000	3240	5815	3240	55,7	77,1	720	4199	5446	77,1
15	1080	K3	B	40	10780	1200	3095	1200	38,8	77,2	519	4666	6044	77,2
16	2640	K3	B	30	12983	1200	3229	1200	37,2	77,9	427	11405	14640	77,9

Tablica 21. Ilość ciepła doprowadzonego do kotłów z paliwem i wyprodukowanego przez kotły w ciągu roku (wariant W7 – WWB)

Produkcja	Parametr	Symbol	Jednostka	Kotły na biomasę	Kotły na węgiel	Suma
	Ilość ciepła wytworzona	Q_c	[GJ]	20 653	117 656	138 309
	Ilość GJ spalonego paliwa	Q_{pal}	[GJ]	26 686	149 087	175 773
	Sprawność kotłów	η_k	[%]	77,4	78,9	78,7

Tablica 22. Koszty pozyskania paliwa (zrębków drzewnych i węgla kamiennego) przez ciepłownię w ciągu roku (wariant W7 – WWB)

Koszt paliw	Wilgotność zrębków	W^r	[%]	30	40	50	60
	Zużycie zrębków	B_z	[t/rok]	1 128	561	0	942
	Koszt zrębków	K_z	[zł/rok]	98 656	42 043	0	47 095
	Wilgotność węgla	W^r	[%]	15			
	Zużycie węgla	B_w	[t/rok]	7 099			
	Koszt węgla	K_w	[zł/rok]	1 632 859			
	Całkowity koszt paliwa	K_{pal}	[zł/rok]	1 820 652			

Tablica 23. Koszty emisji zanieczyszczeń przez ciepłownię w ciągu roku (wariant W6 – WBW)

Emisja	Rodzaj zanieczyszczenia	–	CO ₂	CO	SO _x	NO _x	pył	popiół	Suma
	Kotły na biomasę	[zł/rok]	369	325	124	744	268	474	2 304
	Kotły na węgiel	[zł/rok]	2 230	1 482	35 297	7 059	15 295	24 668	86 032
	Suma kosztów emisji	[zł/rok]	88 336						

Tablica 24. Zestawienie wyników obliczeń dla poszczególnych okresów pracy ciepłowni (wariant W8 – WWW)

Nr okresu	Czas trwania okresu	Kocioł	Paliwo	Wilgotność paliwa	Wartość opałowa paliwa	Moc zapotrzebowana	Maksymalna moc kotła	Moc chwilowa kotła	Obciążenie kotła	Sprawność kotła	Zużycie paliwa	Ilość ciepła wyprodukowanego	Ilość ciepła doprowadzonego w paliwie	Sprawność ciepłowni
-	[h]	-	-	[%]	[kJ/kg]	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[kg/h]	[GJ]	[GJ]	[%]
1	360	K1	W	15	21000	3520	5815	3520	60,5	77,6	778	4562	5879	77,6
2	360	K1	W	15	21000	4170	5815	4170	71,7	78,5	911	5404	6884	78,5
3	360	K1	W	15	21000	4540	5815	4540	78,1	78,9	986	5884	7457	78,9
4	360	K1	W	15	21000	4960	5815	4960	85,3	79,3	1072	6428	8106	79,3
5	360	K1	W	15	21000	5740	5815	5740	98,7	79,9	1232	7439	9310	79,9
6	360	K1	W	15	21000	7590	5815	3795	65,3	78,0	834	4918	6306	78,0
		K2	W	15	21000		5815	3795	65,3	78,0	834	4918	6306	
7	360	K1	W	15	21000	8890	5815	4445	76,4	78,8	967	5761	7311	78,8
		K2	W	15	21000		5815	4445	76,4	78,8	967	5761	7311	
8	360	K1	W	15	21000	10300	5815	5150	88,6	79,5	1111	6674	8395	79,5
		K2	W	15	21000		5815	5150	88,6	79,5	1111	6674	8395	
9	360	K1	W	15	21000	11480	5815	4592	79,0	79,0	996	5951	7533	79,0
		K2	W	15	21000		5815	4592	79,0	79,0	996	5951	7533	
		K3	W	15	21000		2907	2296	79,0	79,0	498	2976	3767	
10	360	K1	W	15	21000	11850	5815	4740	81,5	79,1	1027	6143	7766	79,1
		K2	W	15	21000		5815	4740	81,5	79,1	1027	6143	7766	
		K3	W	15	21000		2907	2370	81,5	79,1	514	3072	3883	
11	360	K1	W	15	21000	8520	5815	4260	73,3	78,6	929	5521	7024	78,6
		K2	W	15	21000		5815	4260	73,3	78,6	929	5521	7024	
12	360	K1	W	15	21000	5370	5815	5370	92,3	79,7	1155	6960	8732	79,7
13	360	K1	W	15	21000	4150	5815	4150	71,4	78,5	906	5378	6851	78,5
14	360	K1	W	15	21000	3240	5815	3240	55,7	77,1	720	4199	5446	77,1
15	1080	K3	W	15	21000	1200	2907	1200	41,3	74,9	275	4666	6229	74,9
16	2640	K3	W	15	21000	1200	2907	1200	41,3	74,9	275	11405	15227	74,9

Tablica 25. Ilość ciepła doprowadzonego do kotłów z paliwem i wyprodukowanego przez kotły w ciągu roku (wariant W8 – WWW)

Produkcja	Parametr	Symbol	Jednostka	Kotły na biomasę	Kotły na węgiel	Suma
	Ilość ciepła wyprodukowanego przez kotły	Q_c	[GJ]	0	138 309	138 309
	Ilość ciepła doprowadzonego z paliwem do kotłów	Q_{pal}	[GJ]	0	176 443	176 443
	Sprawność kotłów	η_k	[%]	–	78,4	78,4

Tablica 26. Koszty pozyskania paliwa (zrębków drzewnych i węgla kamiennego) przez ciepłownię w ciągu roku (wariant W8 – WWW)

Koszt paliwa	Wilgotność zrębków	W^r	[%]	30	40	50	60
	Zużycie zrębków	B_{zr}	[t/rok]	0	0	0	0
	Koszt zrębków	K_{zr}	[PLN/rok]	0	0	0	0
	Wilgotność węgla	W^r	[%]	15			
	Zużycie węgla	B_w	[t/rok]	8 402			
	Koszt węgla	K_w	[PLN/rok]	1 932 467			
	Całkowity koszt paliwa	K_p	[PLN/rok]	1 932 467			

Tablica 27. Koszty emisji zanieczyszczeń przez ciepłownię w ciągu roku (wariant W8 – WWW)

Emisja	Rodzaj zanieczyszczenia	–	CO ₂	CO	SO ₂	NO _x	Pył	Popiół	Suma
	Kotły na biomasę	[PLN/rok]	0	0	0	0	0	0	0
	Kotły na węgiel	[PLN/rok]	2 621	1 743	41 493	8 299	17 980	29 195	101 330
	Suma kosztów emisji	[PLN/rok]	101 330						

Wnioski

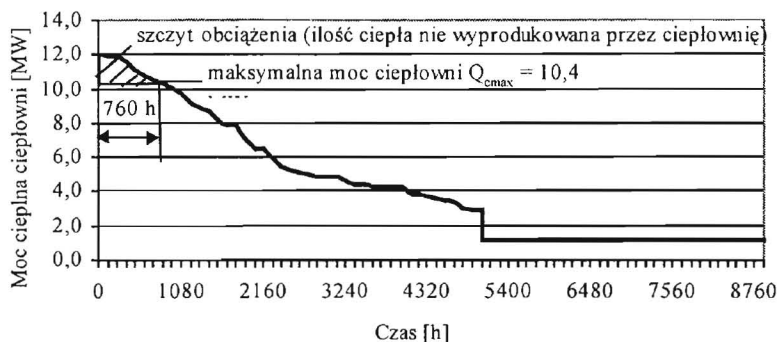
Syntetyczne wyniki obliczeń dla poszczególnych wariantów pracy ciepłowni, różniących się zakresem współspalania biomasy i węgla kamiennego, zamieszczono w tablicy 28. Obejmują one koszty eksploatacyjne oraz koszt produkcji 1 GJ ciepła, które – zgodnie z oczekiwaniem – są najniższe dla wariantu W1, tj. tego, w którym ciepłownia opalana jest wyłącznie zrębkami drzewnymi. Jednak w tym przypadku wyprodukowano w niej 3294 GJ ciepła mniej w stosunku do zapotrzebowania. Fakt ten jest konsekwencją spalania wilgotnych zrębków ($W^r = 60\%$) w okresie szczytowego zapotrzebowania na ciepło. Maksymalna moc ciepłowni wynosi wtedy 10,4 MW, co powoduje, że jej odbiorcy nie są dogrzeni przez okres 760 godzin w roku (rys.8). Podobna sytuacja występuje w wariantcie W2 (BBW), w którym ciepłownia wyprodukowała 1146 GJ ciepła za mało. W pozostałych wariantach istnieje możliwość wyprodukowania wymaganej ilości ciepła, równej 138 309 GJ, przy czym najniższy koszt wytworzenia 1 GJ ciepła osiąga się w wariantcie W3 (BWB), w którym – w miarę wzrastającego zapotrzebowania na moc cieplną – uruchamiany jest najpierw kocioł opalany zrębkami drzewnymi o mocy 5,8 MW, a po osiągnięciu przez niego mocy maksymalnej włączany jest kocioł węglowy (5,8 MW), który pokrywa szczytowe zapotrzebowanie na ciepło. Jeśli istnieje taka konieczność, to na końcu uruchamiany jest kocioł na zrębki

(2,9 MW), który pracuje również w okresie letnim na potrzeby grzania ciepłej wody użytkowej (rys.9). Wariant W3 cechuje również jeden z najwyższych wskaźników sprawności cieplnej ciepłowni w roku (78,4 %). Wynika to stąd, że duża część zapotrzebowania na ciepło w okresie szczytowym jest pokrywana przez kocioł węglowy, który w tym okresie ma sprawność większą od kotła opalanego wilgotnymi zrębkami. Natomiast kocioł K3 opalany suchymi zrębkami osiąga sprawność większą niż kocioł węglowy pracujący w okresie letnim. Jeśli zaś chodzi o koszty pozyskania paliwa przez ciepłownię, to wzrastają one wraz ze spadkiem zakresu spalania biomasy i osiągają maksymalną wartość przy spalaniu wyłącznie węgla (wariant 8 – WWW). Jest to spowodowane istniejącą obecnie dużą różnicą między kosztem produkcji 1 GJ ciepła ze zrębków drzewnych i z miazgi węgla kamiennego (tablica 29).

