

Redaktor naukowy:

prof. nzw. dr hab. inż. Paweł Lindstedt

Recenzenci:

dr hab. inż. Sylwester Kłysz, prof. UW-M – 5, 8

prof. dr hab. inż. Jerzy Manerowski – 6, 9, 11, 12, 15

prof. zw. dr hab. inż. Stefan Szczeciński – 1, 2, 3, 4

prof. dr hab. inż. Janusz Terpiłowski – 13, 14

dr hab. inż. Józef Żurek, prof. ITWL – 7, 10

Opracowanie redakcyjne:

Jadwiga Żukowska

Skład i łamanie:

Autorzy

© Copyright by Politechnika Białostocka 2006

ISSN 1731-0776

Druk:

Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej

Nakład: 100 egz.

## Spis treści

1. Gosiewski Z., Energooszczędne łożyska magnetyczne.....	7
2. Gosiewski Z., Mystkowski A., Sterowanie odporne układem łożysk magnetycznych w maszynach wirnikowych .....	25
3. Gosiewski Z., Falkowski K., Piskur P., Zastosowanie tablic Halbacha w maszynach elektrycznych ruchu liniowego i obrotowego .....	41
4. Gosiewski Z., Żokowski M., Sterowanie ślizgowe aktywnego łożyska magnetycznego .....	57
5. Gryniewski Ł., Derlatka M. Pomiar natężenia poziomu sygnału sieci komórkowej za pomocą modułu GSM-GPRS .....	71
6. Kamiński G., Szczypior J. Analiza konstrukcji maszyn elektrycznych stosowanych w kinematycznych magazynach energii .....	81
7. Lindstedt P., Diagnostyka w systemie eksploatacji obiektów technicznych	97
8. Makowska I., Kwieciński R., Derlatka M. Projekt ekspertowego systemu diagnostycznego silnika samochodowego .....	111
9. Ostapkowicz P., Opis i przyczyny stanów awaryjnych rurociągów przesyłowych z wyciekami .....	125
10. Ostapkowicz P., Rurociągi przesyłowe, ich otoczenie i proces tłoczenia w aspekcie diagnozowania wycieków .....	137
11. Piłat A., Porównanie metod linearyzacji i sterowania liniowo-kwadratowego dla aktywnego łożyska magnetycznego .....	153
12. Piróg S., Elektromechaniczne magazyny energii .....	175
13. Poskrobko S., Łach J., O termicznej utylizacji odpadów opakowaniowych	197
14. Poskrobko S., Łach J., Woroniak G., Charakterystyka paliwa z odpadów celulozowo-papierniczych .....	221
15. Trochimeczuk R., Gawrysiak M., Mechatroniczne ujęcie komponentów stanowiska do laserowego grawerowania szkła .....	235

## Contents

1. Gosiewski Z., ENERGY-SAVING MAGNETIC BEARINGS .....	24
2. Gosiewski Z., Mystkowski A., ROBUST CONTROL OF MAGNETIC BEARINGS IN ROTATING MACHINERY .....	39
3. Gosiewski Z., Falkowski K., Piskur P., HALBACH ARRAYS IN LINEAR AND ROTARY ELECTRIC MACHINE .....	55
4. Gosiewski Z., Żokowski M., SLIDING-MODE CONTROL OF SINGLE-AXIS MAGNETIC BEARING .....	70
5. Gryniewski Ł., Derlatka M. MEASUREMENT OF SIGNAL LEVEL IN CELLULAR NETWORK BY MEANS OF GSM-GPRS MODULE .....	80
6. Kamiński G., Szczyplior J. AN ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINES CONSTRUCTIONS APPLIED IN FLYWHEEL ENERGY STORAGE DRIVE.....	96
7. Lindstedt P., DIAGNOSTICS IN SYSTEM OF EXPLOITATION OF TECHNICAL OBJECTS .....	99
8. Makowska I., Kwieciński R., Derlatka M. PROJECT OF CAR ENGINE DIAGNOSTICS EXPERT SYSTEM.....	124
9. Ostapkowicz P., DESCRIPTION AND CAUSES OF FAILURE STATES OF TRANSMISSION PIPELINES WITH THE LEAKAGES ...	137
10. Ostapkowicz P., TRANSMISSION PIPELINES, THEIR ENVIRONMENT AND RUN OF PUMPING PROCESS, IN ASPECT OF LEAK DETECTION.....	151
11. Piłat A., COMPARISON OF LINEARIZATION METHODS AND LQ CONTROL STRATEGY APPLIED TO ACTIVE MAGNETIC BEARING.....	173
12. Piróg S., THE ELECTROMECHANICAL ENERGY STORAGE .....	195
13. Poskrobko S., Łach J., ON THERMAL UTILIZATION OF PACKAGE MATERIALS WASTE .....	220
14. Poskrobko S., Łach J., Woroniak G., CHARACTERISTICS OF FUEL FROM PULP- AND PAPER WASTE .....	234
15. Trochimeczuk R., Gawrysiak M., MECHATRONIC APPROACH TO COMPONENTS OF LASER ENGRAVE SYSTEM OF GLASS .....	244

Zdzisław GOSIEWSKI\*

## ENERGOOSZCZĘDNE ŁOŻYSKA MAGNETYCZNE

**Streszczenie:** W celu wyznaczenia energii elektrycznej zużywanej przez łożysko magnetyczne wykorzystano model matematyczny łożyska jedno-osiowego, czyli łożyska sterującego ruchem wirnika w kierunku wybranej osi układu współrzędnych. Dla tego modelu wyznaczono wartość mocy elektrycznej służącej do zapewnienia poprawnej pracy łożyska.

Omówiono kierunki badań, które realizuje zespół badawczy Politechniki Białostockiej i które powinny doprowadzić do opracowania energooszczędnych łożysk magnetycznych. Porównane są zalety i wady homopolarnych i heteropolarnych łożysk magnetycznych. Opisano wpływ obniżenia punktu pracy na charakterystyki układu zamkniętego. Zaproponowano wprowadzenie metod sterowania nieliniowego a mianowicie sterowania odpornego i sterowania ślizgowego. Pokazano możliwości wytwarzania łożysk z dodatnią sztywnością w punkcie pracy.

**Słowa kluczowe:** łożysko homopolarne, punkt pracy, kinetyczny zasobnik energii, sztywność dodatnia.

### 1. Wprowadzenie

Małe zużycie energii przez parę kinematyczną łożysko magnetyczne–wirnik jest jedną z zasadniczych korzyści, jaka wynika z zastosowania łożysk magnetycznych (Gosiewski Z., Falkowski K., 2003). Wynika to z braku kontaktu mechanicznego pomiędzy wałem a kadłubem maszyny wirnikowej, a tym samym braku tarcia mechanicznego. Energia zużywana przez elektromagnesy łożysk magnetycznych jest ponaddziesięciokrotnie mniejsza niż energia tracona na pokonanie tarcia w klasycznych łożyskach zarówno ślizgowych jak i tocznych. To nie oznacza, że powinniśmy na tych poprzestać. Istnieją dalsze możliwości zmniejszenia zużycia energii poprzez łożyska magnetyczne, o tym będzie mowa w niniejszym artykule. Zwłaszcza w odniesieniu do łożysk stosowanych w kinetycznych akumulatorach

---

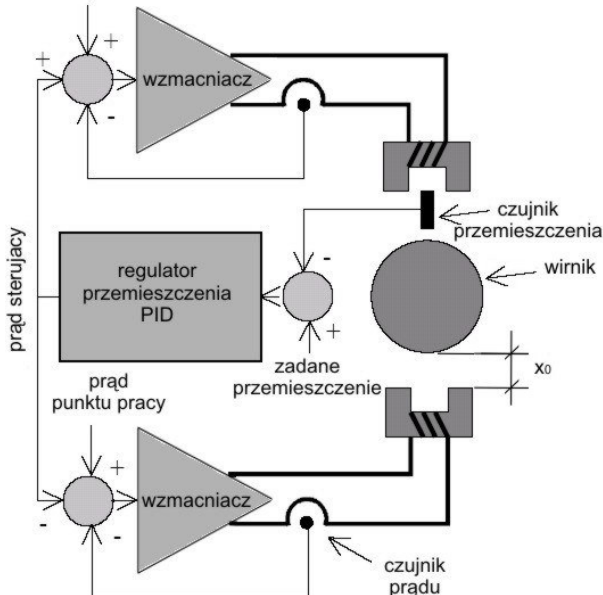
\* Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki,  
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok.



energii (Sivrioglu S., Nonami K., 2004), rozwiązań energooszczędnych poszukuje się.

## 2. Model matematyczny siłownika elektromagnetycznego

W celu wyznaczenia energii elektrycznej zużywanej przez łożysko magnetyczne zbudowano model matematyczny łożyska jednoosiowego, czyli łożyska sterującego ruchem wirnika w kierunku wybranej osi układu współrzędnych, jak to przedstawiono na rys. 1. Na schemacie (rys. 1) przedstawiono układ sterowania prądowego, gdyż sygnałami sterującymi są sygnały natężenia prądu. W tym wypadku wzmacniacze mocy mają dodatkową pętlę sprzężenia (na rys 1 - od mierzonego prądu), która zapewnia natychmiastowy prąd sterujący. Gdy tej pętli nie ma, to jest wariant sterowania napięciowego – w tym wypadku regulator powinien być regulatorem typu predykcyjnego, aby skompensować opóźnienia wywołane wolniejszym narastaniem prądu w uzwojeniach cewek.



**Rys. 1.** Schemat jednoosiowego układu sterowania łożyskiem magnetycznym z regulatorem PID (proporcjonalno-całkująco-różniczkującym)

Wirnik znajduje się pomiędzy dwiema sterowanymi cewkami elektromagnesów łożyska magnetycznego. W położeniu środkowym szczelina pomiędzy wirni-

kiem a stojaniem wynosi  $x_o$ . Przemieszczenie wirnika z położenia środkowego oznaczamy jako zmienną  $x$ .

Dynamika wirnika, zredukowanego do masy punktowej  $m$  w płaszczyźnie łożysk, opisana jest następującym równaniem (Gosiewski Z., 2004):

$$m\ddot{x} = F_2 - F_1 + F_z, \quad (1)$$

gdzie:  $F_1$  i  $F_2$  są siłami generowanymi przez górny i dolny elektromagnes,  $F_z$  jest zewnętrzną siłą zaburzającą, np. od niewyważenia wirnika, jego ciężaru, sił aerodynamicznych, itd. Siły generowane w polu elektromagnetycznym zależą od stałych  $K_1$ ,  $K_2$ , położenia wirnika i od prądów  $I_1$  i  $I_2$  płynących w elektromagnesach:

$$F_1 = \frac{K_1}{4} \left( \frac{I_1}{x_o - x} \right)^2, \quad F_2 = \frac{K_2}{4} \left( \frac{I_2}{x_o + x} \right)^2. \quad (2)$$

W układzie sterowania prądowego używa się prądu sterującego  $i = (I_1 - I_2)/2$  i prądu punktu pracy  $i_o = (I_1 + I_2)/2$ . Po linearyzacji powyższych sił w punkcie pracy, określonym przez parametry:  $x_o$ ,  $i_o$  równanie (1) można zapisać w postaci:

$$m\ddot{x} = k_s x + k_i i + F_z, \quad (3)$$

gdzie:  $k_s = \frac{K}{2} \frac{i_o^2}{x_o^3} = L_o \frac{i_o^2}{x_o^2}$ ,  $k_i = \frac{K}{2} \frac{i_o}{x_o^2} = L_o \frac{i_o}{x_o}$  są odpowiednio sztywnością przemieszczeniową i sztywnością prądową łożyska magnetycznego w układzie otwartym.

Napięcia  $u_1$  i  $u_2$  w obwodach elektromagnesów opisane są następującymi równaniami różniczkowymi:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 I_1 + L_1 \frac{d}{dt} I_1 + \frac{K_1}{2} \frac{d}{dt} \left( \frac{I_1}{x_o - x} \right), \\ u_2 &= R_2 I_2 + L_2 \frac{d}{dt} I_2 + \frac{K_2}{2} \frac{d}{dt} \left( \frac{I_2}{x_o + x} \right), \\ I_1 &= i_o + i, \quad I_2 = i_o - i, \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:  $R_1$ ,  $R_2$  – reluktancja cewek,  $L_1$ ,  $L_2$  – indukcyjność cewek, przy czym  $L_1 = c_1 / (x_o + x)$ ,  $L_2 = c_2 / (x_o - x)$ . Dla jednakowych cewek można przyjąć:

$K_1=K_2=K$ ,  $R_1=R_2=R$ ,  $c_1=c_2=c$ . W wyniku linearyzacji w punkcie  $x_o$  otrzymamy następujące zależności na napięcia w cewkach:

$$\begin{aligned} u_1 &= RI_1 + L_1 \dot{I}_1 + I_1 \frac{dL_1}{dt} \dot{x}, \\ u_2 &= RI_2 + L_2 \dot{I}_2 + I_2 \frac{dL_2}{dt} \dot{x}, \end{aligned} \quad (5)$$

Pierwsze z równań (5) pomnożymy przez  $I_1$ , natomiast drugie - przez  $I_2$ . Po dodaniu ich do siebie otrzymamy zależność na moc pobieraną przez obie cewki:

$$\begin{aligned} P &= I_1 u_1 + I_2 u_2 = \\ &= R(I_1^2 + I_2^2) + (L_1 I_1 \dot{I}_1 + L_2 I_2 \dot{I}_2) + (I_1^2 \frac{dL_1}{dt} + I_2^2 \frac{dL_2}{dt}) \dot{x} \end{aligned} \quad (6)$$

We wzorze na moc występuje suma kwadratów prądów płynących w cewkach. Warto zauważyć, że:

$$I_1^2 + I_2^2 = (i_o + i)^2 + (i_o - i)^2 = i_o^2 + i^2. \quad (7)$$

Tym samym można dojść do konkluzji, że moc, w pewnym przybliżeniu, jest proporcjonalna do sumy kwadratów prądu punktu pracy i prądu sterującego.

Zużyta energię elektryczną znajdziemy przez całkowanie po czasie wyrażenia na moc:

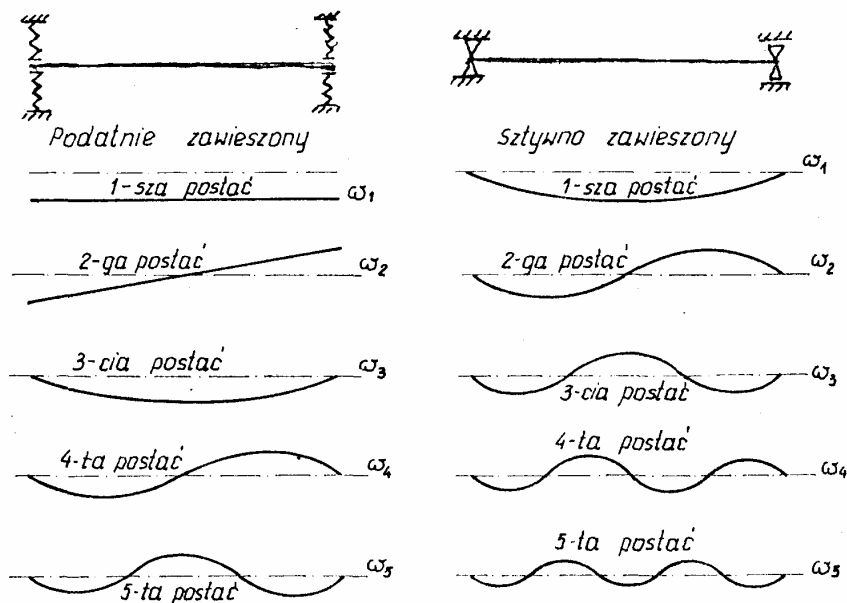
$$E = \int_0^t P d\tau. \quad (8)$$

Z powyższych wyrażeń widzimy, że zarówno moc jak i energia zależą przede wszystkim od prądu płynącego przez cewki. Natomiast prądy płynące w cewkach są złożeniem prądu punktu pracy i prądu sterującego. Dalsze rozważania będą dotyczyć sposobu zmniejszenia tych składowych prądu.

### 3. Sterowanie drganiami maszyn wirnikowych

W przestrzeni kartezyjskiej, podobnie jak dla modelu w przestrzeni stanu, można zbudować układ sterowania modalnego składający się z podukładów, z których każdy steruje drganiami jednej postaci drgań. W wypadku wirnika można, w zależności od sztywności podpór, otrzymać model składający się z postaci

giętych (sztywne podpory) lub model składający się z postaci wirnika sztywnego i postaci giętych (podatne podpory), jak to pokazano na rys.2.



Rys. 2. Postacie drgań wirnika w wypadku podatnych i sztywnych podpór łożyskowych.

Zawieszenie wirnika w łożyskach magnetycznych jest zawieszeniem podatnym. W tym wypadku dla małych prędkości obrotowych dominują postacie wirnika sztywnego (translacyjna i rotacyjna). Ponieważ dla każdej z postaci konstruuje się sterowanie indywidualnie, to jako punkt wyjścia bierze się równanie jednej z postaci drgań (pomija się indeksy numerujące postacie):

$$m\ddot{x} + kx = f(t) \quad (9)$$

gdzie:  $m$  - masa modalna,  $k$  - współczynnik sztywności modalnej,  $f$  - modalna siła sterująca. Częstotliwość własna układu wynosi:  $\omega = \sqrt{k/m}$ . Wprowadza się prawo sterowania typowe dla regulatora PD (proporcjonalno-różniczkującego):

$$f(t) = gx(t) + h\dot{x}(t), \quad (10)$$

które daje następującą dynamikę układu zamkniętego:

$$m\ddot{x} - h\dot{x} + (k - g)x = 0. \quad (11)$$

Rozwiązanie powyższego równania jest następujące:

$$x(t) = e^{-\alpha t} \left( x_o \cos \beta t + \left( \frac{\dot{x}_o + \alpha x_o}{\beta} \right) \sin \beta t \right), \quad (12)$$

gdzie:  $\alpha$  – współczynnik tłumienia drgań,  $\beta$  – częstotliwość drgań sterowanych,  $x_o$  – początkowe przemieszczenie,  $\dot{x}_o$  – początkowa prędkość. Pomiędzy parametrami regulatora ( $g, h$ ), parametrami obiektu ( $m, k$ ) i parametrami dynamicznymi ( $\omega, \alpha, \beta$ ) zachodzą następujące związki:

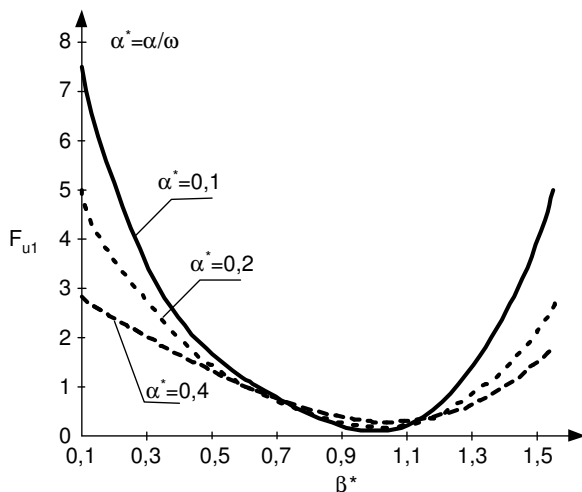
$$\begin{aligned} g &= -m(\alpha^2 + \beta^2 - \omega^2), \\ h &= -2\alpha m. \end{aligned} \quad (13)$$

W powyższych równaniach parametr  $\omega$  opisuje dynamikę obiektu, podczas gdy parametry:  $\alpha, \beta$  opisują dynamikę układu zamkniętego. Jeśli te parametry są znane, to stosując powyższe wzory obliczymy współczynniki wzmocnienia regulatora.

Zachodzi pytanie o najlepsze (optymalne) wartości parametrów  $\alpha$  i  $\beta$ . Parametr  $\alpha$  charakteryzuje szybkość zanikania procesu przejściowego, zatem ten parametr jest przedmiotem szczególnego zainteresowania. Parametr  $\beta$  mógłby być dowolny, ale ma wpływ na siłę sterującą, czyli na zużycie energii przez układ sterowania. Wprowadzimy wskaźnik jakości, którego minimalizacja przyniesie najmniejszą siłę sterującą:

$$F_{u1} = \int_0^{\infty} f^2(t) dt \quad (14)$$

Optymalizację przeprowadzono dla stałych wartości  $\alpha$ , przy zmieniającym się  $\beta$ . Na potrzeby obliczeń wprowadzono bezwymiarowe wielkości:  $t^* = \omega t$ ,  $\alpha^* = \alpha/\omega$ ,  $\beta^* = \beta/\omega$ . Rezultaty obliczeń dla warunków początkowych:  $x(0) = x_o$ ,  $\dot{x}(0) = 0$  pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Siła sterująca w funkcji wybranych parametrów

Z numerycznej analizy wyrażenia na siłę sterującą wynikają następujące wnioski.

1. Siła sterująca jest bliska minimum, jeśli częstotliwość  $\beta$  układu zamkniętego jest równa częstotliwości  $\omega$  układu otwartego
2. Jeśli częstotliwości  $\beta$  są bliskie częstotliwości  $\omega$ , to wartość siły sterującej rośnie wraz ze wzrostem  $\alpha$ . Jeśli częstotliwość  $\beta$  znajduje się wystarczająco daleko od częstości  $\omega$ , to wartość siły sterującej spada wraz ze wzrostem  $\alpha$ .

Dla przypadku  $\beta=\omega$  otrzymamy prawo sterowania, które nazwiemy naturalnym prawem sterowania:

$$f(t) = -2\alpha m\dot{x}(t) - \alpha^2 m x(t) \quad (15)$$

Zauważmy, że naturalne prawo sterowania nie zależy od współczynnika sztywności, lecz jedynie od masy układu. Tym samym można sterować układami o różnej sztywności przy pomocy tego samego prawa sterowania.

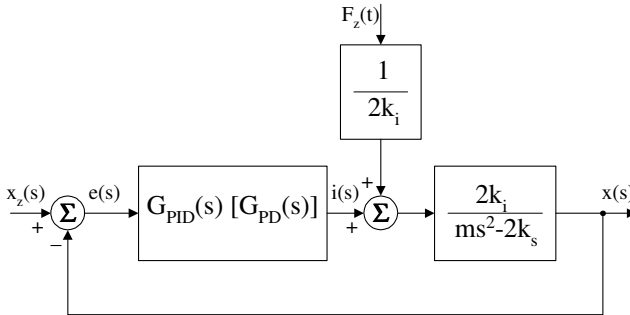
#### 4. Zastosowanie łożysk magnetycznych do sterowania drganiami

Powyższe wnioski można łatwo potwierdzić zajmując się łożyskami magnetycznymi sterowanymi prądowo z regulatorem typu PD.

Funkcja przejścia jednoosiowego aktywnego łożyska magnetycznego jako obiektu sterowanego prądowo opisana jest następującą zależnością (Gosiewski Z., Falkowski K., 2003) w dziedzinie zmiennej zespolonej  $s$ :

$$x(s) = \frac{2k_i}{ms^2 - 2k_s} i(s) + \frac{1}{ms^2 - 2k_s} F_z(s), \quad (16)$$

gdzie przypomnijmy:  $k_i$ ,  $k_s$  - sztywność prądowa i przemieszczeniowa aktywnego łożyska magnetycznego,  $m$  - masa łożyskowanego elementu,  $i(s)$  - prąd sterujący,  $F_z(s)$  - siła wytrącająca masę z położenia równowagi,  $x(s)$  - przemieszczenie masy z punktu pracy. Zauważmy, że transmitancja tego obiektu ma dwa bieguny rzeczywiste o tych samych wartościach, lecz o przeciwnych znakach. Wirnik w łożyskach sterowanych prądowo jest więc obiektem niestabilnym, gdyż zawsze jeden z dwóch rzeczywistych biegunów będzie dodatni.



**Rys. 4.** Model aktywnego zawieszenia magnetycznego sterowanego prądowo z regulatorem PID lub PD

Zastosujmy regulator PD:

$$i(s) = G_{PD}(s)e(s) = [k_p + k_d s] e(s), \quad (17)$$

gdzie:  $k_d$  - wzmocnienie części różniczkującej,  $k_p$  - wzmocnienie części proporcjonalnej,  $e(s)$  - uchyb sterowania. Uchyb sterowania  $e(s)$  jest równy różnicy pomiędzy zadaniem przemieszczeniem  $x_z(s)$  i przemieszczeniem rzeczywistym  $x(s)$ . Najczęściej zadana wartość położenia wynosi zero:  $x_z(s) = 0$ , a więc:  $e(s) = -x(s)$ .

Po uwzględnieniu zależności (17) transformata odpowiedzi układu zamkniętego z regulatorem PD przyjmie postać:

$$x(s) = \frac{\frac{1}{m}}{s^2 + \frac{2k_i k_d}{m}s + \frac{2k_i k_p - 2k_s}{m}} F_z(s) = \frac{1}{ms^2 + ds + k} F_z(s), \quad (18)$$

Układ zamknięty z regulatorem PD opisany jest funkcją przejścia (18), której równanie charakterystyczne ma dwa pierwiastki (bieguny). Zgodnie z założeniami (metoda przesuwania biegunów) bieguny te powinny mieć wartość:  $p_{1,2} = -\omega_n \zeta \pm i\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ , gdzie:  $\omega_n$  - częstotliwość drgań własnych, która dla rozpatrywanej wartości tłumienia  $\zeta$  i czasu regulacji  $t_r$  wynosi:  $\omega_n = \frac{3.2}{t_r \zeta}$ .

Położenie biegunów układu zamkniętego zależy więc od czasu regulacji  $t_r$  oraz od bezwymiarowego współczynnika tłumienia  $\zeta$ . Znając zadane wartości biegunów układu zamkniętego  $p_1$  i  $p_2$  można wyznaczyć wartości nastaw regulatora PD, które wynoszą:

$$k_d = \frac{(-p_1 - p_2)m}{2k_i}, \quad k_p = \frac{p_1 p_2 m + 2k_s}{2k_i}. \quad (19)$$

Wymagane prawo sterowania dla regulatora PD podano zależnością (17). Porównując je z zależnością (21) otrzymamy:

$$k_d = \frac{d}{k_i}, \quad k_p = \frac{k + k_s}{k_i}. \quad (20)$$

Działanie proporcjonalne regulatora  $k_p$  jest proporcjonalne do różnicy pomiędzy zadaną sztywnością układu zamkniętego  $k$  a sztywnością obiektu. Ponieważ sztywność obiektu ma wartość ujemną, to różnica w związku (20) zamieniła się w sumę. To oznacza, że podstawową funkcją działania proporcjonalnego regulatora PD jest stabilizacja obiektu, czyli znaczące przesunięcie biegunów, co zgodnie z powyższymi rozważaniami jest kosztowne energetycznie. Zauważmy, że gdyby sztywność była dodatnia, znak w wyrażeniu (20) zmieniłby się na ujemny i regulator zużywałby znacznie mniej energii. Najlepszy jest ten przypadek, gdy nie potrzeba zmieniać sztywności układu, czyli  $k = k_s$ . Wówczas  $k_p = 0$ . Sztywność układu otwartego zależy od wyboru punktu pracy, co będzie przedmiotem rozważań w kolejnym rozdziale.

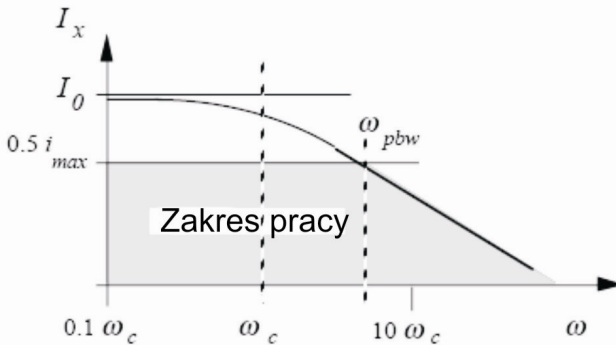
Jeśli chodzi o tłumienie, to zazwyczaj wprowadza się je w takim zakresie, aby układ był zbliżony do optymalnego, czyli aby przeregulowanie wynosiło około 20%. Naturalne tłumienie ruchu wirnika, np. w wyniku tarcia o otaczające powietrze, zmniejsza wymagania energetyczne części różniczkującej regulatora. Nieste-



ty, w przypadku kinetycznego magazynu energii wirnik wiruje w warunkach głębokiej próżni. Tym samym tu nie można uniknąć wydatku energetycznego.

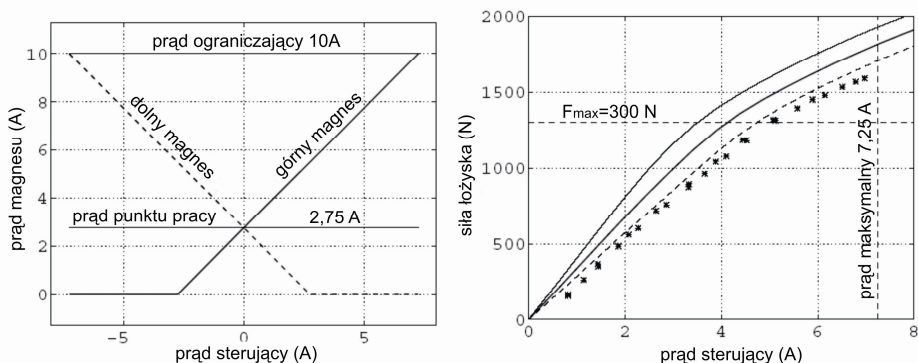
## 5. Punkt pracy

Jak pokazano na rys. 1, przed wejściem do wzmacniacza zadany sygnał sterujący sumuje się z sygnałem punktu pracy (bias). Wzmacniacze generują więc prądy proporcjonalne do tych sygnałów  $I_1 = i_o + i$ ,  $I_2 = i_o - i$ . W wielu rozwiązaniach światowych przyjmuje się, że maksymalna wartość prądu punktu pracy  $i_{max}$  jest równa połowie wartości prądu nasycenia, to jest takiego prądu, który wprowadza strumień magnetyczny w stan nasycenia (rys. 5). W większości materiałów miękkich magnetycznie nasycenie ma miejsce przy strumieniu wynoszącym 1.2-2 [tesla]. Dla takiego rozwiązania mamy zawsze  $i_o \geq i$ , czyli prąd sterujący jest mniejszy od prądu punktu pracy. Energia generowana przez prąd punktu pracy jest energią traconą na uzyskanie ujemnej sztywności układu otwartego. Z kolei ujemna sztywność, jak to wcześniej wyjaśniono, wymaga dodatkowej energii na sterowanie. Powstaje pytanie, czy potrzebny jest punkt pracy?



Rys. 5. Statyczny i dynamiczny zakres pracy wzmacniacza

Rozpatrzmy przypadek (Antila M., 1998; Lantto E., 1999), w którym zmniejszono wartość prądu punktu pracy (rys.6). W tym przypadku prąd nasycenia wynosi 10 [A], gdy tymczasem prąd punktu pracy:  $i_o = 2.75 < 5$ [A]. (patrz rysunek z lewej strony).



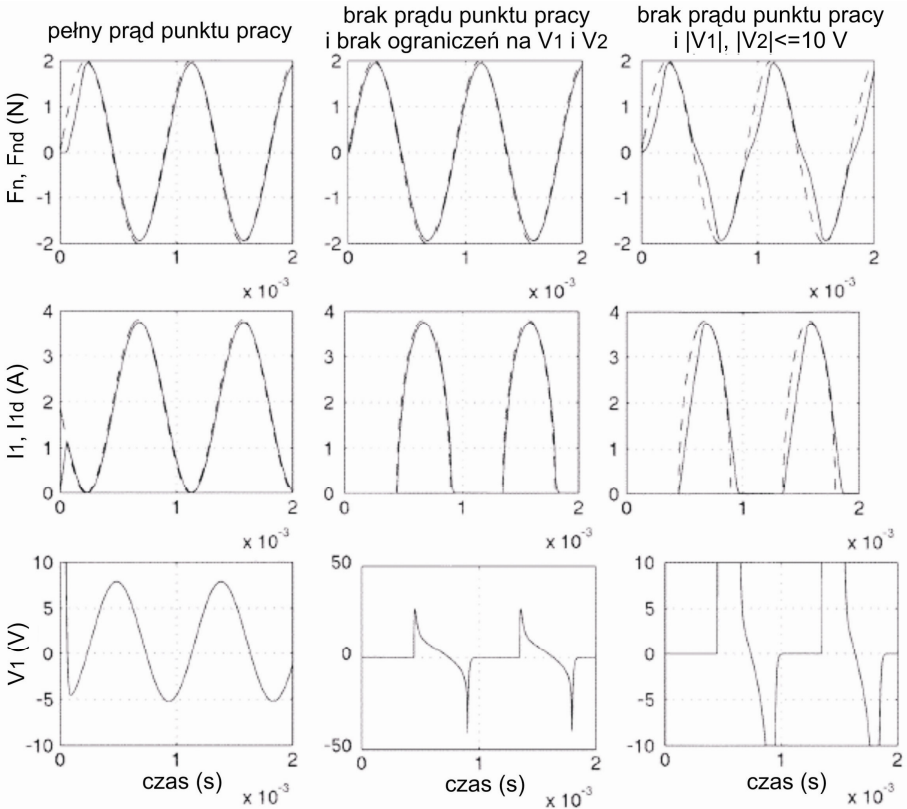
**Rys. 6.** Prądy w górnym i dolnym elektromagniesie (wykres z lewej strony) oraz charakterystyka siły łożyskowej w funkcji prądu sterującego (wykres z prawej strony) (Antila M., 1998).

Jakie są skutki takiego rozwiązania? Po pierwsze, skutkuje to niższą sztywnością układu, a więc mniejszą wartością zarówno współczynnika sztywności przemieszczeniowej jak i współczynnika sztywności prądowej. Po drugie, w zakresie wysokich wartości prądu sterującego charakterystyki siła generowana przez łożysko–prąd sterujący (prawy rysunek) stają się silnie nieliniowe. Wymaga to stosowania nieliniowych metod sterowania. Gdy prąd punktu pracy stanowi połowę prądu nasycenia, to łożyska praktycznie działają w zakresie liniowym, co w sposób istotny upraszcza prawa sterowania.

Zauważmy, że również w tym wypadku zmniejszamy pasmo przenoszenia prądu sterującego. Prąd punktu pracy  $I_o$  jest stały (a więc ma częstość działania  $\omega=0$ , co pokazano na rys. 5). Zaczernione pasmo na tym rysunku reprezentuje dynamiczny zakres prądów sterujących. Większa wartość prądu punktu pracy obniża wartość prądów sterujących, a tym samym rozszerza ich liniowy zakres w dziedzinie częstotliwości.

Idący dalej kolejny przypadek, gdzie zrezygnowano całkowicie z prądu punktu pracy  $I_o=0$ , był rozważany w pracy (Hu T. i inni, 2004). Wyniki tych rozważań, wykonane na bazie symulacji komputerowych, przedstawione są na rys. 7. Pierwsza kolumna wykresów dotyczy przypadku układu łożyskowego z prądem punktu pracy. Siła  $F_{nd}=F_1-F_2$  jest to siła kompensująca zadaną sinusoidalną siłą wymuszającą  $F_z$ .  $F_n$  jest siłą uzyskaną z prądów generowanych przez wzmacniacze. Pozostałe wykresy w tej kolumnie dotyczą prądów i napięć. Warto zauważyć ich gładki przebieg z małymi amplitudami. W tym przypadku można korzystać ze wzmacniaczy o małych mocach.

Pozostałe dwie kolumny wykresów dotyczą przypadku, w którym przyjęto zerowy prąd punktu pracy, przy czym środkowa kolumna rozważana jest dla przypadku braku ograniczeń na moc wzmacniaczy, natomiast ostatnia kolumna dotyczy wzmacniaczy z ograniczeniem napięcia do 10[V]. W tym ostatnim przypadku układ nie jest w stanie wygenerować odpowiednich sił sterujących, co w niektórych przypadkach może prowadzić do niestabilności zawieszenia magnetycznego.

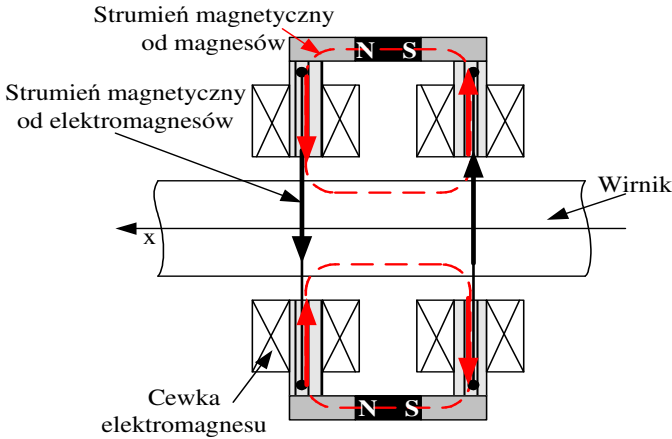


**Rys. 7.** Porównanie obciążeń prądowych i napięciowych wzmacniaczy dla przypadku układu z dużym prądem punktu pracy i układu z zerowym prądem punktu pracy (Hu T. i inni, 2004)

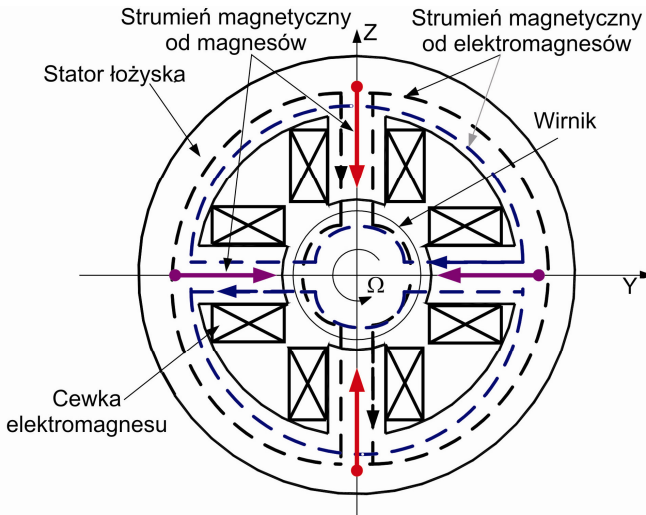
## 6. Łożyska homopolarne

Kolejnym rozwiązaniem są łożyska homopolarne (rys 8 i 9). W tych łożyskach punkt pracy generują magnesy trwałe, tworzące oddzielny obwód magnetyczny (Gosiewski Z., Falkowski K., 2003). Ponieważ w łożyskach homopolarnych

magnesy trwałe działają w trybie przyciągania, to generują one ujemną sztywność tych łożysk w układzie otwartym. Ten sposób działania jest podyktowany łatwym ukierunkowaniem strumienia magnetycznego i stosunkowo łatwymi ich obliczeniami. Jednak, w wypadku przyciągania, nie ma przede wszystkim siły tangencjalnej (prostopadłej), powodującej silne odpychanie na boki biegunów magnetycznych o tych samych znakach.



Rys. 8. Strumienie magnetyczne w łożysku z magnesami trwałymi (przekrój wzdłużny)



Rys. 9. Strumienie magnetyczne w łożysku z magnesami trwałymi (przekrój poprzeczny)

W łożyskach homopolarnych występują dwa obwody magnetyczne. Łożyska homopolarne mają zapewniony punkt pracy poprzez elementy pasywne, jakimi są magnesy trwałe. Chociaż więc nie zużywamy energii na wytworzenie punktu pracy, to musimy ją zużyć, podobnie jak to miało miejsce w łożyskach heteropolarnych sterowanych prądowo, na stabilizację układu i na zapewnienie odpowiedniego poziomu tłumienia w układzie. W każdym razie jest to najlepszy z dotychczas rozważanych układów sterowania, zarówno pod względem energetycznym jak i pod względem poprawności działania.

## 7. Łożyska z dodatnią sztywnością

Rozważania z poprzednich rozdziałów dotyczące energochłonności łożysk prowadzą do następujących wniosków.

1. Punkt pracy powinny zapewniać elementy pasywne. W ten sposób nie będziemy zużywać energii na generowanie punktu pracy.
2. Elementy pasywne powinny pracować w trybie odpychania, gdyż ten tryb zapewni dodatnią sztywność łożyska w układzie otwartym. Przy dodatniej sztywności nie trzeba będzie stabilizować układu, a tym samym można zmniejszyć zużycie energii na sterowanie drganiami wirnika.

W chwili obecnej narzucają się dwie możliwości realizowania tego typu rozwiązań. Można wykorzystać materiały diamagnetyczne, które mają naturalną skłonność do odpychania się od ciał generujących pole magnetyczne. Można również konstruować pewne konfiguracje magnesów trwałych, które będą się wzajemnie odpychały.

W 1842 r. Earnshaw wykazał (Earnshaw S., 1842), że nie ma żadnej kombinacji pasywnych pól elektrostatycznych, magnetostatycznych czy grawitacyjnych, która pozwoliłaby na stabilną lewitację elektrycznego ładunku lub ferromagnetycznego obiektu. Obecnie wiemy, że w zewnętrznym generowanym polu magneto- statycznym jest możliwa taka lewitacja w przypadku ciał wykonanych z diamagnetycznych materiałów. Badania wykazały, że dzięki ujemnej wrażliwości magnetycznej można umieścić ciało diamagnetyczne w „czaszy sił potencjalnych”, w której ciało może swobodnie lewitować. W tym przypadku, laplasjan interakcji potencjału pomiędzy diamagnetykiem a polem magnetycznym traktowany przyrostowo jest ściśle dodatni, czyli (Barrot F. i inni, 2005):

$$\Delta E_p = \frac{-\chi}{\mu_0} \Delta B^2 \geq 0 \quad (21)$$

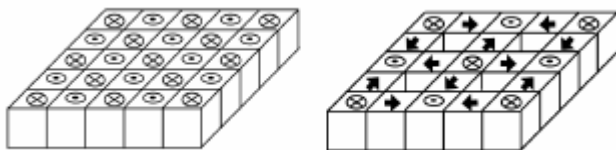
gdzie:  $\chi$  jest wrażliwością magnetyczną diamagnetyku,  $\mu_o$  jest przenikalnością magnetyczną w próżni, a  $B$  – strumieniem magnetycznym.

Siła odpychania będzie wynikała z następującej zależności:

$$\vec{F} = -\frac{d\Delta E_p}{d\vec{B}} = \frac{\chi}{\mu_o} \vec{B} \overrightarrow{\text{grad}}(B) \quad (22)$$

Ujemne wartości wrażliwości  $\chi$  dla różnych materiałów diamagnetycznych są niestety niewielkie - rzędu  $10^{-4}$ - $10^{-6}$ . Jedynie dla nadprzewodników, które również są diamagnetykami, dzięki zjawisku Meissnera-Ochsenfelda, wrażliwość magnetyczna jest wysoka:  $\chi = -1$ . Podejmowane są liczne próby zastosowania nadprzewodnictwa w kinetycznych magazynach energii (Canders W. i inni, 2004). Obecnie dostępne są tak zwane wysokotemperaturowe nadprzewodniki. Wysoka temperatura w wypadku nadprzewodników oznacza temperaturę 70-90 K. Do schładzania można użyć już ciekłego azotu w miejsce znacznie droższego helu, który był używany w wypadku niskotemperaturowych nadprzewodników. Jednakże w dalszym ciągu na uzyskanie tych temperatur należy zużyć dużo energii, a tym samym koszty ciągnione takiego rozwiązania są wysokie (Canders W. i inni, 2004).

Kolejnym rozwiązaniem zapewniającym dodatnią sztywność jest zastosowanie magnesów trwałych, pracujących w układzie odpychania się. W wypadku pojedynczych magnesów siły pola magnetycznego starają się je obrócić tak, aby połączyły się biegunami różnoimiennymi. W tym wypadku siły tangencjalne (prostopadłe) przy zbliżaniu biegunów jednoimiennych są porównywalne z siłami odpychania. Aby ukierunkować linie sił pola magnetycznego, elementarne magnesy łączy się w pewne konfiguracje, zwane tablicami. Najbardziej znana jest tablica Holbacha (rys. 10).



Rys. 10. Ukierunkowanie magnesów trwałych w dwóch typach tablic, (Barrot F. i inni, 2005)

## 8. Sprzętowe straty energii

Zgodnie ze wzorem (6) moc elektryczną traci się w wyniku reluktancji (oporności omowej) przewodów elektrycznych, indukcyjności cewek oraz zjawiska samoindukcji (wynikającej z ruchu wirnika jako zwory względem cewek).

Ogólnie rzecz biorąc, możemy uważać, że te straty są proporcjonalne do kwadratu prądów płynących w cewkach elektromagnesów lub proporcjonalne do strumieni magnetycznych w generowanych obwodach magnetycznych.

Oprócz powyższych strat, w łożyskach magnetycznych mają miejsce straty mocy związane z elektroniką wzmacniaczy prądowych lub napięciowych, histerezą magnetyczną oraz prądami wirowymi. Straty związane histerezą są proporcjonalne do prądu płynącego w cewkach elektromagnesu, natomiast straty wynikające z powstawania prądów wirowych są proporcjonalne do kwadratu prądu, co więcej, wraz z prędkością wirowania straty te rosną liniowo (Schweitzer G., 2002). Prądy wirowe ulegają istotnej redukcji po zastosowaniu na wirniku pakietu pierścieni laminowanych pod biegunami elektromagnesów. Im blachy są cieńsze, tym większe jest tłumienie prądów wirowych

Widzimy, że obniżenie wymienionych tu strat można realizować poprzez zmniejszanie prądu płynącego przez cewki, a to z kolei, jak to wykazano w rozdziale 2, uzyskać można poprzez zmniejszenie prądu punktu pracy i prądu sterowania.

## 9. Program badawczy

Zespół z Politechniki Białostockiej bierze udział w konsorcjum badawczym realizującym projekt badawczy zamawiany „Elektromechaniczny wysokoobrotowy magazyn energii”. Zespół odpowiedzialny jest za realizację i badanie łożysk magnetycznych dla tego zasobnika. Należy zauważyć, że łożyska będą pracowały w szczególnie trudnych warunkach ze względu na:

- stosunkowo głęboką próżnię (problemy z odprowadzeniem ciepła z wirnika wynikającego ze strat energii elektrycznej),
- szeroki przedział i szybkie zmiany prędkości obrotowej (duża zmienność parametrów obiektu sterowania),
- duże obciążenia zewnętrzne od maszyny elektrycznej i niewyważenia, co wymaga odpowiedniej nośności łożysk.

Tak więc w stosunku do łożysk magnetycznych, stosowanych w kinetycznych akumulatorach energii, należy, podobnie jak w stosunku do wielu współczesnych maszyn i urządzeń, wiele decyzji podejmować na etapie projektowania. Pomocnym w tych decyzjach będą badania laboratoryjne poszczególnych konstrukcji łożysk. Aby ograniczyć zakres badań wykorzystano opisany wyżej przegląd zagadnień i badań literaturowych związanych z tematyką strat energetycznych.

Do dalszych badań dla kierunku promieniowego wytypowano łożyska heteropolarne z obniżonym poziomem prądu punktu pracy. Podjęta zostanie również próba

całkowitego wyeliminowania prądu punktu pracy. Dla kierunku osiowego przewodzi się badanie:

- łożysk heteropolarnych z obniżonym prądem punktu pracy.,
- łożysk pasywnych wykorzystujących tablice magnesów trwałych.

Ze względu na obniżenie punktu pracy charakterystyki obiektu stają się nieliniowe. Dlatego rozważać się będzie, obok klasycznych praw sterowania, również metody sterowania nieliniowego, takie jak:

- sterowanie nieliniowe (np. ślizgowe),
- sterowanie odporne.

Ważnym zagadnieniem będzie również zaprojektowanie i wykonanie własnych elementów automatyki:

- wzmacniaczy prądowych, realizowanych w technologii PWM,
- czujników pomiarowych do pomiaru przemieszczeń wirnika względem stojana, oraz zaprogramowanie szybkich sterowników realizowanych w technologii DSP i FPGA.