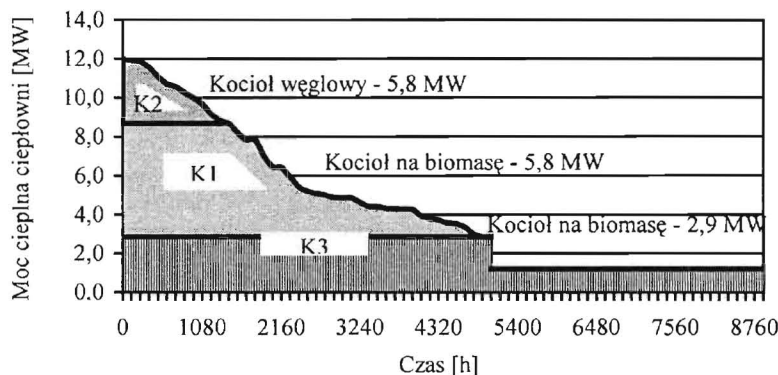
Ze wzrostem zakresu spalania biomasy spada koszt emisji zanieczyszczeń przez ciepłownię, co wynika ze znacznie niższej emisji gazów towarzyszącej spalaniu drewna niż spalaniu węgla kamiennego. Koszt składowania popiołu jest także znacznie mniejszy przy spalaniu drewna. Powstaje go bowiem znacznie mniej niż przy spalaniu węgla kamiennego a ponadto opłata za składowanie popiołu ze spalania drewna jest niższa. Należy także mieć na uwadze, że znaczne możliwości wykorzystania popiołu ze spalania drewna (np. jako nawozu do lasu) mogą doprowadzić do wyeliminowania kosztu składowania popiołu z kosztów eksploatacyjnych ciepłowni.

Tablica 28. Zestawienie kosztów eksploatacyjnych ciepłowni dla poszczególnych wariantów

Wariant Nr	Symbol	Ciepło ze spalania biomasy	Roczna produkcja ciepła	Koszty eksploatacyjne ciepłowni					Suma kosztów eksploatacji	Koszt 1 GJ ciepła
				Koszt paliwa	Koszt emisji	Koszt energii elektr.	Koszt wody	Koszt płac		
-	-	[%]	[GJ]	[tys. PLN/rok]	[tys. PLN/rok]	[tys. PLN/rok]	[tys. PLN/rok]	[tys. PLN/rok]	[tys. PLN/rok]	[PLN/rok]
W1	BBB	100,0	135 015	1 308	16,1	140	6	120	1590	11,8
W2	BBW	76,0	137 163	1 485	36,8				1788	13,0
W3	BWB	71,1	138 309	1 484	40,7				1791	12,9
W4	BWW	53,4	138 309	1 610	56,0				1932	14,0
W5	WBB	39,3	138 309	1 698	67,9				2032	14,7
W6	WBW	19,9	138 309	1 829	84,6				2180	15,8
W7	WWB	14,9	138 309	1 821	88,3				2175	15,7
W8	WWW	0,0	138 309	1 932	101,3				2299	16,6



Rys. 8. Uporządkowany wykres obciążeń dla wariantu W1 pracy ciepłowni



Rys. 9. Uporządkowany wykres obciążeń dla wariantu W3 pracy ciepłowni

Tablica 29. Porównanie kosztów pozyskania 1 GJ ciepła ze zrębków drzewnych i węgla kamiennego

Wielkość	Symbol	Zrębki drzewne				Węgiel
Wilgotność	W^r	30%	40%	50%	60%	15%
Wartość opałowa paliwa	Q_f^r	12983 kJ/kg	10780 kJ/kg	8576 kJ/kg	6372 kJ/kg	21000 kJ/kg
Gęstość nasypowa paliwa	γ_z	229 kg/mp	267 kg/mp	320 kg/mp	400 kg/mp	—
Koszt pozyskania paliwa	k_{pal}	20 PLN/mp				
Ilość GJ ciepła doprowadzanego z paliwem do kotła	I_{GJ}	2,97 GJ/mp	2,88 GJ/mp	2,74 GJ/mp	2,55 GJ/mp	21,0 GJ/t
Koszt pozyskania 1 GJ ciepła	$K_{GJ/pal}$	6,73 PLN/GJ	6,95 PLN/GJ	7,29 PLN/GJ	7,85 PLN/GJ	10,95 PLN/GJ

Powyższa analiza prowadzi do wniosku, że celowe jest spalanie drewna w ciepłowniach, i to zarówno pod względem ekonomicznym jak i ekologicznym. Poprawna praca ciepłowni opalanej drewnem wymaga ciągłego zaopatrzenia w paliwo dobrej jakości (niskiej wilgotności) w ciągu całego roku. Niestety, często wiąże się to z koniecznością zainstalowania w ciepłowni systemu suszenia dostarczanych zrębków drzewnych. Jeśli takiego systemu nie ma, to celowe staje się posiadanie przez ciepłownię kotła opalanego paliwem konwencjonalnym (np. węglem kamiennym), który będzie w stanie pokryć szczytowe zapotrzebowanie na ciepło w okresie dostaw gorszej jakościowo biomasy. Oprócz tego posiadanie przez ciepłownię kotła opalanego węglem kamiennym zwiększa bezpieczeństwo energetyczne zakładu oraz pewność co do wyprodukowania wymaganej ilości ciepła.

Bibliografia

- [1] Energetyczne wykorzystanie drewna. Technologia – Środowisko – Gospodarka, Praca zbiorowa, Poradnik, Polbiom, Warszawa, 2001.
- [2] Ziębik A., Szargut J.: Podstawy gospodarki energetycznej, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.
- [3] Guszcza R., Świgoń J.: Techniczne i ekologiczne aspekty energetycznego wykorzystania drewna i odpadów drzewnych, Gospodarka paliwami i energią, 1, 1997.
- [4] www.mos.gov.pl
- [5] Szargut J., Ziębik A.: Podstawy energetyki cieplnej, PWN, Warszawa, 2000.
- [6] Laudyn D., Strzelczyk F.: Elektrownie, WNT, Warszawa, 1990.

CONVENTIONAL FUEL AIDED BURNING OF WOOD WASTE IN HEAT-GENERATING PLANT

Abstract: This paper is devoted to analysis of conventional fuel (e.g. fine hard coal) aided production of thermal energy in process of wood waste burning in heat-generating plant. These fuels are burnt in separate boilers under assumption that, hot water supplies common collector connected to heat distribution network. The goal of our considerations is comparison of values of operating data in a few cases in which, one deals with different quantity of heat produced in burning process of wood waste and fine hard coal. Each case

is characterized by the same value of such parameters as: installed power, heat load curve as well as annual heat demand. Operating costs of heat-generating plant and cost of production of 1 GJ of heat were estimated, too. In addition, attention has been paid to reduction of emission cost with increase of range of burning of wood waste.

Keywords: biomass, hard coal, co-combustion, heat-generating plant

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

Tomasz Sienkiewicz¹

TANI MINIATUROWY ROBOT MOBILNY – BUDOWA I STEROWANIE

Streszczenie: Opisano budowę i oprogramowanie miniaturowego robota mobilnego. Przedstawiono sposoby sterowania robotem oraz przeanalizowano przyszłe algorytmy sterowania. Przeprowadzono ocenę zastosowanego układu mechanicznego z uwagi na możliwości sterowania i możliwości ruchu oraz przedstawiono propozycję dalszej jego modernizacji. Zaprezentowano możliwości i plany rozbudowy sensoryki i sterowania robota.

Słowa kluczowe: robot mobilny, konstrukcja, sterowanie

Wprowadzenie

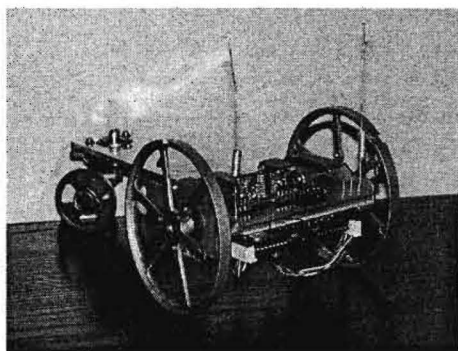
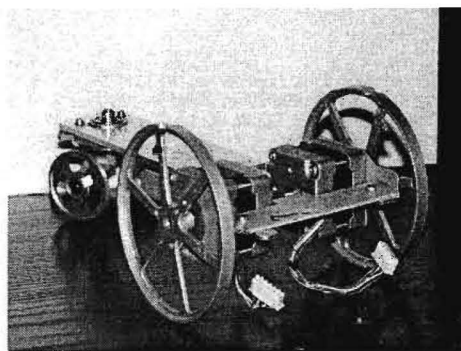
Miniaturowy robot mobilny został wykonany w ramach indywidualnej pracy badawczej. Stanowi on swego rodzaju „poligon doświadczalny” dla prac w zakresie budowy robotów mobilnych prowadzonych w Katedrze Mechatroniki. Założenia projektu są następujące: robot ma być zbudowany minimalnym nakładem kosztów, a jego modułowa, prosta konstrukcja ma umożliwić ma szybką realizację zmian, wynikających z coraz nowszych pomysłów jego autorów.

Uzasadnieniem minimalizacji kosztów jest między innymi praca dydaktyczna ze studentami, których trzeba zachęcić do robienia podobnych projektów. Pokazuje się studentom, że mając ciekawy, twórczy pomysł można stworzyć „coś z niczego”.

¹ Politechnika Białostocka, Białystok ul. Wiejska 45C

I. Budowa

Konstrukcja mechaniczna robota oparta jest na bazie łatwo dostępnych silników krokowych, używanych w stacjach dysków 5,25". Silniki te, wraz z łączącym je aluminium wspornikiem, stanowią szkielet nośny robota (rys.1a), do którego zamocowane są płytki z obwodami sterownika robota (rys.1b) oraz baterie zasilające. Silniki krokowe pozwalają niezależnie sterować kołami napędowymi z dokładnością do 1/200 obrotu, co przy zastosowanych lekkich kołach aluminium o średnicy 96 mm, daje dokładność przemieszczenia około 1,5 mm.



Rys. 1. Konstrukcja robota: a) część mechaniczna; b) część mechaniczna z elektroniką sterującą.

Do sterowania robotem zastosowano mikrokontroler firmy Microchip PIC16F84, taktowany zegarem 4MHz, zawierający wewnętrzną pamięć programu 1kB i wewnętrzną pamięć danych EEPROM o pojemności 64B. Mikrokontroler ma dwa konfigurowalne porty we/wy. Ośmiobitowy port B skonfigurowany został jako wyjścia sterujące dwoma silnikami krokowymi za pomocą dwóch końcówek mocy L292B. Port A, posiadający 5 dowolnie konfigurowalnych we/wy, został wykorzystany do odbioru rozkazów sterujących drogą radiową i przesyłania informacji do urządzenia sterującego, którym może być komputer zaopatrzone w moduł nadawczo-odbiorczy lub np. sterownik ręczny.