W przeprowadzonych tu rozważaniach pominięto zagadnienie współpracy z innymi grupami badawczymi realizującymi odpowiednio: część mechaniczną, maszynę elektryczną i system przetwarzania energii elektrycznej (falownik).

## LITERATURA

1. Antila M.: Electromagnetic Properties of Radial Active Magnetic Bearings. PhD Dissertation. Helsinki University of Technology, 1998, Helsinki, Finland.
2. Barrot F., Sandtner J., Bleuer H.: Acceleration sensor based on diamagnetic levitation. IUTAM Symposium on Vibration Control of Nonlinear Mechanizms and Structures, July 18-22, 2005, Monachium, Germany.
3. Canders W., Hoffman J., May H., Palka R.: SMB Design Based on Advanced Calculation Methods Validated by Practical Experience. 9<sup>th</sup> Int. Symposium on Magnetic Bearings, August 3-6, 2004, Lexington, Kentucky, USA.
4. Earnshaw S.: On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether. Trans. of the Cambridge Philosophical Society, Vol. 7, Part 1, pp. 97-112, 1842.
5. Gosiewski Z.: Diagnostic of Rotating Machinery with Magnetic Bearings & Rigid Rotor. 9<sup>th</sup> Int. Symposium on Magnetic Bearings, August 3-6, 2004, Lexington, Kentucky., USA.
6. Gosiewski Z., Falkowski K.: Wielofunkcyjne, zarówno indu łożyska magnetyczne. Monografia nr 19, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, 2003.
7. Hu T., Lin Z., Allaire P.E.: Reducing Power Loss In Magnetic Bearings by Optimizing Current Allocation. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No 3, May 2004, pp. 1625-1635.
8. Lantto E.: Robust Control of Magnetic Bearings in Subcritical Machines. PhD Dissertation. Helsinki University of Technology, 1999, Helsinki, Finland., USA.
9. Schweitzer G.: Active magnetic bearings – chances and limitations. 8<sup>th</sup> Int. Symposium on Magnetic Bearings, Mito Japan, 2002.



10. Sivrioglu S., Nonami K.: Flywheel Zero-bias AMB System with Force Base Switching Servo Backstepping Control. 9<sup>th</sup> Int. Symposium on Magnetic Bearings, August 3-6, 2004 Lexington, Kentucky, USA.

### **ENERGY-SAVING MAGNETIC BEARINGS**

**Abstract:** To determine the energy consumption of magnetic bearing, the mathematical model of one-axis magnetic bearing was used. The one-axis magnetic bearing controls the motion of rotor in only one direction. For this model the operating power was determined. The directions of research on energy-saving magnetic bearing which are realized in Technical University of Białystok were described. The comparison of advantages and disadvantages of homopolar and heteropolar magnetic bearings was shown. The influence of reduced bias current on AMB closed-loop system was described. In the paper the nonlinear control like robust control and slide control were proposed. The possibility of applying of positive stiffness configuration of AMB was mentioned.

**Keywords:** homopolar magnetic bearing, operating point, energy storage system, positive stiffness.

Pracę sfinansowano w ramach pracy statutowej nr S/WM/3/05 i wykonano w Katedrze Automatyki i Robotyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.

Zdzisław GOSIEWSKI\*, Arkadiusz MYSTKOWSKI\*

## STEROWANIE ODPORNE UKŁADEM ŁOŻYSK MAGNETYCZNYCH W MASZYNACH WIRNIKOWYCH

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono sterowanie odporne  $H_\infty$  i  $H_2$  ruchem wirnika łożyskowanego magnetycznie. Sterowanie odporne jest badane analitycznie. Dla potrzeb sterowania określono model nominalny i model niepewności obiektu. Właściwości układu zamkniętego z regulatorem proporcjonalno-całkująco-różniczkującym (PID) porównano z właściwościami układu z regulatorem odpornym  $H_\infty/H_2$ . W układzie zamodelowano niepewność obiektu sterowania jako multiplikatywną. Właściwości układu z regulatorami  $H_\infty$  i  $H_2$  zależą od właściwie dobranych funkcji wagowych. Wpływ zakłóceń, szumów oraz kształt i ograniczenia nałożone na sygnały można kształtować przez funkcje wagowe. Badania nad układem zamkniętym zaprezentowano w formie wykresów.

**Słowa kluczowe:** sterowanie optymalne  $H_\infty$  i  $H_2$ , odporna stabilność, model niepewności, model rozszerzony, aktywne łożyska magnetyczne.

### 1. Wprowadzenie

Łożyska magnetyczne stosuje się coraz częściej w różnych aplikacjach. Aktywne łożyska magnetyczne, jako zawieszenie bezstykowe, są najlepszym wyborem łożyskowania w szybkoobrotowych maszynach. Łożyska magnetyczne są długowieczne i bezobsługowe. Jednakże jako obiekt sterowania wirnik w łożyskach magnetycznych jest strukturalnie niestabilny. Oznacza to, że do stabilizowania trzeba stosować układy regulacji. Przy stałej prędkości obrotowej wirnika wystarczają często ręcznie strojone regulatory PID.

---

\* Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki,  
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok.

Gdy maszyna wirnikowa pracuje z dużą prędkością obrotową i prędkość ta się zmienia, to należy zbudować bardziej zaawansowane prawo sterowania. Jedną z zaawansowanych metod sterowania jest metoda sterowania odpornego (ang. Robust Control) (Balas G. i inni, 2005), która będzie zastosowana do stabilizowania układu zawieszenia magnetycznego. Proste metody sterowania nie pozwalają uwzględnić działania wszystkich czynników mających wpływ na jakość statyczną i dynamiczną regulacji. Zastosowanie metody sterowania odpornego daje następujące korzyści:

- 1) Jest to metoda sterowania optymalnego wykorzystującego normy sygnałów  $H_2$  i  $H_\infty$ ; pozwala to wyznaczać regulator optymalny dla układu nieliniowego i niestabilnego.
- 2) Jako jedyna z metod pozwala projektować układ sterowania z uwzględnieniem niepewności obiektu, ograniczeń nałożonych na sygnały i zakłóceń działających w układzie.
- 3) Uzupełniając układ o funkcje: wrażliwości, komplementarnej wrażliwości i sterowania można ograniczyć wpływ zakłóceń działających na wejście i wyjście obiektu.

Aby osiągnąć odpowiednią jakość sterowania oraz odporne właściwości układu (wirnik łożyskowany magnetycznie) (Antila M., 1998), regulator odporny wyznaczamy z uwzględnieniem modelu niepewności obiektu sterowania. Zaprojektowany regulator jest niewrażliwy na zmiany parametrów fizyczno-mechanicznych siłowników magnetycznych, zaburzeń zewnętrznych i wymuszeń (np. niewyważenie, efekt żyroskopowy, itd.) (Lantto E., 1999).

W artykule tym ograniczono się do sterowania odpornego ruchu wirnika sztywnego łożyskowanego magnetycznie. Zamknięty układ regulacji jest stabilny mimo: niepewności jego parametrów, zakłóceń zewnętrznych, dużej prędkości obrotowej wirnika, niewyważenia i efektów żyroskopowych. Dla układu wirnika łożyskowanego magnetycznie zaprojektowano optymalne regulatory  $H_\infty$  i  $H_2$ . Dla obiektu nominalnego regulator zaprojektowano metodą przesuwania biegunów oraz reguł stosowanych dla PID. Porównano właściwości różnych układów zamkniętych.

## 2. Nominalny model obiektu

Model obiektu z parametrami nominalnymi jest nazywany modelem nominalnym. Nominalne wartości parametrów obiektu są wyznaczone dla danego prądu punktu pracy  $i_0$ . Kiedy linia środkowa wirnika znajduje się poza środkiem łożysk, wartość prądu punktu pracy może ulec zmianie. W takim przypadku

mówimy, że układ ma parametry niepewne (zmienne w czasie). Dla potrzeb sterowania odpornego potrzebny jest model obiektu i model niepewności obiektu.

Obiektem sterowania jest wirnik sztywny poprzecznie, zawieszony w dwóch promieniowych łożyskach magnetycznych. Ruch wirnika opisują następujące równania (Gosiewski Z., Falkowski K., 2003):

$$\begin{aligned}
 m\ddot{y} &= F_{eyl} + F_{eyp} + G_y + F_{Ry}, \\
 m\ddot{x} &= F_{ezl} + F_{ezp} + G_z + F_{Rz}, \\
 I_x\ddot{\alpha} + \dot{\beta}\Omega(I_x - I_z) &= M_{ey}, \\
 I_z\ddot{\beta} + \dot{\alpha}\Omega(I_y - I_x) &= M_{ez},
 \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie:

$m$  – masa wirnika,

$y, z$  - przemieszczenie środka wirnika w kierunku osi Oy i Oz,

$\dot{y}, \dot{z}, \ddot{y}, \ddot{z}$  - pierwsza i druga pochodna przemieszczenia po czasie środka wirnika,

$\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}$  - obrót wirnika wokół osi Oy oraz jego pierwsza i druga pochodna po czasie,

$\beta, \dot{\beta}, \ddot{\beta}$  - obrót wirnika wokół osi Oz oraz jego pierwsza i druga pochodna po czasie,

$I_x, I_y, I_z$  – osiowy moment bezwładności wirnika i promieniowy moment bezwładności wirnika,

$\Omega$  - prędkość kątowna wirnika,

$F_{eyl}, F_{eyp}, F_{ezl}, F_{ezp}$  – wypadkowa siła elektromagnetyczna generowana przez siłowniki łożysk magnetycznych w kierunku osi Oy i Oz w lewej (l) i prawej (p) płaszczyźnie łożyskowania,

$M_{ey}, M_{ez}$  – moment sił elektromagnetycznych wokół osi Oy i Oz,

$G_y, G_z$  – ciężar wirnika w kierunku osi Oy i Oz,

$F_{Ry}, F_{Rz}$  – siła odśrodkowa wirnika w kierunku osi Oy i Oz.

Model zawierający wszystkie komponenty obiektu posiada 8 zmiennych stanu i może być zapisany w przestrzeni stanu następująco (Gosiewski Z., Falkowski K., 2003):

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{v} \\
 \mathbf{y} &= \mathbf{Cx}
 \end{aligned} \tag{2}$$

gdzie:

$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}$  - wektor stanu,  $\mathbf{q} = [y \quad z \quad \alpha \quad \beta]^T$  - wektor współrzędnych globalnych,

$\mathbf{u} = \mathbf{i}$  - wektor sterowań,  $\mathbf{i} = [i_{yp} \quad i_{yl} \quad i_{zp} \quad i_{zl}]^T$  - wektor prądów sterujących (wektor wejść),

$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 1} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{w} \end{bmatrix}$  - wektor zakłóceń deterministycznych,

$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{V} & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{G} \end{bmatrix}$  - macierz stanu,

$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F} \end{bmatrix}$  - macierz sterowań,

$y = [y_p \quad y_l \quad z_p \quad z_l]^T$  - wektor wyjść,

oraz gdzie:

$\mathbf{w} = [m\Omega^2 e \cos(\Omega t) \quad -mg_z + m\Omega^2 e \sin(\Omega t) \quad 0 \quad 0]^T$  - wektor wymuszeń,

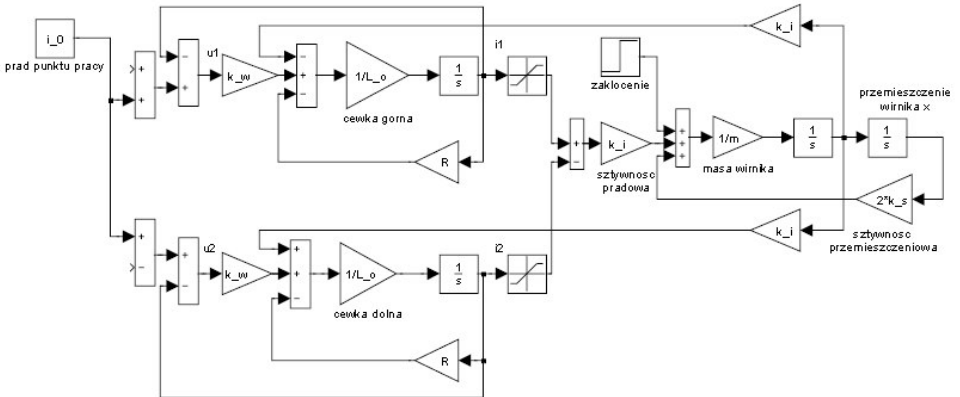
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Omega(I_x - I_z) \\ 0 & 0 & \Omega(I_y - I_x) & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} -2k_s & 0 & 0 & -k_s(p-l) \\ 0 & -2k_s & k_s(p-l) & 0 \\ 0 & k_s(p-l) & -k_s(p^2+l^2) & 0 \\ -k_s(p-l) & 0 & 0 & -k_s(p^2+l^2) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} k_i & k_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_i & k_i \\ 0 & 0 & -k_i p & k_i l \\ +k_i p & -k_i l & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

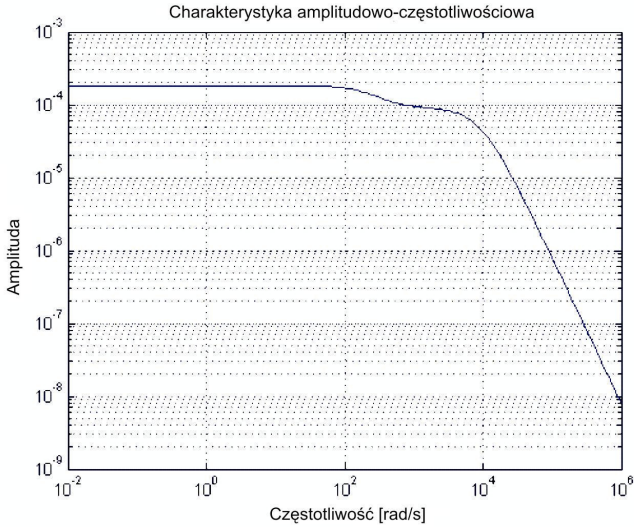
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \text{macierz wyjść (pomiarowa)}.$$

Na rys. 1 przedstawiono nominalny model symulacyjny aktywnego zawieszenia magnetycznego wirnika dla jednej osi.



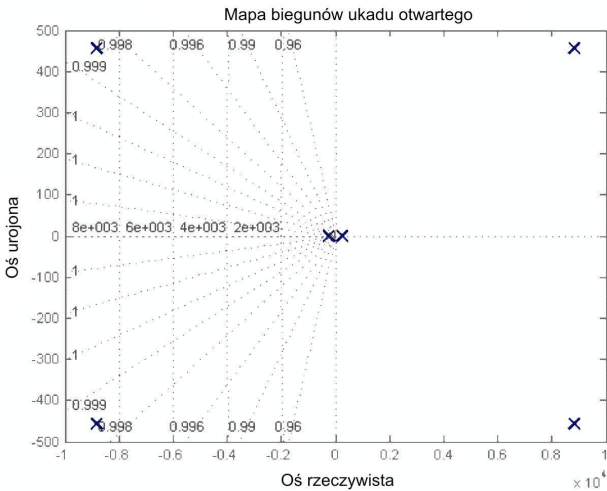
**Rys. 1.** Nominalny model symulacyjny aktywnego zawieszenia magnetycznego

Odpowiedź częstotliwościową modelu wirnika łożyskowanego magnetycznie przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa zawieszenia magnetycznego

Obiekt, jakim jest wirnik łożyskowany magnetycznie, standardowo ma 8 biegunów, które wynikają z ruchu rotacyjnego i translacyjnego wirnika w dwóch płaszczyznach łożyskowania. Położenie wartości własnych modelu wirnika łożyskowanego magnetycznie pokazano na rys. 3.



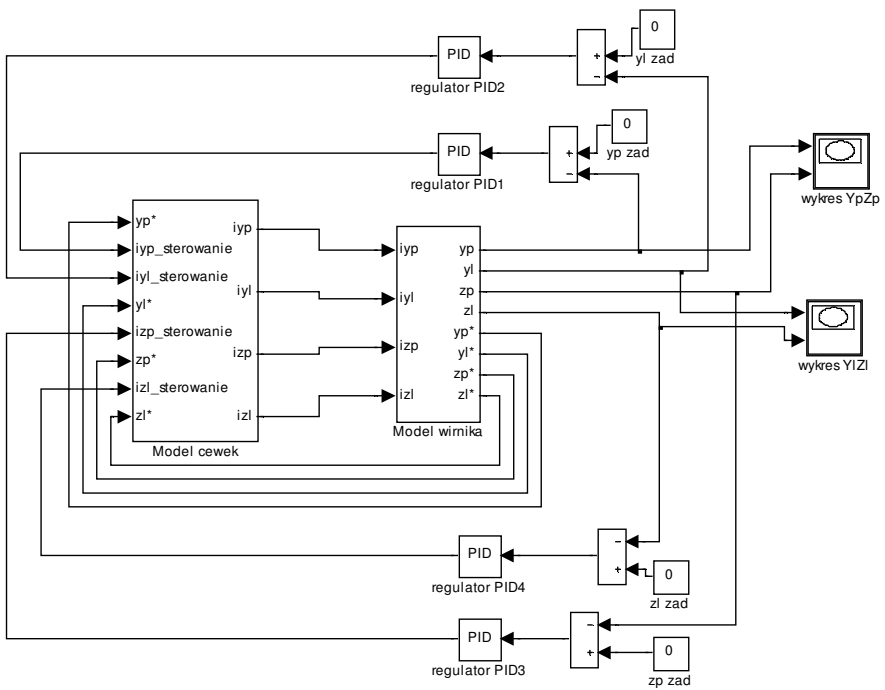
Rys. 3. Mapa biegunów układu otwartego zawieszenia magnetycznego

### 3. Sterowanie PID

Na podstawie modelu wirnika łożyskowanego magnetycznie (4) zaprojektowano 4 regulatory PID sterujące osobno każdą osią wirnika w dwóch płaszczyznach łożyskowania. Wyznaczony regulator PID (Franklin G. F., David J., 1997) jest opisany następującą transmitancją:

$$G(s)_{PID} = \frac{116.4s^2 + 6.8 \cdot 10^4 s + 2.3 \cdot 10^7}{s} \quad (3)$$

Model zamkniętego układu regulacji PID przedstawiono na rys. 4.

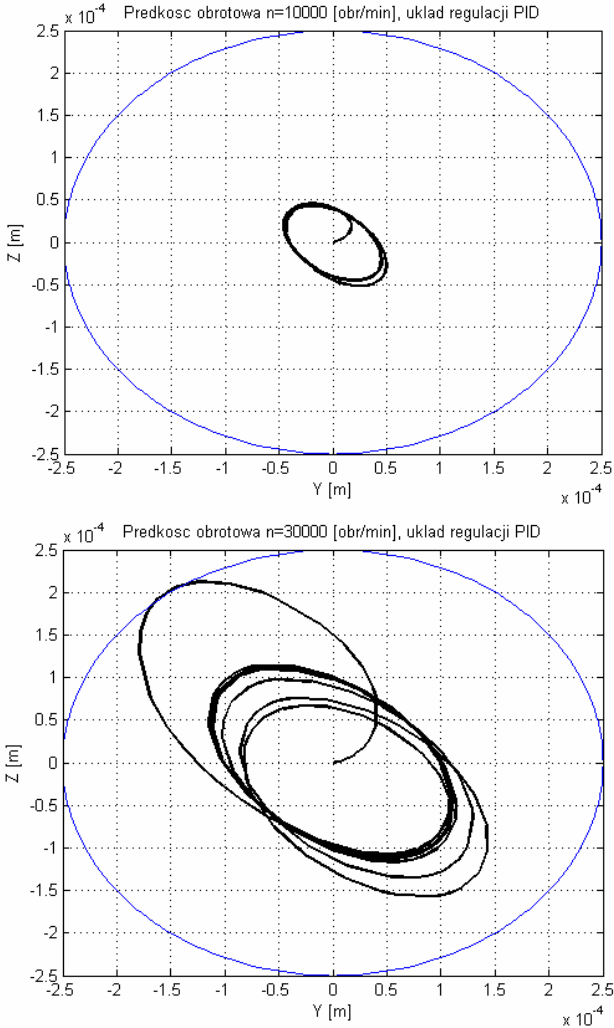


**Rys. 4.** Model symulacyjny układu zamkniętego z regulatorami PID

W modelu symulacyjnym wprowadzono wymuszenie bezwładnościowe modelujące niewyważenie statyczne i dynamiczne. Następnie przeprowadzono badania symulacyjne wyznaczające trajektorię ruchu wirnika dla różnych

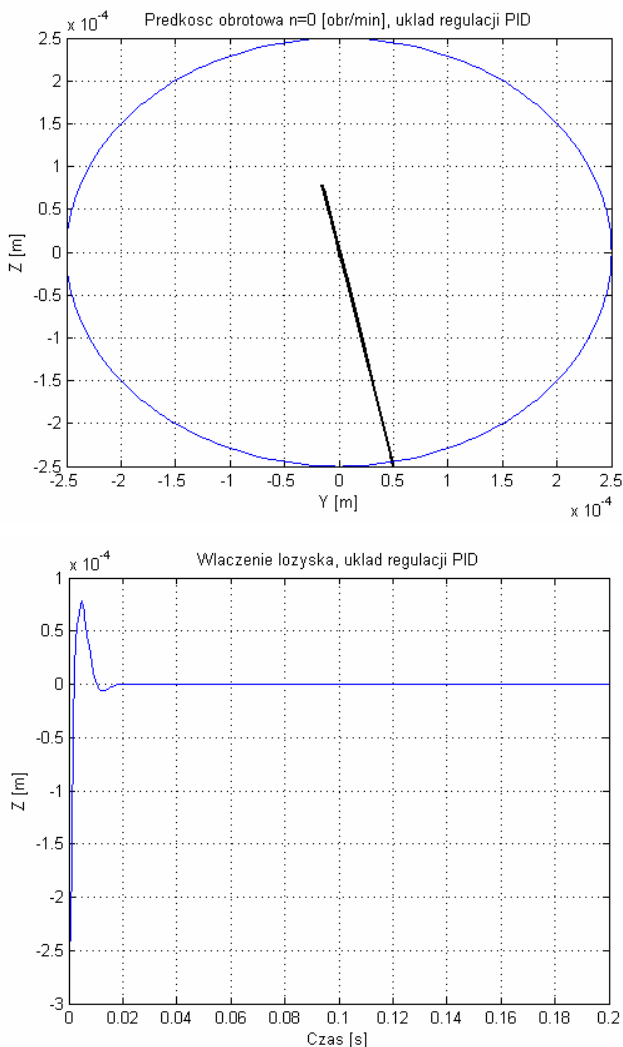


prędkości obrotowych. Rysunek 5 pokazuje tor ruchu środka wirnika w odniesieniu do szerokości szczeliny powietrznej sygnałów rejestrowanych w płaszczyznach łożyskowania wirnika w kierunku osi pomiarowej Y i Z dla prędkości obrotowej  $n=10000$  i  $30000$  [obr/min].



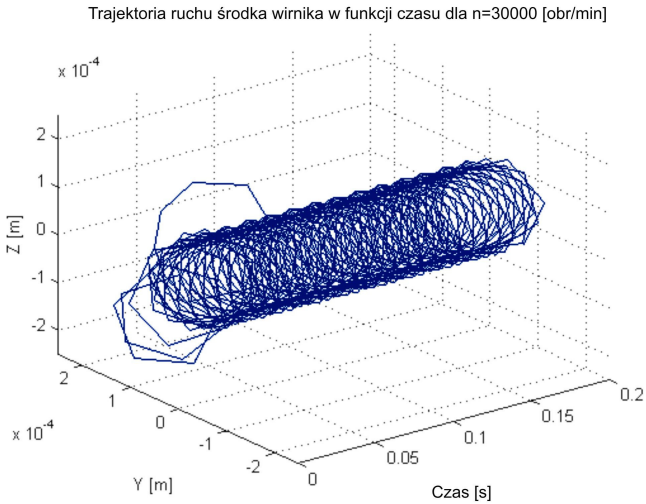
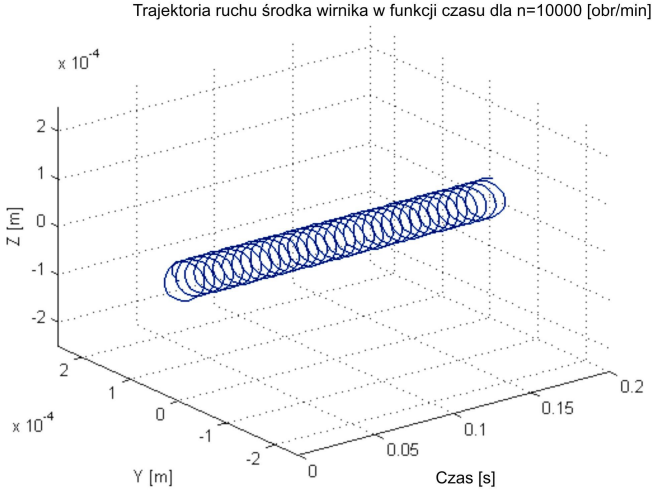
**Rys. 5.** Trajektoria ruchu środka geometrycznego wirnika dla prędkości obrotowej  $n=10000$  i  $30000$  [obr/min]

Dla modelu symulacyjnego przeprowadzono analizę ruchu wirnika w płaszczyznach łożyskowania wirnika podczas włączenia łożysk do pracy. W modelu uwzględniono, że wirnik opiera się na dolnych nabiegownikach elektromagnesów oraz przesunięty jest w osi poziomej o 0,05 [mm]. Proces przejściowy związany z wprowadzeniem wirnika w punkt pracy przedstawiony jest na rysunku 6.



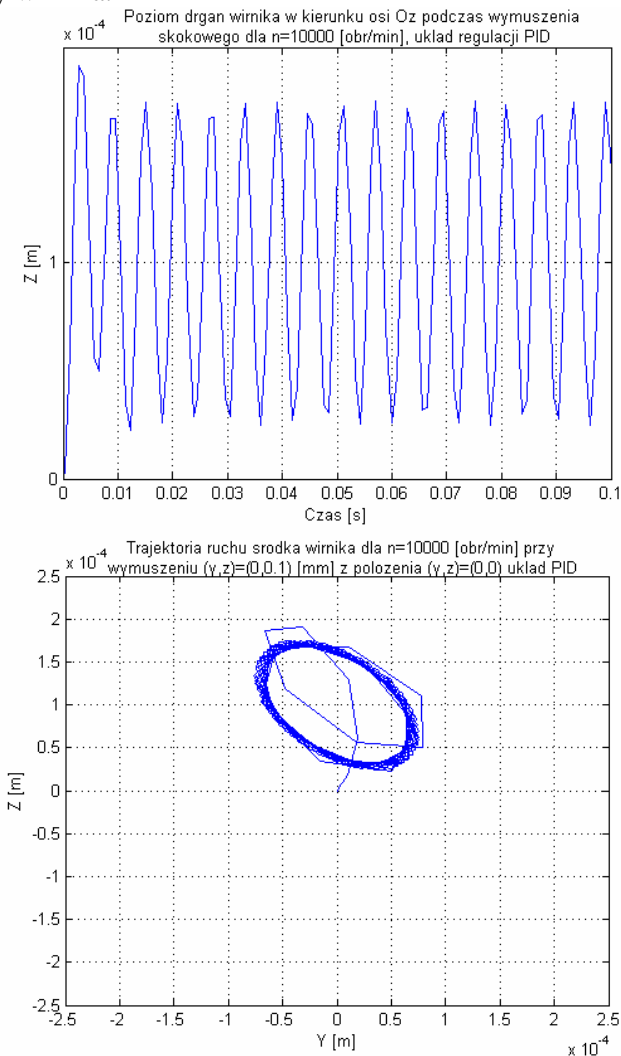
**Rys. 6.** Trajektoria ruchu środka geometrycznego wirnika podczas włączenia łożysk do pracy

Na rysunku 7 przedstawiono trajektorię ruchu środka geometrycznego wirnika w kierunku osi pomiarowej Y i Z, w zależności od czasu. Do modelu wirnika łożyskowanego magnetycznie wprowadzono niewyważenie statyczne i dynamiczne. Symulacje przeprowadzono dla prędkości obrotowej wirnika  $n=10000$  i  $30000$  [obr/min].



**Rys. 7.** Trajektoria ruchu środka geometrycznego wirnika w funkcji czasu dla prędkości obrotowej  $n=10000$  i  $30000$  [obr/min]

Na rysunku 8 przedstawiono poziom drgań wirnika w kierunku osi Z oraz trajektorię ruchu środka geometrycznego wirnika podczas wymuszenia skokowego z punktu pracy wirnika.



**Rys. 8.** Drgania oraz trajektoria ruchu środka geometrycznego wirnika podczas wymuszenia siłą sinusoidalnie zmienną

#### 4. Projektowanie sterowania odpornego $H_2$ i $H_\infty$

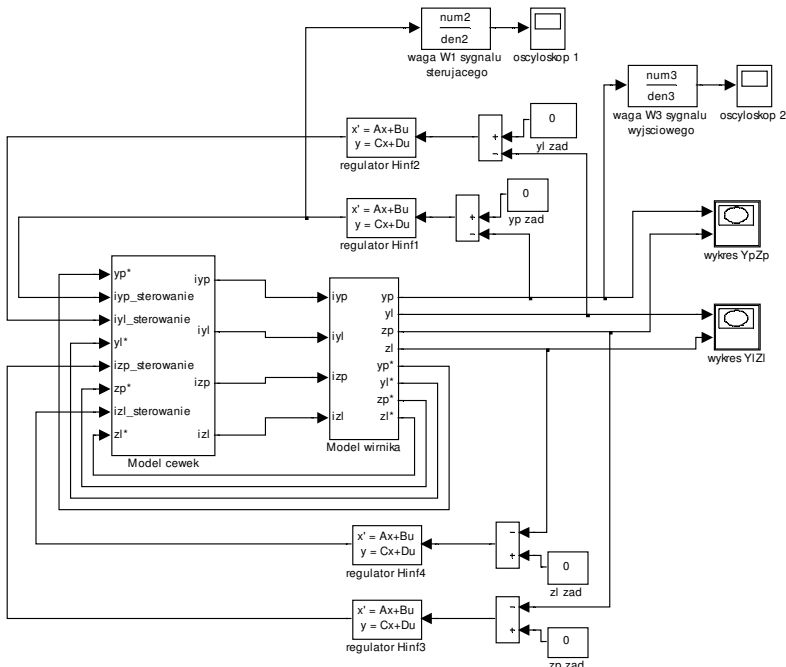
Problem wyznaczenia regulatora  $H_\infty$  sprowadza się do wyznaczenia takiego regulatora  $K$ , który minimalizuje następującą normę (Zhou K. i inni, 1997; Zhou K., Doyle J. C., 1998):

$$\|F(G, K)\|_\infty = \sup_{\omega \in R} |F(G, K)(j\omega)| \quad (4)$$

Problem wyznaczenia regulatora  $H_2$  sprowadza się do znalezienia regulatora  $K$ , który wewnątrznie stabilizuje układ  $G$  tak, że norma z transmitancji układu zamkniętego  $T_{zw}$  jest minimalna. Normę  $H_2$  można opisać następująco:

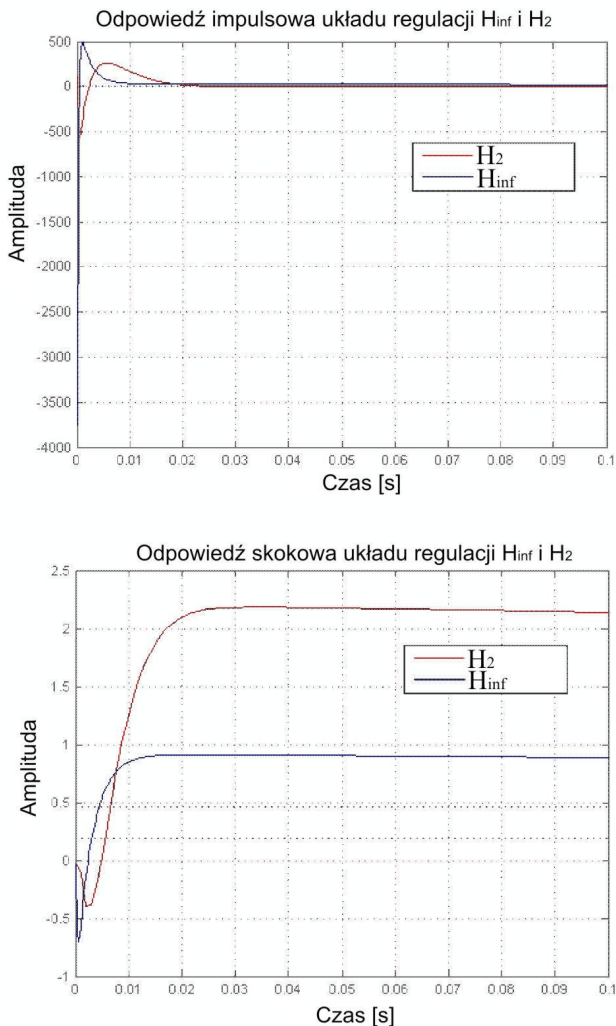
$$\|H\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Trace}[G^T(j\omega)G(j\omega)]d\omega} \quad (5)$$

Na podstawie wyznaczonego modelu regulacji PID wirnika łożyskowanego magnetycznie zaprojektowano regulator odporny  $H_2$  i  $H_\infty$ . Model układu regulacji optymalnej z regulatorami odpornymi pokazano na rys. 9.



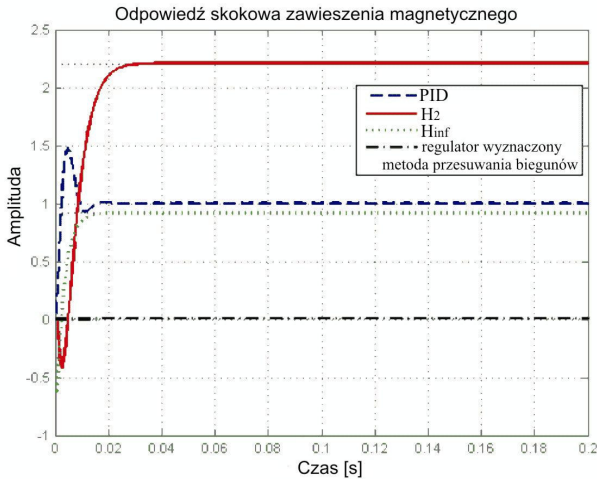
Rys. 9. Model symulacyjny sterowania odpornego zawieszeniem magnetycznym

Na rysunku 10 przedstawiono odpowiedź impulsową i skokową układu regulacji  $H_2$  i  $H_\infty$  dla jednej osi wirnika łożyskowanego magnetycznie.



**Rys. 10.** Odpowiedź skokowa i impulsowa układu regulacji z regulatorem  $H_2$  i  $H_\infty$  ( $H_{inf}$ )

Na rysunku 11 porównano działanie układu regulacji z regulatorem: PID,  $H_2$ ,  $H_\infty$  i regulatorem wyznaczonym metodą przesuwania biegunów.



**Rys. 11.** Porównanie właściwości układu regulacji zawieszenia magnetycznego dla regulatorów: PID,  $H_2$ ,  $H_\infty$  ( $H_{inf}$ ) i regulatora wyznaczonego metodą przesuwania biegunów

## 5. Podsumowanie i wnioski

W artykule zaprojektowano regulator PID i regulator wyznaczony metodą przesuwania biegunów. Porównano właściwości tych regulatorów z właściwościami regulatorów optymalnych  $H_\infty$  i  $H_2$ . Właściwie dobrane funkcje wagowe i model niepewności obiektu mają duży wpływ na właściwości układu zamkniętego. Regulatory optymalne  $H_\infty$  i  $H_2$  lepiej kompensują niewyważenie statyczne i dynamiczne, vibracje i efekty żyroskopowe niż standardowy regulator PID. Symulacje numeryczne wskazują, że układ łożysk magnetycznych jest trudny do regulacji ze względu na niepewność jego parametrów. Jeżeli wzrasta stopień niepewności parametrów obiektu, zmienia się model obiektu. Regulator odporny pozwala kompensować nieliniowy charakter dynamiki łożysk magnetycznych.

Układ zamknięty z regulatorem optymalnym jest bardziej odporny niż układ z standardowym regulatorem PID czy regulatorem wyznaczonym metodą przesuwania biegunów. Główny problem w układzie sterowania łożysk magnetycznych, jakim jest redukcja drgań wirnika, został pomyślnie rozwiązany poprzez zastosowanie optymalnej metody sterowania  $H_\infty$  i  $H_2$ .

## LITERATURA

1. Antila M.: Electromechanical Properties of Radial Active Magnetic Bearings, Dissertation, Helsinki University of Technology, 1998.
2. Balas G., Chiang R., Packard A., Safonov A.: Robust Control Toolbox, MathWorks, 2005.
3. Franklin G. F., David J.: Feedback Control of Dynamic Systems, Prentice Hall, 1997.
4. Gosiewski Z., Falkowski K.: Wielofunkcyjne łożyska magnetyczne, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2003.
5. Lantto E.: Robust Control of Magnetic Bearings in Subcritical Machines, Dissertation, Helsinki University of Technology, 1999.
6. Zhou K., Doyle J. C., Glover K.: Robust and Optimal Control, Prentice Hall, 1997.
7. Zhou K., Doyle J. C.: Essentials of Robust Control, Prentice Hall, 1998.

### ROBUST CONTROL OF MAGNETIC BEARINGS IN ROTATING MACHINERY

**Abstract.** The paper deals with  $H_\infty$  and  $H_2$  optimal control of rigid rotor movement, which is supported by magnetic bearings. The robust control of magnetic bearings is investigated analytically. The nominal model of active magnetic suspension of rotor and uncertainty model is derived. The standard PID control and robust control are compared and performance of nominal feedback configuration with weights is presented. We propose a robust control with multi-objective controller to achieve good robust stability when the model of plant is uncertain. The behaviour of multiplicative uncertainty of magnetic suspension system is showed. The  $H_2$  performance and  $H_\infty$  performance depend on a proper selection of weighting functions. The weight functions:  $W_e$ ,  $W_w$ ,  $W_d$  are connected with error, control and noise signals, respectively. The simulations of closed-loop system are presented.

**Keywords:**  $H_\infty$  and  $H_2$  optimal control, robust stability, uncertain model, augmented model, active magnetic bearings.

Pracę sfinansowano w ramach pracy statutowej nr S/WM/3/05 i wykonano w Katedrze Automatyki i Robotyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.



Zdzisław GOSIEWSKI\*, Mariusz ŻOKOWSKI\*\*

## STEROWANIE ŚLIZGOWE AKTYWNEGO ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę projektowania sterowania ślizgowego typu przekaźnikowego - dwustanowego (*ang. bang-bang*) dla jednej osi siłownika łożyska magnetycznego. Omówiono metodę płaszczyzny fazowej, z której korzysta się przy projektowaniu sterowania ślizgowego (użyto dwóch płaszczyzn przełączających opisanych funkcjami  $s_1(x)$ ,  $s_2(x)$ ). Ruch ślizgowy po tych płaszczyznach zachodzi tylko w przypadku, gdy podobszar w przestrzeni stanu  $x$  jest zdefiniowany następująco:  $s_1(x)s_2(x) \leq 0$ . Dwa elektromagneses siłownika zasilane są stałym napięciem poprzez przełączanie napięcia pomiędzy jego dodatnią a ujemną wartością.

Dla pojedynczej osi aktywnego łożyska magnetycznego przedstawiono teorię sterowania ślizgowego i jego implementację matematyczną dla układu wirnik-łożysko magnetyczne.

**Słowa kluczowe:** sterowanie ślizgowe, aktywne łożysko magnetyczne, przestrzeń fazowa, układ ze zmienną strukturą.

### 1. Wprowadzenie

*Teoria ruchów ślizgowych* jest szczególnym podejściem w projektowaniu układów o zmiennej strukturze. *Układ ze zmienną strukturą* to taki układ, którego struktura może być nagle zmieniona lub też przełączana z pewną logiką przełączeń, której celem jest zapewnienie pożądanego zachowania się całego układu. Regulatory wykorzystujące ruch ślizgowy w swoim działaniu różnią się od prostszych regulatorów przekaźnikowych tym, że zastosowano w nich niezwykle dużą prędkość przełączania między wartościami sterowania.

*Ruchem ślizgowym* określa się szczególnie sposób przemieszczania stanu układu względem zadanej trajektorii. Połączenie tradycyjnych sprzężeń funkcyj-

---

\* Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki,  
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok

\*\* Politechnika Koszalińska, Studia Doktoranckie, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

nych od stanu i wyjścia obiektu (sprzężenia współrzędne) ze sprzężeniami operatorowymi od funkcji stanu z różnymi typami operatorów, np.: statycznych, astatycznych, nieciągłych i nieliniowych, modyfikujących sprzężenia współrzędne, umożliwia określenie ogólnych struktur regulatorów nieliniowych, zapewniających zbieżność trajektorii układu regulacji do trajektorii zadanej dla różnych klas obiektów regulacji, co oznacza kompensację wpływu nieznanych lub niedokładnie określonych części opisu dynamiki obiektu na jego trajektorię.

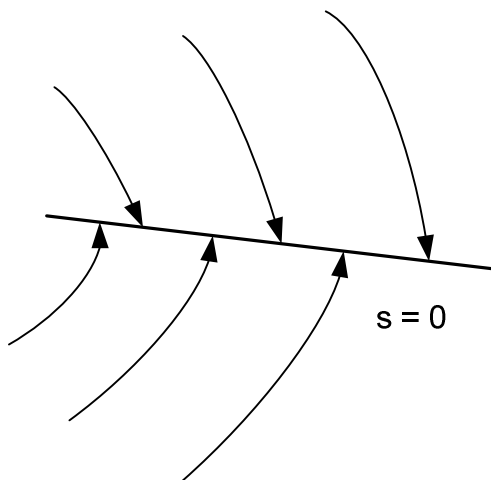
W artykule przedstawiono sterowanie ślizgowe typu przekaźnikowego - dwustanowego (*ang. bang-bang*) dla jednej osi siłownika łożyska magnetycznego.

Termin o nazwie „układ o zmiennej strukturze” (*ang. variable structure system - VSS*) pojawił się po raz pierwszy w latach pięćdziesiątych i został wprowadzony przez Emeljanowa. Podstawowa koncepcja tego układu polega na zmianie struktury sprzężenia zwrotnego, gdy wektor stanu przekracza ustaloną powierzchnię w przestrzeni stanów, zwaną powierzchnią przełączeń. Metody syntezy układów VSS wywodzą się z metod graficznych na płaszczyźnie fazowej oraz z metod rozwiązywania równań różniczkowych z nieciągłą prawą stroną.

Dominującą rolę w teorii VSS odgrywa ruch ślizgowy i sednem idei projektowania algorytmów sterowania VSS jest wymuszanie tego typu ruchu w różnorodnych przestrzeniach stanu. Dzięki regulacji w trybie ruchu ślizgowego zyskuje się uproszczenie dynamiki obiektu poddanego takiej regulacji (redukcja rzędu oraz linearyzacja równań różniczkowych opisujących zamknięty układ regulacji), niewrażliwość układu na zmiany parametrów obiektu oraz odporność na zakłócenia (tzw. sterowanie odporne - *ang. robust control*).

Sterowanie ślizgowe (*ang. Sliding Mode Control - SMC*) jest formą sterowania dwustanowego, w którym trajektoria fazowa układu „ślizga się” po powierzchni przełączeń wyznaczonej przez konstruktora - projektanta układu regulacji.

Podstawą sterowania ślizgowego jest wybór odpowiedniej powierzchni w przestrzeni stanów, zwykle hiperpowierzchni liniowej, zwanej powierzchnią przełączeń, na której następuje przełączanie wejścia sterującego. Dlatego też wejście sterujące jest wybrane tak, aby trajektorie blisko powierzchni ślizgowej były skierowane w jej kierunku (rys. 1).



Rys. 1. Wizualizacja powierzchni ślizgowej

Ostatnie osiągnięcia w nauce i technice elektronicznej umożliwiły praktyczne zastosowanie przełączania z dużą prędkością do wielu klas układów. Jednym z tych obszarów zastosowań teorii ruchu ślizgowego jest sterowanie łożyskami magnetycznymi. Praktyczna realizacja sterowania ślizgowego wiąże się z wysoką częstotliwością przełączeń. Rozwój technologii półprzewodnikowej, a konkretnie półprzewodnikowych elementów mocy oraz cyfrowych układów sterowania pozwala konstruować wysokoczęstotliwościowe przekształtniki statyczne o dobrych parametrach regulacyjnych. Należy zaznaczyć, że dla układów energoelektronicznych algorytmy sterowania nieciągłego (w tym SMC) są bardziej naturalne niż algorytmy ciągłe. Sygnał wyjściowy układu regulacji jest w tym wypadku bezpośrednio wykorzystany do sterowania elementami mocy przekształtnika energoelektronicznego. Gdy sygnał wyjściowy regulatora ślizgowego jest sygnałem zadanym dla pozostałych regulatorów, zjawisko szybkich przełączeń generowanych przez ten regulator może doprowadzić do wzbudzenia drgań wysokiej częstotliwości (*ang. chattering phenomenon*), wynikających ze stosowania w procesie doboru regulatora uproszczonego modelu obiektu regulacji. Stosuje się wówczas sposoby redukujące lub eliminujące zjawisko szybkich przełączeń.

W artykule przedstawiono metodę płaszczyzny fazowej, na której oparte jest sterowanie ślizgowe (użyto dwóch płaszczyzn przełączających). Ruch ślizgowy po tych płaszczyznach zachodzi tylko w wtedy, gdy podobszar w przestrzeni stanu jest zdefiniowany następująco:  $s_1(x)s_2(x) \leq 0$ , czyli w odmienny sposób niż w większości przypadków, gdzie płaszczyzna definiowana jest jako  $s(x) = 0$ . Dwa

elektromagnesy siłownika zasilane są stałym napięciem poprzez przełączanie napięcia pomiędzy jego dodatnią a ujemną wartością.

## 2. Aktywne łożyska magnetyczne

Dla pojedynczej osi aktywnego łożyska magnetycznego pokazanej na rys. 2, przedstawiono równania, opisujące dynamikę układu, które są punktem wyjścia do dalszych rozważań na temat sterowania ślizgowego łożysk magnetycznych.

Ruch wału wykonanego z materiału ferromagnetycznego o masie  $m$  ograniczony jest tylko w kierunku osi  $Ox$ , co jest pokazane na rys. 2. Na wejście układu podawane są napięcia  $u_1$  i  $u_2$ . Oporem zewnętrznym jest rezystancja cewki, która może zawierać prąd szczytkowy. Założono, że przenikalność magnetyczna materiału jest stała, a gęstość strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej jest jednakowa w każdym miejscu. Założono również, że prądy wirowe i straty strumienia magnetycznego są małe. Pominięto w tych rozważaniach skutki związane z występowaniem tych zjawisk ze względu na to, że głównym celem niniejszej pracy jest przedstawienie idei sterowania ślizgowego. W związku z powyższym - równania dla układu z rys. 2 można zapisać następująco:

$$m\ddot{x} = \frac{1}{\mu_0 A} (\phi_2^2 - \phi_1^2) + f_d, \quad (1a)$$

$$u_1 = N\dot{\phi}_1 + Ri_1, \quad u_2 = N\dot{\phi}_2 + Ri_2, \quad (1b)$$

$$i_1 = \frac{2}{\mu_0 AN} (x_0 + x)\phi_1, \quad i_2 = \frac{2}{\mu_0 AN} (x_0 - x)\phi_2, \quad (1c)$$

gdzie:

$x_0 = g+l$

$g$  - szczelina pomiędzy elektromagnesem a zwrą (wałem wirnika) w położeniu centralnym;

$l$  - oznacza nieokreśloną przenikalność magnetyczną;

$f_d$  - siła zakłócająca;

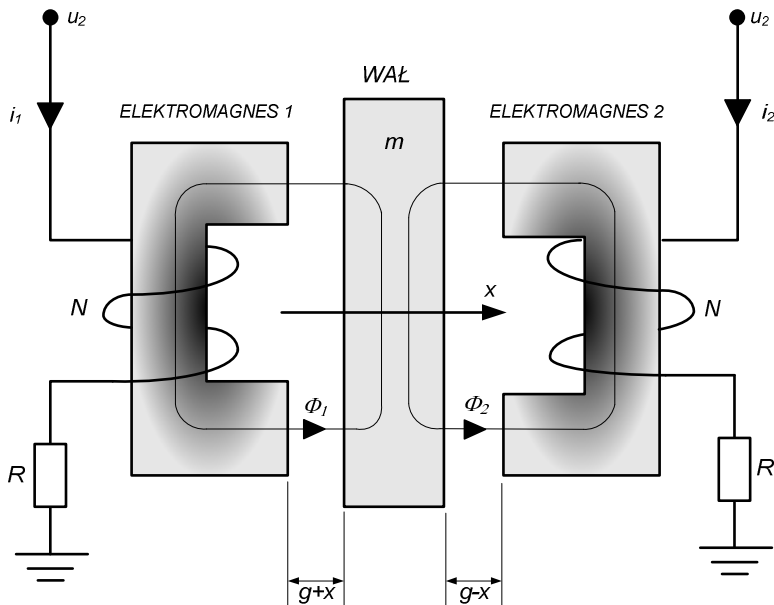
$\Phi_1, \Phi_2$  - strumienie pochodzące odpowiednio od prądów  $i_1$  i  $i_2$ ;

$A$  - pole powierzchni bieguna elektromagnesu;

$N$  - liczba zwoi;

$R$  - oporność cewki;

$\mu$  - przenikalność magnetyczna.