Do transmisji radiowej pomiędzy robotem a urządzeniem sterującym wykorzystano hybrydowe nadajniki i odbiorniki firmy STE pracujące na częstotliwości 433.92 MHz oraz transmisję szeregową RS232. Umożliwia to dwustronną półduplexową transmisję z szybkością 4800 bit/s. Jeżeli wziąć pod uwagę fakt, że urządzenie pracuje w ogólnodostępnym paśmie 433MHz, a moc nadajnika wynosi ok. 6 mW, nie jest wymagana licencja nadawcy.

W celu zmniejszenia miejsca zajmowanego przez elektronikę, sterownik podzielono na dwie części. Pierwszą stanowi płytką zawierającą mikrokontroler wraz z modułami radiowymi i złączem dodatkowym, do którego podłączyć można moduły ultradźwiękowe lub np. czujniki natężenia oświetlenia. Druga część to płytką ze stabilizatorem napięcia oraz końcówkami mocy L292B, do których podłączone zostały silniki krokowe.

2. Oprogramowanie

Oprogramowanie mikrokontrolera zawiera procedury obsługi komunikacji bezprzewodowej, interpreter poleceń dla robota oraz moduł rejestracji położenia i orientacji kół napędowych.

Zastosowanie ogólnodostępnej częstotliwości transmisji radiowej wymusiło opracowanie protokołu szyfrowania rozkazów i eliminowania zakłóceń. Już przy pierwszych próbach komunikacji okazało się, że na tej częstotliwości panuje duży ruch. Zakłócenia wprowadzają między innymi alarmy samochodów oraz urządzenia sterujące wyposażeniem ciężkiego sprzętu budowlanego. W celu zapewnienia niezawodnej komunikacji każda transmisja jest poprzedzona specjalnym „znacznikiem” upewniającym robota, że rozkaz pochodzi ze sterownika. Każde polecenie jest powtarzane, przy czym powtórzenie następuje w inwersji, tzn. pierwotny rozkaz mający postać binarną 01100010 jest przy powtarzaniu wysyłany w postaci 10011101.

W podstawowej konfiguracji robota do określenia położenia używany jest wewnętrzny system odometrii, polegający na zliczaniu impulsów sterujących silnikami krokowymi. Zaletą tej metody jest jej niski koszt, wadą natomiast błąd lokalizacji robota kumulujący się w czasie. Spowodowane jest to między innymi ograniczoną rozdzielczością dekodów i błędami przypadkowymi, np. nierównością podłoża oraz poślizgiem kół.

Interpreter poleceń jest to zbiór procedur umożliwiających rozpoznawanie rozkazów odebranych drogą radiową oraz podejmowanie odpowiednich działań, mających na celu ich realizację. Interpreter poleceń rozróżnia następujące rozkazy:

- zmiana prędkości poszczególnych kół;
- przejazd na zadaną odległość z określoną prędkością;
- skręt;
- jazda po zaprogramowanej trasie;
- przejście w tryb jazdy samodzielnej (zgodnie z wybranym oprogramowaniem).

3. Sterowanie

W celu maksymalnego uproszczenia układu sterującego założono, że do sterowania wystarczy dowolny terminal znakowy. Transmisja danych poprzez port szeregowy komputera odbywa się za pomocą układu nadawczo–odbiorczego, zapewniającego protokół szyfrowania rozkazów i eliminowania zakłóceń. Takie rozwiązanie nie narzuca wymagań co do systemu operacyjnego i sprzętu komputerowego sterującego robotem.

Zastosowano trzy poziomy sterowania. Pierwszy z nich to sterowanie współrzednymi wewnętrznymi – bezpośrednie sterowanie każdego koła robota poprzez zdefiniowanie, które koło ma się poruszyć, w którą stronę i o jaką wartość. Składnia polecenia ma postać $[S;P;K;DD]$, gdzie:

- $[S]$ – określa wybór silnika: L – lewy silnik, R – prawy silnik, A – oba silniki;
- $[P]$ – określa prędkość silnika – są do wyboru cztery prędkości (0, 1, 2, 3);
- $[K]$ – określa kierunek ruchu: 1 – ruch do przodu, 0 – ruch do tyłu;
- $[DD]$ – określa zakres ruchu od 0001h do FFFFh (od 1 do 65535 w zakresie dziesiętnym).

I tak polecenie L;2;1;05DC oznacza: rusz lewe koło do przodu o 1500 jednostek z prędkością 2.

Drugi poziom sterowania to sterowanie ręczne kierunkami. Pozwala ono na ręczne poruszanie robotem za pomocą klawiatury alfanumerycznej komputera. Podczas tego sterowania robot rozpoznaje następujące komendy: 8 – ruch do przodu, 2 – ruch do tyłu, 4 – skręt w prawo, 6 – skręt w lewo, 7,9,1,3 jazda po łukach, „+” zwiększa prędkość, „-” zmniejsza prędkość.

Sterowanie po zaprogramowanej trasie to ostatni z trzech wdrożonych poziomów sterowania. Pozwala ono zrealizować bardziej złożony ruch dzięki umieszczeniu w pamięci danych EEPROM mikrokontrolera sekwencji rozkazów sterujących silnikami. W kolejnych 64 komórkach pamięci zapisane są sekwencje ruchu silników (w postaci analogicznej do tej ze sterowania współrzednymi), które wywołujemy poleceniem LA.

4. Ocena zastosowanego układu mechanicznego

Po przeprowadzeniu pierwszych prób okazało się, że należy zweryfikować założenia konstrukcyjne robota odnośnie do układów napędowych. Silniki krokowe są napędami tanimi, o nieskomplikowanym sterowaniu. Ułatwiają one korzy-

stanie z procesu odometrii. Nie wymagają przy tym stosowania dodatkowych sensorów do pomiaru przebytej drogi. Jednocześnie, właśnie ze względu na sposób pracy, powodują powstawanie dużych błędów w przemieszczaniu się robota, szczególnie na powierzchniach gładkich (znaczące poślizgi kół). Niewielka moc silników powoduje dodatkowo problemy przy poruszaniu się po nierównym terenie.

Wziąwszy pod uwagę wszystkie te aspekty, za kolejny etap trzeba przyjąć zastąpienie silników krokowych silnikami prądu stałego z przekładniami oraz zaopatrzenie w enkodery do określania przebytej drogi. Zmiana ta poprawi właściwości jezdne robota, ale znacznie skomplikuje algorytm sterowania i kontroli ruchu, którego prostota jest największą zaletą zbudowanej konstrukcji.

5. Plany modernizacji robota

Dalsza modernizacja robota nie ograniczy się tylko do zmiany w układzie napędowym. Następnym etapem rozbudowy robota będzie, przy wykorzystaniu możliwości budowy, dodanie kilku sensorów, między innymi natężenia światła, sensorów zbliżeniowych i sensorów odległości.

Obecnie oprogramowanie robota umożliwia tylko proste sterowanie we współrzędnych wewnętrznych, dzięki któremu sterujemy bezpośrednio ruchem poszczególnych kół lub realizujemy ruch po z góry określonej trasie. W planach jest opracowanie oprogramowania współpracującego z czujnikami zewnętrznymi pozwalającego na następujące czynności:

- sterowanie we współrzędnych zewnętrznych związanych z otoczeniem (poruszanie się na podstawie sygnałów pomiarowych z zewnętrznych sensorów położenia).
- sterowanie zachowaniowe (behawioralne) – symulacja pewnych odruchów (zachowań) robota, np. idź w stronę światła, dźwięku, uciekaj od zbliżającego się obiektu itp.
- sterowanie zadaniowe – robot dostaje zadanie do wykonania i sam musi podzielić je na podzadania.

Obecnie sterowanie realizuje się przez jeden mikrokontroler wykonujący podstawowe komendy ruchu. Jest on swego rodzaju rdzeniem nerwowym. Chcąc zrealizować wspomniane wcześniej rodzaje sterowania, należałoby dodać jeszcze jeden mikrokontroler (tzw. nadrzędny), który zajmowałby się obliczaniem algorytmu ruchu i kontrolą działania mikrokontrolera bazowego. Nowy element byłby zatem swoistym mózgiem robota. Taka sama zasada obowiązywałaby w układzie

sensorycznym. Składałby się on z szeregu czujników i procesora kontrolującego ich pracę. Ten ostatni współpracowałby z mikrokontrolerem nadrzędnym. Pobierałby od niego wytyczne o wymogach sensorycznych dla danego algorytmu ruchu i przekazywałby potrzebne informacje z czujników zewnętrznych.

Podsumowanie

W powyższym artykule przedstawiliśmy robota o prostej budowie i sterowaniu. Mogłoby paść pytanie, dlaczego od razu w konstrukcji nie zastosowaliśmy profesjonalnych silników, układu sterowania wykorzystującego procesory o dużej mocy obliczeniowej oraz kontroli ruchu bezpośrednio przez komputer. Chcemy tu jednak ponownie odnieść się do założeń projektu: minimalne koszty, modułowość i prostota budowy. Mając taką bazę zawsze można rozbudowywać konstrukcję.

Bibliografia

1. Sienkiewicz T., *Elementy sterowania kroczącego robota dydaktycznego*, Praca magisterska, Politechnika Białostocka, 1999.
2. Szczebiot R., *Sześcionożny robot kroczący SRK1*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, 2000.
3. Zielińska T., Chmielniak A., *Sterowanie zachowaniami zespołu robotów mobilnych*, Prace Naukowe Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, 1998.

INEXPENSIVE MINIATURE MOBILE ROBOT - THE CONSTRUCTION AND THE CONTROL

Abstract: The construction and software of the miniature mobile robot were described. Methods of the control of the robot were introduced and future algorithms of the control were analysed. The estimation of the applied mechanical setup was carried out with regard to chances to steer and chances of the movement, and the proposal further of his modernization was introduced. The possibilities and plans of the development sensors and of steering the robot were presented.

Keywords: mobile robot, construction, control

Juraj Smrček¹, Anton Palko², Peter Tuleja¹

BIOMECHANICAL GRIPPER – NEW MECHANISM EFFECTOR FOR ROBOTS

Abstract: The specific group grippers are biomechanical grippers, whose shape and construction are analogical to biological model (human hand). These constructions are arranged into category of “intelligent grippers” recently. The analysis of gripping the objects by biomechanical grippers and consequently setting of the model identification of related characteristics and parameter are possible to base on the principles shown. It is possible to secure reliable and safe clamping of manipulated objects in the period of gripper design. This paper gives knowledge from the solution of system problems of manipulated object gripping in the realisation of elements “gripper – manipulated object application requirements” in the period of gripper design.