Rys. 2. Schemat aktywnego łożyska magnetycznego

Dla zwięzłego przedstawienia dalszych rozważań zmienne w równaniach (1) zapisano w następujący sposób:  $\xi = x/x_0$ ,  $\eta_1 = I_1/I_0$ ,  $\eta_2 = i_2/I_0$ ,  $\theta = f_d/mx_0$ ,  $\varepsilon_1 = u_1/RI_0$ ,  $\varepsilon_2 = u_2/RI_0$ ,  $\psi_1 = \varphi_1/\Phi_0$ ,  $\psi_2 = \varphi_2/\Phi_0$ , gdzie:  $I_0$  - prąd punktu pracy;  $\Phi_0 = \mu_0 AN I_0 / 2x_0$  - strumień punktu pracy.

Na podstawie powyższych znormalizowanych zmiennych otrzymano:

$$\ddot{\xi} = \alpha(\psi_2^2 - \psi_1^2) + \theta, \quad (2a)$$

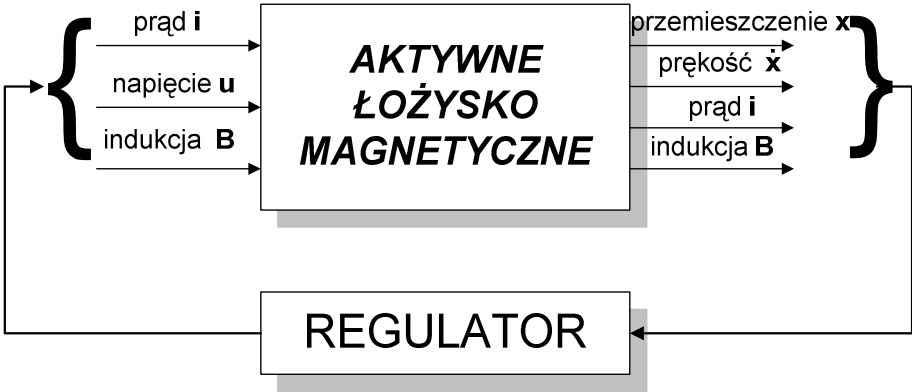
$$\varepsilon_1 = \frac{1}{\beta}\dot{\psi}_1 + \eta_1, \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{\beta}\dot{\psi}_2 + \eta_2, \quad (2b)$$

$$\eta_1 = (1 + \xi)\psi_1, \quad \eta_2 = (1 - \xi)\psi_2, \quad (2c)$$

gdzie:

$$\alpha = \mu_0 AN^2 I_0^2 / 4mx_0^3$$

$$\beta = 2Rx_0 / \mu_0 AN^2$$



Rys. 3. Aktywne łożysko magnetyczne jako obiekt regulacji

### 3. Sterowanie ślizgowe

Założono, że struktura łożyska magnetycznego przedstawionego na rys. 2 jest niedostępna (można jedynie ingerować poprzez regulację napięcia zasilającego cewek).

Po tych założeniach można przystąpić do projektowania sterowania ślizgowego. Dla równań (2) poszukujemy takiego rozwiązania, które będzie dawało zależności pomiędzy wielkościami, których nie można zmieniać, a wielkościami, które mogą ulegać zmianom. Przesuwając w równaniu (2c) człon  $\xi\psi$  na lewą stronę i przenosząc pozostałą część na jego prawą stronę, otrzymujemy następujące wyrażenie:

$$\xi\psi_1 = \eta_1 - \psi_1, \quad \xi\psi_2 = -\eta_2 + \psi_2. \quad (3)$$

Następnie różniczkujemy względem czasu:

$$\psi_1\dot{\xi} + \dot{\psi}_1\xi = \dot{\eta}_1 - \dot{\psi}_1 = \dot{\eta}_1 - \beta(\varepsilon_1 - \eta_1), \quad (4a)$$

$$\psi_2\dot{\xi} + \dot{\psi}_2\xi = -\dot{\eta}_2 + \dot{\psi}_2 = -\dot{\eta}_2 + \beta(\varepsilon_2 - \eta_2). \quad (4b)$$

Łatwo zauważyć, że po lewej stronie równania znajduje się prędkość i przemieszczenie, które są wielkościami liniowymi. Liniowość tychże wielkości można wykorzystać do zbudowania funkcji przełączającej dla sterowania ślizgowego (inną liniową wielkością jest przyspieszenie, lecz zależy od wartości napięcia zasilającego układ).

Wartości pozostające po prawej stronie równania można z łatwością zmierzyć, są to: prąd i szybkość jego zmian mierzona poprzez połączony szeregowo z cewką – rezystor. Wykonane jest to dla obu cewek w jednakowy sposób. Strumienie magnetyczne i szybkość ich zmian nie są wartościami stałymi, co stwarza pewne problemy. Gorszą rzeczą jest to, że szybkość zmian strumienia magnetycznego nie może mieć pojedynczego znaku przez cały czas.

Jeśli ograniczyć prąd płynący w układzie łożyska magnetycznego do tego, aby płynął on tylko w jednym kierunku, wartości strumieni:  $\psi_1$  i  $\psi_2$  mogą być nieujemne. Jeżeli utrzymamy prąd punktu pracy, to strumienie magnetyczne mogą być dodatnie i prawie stałe. Ponadto, jeżeli płynący prąd w układzie jest zgodny ze sterowaniem ślizgowym, trudności związane ze zmianami strumienia magnetycznego się zmniejszają.

Przełączanie napięć wejściowych pomiędzy wartościami dodatnimi a ujemnymi jest rozwiązane w następujący sposób:

$$\varepsilon_1 = 1 - \left( \frac{U}{RI_0} \right) \mu, \quad \varepsilon_2 = 1 + \left( \frac{U}{RI_0} \right) \mu, \quad (5)$$

gdzie:

$U$  – dodatnie napięcie;

$\mu \in \{-1, 1\}$  – nowe wielkości sterujące.

Układ stałej sumy napięć posłuży utrzymaniu znamionowego prądu punktu pracy  $I_0$  (Li L., 1999). Można zauważyć na podstawie równań (5), że  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 2$ .

Napięcia zasilające układ są przełączane pomiędzy  $RI_0 + U$  i  $RI_0 - U$ , jeżeli  $U/RI_0$  jest dużo większe niż 1, to wtedy między następującymi chwilami - podczas przełączania, różniczki strumienia względem czasu:  $d\psi_1/dt$  i  $d\psi_2/dt$  są blisko jakiejś stałej wartości. Wartości  $\{\psi_1, \psi_2\}$  i  $\{d\psi_1/dt, d\psi_2/dt\}$  są odpowiednio równe 1 i  $10^3$ , więc mogą posłużyć jako liniowe współczynniki płaszczyzny przełączającej. Innym faktem jest to, że obie różniczki  $d\psi_1/dt$  lub  $d\psi_2/dt$  mają dodatni znak w całym przedziale czasu. Wszystkie te dogodności wykazują, że można zastosować równania (4a) i (4b), zależne od znaku  $\mu$ , do sterowania ślizgowego.

Przyspieszenie powinno także być zawarte w zdefiniowanej powierzchni przełączeń. Do tego celu powinno służyć wyrażenie:

$$\psi_2 - \psi_1 = \eta_2 - \eta_1 + \xi(\psi_1 + \psi_2). \quad (6)$$

Podstawiając równanie (6) do równania (2a) i zakładając  $\theta = 0$ , można zapisać:

$$\ddot{\xi} = \alpha(\psi_1 + \psi_2)(\eta_1 - \eta_2) + \alpha\xi(\psi_1 + \psi_2)^2. \quad (7)$$

Suma strumieni  $\psi_1 + \psi_2$  jest bliska 2, oczywiście pod działaniem stałej sumy napięć. Drugą liniową zmienną znajdującą się po prawej stronie równania (7) jest  $\xi$ , która związana jest z przemieszczeniem. W konsekwencji wyrażenie  $C(\eta_2 - \eta_1)$ , gdzie  $C$  jest stałą dodatnią, może zostać użyte jako przyspieszenie w płaszczyźnie przełączającej.

Łącząc razem powyżej przedstawione wzory, można zapisać dwie funkcje przełączające w następującej postaci:

$$s_1 = C(\eta_2 - \eta_1) + \psi_1 \dot{\xi} + \dot{\psi}_1 \xi, \quad (8a)$$

$$s_2 = C(\eta_2 - \eta_1) + \psi_2 \dot{\xi} + \dot{\psi}_2 \xi. \quad (8b)$$

Równania są równe  $s_1 = 0$  i  $s_2 = 0$ , gdy w przestrzeni fazowej  $\mu$  jest stałe. Z równania (4), poprzez pomiar, mogą zostać wyznaczone następujące wartości  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $d\eta_1/dt$ ,  $d\eta_2/dt$  i podstawione do wyżej sformułowanych funkcji przełączających  $s_1$  i  $s_2$ . Wszystkie współczynniki w równaniu (8a) są dodatnie, kiedy  $\mu = -1$ , dlatego też w równaniu (8b) wszystkie współczynniki są ujemne, gdy  $\mu = 1$ . Poniżej przedstawiono algorytm sterowania ślizgowego – dyskretnego w czasie:

$$\begin{aligned} &\text{Dla każdej chwilowej wartości } \rightarrow \\ &\text{jeżeli } \mu = -1 \text{ i } s_1 < 0, \text{ to } \mu = 1, \\ &\text{w przeciwnym razie jeżeli } s_2 > 0, \text{ to } \mu = -1. \end{aligned} \quad (9)$$

Zapisanie powyższego algorytmu ślizgowego sterowania ciągłego w czasie jest również możliwe, jednakże zapis w powyższej postaci, czyli dla układu dyskretnego w czasie, łatwiej opisać. Założono, że częstotliwość próbkowania jest bardzo wysoka i dlatego też nie ma znaczącej różnicy pomiędzy układem dyskretnym a ciągłym w czasie.

#### 4. Warunki ruchu ślizgowego

Funkcje przełączające  $s_1$  i  $s_2$  wiążą się bezpośrednio z szybkością zmian strumieni magnetycznych, które nie są wartościami zmiennych stanu. W celu ułatwienia analizy podano równoważne funkcje przełączające, które są wyłącznie funkcjami zmiennych stanu. Ze względu na to, że funkcja przełączająca  $s_1$  jest kontrolowana, gdy  $\mu = -1$ , natomiast  $s_2$ , gdy  $\mu = 1$ , funkcje przełączające mogą być zdefiniowane w następujący sposób:

$$s_1 = C(\eta_2 - \eta_1) + \psi_1 \dot{\xi} + \beta(\rho - \eta_1)\xi, \quad (10a)$$



$$s_2 = C(\eta_2 - \eta_1) + \psi_2 \dot{\xi} + \beta(\rho - \eta_2)\xi. \quad (10b)$$

Zapisane powyżej funkcje przełączające nie mają wpływu na przedstawiony powyżej algorytm sterowania ślizgowego (9), gdzie  $\rho = 1 + U/RI_0$  jest dodatnią amplitudą w wejściu napięciowym, stąd  $s_1$  i  $s_2$  zapisane są w powyższej postaci (10). Łatwo zauważyć, że w wyniku przybliżenia pierwszego rzędu wokół punktów równowagi  $s_1$  i  $s_2$ , funkcje stają się identyczne i liniowe ze względu na liniowość składników  $d^2\xi/dt^2$ ,  $d\xi/dt$  i  $\xi$ .

Przedefiniowanie funkcji przełączających pozwoliło rozwiązać problem związany z szybkością zmian strumienia, tzn. to, że zmiana ta nie mogła mieć przez cały czas tego samego znaku. Rozwiązano to w taki sposób, że tylko jedna z funkcji przełączających (10) jest dostępna w czasie pomiaru prądu i prędkości jego zmian, pomijając momenty, gdy  $\mu$  jest przełączane pomiędzy 1 a -1.

Podstawowym wymaganiem dla algorytmu (9) jest to, że warunki te muszą być spełnione. Dlatego więc wymaga się, aby  $ds_1/dt < 0$  kiedy  $\mu = -1$  i  $ds_2/dt > 0$  gdy  $\mu = 1$ , lecz nie jest to jednak jeszcze wystarczające. Ze względu na przejrzystość wymagane jest, aby  $ds_2/dt < 0$ , kiedy  $\mu = -1$  i  $ds_1/dt > 0$  kiedy  $\mu = 1$ . Założono więc, że gdy  $|d\xi/dt|$  jest ograniczone i napięcie zasilające  $U$  wystarczająco wysokie, to wtedy kolejne warunki będą spełnione:

$$\dot{s}_1 < 0, \quad \dot{s}_2 < 0 \quad \text{kiedy} \quad \mu = -1, \quad (11a)$$

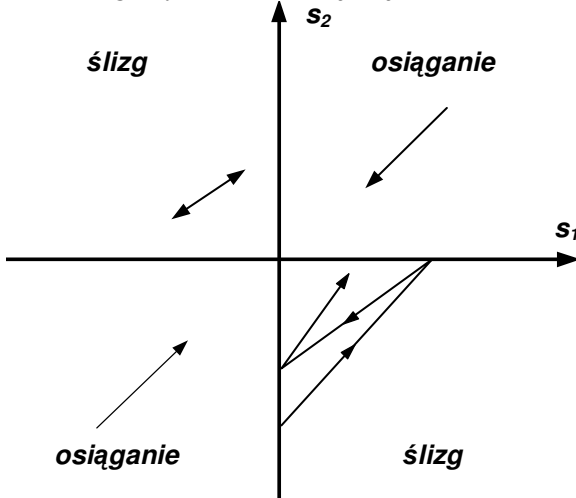
$$\dot{s}_1 > 0, \quad \dot{s}_2 > 0 \quad \text{kiedy} \quad \mu = 1. \quad (11b)$$

Warunki osiągnięcia przez układ ruchu ślizgowego zostaną przedstawione poniżej.

W sterowaniu ślizgowym liczba powierzchni ślizgowych jest ściśle związana z liczbą zmiennych sterujących. W naszym przypadku zdefiniowane są dwie powierzchnie przełączające, gdzie jest tylko jedno wejście sterujące. Najczęściej nie można utrzymać dwóch funkcji, aby były one jednocześnie zerowe  $s_1 = 0$  i  $s_2 = 0$ , lecz za pomocą algorytmu (9) można utrzymywać funkcje przełączające  $s_1$  i  $s_2$  blisko wartości zerowej. W rzeczywistości sytuacja, gdzie  $s_1 \cdot s_2 > 0$ , ma miejsce w osiągnięciu fazy, następnie, jeżeli przełączanie zachodzi nieskończenie szybko, utrzymywana jest sytuacja  $s_1 \cdot s_2 \leq 0$  w ślizgowej fazie. W wyniku nieskończenie szybkiego przełączania funkcjonowanie algorytmu jest wyraźniejsze, jeżeli:

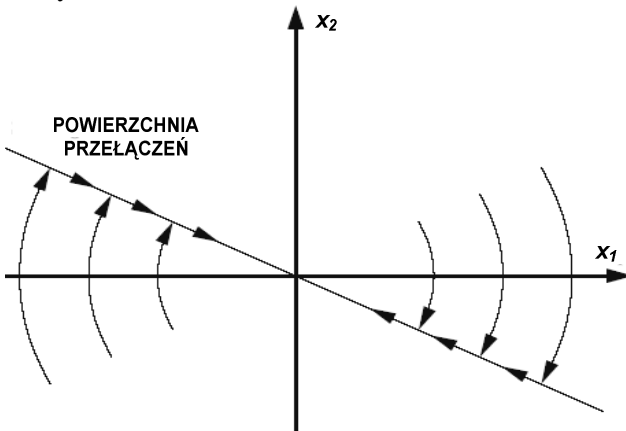
- jeżeli  $s_1 < 0$  i  $s_2 < 0$ , to  $\mu = 1$  do czasu, gdy  $s_2 = 0$ ;
- jeżeli  $s_1 > 0$  i  $s_2 > 0$ , to  $\mu = -1$  do czasu, gdy  $s_1 = 0$ ;
- jeżeli  $s_1 \leq 0$  i  $s_2 \geq 0$ , to  $\mu$  jest przełączane pomiędzy -1 i 1 z 50% cyklem pracy;
- jeżeli  $s_1 \geq 0$  i  $s_2 \leq 0$ , to  $\mu$  jest przełączane pomiędzy -1 i 1 do chwili, gdy  $s_1$  i  $s_2$  osiągną kolejno zero.

Prawa związane z przełączaniem są przedstawione na rys. 4. Łatwo zauważyć, że warunki osiągnięcia fazy muszą być zgodne z algorytmem (9), aby poprawnie działał algorytm. Z rys. 4 widać, że faza osiągnięcia jest symetryczna w obu obszarach osiągnięcia płaszczyzny ślizgowej, natomiast w fazie ślizgowej, w obszarze, gdzie występuje ruch ślizgowy, zachowanie jest już inne.



Rys. 4. Obszary faz ślizgu i osiągnięcia tego ruchu

Główna idea i typowy portret fazowy ilustrujący sterowanie ślizgowe przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Typowy portret fazowy ruchu ślizgowego

## 5. Stabilność ruchu ślizgowego

Dla uproszczenia opisu układu wprowadzimy odpowiednio strumienie magnetyczne:  $\psi_0 = (\psi_1 + \psi_2)/2$  i  $\psi = (\psi_2 - \psi_1)/2$ . Podobnie, do równań na prąd punktu pracy i prąd pobudzający układ wprowadzimy:  $\eta_0 = (\eta_1 + \eta_2)/2$  i  $\eta = (\eta_2 - \eta_1)/2$ . Powyższe równania wskazują, że równowaga ma miejsce, gdy  $\psi_0 = \eta_0 = 1$ . Według wzoru (2c) jest:

$$\eta_0 = \psi_0 - \xi\psi. \quad (12)$$

$$\eta = \psi - \xi\psi_0. \quad (13)$$

Podstawiając  $s_0 = (s_1 + s_2)/2$ , a następnie z (10) i (12) - (13), otrzymuje się:

$$s_0 = \frac{2C}{4\alpha\psi_0} \ddot{\xi} + \psi_0 \dot{\xi} + [\beta\rho - (2C + \beta)\psi_0] \xi. \quad (14)$$

Dodając dwa równania (2b) i zamieniając (5) i (12) - (13), dochodzi się do równania:

$$\frac{1}{\beta} \dot{\psi} + \psi_0 = 1 + \xi\psi. \quad (15)$$

Równania (14) - (15) są rozpatrywane jako równania stanu trzeciego rzędu z wejściami, które są umieszczone po prawej stronie tychże równań. Układ jest układem autonomicznym i stabilnym lokalnie dookoła punktu równowagi o wartościach  $\xi = d\xi/dt = 0$  i  $\psi_0 = 1$ . Sterowanie ślizgowe ma miejsce, gdy spełniony jest warunek  $s_1 \cdot s_2 \leq 0$ , który pozwala stwierdzić, że  $|s_1 + s_2| \leq |s_2 - s_1|$ , jest prawdziwe dla poniższej zależności:

$$|s_0| \leq \left| \xi\dot{\psi} - \beta\psi\xi + \beta\psi_0\xi^2 \right|. \quad (16)$$

W ten sposób  $s_0$  jest ograniczone kwadratową funkcją zapisaną w zmiennych stanu, co powoduje, że dynamika ruchu ślizgowego jest lokalnie stała. Choć dynamika układu opisanego równaniami (14) - (15) jest dynamiką ruchu trzeciego rzędu, to uwzględnienie równania (16) prowadzi do dynamiki ruchu ślizgowego czwartego rzędu. Wyrażenie (16) jest nierównością, w której  $s_0$  nie jest funkcją zmiennych stanu  $\xi$ ,  $d\xi/dt$  i  $\psi_0$ . W ten sposób wyrażenie  $d^2\xi/dt^2$  w równaniu (14) również nie jest funkcją zmiennych stanu, ale kolejną czwartą zmienną stanu. Dlatego też dynamika ruchu ślizgowego nie jest całkowicie określona przez powierzchnie przełączające. Jeżeli jednak warunki osiągnięcia ruchu ślizgowego są

zgodne z warunkami (11), to odporność układu ze standardowym sterowaniem ślizgowym nie jest zapewniona.

## 6. Symulacja komputerowa

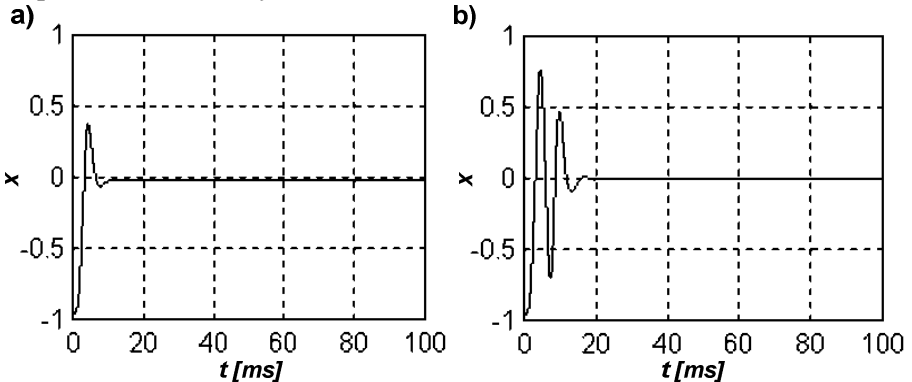
Przyjmujemy następujące parametry aktywnego łożyska magnetycznego:  $A = 10^{-3} \text{ m}^2$ ;  $N = 300$ ;  $m = 0.3 \text{ kg}$ ;  $x_0 = 0.3 \times 10^{-3} \text{ m}$  i  $R = 0.27 \Omega$ . Efekt skończonej przenikalności nie jest brany pod uwagę, dlatego  $l = 0$ . Inne parametry, takie jak:  $I_0 = 0.8 \text{ A}$ ,  $U = 25 \text{ V}$  i  $C = 300$ , mogą być zmieniane. Zmieniając indukcję magnetyczną od wartości  $0.1 \text{ mH}$  w obie strony, można dokonać pomiaru prędkości zmian prądu. Okres próbkowania wyniósł  $100 \text{ kHz}$ .

Symulacje wykonano na podstawie równań opisujących płaszczyzny przełączające (10), wprowadzając zmienną  $z$ , sformułowaną jako:

$$\tau \dot{z} + z = -C(\eta_2 - \eta_1), \quad (17)$$

która została dodana do prawych stron w wyrażeniach (10a) i (10b). W taki sposób, ze względu na stan ustalony, został zredukowany (skrócony) człon  $C(\eta_2 - \eta_1)$ . Wartość  $\tau$  wynosi  $0.005 \text{ s}$ .

Podobną koncepcją jest obserwacja wielkości zakłócających dla osiągnięcia zerowej wartości odchylenia dla stanów ustalonych w wyniku działania zewnętrznych sił zakłócających  $\theta$ . Symulacje przeprowadzono dla wartości początkowej  $\xi = -0.9$ , podczas gdy, wartości początkowe pozostałych zmiennych wynosiły zero (rys. 6). Przyjęto założenie, że ruch odbywa się tylko w kierunku pionowym, a więc masa zawieszona obiektu w lewitacji magnetycznej (wał) wywołała statyczne przemieszczenie (rysunek 6a).



**Rys. 6.** Wyniki symulacji: a) uruchomienie bez obserwatora zakłóceń; b) uruchomienie z obserwatorem zakłóceń

W wyniku symulacji stwierdzono, że funkcjonowanie układu jest wrażliwe na niektóre parametry. Wartości funkcji przełączających, które są bliskie zeru, nie zapewniają tego, że układ osiąga stan ustalony. Opierają się one na kasowaniu dwóch dużych wartości - dwóch składników po prawych stronach wyrażeń (4). Mały błąd procentowy zależności na  $\beta$ , które wykorzystano w zbudowaniu wyrażenia (4), powoduje ostatecznie duże błędy  $s_1$  i  $s_2$ , kiedy stan układu jest bliski punktu równowagi.

## 7. Wnioski

W wyniku szybkiego przełączania, kiedy napięcia wejściowe są odcinkami stałe, niektóre funkcje zmiennych stanu są dostępne poprzez pomiar prądu płynącego i szybkości jego zmian. Używając tych funkcji jako funkcji przełączających, stan systemu doprowadza się do podobszaru przestrzeni stanu i utrzymuje się w nim, ponieważ dynamika układu jest stabilna w tym podobszarze.

Sterowanie ślizgowe można zastosować do łożysk magnetycznych w celu polepszenia ich odporności na zakłócenia. Jednakże zaproponowane w tej pracy sterowanie ślizgowe układu aktywnego łożyska magnetycznego, ze względu na małą liczbę sygnałów pomiarowych w trakcie przełączania, powoduje utratę dobrych własności sterowania ślizgowego.

Dynamika ruchu ślizgowego zależy od zakłóceń i parametrów obiektu regulowanego, takich jak: prąd punktu pracy i amplituda napięcia zasilania. Rozwiązanie tych problemów będzie przedmiotem dalszych prac badawczych.

### LITERATURA

1. Li L., Linearizing Magnetic Bearing Actuators by Constant Current Sum, Constant Voltage Sum, and Constant Flux Sum, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 35, no. 1, January 1999, pp. 528-535.
2. Nonlinear Control Design Blockset User's Guide Version 5. MathWorks 1999.
3. Gosiewski Z., Hanc D., Sliding Mode Control of an Aircraft Electric Drive, Proc. Seminar "Recent Research and Design Progress in Aeronautical Engineering and its Influence on Education", Warsaw, 2000, Poland.
4. Gosiewski Z., Falkowski K., Wielofunkcyjne łożyska magnetyczne, Monografia nr 19, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2003.

## **SLIDING-MODE CONTROL OF SINGLE-AXIS MAGNETIC BEARING**

**Abstract:** The methodology of sliding mode control design for active magnetic bearings is presented in the paper. The phase plane method with using of two switching planes (described by functions  $s_1(x)$ ,  $s_2(x)$ ) is shown. The sliding motion is realized in the state subspace, when  $s_1(x) s_2(x) \leq 0$ . Two opposite electromagnets are supplied by constant voltage with switching between the positive and negative values of the voltage.

For the rotor-bearing system shown in the below Figure the complete theory of bang-bang control is developed.

**Keywords:** sliding mode control, active magnetic bearing, phase space, variable structure system.

Pracę sfinansowano w ramach pracy statutowej nr S/WM/3/05 i wykonano w Katedrze Automatyki i Robotyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.

Zdzisław GOSIEWSKI<sup>1</sup>, Krzysztof FALKOWSKI<sup>1</sup>, Paweł PISKUR<sup>2</sup>

## **ZASTOSOWANIE TABLIC HALBACHA W MASZYNACH ELEKTRYCZNYCH RUCHU LINIOWEGO I OBROTOWEGO**

**Streszczenie:** W referacie przedstawione są przykłady wykorzystania tablic Halbacha w maszynach elektrycznych ruchu liniowego i obrotowego oraz krótka charakterystyka współczesnych magnesów trwałych. Przeprowadzona analiza rozkładu strumienia magnetycznego dla płaskiej tablicy Halbacha wykazała trzykrotnie większą wartość strumienia magnetycznego po jednej stronie tablicy w porównaniu z wartością strumienia po stronie przeciwnej. Specjalnie ukierunkowanie strumienia magnetycznego pozwala stosować magnesy trwałe w szerszym zakresie oraz miniaturyzować projektowane urządzenia.

**Słowa kluczowe:** tablica Halbacha, magnes trwały, silnik liniowy, silnik obrotowy

### **1. Wstęp**

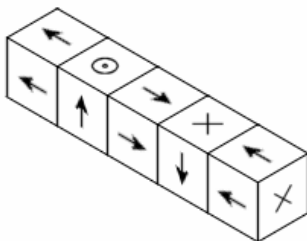
Magnetyczna lewitacja jest to proces, który za pomocą sił pola magnetycznego pozwala utrzymywać w pewnej odległości względem siebie dwa obiekty. W zależności od właściwości magnetycznych użytych obiektów mogą to być siły odpychania lub przyciągania. W diamagnetyku pole magnetyczne powoduje indukcję momentu magnetycznego skierowanego przeciwnie do wywołującego go pola. Jest to zjawisko analogiczne do reguły Lenza w elektryce, różniące się tym, że prąd indukcyjny w zjawisku diamagnetyzmu nie zanika. Zgodnie z efektem Meissnera, nadprzewodniki ( $\mu_r = 0$ ) odpychają pole magnetyczne znacznie lepiej niżeli diamagnetyki. Magnes trwały jest utrzymywany w stałej odległości od nadprzewodnika. Zasadę tę wykorzystuje kolej magnetyczna (ang. *Magnetic levitation train*), w której dodatkowo stała odległość jest utrzymywana z wykorzystaniem pętli sprzężenia zwrotnego. Inną metodą uzyskania magnetycznej lewitacji jest oddziaływanie elektromagnesów z ferromagnetykami (przyciąganie) lub samych elektromagnesów (przyciąganie lub odpychanie).

---

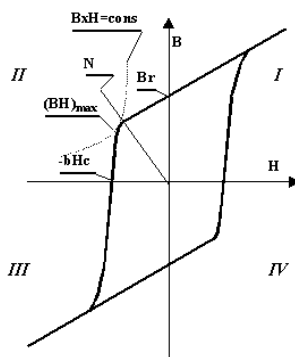
<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45c,

<sup>2</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, 75-620 Koszalin ul. Raclawicka 15-17.

Powyższe rozwiązania wymagają stosowania elektromagnesów dużych rozmiarach, do których trzeba doprowadzić źródło zasilania, jak również dodatkowej instalacji chłodzenia w celu otrzymania efektu nadprzewodnictwa. Magnesy trwałe do niedawna stosowano w dość wąskim zakresie. Jednak rozwój produkcji magnesów oraz specjalna konfiguracja ułożenia, opracowana w latach osiemdziesiątych przez Halbacha, dały nowe możliwości. Obecnie prowadzi się badania nad zastosowaniem tablic Halbacha w maszynach elektrycznych ruchu liniowego i obrotowego. Opracowana przez Halbacha metoda pozwala na znacznie efektywniejsze wykorzystanie magnesów trwałych poprzez ukierunkowywanie strumienia magnetycznego. W referacie przedstawione będą sposoby wykorzystania tablic Halbacha w maszynach elektrycznych ruchu liniowego i obrotowego oraz przykładowa analiza rozkładu strumieni magnetycznych w tablicy Halbacha. Na poniższym rysunku przedstawiona została liniowa tablica Halbacha zbudowana z pięciu magnesów trwałych.



Rys.1. Tablica Halbacha



Rys.2. Pętla histerezy  $B = f(H)$

## 2. Charakterystyka magnesów



Optymalizacja pola magnetycznego magnesów trwałych odbywa się również poprzez dobór odpowiedniego rodzaju magnesów. Należy wziąć pod rozwagę takie właściwości magnesu jak (rys.2): remanencję  $B_r$ , pole koercji  $bH_c$ , gęstość energii (maksymalną wartość iloczynu  $(B \times H)_{\max}$  na krzywej odmagnesowania magnesu, czyli „moc” magnesu), odporność na temperaturę i możliwość uzyskania skomplikowanych kształtów.

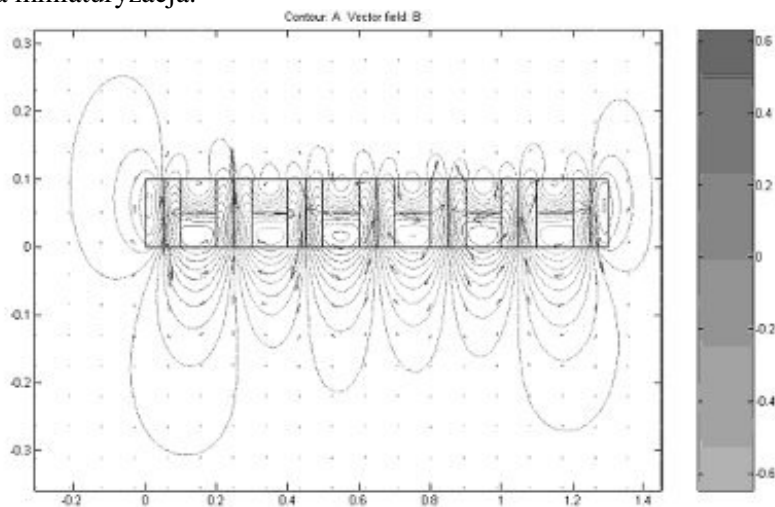
Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę kilku typów magnesów. Od założeń konstrukcyjnych a czasami również ekonomicznych zależy, zastosowanie którego magnes okaże się najlepsze.

Magnesy ferrytowe produkuje się jako materiały anizotropowe i izotropowe. Przy produkcji magnesów anizotropowych operacja prasowania odbywa się w polu magnetycznym orientującym ziarna osiami łatwego namagnesowania wzdłuż linii sił pola, dzięki czemu uzyskuje się około czterokrotnie większą gęstość energii  $(BH)_{\max}$  i około dwukrotnie wyższą remanencję  $B_r$  aniżeli w ferrytowych magnesach izotropowych. Do głównych zalet magnesów ferrytowych zalicza się duże pole koercji  $bH_c$  i wysoką rezystywność, umożliwiającą pracę w zmiennych polach magnetycznych, wysoką maksymalną temperaturę pracy  $T_{\max}$ , dużą odporność na korozję i względnie niską cenę.

Magnesy alnico cechuje najwyższa spośród wszystkich magnesów stabilność temperaturowa parametrów magnetycznych, a także bardzo wysoka temperatura Curie  $T_c$  i związana z nią maksymalna temperatura pracy  $T_{\max}$ . Mają one także najwyższą odporność na korozję. Maksymalne gęstości energii  $(BH)_{\max}$  tych magnesów są nieco większe lub zbliżone do wartości  $(BH)_{\max}$  charakterystycznych dla anizotropowych magnesów ferrytowych, natomiast ich wartości remanencji  $B_r$  są podobne jak dla magnesów samarowo - kobaltowych i spiekanych magnesów neodymowych. Małe wartości koercji  $bH_c$  uniemożliwiają jednak stosowanie magnesów alnico w obecności dużych pól odmagnesowujących, co ogranicza zakres ich zastosowania. Podstawową zaletą magnesów alnico jest to, że górują nad innymi magnesami stabilnością temperaturową parametrów magnetycznych, maksymalną temperaturą pracy  $T_{\max}$  oraz odpornością na korozję.

Magnesy neodymowe spiekane wytwarza się metodami metalurgii proszków, a dzięki prasowaniu w polu magnetycznym lub obróbce plastycznej w podwyższonej temperaturze uzyskują strukturę anizotropową. Uzyskano dla nich rekordowo duże maksymalne gęstości energii  $(B \times H)_{\max}$  (ok. 400 kJ/m<sup>3</sup>). Magnesy te charakteryzują się dużą wartością remanencji  $B_r$ , podobne jak magnesy alnico, jednak ich pola koercji  $bH_c$  są kilkudziesięciokrotnie wyższe, co umożliwia pracę w obecności silnych pól odmagnesowujących. W porównaniu z magnesami samarowo-kobaltowymi mają jednak niższy zakres temperatury pracy, a ich właściwości magnetyczne są w znacznie większym stopniu zależne od temperatury. Ze względu na zawartość neodymu o dużej skłonności do utleniania magnesy powle-

kane są cienkimi warstwami antykorozyjnymi. Stosowane są tam, gdzie wymagana jest duża miniaturyzacja.

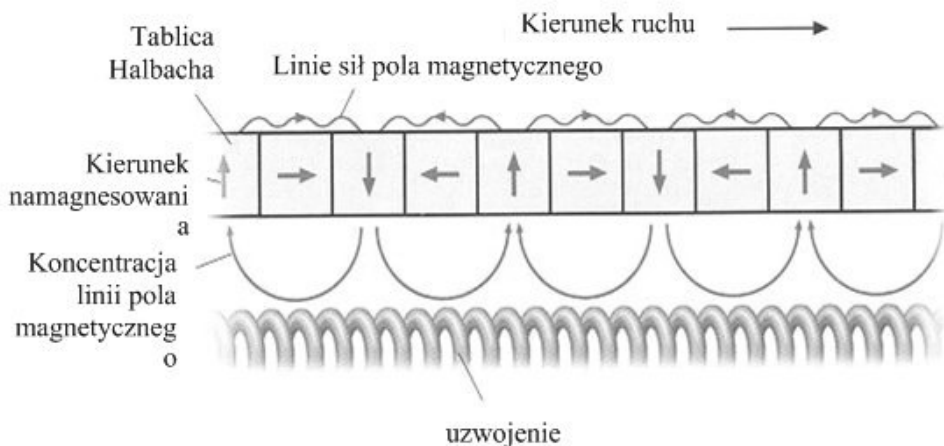


Rys.3. Symulacja rozkładu linii sił potencjału pola magnetycznego tablicy Halbacha

Magnesy neodymowe wiązane można wytwarzać jako magnesy izotropowe oraz anizotropowe. Najczęściej jednak są to magnesy izotropowe, których maksymalna gęstość energii  $(BH)_{\max}$  oraz remanencja  $(B_r)$  są około dwukrotnie większe od najmocniejszych magnesów ferrytowych. Dla anizotropowych magnesów wiązanych Nd-Fe-B, wartości te są około czterokrotnie większe. Oba wymienione typy magnesów charakteryzują się bardzo dużymi wartościami koercji  $(bH_c)$ , co umożliwia stosowanie ich w obecności silnych pól odmagnesowujących. Dzięki hermetycznemu zamknięciu ziaren proszku Nd-Fe-B w osnowie tworzywa sztucznego, magnesy te cechuje wysoka odporność na korozję. Najważniejszymi zaletami wiązanych magnesów Nd-Fe-B są: duża powtarzalność właściwości magnetycznych, możliwość uzyskania skomplikowanych i powtarzalnych kształtów bez drogiej obróbki mechanicznej, wysoką odporność na korozję oraz bardzo duże wartości koercji  $(bH_c)$ .

### 3. Tablice Halbacha w maszynach elektrycznych ruchu liniowego

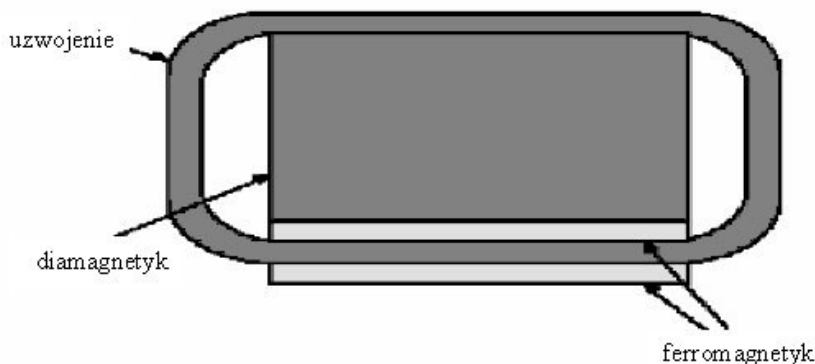
Ułożenie magnesów trwałych w konfiguracji jak na rys.3 powoduje skoncentrowanie się strumienia magnetycznego po jednej stronie. Natomiast po drugiej stronie tablicy Halbacha linie pola magnetycznego mają przebieg sinusoidalny a pole magnetyczne jest znacznie słabsze. Rozwiązanie takie nie wymaga stosowania nadprzewodzących magnesów czy elektromagnesów, które potrzebują dodatkowego źródła zasilania i instalacji chłodzenia.



**Rys.4.** Magnetyczna lewitacja magnesów ułożonych w konfiguracji tablicy Halbacha z uzwojną częścią pierwotną silnika liniowego

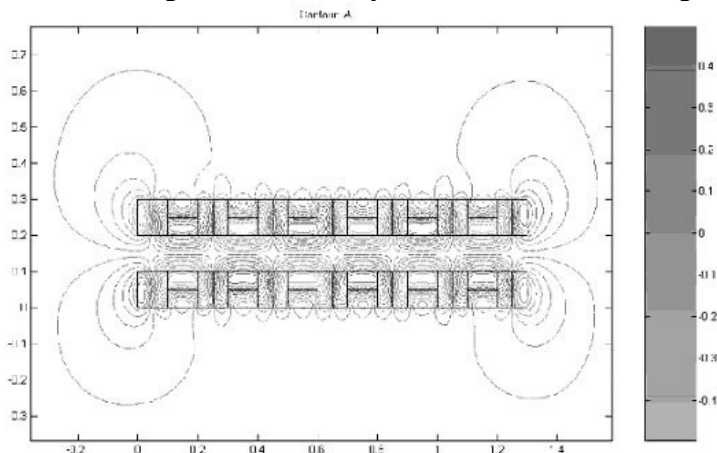
Jeżeli zbliżymy elektromagnes do tablicy Halbacha (rys.4) po stronie koncentracji strumienia magnetycznego, siłą odpychającą powoduje pole magnetyczne, generowane przez natężenie prądu w uzwojeniu. Pole magnetyczne generowane przez uzwojenie powstaje w chwili ruchu magnesów trwałych względem uzwojenia. Rozwiązanie to wymaga nadania prędkości początkowej magnesom trwałym. Jednak regulacja odległości pomiędzy uzwojeniem i tablicą Halbacha następuje samoczynnie. Wraz ze zmniejszeniem się odległości wzrasta pole magnetyczne, w którym porusza się uzwojenie, co z kolei powoduje indukowanie się większej siły elektromotorycznej i generowanie mocniejszego pola magnetycznego przez uzwojenie.

Koncentrację strumienia magnetycznego od uzwojenia można uzyskać poprzez zastosowanie do budowy rdzenia diamagnetyka, a w elemencie uzwojenia znajdującym się najbliżej magnesów przez wprowadzenie ferromagnetyka (rys.5).



Rys.5. Schemat budowy rdzenia części pierwotnej

Tablica Halbacha może być wykorzystana w układzie odpychania lub przyciągania, w którym oba elementy są zbudowane z magnesów trwałych. Pojawia się jednak problem z utrzymaniem stałej odległości pomiędzy elementami, jak również nadanie prędkości postępowej części wtórnej. Siła odpychania jest nieliniowa w funkcji odległości, co powoduje podatność układu na występowanie długotrwałych drgań po wytrąceniu układu z położenia równowagi. Układ magnesów trwałych w konfiguracji odpychania może być wykorzystany do budowy kinematycznego zasobnika energii lub układu łożyskowania wału obrotowego.



Rys.6. Rozkład linii sił pola magnetycznego w układzie odpychania dwóch tablic Halbacha

#### **4. Tablice Halbacha w maszynach elektrycznych ruchu obrotowego**

W maszynach elektrycznych ruchu obrotowego tablice Halbacha mogą być wykorzystane do kompensacji siły przyciągania ziemskiego oraz utrzymania stałej szczeliny powietrznej pomiędzy wirnikiem i stojanem. Do budowy tablicy Halbacha mogą być wykorzystane elektromagnesy, w których zmianę gęstości strumienia magnetycznego uzyskuje się poprzez zmianę natężenia prądu. Elektromagnesy dopasowane wymiarami oraz właściwościami magnetycznymi mogą być umieszczone w miejscach magnesów trwałych. Regulacja natężenia prądów w cewkach elektromagnesów pozwala utrzymać stałe odległości i tłumić drgania. Elektromagnesy są częściami składowymi tablicy Halbacha umieszczonej na stojanie, co eliminuje problem dostarczenia prądu do uzwojenia cewek. Do pomiaru odległości konieczne jest zastosowanie czujników pomiarowych przekazujących sygnał w pętli sprzężenia zwrotnego do zasilaczy elektromagnesów.

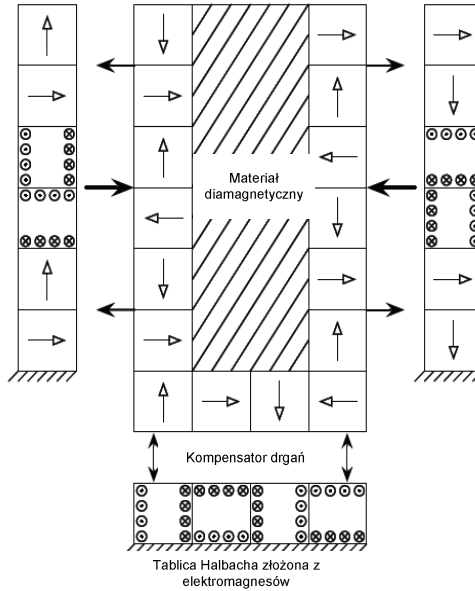
Na rysunku 7 przedstawiono schemat rozmieszczenia tablicy Halbacha w płaszczyźnie równoległej do wektora prędkości obrotowej. Rozmieszczenie to jest podobne do konfiguracji w silnikach liniowych. Zasada wykorzystania tablic Halbacha w maszynach elektrycznych ruchu obrotowego polega na ukierunkowaniu strumienia magnetycznego magnesów trwałych w kierunku rdzenia ferromagnetycznego. Odpowiednio ukierunkowane wektory magnesów trwałych zamykają strumień magnetyczny w płaszczyźnie stojana i wirnika. Po zewnętrznej stronie tablicy Halbacha stosowane są pierścienie utrzymujące magnesy w żądanym położeniu. Pierścienie przeciwdziałają siłom odpychania magnesów, które sąsiadują z magnesami tymi samymi biegunami. Siła pomiędzy sąsiadującymi magnesami może być liczona w funkcji bardzo małych przemieszczeń wg wzoru:

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \int \frac{B \cdot H}{2} dv, \quad (1)$$

gdzie:  $BH$  – gęstość energii.