Keywords: biorobotics, biomechanical robots, biomechanical gripper, characteristics and parameter, application

Introduction

Introduction of robotic complexes into mining processes, besides growing requirements on affectivity of mining process technologies, is motivated also by humanization of work in the environment which is characterized mainly by the danger of gas explosion, polluted atmosphere, dampness, high temperature, dustiness, noise, vibration, etc. In accordance with basic mining technological processes it is suitable to design robototechnological complexes mainly for driving, extrac-

¹ Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department Production Technique and Robotics, B. Nemcovej 32, 042 00 Kosice, Slovakia;

² H.M.transtech Prešov, Volgogradska 13, 080 01 Prešov, Slovakia

tion, manipulation and transport. To explain it simply, all technological and manipulative operations contain the structure of acts of “gripping the manipulated object”, “transfer of the manipulated object along any line”, and “putting down the manipulated object at given point”. Available analyses of robot applications in mining form mainly the following requirements: adaptability, ability of space mobility, orientation in the space with scarce light, cinematic structure for narrow space, sturdiness for the worst working environment. Realization of these requirements from the point of view of recent trends in robotics is the contents of the paper.

Recent trends of the development of productive and manipulation processes automation lead to the new generations of automation systems conceptually and principally based on BMS – Bionic Manufacturing Systems or IMS – Intelligent Manufacturing Systems models.

This trend is closely connected with recent effort to take and use the knowledge of biologic objects [living nature] in designing and optimization of structures, architecture and setting the characteristics of difficult technical objects and systems.

On the basis of implied trend a new theoretic – application direction emerges, so – called „biorobotics“ dealing with theory, construction and application of robots in which theoretical and clinical knowledge about the features, processes and characteristics of some biologic organisms organs are used. This direction gives the frame to the new development trends, innovation and re-structuralization processes in the classical „robotics“ and in its application branches for the third millennium.

I. Biomechanical robots

Recent knowledge in the given circumstances allows defining „biorobotics“ with the help of systematically structured subsystems [biomechanism, biocontroll, biosensors, biointelligence]. The basic subsystem in subsystem „biomechanism“ [biokinematics, biodynamic, bioactuators] enriches the construction of technical mechanisms with the knowledge of the behavior of biologic organisms.

On the base of this knowledge, the system structure of „biomechanical robot“, Fig.1, was set. The principle of this structure allows to design the parts and functional systems of the robotic equipment like mechanic analogues of the movement and other systems of chosen biologic object, for example the gripper / according to the shape and function of a human arm, movement knobs of the robot / according to the movement of animal organs, artificial arms and legs {prothetic equipment} / according to original ones.

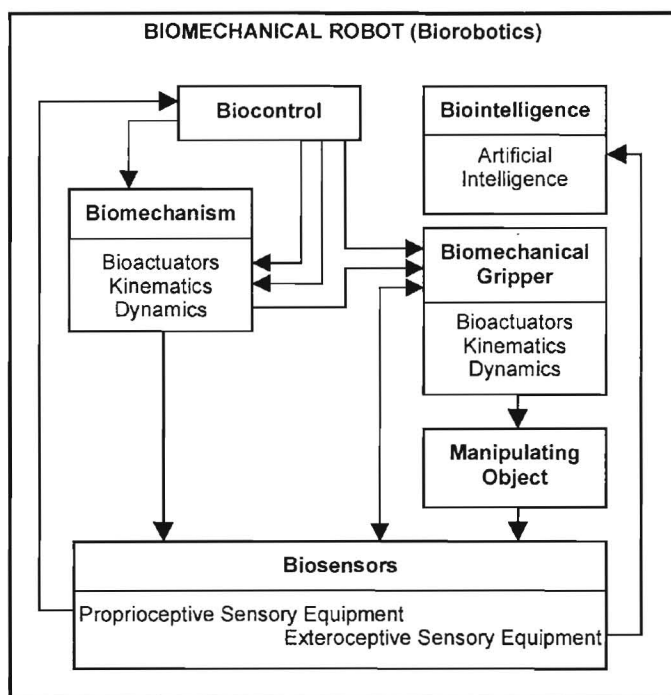


Fig. 1. Biomechanical robots, system structure

1.1. Biomechanical gripper

The active mechanism [subsystem] of IR is finished by final effectors [working tool – working organ] which relates to IR application. It can be said that the final effectors G/IR is special single – purpose device constructed according to conditions of IR usage.

Recent system approach classifies G/IR from the point of view of application as gripping [gripping of manipulated object], technological [concrete tool] and combined [modification of the given ones].

The specific group of G/IR is biomechanics grippers [BG/IR], which belong to the category of combined G/IR. The notion of BG/IR relates to G/IR also, whose shape and construction are analogical to biological model [human hand], they are biomechanical model, Fig.2. These constructions are arranged into the category of „intelligent grippers“ recently, the first constructions date back to the 80s of this century.

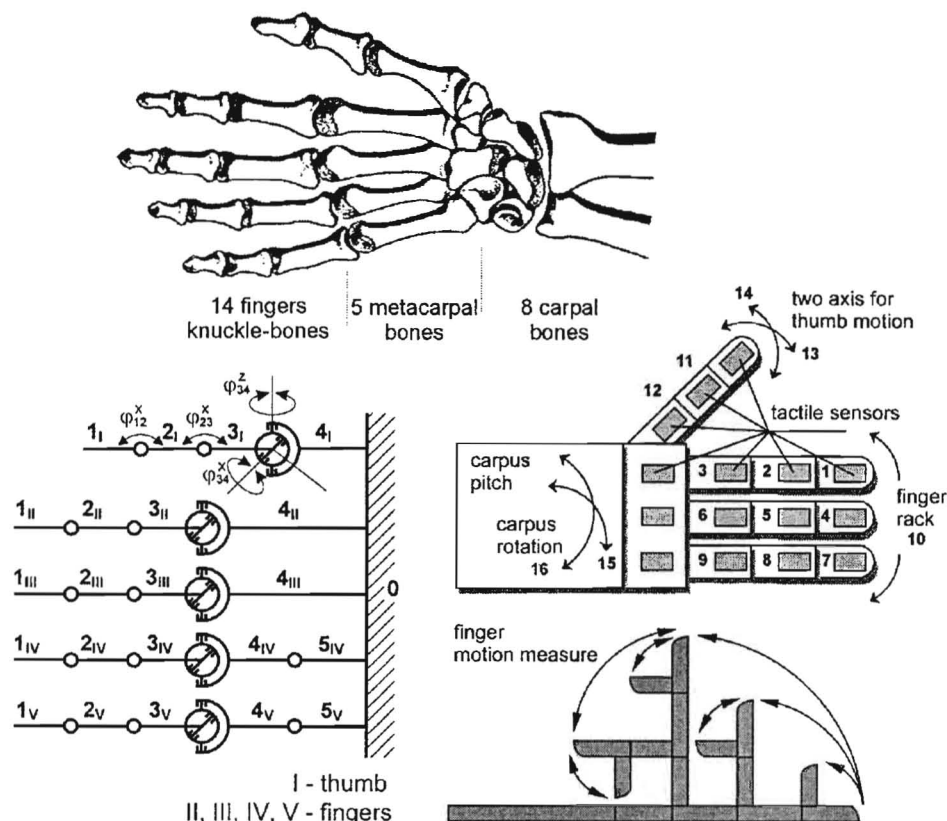


Fig. 2. Biological model, biomechanical model

BG/IR technically copies kinematics of biological model with the aim to approach the features and characteristics of gripping with fingers, thumb and palm [gripping by clamping, holding, squeezing] as much as possible, Fig.3.

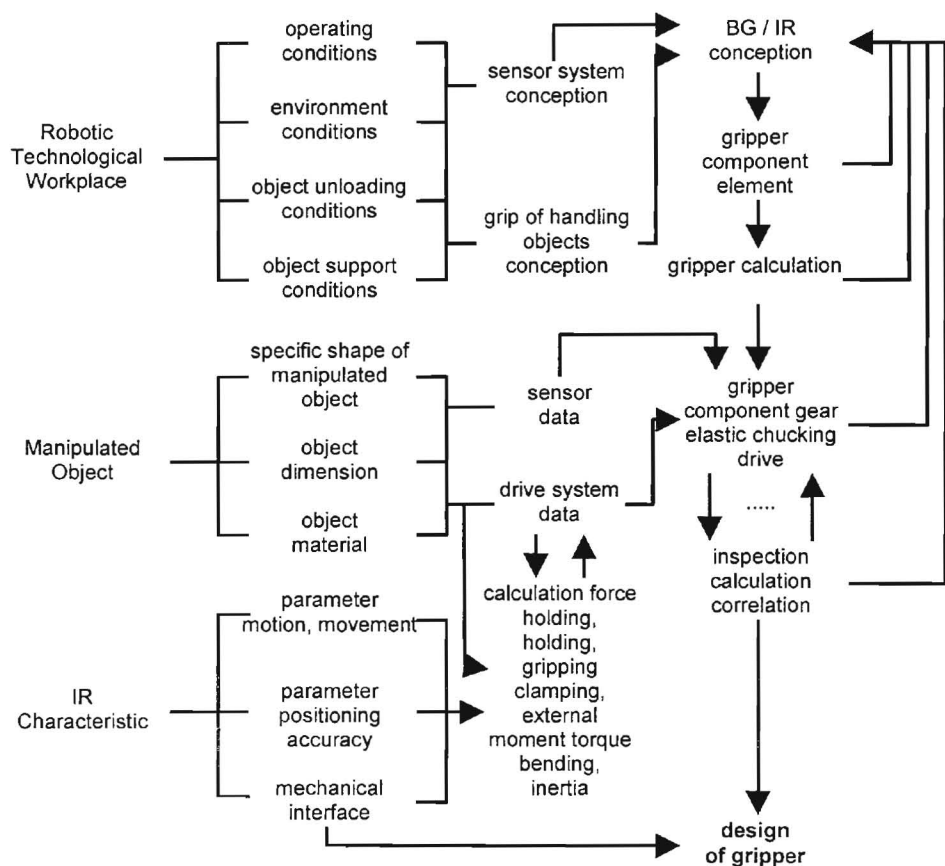


Fig. 3. Grip of handling objects

The analysis of gripping the objects by BG/IR and consequently setting of the model of identification of related characteristics and parameters are possible to base on the principles shown in the Fig.4.