Wzór ten jest mało praktyczny w obliczeniach numerycznych, ze względu na skończoną liczbę przemieszczeń, dla których trudno jest aproksymować wartość pola magnetycznego magnesów o nieregularnych kształtach i różnych wektorach namagnesowania. Wykorzystując równanie Maxwella (Stratton 1941), poprzez całkowanie po określonej powierzchni można wyznaczyć kierunek i wartość siły oddziaływania pomiędzy dwoma magnesami.

$$\oint \vec{S} \cdot \vec{n} da. \quad (2)$$



**Rys.7** Wykorzystanie elektromagnesów do budowy tablic Halbacha w maszynach elektrycznych ruchu obrotowego

Składowe tensora siły magnetycznej wynoszą:

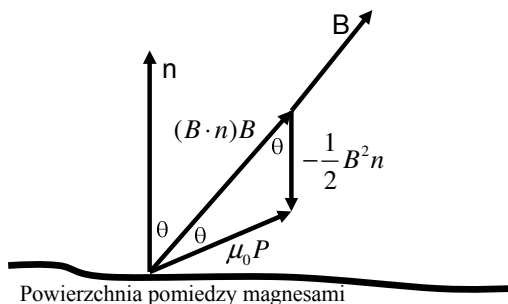
$${}^2S^m = \frac{1}{\mu_0} \begin{pmatrix} B_x^2 - \frac{B^2}{2} & B_x B_y & B_x B_z \\ B_y B_z & B_y^2 - \frac{B^2}{2} & B_y B_z \\ B_z B_x & B_z B_y & B_z^2 - \frac{B^2}{2} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

(Tensor siły magnetycznej  ${}^2S^m$  przenika całą powierzchnię). Rozwijając iloczyn  $\vec{S} \cdot \vec{n}$  można wyrażenie  $\iint \vec{S} \cdot \vec{n} da$  zapisać jako:

$$F = \frac{1}{\mu_0} \iint_S [(B \cdot n)B - \frac{1}{2} B^2 n] da. \quad (4)$$

Wektor siły  $P = \frac{1}{\mu_0}[(B \cdot n)B - \frac{1}{2}B^2n]$  nie leży generalnie wzdłuż wektora

$\mathbf{B}$ , lecz w pod kątem  $2\theta$  do wektora  $\mathbf{n}$  w płaszczyźnie utworzonej poprzez wektor  $\mathbf{n}$  i wektor  $\mathbf{B}$ .



**Rys.8.** Kierunek działania siły pola magnetycznego.

Z zależności trygonometrycznych można zapisać:

$$(\mu_0 P)^2 = \left(\frac{B^2}{2}\right)^2 + (B^2 \cos \theta)^2 - 2\left(\frac{B^2}{2}\right)(B^2 \cos \theta) \cos \theta, \quad (5)$$

$$(\mu_0 P)^2 = \frac{B^4}{4} + B^4 \cos^2 \theta - B^4 \cos^2 \theta, \quad (6)$$

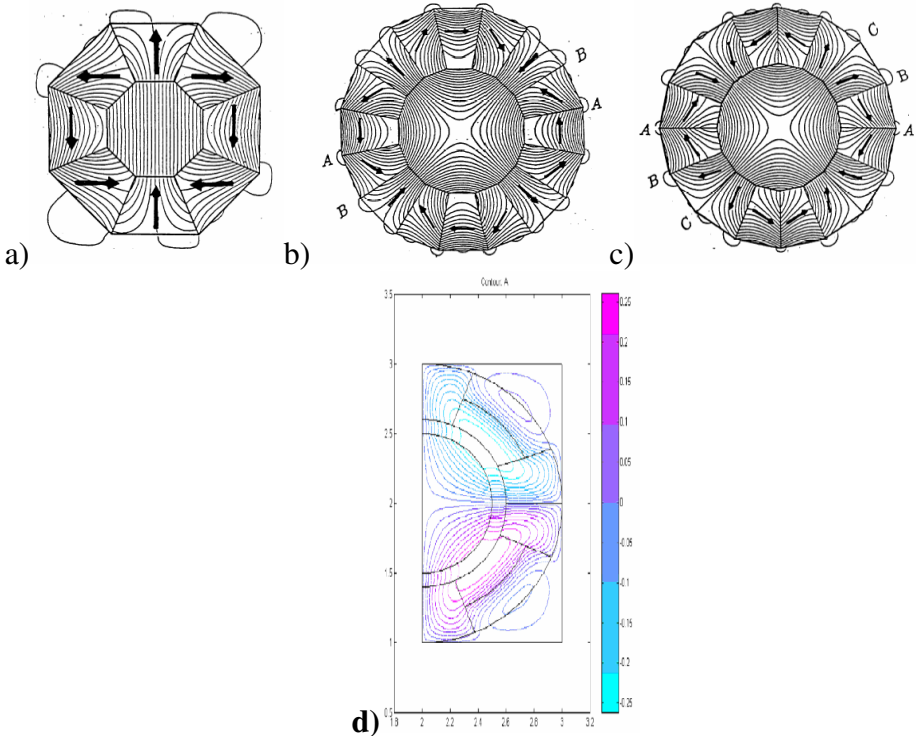
ostatecznie wyrażenie na wartość oddziaływania dwóch położonych obok siebie magnesów przyjmuje postać:

$$\mu_0 P = \frac{B^2}{2}, \quad (7)$$

gdzie:  $P$  – wektor siły,  $B$  – remanencja,  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni.

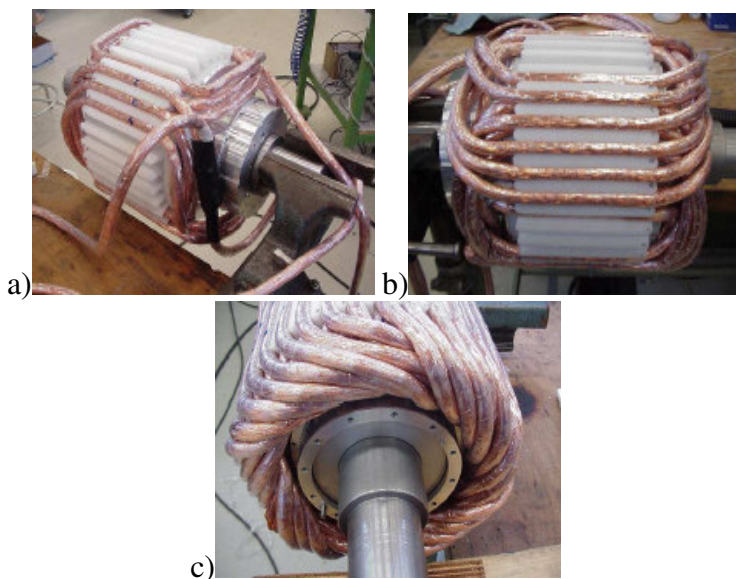
Różne konfiguracje tablic Halbacha w maszynach elektrycznych ruchu obrotowego są przedstawione na rysunku 9. Remanencja ( $B_r$ ) w tablicach Halbacha wykonanych z magnesów samarytowo-kobaltowych lub neodymowych spiekanych osiąga wartość 1 [Tesla]. Dla tych danych zostały oszacowane siły w płaszczyznach A-A, B-B i C-C (rys.9 b i c). W tablicy Halbacha z rysunku b w płaszczyźnie A-A pomiędzy magnesami działa siła przyciągania o wartości 330[N], natomiast w płaszczyźnie B-B działa siła odpychająca o wartości 179[N]. W tablicy Halbacha z rysunku 9c w płaszczyźnie A-A i B-B działają siły przyciągania o wartości kolejno: 435[N] i 78,3[N], natomiast w płaszczyźnie C-C działa siła odpychająca o wartości

352,8[N]. Większe siły wewnętrzne w tablicy Halbacha z rysunku 9c są spowodowane umieszczeniem magnesów obok siebie biegunami N do N i S do S. Mniejsze siły wewnętrzne w tablicy Halbacha występują w konfiguracji z rysunku 9b, jednak zastosowane magnesy mają zróżnicowane względem kształtu kierunki namagnesowania, co stwarza konieczność produkcji specjalnej partii magnesów. Istnieje możliwość wykorzystania magnesów neodymowych wiązanych, jednak należy się liczyć z wysokimi kosztami projektu. Na rysunku 9d pokazana jest połowa tablicy Halbacha, w której liczba magnesów ograniczono do magnesów w kształcie odcinków koła namagnesowanych równoległe i prostopadle do promienia. Takie rozwiązania są stosunkowo proste, ponieważ strumienie magnetyczne, generują cztery siły promieniowe rozmieszczone względem siebie o kąt  $90^{\circ}$  i są one stosunkowo proste.



**Rys.9.** Różne konfiguracje tablic Halbacha dla maszyn elektrycznych ruchu obrotowego.



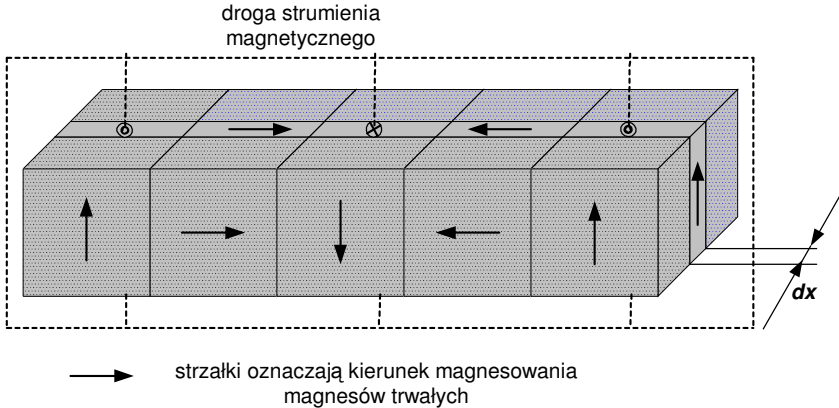


**Rys.10.** Stator trójfazowego kinematycznego zasobnika energii typu flywheel

Koncentracja strumienia magnetycznego następuje w wewnętrznej części tablicy Halbacha. W jej środku można umieścić uzwojenie trójfazowe, nawinięte na stojanie. Żyłki uzwojenia wykonane są z materiału diamagnetycznego, tak by strumień magnetyczny wytwarzany przez przepływający w uzwojeniu prąd był skierowany w kierunku tablicy Halbacha. Dodatkowo w celu zwiększenia bezwładności części ruchomej (i mocowania magnesów trwałych), na zewnętrznej stronie tablicy Halbacha można zamocować pierścien z włókien węglowych. Poniższe rysunki 10 (a) i (b) przedstawiają uzwojenie stojana podczas procesu uzwojania, natomiast rysunek 10 (c) przedstawia kompletny, uzwojony stojan.

## **5. Analiza rozptyłu strumieni magnetycznych w tablicy Halbacha**

Analiza wartości strumieni magnetycznych zostanie przeprowadzona z wykorzystaniem praw Kirchoffa i Ohma dla obwodów magnetycznych. Wartości strumieni są potrzebne do wyznaczenia wartości siły magnetycznej. Jednak ta analiza zostanie ograniczona do rozptyłu strumieni w celu określenia różnic strumienia po obu stronach tablicy Halbacha (Falkowski 2005).



Rys.10. Poddana analizie tablica Halbacha

Z obwodu magnetycznego wydzielona została jego część o wymiarze  $dx$ . Do wyznaczenia wartości oporu magnetycznego poszczególnych części obwodu wykorzystany został wzór:

$$R_{\mu} = \frac{l_{\mu}}{\mu_0 A_{\mu}} \quad (8)$$

gdzie:

$R_{\mu}$  – reluktancja,  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni,  $l_{\mu}$  - długość odcinka, dla którego obliczana jest reluktancja,,  $A_{\mu}$  - pole przekroju odcinka, dla którego obliczana jest reluktancja.

W celu określenia źródła energii magnes stały zastąpiono cewką o tych samych rozmiarach, przez którą przepływa prąd magnesujący  $I_m$  o wartości:

$$I_m = a_m h, \quad (9)$$

gdzie:  $h$  – jest wymiarem geometrycznym magnesu,  $a_m$  – okładem magnesującym równym:

$$a_m = \frac{M \times n}{\mu_0} = \frac{M}{\mu_0} \quad \text{gdzie } M=B_r, \quad (10)$$

gdzie:  $M$  – wektor namagnesowania,  $n$  – wektor jednostkowy,  $B_r$  – remanencja.

Na rysunku 12 przedstawiono schemat obwodu magnetycznego dla zdyskretyzowanej części tablicy Halbacha. Dla siedmiu węzłów i sześciu oczek napisano, zgodnie z prawami Kirchoffa i Ohma, równania, w których niewiadomymi jest

dwanaście strumieni magnetycznych. Równania te w formie macierzowej mają postać:

$$\mathbf{R}\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\Theta} \quad (11)$$

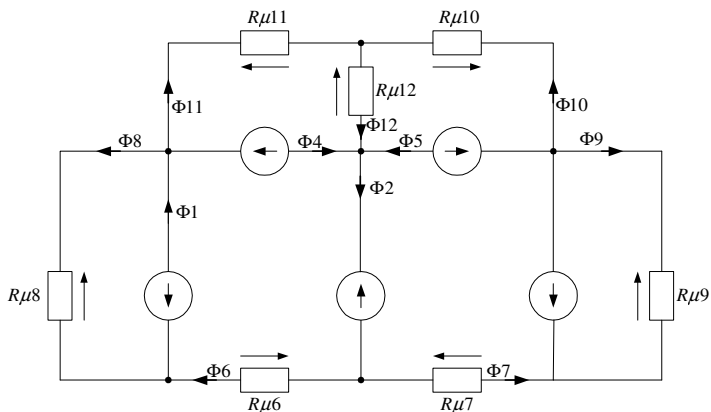
gdzie:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R\mu_8 & 0 & 0 & 0 & 0, \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R\mu_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0, \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R\mu_{11} & R\mu_{12}, \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R\mu_{10} & 0 & R\mu_{12}, \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R\mu_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0, \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R\mu_9 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

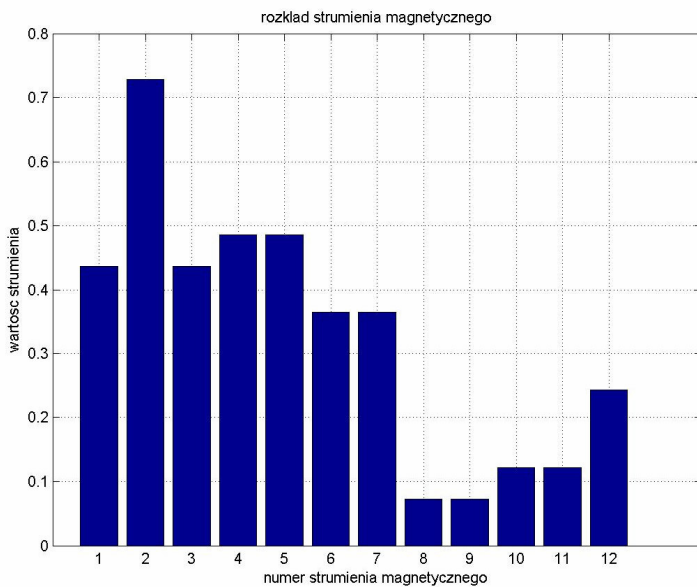
$$\mathbf{j} = [\Phi_1 \ \Phi_2 \ \Phi_3 \ \Phi_4 \ \Phi_5 \ \Phi_6 \ \Phi_7 \ \Phi_8 \ \Phi_9 \ \Phi_{10} \ \Phi_{11} \ \Phi_{12}]^T,$$

$$\boldsymbol{\Theta} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{-B_r}{\mu_0} \ \frac{-3B_r}{\mu_0} \ \frac{B_r}{\mu_0} \ \frac{B_r}{\mu_0} \ \frac{-3B_r}{\mu_0} \ \frac{-B_r}{\mu_0}]^T.$$

Analiza rozplywu strumienia dla tablicy Halbacha została przeprowadzona dla przykładowego magnesu neodymowego o wymiarach 10x10x4, remanencji  $B_r = 1.2[\text{T}]$  i gęstości energii 265 [kJ/m<sup>3</sup>]. Wartości strumieni po stronie tablicy Halbacha, gdzie następuje kumulacja strumieni magnetycznych, jest trzykrotnie większa i wynosi 0.365[Wb], natomiast po stronie przeciwnej 0.12[Wb]. Największą wartość osiągają strumienie magnetyczne w obszarach zajętych przez magnesy. W gałęziach 1 i 3 strumienie są nieznacznie słabsze od strumieni magnetycznych w gałęziach 4 i 5, co wynika z konieczności pokonania większej drogi przez strumienie w tych gałęziach i z rozpraszania części strumienia na granicy tablicy Halbacha.



Rys. 12. Schemat obwodu magnetycznego tablicy Halbacha



Rys.13. Wartości strumienia magnetycznego w poszczególnych gałęziach

## 6. Podsumowanie

Wykorzystując magnesy wykonane z metali ziem rzadkich, można zbudować tablicę Halbacha w urządzeniach, w których wymagana jest duża wartość strumienia magnetycznego i związane z nim wartości siły magnetycznej. Tablicę można stosować zwłaszcza w miejscach, w których były stosowane elektromagnesy lub magnesy nadprzewodzące, co pozwala eliminować dodatkowe źródła zasilania i instalacji chłodzenia. Zastępując magnesy tablicą Halbacha można uzyskać miniaturyzację obiektu bez utraty jego właściwości magnetycznych.

Przedstawiona analiza rozpręgu strumieni magnetycznych dla płaskiej tablicy Halbacha wykazała trzykrotnie większą kumulację strumienia po jednej stronie niż po stronie przeciwnej. Podobną analizę można przeprowadzić dla tablicy Halbacha zbudowanej z większej liczby magnesów, jak również dla tablicy wykorzystanej w pasywnych łożyskach magnetycznych, poprzez wydzielenie odcinka obwodu magnetycznego dwiema płaszczyznami równoległymi do osi i promienia.

### LITERATURA:

1. Falkowski K.: „Pasywne łożysko magnetyczne dla kinetycznego akumulatora energii” *sprawozdanie wewnętrzne, Katedra Automatyki i Robotyki*, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka;
2. Halbach K.: “Design of Permanent Multipole Magnets With Oriented RareEarth Cobalt Materials”, *NIM 169* (1980) p.1-10;
3. Stratton J.A.: “Electromagnetic Theory”, 1941 , chapter 2;
4. Acarnley P.P., Mecrow B.C., Burdess J.S., Fawcett J.N., Kelly J.G., Dickinson P.G.: “Design Principles for a Flywheel Energy Store for Road Vehicles”. *In IEEE Transactions on Industry Applications*, volume 32, pages 1402–1408, November/December 1996;
5. [www.magnesytrwale.com.pl](http://www.magnesytrwale.com.pl)

### HALBACH ARRAYS IN LINEAR AND ROTARY ELECTRIC MACHINE

**Abstract:** Examples of using Halbach array in linear and rotating motors and short characteristic of permanent magnets have been presented in this paper. Analysis of magnetic flux for the linear Halbach array has been shown. A Halbach array is a special configuration of permanent magnets which three times augments the magnetic field on one side of the device while cancelling the field on the other side. The special arrangement of permanent magnets enables designers to more widely applies permanent magnets and minimize devices.

**Key words:** Halbach array, permanent magnet, linear motor, rotating motor

Prace sfinansowano w ramach pracy statutowej S/WM/3/05 i wykonano w Katedrze Automatyki i Robotyki, Wydziału Mechanicznego, Politechniki Białostockiej.

Łukasz Gryniowski<sup>1</sup>, Marcin Derlatka<sup>2</sup>

## POMIAR NATĘŻENIA POZIOMU SYGNAŁU SIECI KOMÓRKOWEJ ZA POMOCĄ MODUŁU GSM-GPRS

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono projekt urządzenia do pomiaru natężenia poziomu sygnału sieci komórkowej oraz dostępnych stacji nadawczo-odbiorczych (BTS), opracowany w ramach magisterskiej pracy dyplomowej w Politechnice Białostockiej. Podstawę zaprojektowanego urządzenia pomiarowego stanowią: moduł GSM/GPRS firmy Siemens, mikroprocesor ATmega 128 firmy ATMEL i graficzny wyświetlacz LCD 128x64.

**Słowa kluczowe:** sieć komórkowa, mikroprocesor AVR

### 1. Wprowadzenie

Radiokomunikacja ruchoma przeżywa obecnie swój dynamiczny rozwój. Najbardziej rozpowszechnionymi jej formami są systemy telefonii bezprzewodowej, począwszy od bezprzewodowych centrali zakładowych a skończywszy na satelitarnych i telefonii komórkowej.

Celem pracy jest przedstawienie projektu urządzenia zestawu, służącego do mierzenia poziomu natężenia sygnału sieci i dostępnych BTSów (ang. Base Transceiver Station – Stacja Nadawczo-Odbiorcza) oraz zaprezentowanie ogólnych zasad działania sieci komórkowych. Zaprojektowany układ może służyć do zbierania informacji o poziomie natężenia sygnału sieci komórkowej oraz danych o dostępnych BTSach, zatem pozwala lokalizować urządzenia wykorzystujące transmisję radiową oraz uszkodzoną stację nadawczo-odbiorczą.

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny,  
Koło Naukowe Biocybernetyki i Systemów Informatycznych.

<sup>2</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki,  
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45C.

## **2. Cyfrowy system telefonii komórkowej - GSM**

W pierwszych sieciach analogowych problemem była ograniczona pojemność pasma radiowego oraz potrzeba istnienia systemu telefonii komórkowej, który działałby na terenie całej Europy. Poszukiwania doprowadziły do opracowania nowego systemu cyfrowego: cyfrowego systemu telefonii komórkowej – GSM (ang. Global System for Mobile Communications), który umożliwił lepsze wykorzystanie pasma radiowego, a także uzyskanie zdecydowanie wyższej jakości transmisji. System ten umożliwia realizację usług niedostępnych w systemach analogowych [15].

System GSM po raz pierwszy został zaprezentowany na targach TELECOM w Genewie w październiku 1991 roku, a pierwsze komercyjne systemy uruchomiono w roku 1992. Od tamtej chwili popularność systemu rośnie w oszałamiającym tempie. Niezależnie od GSM na świecie istnieją jeszcze dwa cyfrowe systemy telefonii komórkowej: w USA system IS-95 i w Japonii system JDC (ang. Japanese Digital Cellular) [15]. Istotą każdego z tych systemów jest struktura komórkowa. Stosuje się w nich stacje bazowe o różnych zasięgach, zależnych od liczby występujących na danym obszarze abonentów. Im jest ich mniej tym zasięg jest odpowiednio większy. Obszar dzieli się na kilka dużych komórek, które są dzielone na coraz to mniejsze (zależnie od liczby abonentów). Przejście z jednej komórki do drugiej nie ma wpływu na ciągłość transmisji [10].

## **3. Architektura sieci komórkowej - GSM**

System sieci komórkowej działa na obszarze, który jest podzielony na poszczególne fragmenty. Całe zarządzanie odbywa się przez tzw. centrale radiokomunikacyjne MSC (ang. Mobile Switching Center), są to wyspecjalizowane centrale elektroniczne. Do każdej centrali dołączona jest baza danych tzw. VLR (ang. Visited Location Register). Pełni ona funkcję rejestru stacji ruchomych dla abonentów chwilowo przebywających w obszarze, obsługiwany przez daną centralę radiokomunikacyjną. Dodatkowo system zarządzany jest przez centrum identyfikacji AUC (ang. Authentication Centre). Jest to taka baza danych, która służy do sprawdzania czy dany abonent może zrealizować połączenie [8].

Rejestr abonentów macierzystych HLR (ang. Home Location Register) jest centralną bazą danych. Zgromadzone są tu stałe parametry i informacje o czasowym położeniu dotyczące każdego z abonentów. System ma zazwyczaj więcej niż jeden rejestr HLR, natomiast dane o abonencie przechowywane są tylko w jednym z nich. Informację o abonentach przyjezdnych przechowuje rejestr VLR. Znajdują

się tutaj dane na temat stacji ruchomych, znajdujących się w zasięgu danej centrali MSC. Rejestry VLR i HLR wymieniają ze sobą informacje dotyczące abonentów, którzy znajdują się obecnie na danym obszarze. Umożliwia to zlokalizowanie danej osoby przemieszczającej się w obszarze danego systemu. Dzieje się to przez znalezienie informacji o położeniu klienta przez rejestr HLR i przekazanie połączenia do centrali MSC, posiadającej dane ze swojego rejestru VLR [8].

Wszystkie centrale MSC są połączone ze sobą i z publiczną komutowaną siecią telefoniczną PSTN (ang. Public Switched Telephone Network). Dodatkowo zarządzają minimum jednym systemem stacji bazowych BSS (ang. Base Station System). Stacja taka składa się z kontrolera stacji bazowych BSC (ang. Base Station Controller) oraz kilku transceiverów (układów nadawczo-odbiorczych) ze stacji bazowych BTS.

Centrala MSC ma koordynować połączenia między abonentami. Realizuje to przez spełnianie wymaganych funkcji. Należą do nich:

- wywołanie abonenta;
- dynamiczny rozdział zasobów sieci na obszarze przez nią zarządzanym;
- zarządzanie procedurą przenoszenia połączeń (w trakcie zmiany komórki należącej do innego systemu stacji bazowych BSS);
- realizacja funkcji styku z innymi sieciami;
- szyfrowanie ciągów binarnych;
- taryfikacja wszystkich abonentów działających na jej obszarze;
- realokacja przydzielonych transceiverom BTS częstotliwości kanałowych w sytuacji szczególnego obciążenia poszczególnych fragmentów sieci [8].

Schemat architektury systemu GSM przedstawiono na rysunku 1.

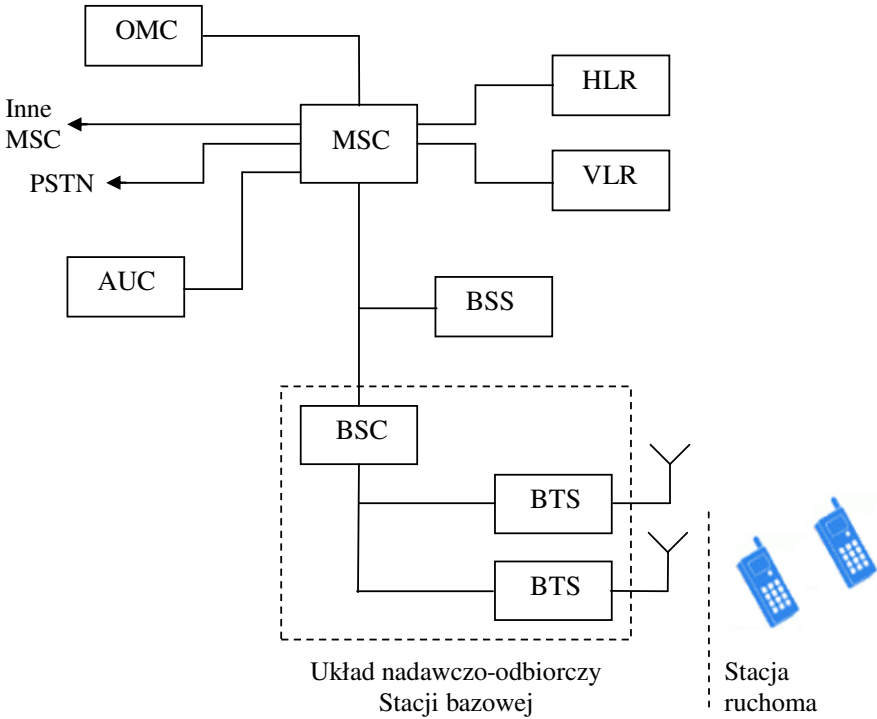
#### **4. Przeznaczenie i zasada działania zestawu urządzeń**

Zestaw opracowanych urządzeń przeznaczony jest do pomiaru natężenia poziomu sieci komórkowej i dostępnych BTSów. Bieżące wartości sygnałów i informacje o BTSach zebranych przez moduł GSM/GPRS pokazywane są na wyświetlaczu LCD.

Na rynku istnieją już urządzenia, które dokonują takich pomiarów; - przykładem mogą być urządzenia firm AEROFLEX lub LPT TECHNOLOGIES. Urządzenia te noszą nazwę analizatora widma i służą do analizy widma radiowego. Jednakże bardzo duży zakres używanych częstotliwości fal radiowych (od 0,1 MHz do 300 GHz) powoduje, że istnieje wiele ich rodzajów. Zdecydowana większość łączy w jednym przyrządzie pomiar sygnałów z wielu pasm radiowych i dodatkowe funkcje. To zazwyczaj jest nieprzydatne, z wyjątkiem przypadków



badan czystości radiowej środowiska i zakłóceń przemysłowych. Uniwersalność tych urządzeń skutkuje wysoką ceną i bardzo skomplikowaną obsługą. Parametry techniczne uniwersalnego analizatora nie są tak dobre jak parametry mierników z małą ilością funkcji i przeznaczeniem do badania konkretnych zakresów radiowych [17]. Z tych powodów wyspecjalizowane urządzenie jest proste w obsłudze i znacznie tańsze.

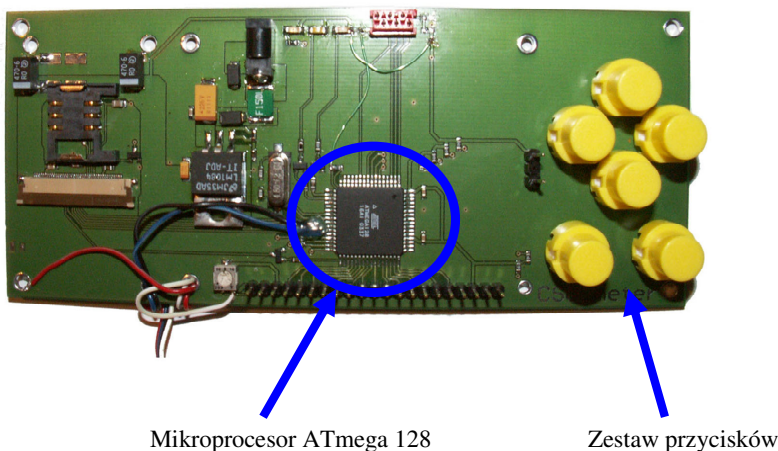


**Rys. 1** Schemat architektury systemu GSM [8, 10] OMC – centrum operacyjno-utrzymawcze (ang. Operation and Maintenance Center)

Takim właśnie urządzeniem jest prezentowany w pracy układ do badania natężenia poziomu sygnału sieci GSM i dostępnych BTSów. Zastosowany zostanie do łatwego pomiaru jakości sygnału radiowego GSM w danym punkcie terenu. Zebrane informacje posłużą do lokalizowania urządzeń przemysłowych, wykorzystujących sieć radiową GSM do przesyłania i odbierania danych.

## 5. Budowa i działanie urządzenia do diagnozowania sieci komórkowej

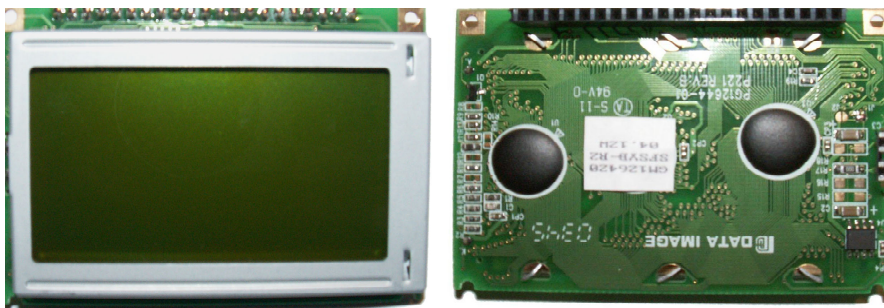
Do bezpośredniego pomiaru natężenia poziomu sygnału sieci i dostępnych BTSów wykorzystywany jest moduł GSM/GPRS. Przekazuje on zebrane informacje do mikroprocesora, gdzie następuje ich przetworzenie na informacje zrozumiałe dla odbiorcy. Następnie zostają one wyświetlone na wyświetlaczu LCD. Sterowanie całym układem odbywa się za pomocą czterech przycisków. Dzięki nim możemy w razie potrzeby zebrać bardziej szczegółowe informacje o BTSie, na którym moduł jest zalogowany, bądź szukać innych dostępnych w danym rejonie. Poniższe rysunki przedstawiają zestaw urządzeń wykorzystany do pomiaru natężenia sygnału sieci komórkowej.



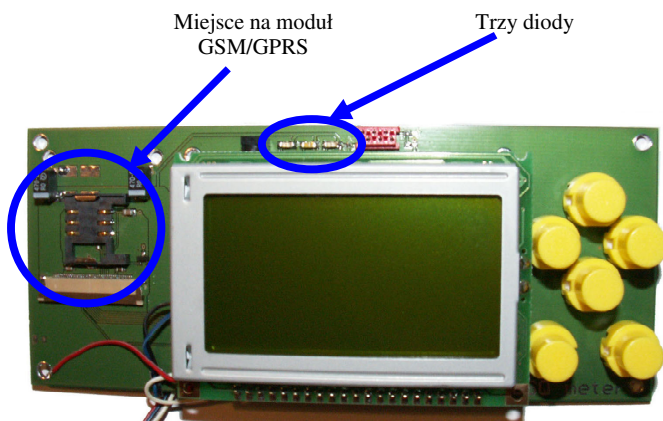
Rys. 2 Układ z zaznaczonym mikroprocesorem i przyciskami

Dodatkowo układ posiada trzy diody (rys. 4), które mogą być wykorzystane do sygnalizowania zaistniałych błędów lub uszkodzeń. I tak jedna dioda została wykorzystana do sygnalizowania uszkodzenia, wynikającego z braku zasilania, druga wskazuje przesyłanie danych z modułu GSM/GPRS, a trzecia jest zapalana w czasie przesyłania danych z komputera stacjonarnego.

Sercem całego zestawu urządzeń jest mikroprocesor. Jedynie on ma bezpośredni dostęp do wszystkich pozostałych elementów układu. Użytkownik tylko w sposób pośredni steruje działaniem mikroprocesora za pomocą przycisków.



Rys. 3 Wyświetlacz LCD, (od lewej) widok z przodu i z tyłu



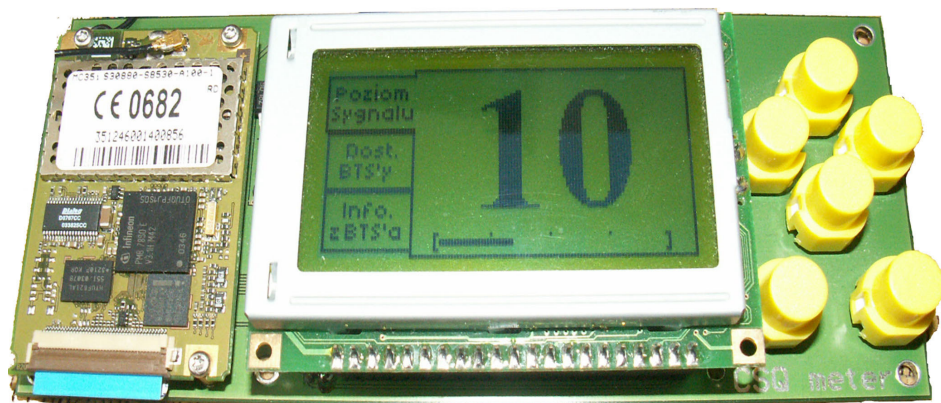
Rys. 4 Zestaw urządzeń z uwzględnionym miejscem pod moduł GSM/GPRS

Podczas projektowania układu szczególną uwagę zwrócono na optymalne wykorzystanie portów i systemu przerw. Wyświetlacz LCD podłączony jest do całego portu C i części portu A (reszta pinów portu A nie jest wykorzystana). Daje to możliwość szybkiej zmiany ustawień. Unika się w ten sposób ustawiania wielu pinów na różnych portach, upraszcza obsługę, zwiększa szybkość oraz daje przejrzystszy algorytm. Podobnie przedstawia się sprawa z przyciskami. Jednak w tym przypadku zoptymalizowano układ pod względem wykorzystania systemu przerw

## 6. Wyniki działania zestawu urządzeń

Po włączeniu do zasilania zestawu urządzeń następuje inicjalizacja systemu, zajmuje to około 30 sekund. W momencie, w którym moduł łączy się do sieci

komórkowej, otrzymuje polecenie z mikroprocesora o zebraniu informacji na temat natężenia poziomu sygnału sieci komórkowej. Po otrzymaniu pełnej odpowiedzi dane są przekształcane na wartość liczbową i wyświetlane na wyświetlaczu w formie przedstawionej na rysunku poniżej.



**Rys.5** Zestaw urządzeń podczas działania - na wyświetlaczu dane na temat natężenia poziomu sygnału sieci komórkowej

Informacje przedstawione w ten sposób pozwalają łatwo i szybko zorientować się czy warto zainstalować w danym punkcie terenu urządzenie wykorzystujące sieć komórkową. Istnieje możliwość, że ulegnie uszkodzeniu stacja nadawczo-odbiorcza i urządzenie przestanie przysyłać dane, dlatego istotnym elementem prawidłowego zlokalizowania miejsca montażu danego urządzenia jest możliwość wykorzystania innej stacji nadawczo odbiorczej. W tym celu zestaw urządzeń do pomiaru natężenia poziomu sygnału sieciowego może zebrać informacje na temat sześciu dostępnych stacji nadawczo-odbiorczych w danym punkcie terenu. Ponieważ moduł zbiera dane tylko o BTSach, które znajdują się najbliżej, można również w łatwy sposób zdiagnozować uszkodzenie danej stacji nadawczo-odbiorczej. Polega to na tym, iż posiadając informacje na temat położenia poszczególnych BTSów na danym obszarze terenu, moduł powinien wskazywać dane dotyczące konkretnych urządzeń. Jeśli jednak informacje dotyczą innego bądź innych odległych BTSów, a warunki atmosferyczne oraz położenie w terenie nie wpływają na łączność, oznacza to, że nastąpiło uszkodzenie danej stacji nadawczo-odbiorczej.

Zestaw urządzeń po zebraniu wymaganych informacji wyświetla na ekranie osiem kolumn; ze względu na to, że nazwy kolumn nie mieszczą się w jednej linii nie są wyświetlane. Przykładowe wartości wyświetlane na LCD zamieszczone są poniżej:

chann	rs	dBm	MCC	MNC	BCC	C1	C2
653	26	-84	262	07	0	22	22
660	20	-90	262	07	3	16	16
687	19	-91	262	07	1	15	15
678	14	-96	262	07	3	10	10
671	14	-96	262	07	1	10	10
643	10	-100	262	07	7	6	6

OK

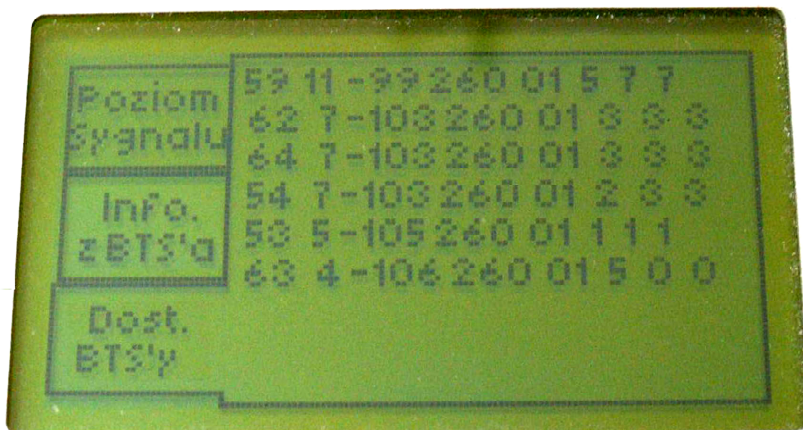
Każda z nich przedstawia pewną liczbę wielkości i tak kolejno kolumny przedstawiają:

- chann - numer kanału częstotliwości;
- rs - moc sygnału od 0 do 63 (przedział od 6 do 54 odpowiada przedziałowi od -110dBm do -35dBm);
- dBm - odbierany poziom sygnału w dBm;
- MCC - kod kraju (pierwsza część kodu PLMN);
- MNC - kod sieci (druga część kodu PLMN);
- BCC - podstawowy kod kolorów oznakowania stacji bazowej;
- C1 - kryterium selekcji komórek;
- C2 - kryterium ponownej selekcji komórek.

gdzie:

PLMN – (ang. Public Land Mobile Network) – sieć publiczna lądowej łączności ruchomej.

Moduł nie zawsze jest w stanie zebrać informację o sześciu BTSach. Na ekranie wyświetlone są wszystkie, jakie udało się dla modułu zebrać.



Rys. 9 Wyświetlane informacje o sześciu BTSach na LCD

## 7. Podsumowanie

Rozwój sieci komórkowej stwarza nowe możliwości, ale także i problemy. Obecnie transmisja danych w miejscach, gdzie wcześniej było to utrudnione czy wręcz niemożliwe (np. w lasach, na morzu czy terenach niezurbanizowanych), stała się faktem. Jednak wiąże się z tym pewne wymagania, jak np. zlokalizowanie miejsca montażu urządzenia wykorzystującego łączność satelitarną. Aby to zrobić, należy dokonać pomiaru natężenia poziomu sygnału sieciowego. Można to zrobić przy pomocy analizatora widma radiowego. Jednakże duży zakres badanej częstotliwości, skomplikowana obsługa oraz duży koszt powoduje, że jest to nieopłacalne dla tego konkretnego przykładu. Dlatego możliwość wyposażenia szeregu pracowników w tanie, proste i wyspecjalizowane urządzenia bez konieczności ich przeszkolenia wydaje się rozwiązaniem dobrym. Takie właśnie urządzenie do pomiaru natężenia poziomu sygnału sieciowego jest przedstawione w niniejszej pracy.

Urządzenie może również być wykorzystywane do diagnozy uszkodzonego BTSa. Moduł wskazuje poziom sygnału sieciowego, który jest najmocniejszy na danym terenie. Jeśli na danym obszarze w pobliżu znajduje się BTS, moduł powinien wskazywać dane dotyczące tej konkretnej stacji nadawczo-odbiorczej. Jeśli jednak informacjedotyczą innego odległego BTS'a, a warunki atmosferyczne oraz położenie w terenie nie wpływają na łączność, oznacza to, że nastąpiło uszkodzenie danej stacji nadawczo-odbiorczej. W ten sposób można w łatwy sposób zdiagnozować uszkodzenie konkretnego BTS'a.



## LITERATURA

1. Zieliński T. P.: Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2002.
2. Hołubowicz W., Płóciennik P.: GSM cyfrowy system telefonii komórkowej, Wydaw. EFP - Francusko-Polskiej Wyższej Szkoły Nowych Technik Informatyczno-Komunikacyjnych, Poznań, 1995.
3. Kolan Z.: Urządzenia techniki cyfrowej, Centrum Wdrożeń Komputerów, Wrocław, 1994.
4. Ludwin W.: Projektowanie sieci komórkowych w aspekcie ruchowym, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2003.
5. Mehrotra A.: GSM system engineering, Artech House, Boston, London, 1997.
6. Stranneby D.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, Wydaw. BTC, Warszawa, 2004.
7. Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów, WKiŁ, Warszawa, 2003.
8. Wesołowski K.: Systemy radiokomunikacji ruchomej, WKiŁ, Warszawa, 1999.
9. Winietki W.: Wirtualne przyrządy pomiarowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
10. Zienkiewicz R.: Telefony komórkowe GSM i DCS, WKiŁ, Warszawa, 1999.
11. Wojtatowicz T.W.: Interfejs RS-232C <http://lodd.p.lodz.pl/kwbd/rs232.htm>.
12. Strangio Ch.E.: [http://www.camiresearch.com/Data\\_Com\\_Basics/RS232\\_standard.html](http://www.camiresearch.com/Data_Com_Basics/RS232_standard.html).
13. [http://www.atmel.com/dyn/products/product\\_card.asp?part\\_id=2019](http://www.atmel.com/dyn/products/product_card.asp?part_id=2019).
14. [http://wydra.civ.pl/gsm\\_historia.html](http://wydra.civ.pl/gsm_historia.html).
15. Adolski W.: Historia telefonii komórkowej, [http://www.fkn.pl/artykuly/artykul/ida\\_\\_160/ids\\_\\_1/word1\\_\\_gsm](http://www.fkn.pl/artykuly/artykul/ida__160/ids__1/word1__gsm).
16. <http://www.pldg.pl/p/pl/TarJ/19/12/1/1/>
17. Urbaneek A.: Sprawdzanie sieci, [http://www.networld.pl/artykuly/5577\\_5.html](http://www.networld.pl/artykuly/5577_5.html).

### MEASUREMENT OF SIGNAL LEVEL IN CELLULAR NETWORK BY MEANS OF GSM-GPRS MODULE

**Abstract:** The project of device to measurement of signal level in cellular network and available Base Transceiver Stations has been presented. The device was based on GSM-GPRS module (Siemens), microcontroller ATmega 128 (ATMEL) and graphical display LCD 128x64.

**Keywords:** cellular network, microcontroller AVR

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/3/06.

Grzegorz Kamiński\*, Jan Szczypior\*

## ANALIZA KONSTRUKCJI MASZYN ELEKTRYCZNYCH STOSOWANYCH W KINEMATYCZNYCH MAGAZYNACH ENERGII

**Streszczenie:** W pracy przeprowadzono analizę i uzasadnienie wyboru maszyny elektrycznej, która najlepiej spełnia wymagania kinematycznego magazynu energii. Szczegółowo omówiono konstrukcję obwodu magnetycznego dyskowej maszyny bezszczotkowej z magnesami trwałymi. Zaprezentowano wyniki obliczeń polowych rozkładu indukcji magnetycznej w przestrzeni szczeliny powietrznej, w której umieszczony jest twornik. Szczegółowo rozpatrzono konstrukcję bezrdzeniowego twornika tej maszyny oraz przeanalizowano dwa warianty uzwojeń tworników ze zwojami o kształcie klasycznym i skośnym. Przedstawiono sposób projektowania uzwojenia twornika bezrdzeniowego dla maszyny tarczowej oraz sposób obliczeń napięć indukowanych w pasmach analizowanych uzwojeń. Sformułowano kryteria, umożliwiające ocenę i wybór lepszego wariantu uzwojenia.

**Słowa kluczowe:** kinematyczny magazyn energii-bezwładnik, maszyna bezszczotkowa z magnesami trwałymi, twornik bezrdzeniowy, uzwojenia twornika bez rdzenia ferromagnetycznego.

### 1. Wprowadzenie

Kinematyczny, elektromechaniczny magazyn energii – bezwładnik lub zasobnik jest urządzeniem, które przetwarza dostarczoną energię o różnych parametrach: napięcia, prąd, liczba faz, częstotliwość na energię kinetyczną wirującej masy. Magazynuje energię w postaci energii kinetycznej wirującej masy i w razie potrzeby przetwarza zmagazynowaną energię kinetyczną na energię elektryczną o zakładanych parametrach.

Do podstawowych parametrów kinematycznego magazynu energii, które determinują parametry konstrukcyjne maszyny elektrycznej zalicza się:

- magazynowaną energię użyteczną  $W_N$ ,

---

\* Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Maszyn Elektrycznych.



- moc maksymalna  $P_N$  z jaką energia jest dostarczana lub odbierana,
- zakres prędkości, w którym następuje magazynowanie i odzysk energii,

$$k_v = n_{\min} / n_{\max} \quad (1)$$

- maksymalną energię kinetyczną  $W_{k\max}$ .

$$W_{k\max} = \frac{W_N}{1 - k_v^2} \quad (2)$$

Bardzo ważnym parametrem magazynu energii jest czas konieczny do przejścia z jednego stanu pracy magazynu i maszyny elektrycznej do drugiego. Szczególnie ważny, w zastosowaniach awaryjnego zasilania, jest jak najkrótszy czas przejścia ze stanu ładowania do oddawania (silnik prądnica) i ze stanu magazynowania do oddawania (stan jałowy prądnica). Ponadto sprawność całego cyklu ładowania magazynowania i oddawania energii powinna być jak największa. Obie te wielkości w bardzo dużym stopniu zależą od rodzaju zastosowanej maszyny elektrycznej. Dlatego muszą być brane pod uwagę jako istotne kryteria przy wyborze maszyny.

Na podstawie dotychczasowej charakterystyki elektromechanicznych wysokoobrotowych magazynów energii można określić wymagania odnoszące się do zastosowanych w nich maszyn elektrycznych:

- wysoka sprawność w stanach obciążenia w zakresie pracy motorowej i generatorowej,
- duża wartość mocy na jednostkę masy,
- bardzo małe straty w stanie jałowym maszyny,
- utrzymywanie lub bardzo szybkie odzyskanie napięcia na zaciskach.

## 2. Analiza konstrukcji maszyny elektrycznej – wybór typu maszyny

Spełnienie dwóch pierwszych wymagań możliwe jest przy zastosowaniu maszyn wysokoobrotowych  $n > 20000$  obr/min. Ogranicza to konstrukcję wirnika - bez uzwojenia, jednocześnie narzuca litą strukturę jego obwodu magnetycznego. Oznacza to możliwość zastosowania następujących rodzajów maszyn elektrycznych:

- indukcyjnych z litym wirnikiem,
- synchronicznych reluktancyjnych,
- bezszczotkowych z magnesami trwałymi,
- reluktancyjnych przełączalnych.

Trzy pierwsze rodzaje maszyn, pod kątem zastosowania w kinematycznych magazynach energii, omówiono szczegółowo w pracy [1,3]. Żeby zobrazować

złożoność wyboru najlepszego rodzaju maszyny do kinematycznego magazynu energii, trzeba wymienić najważniejsze zalety i wady poszczególnych rodzajów maszyn.

### **Maszyna indukcyjna z litym wirnikiem**

Zalety:

- prosta konstrukcja,
- wirnik może mieć proste geometrycznie kształty dysku, walca lub rury,
- w czasie magazynowania energii nie ma strat pochodzenia elektromagnetycznego.

Wady:

- długi czas przy zmianie stanu pracy (jałowy, silnikowy, prądnicowy),
- problemy z mocą bierną w zakresie pracy prądnicowej,
- mała wartość mocy na jednostkę masy maszyny [1],
- w stanach obciążenia duże straty mocy w wirniku (duży poślizg) - problemy z odprowadzeniem ciepła przy pracy maszyny w próżni.

### **Maszyna synchroniczna reluktancyjna**

Zalety:

- maszyna jednostronnie wzbudzana dzięki czemu ma małe straty w wirniku,
- w czasie magazynowania energii brak strat pochodzenia elektromagnetycznego.

Wady:

- w litym wirniku stosunek reaktancji w osi d do reaktancji w osi q nie osiąga zbyt dużych wartości, z tego powodu mały jest moment i moc na jednostkę masy,
- mały kąt obciążenia i niski współczynnik mocy,
- pulsacje pola wywołane zębami w rdzeniu stojana są przyczyną strat powierzchniowych w litym wirniku,
- jawnobiegunowy wirnik ma większe straty tarcia nawet w atmosferze próżni technicznej, niż gładki cylinder,
- złożone sterowanie w zakresie pracy generatorowej i zmieniającej się prędkości obrotowej.

### **Maszyna bezszczotkowa z magnesami trwałymi**

Zalety:

- duża gęstość momentu i mocy oraz wysoka sprawność,
- występowanie napięcia na zaciskach w stanie magazynowania energii, przy niewielkich stratach, gdy stojan nie ma rdzenia ferromagnetycznego, dzięki czemu magazyn energii może być nadzorowany przez układ monitorujący, zasilany niezależnie własną energią.

Wady:

- magnesy umiejscowione w wirniku psują jego jednorodną strukturę. Z tego powodu magnesy muszą być umieszczone w wirniku w taki sposób, aby nie spowodować znacznego wzrostu koncentracji naprężeń,
- pole magnetyczne nie może być usunięte z maszyny; podczas ruchu wirnika następuje przemagnesowanie rdzenia stojana i powstawanie strat mocy. Jest to szczególnie niekorzystne w stanie jałowym maszyny.

### **Maszyna reluktancyjna przełączalna**

Zalety:

- nie ma strat w stanie jałowym maszyny podczas magazynowania energii,
- bardzo krótki czas przejścia ze stanu jałowego do stanu prądnicowego (ze stanu magazynowania do oddawania energii).

Wady:

- ograniczona prędkość obrotowa  $< 20\,000$  obr/min [2],
- znaczne straty w rdzeniu (lity wirnik) w stanie obciążenia,
- bardzo duże pulsacje momentu, które są źródłem drgań i hałasu,
- mała wartość mocy na jednostkę masy [2].

Po analizie wad i zalet poszczególnych rodzajów maszyn, przy jednoczesnym spełnieniu wymagań napędowych oraz konstrukcyjnych samego bezwładnika, do dalszych rozważań wybrano maszynę bezszczotkową z wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi. Zdecydowały o tym wymienione zalety maszyny. Rozpatrywane wady mogą być zminimalizowane przez odpowiednią konstrukcję wirnika i stojana maszyny.

## **3. Konstrukcja wybranego typu maszyny**

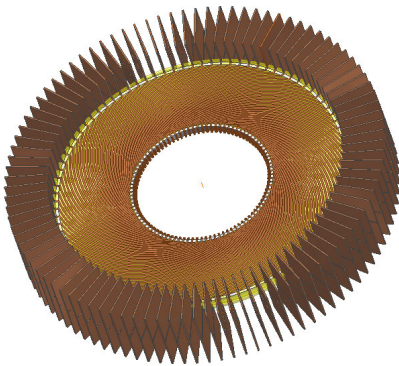
Wirującą częścią maszyny jest obwód magnetyczny, wykonany z wysoko-wytrzymałościowej stali o dobrych właściwościach ferromagnetycznych. Pole magnetyczne wytworzone jest przez wysokoenergetyczne magnesy trwałe (rys.2). Twornik jest stacjonarny i tak skonstruowany, aby maksymalnie ograniczyć wydzielane w nim straty, szczególnie gdy maszyna nie jest obciążona. Ponieważ główną przyczyną powstawania strat mocy w stanie jałowym maszyny jest przemagnesowywanie ferromagnetycznego rdzenia twornika, to jednym ze sposobów ograniczenia strat jest zastosowanie nowoczesnych materiałów ferromagnetycznych (folia amorficzna) [1].

Innym bardziej radykalnym rozwiązaniem jest całkowite pozbycie się żelaza z twornika [3,4]. Wylimitowanie rdzenia ferromagnetycznego ze stojana maszyny możliwe jest dzięki wysokoenergetycznym magnesom trwałym. Obecnie, bez zbyt trudności, można wytwarzać, w przestrzeni powietrza o grubości od kilku

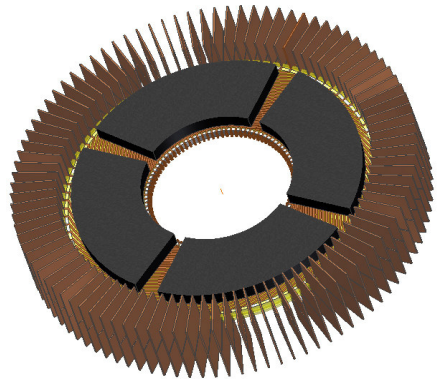
do kilkunastu milimetrów pole magnetyczne o indukcji porównywalnej z indukcją w szczelinach maszyn klasycznych. Mimo to, opracowanie konstrukcji i technologii wykonania tworników bez rdzeni ferromagnetycznych jest zadaniem trudnym i złożonym. Trudności wynikają między innymi stąd, że rdzeń ferromagnetyczny w stojanie maszyny spełnia trzy ważne funkcje:

- zwiększa przewodność dla strumienia magnetycznego,
- poprawia przewodność dla strumienia ciepła wytworzonego przez straty mocy wydzielane w uzwojeniu i w samym rdzeniu,
- zapewnia odpowiednią sztywność, potrzebną do przenoszenia naprężeń mechanicznych od sił elektrodynamicznych.

Jak już wspomniano, pierwszą funkcję rdzenia mogą przejąć wysokoenergetyczne magnesy trwałe. Zakłada się, że drugą funkcję rdzenia przejmie odpowiednio skonstruowane uzwojenie, którego pręty zaopatrzone w specjalne żebra radiatora (rys. 1 ) będą bezpośrednio chłodzone w specjalnym wymienniku ciepła [4]. Jest to jednak dodatkowe ograniczenie nałożone na konstrukcję uzwojenia. Funkcję mechaniczną rdzenia powinien przejąć odpowiednio ukształtowany szkielet-karkas, wykonany z materiału niemagnetycznego i nieprzewodzącego na bazie włókien szklanych lub węglowych i tworzyw sztucznych. Widać z tego, że poszczególne funkcje rdzenia przejmują w tworniku bezrdzeniowym inna jego część. Poszerza to zakres poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych, o większej specjalizacji poszczególnych części, optymalnie spełniających określoną funkcję.



Rys. 1. Uzwojenie stojana z żebrami radiatora



Rys. 2. Uzwojenie stojana z magnesami wirnika

Wyeliminowanie w tworniku bezrdzeniowym zębów i żłobków, w których rozłożone jest uzwojenie zmienia strukturę twornika z ażurowej na strukturę warstwową. W tworniku bez rdzenia ferromagnetycznego pojawia się większa swobo-

da zagospodarowania przekroju warstwy uzwojenia. Jednakże zbyt ciasne upakowanie przekroju warstwy uzwojenia materiałem przewodzącym prowadzi do osłabienia wytrzymałości mechanicznej twornika i ogranicza możliwości kształtowania zamkniętych zwojów uzwojenia (wydłużenie lub pogrubienie strefy połączeń czołowych).

W dalszej części pracy będzie omówiona szczegółowo konstrukcja maszyny tarczowej z polem aksjalnym i twornikiem bez rdzenia ferromagnetycznego. Maszyna o takim kształcie ma najlepszą wytrzymałość mechaniczną i zapewnia uzyskanie największej prędkości obrotowej kinematycznego magazynu energii.

### 3.1. Obwód magnetyczny i uzwojenie

Rozpatrywana bezszczotkowa, tarczowa maszyna z magnesami trwałymi składa się ze stacjonarnego bezrdzeniowego twornika i wirującego obwodu magnetycznego z magnesami trwałymi [4]. Rolę jarzm w obwodzie magnetycznym spełniają stalowe tarcze, osadzone na łożyskowanym wale. Magnesy magnesowane osiowo, w postaci tarcz lub segmentów, są mocowane do wewnętrznych, bocznych powierzchni jarzm od strony szczeliny powietrznej. Pomiędzy powierzchniami magnesów w przestrzeni szczeliny powietrznej umieszczony jest tarczowy twornik bez rdzenia ferromagnetycznego. Duża prędkość obrotowa wirnika narzuca odpowiednią wielkość promienia zewnętrznego wirnika, co ogranicza aktywną powierzchnię maszyny. W takiej sytuacji dużą moc maszyny można uzyskać przez zastosowanie kilku maszyn dyskowych, osadzonych na wspólnym wale, czyli tzw. konstrukcji modułowej (rys. 3).

W pracy ograniczono się do analizy uzwojeń, które spełniają następujące warunki:

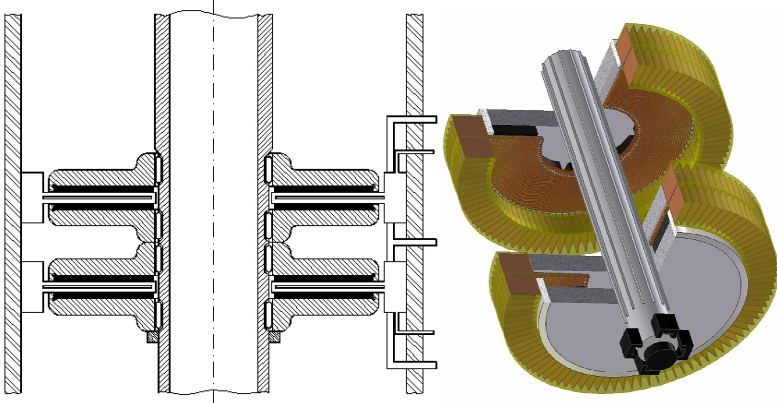
- kształt przekroju przewodu, z którego wykonywany jest zwoj uzwojenia, jest taki sam w strefie aktywnej i w strefie połączeń czołowych,
- grubość warstwy uzwojenia w strefie aktywnej i w strefie połączeń czołowych jest taka sama.

Warunki te z jednej strony ograniczają liczbę możliwych rozwiązań, z drugiej zaś upraszczają technologię wykonania uzwojenia. Ponieważ moc rozpatrywanych maszyn wynosi ok. 100 kW to wszystkie omawiane uzwojenia będą składać się z jednozwojnych zezwojów - zwojów prętowych o takim samym kształcie.

Rozpatrzono dwa kształty zwojów:

- klasyczny, w którym boki zwoju w strefie aktywnej mają jednakową rozpiętość kątową,
- skośny lub zbieżny, w którym boki zwoju w strefie aktywnej mają zmienną

rozpiętość kątową.



Rys. 3. Modułowa konstrukcja maszyny tarczowej

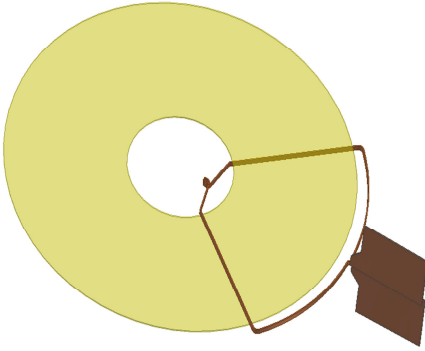
### 3.2. Uzwojenia maszyny tarczowej z polem aksjalnym

W maszynach tarczowych, boki zwoju o kształcie klasycznym mają w strefie aktywnej jednakową rozpiętość kątową, czyli biegną w kierunku radialnym, natomiast w strefie połączeń czołowych są zbieżne (rys. 4).

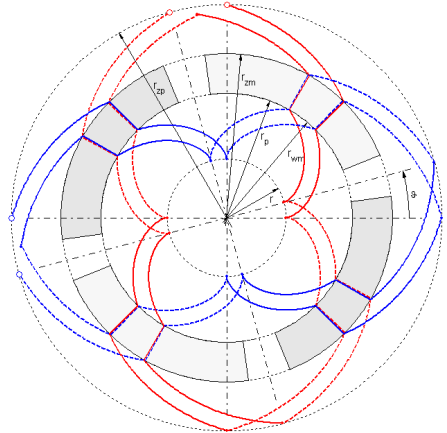
Wykorzystanie pól pierścieni, w których znajduje się wewnętrzna i zewnętrzna strefa połączeń czołowych jest optymalne, gdy boki zwojów w tych obszarach mają kształt ewolwenty, jak to pokazano na rys. 5. Wadą tego kształtu zwoju są większe odległości pomiędzy bokami sąsiednich zwojów w strefie aktywnej niż w strefach połączeń czołowych. Zaletą tego kształtu jest stała rozpiętość kąтова zwoju.

Każdy bok zwoju o kształcie klasycznym składa się z trzech odcinków. Pierwszy odcinek wewnętrznego połączenia czołowego ma kształt fragmentu ewolwenty wewnętrznego okręgu uzwojenia o promieniu  $r$ . Koniec tego odcinka jest przesunięty względem punktu początkowego o kąt połowy podziałki biegunowej, w tym przypadku o  $45^\circ$ . Z warunku tego można obliczyć wewnętrzny promień strefy aktywnej – magnesów wirnika  $r_{wm}$ . Następny – czynny odcinek boku zwoju ma kierunek promieniowy do końca zewnętrznego promienia magnesów  $r_{zm}$ . Ostatni odcinek zewnętrznego połączenia czołowego ma również kształt fragmentu ewolwenty. Rozpiętość kąтова pomiędzy początkiem i końcem tego odcinka jest równa połowie podziałki biegunowej ( $45^\circ$ ). Z warunku tego, przy zadanym  $r_{zm}$ , można wyznaczyć promień  $r_{zp}$  będący zewnętrznym promieniem uzwojenia. Widać z tego, że zwój o kształcie klasycznym w przypadku maszyny tarczowej ma kształt

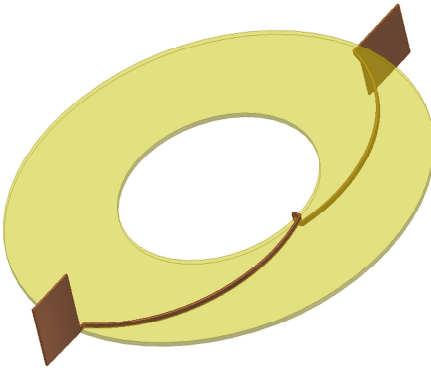
ewolwentowo-promieniowy.



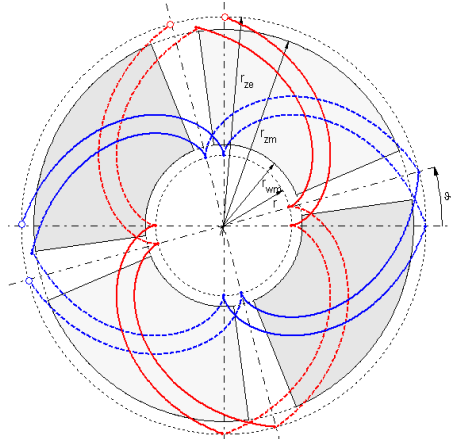
**Rys. 4.** Zwój maszyny tarczowej o kształcie klasycznym



**Rys. 5.** Pasma uzwojenia o zwojach klasycznych



**Rys. 6.** Zwój maszyny tarczowej o kształcie skośnym



**Rys. 7.** Pasma uzwojenia o zwojach ewolwentowo-promieniowych

Zwój o kształcie skośnym pokazano na rys. 6. Przy tym kształcie zwoju jego boki są zbieżne w strefie aktywnej. Jeżeli końce jednego boku zwoju – pręta są na długości maszyny przesunięte o podziałkę biegunową, to uzwojenie składające się

z takich zwojów praktycznie nie ma strefy połączeń czołowych. Oznacza to, że prawie całe uzwojenie zawarte jest w strefie działania pola. Zaletą tego kształtu zwoju jest dobre wyzyskanie przekroju warstwy uzwojenia materiałem przewodowym i jednocześnie skrócenie jego długości. Skutkiem tego jest zmniejszenie rezystancji uzwojenia i strat obciążeniowych. Wadą tego kształtu jest zmieniająca się rozpiętość kątowa zwoju. Skutkiem tego jest mniejsza wartość napięcia indukowanego. Przy określonej mocy prowadzi to do wzrostu wartości prądu, czyli również wzrostu strat obciążeniowych. Zwój o kształcie skośnym w maszynie tarczowej (rys. 6.) przyjmuje kształt ewolwenty (rys. 7.)

W tym przypadku odległości pomiędzy bokami sąsiednich zwojów są jednakowe i prawie całe uzwojenie jest umieszczone w strefie aktywnej (rys. 7). Bok zwoju jest odcinkiem ewolwenty wewnętrznego okręgu o promieniu  $r$ . Przesunięcie kątowe pomiędzy początkiem i końcem tego odcinka jest równe podziałce biegunowej. Z tego warunku dla danego  $r$  wyznaczany jest zewnętrzny promień uzwojenia  $r_{ze}$ . Wewnętrzny -  $r_{zm}$  i zewnętrzny -  $r_{wm}$  promień strefy magnesów są związane z promieniami  $r$  i  $r_{ze}$  i mogą być określone przez odpowiednie powiększenie  $r$  i pomniejszenie  $r_{ze}$  o wymagane odległości technologiczne.

Modyfikując konstrukcję maszyny z uzwojeniem o zwojach klasycznych (rys. 5), poprzez rozszerzenie strefy magnesów w kierunku promieniowym, na strefy połączeń czołowych można zwiększyć wykorzystanie boków zwoju do wytworzenia większego napięcia indukowanego. Podobnie jest w wypadku uzwojenia ewolwentowego (rys. 7), przez zmniejszenie szerokości strefy magnesów, w kierunku promieniowym, można zwiększyć wykorzystanie magnesów do indukowania napięcia poprzez zwiększenie średniej rozpiętości zwoju. Przy takim rozszerzeniu zdania projektowego uzwojenie ewolwentowe jest szczególnym przypadkiem uzwojenia ewolwentowo-promieniowego o zerowej długości odcinka promieniowego.

Podsumowując rozważanie tego punktu pracy można stwierdzić, że uzwojenie o zwojach skośnych ma w stosunku do uzwojenia o zwojach klasycznych istotną zaletę, polegającą na lepszym wykorzystaniu miejsca przeznaczonego na uzwojenie i skróceniu długości zwojów, ale również poważną wadę, polegającą na zmniejszeniu napięcia indukowanego. Zatem wybór nie jest prosty.

#### 4. Obliczenia rozkładu pola magnetycznego w obszarze twornika

Do porównania omawianych wariantów uzwojeń potrzebne są średnie i skuteczne wartości napięć indukowanych w uzwojeniach. Napięcia te można obliczyć na podstawie chwilowych przebiegów napięć fazowych. Czasowe przebiegi napięć indukowanych można obliczyć na podstawie znanego rozkładu pola magnetyczne-

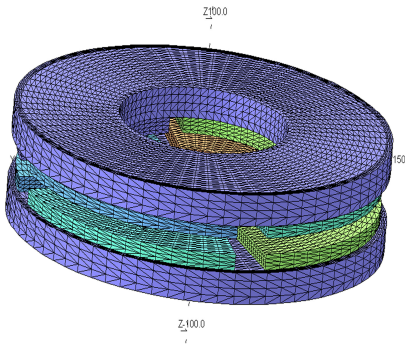


go w obszarze twornika.

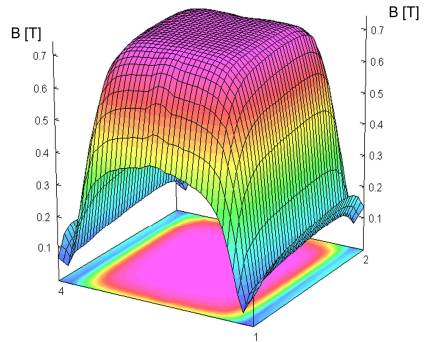
Rozkłady pola magnetycznego w prezentowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych maszyn zostały obliczone przy użyciu programu Vector Field Opera 3D. Zbudowano sparametryzowany przestrzenny model przedstawiający konstrukcję badanej maszyny. Model umiejscowiono w układzie współrzędnych w taki sposób, że oś Z była osią obrotu wirnika. Obliczenia wykonano dla stanu jałowego przy użyciu modułu TOSCA - pole magnetostaticzne.

Model silnika tarczowego do obliczeń polowych wraz z wygenerowaną siatką został przedstawiony na rys. 8. Na płaszczyznach zewnętrznych modelu, równoległych do płaszczyzny XY, został zadany warunek brzegowy  $B_t=0$ . Na pozostałych płaszczyznach zewnętrznych  $B_n=0$ .

Na rysunku 9 przedstawiono przestrzenny rozkład indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej. Rozkład obejmuje obszar jednego bieguna w środku szczeliny powietrznej przy wysokości magnesów 10 mm i rozpiętości kątowej  $80^\circ$ . Punkty 1 i 4 leżą na wewnętrznej średnicy magnesu, natomiast punkty 3 i 2 na zewnętrznej średnicy magnesu.



Rys. 8. Model maszyny tarczowej do obliczeń



Rys. 9. Rozkład indukcji w środku szczeliny polowych powietrznej, w obszarze jednego bieguna

## 5. Analiza uzwojeń maszyny tarczowej

Przy projekcie uzwojenia twornika maszyny tarczowej założono, że maszyna ma 2 pary biegunów, moc ok. 100 kW i prędkość obrotową 20000 obr/min. Z obliczeń mechanicznych [3] określono promień zewnętrzny magnesów  $r_{zm}=145$  mm. Przyjęto, że promień zewnętrzny uzwojenia ewolwentowego  $r_{ze}$  powinien być ok. 10 mm większy od  $r_{zm}$ . Metodą kolejnych przybliżeń dobrano promień wewnętrzny uzwojenia  $r=52$  mm. Ewolwenta tego okręgu określa kształt boku zwoju.

Ponieważ przesunięcie kątowe pomiędzy początkiem i końcem boku zwoju ewolwentowego jest równe podziałce biegunowej, to z warunku tego można wyznaczyć zewnętrzny promień uzwojenia  $r_{ze}=154.5$  mm. Promień wewnętrzny  $r_{wm}$  magnesów powiększono w stosunku do  $r$  do wartości 60 mm. Wyznaczony kształt zwojów i schemat jednej fazy uzwojenia przy liczbie zwojów w grupie  $n_{zg}=6$  pokazano na rys. 10. Przy powyższych obliczeniach korzystano z parametrycznego równania ewolwenty okręgu [5]

$$\begin{aligned} x &= r\cos(\varphi) + r\varphi\sin(\varphi) \\ y &= r\sin(\varphi) - r\varphi\cos(\varphi) \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie  $x, y$  – współrzędne punktu ewolwenty,  $r$  – promień okręgu bazowego,  $\varphi$  – kąt określający punkt na okręgu bazowym, w którym styczna do niego przechodzi przez punkt ewolwenty o współrzędnych  $(x, y)$

Długość pręta o kształcie odcinka ewolwenty obliczono z zależności  $l_p = 0.5r\varphi^2 = 203.6$  mm.

Ponieważ twornik nie ma rdzenia ferromagnetycznego, to napięcie indukowane w bokach zwojów–prętach można obliczyć z zależności

$$U_{ip} = \int_0^{l_p} \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad (4)$$

gdzie:  $U_{ip}$  – napięcie indukowane w pręcie,  $\vec{v}$  – prędkość liniowa w punkcie pręta,  $\vec{B}$  – indukcja w punkcie pręta,  $l_p$  – długość pręta.

Napięcie indukowane w paśmie fazowym uzwojenia można obliczyć jako sumę napięć indukowanych w poszczególnych prętach. Przy liczeniu napięć indukowanych pręt w strefie magnesów, pomiędzy promieniami  $r_{wm}$  i  $r_{zm}$  podzielono na  $k$  odcinków ze stałym przyrostem  $\Delta r$ . Kolejne punkty pręta mają współrzędne promieniowe  $r_i = r_{wm} + i\Delta r$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, k$ . Następnie z równania ewolwenty znaleziono zbiór współrzędnych kątowych tych punktów  $A = \{0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i(r_i), \dots, \alpha_k(r_{zm})\}$  Przy takiej dyskretyzacji pręta zależność (2) sprowadza się do formuły:

$$U_{ip} = \frac{\pi n}{120} \sum_{i=0}^{k-1} (B_i(r_i, \alpha_i) + B_{i+1}(r_{i+1}, \alpha_{i+1}))(r_{i+1}^2 - r_i^2) \quad (5)$$

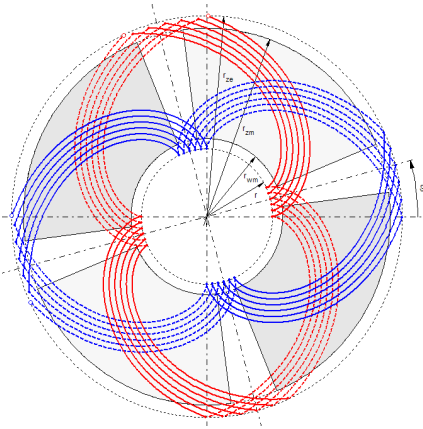
gdzie  $n$  – prędkość obrotowa wirnika w obr/ min

Przyjęto, że indukcja nie zmienia się w kierunku promieniowym i zależy tylko od współrzędnej kątowej  $\alpha_i$  punktu pręta. We wszystkich punktach pręta o

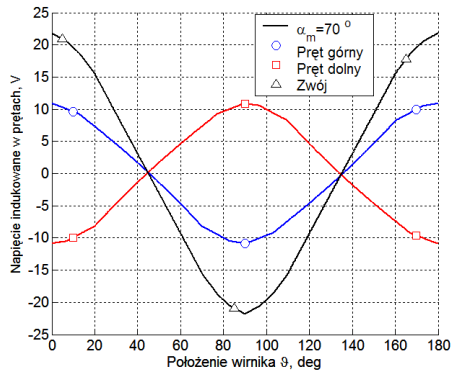
danej współrzędnej kątowej w układzie odniesienia związanym z twornikiem indukcyjność zależy również od kątowej rozpiętości magnesu, określonej współczynnikiem wypełnienia podziałki biegunowej  $\alpha_e$  i od kąta położenia wirnika  $\vartheta$ . Zależność indukcyjności określono przebiegiem prostokątnym o wartości  $B_\delta$  tam gdzie występuje magnes według zależności

$$B(\alpha, \vartheta, \beta_m) = B_\delta (|\sin(2(\alpha - \vartheta))| > \sin(2\beta_m)) \text{sign}(\sin(2(\alpha - \vartheta))) \quad (6)$$

gdzie:  $\beta_m$  – połowa kąta określającego rozpiętość strefy niezapełnionej przez magnes na podziałce biegunowej  $\beta_m = (\tau - \alpha_m)/2 = \tau(1 - \alpha_e)/2$ ,  $\alpha_m$  – rozpiętość kątowa magnesu na podziałce biegunowej – kąt magnesu.



Rys. 10. Schemat jednego pasma uzwojenia



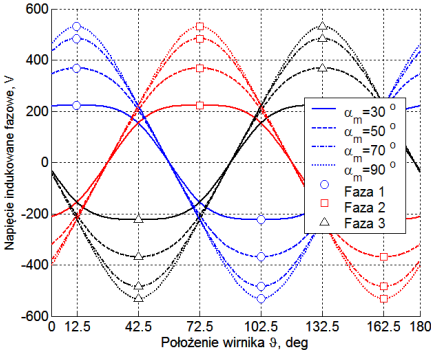
Rys. 11. Napięcie indukowane w pierwszym zwoju ewolwentowym

Uwzględniając wzór (6) we wzorze (5) obliczono zależność napięcia indukowanego w górnym pręcie pierwszego w grupie zwoju od kąta położenia wirnika  $\vartheta$ , przy określonym kącie magnesu  $\alpha_m$ . Napięcie pręta dolnego obliczono analogicznie, przyjmując takie same jak w pręcie górnym współrzędne promieniowe punktów na boku dolnym. Współrzędne kątowe określono z zależności  $\alpha_{id} = \pi - \alpha_{ig}$ , przy czym indeksami  $d$  i  $g$  oznaczono współrzędne kątowe punktów pręta dolnego i górnego.

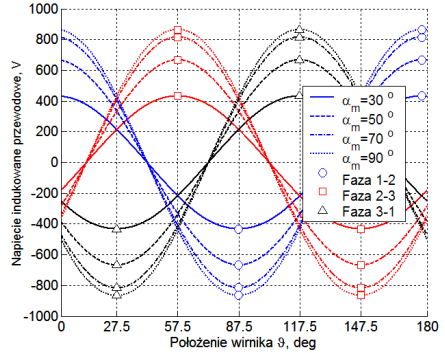
Wyniki obliczeń napięcia indukowanego w boku górnym i dolnym oraz całym pierwszym zwoju, przy kącie magnesu  $\alpha_m=70^\circ$ , pokazano na rys. 11. Napięcia indukowane w pozostałych zwojach w grupie są takie same, tylko odpowiednio przesunięte o kąt przesunięcia danego zwoju względem pierwszego.

Na rys. 12 i 13 zamieszczono obliczone przebiegi napięcia indukowanego fazowego i przewodowego, przy różnych wartościach kąta magnesu  $\alpha_m = 30^\circ, 50^\circ$ ,

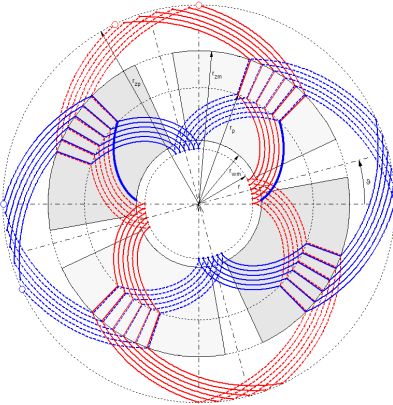
70°, 90°.



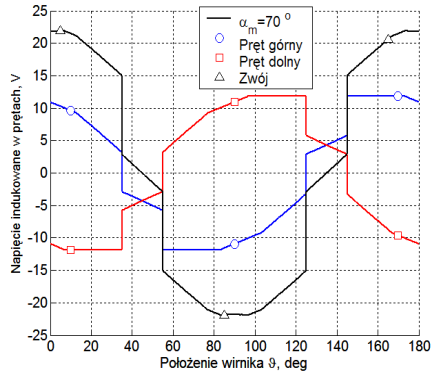
Rys. 12. Napięcie indukowane fazowe, przy różnych kątach magnesu



Rys. 13. Napięcie indukowane, przewodowe kątach magnesu



Rys. 14. Schemat jednego pasma uzwojenia

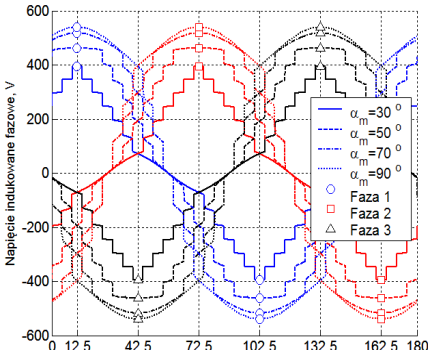


Rys. 15. Napięcie indukowane w pierwszym zwoju ewolwentowo-promieniowym

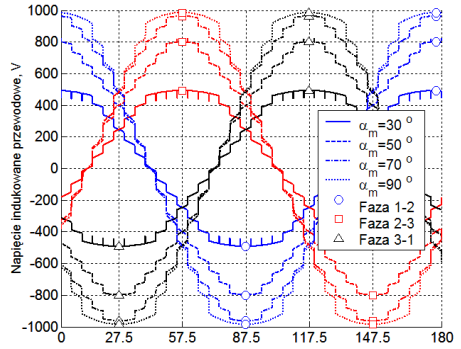
Z rysunków 12 i 13 wynika, że zwiększanie kąta magnesu powyżej 70° powoduje nieproporcjonalnie mały przyrost amplitudy napięcia.

Przy takich samych jak dla uzwojenia ewolwentowego promieniach:  $r$  – wewnętrznym promieniu uzwojenia,  $r_{wm}$  i  $r_{zm}$  – wewnętrznym i zewnętrznym promieniu magnesów zaprojektowano uzwojenie o klasycznym – ewolwentowo-promieniowym kształcie zwojów. Wyznaczony kształt zwojów i schemat jednej fazy uzwojenia przy tej samej liczbie zwojów w grupie  $n_{zg}=6$  pokazano na rys. 14. Na rysunku tym dodatkowo zaznaczono punkty na górnym i dolnym boku pierwszego zwoju, na podstawie których obliczane jest napięcie indukowane, przy pręd-

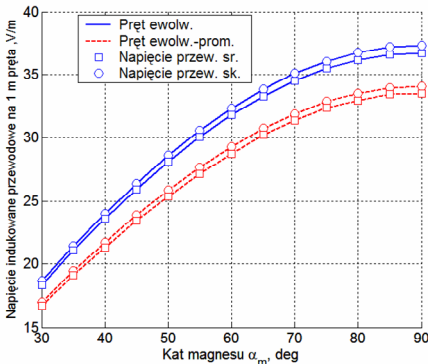
kości znamionowej. Długość boku zwoju  $l_p=263.1$  mm, i jest o 29 % większa od boku zwoju ewolwentowego.



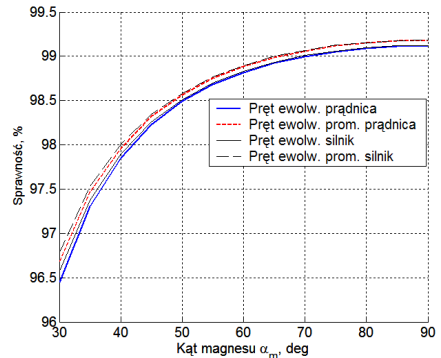
Rys. 16. Napięcie indukowane fazowe, przy różnych kątach magnesu



Rys. 17. Napięcie indukowane, przewodowe przy różnych kątach magnesu



Rys. 18. Efektywność napięciowa uzwojeń



Rys. 19. Sprawności obydwu wariantów maszyn

Wyniki obliczeń napięcia indukowanego w górnym i dolnym boku oraz całym pierwszym zwoju, przy kącie magnesu  $\alpha_m=70^\circ$ , pokazano na rys. 15. Skokowe zmiany napięcia indukowanego spowodowane są promieniowymi odcinkami prętów i przyjętym w obliczeniach prostokątnym rozkładem indukcji.

Na rys. 16 i 17 zamieszczono obliczone przebiegi napięcia indukowanego fazowego i przewodowego, przy różnych wartościach kąta magnesu  $\alpha_m = 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ . Z rysunków tych wynika, że przyrost kąta magnesu z  $70^\circ$  do  $90^\circ$  powoduje nieproporcjonalnie mały przyrost amplitudy napięcia.

Na rys. 18. pokazano zależność napięcia indukowanego przewodowego na jednostkę długości przewodu dwóch pasm uzwojenia – efektywność napięciowa uzwojenia. Z rysunku tego wynika, że uzwojenie ewolwentowe ma o ponad 9 % większą efektywność napięciową od uzwojenia ewolwentowo-promieniowego.

Efektywność napięciowa uzwojenia jest prostą miarą intuicyjnej oceny uzwojenia, jednakże na jej podstawie nie można jednoznacznie wnioskować o sprawności maszyny, która w rozważanym zastosowaniu jest najważniejszym kryterium oceny. W celu porównania obydwu wariantów uzwojeń obliczono sprawność maszyn w stanie silnikowym i prądnicowym, przy założeniu, że moc idealna maszyny jest równa 100 kW. Zależność sprawności od kąta magnesu pokazano na rys 19. Z rysunku tego wynika, że sprawność obydwu maszyn jest niemalże taka sama. Różnice są mniejsze od 1 promila.

## **6. Podsumowanie**

W pracy przedstawiono analizę wyboru rodzaju maszyny elektrycznej do zastosowania w kinematycznych magazynach energii. W analizie wzięto pod uwagę maszynę indukcyjną z litym wirnikiem, reluktancyjną maszynę synchroniczną, maszynę z magnesami trwałymi i maszynę reluktancyjną przełączalną.

Stwierdzono, że najlepiej jest zastosować maszynę z magnesami trwałymi. Spośród rozpatrywanych maszyn najbardziej obiecujące są konstrukcje z polem aksjalnym oraz z wewnętrznym stojanem bez rdzenia ferromagnetycznego.

Z przeprowadzonej analizy dwóch wariantów uzwojenia silnika tarczowego, różniących się kształtem zwoju, wynika, że lepszym uzwojeniem jest uzwojenie ewolwentowe. Sprawność maszyn w obydwu przypadkach jest prawie taka sama, natomiast masa uzwojenia ewolwentowego jest o 29 % mniejsza. Różnica wynika bezpośrednio z większej długości pręta uzwojenia ewolwentowo-radialnego. Jest to dodatkowa wada tego uzwojenia, przy przewidywanym sposobie bezpośredniego chłodzenia prętów.

Otrzymany wynik analizy nie jest uniwersalny, gdyż uzyskano go przy niezmiennym kształcie wirnika. W rozpatrywanym zastosowaniu maszyny było to konieczne, ponieważ kształt wirnika był ograniczony jego wytrzymałością mechaniczną.

Szersza, bardziej uniwersalna analiza kształtu zwoju uzwojeń tworników w maszynach bezrdzeniowych wymaga sformułowania bardziej ogólnego zadania projektowego, bez tak silnego ograniczenia kształtu wirnika, z uwzględnieniem ograniczeń cieplnych.

## LITERATURA

1. Acarnley P.P., Mecrow B. C., Burdess J. C., Fawcett J. N., Kelly J. G., Dickinson P. G.: „Design Principles for a Flywheel Energy Store for Road Vehicles”, IEEE Transactions on Industry Application, 32 (1996), n 6, 1402-1408.
2. Darrelmann H., Canders W.R., Laube F. „A Flywheel energy storage system for power quality applications in the 10 kWh class” Prezentacja na Seminarium Naukowym CoE. IME. PW 2005.
3. Kamiński G., Szczypior J.: „Wysokobrotowe maszyny elektryczne w układach napędowych kinematycznych magazynów energii – bezwładników”, Proc. of SME 2004 Hajnówka, 304-312.
4. Kamiński G., Szczypior J., Smak A.: Wybrane problemy konstrukcji maszyny bezszczotkowej stosowanej w kinematycznym magazynie energii, Proc. of SME 2005 Jarnołtówek.694-700.
5. Dziubiński I., Świątkowski T.: Poradnik matematyczny, PWN Warszawa, 1982.

### AN ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINES CONSTRUCTIONS APPLIED IN FLYWHEEL ENERGY STORAGE DRIVE

Summary: The analysis of electric machine constructions choice for flywheel energy storage systems is presented in the paper. The structure of disc machine without ferromagnetic core is considered. Magnetic circuits with two winding variants (classic and skew coil) are discussed in detail. Calculation results of magnetic field distribution in an air gap area, where an armature is located, are presented. A coreless armature design method for the disc machine and evaluation of back EMF waveform in winding phases are discussed in details. The example calculations of back EMF waveforms in dependency of the magnet angle within pole pitch are shown. Finally, the evaluation chose criteria of the best winding option are formulated..

**Keywords:** kinetic energy storage, brushless electric machine, permanent magnet

Irena Makowska<sup>1</sup>, Radosław Kwieciński<sup>2</sup>, Marcin Derlatka<sup>2</sup>

## PROJEKT EKSPERTOWEGO SYSTEMU DIAGNOSTYCZNEGO SILNIKA SAMOCHODOWEGO

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono projekt diagnostycznego systemu ekspertowego silnika samochodowego na przykładzie silników firmy Fiat. Dane uzyskano z badań przeprowadzonych na stanowisku hamownianym firmy Fiat z siedzibą w Suwałkach. Do realizacji projektu wykorzystano oprogramowanie PC-Shell (szkieletowy system ekspertowy).

**Słowa kluczowe:** samochodowy, system diagnostyczny, system ekspertowy

### 1. Wprowadzenie

W ramach diagnostyki silnika samochodowego ocenia się jego stan techniczny i na podstawie tej oceny podejmuje się decyzję o dalszym użytkowaniu bądź o metodzie usprawnienia jego pracy. Metoda ta może dotyczyć przedsięwzięć profilaktycznych (regulacja, wymiana elementów lub całych zespołów, związana z ich eksploatacją) albo wprowadzenia zmian w konstrukcji, technologii, eksploatacji. Ocena stanu technicznego silnika wymaga dogłębnej analizy wielu wielkości oraz doświadczenia i/lub zastosowania systemu ekspertowego.

System ekspertowy jest programem korzystającym z bazy wiedzy, utworzonej na podstawie szczegółowej wiedzy dotyczącej konkretnego zagadnienia. Ułatwia on podejmowanie decyzji, wspiera ekspertów w wybranej dziedzinie, dostarcza rad, zaleceń i diagnoz.

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny,  
Koło Naukowe Biocybernetyki i Systemów Informatycznych

<sup>2</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki,  
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45C.



Ekspertowy system diagnostyczny silnika samochodowego marki Fiat wymaga:

- zdiagnozowania silnika samochodowego (wartości z diagnozy: ciśnienie sprężania, zużycie paliwa, prędkość obrotowa wału korbowego silnika, moment obrotowy obciążający silnik i in.);
- wykrycia dodatkowych sygnałów diagnostycznych (hałas lub trzask podczas pracy silnika, obecność paliwa w zbiorniku, wyciek paliwa pod samochodem, odchylenie od typowej pracy silnika, przedmuchy spalin do skrzyni korbowej, przegrzanie silnika, „strzelanie” w tłumiku, stuki podczas pracy silnika, syczenie w skrzyni korbowej itp.);
- porównania wartości z diagnostyki z danymi technicznymi;

W artykule przedstawiono projekt diagnostycznego systemu ekspertowego silnika samochodowego na przykładzie silników firmy Fiat.

## **2. Projekt ekspertowego systemu diagnostycznego**

W pracy wykorzystano szkieletowy system ekspertowy PC-Shell. Opis bazy wiedzy jest podzielony na pięć bloków: blok opisu źródeł, faset, reguł, faktów oraz sterowania. Obiektem diagnozowanym jest silnik samochodowy marki Fiat. Opis silnika tworzą [2] charakterystyki, które uzyskano z hamowni silnikowej. Badania na stanowiskach hamownianych wykonywano w warunkach ustalonych, co oznacza, że przy wyznaczaniu każdego punktu charakterystyki wszystkie wielkości determinujące pracę silnika nie ulegały zmianie (prędkość obrotowa, obciążenie, skład mieszanki itp.). Wykaz najczęściej występujących usterek i przyczyn ich występowania [3] pozwala zdefiniować zbiór uszkodzeń, które rozpoznawalne są dzięki systemowi ekspertowemu.

### **2.1. Sygnały diagnostyczne**

Dane z przeprowadzonej diagnostyki, czyli zużycie paliwa [litr/100km], stopień sprężania [ $\rho$ ], moc maksymalna osiągnięta przez silnik [obr/min], moment maksymalny osiągnięty przez silnik [obr/min], przedstawiono w tabeli 1, a dane techniczne poszczególnych marek i typów samochodów zestawiono w tabeli 2. Tabela 3 zawiera dopuszczalne odchyłki poszczególnych wartości parametrów.

Pomiar momentu obrotowego i mocy maksymalnej wykonano na hamowni. Hamownia składa się z zamontowanych w podłodze rolek i komputera. W podłodze przy rolkach znajduje się czujnik, który mierzy ich prędkość.

Tab. 1. Dane z diagnostyki samochodów firmy Fiat

Lp.	Typ samochodu	Zespół napędowy	Skrzynia biegów	Zużycie paliwa wg norm ECE[litr/100km]				Ciśnienie sprężania [bar]	Moc max osiągnięta przez silnik [obr/min]	Moment max osiągnięty przez silnik [obr/min]
				Test miejski	Prędkość stała 90 km/h	Prędkość stała 120 km/h	Zużycie średnie			
1	Punto	1108	5	7,9	4,7	6,5	6,4	9,6	5500	3500
2	Punto	1108	6	7	5	6,9	6,3	9,6	5500	3500
3	Punto	1242 SPI	5	7,5	4,8	6,4	6,2	9,6	5500	3000
4	Punto	1242 MPI	5	7,8	5,3	6,9	6,7	9,8	6000	4000
5	Punto	1372 turbo	5	9,7	6,1	8,3	8	7,8	5750	3000
6	Punto	1697 TD	5	6,9	4,5	6,4	5,9	7,8	5750	3000
7	Palio Weekend	1372	5	9,4	5,5	7,2	7,4	9,2	6000	3000
8	Palio Weekend	1581	5	9,6	5,5	7,5	7,6	10,15	5500	4500
9	Palio Weekend	1242	5	9,2	5,4	6,8	7,2	10,6	5000	4000
10	Palio Weekend	1596	5	11,7	6,1	8,1	8,7	10,5	5750	4000
11	Palio Weekend	1242(178 DXG1A AP)	5	8,2	5,2	7,2	6,9	9,8	6000	3000
12	Palio Weekend	1581(178 DXD1A AP)	5	9,8	5,5	7,5	7,6	10,15	5500	4500
13	Siena	1242(178 CXG1A AP)	5	8,2	5,2	7,2	6,9	9,8	6000	3000
14	Siena	1372	5	9,8	5,5	7,6	7,6	9,2	6000	3000
15	Siena	1581	5	9,8	5,5	7,5	7,6	10,15	5500	4500
16	Siena	1581(178 CXD1A AP)	5	9,8	5,5	7,5	7,6	10,15	5500	4500
17	Cinquecento	704	5	6,1	4,3	–	5,2	9	5000	3000
18	Cinquecento	903	5	6,6	4,8	6,4	5,9	9	5500	3000
19	Cinquecento	903(Wersja USA 93)	5	6,7	4,8	6,3	5,9	9	5500	3000

20	Multipla	1581	5	11,1	7,2	8,6	9	7,8	5750	4000
21	Multipla	1910	5	8	5,5	6,4	6,6	8,5	4000	1700
22	Bravo-Brava	1370	5	9,8	6	7,8	7,9	9,85	6000	2750
23	Bravo-Brava	1581	5	11,2	6,6	8,5	8,8	10,15	5750	4000
24	Bravo-Brava	1747(5 drzwi)	5	11,5	6,6	8,4	8,8	10,3	5800	4400
25	Bravo-Brava	1747(3 drzwi)	5	11,3	6,5	8,3	8,7	10,3	5800	4400
26	Bravo-Brava	1998	5	11	7,1	8,5	8,9	10	6100	4500
27	Bravo-Brava	1910 JTD	5	11,5	7,8	9	9,4	18,45	4000	1500
28	Scudo	1868 D	5	10,1	6,6	7,9	8,2	23	4600	2500
29	Lancia Y	1242	6	7,2	4,8	6,6	6,2	9,8	5500	3000
30	Lancia Y	1242	5	7,6	5,0	6,7	6,4	9,8	5500	3000
31	Lancia Y	1370	6	8,9	5,2	7,0	7	9,85	6000	3250

Przed samą próbą dokonuje się kilku czynności pomocniczych. Najistotniejszą jest przymocowanie auta za pomocą pasów. Następnie trzeba ustalić prędkość obrotową silnika przy określonej prędkości na danym biegu.