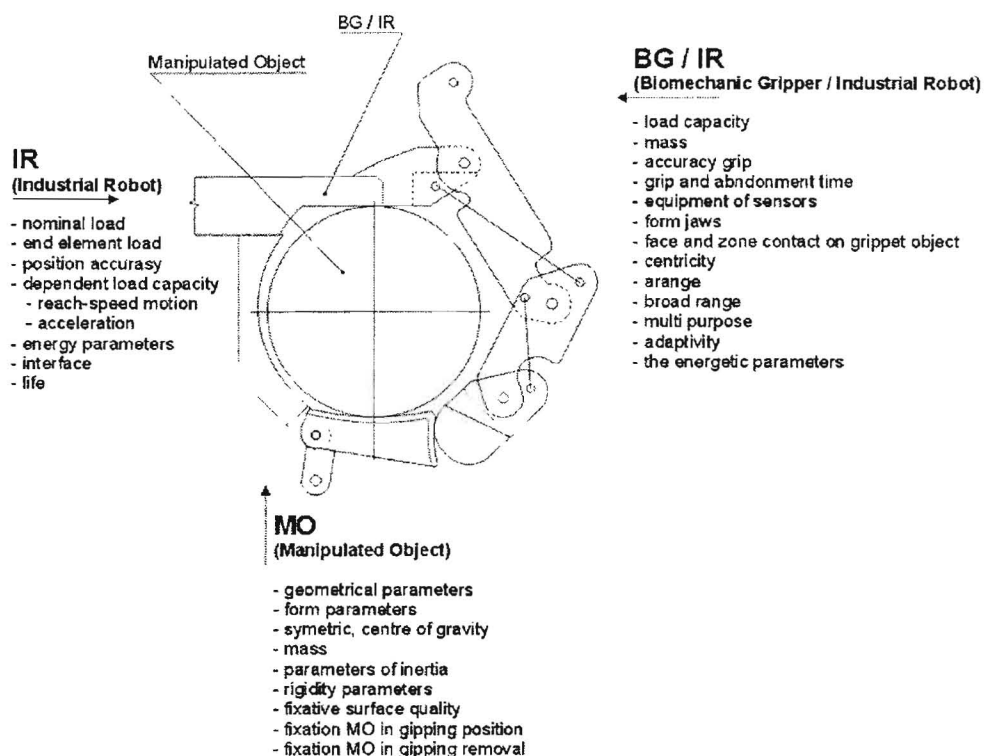


Fig. 4. Projecting method gripper

1.2. BG/IR characteristics and parameter

Technical practice so far did not create standard set of characteristics and parameters for complete evaluation of G/IR features.

On the base of knowledge from mechanic and functional sets accuracy theory, an approach for defining characteristics and parameters G/IR set were formulated, Fig.5. Each group is filled with concrete parameters [parameters of relevant standards are taken into consideration too], generally valid for G/IR type of machines. The set is constructed as an open system that can be completed on the base of new information and demands.

Characteristic group	Partial group	Parameter
Geometrical	working space	gripper influence size, gripper working space, collision room of gripper,...
	geometrical precision	accuracy of manufacturing, geometrical dimension, groove angle of gripper jaw, ...
	working accuracy	positioning accuracy, grip accuracy, operation accuracy,...
Static	static precision	grip stability, gripper rotation, grip position, ...
	static toughness	static toughness, play of gripper, gripper joint clearance,...
Kinematics	kinematics structure	degree of freedom, kinematics structure, gripper mobility,...
	movement parameters	gripper sliding route, opening path of grip organ, gripper process speed, ...
Dynamic	dynamic toughness	dynamic toughness, acceleration of drive extreme, relative angle acceleration,...
	maximum loading	maximum load, nominal load, danger room, ...
Working output	indicator power consumption	power consumption, power input, drive energy, ...
	indicator performance	maximum load, nominal load, load bearing capacity ...
Operation	indicator operation	grip time, gripper change time, gripper stopping time,...
	safety	grip safety, operation safety, collision work function, ...
	reliability	freedom of defects, handling error, life of gripper, ...

Fig. 5. Characteristics and parameters G/IR

Mentioned approach to identification of BG/IR characteristics could be presented through experimental measuring held on BG/IR developed at the working place of the paper authors. A choice of typical „mechanic“ parameters, especially important for evaluation of this category of G/IR is given here.

Pose accuracy and pose repeatability – unidirectional positioning accuracy and repeatability and unidirectional orientation accuracy and repeatability of manipulated object gripping during repeated expansion and contraction of active parts [articles] of BG/IR, Fig.6. The parameter is dependent on the accuracy and repeatability of making the way and position of BG/IR parts during gripping of the object.

Force relations – express the force parts and relevant related forces from speed components of IR movement in the relation to a security of manipulated object gripping for all times of IR manipulation with given object. The basic relations are given by Fig.7, the decisive „critical“ influences on given parameters are balancing of energy feeding values, the position of the object from the point of view of own

gravity and orientation of BG/IR components during its gripping, speed parameters of IR movement.

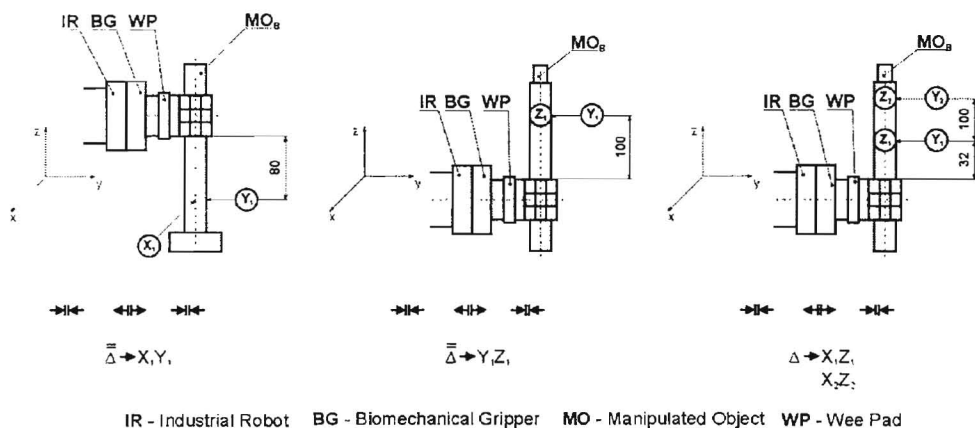


Fig. 6. Pose accuracy and pose repeatability

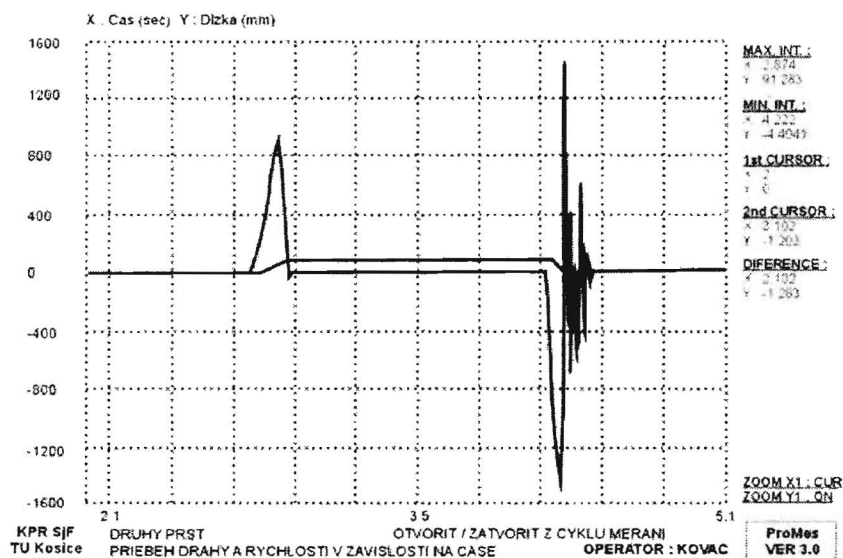


Fig. 7. Force relations

2. Application of biomechanical grippers

Biological models open wide space for their application use in concrete technical solutions. In relation to the application topic of the conference the following designs can be given as examples.

At the workplace of authors, there was a three-fingered gripper FUNNY developed (the first Prešov biomechanics gripper) with a simple palm in opposite position, the kinematics corresponds with the trajectories of human fingers during gripping, Fig. 8. Drive is designed through pneumatic linear drives. It is equipped with the sensors for force and the reader of presence of manipulated object. Loading capacity is 1,50 kg; the range of manipulated object is 10 to 90 mm. The gripper can “intelligently” manipulate for example with spools in spinning machines, with long object in manipulation operations of the type of “bar plugging”, as a gripper for supportive manipulation operations in mining and driving machines.

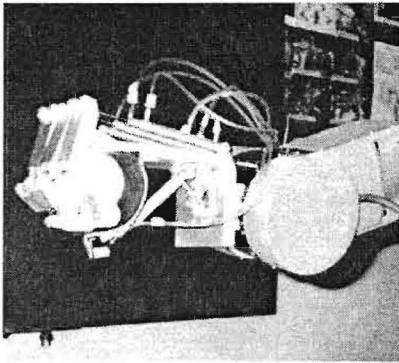
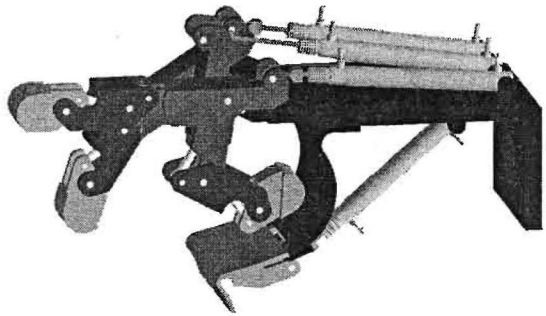


Fig. 8. Funny gripper



At the workplace of authors, a wide-range four-fingered gripper JANE was designed, Fig. 9. As a drive, step electro engines serve, each finger has a separate drive, and it is equipped with force sensors and the readers of presence of manipulated object. Loading capacity of the gripper is 1,00 kg. The gripper can “intelligently manipulate”

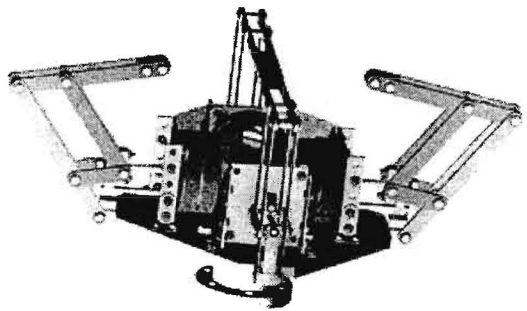


Fig. 9. JANE gripper

e.g. in manipulation operations connected with the technology of spinning, or weaving, as a gripper for supportive manipulation operations in mining and driving machines.

Biomechanical wide-range three-fingered gripper for gripping axisymmetric rotation manipulation objects, Fig. 10. The gripper has exchangeable jaws with the stability of fixed gripping secured and keeping the orientation of physical axis of manipulated object.

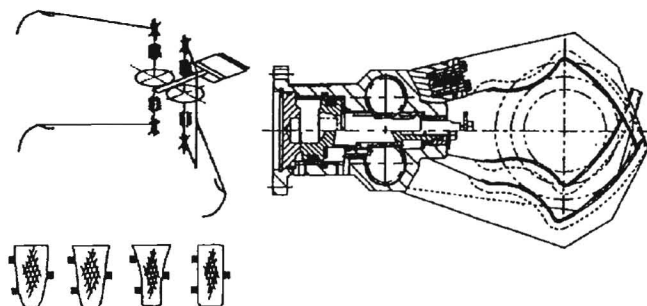


Fig. 10. Gripper three – fingered

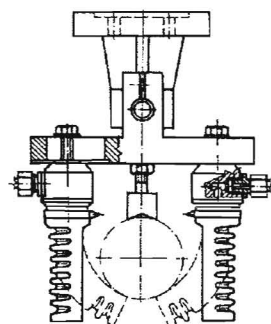


Fig. 11. Gripper – plastic fingers

The special gripper using “plastic fingers” (overpressure containers), Fig. 11. The gripper has a character of universal wide-range means, for gripping manipulated objects at outer surface.