Proces pomiaru [7]:

- badane jest przełożenie skrzyni biegów i napędu;
- po upewnieniu się, że temperatura silnika jest już prawidłowa, kierowca rozpędza auto na najwyższym możliwym lub wybranym przez siebie biegu do maksymalnych istotnych dla pomiaru obrotów;
- dokonuje się pomiaru prędkości rolek, a komputer, uwzględniając czas potrzebny na ich rozpędzenie i zatrzymanie, wylicza moment obrotowy na kołach oraz opory toczenia i przekładni.
- kierowca naciska sprzęgło, pozostawiając włączony bieg, hamownia zwalnia aż do zatrzymania;
- po zatrzymaniu rolek na ekranie komputera pojawia się zmierzony moment obrotowy silnika - jest to wartość na silniku, a nie na kołach, gdyż program, uwzględniając zmierzone opory toczenia, oblicza je automatycznie;
- komputer automatycznie podaje maksymalne wartości momentu obrotowego i mocy maksymalnej, obroty silnika oraz prędkość jazdy przy jakich są uzyskiwane.

Pomiar ciśnienia sprężania służy do sprawdzenia stopnia zużycia elementów silnika, które mają wpływ na szczelność cylindra, tłoka, pierścieni.

W trakcie pomiaru wykonywane są również następujące czynności:

- sprawdzenie i w razie potrzeby wyregulowanie luzów zaworów (mają one wpływ na wynik pomiaru);
- wykręcenie wszystkich świec zapłonowych lub wtryskiwaczy po nagraniu silnika do normalnej temperatury pracy (jeżeli pomiar luzów zaworów odbywał się na „zimno”).

Ocena wyników polega na porównaniu otrzymanych wyników pomiaru z danymi fabrycznymi. Różnice ciśnienia sprężania między poszczególnymi cylindrami nie powinny być większe niż 10% najwyższego odczytu. Spadek ciśnienia sprężania o 15...20% w stosunku do wartości nominalnej świadczy o dużym zużyciu tłoka, cylindra, pierścieni tłokowych i zaworów, mających wpływ na obniżenie parametrów pracy silnika i jego trwałości, które kwalifikuje silnik do naprawy.

Pomiar ciśnienia sprężania pozwala jedynie ogólnie ocenić szczelność cylindrów silnika i na jego podstawie trudno jest określić zakres niezbędnej naprawy. Chcąc jednoznacznie ustalić miejsca nieszczelności oraz określić wielkość występującego zużycia należy dodatkowo wykonać pomiar szczelności cylindrów.

Najprostszym sposobem oceny działania układu zasilania jest określenie ilości paliwa zużywanego przez samochód podczas jazdy. Można to wykonać, stosując metodę „pełnego zbiornika”, która polega na przejechaniu dłuższego odcinka drogi (co najmniej 100 km) po maksymalnym napełnieniu zbiornika paliwa. Ilość paliwa uzupełnionego do stanu poprzedniego pozwoli określić, po uwzględnieniu pokonanego odcinka drogi, średnie zużycie paliwa. Otrzymane wyniki można porównywać z danymi zebranymi na podstawie doświadczeń stacji diagnostycznych. Jeżeli zostanie stwierdzone nadmierne zużycie paliwa, to przyczyn tego zjawiska należy przede wszystkim poszukiwać w nieprawidłowo działającej instalacji paliwowej i zapłonowej, a dopiero później w uszkodzeniu bądź zużyciu eksploatacyjnym silnika, źle wyregulowanych hamulcach lub nadmiernych oporach tarcia w układzie napędowym.

Konstruując system ekspertowy użyto ponadto następujących sygnałów diagnostycznych:

- hałas lub trzask podczas pracy silnika;
- obecność paliwa w zbiorniku;
- wyciek paliwa;
- równomierność pracy silnika;
- przedmuchy spalin do skrzyni korbowej;
- przegrzanie silnika (czy nastąpiło);
- „strzelanie” w tłumiku;
- stuki podczas pracy silnika;

- syczenie w skrzyni korbowej.

Powyższe objawy można stwierdzić bez żadnej specjalistycznej aparatury, podczas pracy silnika. Wystąpienie lub brak powyższych objawów pomaga w dokładniejszej lokalizacji uszkodzenia silnika lub ogólnej ocenie badanego silnika samochodowego.

**Tab. 2.** Dane techniczne poszczególnych samochodów

Lp.	Typ samochodu	Zespół napędowy	Skrzynia biegów	Zużycie paliwa wg norm ECE[litr/100km]				Ciśnienie sprężania [bar]	Moc max osiągnięta przez silnik [obr/min]	Moment max osiągnięty przez silnik [obr/min]
				Test miejski	Prędkość stała 90 km/h	Prędkość stała 120 km/h	Zużycie średnie			
1	Punto	1108	5	7,3	4,8	5,7	5,9	9,8	5500	3500
2	Punto	1108	6	6,5	4,5	6,7	5,9	9,8	5800	4500
3	Punto	1242 SPI	5	7,6	4,8	5,8	6,1	10,6	5500	4000
4	Punto	1242 MPI	5	7,6	4,8	5,7	6,0	10,6	6000	4000
5	Punto	1372 turbo	5	7,8	5,1	6,1	6,3	11	5800	4500
6	Punto	1697 TD	5	5,6	3,9	4,5	4,7	18	5750	3000
7	Palio Weekend	1372	5	8,2	5,5	7	6,9	9,6	6000	3000
8	Palio Weekend	1581	5	9,2	5,4	6,8	7,1	10,6	5500	4500
9	Palio Weekend	1242	5	9,2	5,4	6,8	7,1	10,6	5000	4000
10	Palio Weekend	1596	5	11,7	6,1	8,1	8,6	10,8	5750	4000
11	Palio Weekend	1242(178 DXG1A AP)	5	8,9	5,9	7	7,3	9,8	6000	3000
12	Palio Weekend	1581(178 DXD1A AP)	5	9,2	5,4	6,8	7,1	10,6	5500	4500
13	Siena	1242(178 CXG1A AP)	5	8,2	5,2	7,2	6,9	9,8	6000	3000
14	Siena	1372	5	9,5	5,5	7,5	7,5	9,2	6000	3000
15	Siena	1581	5	9,8	5,5	7,5	7,6	10,1	5500	4500
16	Siena	1581(178 CXD1A AP)	5	9,8	5,5	7,5	7,6	10,1	5500	4500

17	Cinquecento	704	5	4,7	4	6,5	5,1	10	5000	3000
18	Cinquecento	903	5	6,5	4,7	6,3	5,8	10	5500	3000
19	Cinquecento	903(Wersja USA 93)	5	6,7	4,7	6,3	5,9	10	5500	3250
20	Multipla	1581	5	11,1	7,2	8,6	9,0	10,5	5750	4000
21	Multipla	1910	5	8	5,5	6,4	6,6	18,5	4000	1700
22	Bravo-Brava	1370	5	9,5	5,4	6,9	7,3	10	6000	3000
23	Bravo-Brava	1581	5	10,6	6	7,7	8,1	10,3	5750	4000
24	Bravo-Brava	1747(5 drzwi)	5	11,5	6,6	8,4	8,8	10,3	5800	4400
25	Bravo-Brava	1747(3 drzwi)	5	9,8	6	7,5	7,8	10,3	5800	4400
26	Bravo-Brava	1998	5	11	6,6	8,4	8,7	10,3	6200	4400
27	Bravo-Brava	1910 JTD	5	7,3	4,5	5,5	5,8	20	4000	1500
28	Scudo	1868 D	5	10,1	6,6	7,9	8,2	23	4600	2500
29	Lancia Y	1242	6	6,5	4,5	6	5,7	9,8	5500	3000
30	Lancia Y	1242	5	5,5	5,0	6,5	5,7	9,8	5500	3000
31	Lancia Y	1370	6	7,5	4,8	6,5	6,3	9,8	6000	3250

Tab.3. Dopuszczalne wartości zmierzonych parametrów

Lp	Typ samochodu	Zespół napędowy	Skrzynia biegów	Dopuszczalna max wartość średniego zużycia paliwa [litr/100km]	Dopuszczalna min wartość ciśnienia sprężania	Dopuszczalna min wartość mocy max [obr/min]	Dopuszczalna min wartość momentu max [obr/min]
1	Punto	1108	5	6,9	8,3	3850	2450
2	Punto	1108	6	6,9	8,3	4060	3150
3	Punto	1242 SPI	5	7,1	9,0	3850	2800
4	Punto	1242 MPI	5	7,0	9,0	4200	2800
5	Punto	1372 turbo	5	7,3	9,4	4060	3150
6	Punto	1697 TD	5	5,7	15,3	4025	2100
7	Palio Weekend	1372	5	7,9	8,2	4200	2100
8	Palio Weekend	1581	5	8,1	9,0	3850	3150

9	Palio Weekend	1242	5	8,1	9,0	3500	2800
10	Palio Weekend	1596	5	9,6	9,2	4025	2800
11	Palio Weekend	1242(178 DXG1A AP)	5	8,3	8,3	4200	2100
12	Palio Weekend	1581(178 DXD1A AP)	5	8,1	9,0	3850	3150
13	Siena	1242(178 CXG1A AP)	5	7,9	8,3	4200	2100
14	Siena	1372	5	8,5	7,8	4200	2100
15	Siena	1581	5	8,6	8,6	3850	3150
16	Siena	1581(178 CXD1A AP)	5	8,6	8,6	3850	3150
17	Cinquecento	704	5	6,1	8,5	3500	2100
18	Cinquecento	903	5	6,8	8,5	3850	2100
19	Cinquecento	903(Wersja USA 93)	5	6,9	8,5	3850	2275
20	Multipla	1581	5	10,0	8,9	4025	2800
21	Multipla	1910	5	7,6	15,7	2800	1190
22	Bravo-Brava	1370	5	8,3	8,5	4200	2100
23	Bravo-Brava	1581	5	9,1	8,8	4025	2800
24	Bravo-Brava	1747(5 drzwi)	5	9,8	8,8	4060	3080
25	Bravo-Brava	1747(3 drzwi)	5	8,8	8,8	4060	3080
26	Bravo-Brava	1998	5	9,7	8,8	4340	3080
27	Bravo-Brava	1910 JTD	5	6,8	17,0	2800	1050
28	Scudo	1868 D	5	9,2	19,6	3220	1750
29	Lancia Y	1242	6	6,7	8,3	3850	2100
30	Lancia Y	1242	5	6,7	8,3	3850	2100
31	Lancia Y	1370	6	7,3	8,3	4200	2275

## 2.2. Implementacja systemu ekspertowego

Prezentowany system ekspertowy może stanowić integralną część większego i bardziej skomplikowanego systemu ekspertowego, służącego do diagnostyki samochodów osobowych. System ten pomaga przeciętnemu użytkownikowi samochodu (w tym przypadku samochodów firmy Fiat) w zlokalizowaniu uszkodzeń silnika. Na podstawie odpowiedzi na kilka prostych pytań oraz pobrania konkretnych wartości danych parametrów takich jak: średnie zużycie paliwa, stopień sprężania, moc maksymalna, moment maksymalny, otrzymanych z diagnostyki, system ocenia sytuację, podając hipotezę ewentualnej usterki.

W systemie ekspertowym używane hasła, Objawy, Usterki miały następujące znaczenie:

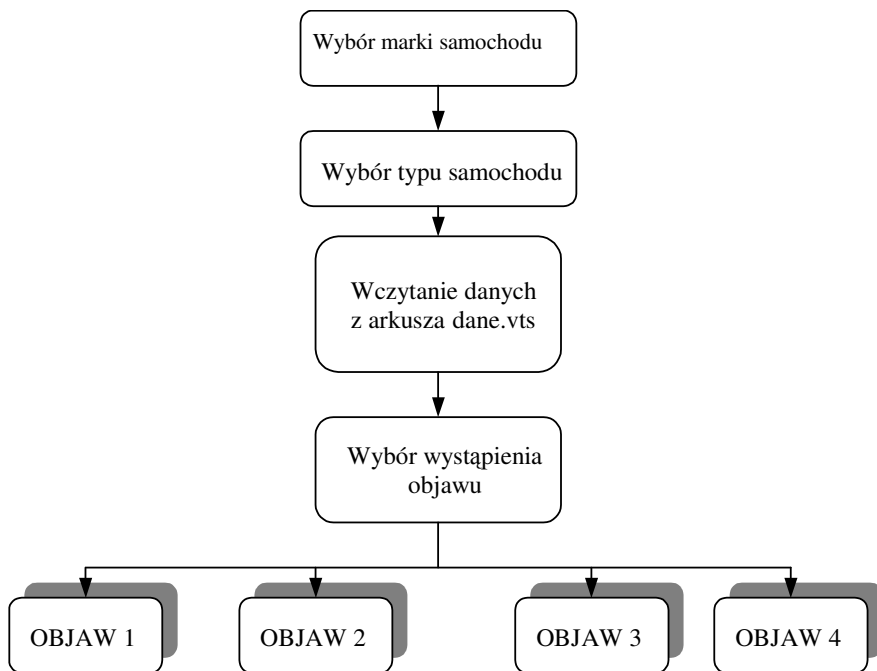
1. OBJAW 1 – „Nie stwierdzono nieprawidłowości podczas pracy silnika”.
2. OBJAW 2 – „Samochód nie osiąga normalnych prędkości jazdy”.
3. OBJAW 3 – „Brak oleju lub jego zanieczyszczenie”.
4. OBJAW 4 – „Nagle przestaje pracować silnik”.
5. USTERKA 1 – „Silnik działa prawidłowo”.
6. USTERKA 2 – „Uszkodzona uszczelka pod głowicą”.
7. USTERKA 3 – „Uszkodzona pompa wtryskowa”.
8. USTERKA 4 – „Niepoprawna regulacja gaźnika”.
9. USTERKA 5 – „Uszkodzenia gładzi cylindrów”.
10. USTERKA 6 – „Uszkodzenie zabezpieczenia sworznia tłokowego”.
11. USTERKA 7 – „Zużycie pierścieni uszczelniających, pęknięcie pierścienia tłokowego”.
12. USTERKA 8 – „Zużycie gładzi cylindrów”.
13. USTERKA 9 – „Pęknięcie tłoka”.
14. USTERKA 10 – „Niewłaściwe wyprzedzenie wtryskiwania”.
15. USTERKA 11 – „Zanieczyszczenie komór spalania nagarem”.
16. USTERKA 12 – „Niewłaściwe przyleganie głowicy cylindrów do kadłuba”.
17. USTERKA 13 – „Zużycie pierścieni tłokowych”.
18. USTERKA 14 – „Zużycie płaszczka tłokowego”.
19. USTERKA 15 – „Zużycie przyłgni zaworów wylotowych”.
20. USTERKA 16 – „Osadzanie się nadmiernej ilości nagaru na denku tłoka”.
21. USTERKA 17 – „Pęknięcie pierścienia tłokowego”.
22. USTERKA 18 – „Nieszczelność zbiornika paliwa”.
23. USTERKA 19 – „Uszkodzony przewód paliwa”.
24. USTERKA 20 – „Uszkodzona pompa paliwowa”.
25. USTERKA 21 – „Zanieczyszczenie lub zbyt niski poziom paliwa w zbiorniku”.
26. USTERKA 22 – „Zanieczyszczenie przewodów paliwa”.
27. USTERKA 23 – „Zanieczyszczenie zbiornika paliwa”.



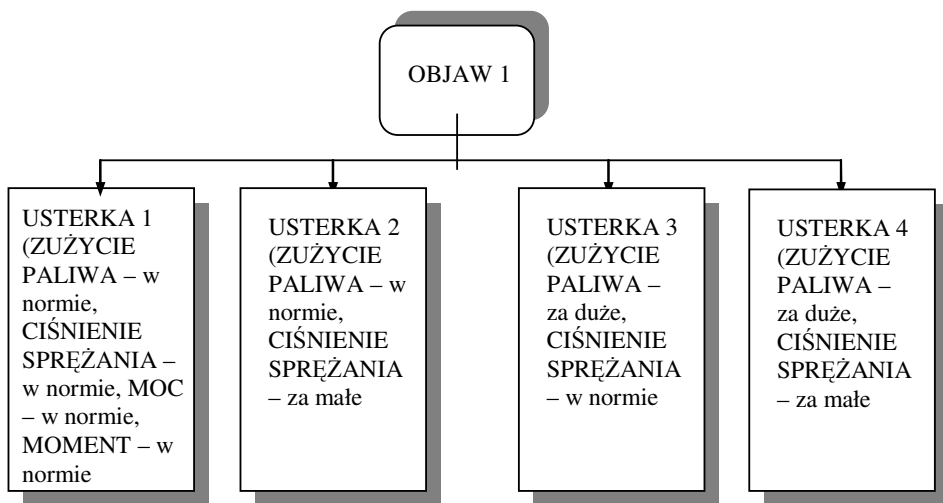
28. USTERKA 24 – „Zawieszanie się zaworów, urwanie się grzybka zaworu, pęknięcie sprężyny zaworu”.
29. USTERKA 25 – „Zbyt niski poziom paliwa w zbiorniku”.
30. USTERKA 26 – „Uszkodzony tłok”.
31. USTERKA 27 – „Zużycie kół lub łańcucha napędu rozrządu”.
32. USTERKA 28 – „Uszkodzenie tłumika lub rury wydechowej”.
33. MOC – „Jaka jest wartość mocy maksymalnej osiąganej przez silnik?”.
34. ZUŻYCIE PALIWA – „Jakie jest zużycie paliwa?”.
35. CIŚNIENIE SPRĘŻANIA – „Jaka jest wartość ciśnienia sprężania”.
36. MOMENT – „Jaka jest wartość momentu maksymalnego osiąganego przez silnik?”.
37. Paliwo – „Czy stwierdzono obecność paliwa?”.
38. Syczenie – „Czy stwierdzono syczenie w skrzyni korbowej?”.
39. Stuki – „Czy słychać stuki podczas pracy silnika?”.
40. Przegrzanie – „Czy nastąpiło przegrzanie silnika?”.
41. Przedmuchy – „Czy stwierdzono przedmuchy spalin do skrzyni korbowej?”.
42. Hałas – „Czy słychać było trzask lub hałas?”.
43. Praca – „Czy praca silnika jest równomierna?”.
44. Strzelanie – „Czy silnik strzela w tłumik?”.
45. Paliwo do silnika – „Czy dociera paliwo do silnika?”.
46. Paliwo pod samochodem – „Czy są wycieki paliwa pod samochodem?”.

Przedstawione poniżej rysunki obrazują algorytm działania systemu ekspertowego umożliwiającego lokalizację uszkodzenia silnika samochodu osobowego po wybraniu jednego z czterech dostępnych w programie objawów. Z każdym atrybutem (np. moc na rys. 2) związane są odpowiadające im wartości (w tym przypadku „za mała” i „w normie”). Wartości atrybutów zostały ustalone na podstawie wzorcowych wartości parametrów (tab. 3) oraz obserwacji występowania lub niewystępowania pewnych symptomów.

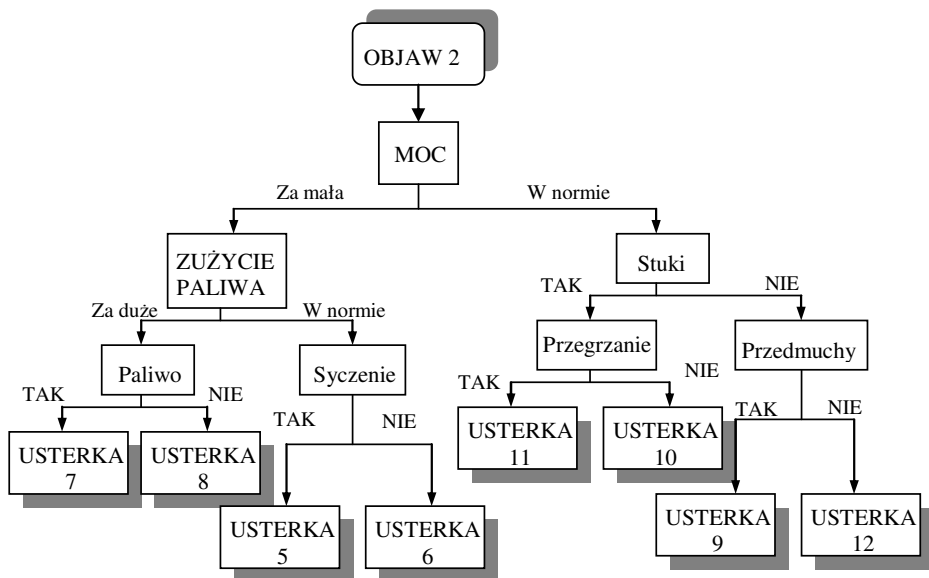
Działanie tak zbudowanego systemu ekspertowego przetestowano opierając się na danych przedstawionych w tabeli 1. Uzyskano poprawne diagnozy stanu technicznego badanych silników dla wszystkich przypadków z posiadanej bazy danych. Należy przypuszczać, że system ekspertowy zadziała prawidłowo także w czasie diagnozowania innych silników samochodów firmy Fiat, gdyż w systemie zaimplementowano wartości graniczne badanych parametrów dla uwzględnionych w pracy uszkodzeń.



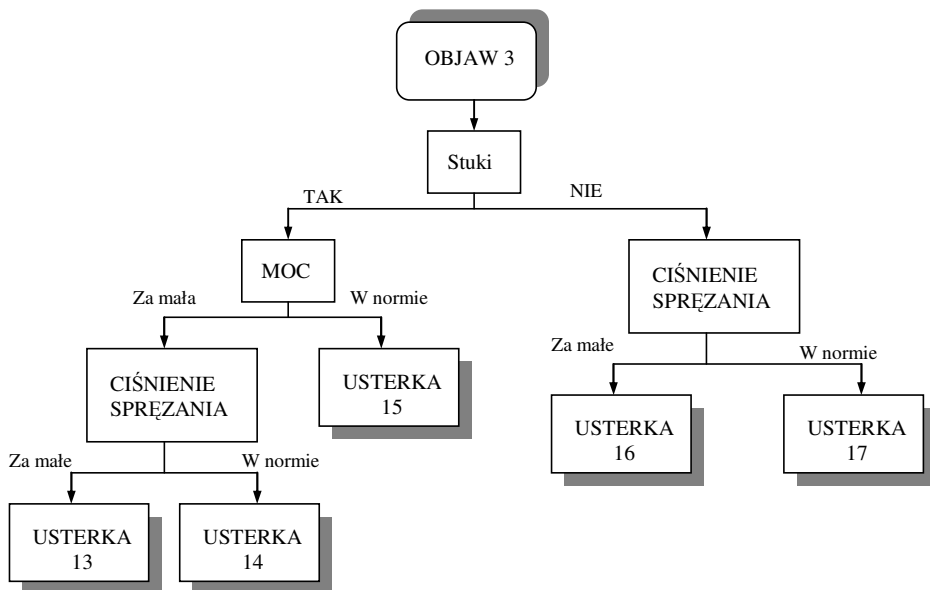
Rys. 1. Ogólna struktura ekspertowego systemu diagnostycznego silnika samochodowego



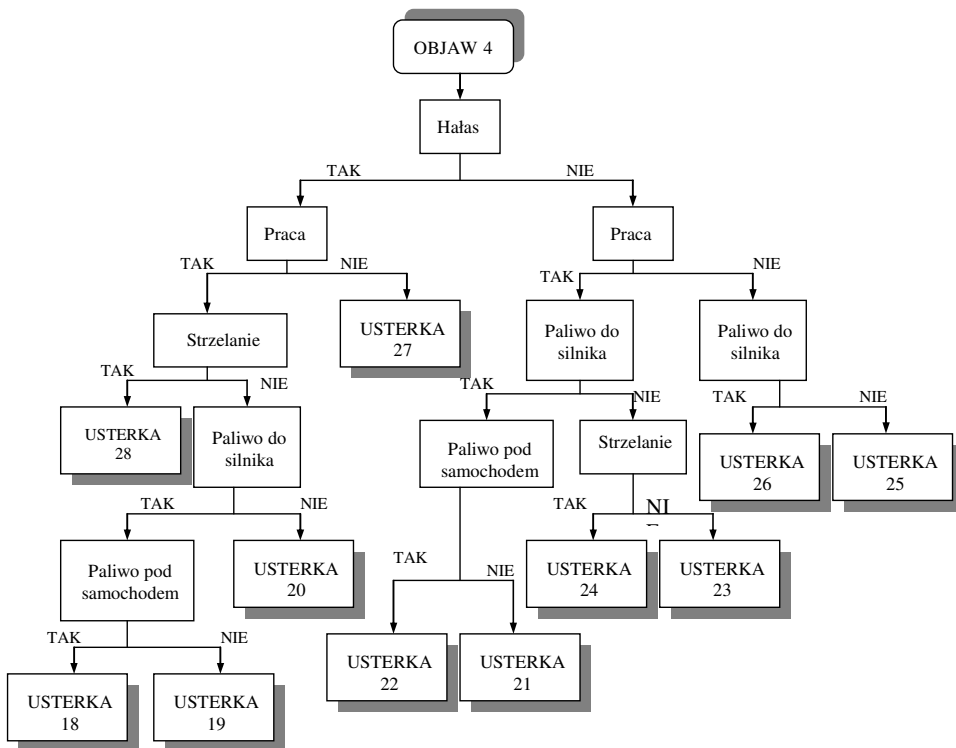
Rys. 2. Lokalizacja uszkodzeń po wybraniu OBJAWU 1



Rys. 3. Lokalizacja uszkodzeń po wybraniu OBJAWU 2



Rys. 4. Lokalizacja uszkodzeń po wybraniu OBJAWU 3



Rys 5. Lokalizacja uszkodzeń po wybraniu OBJAWU 4

### 3. Podsumowanie

Zbudowany system ekspertowy może stanowić integralną część większego i bardziej złożonego systemu ekspertowego, służącego w diagnostyce samochodów osobowych. Na podstawie odpowiedzi na kilka pytań oraz pobrania konkretnych wartości danych otrzymanych ze stanowiska hamownianego system ocenia stan silnika samochodowego, podając hipotezę ewentualnej usterki.

Uzyskane wyniki, w zakresie posiadanej bazy wiedzy, są satysfakcjonujące. Zostały rozpatrzone wszystkie możliwe uszkodzenia ze względu na odpowiednie wartości zdiagnozowanych parametrów i występujących objawów (np. stuki, hałas itp.). System powstał po konsultacjach z fachowcami z dziedziny mechaniki samochodowej.

## LITERATURA

1. Bocheński C., praca zbiorowa, Badania kontrolne samochodów, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2000.
2. Chromiec J., Strzemieczna E., Sztuczna Inteligencja, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1994.
3. Makowska I., Metody projektowania systemów wspomaganie wnioskowania diagnostycznego, praca magisterska, Politechnika Białostocka, Białystok, 2005.
4. Michalik K., PC-Shell 4.1. Szkieletowy system ekspertowy. Podręcznik użytkownika, Katowice, 2004.
5. Michalik K., PC-Shell 4.1. Szkieletowy system ekspertowy. Podręcznik inżyniera, Katowice, 2004.
6. Michalik K., PCShell., <http://www.aitech.com.pl/doc/pcshell3.pdf>
7. Mulawka J. J., Systemy ekspertowe, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996.
8. Diagnostyka samochodowa, <http://www.mikrofirmabhp.pl/6061.html>.
9. Akademia samochodowa. Moc i moment, [http://www.mt.com.pl/num/09\\_01/mommoc.htm](http://www.mt.com.pl/num/09_01/mommoc.htm).
10. Zestawienie usterek silnika, <http://macmerc.netium.com.pl/usterki/silnik01.htm>

### PROJECT OF CAR ENGINE DIAGNOSTICS EXPERT SYSTEM

**Abstract:** The project of car engine diagnostics expert system based on Fiat's engines example has been presented. The data have been derived from Fiat branch Suwałki. PC-Shell (shell expert system).has been used in project realization

**Keywords:** car engine, diagnostics system, expert system

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/3/06.

Paweł Lindstedt\*

## DIAGNOSTYKA W SYSTEMIE EKSPLOATACJI OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono związki jakie istnieją między „regulacją”, „diagnostyką” i „niezawodnością” w cybernetycznym systemie eksploatacji obiektów technicznych. Podkreślono szczególną rolę diagnostyki w tym systemie. Wykazano zależność między badaniami diagnostycznymi i regulacją oraz wnioskowaniem diagnostycznym i niezawodnością maszyny.

Uzasadniono, że zmiana stanu technicznego obiektu (diagnostyka) może być wykorzystana do określenia zmian jego stanu działania (regulacja), oraz że zmiana stanu technicznego obiektu umożliwi prognozę uszkodzeń, które następnie mogą być wykorzystane do wyznaczania jego aktualnych charakterystyk uszkodzeniowych (niezawodnościowych).

**Słowa kluczowe:** eksploatacja obiektów technicznych, system cybernetyczny, regulacja, diagnostyka, niezawodność

### 1. Wstęp

Złożone i często kosztowne obiekty techniczne składają się z wielu różnych elementów, które muszą spełniać wysokie wymagania materiałowe i technologiczne oraz trwałościowe i niezawodnościowe. Pracują w zmiennym i uciążliwym otoczeniu, co wynika z trudnych warunków i skomplikowanych, często wygórowanych wymagań programu ich użytkowania. Obiekty techniczne (szczególnie te, których rewers wynosi kilkadziesiąt tysięcy godzin i więcej) wymagają specjalnej dbałości obsługowej w zakresie ich regulacji oraz diagnostyki, by mogły charakteryzować się niezawodnością i być bezpieczne. Obsługę musi cechować sumienność i dokładność wykonania zalecanych czynności. Musi ona zwracać uwagę, że znaczną część elementów składowych należy obsługiwać zgodnie z zasadami diagnostyki według stanu technicznego. Obsługa techniczna staje zatem przed ogrom-

---

\* Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki,  
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45C.

nymi i skomplikowanymi zadaniami, wiążącymi się z utrzymaniem i prognozowaniem zdatności obiektów. Bez odpowiedniego naukowego interdyscyplinarnego wspomaganie w zakresie regulacji, diagnostyki i niezawodności problemu eksploatacji skomplikowanych obiektów nie mogą być skutecznie rozwiązywane [5, 7, 8, 17].

## 2. Cybernetyczny system eksploatacji obiektu technicznego

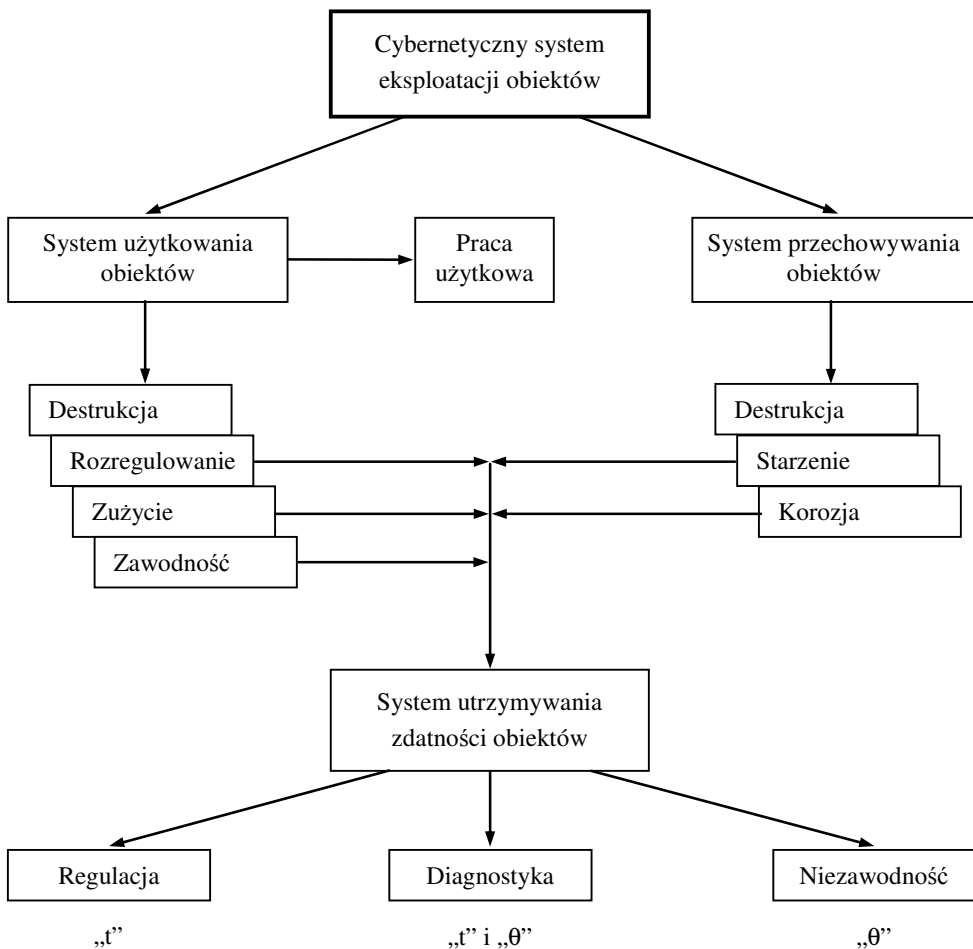
Z rysunku 1, na którym przedstawiono schemat modelu cybernetycznego systemu eksploatacji obiektu technicznego, wynika, że podczas użytkowania i przechowywania obiektu następuje jego ciągła i nieuchronna destrukcja (zmiany regulacji, zużycie, zwiększenie zawodności). Ta nieuchronność destrukcji powinna decydować o kształcie systemu utrzymywania zdatności obiektu. Zatem system obsługi powinien składać się z systemów regulacji, diagnostyki i niezawodności [4, 6, 8].

Celem regulacji jest utrzymywanie optymalnej jakości działania obiektu technicznego zgodnie z zasadami automatyki. Prowadzi się ją w czasie bieżącym, czyli dynamicznym – „ $t$ ” [1, 2, 15, 17].

Celem diagnostyki jest pozyskiwanie informacji o zmianach stanu technicznego, zachodzących podczas eksploatacji obiektu, metodami pośrednimi – bez konieczności demontażu obiektu [12, 14, 18] – przy wykorzystaniu mierzonych sygnałów dynamicznych obiektu. W systemach diagnostycznych wyróżnia się działalność, którą wykonuje się w czasie dynamicznym – „ $t$ ”, i działalność obsługową, wykonywaną w czasie eksploatacyjnym – „ $\theta$ ”. Wiedza o zmianach stanu technicznego stwarza podstawy do eksploatacji obiektów według stanu technicznego [2, 8, 19].

Celem niezawodności jest ciągle uściślanie charakterystyk niezawodności na podstawie wiedzy o zaistniałych uszkodzeniach podczas eksploatacji. Charakterystyki niezawodności opisywane są w czasie eksploatacyjnym „ $\theta$ ” [3, 5, 16].

Zgodnie z zasadami cybernetyki w procesie obsługi obiektów technicznych obserwowane i dokumentowane są zmiany zaistniałe w ich regulacji, diagnostyce i niezawodności [2, 19]. Zmiany te opisywane są w czasie eksploatacyjnym „ $\theta$ ” i są podstawą do planowania odpowiedniej zmiany obsługi obiektu.



**Rys. 1.** Główne elementy cybernetycznego systemu eksploatacji obiektów:  $t$  – czas dynamiczny (newtonowski),  $\theta$  – czas eksploatacyjny (bergsonowski)

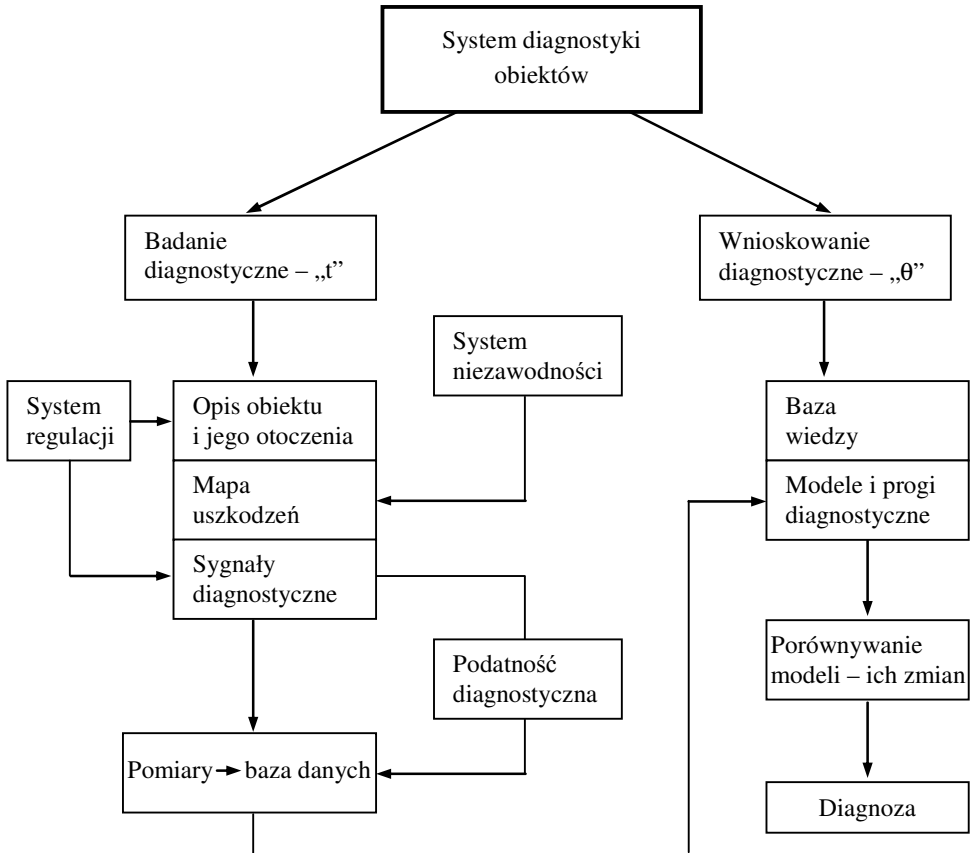
Szczególną rolę w systemie utrzymywania zdolności obiektu odgrywa diagnostyka, która wiąże się bezpośrednio z systemami regulacji i niezawodności [10, 12, 13, 18].



### 3. Diagnostyka w cybernetycznym systemie eksploatacji obiektów

Schemat systemu diagnostyki obiektu technicznego i jego powiązań z systemem regulacji i niezawodności przedstawiono na rysunku 2.

Z analizy rysunku 2 wynika, że diagnostyka dotyczy w równej mierze diagnozowanego obiektu i jego otoczenia [8, 11]. Realizuje się ją w dwu różnych czasach – „ $t$ ” i „ $\theta$ ”, ale ściśle ze sobą powiązanych działalnością diagnostyczną, w której są: badania diagnostyczne (realizowane w czasie „ $t$ ”) i wnioskowanie diagnostyczne (realizowane w czasie „ $\theta$ ”).



Rys. 2. Schemat systemu diagnostyki i jego związki z systemami regulacji i niezawodności

Badania diagnostyczne (rys. 2) są podstawowym elementem diagnozowania i w znacznym stopniu decydują o jego skuteczności. Dzieli się je na kilka etapów, wśród których wyróżnia się [6, 8, 14, 18]:

- I. Poznanie obiektu. W tej fazie badań diagnostycznych należy pozyskać szeroko pojętą wiedzę o obiekcie i otoczeniu; obejmuje ona:
  - formalny opis obiektu, opis budowy i działania w otoczeniu (w tym równania ruchu i charakterystyki statyczne i dynamiczne), technologia produkcji obiektu, charakterystyki niezawodności i bezpieczeństwa, a w tym zbiór typowych uszkodzeń i generowanych przez nie sygnałów diagnostycznych,
  - opis sygnałów diagnostycznych, ich naturę fizyczną i stopień zakłócenia.
- II. Pomiar sygnałów diagnostycznych. Tu dobiera się potrzebne środki pomiarowe, a następnie opracowuje precyzyjną instrukcję wykonywania pomiarów. Instrukcja ta powinna obowiązywać w nieziennej formie przez cały czas życia obiektu. Szczególnego znaczenia nabiera tu wymaganie zapewnienia odpowiedniej stałej dokładności (klasy) pomiarów oraz powtarzalność (identyczność) ustawienia środków pomiarowych względem obiektu podczas kolejnych badań diagnostycznych.
- III. Usuwanie zakłóceń z sygnałów diagnostycznych. Proces ten realizowany jest przez zastosowanie w układach pomiarowych odpowiednich filtrów (dolno-przepustowych, górnoprzepustowych, pasmowych, grzebieniowych, Wienera itd.) lub (co jest bardziej efektywne i uniwersalne) korelatorów do przetworzenia zmierzonych przebiegów sygnałów (w czasie dynamicznym  $t$ ) na przebiegi funkcji korelacji (w czasie przesunięcia  $\tau$ ) a następnie na funkcje gęstości mocy widmowej sygnału (zależnej od częstotliwości  $\omega$ ).
- IV. Formowanie sygnałów diagnostycznych. Czynność ta ma za zadanie sprowadzenie wszystkich mierzonych sygnałów do postaci bezwymiarowej. Wartością odniesienia mierzzonego sygnału diagnostycznego jest jego wartość obliczeniowa wynikająca z projektu obiektu lub wartość ustalona podczas prób fabrycznych lub wartość ustalona podczas przekazywania obiektu z systemu produkcji do systemu eksploatacji.
- V. Opracowanie bazy danych. Bazą danych są tabele wskaźników jakości przebiegów uformowanych sygnałów, funkcji korelacji i gęstości mocy widmowej sygnałów. Przyjęte wskaźniki jakości powinny nawiązywać swoją naturą fizyczną do „czasu regulacji” i „czasu przeregulowania”, które stosuje się w ocenie jakości układów automatycznej regulacji. Bazą danych mogą też być macierze parametrów modeli matematycznych wyznaczonych metodami identyfikacji statycznej i dynamicznej. Opracowanie bazy danych jest etapem końcowym badań diagnostycznych.

Wnioskowanie diagnostyczne (rys. 2) jest kolejnym elementem diagnozowania, równie ważnym jak badania diagnostyczne. Polega na przetworzeniu wyników badania diagnostycznego (bazy danych) oraz innych informacji o obiekcie i otoczeniu (bazy wiedzy) na diagnozę, genezę i prognozę. We wnioskowaniu diagnostycznym wyróżnia się kilka różnych faz [2, 8, 14, 18]:

- I. Opracowanie modelu diagnostycznego. Polega na powiązaniu (na podstawie posiadanej wiedzy) sygnałów diagnostycznych ze zmianami stanu technicznego (uszkodzeniami) obiektu. Formalne powiązanie sygnałów diagnostycznych, wskaźników jakości przebiegów sygnałów, parametrów diagnostycznych z uszkodzeniami jest w procesie diagnozowania bezwzględnie konieczne. Model diagnostyczny umożliwia „zapamiętanie” (ciągle zmieniającego się) stanu technicznego obiektu w chwili diagnozowania  $\theta_0$  i zachowanie go do następnych chwil diagnozowania  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  itp. Zatem bez modelu diagnostycznego nie można zrealizować zasad diagnostyki, bazujących na porównywaniu stanów bieżących obiektu ze stanami poprzednimi i wzorcowymi.
- II. Opracowanie algorytmów porównywania modeli diagnostycznych. Obejmuje zasady porównywania modeli z bieżącego diagnozowania z modelami poprzednimi z historii życia obiektu. Otrzymane zmiany postaci i parametrów modelu przetwarzane są na zmiany stanu technicznego obiektu.
- III. Komputerowe wspomaganie wnioskowania diagnostycznego. Podejmuje problematykę skutecznego eliminowania z procesu wnioskowania diagnostycznego subiektywnego działania diagnosty i zastąpienie go obiektywnym (zawsze identycznie działającym teraz i po wielu latach) systemem ekspertowym. Okazuje się bowiem (a praktyka to potwierdza), że komputerowo zapewniona identyczność wnioskowania jest znacznie bardziej efektywna niż inteligencja dzisiejszego diagnosty i następujących po nim zupełnie innych diagnostów.

#### **4. Regulacja w systemie eksploatacji obiektów i jej związku z diagnostyką**

Obiekt techniczny powinien być prawidłowo wyregulowany. Oznacza to, że powinny być zapewnione prawidłowe relacje między sygnałami związanymi z funkcjonowaniem obiektu [8, 15, 17].

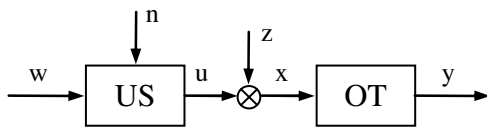
Zgodnie z zasadami automatyki wymaga się, aby obiekt techniczny był odporny na sygnały zakłóceń pochodzące od jego otoczenia oraz aby miał zdolność nadszarpnięcia za sygnałami sterującymi nastawianymi przez użytkownika obiektu.

W procesie eksploatacji zaobserwowano, że podczas użytkowania obiekt zużywa się, a to powoduje między innymi jego rozregulowanie. W procesie obsługi obiekt doprowadza się do prawidłowego stanu działania poprzez zmianę nastaw urządzeń regulacyjnych obiektu. Zatem każda zmiana wymaganych nastaw, poddyktowana zapewnieniem wymaganej jakości działania obiektu (regulacja obiektu) ma swoją przyczynę w zmianie parametrów konstrukcyjnych, czyli stanu technicznego obiektu (diagnostyka obiektu).

Stopień zależności między stanem regulacji obiektu a jego stanem technicznym jest jednak różny. W skrajnych przypadkach obiekt niezdatny funkcjonalnie może być zdalny technicznie a niezdatny technicznie zdalny funkcjonalnie [6, 8].

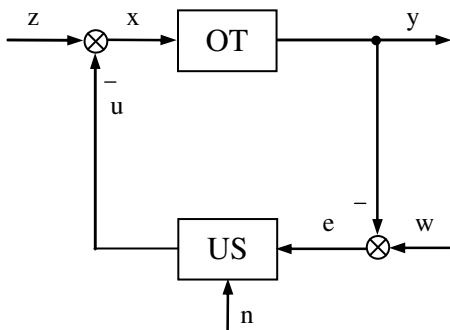
Intensywność wpływu elementów obiektu i parametrów obiektu oraz jego otoczenia na jakość funkcjonowania można ocenić na podstawie analizy funkcji wrażliwości konstrukcyjnej, parametrycznej i zakłóceńowej [8, 9, 15, 17].

Obiekt techniczny z urządzeniem sterującym w układzie otwartym przedstawiono na rysunku 3.



**Rys. 3.** Obiekt techniczny z urządzeniem sterującym w układzie otwartym: OT – obiekt techniczny, US – urządzenie sterujące, w – nastawiany sygnał użytkowy, n – nastawy urządzenia sterującego, u – sygnał oddziaływania US na OT, z – zakłócenie, y – sygnał użytkowy, x – sygnał wejściowy

Obiekt techniczny z urządzeniem sterującym w układzie zamkniętym przedstawiono na rysunku 4.



**Rys. 4.** Obiekt techniczny z urządzeniem sterującym w układzie zamkniętym: OT – obiekt techniczny, US – urządzenie sterujące, w – nastawiany sygnał użytkowy, n – nastawy urządzenia sterującego, u – sygnał oddziaływania US na OT, z – zakłócenie, y – sygnał użytkowy, x – sygnał wejściowy, e – sygnał uchybu

Elementy składowe układu z rysunków 3 i 4: urządzenia sterującego „US” można opisać transmitancją  $G_{US}$ , a obiektu technicznego „OT” transmitancją  $G_{OT}$ .