Special gripper based on similar principle, Fig. 12, serves for object gripping at inner surface.

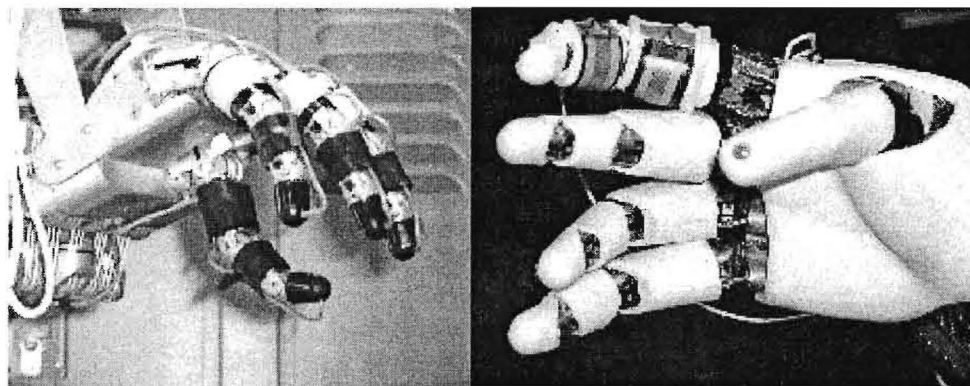


Fig. 12. Gripper MIT Dextrous Hand

Conclusion

Introduced model of G/IR characteristics and parameters identification were tested on BG/IR and also on „classical“ G/IR. The results affirmed suitability of the model conception as well as practical usability of identified parameters during G/IR construction or their setting into concrete applications.

It is possible to secure reliable and safe clamping of manipulated objects in the period of G/IR design, in the period of G/IR setting to secure diagnostics of the influence of clamping inaccuracy and by this secure „stability“ of this process and consequently to influence the quality of whole automation process in which IR is set, this all through using the possibilities of shown approach and its algorithmisation.

Acknowledgements

Slovak Ministry of Education Research Project, contract VEGA No. 1/0415/03, supported this work.

Literature

1. Kawamura,K.; Fashoro,M.: Biorobotics. Technical Report. Centre for Intelligent Systems, Vanderbilt University, Nashville [USA], 1992
2. Marcincin,J.N.; Smrcek,J.: Biorobotics – New and Perspective Evolutionary Course in Robotics. In: Biomechanika – Biomechanics ` 94, Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechniki Wrocławskiej, Nr.75, Wrocław [Poland] 1994, pp.240–243
3. Marcincin,J.N.; Smrcek,J.: Biomechanical Grippers: Important Elements of Biomechanical Robots. Industrial Robot, Vol.24, No.3, Bradford [UK] 1997, pp.234/238
4. Marcincin,J.N.; Smrcek,J.: Biorobotics – theory, princely, application in technique praxis. Academic Press, Elfa Kosice, Kosice 1998 [in Slovak]
5. Novak, P.: Problems of safety assurance of IPC control systems. Proceedings 6th Int. Conf. ROBTEP 2002 Automatization / Robotics in theory and practice, TU SjF Košice, Kosice 2002, pp. 275–280

6. Sandler, B.Z.: Robotics – Designing the Mechanisms for Automated Machinery. Academic Press London, London (UK) 1991
7. Skarupa, J.; Zelina, P.: Gripper head Industrial Robots. ES VSB–TU Ostrava [Czech] 1993 [in Czech]
8. Skarupa, J.; Mostyn, V.: Theory industrial robots. Viena Kosice, Kosice 2000 [in Czech]
9. Smrček, J.; Palko, A.; Petruska.: Biomechanical Robots / Biomechanical Gripper New Mechanism, Approach its Applications. In: Proceedings 30th ISIR, Tokyo [Japan] 1999
10. Smrček, J.; Palko, A.: Robotics – effector for industrial and service robots, design – construction – constructive. Viena Kosice, Kosice 2004 [in Slovak]
11. Vassura, G.; Bicchi, A.: Robots and Biological Systems: Towards a New Bionic. Springer Verlag, Berlin [Germany] 1993, pp.165–177
12. Zivcak, J.; Hudak, R.: Biomechanisms. MaNaCon Presov, Presov 2001 [in Slovak]

CHWYTAK BIOMECHANICZNY – NOWE ROZWIĄZANIE EFEKTORA ROBOTÓW

Streszczenie: Specyficzną grupę chwytaków są chwytaki biomechaniczne, ukształtowane i skonstruowane na podstawie analogii do modelu biologicznego (ręka człowieka). Konstrukcje te są zaliczane obecnie do kategorii chwytaków inteligentnych. W pracy przedstawiono analizę chwytania obiektu chwytakiem biomechanicznym oraz wynikającą z niej identyfikację charakterystyk i parametrów układu. Uzyskanie dużej niezawodności chwytaka oraz bezpiecznego manipulowania chwytanym obiektem możliwe jest już na etapie projektowania. W tym celu w pracy zawarto niezbędne zalecenia.

Słowa kluczowe: bioroboty, biomechaniczne roboty, biomechaniczny chwytak, charakterystyki i parametry, zastosowanie

Roman Trochimczuk¹, Sviatoslav E. Karpovich²

POZYCJONER PLANARNY DLA LASEROWEGO SYSTEMU FORMOWANIA OBIEKTÓW 3D W SZKLE

Streszczenie: W pracy przeprowadzono analizę konstrukcji, wykazując zalety i niedogodności istniejących rozwiązań planarnego systemu pozycjonowania wiązki laserowej. Omówiono również metodę syntezy programowych przesunięć na bazie rozwiązania odwrotnego zadania dynamiki. Ponadto w podsumowaniu określono niektóre osobliwości technologii produkcji pozycjonerów planarnych.

Słowa kluczowe: pozycjoner planarny, laserowy system formowania obiektów w szkło, synteza programowych przesunięć, generowanie trajektorii

Wprowadzenie

Konstruowanie laserowych systemów formowania trójwymiarowych obiektów w szkło i innych przezroczystych dielektrykach zdeterminowało dobór systemów pozycjonujących ognisko wiązki laserowej (wiązki formującej). Wraz z wdrożeniem układów laserów impulsowych $Na^{3+}YAG$, pracujących na roboczych częstotliwościach powyżej 100Hz, do systemów formowania (rodzina ELS – *Engrave Laser System*, firmy Lotis TII) [2] okazało się, że dotychczas stosowane układy pozycjonerów liniowych (działających na układzie gwint–nakrętka) nie

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

² Katedra Ciepłownictwa, Instytut Inżynierii i Ochrony Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45E, 15–351 Białystok, Polska

zapewniają wystarczającej dokładności pozycjonowania oraz odpowiednich wartości prędkości i przyspieszeń, aby otrzymać wysokojakościowe produkty (*kubiki*) [2]. W związku z powyższym zaczęto poszukiwać nowych alternatywnych rozwiązań, które zapewniłyby wysoką produktywność systemu formowania, przy warunku maksymalnego wykorzystania możliwości oferowanych przez układ lasera impulsowego oraz dających możliwość zaaplikowania do istniejącego rozwiązania elastycznych algorytmów generowania trajektorii.

Główna zasada przy budowie współrzędnościowych systemów pozycjonujących na liniowych silnikach krokowych [7] zawiera się w budowie systemu magnetycznego, zapewniającego kolejne wytyczanie stref zębów biegunów albo grup biegunów induktora. Układ magnetyczny powinien zapewniać jednakowe strumienie magnetyczne stref zębów napędu (magnetyczną symetrię), by wyeliminować amplitudy drgań jego siły ciągnącej w procesie komutacji uzwojenia.

Współrzędnościowe moduły elektromagnetyczne w wieloosiowym krokowym napędzie budowane są z jednakowych elektromagnetycznych elementów. Elementy współrzędnościowego układu można podzielić następująco [4], [5]:

- moduł elementarny, tj. układ magnetyczny z biegunami zębowymi, uzwojeniem fazowym albo sterującym uzwojeniem fazowym i źródłem wzbudzenia (może to być samo uzwojenie fazowe, ze stałą składową prądu); modułu elementarnego nie można rozdzielić na jednakowe części,
- moduł fazowy składa się z jednego lub kilku elementarnych modułów (zawiera minimalną i dostateczną liczbę zębowych biegunów z wzajemnym przesunięciem zębów); źródła wzbudzenia i uzwojeń fazowych, w których na skutek komutacji następuje samoistne przemieszczenie modułu fazowego wzdłuż osi prostopadłej do kierunku nacięcia zębów.

Współrzędnościowe pozycjonery elektromagnetyczne zawierają minimalnie dwa moduły fazowe, rozłożone symetrycznie w stosunku do środka masy. W każdej z symetrycznych części układu współrzędnościowego mogą być ustalone moduły fazowe, przy czym, w przypadku wzrostu liczby faz (na przykład z 2 do n), dokładając identyczne moduły fazowe z wzajemnym przesunięciem zębów w stosunku do pierwszego umiejscowionego, zwiększamy siłę ciągnącą. W przypadku ustalenia prostego, w celu zwiększenia siły ciągnącej, moduły fazowe dokłada się bez wzajemnego przesunięcia [6].

Elementarne moduły fazowe, ze względu na swoją konstrukcję i założony sposób przedstawienia siły ciągnącej, można podzielić według typu i osobliwości konstrukcyjnych całego pozycjonera współrzędnościowego. Tak jak dowolny synchroniczny układ, moduły fazowe mogą być: aktywne, reakcyjne, induktorowo-reakcyjne i induktorowe. Analiza porównawcza różnych typów modułów

kcyjne i indukcyjne. Analiza porównawcza różnych typów modułów fazowych pokazuje, że według wielkości dobroci dynamicznej (w odniesieniu do maksymalnej siły ciągnącej, do masy modułu), masowo-gabarytowych i energetycznych wskaźników, jako najlepszy i najbardziej rozwojowy okazuje się indukcyjny moduł fazowy ze wzbudzeniem od magnesów stałych.

Do niedostatków konstrukcji można zaliczyć: wzrost ceny przy wysokiej jakości magnesy stałe (wykonane z drogich stopów metali ziem rzadkich) oraz obecność krzywej przestrzennej momentu synchronizującego (nawet przy nieobecności nasycenia obwodu magnetycznego) drugiej harmonicznej, zmniejszającej dokładność pozycjonowania modułu. Wobec tego, że zniekształcenia krzywej przestrzennej siły są niewielkie i znane są metody ich kompensacji, a także w związku z tym, że prędkość przemieszczania napędu okazuje się jednym z najważniejszych parametrów, wieloosiowe napędy krokowe, na bazie modułów indukcyjnych ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów stałych, znalazły szerokie zastosowanie w przemyśle.

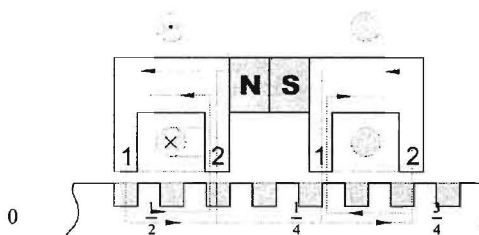
I. Analiza konstrukcji pozycjonera planarnego

Rezultaty wyżej przedstawionego rozumowania są podstawą do wyboru (w rozumieniu bazowych) indukcyjnego modelu ze wzbudzeniem od magnesów stałych. Same moduły elektromagnetyczne z magnesami stałymi mogą występować w różnych wariantach rozwiązań konstrukcyjnych, tj. według rozłożenia uzwojeń oraz magnesów.

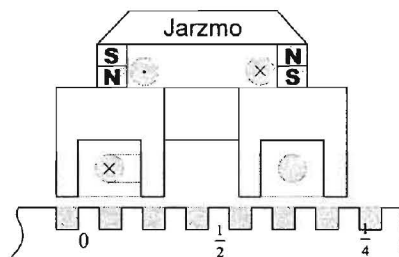
Główne realizacje konstrukcyjne przedstawiono na rysunkach (1 – 4) [7]. Schematy modułów elektromagnetycznych z górnym położeniem stałych magnesów wzbudzających (rys. 1, rys. 4) charakteryzują się tym, że każdy elementarny moduł, zawierający dwa Π – kształtowe magnetowody z uzwojeniami fazowymi na wystęпах zębów biegunów, wyposażony jest w dwa pionowo rozłożone magnesy wzbudzające, związane ze sobą jarzmem. Jeżeli każdy elementarny moduł zawiera uzwojenia dwóch faz, rozłożone na różnych Π – kształtowych biegunach nierozszczepialnie lub rozszczepialnie, to te elementarne moduły okazują się jednocześnie modułami fazowymi. Przy komutacji dwóch faz różnobiegunowymi impulsami prądu, albo prądami sinusoidalnymi z przesunięciem fazowym odpowiednio na $\omega t = \pi/2$, moduły fazowe samodzielnie przemieszczają się wzdłuż powierzchni zębów płyty induktora prostopadle w stosunku do nacięcia zębów.

Na rysunku 3 pokazano przykład modułu fazowego z liczbą faz $m=2$, składającego się z dwóch elementarnych modułów. W każdym z nich jest uzwojenie fazowe. Wzajemne przesunięcie zębów na każdym z biegunów jest określone w radianach (przykład rys. 3). Przejście od kąta φ radianów do realnej odległości x określone jest zależnością $x = \tau \cdot \frac{\varphi}{2\pi}$. Wariant modułu fazowego składającego się

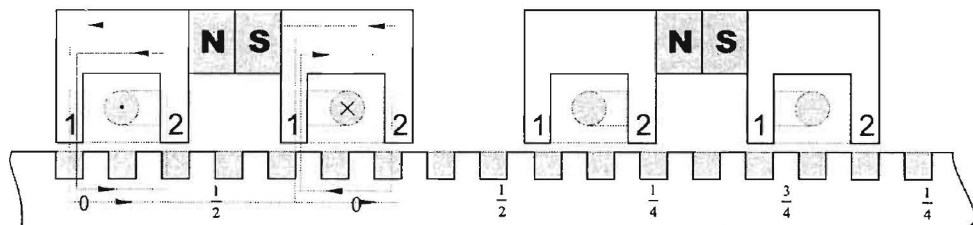
z dwóch elementarnych modułów z pojedynczym uzwojeniem fazowym każdy, jest bardziej dogodny niż wariant z dwoma uzwojeniami – również z punktu widzenia opłacalności ekonomicznej (używa się do produkcji miedzi). Przegrywa on jednak w przypadku, kiedy zależy nam na minimalizacji rozmiarów modułu wzdłuż osi przemieszczenia. Wyjaśnia to fakt, że rozmiary Π – kształtowych rdzeni mogą być optymalizowane według kryterium otrzymania maksymalnych właściwych wartości mocy i dobroci dynamicznej [5]. Wtedy, aby osiągnąć takie rozmiary, z pomocą konstrukcji (rys. 1, rys. 2), otrzymamy minimalne rozciągnięcie współrzędnościowego modułu wzdłuż osi przemieszczenia. Jeżeli chce się zbudować współrzędnościowy moduł na bazie konstrukcji z rys. 1, rys. 4, z tym właśnie rozciągnięciem, okaże się, że należy dwukrotnie skrócić rozmiar magnetowodu, co pociąga za sobą znaczne pogorszenie właściwych charakterystyk oraz wpływa na samą technologię produkcji.



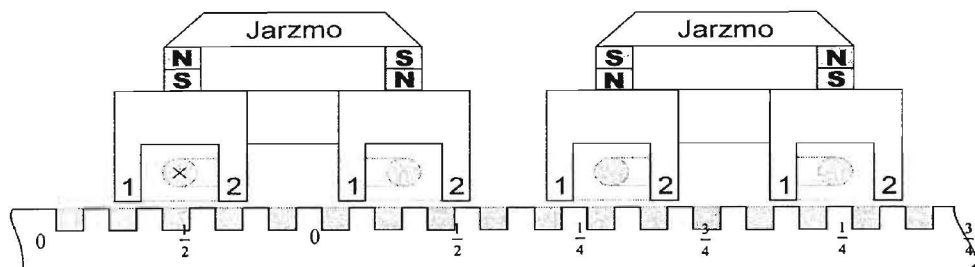
Rys. 1. Dwufazowy moduł z rozdzielającym magnesem



Rys. 2. Dwufazowy moduł z jarzmem



Rys. 3. Układ z jednofazowymi modułami rozdzielonymi magnesami



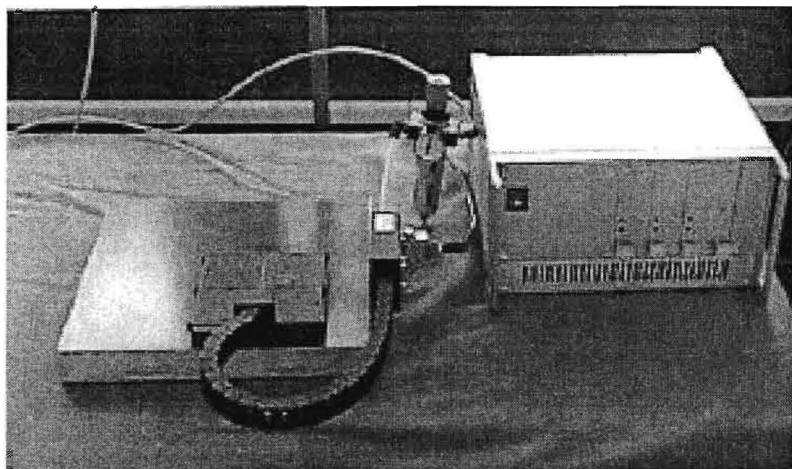
Rys. 4. Układ z jednofazowymi modułami z jarzmem

Konstrukcja elementarnych modułów fazowych z górnym rozłożeniem magnesów wzbudzających umożliwiła zastosowanie niedrogich magnesów. Jednocześnie rozmiar modułu (wysokość) jest w tym wypadku dostatecznie duży. Układy z jarzmem mają niewielkie zastosowanie. W związku z powyższym, najbardziej dogodna okazuje się konstrukcja z rozdzielającymi magnesami wzbudzenia (rys. 1, rys. 3).

Najlepsze masowo-gabarytowe charakterystyki osiągane są przy układzie z rozdzielającym rozłożeniem wysoko efektywnych magnesów o dużej energii. Właściwościami takimi odznaczają się magnesy wykonane ze stopów metali ziem rzadkich $SmCo$ i $FeNiBr$. Porównanie zalet i niedostatków konstrukcji modułów z rozdzielającym położeniem magnesów, prowadzi do następujących stwierdzeń [4]:

- rozstaw fazowych uzwojeń na zewnętrznych biegunach albo jarzmie magnetowodu pociąga za sobą wibracje pierwszej (głównej) harmonicznej krzywej przestrzennej siły ciągu, w zależności od podłączenia w danym momencie magnesu i uzwojeń fazowych; wobec tego, w krzywej przestrzennej siły ciągu widoczna jest druga składowa harmoniczna, co nieznacznie wpływa na dokładność pozycjonowania napędu,
- rozłożenie uzwojeń fazowych na wszystkich biegunach magnetowodu usuwa drgania amplitudy głównej harmonicznej przestrzennej krzywej siły ciągu, jednakowo wpływając również na drugą składową harmoniczną,
- moduł fazowy (rys. 3), składający się z dwóch elementarnych modułów z uzwojeniami fazowymi, obejmujący parami wewnętrzne bieguny magnetowodów, nie ma na ogół takich niedostatków; wobec tego moduł ten ma małe rozciągnięcie uzwojeń fazowych, co sprawia, że ekonomiczne staje się wykorzystanie miedzi i polepszają się możliwości zintensyfikowania elektromagnetycznych procesów przejściowych; do niedostatków tego typu konstrukcji można zaliczyć trudność stworzenia kompaktowych modułów współrzędnościowych.

Wobec tego, taka konstrukcja modułu współrzędnościowego z dwoma niezależnymi dwufazowymi modułami okazuje się właściwa z technicznego punktu widzenia do budowy układu tłumiącego mechaniczne drgania napędu przy postoju. W tym przypadku, w ciągu całego cyklu tłumienia, jeden z dwufazowych modułów wykorzystuje się jako indukcyjny sensor prędkości i według jego sygnałów przełącza się fazy modułu drugiego, który jest elementem regulowanym (obiektem) układu tłumienia.



Rys. 5. Fotografia planarnego pozycjonera wraz ze sterownikiem dla systemów laserowego formowania obiektów

Przeprowadzona analiza pozwala, w zależności od potrzeb zastosowania napędu, według parametru masowo-gabarytowego i dokładnościowych wskaźników, zasadnie wybrać typ elementarnych modułów fazowych, na bazie których można zbudować współrzędnościowe napędy planarne (rys.5).

Jeszcze jednym ważnym rezultatem prześledzenia różnych typów modułów elementarnych okazuje się możliwość stwierdzenia: ponieważ współrzędnościowy moduł, niezależnie od typu elementarnego modułu, odzwierciedla się przy pomocy zwiększania liczby tych modułów (w funkcji potrzebnej siły ciągu), optymalizacja modułu współrzędnościowego według głównych wskaźników (dobroć dynamiczna, właściwa siła ciągu) sprowadza się do optymalizacji jego zestawionych części, tj. elementarnego modułu [4].