Działanie układu z rysunku 3 można opisać następującymi transmitancjami:  
dla  $z = 0$

$$H_w = \frac{Y(s)}{W(s)} = G_{US} G_{OT}, \quad (1)$$

dla  $w = 0$

$$H_z = \frac{Y(s)}{Z(s)} = G_{OT}. \quad (2)$$

Działanie układu z rysunku 4 można opisać następującymi transmitancjami:  
dla  $z = 0$

$$H_w = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_{US} G_{OT}}{1 + G_{US} G_{OT}}, \quad (3)$$

dla  $w = 0$

$$H_z = \frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{G_{OT}}{1 + G_{US} G_{OT}}; \quad (4)$$

gdzie:  $Y(s)$ ,  $W(s)$ ,  $Z(s)$  – transformata sygnałów  $y(t)$ ,  $w(t)$ ,  $z(t)$ ;  $s$  – zmienna zespolona.

Opis ten jest podstawą do wyznaczenia funkcji wrażliwości układu na zmiany konstrukcji, parametrów elementów składowych oraz otoczenia reprezentowanego tu przez sygnały „w” i „z”.

Wrażliwość układu na zmiany konstrukcyjne opisuje się następującymi funkcjami wrażliwości konstrukcyjnej:

$$W_{G_{US}}^{H_W} = \frac{\frac{dH_W}{H_W}}{\frac{dG_{US}}{G_{US}}} = \frac{G_{US}}{H_W} \frac{dH_W}{dG_{US}}, \quad (5)$$

$$W_{G_{OT}}^{H_W} = \frac{\frac{dH_W}{H_W}}{\frac{dG_{OT}}{G_{OT}}} = \frac{G_{OT}}{H_W} \frac{dH_W}{dG_{OT}}, \quad (6)$$

$$W_{G_{OT}}^{H_Z} = \frac{\frac{dH_Z}{H_Z}}{\frac{dG_{OT}}{G_{OT}}} = \frac{G_{OT}}{H_Z} \frac{dH_Z}{dG_{OT}}. \quad (7)$$

Z funkcji wrażliwości opisanymi wzorami 5÷7 można wyznaczyć wpływ rozwiązań konstrukcyjnych elementów układu na jego jakość statyczną i dynamiczną, a zatem związek między stanem technicznym (diagnostyką) i stanem działania (automatyką-regulacją) obiektu technicznego.

Wrażliwość układu na zmiany parametrów transmitancji elementów składowych układu opisuje się następującymi funkcjami wrażliwości parametrycznej:

$$W_{k_i}^{H_W} = \frac{k_i}{H_W} \frac{dH_W}{dk_i}, \quad (8)$$

$$W_{k_i}^{H_Z} = \frac{k_i}{H_Z} \frac{dH_Z}{dk_i}, \quad (9)$$

$$W_{T_i}^{H_W} = \frac{T_i}{H_W} \frac{dH_W}{dT_i}, \quad (10)$$

$$W_{T_i}^{H_Z} = \frac{T_i}{H_W} \frac{dH_Z}{dT_i}, \quad (11)$$

gdzie dodatkowo:  $k_i$  – kolejne parametry transmitancji  $H_W$  i  $H_Z$ , oraz  $T_i$  – kolejne stałe czasowe transmitancji  $H_W$  i  $H_Z$ .

Z funkcji wrażliwości parametrycznych opiszanych zależnościami 8÷11 można opisać wpływ parametrów transmitancji (stan techniczny) na jego jakość dynamiczną (stan działania obiektu).

Wrażliwość układu na jego otoczenie w przestrzeni czasu opisuje się następującymi funkcjami wrażliwości sygnałowej:

$$W_z^y = \frac{z}{y} \frac{dy}{dz} = \frac{z}{y} \frac{\dot{y}}{\dot{z}}, \quad (12)$$

$$W_w^y = \frac{w}{y} \frac{dy}{dw} = \frac{w}{y} \frac{\dot{y}}{\dot{w}}, \quad (13)$$

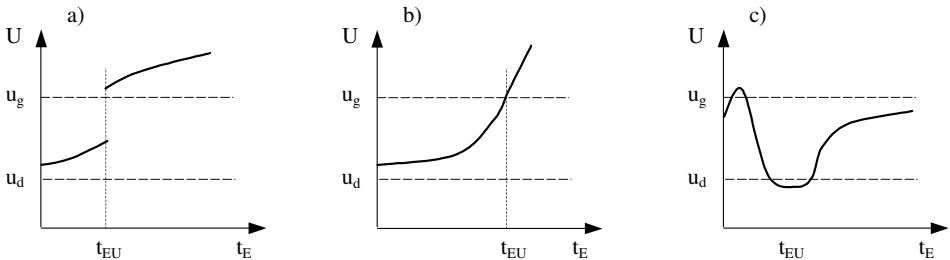
gdzie dodatkowo:  $\dot{y}$ ,  $\dot{z}$ ,  $\dot{w}$  – pochodne sygnałów  $y$ ,  $z$ ,  $w$ .

Z funkcji wrażliwości sygnałowej otrzymuje się informacje o wpływie sposobu użytkowania ( $w$ ) i warunków użytkowania ( $z$ ) na rezultat użytkowania ( $y$ ).

Reasumując powyższe, można stwierdzić, że wyznaczone funkcje wrażliwości konstrukcyjnej, parametrycznej i sygnałowej wiążą stan działania ze stanem technicznym obiektu, zatem i działalność regulacyjną z działalnością diagnostyczną.

## 5. Niezawodność w systemie eksploatacji obiektów i jej związku z diagnostyką

Obiekt techniczny powinien być niezawodny, czyli zdolny do spełnienia postawionych mu wymagań w określonych warunkach użytkowania [3, 5, 7, 20]. Właściwości obiektu określające jego przydatność w zadanym zastosowaniu można opisać za pomocą mierzalnych funkcji jego cech istotnych. Zaistnienie zmiany cech istotnych obiektu technicznego powodują zmiany ich stanu niezawodnościowego. Całkowita lub częściowa utrata zdolności, zmiana istotnych właściwości obiektu technicznego to zjawisko, które zgodnie z PN określa się terminem „uszkodzenie”. Wyróżnia się następujące przypadki uszkodzeń (zmian mierzalnych cech istotnych stanu obiektu technicznego): katastroficzne, starzeniowe i przemijające (rys. 5).



**Rys. 5.** Przebieg zmian wartości mierzalnych cech istotnych „U” podczas eksploatacji w czasie  $t_E$ ; a) katastroficznych, b) starzeniowych, c) przemijających:  $t_U$  – czas uszkodzenia obiektu technicznego,  $u_{g/d}$  – górna i dolna wartość cechy

Proces losowy pojawiania się uszkodzeń obiektu technicznego zależy od warunków początkowych i zmian od wymuszeń zewnętrznych; opisywany jest probabilistycznymi funkcjami (wskaźnikami) niezawodności. Wyboru wskaźników niezawodności dla obiektów technicznych (dwustanowych – zdatny lub niezdatny), produkowanych masowo lub seryjnie dokonuje się wg PN-77/N-04010.

Podstawowe funkcje i wskaźniki niezawodności to:

*Funkcja niezawodności:*

$$R(t_E) = P(T \geq t_E) \quad (14)$$

gdzie:  $T$  – zmienna losowa określająca czas przebywania obiektu w stanie zdatności,  $t_E$  – chwile czasu eksploatacji  $\theta$

*Funkcja zawodności:*

$$F(t_E) = P(T < t_E) = 1 - R(t_E) \quad (15)$$

*Funkcja gęstości prawdopodobieństwa uszkodzeń:*

$$f(t_E) = \frac{dF(t_E)}{dt_E} \quad (16)$$

*Funkcja intensywności uszkodzeń:*

$$\lambda(t_E) = \frac{f(t_E)}{R(t_E)} \quad (17)$$

*Wartość oczekiwana czasu zdatności obiektu (do pierwszego uszkodzenia):*

$$E(T) = \int_0^{\infty} R(t_E) dt_E \quad (18)$$

W procesie eksploatacji zgodnie z PN-77/N-04005 wyznacza się estymatory wskaźników niezawodności:

$$R(t_E)^* = \frac{n(t_E)}{n} \quad (19)$$

gdzie:  $n(t_E)$  – liczba obiektów, które w przedziale czasu  $< 0, t_E >$  nie uszkodziły się,  $n$  – liczba badanych obiektów



$$F(t_E)^* = \frac{m(t_E)}{n} \quad (20)$$

gdzie:  $m(t_E)$  – liczba obiektów, które w przedziale czasu  $< 0, t_E >$  uszkodziły się

$$\lambda(t_E)^* = \frac{n(t_E) - n(t_E + \Delta t_E)}{n(t_E)\Delta t_E} \quad (21)$$

gdzie:  $n(t_E + \Delta t_E)$  – liczba obiektów, które w przedziale czasu  $< 0, t_E + \Delta t_E >$  nie uszkodziły się,  $\Delta t_E$  – przedział czasu, w którym obiekt jest badany

$$E(T)^* = \theta^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_E \quad (22)$$

gdzie:  $t_E$  – czas, w którym nastąpiło uszkodzenie i-tego obiektu

Pozwalają one dobrać odpowiednią matematyczną postać funkcji niezawodności  $R(t)$  i innych do opisanego obserwowanego podczas eksploatacji strumienia uszkodzeń (np.  $R(t) = e^{-\lambda t_E}$  – rozkład wykładniczy,  $R(t) = e^{-\lambda t_E^\delta}$  – rozkład Weibulla, itp. [3, 5, 7]).

Liczba uszkodzeń i ich występowanie w czasie są zatem podstawą do wyznaczenia wskaźników niezawodności obiektu. Należy tu jednak zauważyć, że uszkodzenie to jest już tak niepożądany stan, w którym cecha istotna właściwości obiektu  $U$  (rys. 5) przekroczy wartości graniczne  $u_g$  lub  $u_d$ , a obiekt ze stanu zdatności przejdzie w stan niezdatności.

Dlatego zaistniała potrzeba prognozowania uszkodzeń, co z kolei wymaga ciągłej obserwacji zmian niedostępnej mierzalnej istotnej właściwości obiektu.

Stanie się to możliwe po wykorzystaniu następujących zasad diagnostyki:

1. Każda zmiana cechy stanu technicznego generuje mierzalne i dostępne sygnały diagnostyczne.
2. Sygnały diagnostyczne pozwalają pośrednio obserwować niedostępne istotne cechy stanu technicznego.
3. Sygnały diagnostyczne pozwalają prognozować osiągnięcie przez istotną cechę stanu wartości granicznych  $u_g$  lub  $u_d$ .

Prognozowane zgodnie z zasadami diagnostyki potencjalne uszkodzenia pozwolą weryfikować w procesie eksploatacji wymagane charakterystyki niezawodnościowe bez oczekiwania na wystąpienie realnych uszkodzeń.

## 6. Podsumowanie

Zmiana stanu technicznego (parametrów stanu) obiektu (rys. 3 i 4) spowoduje zmianę jego stanu działania (zmieniają się wskaźniki jakości działania). Ponieważ wymaga się, aby jakość działania była zawsze właściwa i stała, to należy doregulować nastawy urządzenia sterującego do potrzeb obiektu (rys. 3 i 4). Zatem wymagana zmiana nastaw urządzenia sterującego (wykonana podczas obsługi obiektu) świadczy także o jego zmianie stanu technicznego. Należy domniemywać, że w eksploatacji obiektu technicznego może pojawić się taka sytuacja, gdy dobór nastaw urządzenia sterującego do nadmiernie zużytego i uszkodzonego obiektu technicznego będzie niemożliwy. Ten fakt (najlepiej gdy będzie prognozowany) staje się podstawą do predykcji charakterystyk niezawodnościowych obiektu.

Stąd wniosek podstawowy, że regulacja, diagnostyka i niezawodność obiektu technicznego pozostają w ścisłym związku, który może być optymalnie zrealizowany w ramach cybernetycznego systemu eksploatacji obiektu technicznego.

## LITERATURA

1. Antoniewicz J.: Automatyka, WNT, Warszawa, 1973.
2. Ashby R.W.: Wstęp do cybernetyki, PWN, Warszawa, 1963.
3. Bobrowski D.: Modele i metody matematyczne teorii niezawodności, WNT, Warszawa, 1985.
4. Boliński B., Stelmaszczuk Z.: Eksploatacja silników turbinowych, WKŁ, Warszawa, 1981.
5. Borgoń J., Jaźwiński J., Klimaszewski S., Żmudziński Z., Żurek J.: Symulacyjne metody badania bezpieczeństwa lotów, Wyd. ASKON, Warszawa, 1998.
6. Borowczyk H., Lindstedt P. + zespół: Model zintegrowanego systemu diagnostycznego płatowca i zespołu napędowego statków powietrznych, Opracowanie ITWL Nr 12020/I, ITWL, Warszawa, 1997.
7. Lewitowicz J., Kustroń K.: Podstawy eksploatacji statków powietrznych, t. 2, Wyd. ITWL, Warszawa, 2003.
8. Lindstedt P.: Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy, Wydawnictwo Naukowe ASKON, Warszawa, 2002.
9. Lindstedt P.: Funkcje wrażliwości w procesie organizacji badań diagnostycznych obiektów technicznych, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn nr 12, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok, 2004.
10. Lindstedt P., Błachnio J.: Automatyka i diagnostyka podstawą systemu obsługiwanie maszyn, Materiały V Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej DPP'01, Wyd. Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra, 2001.
11. Lindstedt P., Borowczyk H., Magier J.: Sterowanie procesem użytkowania turbinowego silnika śmigłowego na podstawie kompleksowych sygnałów diagnostycznych i sygnałów otoczenia, Materiały VIII Międzynarodowej Konferencji AIRDIAG'05, Wyd. ITWL, Warszawa, 2005.
12. Lindstedt P., Sabak R.: Nowe techniki w diagnostyce lotniczych silników turbinowych, Materiały Seminarium Wydz. M.E.L. PW, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.

13. Lindstedt P., Szczepanik R.: Regulacja i diagnostyka w obsłudze technicznej silników lotniczych, VII Międzynarodowa Konferencja AIRDIAG'01, Wyd. ITWL, Warszawa, 2001.
14. Paton R., Frank P., Clark R.: Fault diagnostic in dynamic systems. Theory and applications, Cambridge University Press, 1989.
15. Pełczewski W.: Teoria sterowania, WNT, Warszawa, 1980.
16. Smalko Z.: Podstawy eksploatacji technicznej pojazdów, Ofic. Wyd. PW, Warszawa, 1998.
17. Staniszewski R.: Sterowanie zespołów napędowych, WKŁ, Warszawa, 1980.
18. Szczepanik R., Lindstedt P., Borowczyk H.: Diagnostyka techniczna w systemie utrzymania zdadności silników lotniczych, Problemy Badań i Eksploatacji Techniki Lotniczej, tom V rozdział 4, Wyd. ITWL, Warszawa.
19. Wiener N.: Cybernetyka czyli sterowanie i komunikacja w zwierzęciu i maszynie, PWN, Warszawa, 1971.
20. Żurek J.: Problemy bezpieczeństwa w lotnictwie, Przegląd WLOP, 12/2001, Wyd. EMPA, Poznań, 2001.

## **DIAGNOSTICS IN SYSTEM OF EXPLOITATION OF TECHNICAL OBJECTS**

**Abstract:** In this work the relationships, which exist between „regulation”, „diagnostics” and “reliability” in the cybernetic system of exploitation of technical objects has been presented. Particular part of diagnostics in this system has been underlined. Relation between diagnostic researches and regulation also diagnostic inferences and reliability of machine has been proved.

Has been justified, that the change in maintenance status of object (diagnostics) can be used to determining of changes its performance status (regulation), and that the change in maintenance status of object makes damages prognosis possible, which next can be used to determine its actual defecting characteristics (reliability).

**Keywords:** exploitation of technical objects, cybernetic system, regulation, diagnostics, reliability

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/3/06.

Paweł Ostapkowicz\*

## OPIS I PRZYCZYNY STANÓW AWARYJNYCH RUROCIĄGÓW PRZESYŁOWYCH Z WYCIEKAMI

**Streszczenie:** W pracy omówiono przyczyny powstawania uszkodzeń rurociągów przesyłowych oraz zagadnienia związane z zapobieganiem ich powstawaniu, obejmujące działania, podejmowane na poszczególnych etapach, począwszy od projektowania, poprzez budowę, a skończywszy na eksploatacji obiektu. Ponadto przedstawiono klasyfikację wycieków, a także modelowy opis zjawiska wycieku.

**Słowa kluczowe:** rurociągi przesyłowe, przyczyny wycieków, opis zjawiska wycieku

### 1. Wprowadzenie

Stan awaryjny rurociągu przesyłowego z wyciekami ma miejsce wówczas, gdy w czasie tłoczenia występuje nagły nieprzewidziany wyciek medium z rurociągu, spowodowany uszkodzeniem (naruszeniem ciągłości) ścianki rury, połączeń rurowych lub uszkodzeniem armatury.

Pojawienie się wycieku, zależnie od jego wielkości i miejsca, może powodować ograniczenie zdatności obiektu (np. kontynuacja pracy rurociągu przy obniżonym ciśnieniu) lub całkowitą jego niezdatność.

Skuteczne diagnozowanie wycieków z rurociągów przesyłowych, oparte na metodach funkcjonalnych, bazujących na sygnałach przepływu, tj.: sygnałach ciśnienia, natężenia strumienia, temperatury, wymaga od diagnostów posiadania dostatecznej wiedzy o samym zjawisku wycieku i generowanych przez wyciek sygnałach diagnostycznych. Ponadto istotna jest znajomość zagadnień dotyczących przyczyn i możliwości zapobiegania pojawieniu się wycieków.

---

\* Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki,  
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45C.

## 2. Przyczyny i typowe uszkodzenia rurociągów

### 2.1. Klasyfikacja przyczyn uszkodzeń rurociągów

Uszkodzenia rurociągów przesyłowych, prowadzące do powstania wycieków, mogą być spowodowane wieloma różnymi przyczynami. Według literatury branżowej są one klasyfikowane, jako [5, 7]:

- oddziaływanie środowiska zewnętrznego, które obejmuje:
  - A1 – oddziaływania obciążeniami środowiskowymi takimi jak: ciężar przykrywającej rurociąg warstwy ziemi, parcie wody, lodu, wiatru, oblodzenie oraz wpływ temperatury otoczenia,
  - 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 błędzących (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, obejmujące:
  - C1 – wady złączy, tj. wady spoin i połączeń kołnierzowych,
  - C2 – zastosowanie elementów rurociągu wykonanych ze stali o udarności nieodpowiedniej 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 (sfalowanie) powodujące powstawanie turbulencji,
  - C5 – wady materiałowe i konstrukcyjne osprzętu obsługującego rurociąg;

- działalność człowieka, i wynikające z niej:
  - 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 kradzieży transportowanego medium lub przeprowadzenia ataku terrorystycznego,
  - D5 – niedostateczna kontrola jakości prac budowlanych,
  - D6 – niedostateczna kontrola (monitoring) oraz błędy obsługi podczas eksploatacji obiektu.

Powyższy rodzajowy podział zagrożeń zastępowany jest często tzw. podziałem modelowym, który wyróżnia następujące zagrożenia [5, 7]:

- uszkodzenia o charakterze impulsowym  
Awaryje o charakterze impulsowym są skutkiem nagłego przekroczenia nośności (odporności) przewodu rurociągu na obciążenie, np.: przy uderzeniu pioruna (A4), zadziałaniu obciążeń wewnętrznych i zewnętrznych o nieprzewidywalnej projektem wartości (A1, A2, B2, D1, D2). Zalicza się do nich także uszkodzenia przewodu powstałe wskutek celowej i przypadkowej działalności ludzkiej (D3, D4);
- uszkodzenia o charakterze kumulacyjnym  
Awaryje o charakterze kumulacyjnym spowodowane są występowaniem w czasie eksploatacji rurociągu pewnych oddziaływań i obciążeń powodujących stopniowe jego zużycie (starzenie), co objawia się obniżeniem wartości istotnych parametrów obiektu, np. nośności. Ich źródłem jest korozja (A3, B4, B5) lub zjawiska zmęczeniowe (B1, B3, C1, C2, C3, C4, C5);
- uszkodzenia 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) oraz łączne występowanie zjawisk impulsowej utraty nośności (odporności) konstrukcji rurociągu.

Powyższa klasyfikacja dotyczy rurociągów wykonanych z rur stalowych. Może ona być także zastosowana do rurociągów z tworzyw sztucznych, po

uwzględnieniu kilku istotnych różnic, np.: niewystępowania korozji, szybszego starzenia czy innego przebiegu procesów zniszczenia dla tworzyw.

Z doniesień literaturowych, m.in. w [5, 9] – stanowiących opis i analizę awarii, zaistniałych w rurociągach przesyłowych wykonanych z rur stalowych – wynika, że najczęstsze przyczyny uszkodzeń to:

- korozja zewnętrzna i wewnętrzna (w tym naprężeniowa i elektrochemiczna),
- niewystarczająca nośność lokalna rurociągu w stosunku do wzrastających obciążeń dynamicznych i przeciążeń (zwłaszcza w miejscu ukrytych wad i tzw. koncentratów naprężeń),
- obecność karbów strukturalnych i geometrycznych,
- występowanie uderzeniowych fal ciśnienia (których nie można do końca uniknąć, można je jednak kontrolować) i zjawiska kawitacji,
- oddziaływanie zjawisk przyrodniczych (np. uderzenie pioruna, drgania sejsmiczne, wstrząsy górotworu) oraz utrata stateczności rurociągu wskutek osiadania i parcia gruntu,
- działalność ludzka (celowe i przypadkowe uszkodzenia rurociągów, tj.: wysadzanie i nawiercanie rurociągów w celu przerwania tłoczenia lub kradzieży medium, mechaniczne uszkodzenia wynikające z przeprowadzanych prac na rurociągu lub w pobliżu rurociągu, a ponadto błędy obsługi).

## 2.2. Typowe uszkodzenia rurociągów

Jako główne typowe uszkodzenia rurociągów przesyłowych należy wymienić pęknięcia rur i nieszczelności armatury [5, 9].

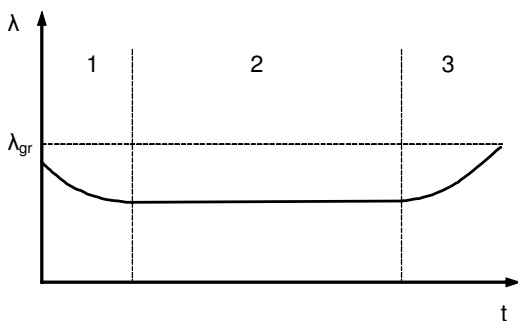
Na podstawie przeprowadzanych analiz i badań, w tym na wyciętym materiale uszkodzonego odcinka rury, w przypadku pęknięć rur stalowych, stwierdza się, że:

- usytuowanie pęknięć na rurach we wszystkich przypadkach jest zazwyczaj podobne; przebiegają one wzdłuż krawędzi lica spoiny wzdłużnej,
- pęknięcia występują przy ciśnieniu znacznie niższym od dopuszczalnego ciśnienia roboczego, ustalonego na podstawie przeprowadzonych prób wytrzymałości na etapie oddawania rurociągu do eksploatacji,
- pęknięciom ulegają złącza obarczone wadami materiałowymi lub spawalniczymi, względnie obydwoma występującymi łącznie,
- większość pęknięć ma charakter kruchy i występują one przy wartościach naprężeń poniżej granicy plastyczności.

### 2.3. Funkcja intensywności uszkodzeń

Na podstawie przedstawionej analizy przyczyn uszkodzeń rurociągów, można stwierdzić, że ryzyko wystąpienia poszczególnych uszkodzeń może być różne w danych okresach eksploatacji. Opis tego ryzyka, tak jak w przypadku innych obiektów technicznych, może być dokonany za pomocą funkcji intensywności uszkodzeń  $\lambda$ .

Przebieg tej funkcji przedstawiono na rysunku 1. Można w nim wyróżnić trzy podstawowe okresy, odpowiadające poszczególnym przedziałom czasowym użytkowania.



**Rys. 1.** Przebieg funkcji intensywności uszkodzeń rurociągów: 1 – okres adaptacji, 2 – okres normalnej eksploatacji, 3 – okres przyspieszonego zużycia,  $\lambda_{gr}$  – intensywność graniczna

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 w wcześniejszych etapach kontroli.

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 i osiąga w końcu przyjęty poziom graniczny  $\lambda_{gr}$ . Wzrost intensywności uszkodzeń powodowany starzeniem się obiektu charakteryzuje się ujawnianiem 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.



W praktyce eksploatacyjnej oprócz ogólnej funkcji intensywności uszkodzeń, często korzysta się z poszczególnych funkcji intensywności dla danego rodzaju i charakteru uszkodzeń. Znajomość obu rodzaju funkcji pozwala wyznaczyć funkcję niezawodności rurociągu – ogólną i funkcje charakterystyczne dla określonych awarii.

### 3. Parametry i klasyfikacja wycieków

Parametrami charakteryzującymi wycieki są:

- miejsce wycieku - określane we współrzędnych długości rurociągu: [km] lub [m],
- natężenie wycieku - oznaczające intensywność wydostawania się medium z rurociągu; określane w jednostkach przepływu masowego: [tony/h], [kg/s], lub w jednostkach przepływu objętościowego: [ $\text{m}^3/\text{h}$ ], [litry/s]. Natężenie wycieku często jest odnoszone do natężenia przepływu dla stanu bez wycieku, zmierzonego na wlocie rurociągu  $Q_{wej\_0}$ . Wówczas jest ono wyrażane w [%],
- wielkość wycieku - oznaczająca ilość medium, które wydostało się na zewnątrz rurociągu; określana w jednostkach masy: [tony], [kg] lub w jednostkach objętości: [ $\text{m}^3$ ], [litry].

Ze względu na wielkość (natężenie) wycieki dzieli się następująco:

- małe,
- średnie,
- duże.

Wycieki o dużej wielkości oznaczają ilość medium, która znalazła się na zewnątrz rurociągu, rzędu od kilku do tysiąca metrów sześciennych i więcej. Taki wyciek z rurociągów przesyłowych dalekiego zasięgu, transportujących ropę naftową, może w konsekwencji oznaczać degradację biologiczną gleb i wód na sporym obszarze wokół obiektu oraz ewentualność powstania ogromnego pożaru.

Powyzsza klasyfikacja natężenia wycieków wiąże je bezpośrednio z określonymi przedziałami liczbowymi. Przy czym trudno w literaturze odnaleźć jednoznaczne wielkości przedziałów. Stąd też autor przyjął następujący podział:

- małe - oznaczają wycieki do 2%  $Q_{wej\_0}$ ,
- średnie - oznaczają wycieki od 2 do 5%  $Q_{wej\_0}$ ,
- duże - oznaczają wycieki powyżej 5%  $Q_{wej\_0}$ .

Istotny jest także podział wycieków ze względu na ich przebieg czasowy. Według tej kategorii wycieki dzieli się następująco:

- wolne - których natężenie wzrasta stopniowo w określonym przedziale czasowym, od pewnej wartości początkowej ku wartości nominalnej. Przykładem mogą być wycieki powstające w obrębie połączeń spawanych, wskutek uszkodzeń o podłożu korozyjnym i punktowym początkowym charakterze, które to uszkodzenia powiększają się stopniowo w czasie,
- nagłe - których natężenie osiąga wartość nominalną w krótkim czasie. Przykładem mogą być również wycieki o podłożu korozyjnym, z tą różnicą, że w momencie pojawienia się wycieku dochodzi do większego początkowego uszkodzenia przewodu (naruszenia jego ciągłości). W przypadku nagłych wycieków wyraźnie widoczne jest zjawisko rozchodzenia się fal rozprężeniowych ciśnienia.

Większość wycieków z rurociągów przesyłowych kwalifikuje się do kategorii nagłych.

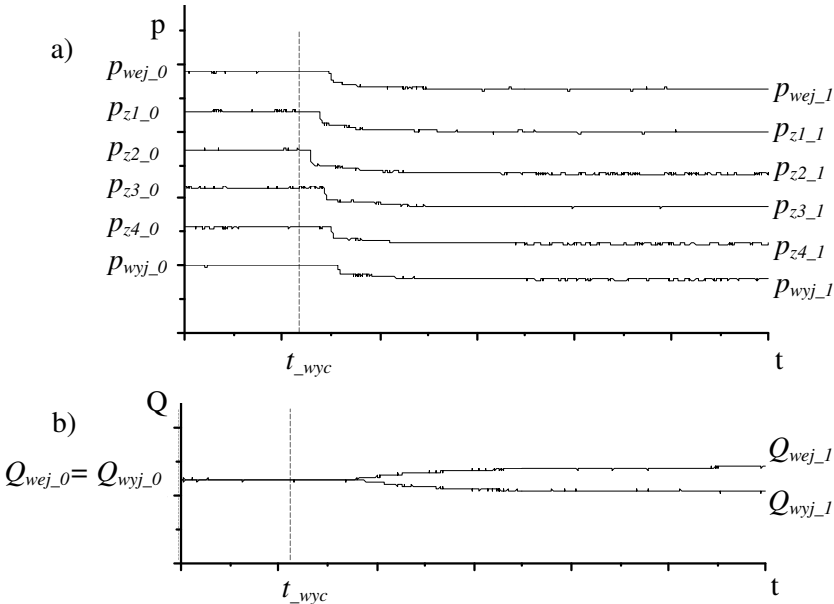
#### 4. Modelowy opis wycieku. Sygnały diagnostyczne generowane przez wyciek

Prezentowany poniżej opis wycieku wykorzystuje model obiektu, który zakłada że:

- rurociąg ma długość  $l$ , stałą na całej długości (określanej współrzędną  $z$ ) średnicę wewnętrzną  $d(z) = const$ , a stąd stały przekrój kołowy pola przepływu  $S(z) = const$ ,
- rurociąg jest ułożony poziomo,
- rurociąg jest całkowicie wypełniony cieczą,
- przepływ medium odbywa się bez wymiany ciepła i masy, jest przepływem jednofazowym i ustalonym, charakteryzuje go stała wartość współczynnika tarcia  $\lambda(z) = const$ ,
- gęstość bądź ciężar właściwy przepływającego medium nie ulega zmianie wzdłuż rurociągu,
- ciśnienie i natężenie przepływu (objętościowe) na początku rurociągu wynosi odpowiednio  $p_{wej\_0}$  i  $Q_{wej\_0}$ .

Wskutek pojawienia się wycieku o natężeniu  $Q_{wyc}$  w odległości  $z_{wyc}$  obserwuje się zjawisko powstawania i rozchodzenia 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, której wartość zależy głównie od parametrów tłoczonego medium (gęstości, współczynnika ściśliwości) i w niedużym stopniu od parametrów rurociągu. Czoła fal rozprężeniowych widoczne są na rysunku 2a. Za czołem fali rozprężeniowej ciśnienie w rurociągu maleje o tym mniejszą wartość, im większa jest odległość danego punktu od miejsca wycieku. Po pewnym czasie dochodzi do nowego stanu ustalonego.

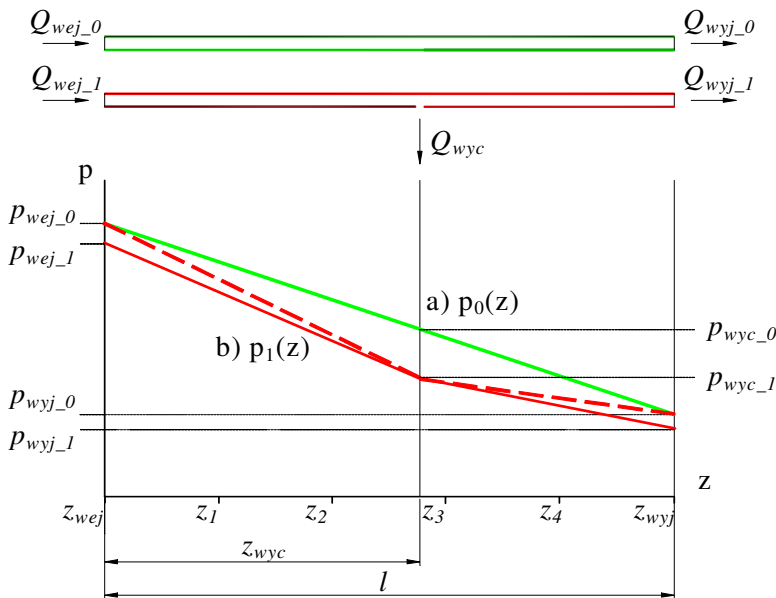


**Rys. 2.** Przebiegi czasowe w stanach z wyciekiem: a) sygnałów ciśnienia, b) sygnałów natężenia przepływu; gdzie:  $p_{wej\_0}$ ,  $p_{wyj\_0}$  – ciśnienie na początku i na końcu rurociągu dla stanu bez wycieku;  $p_{z1\_0}$ ,  $p_{z2\_0}$ ,  $p_{z3\_0}$ ,  $p_{z4\_0}$  – ciśnienie w określonych punktach wzdłuż długości rurociągu dla stanu bez wycieku;  $p_{wej\_1}$ ,  $p_{wyj\_1}$  – ciśnienie na początku i na końcu rurociągu dla stanu z wyciekiem;  $p_{z1\_1}$ ,  $p_{z2\_1}$ ,  $p_{z3\_1}$ ,  $p_{z4\_1}$  – ciśnienie w określonych punktach wzdłuż długości rurociągu dla stanu z wyciekiem;  $Q_{wej\_0}$ ,  $Q_{wyj\_0}$  – natężenie przepływu na początku i na końcu rurociągu dla stanu bez wycieku;  $Q_{wej\_1}$ ,  $Q_{wyj\_1}$  – natężenie przepływu na początku i na końcu rurociągu dla stanu z wyciekiem;  $t_{wyc}$  – moment początku wycieku.

Ulega zatem zmianie rozkład linii piezometrycznej, która przed wyciekiem w stanie ustalonym  $p_0(z)$  była linią prostą (rys. 3a). Dla stanu ustalonego z wyciekiem  $p_1(z)$  będzie ona linią łamaną, którą tworzą dwie proste, pokazane jako linie ciągłe (rys. 3b). W miejscu wycieku  $z_{wyc}$  następuje spadek ciśnienia od  $p_{wyc\_0}$  do  $p_{wyc\_1}$ . Zmianie ulega ciśnienie na wlocie rurociągu, od  $p_{wej\_0}$  do

$p_{wej\_1}$ , przy czym  $p_{wej\_1} - p_{wej\_0} < 0$  (wielkość różnicy zależy głównie od charakterystyki pompy oraz natężenia i miejsca wycieku), a także ciśnienie na wylocie rurociągu, od  $p_{wyj\_0}$  do  $p_{wyj\_1}$ . Jeżeli się przyjmie, że posiada się pompę, której charakterystyka umożliwi utrzymanie stałej wartości ciśnienia na wlocie rurociągu  $p_{wej\_1} = p_{wej\_0}$ , a na końcu rurociągu utrzymane zostanie ciśnienie  $p_{wyj\_1} \cong p_{wyj\_0}$ , wykres spadku ciśnienia wzdłuż całego rurociągu dla stanu ustalonego z wyciekaniem  $p_1(z)$  będzie zgodny z liniami kreskowymi.

Pojawienie się wycieku spowoduje ponadto zmianę wartości natężenia przepływu medium (rys. 2b). Przed wyciekaniem w stanie ustalonym wartości  $Q_{wej\_0}$  i  $Q_{wyj\_0}$  były sobie równe. Po upływie określonego czasu od pojawienia się wycieku przyjmą one nowe wartości ustalone – na odcinku od początku rurociągu do miejsca wycieku  $z_{wyc}$  natężenie przepływu wyniesie  $Q_{wej\_1}$ , a na odcinku od miejsca wycieku  $z_{wyc}$  do końca rurociągu będzie równe  $Q_{wyj\_1} = Q_{wej\_1} - Q_{wyc}$ , przy czym  $Q_{wej\_1} > Q_{wej\_0}$ ,  $Q_{wyj\_1} < Q_{wyj\_0}$ , co wynika z pojawienia się wycieku i charakterystyki pracy pompy.



Rys. 3. Wykres spadku ciśnienia dla rurociągu: a) bez wycieku, b) z wyciekaniem w punkcie  $z_{wyc}$

Pojawienie się wycieku wywołuje zatem relacje między ciśnieniem a natężeniem przepływu, przy czym relacje te przyjmują określone wartości dla różnych rurociągów.

## **5. Zapobieganie awariom rurociągów. Diagnostyka stanu technicznego rurociągów**

### **5.1. Działania prewencyjne na etapie konstruowania i budowy rurociągów**

W celu uniknięcia stanów awaryjnych z wyciekami podejmowane są odpowiednie działania prewencyjne na etapie projektowania, budowy i eksploatacji rurociągów. Mają one przede wszystkim za zadanie podniesienie stopnia bezpieczeństwa i niezawodności obiektów oraz eliminowanie występujących zagrożeń.

Na etapie projektowania i budowy, przykładem takich działań mogą być:

- wytyczenie przebiegu trasy rurociągu uwzględniające minimalizację występowania zagrożeń od otoczenia, tj. prowadzenie trasy rurociągu możliwie daleko od elektrowni, torów kolejowych i linii wysokiego napięcia, przez co eliminuje się działanie prądów błędzących, wywołujących korozję,
- stosowanie odpowiednich zabezpieczeń przewodu, w postaci okładzin izolujących, pozwalających na znaczące zmniejszenie efektu korozji wywoływanej przez wilgoć i prądy błędzące,
- stosowanie elementów rurociągu o jak najbardziej zbliżonych właściwościach fizykochemicznych, co pozwala uniknąć powstawania różnicy potencjałów, inicjujących korozję,
- stosowanie odpowiednich metod wyginania rur i budowy zakrętów, w sposób pozwalający uniknąć pęknięcia zmęczeniowego w tych miejscach.

Istotne znaczenie mają także badania kontrolne, prowadzone począwszy 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 być usunięta). Dokonywana jest także identyfikacja wykrytych wad z podaniem ich dokładnej lokalizacji i wymiarów. Następnie określa się jakość wykonania obiektu i prognozuje się jego trwałość, przyjmując normatywne wartości dopuszczalne. Ze względów ekonomicznych badania takie nie obejmują jednak kontroli stuprocentowej. Stąd też oddany do eksploatacji rurociąg może nadal mieć wady ukryte, które nie zostały ujawnione na kolejnych etapach kontroli, a które mogą stanowić zagrożenie w czasie użytkowania.

## **5.2. Działania prewencyjne na etapie eksploatacji rurociągów**

Działania prewencyjne na etapie eksploatacji rurociągów, poza monitorowaniem ich pracy – procesu tłoczenia, obejmują przede wszystkim kontrolę zmian stanu technicznego, decydującego o niezawodności rurociągu.

Podstawą kontroli stanu technicznego są odpowiednie badania diagnostyczne. Celem tych badań powinno być ciągłe lub okresowe monitorowanie stanu technicznego ze śledzeniem pogłębiania się uszkodzeń, ocena struktury materiałów oraz pomiar geometrii rurociągu (wpływającej na jego działanie). Szczegółnej uwagi wymagają na przykład procesy korozji, a to głównie dlatego, że grubość ścianki rurociągu przy tak dużej stalochłonności konstrukcji i ze względu na koszty budowy, dobierana jest jedynie pod kątem wytrzymałościowym bez naddatków na ubytki korozyjne. Oznacza to, przy przyjmowanych dla rurociągów okresach eksploatacji sięgających do i powyżej 50 lat, konieczność dokładnego kontrolowania starzenia korozyjnego, które powinno być mniejsze od starzenia funkcjonalnego. Okresowo należy także sprawdzać poziom naprężeń.

Należy mieć na uwadze, że ograniczeniem co do możliwości stosowania niektórych metod kontroli jest fakt, że rurociąg przysypany jest ziemią lub znajduje się w wodzie, a ze względów ekonomicznych niewskazane jest jego wyłączenie.

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.

## LITERATURA

1. Billman L., Isermann R.: Leak detection methods for pipelines, *Automatica*, vol. 23, no. 3, 1987.
2. Bobrowski D.: Modele i metody matematyczne w teorii niezawodności, WNT, Warszawa, 1985.
3. Korbicz J. i inni: Diagnostyka procesów modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania, WNT, Warszawa, 2002.
4. Lindstedt P.: Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy, Wydawnictwo Naukowe ASKON, Warszawa, 2002.
5. Michałowski W.S., Trzop S.: Rurociągi dalekiego zasięgu, Wydawnictwo Fundacji Odyseum, Warszawa, 1996.
6. Niederliński A.: Systemy komputerowe automatyki przemysłowej tom 2., WNT, Warszawa, 1985.
7. Rządkowski J.: Polityka ubezpieczeń rurociągów, Rurociągi nr 1-2, 2002.
8. Sobczak R.: Lokalizacja wycieków z rurociągów, *Pomiary Automatyka Robotyka* nr 3, 1999.
9. Trzop S.: Wybrane zagadnienia z konstruowania rurociągów w aspekcie niezawodności ich pracy, IV Krajowa konferencja techniczna Zarządzanie ryzykiem w eksploatacji rurociągów, Płock, 2001.
10. Żółtowski B., Ćwik Z.: Leksykon diagnostyki technicznej, Wyd. Uczel. ATR, Bydgoszcz, 1996.

### **DESCRIPTION AND CAUSES OF FAILURE STATES OF TRANSMISSION PIPELINES WITH THE LEAKAGES**

**Abstract:** In this work the causes of damages of transmission pipelines and the problems connected with prevention of damages arising, contained the activities, taken in the individual stages: since design, through building, finish exploitation of object, has been discussed. The classification of leakages, as well representative description of leakage phenomenon, has been also presented.

**Keywords:** transmission pipelines, causes of leakages, description of leakage phenomenon

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/3/06.

Paweł Ostapkowicz\*

## RUROCIĄGI PRZESYŁOWE, ICH OTOCZENIE I PROCES TŁOCZENIA W ASPEKTCIE DIAGNOZOWANIA WYCIEKÓW

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono podstawowe informacje na temat rurociągów przesyłowych do transportu ciekłych mediów, ich otoczenia i przebiegu procesu tłoczenia, istotne w aspekcie realizacji względem tych obiektów działalności diagnostycznej w zakresie diagnozowania wycieków.

**Słowa kluczowe:** rurociągi przesyłowe, diagnozowanie wycieków

### 1. Wprowadzenie

Prowadzenie skutecznej działalności diagnostycznej względem dowolnego typu obiektów technicznych wymaga od diagnostów posiadania dostatecznej wiedzy o samych obiektach i ich otoczeniu [5].

Gdy obiektem diagnozowania jest instalacja technologiczna oraz zachodzący w niej proces, wiedza o instalacji (jej komponentach, oprzyrządowaniu pomiarowym) i otoczeniu – powinna być dodatkowo poszerzona o niezbędne informacje o samym procesie [3].

Przykładem diagnozowania instalacji technologicznej oraz zachodzącego w niej procesu jest diagnostyka wycieków z rurociągów przesyłowych do transportu ciekłych mediów, wykorzystująca tzw. metody wewnętrzne, bazujące na sygnałach parametrów przepływu, tj.: sygnałach ciśnienia, natężenia strumienia, temperatury.

Celem niniejszej pracy jest zwięzłe przedstawienie dotychczasowej wiedzy na temat tego typu rurociągów, ich otoczenia oraz procesu tłoczenia.

---

\* Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki,  
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45C.



## **2. Ogólna charakterystyka rurociągów przesyłowych**

### **2.1. Klasyfikacja rurociągów**

Rurociągi, w zależności od rodzaju transportowanych mediów, dzieli się na obiekty do przesyłania:

- cieczy,
- ciał lotnych,
- ciał sypkich,
- różnych czynników dwu- lub wieloskładnikowych.

Rurociągi do transportu cieczy, ze względu na odległość i charakter przesyłu, dzieli się następująco, na:

- rurociągi przesyłowe,
  - dalekiego zasięgu (określane również jako przewodowe lub magistralne),
  - lokalne,
- rurociągi procesowe.

Zależnie od rodzaju przesyłanych mediów, rurociągi przesyłowe, a w szczególności dalekiego zasięgu, dzieli się na:

- ropociągi (do transportu ropy),
- rurociągi produktowe (do przesyłu produktów naftowych),
- gazociągi (do przesyłu gazu),
- inne (do transportu innych ciekłych mediów).

### **2.2. Definicja rurociągu typu przesyłowego**

Rurociąg typu przesyłowego, według [6, 8] – jest to przewód utworzony przez szereg szczelnie połączonych ze sobą rur, kształtek rurowych, zaworów i czujników. Służy do transportu określonego rodzaju medium pomiędzy wydzielonymi obiektami nadania, odbioru lub rozdziału (stacjami pomp, punktami odwiertów, zbiornikami magazynowania itp.).

### **2.3. Cechy rurociągów o charakterze przesyłowym**

Istotną cechą rurociągów przesyłowych jest ukształtowanie profilu ich trasy zbliżone maksymalnie do linii prostej z zastosowaniem łagodnych łuków, co pozwala uniknąć dużych strat energii medium na przepływie. Rurociągi przesyłowe nie mają zazwyczaj odgałęzień i żadnych pętli.

Dla porównania, w przypadku rurociągów procesowych straty energii medium na przepływie są zazwyczaj dość znaczne, głównie z powodu nagłych zmian

średnicy przewodu, pionowych odcinków technologicznych oraz ostrych załamania kierunku przepływu. Rurociągi te posiadają wiele odgałęzień, a także pętli.

Czasami jednak rurociągi procesowe można traktować jako typowe obiekty przesyłowe. Pod warunkiem, że mają odpowiednio znaczącą długość i mało wymienionych wyżej niekorzystnych szczegółów konstrukcyjnych.

Rurociągi przesyłowe dalekiego zasięgu, w odróżnieniu od rurociągów lokalnych, są obiektami znajdującymi się poza obrębem granic pól naftowych, baz paliw, terenem portów, lotnisk, stacji kolejowych i innych zakładów zamkniętych, oraz poza sieciami rozprowadzającymi w miastach i osiedlach.

Tego typu rurociągi przesyłowe wyróżniają się dużymi rozmiarami, oraz zauważalnie wysoką wartością stosunku długości do średnicy. Przykładem mogą tu być obiekty transportujące ropę naftową i jej produkty, które nierzadko osiągają długość do kilku tysięcy kilometrów, przy średnicach przewodu dochodzących nawet do około i powyżej 1000 mm. Średnice innych rurociągów przesyłowych dalekiego zasięgu są wprawdzie nieco mniejsze, ale rurociągi te nadal są jednak obiektami dużymi, ponieważ długość ich wynosi dziesiątki lub setki kilometrów.

#### **2.4. Istota działania rurociągów przesyłowych**

Transport dowolnych mediów rurociągami możliwy jest wówczas, gdy medium posiada określoną energię – znajduje się pod odpowiednim ciśnieniem. W rurociągach do przesyłania cieczy ciśnienie to wytwarza się za pomocą pomp.

Podczas przepływu ciekłego medium rurociągiem, wraz ze wzrostem pokonywanej odległości, następuje spadek jego ciśnienia. Jest on przede wszystkim spowodowany stratą liniową ciśnienia, wywołaną działaniem sił tarcia, oraz występowaniem naporu hydrostatycznego wynikającego z różnicy wysokości profilu trasy. W sytuacjach ekstremalnych ów spadek ciśnienia może osiągać dość znaczne wielkości. Nie może on jednak spowodować obniżenia ciśnienia na końcu rurociągu poniżej pewnej wymaganej wartości granicznej, bo to zakłóciłoby przepływ, a nawet groziłoby jego zanikiem.