2. Synteza programowych przesunięć na bazie rozwiązania odwrotnego zadania dynamiki

Ogólne założenie zadania syntezy programowego przemieszczania układu współrzędnościowego i przestrzennych mechanizmów [1], [3] sprowadza się do stwierdzenia: przesunięcie wielowspółrzędnościowego mechanizmu można opisać układem dyferencjalnych równań drugiego rzędu, otrzymanych z zasady Lagrange'a. W ogólnym ujęciu zapiszemy to w postaci:

$$\dot{X}_i = f_i(t, x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_r), \quad i = 1, n, \quad (1)$$

gdzie: $X = (x_1, \dots, x_n)$ – jest wektorem współrzędnych fazowych mechanizmu,
 $u = (u_1, \dots, u_r)$ – jest wektorem sterowania.

Układ opisany równaniem (1) zapisywany będzie w dalszej części rozważań w formie wektorowej:

$$\dot{X}_i = f_i(t, x, u), \quad i = 1, n \quad \text{lub} \quad \dot{X} = f(t, x, u), \quad (2)$$

gdzie: $f = (f_1, \dots, f_n)$ – wektor prawych części, a $\dot{X}$ – wektor lewych części.

Zadanie syntezy przesunięć wielowspółrzędnościowego mechanizmu znosi się do ustalenia sterowania $u = u(t, x)$, które spełnia niektóre techniczne wymagania $u \in U$ (U – zadany zbiór w R^n), i dla których odpowiada rozwiązanie równania $x = x(t)$ (1) spełniającego warunek:

$$\omega_k(t, x_1, \dots, x_n) = 0, \quad k = 1, m, \quad m \leq n \quad (3)$$

(lub $\omega_k(t, x) = 0, \quad k = 1, m$), innymi słowy – przesunięcie przebiega po krzywej lub powierzchni, opisanej równaniami (3). Zadanie syntezy programowych przesunięć można rozwiązywać niejednoznacznie, zadanie syntezy optymalnych przesunięć rozpatruje się, sprowadzając je do równania $u = u(t, x)$ opisującego przesunięcie (3) i sprowadzającego do minimum niektóre funkcjonały [1], [3]. Przykładowe zadanie syntezy optymalnego po prędkości programowego przesunięcia sprowadza do minimum kryterium:

$$J = t_1 \rightarrow \min, \quad (4)$$

na zbiorze rozwiązania układu (1), przy ograniczeniach fazowych:

$$x(0) = 0, \quad x(t_1) = x_1, \quad \omega_i(t, x) = 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (5)$$

Tak samo można rozpatrzeć zadanie z minimalną utratą zasobów sterowania:

$$J = \int \|u(t)\|^2 dt \rightarrow \min. \quad (6)$$

Dyferencjalne równania przesunięcia można przedstawić w postaci [1]:

$$\dot{x}_i = p_i(x_1, \dots, x_n) + b_i(x_1, \dots, x_n)u_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (7)$$

gdzie: $x = (x_1, \dots, x_n)$ – uogólnione współrzędne fazowe, $u = (u_1, \dots, u_n)$ – wektor sterowania.

Przepiszemy układ (7) do formy wektorowej:

$$\dot{x}_i = p_i(x) + u_i b_i(x), \quad i = \overline{1, m}. \quad (8)$$

Zadanie polega na zbudowaniu sterowania $u = u(t, x)$, takiego że $u \in R^n$, a odpowiadające jemu rozwiązanie układu (7) spełnia warunki dodatkowe:

$$\omega_k(t, x) = 0, \quad k = \overline{1, r}. \quad (9)$$

Jeżeli $x = x(t)$ jest rozwiązaniem (1) spełniającym (9), to $\omega_k(t, x(t)) \equiv 0$, $k = \overline{1, n}$ – skąd wynika warunek:

$$\frac{d}{dt} \omega_k(t, x(t)) \equiv 0, \quad k = \overline{1, r}, \text{ lub} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial \omega_k(t, x)}{\partial x_i} [p_i(x) + u_i b_i(x)] + \frac{\partial \omega_k}{\partial t}(t, x) \right\} \equiv 0,$$

przy założeniu, że $x = x(t)$ spełnia (9).

Ostatnie twierdzenie jest równoważne zależności:

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial \omega_k(t, x)}{\partial x_i} [p_i(x) + u_i b_i(x)] + \frac{\partial \omega_k}{\partial t}(t, x) \right\} = R_k(t, x, \omega_k), \quad k = \overline{1, r}, \quad (11)$$

gdzie R_k – dowolna funkcja taka, że $R_k(t, x, 0) \equiv 0$.

Podsumowując, można stwierdzić, że równanie (11) jest wystarczające dla realizacji programu (9) wzdłuż rozwiązania $x = x(t)$ układu (7) i może być wykorzystywane dla obliczenia potrzebnych oddziaływań sterujących $u_i = u_i(t, x)$, $i = \overline{1, n}$ [3].

Poprzez to, że $r \leq n$, układ (11) określa sterowanie niejednoznacznie. Zadanie to jest zadaniem minimalizacji warunkowej, którą rozwiązać można metodami bazującymi na nieoznaczonych współczynnikach Lagrange'a.

Algorytmy zbudowane na powyższych równaniach wykorzystano praktycznie budując oprogramowanie generujące trajektorie przemieszczeń precyzyjnych pozycjonerów, realizujących paraboloidalne przemieszczenia, niezbędnych w urządzeniach laserowych, używanych do produkcji oraz diagnozowania elementów elektroniki (kontrolery, chipy). Pełny opis zawarto w pozycji literaturowej [3].

Podsumowanie

Analiza napędów bezpośredniego działania pokazuje, że ich robocze charakterystyki w znacznym stopniu zależą od samej konstrukcji układu magnetycznego oraz od parametrów struktur zębowych (profilu i okresu z jakim są rozmieszczone zęby, ich niedokładność – krok). Okres struktury zębowej warunkuje dyskretność przemieszczenia, dobór układu sterowania. Wynosi on w precyzyjnych krokowych silnikach krokowych od 0,48 do 0,68 mm.

Przygotowanie mikrożłobków struktury zębowej w potrzebnej konfiguracji i z określoną dokładnością dla zapewnienia właściwych charakterystyk dynamicznych okazuje się głównym problemem technologicznym przy wykonaniu precyzyjnych liniowych silników krokowych. Należy przy tym zapewnić [4]:

- stosunek głębokości żłobka do połowki okresu zębowej struktury 0,8...1,1 (okres 0,48; 0,64),
- profil żłobka powinien być prostokątny lub trapezoidalny,
- sumaryczny błąd przy wykonaniu żłobków na roboczym polu statora i induktora nie może być większy niż 10 μm .

Odchyłka od płaskości oddziaływających powierzchni statora i induktora powinna być poniżej 5 μm , dla zapewnienia szczeliny powietrznej, mieszczącej się w przedziałach od 15...20 μm , przy minimalnych masach i maksymalnej mocy. Do wypełnienia żłobków zębowej struktury, w celu otrzymania płaskich roboczych powierzchni liniowego silnika krokowego, konieczny staje się dobór twardych komponentów, charakteryzujących się współczynnikiem liniowego rozszerzania bliskim materiałowi, z jakiego wykonany jest magnetowód.

Nowoczesna technologia wytwarzania liniowych silników krokowych powinna charakteryzować się uniwersalnością oraz elastycznością przy dostatecznie dużej produktywności, zapewniać otrzymanie zębowych struktur o różnych profilach

z wysoką dokładnością rozmiaru, jakością powierzchni w celu otrzymania stabilnych charakterystyk eksploatacyjnych.

Budując oprogramowanie i algorytmy generujące trajektorię planarnego systemu pozycjonującego wiązkę laserową, trzeba rozwiązać zadania sterowania, ze szczególnym uwzględnieniem ograniczeń stawianych przez sam laser impulsowy (50, 100Hz lub więcej). Klasyczne podejście z punktu widzenia teorii maszyn i mechanizmów nie jest wystarczające. Należy uwzględnić czas przejścia wiązki laserowej, który powinien się mieścić w takcie pracy samego lasera, bez względu na odległości między punktami. Jeśli rozpatrywać poziom dynamiczny, zadanie generowania trajektorii sprowadza się do analizy i syntezy odwrotnego zadania dynamiki, pozwalającego otrzymać wartości potrzebnych funkcji sterujących pozycjonerem planarnym [1].

Rozwiązanie tych złożonych zadań technologicznych potrzebowało badań naukowych, inżynierskich opracowań oraz przeprowadzania wielu eksperymentów. Pozwoliło to na otrzymanie wysokiej jakości nowoczesnych urządzeń na bazie współrzędnościowych układów pozycjonujących dla laserowych systemów formowania, mikroelektroniki.

Literatura

1. Trochimeczuk R., Karpowicz S.E.: *Rozwiązywanie zadań generowania trajektorii dla trzysosiowego systemu pozycjonującego wiązkę lasera impulsowego*, Teoria maszyn i mechanizmów: XIX Konferencja Naukowo-Dydaktyczna, Wydaw. Instytutu Technologii Eksploatacji, Kraków, 2004.
2. Trochimeczuk R., Karpowicz S.E.: *Wybrane aspekty formowania obiektów 3D w szkle i innych przezroczystych dielektrykach za pomocą lasera*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn nr 10, Wydawnictwo PB, 2002.
3. Jakowluk A., Karpovich S.E., *Algorytmization of mathematical models for non-holomic constraints system and nonlinear mechanics in the biaxial stress states of solid bodies*, Białystok Technical University, Białystok, 1998.
4. Karpovich S.E., Żarski W.W., Ljaszuk J.F., Mierzyński J.M.: *Precyzyjnyje koordinatnyje sistemy na osnovie elektropriwoda prjamogo dejstwa*, GNPKTМ „Planar”, Mińsk, 2001.
5. Karpovich S.E., Rusieckij A.M., Ljaszuk J.F., Matjuszko W.E.: *Optymizacjonnoje projektirowanie precyzyjnych koordinatnyh sistem i mechaniz-mow oborudowania proizvodstva elektronnoj techniki*, NPO „INTEGRAL”,

Mińsk 1999.

6. Karpovich S.E., Mierzyński J.: *Design aspects of flexible manufacturing systems with linear stepping motors*, Proceedings of 41th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, Germany, 1996.
7. Dostanko A.P., Tolochko N.K., Karpovich S.E.: *Technology and technique of precise laser modification of solid-state structures*, Technoprint, Mińsk, 2002.

PLANAR POSITIONING SYSTEM FOR LASER FORMING 3D OBJECTS INSIDE GLASS

Abstract: The article presents analysis of construction (the advantages and inconvenience of existing solutions) planar positioning system of laser beam. The method of synthesis of program moving based of inverse dynamics has been presented. In summary some talk about peculiars of technology of production planar positioning system has been elaborated.

Keywords: planar servomotor, laser system for forming 3D objects in glass , the synthesis of program shifts, the trajectory generating

Wykonano w ramach pracy statutowej Katedry Mechatroniki nr S/WM/2/03