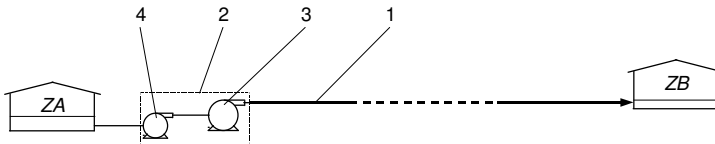
By móc zatem uzyskać i utrzymać założoną wielkość przepływu przez rurociąg, niezbędne jest wytworzenie dostatecznie wysokiego ciśnienia na wlocie rurociągu (rzędu kilkudziesięciu lub nawet setek barów). W tym celu stosuje się odpowiedni układ pompujący. Przy znacznych odległościach przesyłu, poza podniesieniem ciśnienia na wlocie rurociągu, często staje się także konieczne podnoszenie ciśnienia w kilku miejscach na jego długości. Wymaga to już jednak zaprojektowania bardziej złożonego rozwiązania, określanego jako system podnoszenia ciśnienia medium.

Należy tu także wspomnieć, że ciecze można transportować rurowciągami przy użyciu podciśnienia. W praktyce dotyczy to jednak niewielkiej grupy obiektów, i nie będzie o nich mowy w niniejszej pracy.

Prędkość przepływu ciekłych mediów w rurowciągach przesyłowych wynosi zazwyczaj od 1 do 6 m/s.

## 2.5. Typowe rozwiązania instalacji rurowciągów przesyłowych

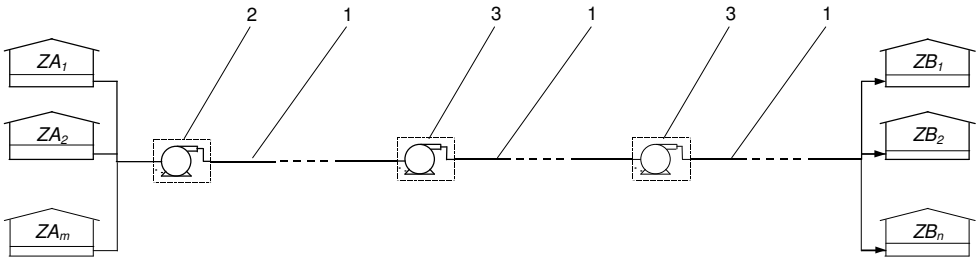
Uproszczony schemat typowego rozwiązania instalacji rurowciągu przesyłowego pokazano na rysunku 1. Medium (ciecz) pobierane jest ze zbiornika ZA i za pomocą układu pompującego 2 (który tworzy pompa główna 3, często wspomagana pompą podporową 4), rurowciągiem 1 przetłaczane do zbiornika ZB [10].



**Rys. 1.** Uproszczony schemat typowego rozwiązania instalacji rurowciągowej z pojedynczymi zbiornikami: 1 – rurowciąg, 2 – układ pompujący, 3 – pompa główna, 4 – pompa podporowa, ZA – zbiornik początkowy, ZB – zbiornik końcowy

Rzeczywiste instalacje rurowciagowe są bardziej złożone, bowiem:

- pomiędzy początkiem i końcem rurowciągu mogą czasami występować odgałęzienia,
- jak już zasygnalizowano w punkcie 2.4, przy znacznych odległościach przesyłu, oprócz początkowego układu pompującego na trasie rurowciągów stosowane są kolejne układy pompujące (rys. 2). W praktyce rozdzielają one rurowciąg na poszczególne odcinki,
- składają się z  $m$  zbiorników początkowych  $ZA_m$  oraz  $n$  zbiorników końcowych  $ZB_n$  (rys. 2), o różnych stopniach napełnienia, które to zbiorniki często wypełniają media o odmiennych właściwościach. Stąd zależnie od potrzeb tłoczenie może być przełączane na odpowiednie zbiorniki. Dodatkowe zbiorniki, spełniające rolę retencyjną, mogą się także znajdować w obrębie rozmieszczonych na trasie rurowciągu układów pompujących.



**Rys. 2.** Uproszczony schemat typowego rozwiązania instalacji rurociągowej z kilkoma zbiornikami i układami pompującymi: 1 – rurociąg (jego poszczególne odcinki); 2 – początkowy układ pompujący; 3 – kolejne układy pompujące; ZA<sub>1</sub>, ZA<sub>2</sub>, ZA<sub>m</sub> – zbiorniki początkowe; ZB<sub>1</sub>, ZB<sub>2</sub>, ZB<sub>n</sub> – zbiorniki końcowe

## 2.6. Infrastruktura rurociągów przesyłowych

Rurociągi przesyłowe powstają na lądzie, dnie mórz i oceanów. Na lądzie najczęściej są one prowadzone pod powierzchnią gruntu, znajdując się na dnie wykopu przysypane warstwą ziemi lub piasku. Mogą one być także prowadzone na powierzchni gruntu i wówczas umieszcza się je na specjalnych podporach. Rurociągi podmorskie lokalizuje się na dnie, a po odpowiednim zakotwiczeniu często także przykrywa się warstwą piasku.

Budowa rurociągów przesyłowych, a zwłaszcza tych dalekiego zasięgu jest przedsięwzięciem bardzo kosztownym, złożonym organizacyjnie i skomplikowanym technicznie. Kompletna realizacja takiego obiektu rurociągowego obejmuje bowiem [8]:

- obiekty liniowe - rurociąg wraz armaturą i z przejściami przez przeszkody sztuczne i naturalne, sieć ochrony katodowej, sieć telemechaniki i łączności oraz systemy kontrolno-pomiarowe,
- obiekty punktowe - stacje pomp, bazy awaryjno-remontowe, stacje rozdzielcze oraz inne obiekty niezbędne do zabezpieczenia normalnej eksploatacji obiektu,
- budownictwo towarzyszące - obiekty inżynieryjne zabezpieczające środowisko przed skażeniami i rozlewami medium oraz drogi dojazdowe.

## 2.7. Podstawowe parametry techniczne rurociągów przesyłowych

Podstawowymi parametrami, które charakteryzują rurociągi przesyłowe są:

- średnica zewnętrzna rurociągu - [in, mm],
- średnica wewnętrzna rurociągu - [in, mm],
- lub grubość ścianki - [in, mm],

- całkowita długość nitki rurociągu - [km],
- nominalne natężenie przepływu transportowanego medium - [ $\text{m}^3/\text{h}$ , tony/h], lub przepustowość rurociągu - [ $\text{m}^3/\text{rok}$ , 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 - [ $^{\circ}\text{C}$ ].

## 2.8. Wymagania, które muszą spełniać rurociągi przesyłowe

Rurociągi o charakterze przesyłowym powinny cechować:

- szczelność,
- dostatecznie duża gładkość ścian przewodu, zapewniająca minimalne straty na przepływie,
- odpowiednio wysoka wytrzymałość przewodu, zarówno na obciążenia zewnętrzne, jak i obciążenia od ciśnienia tłoczonego medium,
- odporność ścian przewodu i armatury na oddziaływanie fizykochemiczne medium,

a w ogólności trwałość i niezawodność eksploatacyjna.

W nowo oddawanych do eksploatacji tego typu obiektach, istotnymi cechami są ponadto:

- nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne,
- wysoka wartość użytkowa.

## 3. Elementy konstrukcyjne rurociągów przesyłowych – na podstawie [8]

Podstawowymi elementami konstrukcyjnymi rurociągów przesyłowych są:

- rury przewodowe i osłonowe (ochronne),
- Jako rury przewodowe powszechnie stosowane są głównie rury stalowe. Przy niskich ciśnieniach eksploatacyjnych stosuje się także rury z tworzyw sztucznych. Wymiarami geometrycznymi charakteryzującymi rury są: średnica zewnętrzna, średnica wewnętrzna, grubość ścianki, długość. Są to wielkości znormalizowane.

Na przykład rurociągi przesyłowe dalekiego zasięgu do transportu ropy naftowej i jej produktów wykonywane są najczęściej z rur stalowych o średni-

cach wewnętrznych od 300 do 1200 mm i długości dochodzącej nawet do 20 m.

Bardzo istotnym zagadnieniem jest montaż rur. Jest to operacja złożona organizacyjnie i skomplikowana technicznie. Obejmuje ona m.in. roboty związane z łączeniem pojedynczych rur, a w przypadku rurociągów podziemnych także układanie rur w wykopie.

– kształtki,

Są to elementy, które umożliwiają: zmianę kierunku trasy, zmianę średnicy przewodu, zaślepienie lub rozgałęzienie przewodu. Zalicza się do nich: łuki, kolana, trójniki, zaślepki, zwężki oraz, z ang. weldolety, sockolety i sweepolety (służące do podłączenia do linii głównej rurociągu dowolnego odgałęzienia, wstawiane lub dospawywane do rurociągu po wykonaniu otworu).

– armatura trasowa,

Stanowią ją zasuwki i zawory. Armaturę trasową w ogólności dzieli się na: armaturę odcinającą (szczelnie odcinającą przepływ medium), armaturę regulacyjną (sterującą wielkością natężenia przepływu i ciśnienia w rurociągu). Należy tu także wymienić armaturę, która zapobiega cofaniu się tłoczonego medium. Rolę tę spełniają zawory zwrotne.

Armaturę odcinającą i regulacyjną zasadniczo umieszcza się na początku i końcu każdego rurociągu przesyłowego, a w przypadku obiektów dalekiego zasięgu na początku i końcu ich poszczególnych odcinków.

Dodatkowo armaturę odcinającą rozmieszcza się także na trasie – zależnie od rodzaju terenu, jego uzbrojenia i potrzeb minimalizacji ewentualnego wycieku – przeważnie w odległościach 20÷25, a nawet do 30 km. Na odcinkach przejść rzecznych oraz w miejscach gdzie rurociągi szczególnie są narażone na uszkodzenia, odległości pomiędzy kolejnymi stacjami odcinającymi nie powinny natomiast przekraczać 16 km.

– takie elementy jak: kołnierze połączeniowe, kołnierze izolacyjne, odpowietrzniki, odwadniacze, komory wysyłania i odbioru czyszczaków, materiały izolacyjne, obciążniki zabezpieczające rurociąg przed wypłynięciem na przeszkodach wodnych i w gruntach zawodnionych, elementy ochrony katodowej.

Ponadto również:

- urządzenia zabezpieczające przed wzrostem niepożądanego ciśnienia,
- urządzenia sygnalizacyjne i pomiarowe,
- układy zdalnego sterowania zasuwami trasowymi,
- regulatory ciśnienia, temperatury i poziomu cieczy,
- urządzenia do wykrywania ewentualnych przecieków,

oraz takie części pomocnicze jak:

- podpory,

- zawieszenia,
- izolacje cieplne.

#### 4. Układy pompujące

W rurociągów przesyłowych do transportu ciekłych mediów rolę wspomnianych w punkcie 2.4 układów pompujących pełnią najczęściej stacje pomp, które tworzą zamontowane w obrębie wydzielonych obiektów pompy. Przy czym wyróżnia się dwa podstawowe typy stacji pomp:

- stacje początkowe (wstępne) - usytuowane na wlocie rurociągu i posiadające dość skomplikowaną budowę,
- stacje pośrednie - usytuowane w pewnych odległościach wzdłuż trasy rurociągu i zawierające mniej specjalistycznych urządzeń niż stacje początkowe.

Liczba i rozmieszczenie stacji pośrednich zależy przede wszystkim od długości rurociągu oraz od wielkości energii, jaką należy dostarczyć, by móc utrzymać ciągłość przesyłu medium o wymaganym natężeniu.

W przypadku rurociągów transportujących ropę naftową i jej produkty stacje takie rozmieszcza się w odległościach około 80÷200 km. Jeżeli zatem długość tych rurociągów nierzadko osiąga kilka tysięcy kilometrów, oznacza to, że na ich trasie znajduje się kilka, a nawet kilkanaście stacji pośrednich.

#### 5. Najczęściej tłoczone ciekłe media i ich właściwości fizykochemiczne

Rurociągami przesyłowymi transportowane są różne ciekłe media. Najczęściej jest to ropa naftowa i jej produkty. Poza tym woda i inne substancje chemiczne, w tym m.in.: polietylen, etylen, propylen, butadien, styren, chlor, amoniak. Media te posiadają odmienne właściwości fizyczne i skład chemiczny.

Pośród właściwości fizycznych, najbardziej istotny wpływ na przebieg transportu wywierają:

- gęstość (lub ciężar właściwy),  
Im jest ona niższa, tym mniej trzeba energii do przesyłu medium. Gęstość poszczególnych tłoczonych cieczy może ulegać zmianom, jest ona bowiem bezpośrednio zależna od temperatury i ciśnienia. Szczególnie istotny jest wpływ temperatury, której to niewielki wzrost lub spadek w przypadku niektórych cieczy (w tym np. ropy naftowej) może powodować znaczące zmia-

ny (obniżenie lub zwiększenie) gęstości. Zmiany gęstości wpływają z kolei na objętość, a zatem na natężenie przepływu w rurociągu.

– lepkość,

W kwestii lepkości, która to wielkość jest miarą wewnętrznych sił oporu ruchu danego medium, sytuacja wygląda podobnie. Im jest ona niższa, tym medium łatwiej (szybciej) przepływa w rurociągu. Lepkość poszczególnych tłoczonych cieczy wykazuje także bezpośrednią zależność od temperatury i ciśnienia. W obu przypadkach zależność ta jest odwrotnie proporcjonalna, przy czym temperatura wpływa na zmianę lepkości bardziej znacząco; jak ma to miejsce np. w odniesieniu do ropy naftowej.

– temperatura,

Jak już zasygnalizowano, temperatura medium wpływa bezpośrednio na jego gęstość i lepkość. Temperatura medium wzdłuż rurociągu, znajdującego się przykładowo pod powierzchnią, ustala się po kilku lub kilkunastu pierwszych kilometrach trasy i osiąga poziom temperatury gruntu.

poza tym także:

– zawartość gazów w tłoczonych cieczy - duża ich ilość może powodować powstawanie zaburzeń przepływu,

– zawartość cząstek stałych - mogąca powodować oddziaływania erozyjne na ściany przewodu.

W tym miejscu wypada także wspomnieć o ściśliwości cieczy. Nie została ona wymieniona wcześniej celowo, bowiem w transporcie rurociągowym ciecze są traktowane jako praktycznie nieściśliwe.

Co się zaś tyczy właściwości chemicznych, to niezmiernie ważne są:

– skład chemiczny - decydujący o oddziaływaniu tłoczonego medium na materiał ścian rurociągu,

– stopień palności - powodujący występowanie zagrożeń pożarowych i wybuchowych.

## **6. Podstawowe stany pracy rurociągów przesyłowych**

### **6.1. Klasyfikacja stanów pracy rurociągów przesyłowych**

W przypadku rurociągów przesyłowych wyróżnia się dwa podstawowe stany pracy (przebiegi procesu tłoczenia):

- bez wycieku,
- z wyciekami.



Dla obu tych stanów, tłoczenie medium może mieć zarówno charakter ustalony – określany jako stan pracy ustalonej, bądź niestabilizowany – określany jako stan pracy niustalonej.

Rozpatrując poszczególne stany pracy, którym towarzyszą określone zjawiska przepływowe, należy mieć na uwadze, że są to procesy dynamiczne. Wywierają one wpływ na dwa podstawowe parametry tłoczenia – ciśnienie i natężenie strumienia.

Informacje o stanach pracy rurociągów przesyłowych z wyciekami można znaleźć w pracach [9, 10].

## 6.2. Charakterystyka stanu ustalonego bez wycieku

Ustalony stan pracy bez wycieku jest pożądanym stanem pracy rurociągu przesyłowego. Charakteryzują go stabilne w czasie wartości ciśnienia i natężenia strumienia.

Obserwuje się wówczas niewielkie wahania ciśnienia, które przykładowo przy poziomie sygnału 3÷4 Mpa wynoszą około 30÷50 kPa [10]. Wahania ciśnienia mogą 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.

## 6.3. Charakterystyka stanu niustalonego bez wycieku

Niustalony stan pracy bez wycieku jest z kolei stanem niepożądanym. Charakteryzuje go występowanie wielu zjawisk, które mają charakter przejściowy. Zjawiska te, poza zaburzeniami przepływu, mogą nawet powodować realne zagrożenie dla konstrukcji obiektu.

Z obserwacji eksploatacyjnych wynika, że najczęstszymi przyczynami powstawania niustalonego przepływu medium w przewodzie rurociągu są [8]:

- uruchomienie lub zatrzymanie stacji pomp,
- zanik energii powodujący zatrzymanie stacji pomp,
- blokada przepływu strumienia przez zasowy i zawory.

Mogą je także powodować:

- przełączanie tłoczenia pomiędzy zbiornikami,
- niecałkowite wypełnienie przewodu,
- powstawanie przepływu dwufazowego,
- zbyt nagłe otwieranie lub zamykanie zaworów i zasuw.

W większości są to zatem przyczyny związane z działaniami operacyjnymi.

Jeśli chodzi o zagrożenia, to szczególnie niebezpieczne okazują się sytuacje, w których dochodzi do nagłych zmian natężenia strumienia lub jego całkowitego zatrzymania. Wówczas może powstawać zjawisko uderzenia hydraulicznego, określane również jako efekt propagacji dodatniej fali uderzeniowej. Powoduje ono kilkakrotne przekroczenie nominalnej wartości ciśnienia w rurociągu.

## **7. Oprzyrządowanie pomiarowe rurociągów przesyłowych**

### **7.1. Monitorowanie procesu tłoczenia**

Montowane na rurociągach oprzyrządowanie pomiarowe ma przede wszystkim umożliwiać monitorowanie procesu tłoczenia. Monitoruje się to obecnie za pomocą odpowiednich systemów, wzorowanych najczęściej na powszechnie stosowanych w przemyśle rozwiązaniach typu SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Stosuje się też bardziej uproszczone systemy.

### **7.2. Ogólna charakterystyka systemów SCADA**

Zgodnie z definicją monitoringu systemy typu SCADA instalowane na rurociągach przesyłowych mają za zadanie dostarczać obsłudze niezbędnych informacji do oceny pracy obiektu (procesu tłoczenia) oraz utrzymania założonych wielkości przepływu. W ramach monitorowania systemy te realizują również takie funkcje jak:

- wizualizacja procesu,
- gromadzenie i archiwizacja danych pomiarowych.

Systemy SCADA nie są jednak ograniczone wyłącznie zadaniem monitorowania (kontroli), bowiem w praktyce wypełniają one pełen zakres zadań, obejmujący [4]:

- regulację,
- sterowanie,
- planowanie i wdrażanie czynności eksploatacyjnych, np. czyszczenie rurociągu.

Spełnianie tylu obszernych zadań przez systemy SCADA możliwe jest dzięki ich odpowiedniej strukturze, która obejmuje zarówno hardware i software, a w ogólności takie podstawowe elementy:

- urządzenia pomiarowe (przetworniki ciśnienia, przepływomierze, przetworniki temperatury),
- sterowniki programowalne PLC,
- moduły transmisji danych,

– stację dyspozytorską.

Dla porównania trzeba powiedzieć, że systemy typu uproszczonego – stosowane w celu monitorowania pracy rurociągów przesyłowych – wprawdzie nie realizują tylu zadań, jednak ich struktura zawiera większość z wyżej wymienionych elementów.

### **7.3. Standardowe sygnały pomiarowe dla rurociągów przesyłowych**

Standardowymi sygnałami pomiarowymi dla rurociągów przesyłowych, które reprezentują działanie obiektu (proces tłoczenia) są wielkości podstawowych parametrów przepływu:

- ciśnienia,
- natężenia strumienia,
- temperatury.

Pomiaru tych wielkości zasadniczo dokonuje się na początku i na końcu rurociągu. Poza tym, szczególnie w odniesieniu do ciśnienia i temperatury, dodatkowe punkty pomiarowe rozmieszcza się wzdłuż trasy. O wyborze ich lokalizacji decydują m.in. takie względy jak ukształtowanie terenu, czy stan techniczny danego odcinka rurociągu. Najczęściej jednak lokuje się je w obrębie stacji zasuw.

### **7.4. Oprzyrządowanie pomiarowe**

Pomiar wyżej wymienionych wielkości może być przeprowadzany za pomocą dwójakiego typu urządzeń. Mogą to być:

- typowe konwencjonalne przyrządy pomiarowe, które pozwalają na bezpośredni odczyt wielkości mierzonej, takie jak: manometry, przepływomierze oparte na zastosowaniu kryz pomiarowych z układami manometrycznymi, termometry,
- przetworniki pomiarowe, które generują na wyjściu proporcjonalny do mierzonej wielkości sygnał elektryczny; odpowiednio: przetworniki ciśnienia, przepływu i temperatury.

Z uwagi na rozległe rozmieszczenie punktów pomiarowych, ich znaczącą liczbę (często sięgającą kilkunastu a nawet kilkudziesięciu) oraz z uwagi na potrzebę równoczesnego dokonywania pomiarów, istotnego znaczenia nabiera druga grupa urządzeń. Urządzenia należące do pierwszej grupy spełniają natomiast rolę typowo kontrolną i nie są one źródłem informacji w strukturach pozyskiwania danych pomiarowych.

## **7.5. Konfiguracja i funkcjonowanie układów pomiarowych**

Układowi pomiarowym systemów typu SCADA i typu uproszczonego stawiany jest wymóg dostarczania w cyfrowych postaciach sygnałów – wiarygodnych i niezawodnych informacji o przebiegu wielkości mierzonych. Pozyskiwanie danych pomiarowych przez te układy powinno odbywać się w sposób okresowo ciągły i bez znaczących opóźnień czasowych.

Funkcjonowanie układów pomiarowych oparte jest na rozmieszczonych na trasie rurociągu przesyłowego przetwornikach dokonujących pomiaru określonych wielkości przepływu. Urządzenia te, jak wspomniano w punkcie 7.4, generują analogowe sygnały elektryczne proporcjonalne do wartości wielkości mierzonych. Sygnały analogowe zostają następnie przetworzone za pomocą odpowiednich modułów na postać cyfrową, po czym przy użyciu sterowników i modułów komunikacyjnych zostają przesłane do centrali. W przypadku systemów SCADA rolę centrali pełni stacja dyspozytorska. Stacją taką tworzy komputer PC z odpowiednim oprogramowaniem.

W praktyce przesył danych pomiarowych może być realizowany za pomocą dwóch rodzajów transmisji:

- przewodowej - opartej najczęściej na poprowadzonym wzdłuż rurociągu światłowodzie lub, gdy istnieje taka możliwość, przy wykorzystaniu stacjonarnych linii telefonicznych,
- bezprzewodowej - wykorzystującej technologie i sieć telefonii GSM-GPRS lub przydzielone kanały radiowe.

Opracowanie i budowa takiej struktury układu pomiarowego jest zadaniem dość złożonym, a przede wszystkim kosztownym. Poza ilością i lokalizacją punktów pomiarowych i doбором urządzeń należy uwzględnić rozwiązanie takich istotnych zagadnień jak:

- unifikacja sygnałowa urządzeń,
- zasilanie urządzeń,
- sposób przesyłania danych z poszczególnych urządzeń,
- komunikacja dwukierunkowa,
- wymagana częstość pomiaru, tj. próbkowanie sygnałów,

a także, dodatkowo takich jak:

- kalibracja czujników pomiarowych,
- procedury dostępu do danych pomiarowych,
- szkolenie obsługi.

Znaczne koszty ponosi się także w związku z funkcjonowaniem takich układów pomiarowych. Są to koszty związane m.in. z opłatami za energię, za przesył danych, za okresowe przeglądy i naprawy.

Pomimo korzystania z najnowszych technologii, przy tak znacznych odległościach, układy pomiarowe rurociągów przesyłowych nie są całkowicie odporne na błędy związane transmisją danych. Źródłem błędów są dodatkowo procesy przetwarzania wielkości mierzonych. Stąd też, o ile jest to możliwe, wskazane jest ograniczenie liczby punktów pomiarowych.

## **8. Otoczenie rurociągów przesyłowych i jego oddziaływanie na obiekty**

Bezpośrednie otoczenie rurociągów przesyłowych zależy od przebiegu trasy rurociągów. Mogą to być zatem środowiska: ziemne, powietrzne lub wodne; różniące się rodzajem i stopniem oddziaływań na obiekt.

W przypadku rurociągów lądowych, których trasy biegną często przez linie kolejowe, drogi, autostrady, cieki wodne, bagna, torfowiska, tereny zalesione, a nawet formacje skalne – mamy do czynienia ze środowiskami średnio agresywnymi, o dużych wahaniami temperatury, wilgotności i ciśnienia, co przyspiesza szybkość korozji rurociągu.

Ponadto występowanie takich zjawisk jak: ruchy podłoża, drgania, prądy błądzące oraz istnienie pól magnetycznych i elektrycznych, poza negatywnym wpływem na trwałość obiektu, może zakłócać poprawne działanie i obsługę urządzeń sterujących oraz systemów kontrolno-pomiarowych, tzn. być źródłem zakłóceń i szumów pomiarowych.

### **LITERATURA**

1. Billman L., Isermann R.: Leak detection methods for pipelines, *Automatica*, vol. 23, no. 3, 1987.
2. Chądzyński M.A.: „Wielka rura” w Polsce, Rurociągi nr 1-2, 2001.
3. Kościelny J.M.: Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa, 2001.
4. Kwietniewski M., Gębski W., Wronowski N.: Monitorowanie sieci wodociągowych i kanalizacyjnych, Wydawnictwa Zarządu Głównego Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych, Warszawa, 2005.
5. Lindstedt P.: Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy, Wydawnictwo Naukowe ASKON, Warszawa, 2002.
6. Magda W.: Rurociągi podmorskie. Zasady projektowania, WNT, Warszawa, 2004.
7. Malczewski J., Piekarski M.: Modele procesów transportu masy, pędu i energii, WNT, Warszawa, 1992.
8. Michałowski W.S., Trzop S.: Rurociągi dalekiego zasięgu, Wydawnictwo Fundacji Odyseum, Warszawa, 1996.

9. Ostapkowicz P.: Diagnostowanie wycieków z rurociągu modelowego przy użyciu metody gradientowej i metody śledzenia czoł fal rozprężeniowych ciśnienia, Zeszyty Naukowe PB, Budowa i Eksploatacja Maszyn z. 12, Białystok, 2004.
10. Sobczak R.: Detekcja wycieków z rurociągów magistralnych cieczy, Nafta Gaz nr 2, 2001.
11. Żółtowski B., Ćwik Z.: Leksykon diagnostyki technicznej, Wyd. Uczel. ATR, Bydgoszcz, 1996.

#### **TRANSMISSION PIPELINES, THEIR ENVIRONMENT AND RUN OF PUMPING PROCESS, IN ASPECT OF LEAK DETECTION**

**Abstract:** In this work basic information about the transmission pipelines to transport liquid media, their environment and run of pumping process, significant in aspect realization diagnostic activity in range of leak detection, has been presented.

**Keywords:** transmission pipelines, leak detection

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/3/06.

Adam Piłat\*

### **Porównanie metod linearyzacji i sterowania liniowo-kwadratowego dla aktywnego łożyska magnetycznego**

#### **Streszczenie:**

**Słowa kluczowe:** aktywne łożysko magnetyczne, system nieliniowy, system liniowy, sterowanie w czasie rzeczywistym, regulator LQ, linearyzujące sprzężenie zwrotne, FPGA

## **1. Wstęp**

Przedmiotem rozważań są lokalne regulatory liniowo-kwadratowe zastosowane do systemu aktywnych łożysk magnetycznych. Przedmiotem rozważań jest laboratoryjny model lewitującego wirnika napędzanego silnikiem prądu stałego. System ten jest przykładem nieliniowego i strukturalnie niestabilnego obiektu o wielu wejściach i wielu wyjściach (MIMO). Dokonanie dekompozycji systemu MIMO na podsystemy celem uzyskania modeli lokalnych pozwala na uwzględnienie wirnika jako odseparowanych masy skupione w obu łożyskach, a sterowania są oddzielnie realizowane w każdej z osi. Podejście to nie pozwala na tak dogłębną analizę jak w przypadku systemu MIMO jednakże umożliwia realizację lokalnych zadań sterowania.

## **2. Stanowisko laboratoryjne**

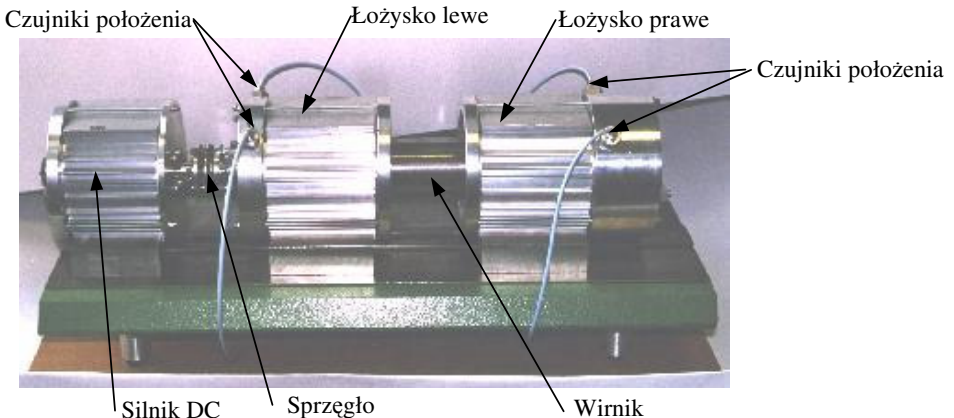
---

\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Katedra Automatyki, 30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30.

Głównym elementem stanowiska są dwa promieniowe aktywne łożyska magnetyczne oraz wirnik jako obiekt lewitacji. Każde łożysko jest sterowane w dwóch wzajemnie prostopadłych osiach przy wykorzystaniu dwóch zestawów cewek (górných i dolnych) dla każdej osi. Elementem napędzającym wirnik jest silnik prądu stałego. Silnik i wirnik zostały połączone za pomocą sprzęgła kłowego. Pewną wadą takiego rozwiązania jest luz w osi wirnika, wynoszący 3mm. Do sterowania cewkami służy wzmacniacz mocy, sterowany sygnałem PWM.

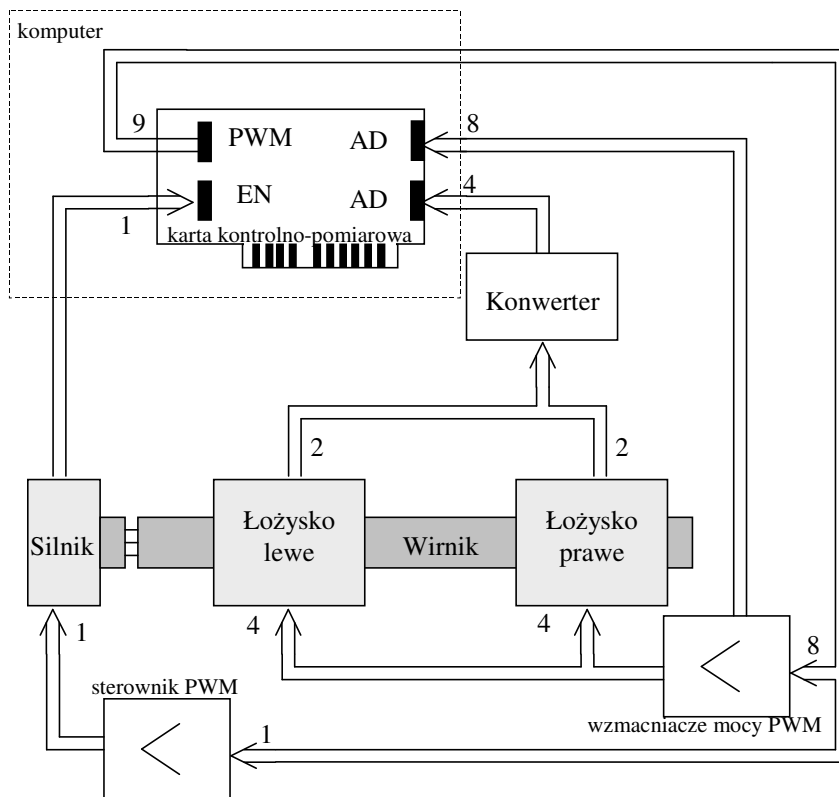
Bezkontaktowy pomiar położenia wirnika w każdym łożysku magnetycznym odbywa się za pomocą dwóch czujników wiropływowych umieszczonych w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny łożysk. Czujniki te są umieszczone współosiowo względem osi sterowania. Obracający się wirnik zakreśla pod powierzchnią czujników tzw. ścieżkę pomiarową.

W celu umożliwienia realizacji zadań sterowania cyfrowego model laboratoryjny łożysk magnetycznych dostosowano tak by można go było podłączyć do komputera klasy PC. Na rysunku 2.2 przedstawiono schemat układu pomiarowo-sterującego. Napięcia z czujników wiropływowych zostały dostosowane do zakresu napięć akceptowanych przez kartę kontrolno-pomiarową RT-DAC3. Do sterowania silnikiem wykonano sterownik PWM. Sygnałami sterującymi w systemie łożysk magnetycznych są sygnały PWM: osiem do sterowania cewkami i jeden do sterowania silnikiem. Sygnałami pomiarowymi są: cztery napięcia pochodzące od czujników położenia, osiem napięć odpowiadających prądom płynącym przez cewkę, jeden sygnał z enkodera reprezentujący obroty silnika-wirnika. Obsługa karty poprzez komputer sterujący odbywa się za pomocą odczytu i zapisu wartości do określonych rejestrów w przestrzeni adresowej komputera.



**Rys. 2.1.** Laboratoryjne stanowisko badawcze





Rys. 2.2. Schemat stanowiska laboratoryjnego

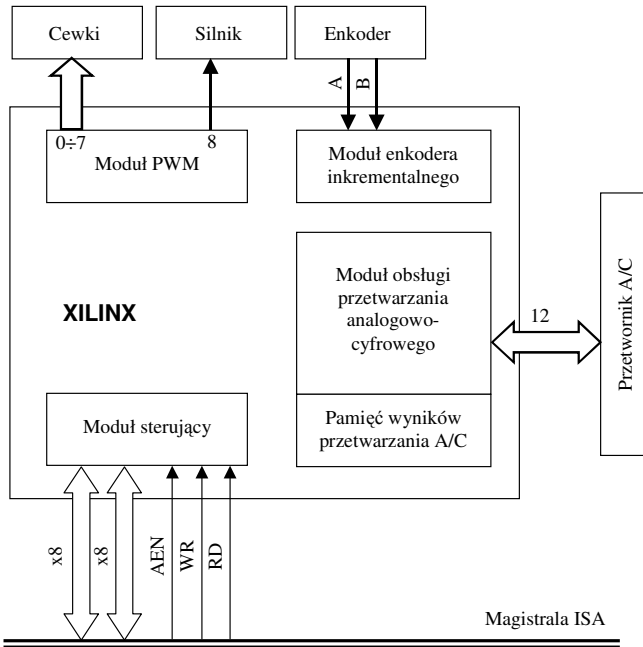
Zadania przetwarzania sygnałów wejściowych i wyjściowych obsługiwane przez kartę odciążają procesor główny komputera sterującego i tworzą dogodniejsze warunki pracy systemu w czasie rzeczywistym. Karta RT-DAC3 zawiera rekonfigurowalny i reprogramowalny układ FPGA XCS30 firmy XILINX.

W układzie FPGA skonfigurowano (rys. 2.3):

- moduł generatora sygnału PWM, posiadający możliwość generowania sygnału PWM o tej samej częstotliwości, lecz różnym wypełnieniu dla każdego z 9 kanałów,
- moduł enkodera inkrementalnego, umożliwiający odczyt fal pomiarowych z enkodera (zliczający impulsy i określający kierunek obrotów),
- moduł obsługi przetwarzania analogowo-cyfrowego, umożliwiający odczyt 12 kanałów analogowych.

Przeniesienie najczęściej wykonywanych, standardowych operacji na warstwę sprzętową umożliwia realizowanie zaawansowanych algorytmów sterowania jako zadań systemu czasu rzeczywistego działającego pod kontrolą Windows NT/2000 systemem łożysk magnetycznych.

Do sterowania systemem łożysk magnetycznych wykorzystano komputer klasy PC, wyposażony w dwa procesory. Głównym powodem wyboru takiej konfiguracji sprzętowej było zapewnienie odpowiedniej rezerwy czasu na potrzeby realizacji algorytmu sterującego.



Rys. 2.3. Konfiguracja układu XILINX

Jako system operacyjny wybrano system Windows 2000, oparty na technologii NT. System ten umożliwia tzw. koligację, czyli przydzielanie wykonywania aplikacji do wybranego procesora. Dzięki tej właściwości zadania systemowe były realizowane na jednym procesorze, a zadania czasu rzeczywistego na drugim. Zadania sterowania w czasie rzeczywistym zrealizowano z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB/Simulink wraz z przybornikami RTW i RTWT, stosując metodę opisaną w punkcie 2.1.3.

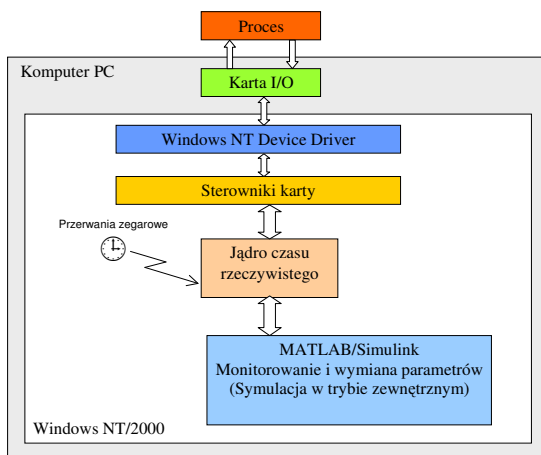
Jądrem systemu czasu rzeczywistego działającego na platformie Windows NT/2000 stanowi Real-Time Windows Target. Oprogramowanie to umożliwia

wykonywanie zadań na tzw. ringu zerowym procesora, który gwarantuje determinizm czasowy oraz umożliwia realizację zadań czasu rzeczywistego w systemach Windows NT/2000 z częstotliwością próbkowania do kilku kHz, w zależności od wydajności warstwy sprzętowej.



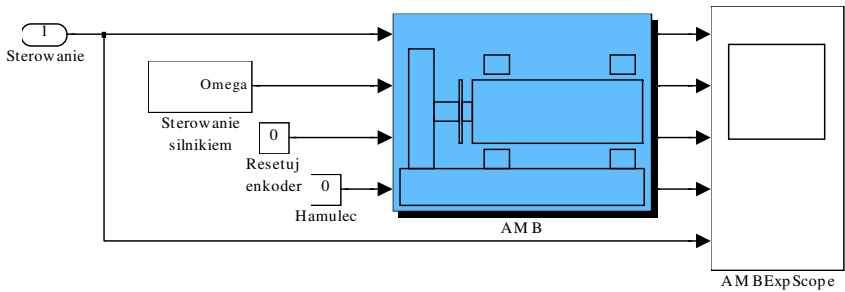
Rys. 2.4. Wykorzystanie systemu dwuprocessorowego

Komunikacja ze sterowanym procesem odbywa się za pomocą sterowników karty. Na potrzeby systemu łożysk magnetycznych, w celu obsługi zrealizowanej logiki układu XILINX kart RT-DAC3, zostały napisane w języku C procedury komunikacyjne – sterowniki karty. Sterowniki te umożliwiają odczyt kanałów analogowych, zapisanie częstotliwości i współczynników wypełnienia sygnałów PWM, zerowanie i odczyt wartości z enkodera.

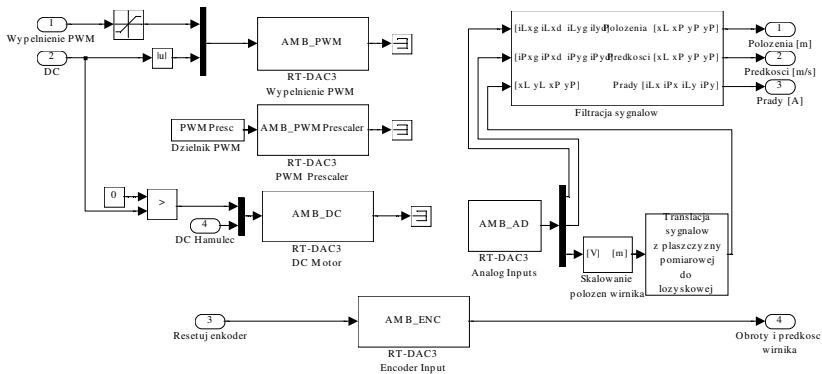


Rys. 2.5. Działanie systemu czasu rzeczywistego w środowisku Windows NT/2000

- Podsumowując powyższe można stwierdzić, że zastosowanie rozwiązań:
- przeniesienie części zadań na warstwę sprzętową,
  - zastosowanie systemu dwuprocesorowego,
  - wykorzystanie jądra czasu rzeczywistego w środowisku Windows NT/2000
- pozwoлиło realizować zadanie sterowania w czasie rzeczywistym na sprzęcie komputerowym o otwartej architekturze sprzętowo-programowej i okazało się słusznym rozwiązaniem już podczas pierwszych eksperymentów przeprowadzonych na badanym zestawie łożysk magnetycznych. Eksperymenty pokazały, że w takiej konfiguracji sprzętowej możliwe jest rozwiązywanie modelu w czasie rzeczywistym metodą Rungego-Kutty czwartego rzędu z częstotliwością próbkowania 5kHz. Częstotliwość ta okazała się graniczna ze względu na zastosowane przetworniki analogowo cyfrowe, realizujące 12 pomiarów, oraz ze względu na procedury sterowników obsługujące kartę kontrolno-pomiarową.



**Rys. 2.6.** Ogólny schemat interfejsu systemu łożysk magnetycznych zrealizowany w środowisku MATLAB/Simulink



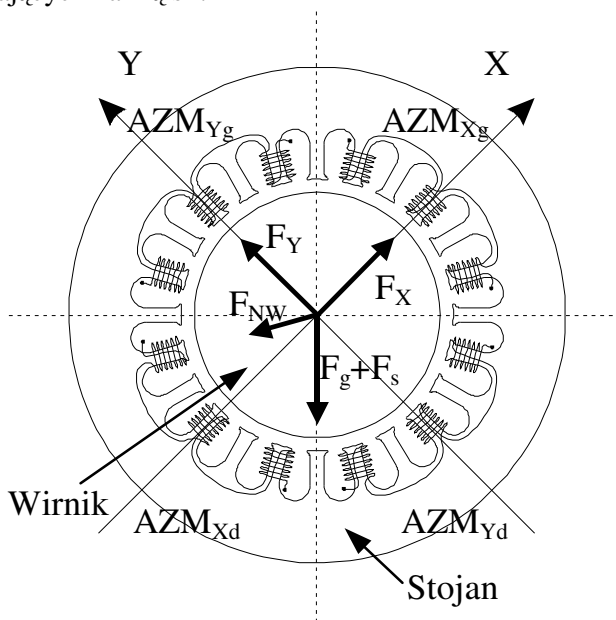
**Rys. 2.7.** Wnętrze bloku AMB łączące warstwę sprzętową i programową

Wewnątrz bloku AMB umieszczono sterowniki, służące do obsługi karty kontrolno-pomiarowej oraz moduły skalowania i filtracji sygnałów pomiarowych. Prędkość osiowa w płaszczyznach łożyskowych jest odtwarzana za pomocą ilorazu różnicowego. Jakość odtwarzania okazała się wystarczająca dla realizowanych zadań sterowania. Sygnałami wejściowymi są: współczynniki wypełnienia PWM, sterowanie silnikiem, zahamowaniem silnika i zerowanie stanu enkodera. Wyjściami są: położenia i prędkości osiowe wirnika w osiach sterowania, prądy płynące w cewkach elektromagnesów.

### 3. Modelowanie

#### 3.1. Model lokalny - nieliniowy

W modelu lokalnym wirnik traktowany jest jako masa zawieszona w łożysku magnetycznym. Model ten nie uwzględnia dynamiki związanej z ruchem obrotowym oraz sprzężeń mechanicznych pochodzących od całego wirnika. Na rysunku 3.1 przedstawiono schemat masy zawieszonyj w łożysku magnetycznym oraz rozkład działających na nią sił.



Rys. 3.1. Konfiguracja masy zawieszonyj w łożysku

Na wirnik działają siły elektromagnetyczne  $F_X$  i  $F_Y$  pochodzące od górnych i dolnych siłowników umieszczonych odpowiednio w osiach X i Y. Ciężar wirnika jest kompensowany przez górne siłowniki.

Uaktywnienie dolnych siłowników powoduje wzrost siły w górnym siłowniku, która równoważy siły grawitacji i siłę pochodzącą od dolnego siłownika. Odpowiednie ustalenie wartości sił działających na wirnik wpływa na sztywność charakteryzującą działanie łożyska magnetycznego.

Nieznane siły  $F_s$  (obciążeń statycznych) i  $F_{NW}$  (niewyważenia resztkowego) są w modelu pominięte. W pracy systemu będą traktowane jako zakłócenie.

Zachowanie się systemu w jednej osi sterowania można zapisać za pomocą równań:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{2m_l} \left[ L^{(1)}(x_1) \cdot x_3^2 - L^{(1)}(d - x_1) \cdot x_4^2 \right] + \frac{F_{gX}}{m_l} \\ \dot{x}_3 &= \frac{a_3(u_{c3} - u) + b_3 - P1_3 x_3}{P2_3} \\ \dot{x}_4 &= \frac{a_4(u_{c4} + u) + b_4 - P1_4 x_4}{P2_4} \end{aligned} \quad (3.1)$$

gdzie:  $x_1$  - położenie osiowe masy,  $x_2$  - prędkość ruchu osiowego masy,  $x_3$  - prąd w górnej cewce rozważanej osi sterowania,  $x_4$  - prąd w dolnej cewce rozważanej osi sterowania,  $u$  - sterowanie górną cewką - współczynnik PWM,  $u_{c3}$  - stała wartość sterowania,  $u_{c4}$  - stała wartość sterowania,  $m_l$  - masa zawieszona w łożysku,  $d$  - luz łożyskowy,  $F_{gX} = F_{gY}$  - siła ciężkości działająca w osi sterowania,  $L(.)$  - indukcyjność cewki,  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $P1_i$ ,  $P2_i$  - parametry układu wykonawczego,  $i = \{3, 4\}$ .

Pierwsze dwa równania opisują dynamikę ruchu wirnika, uwzględniając nieliniowy charakter siły elektromagnetycznej wyrażonej za pomocą indukcyjności. Równanie trzecie czwarte opisują dynamikę elektronicznego toru wykonawczego (sterownika mocy wraz z cewkami). Dla opisanie obu osi łożyska. powyższy zestaw czterech równań należy zastosować dwukrotnie.

W celu przeprowadzenia syntezy i weryfikacji działania algorytmów sterowania zrealizowano model symulacyjny, odpowiadający jednej osi sterowania w łożysku magnetycznym. Symulację przeprowadzono za pomocą metody Rungego-Kutty czwartego rzędu w programie MATLAB/Simulink. W modelu uwzględniono ograniczenia na zmienne stanu i sterowania. Zamodelowano tor

wykonawcze odpowiadające trzeciemu i czwartemu równaniu modelu, a także siły elektromagnetyczne odpowiednio dla górnego i dolnego siłownika. Zrealizowany model jest ciągłym modelem nieliniowym.

### Analiza punktów równowagi systemu

Z realizacji technicznej systemu łożysk magnetycznych oraz przyjętej metody sterowania różnicowego wynikają następujące ograniczenia:

$$\begin{aligned} x_1 \in [0, d], \quad x_2 \in \mathfrak{R}, \quad x_3 \in [0, 5], \quad x_4 \in [0, 5] \\ (u_{c3} - u) \in [0, 1], \quad (u_{c4} + u) \in [0, 1] \end{aligned} \quad (3.1)$$

Przyrównując prawe strony równań, z uwzględnieniem ograniczeń (3.1), otrzymano punkty równowagi systemu:

$$\begin{aligned} x_{10} \in [0, d], \quad x_{20} = 0 \\ x_{40} \in [0, 5] \\ x_{30} = \sqrt{\frac{L^{(1)}(d - x_1)x_{40}^2 - 2F_{gx}}{L^{(1)}(x_1)}} \\ u_0 = 0 \\ u_{c3} = \frac{P1_3 x_{30} - b_3}{a_3} \\ u_{c4} = \frac{P1_4 x_{40} - b_4}{a_4} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Można zauważyć, że w punkcie równowagi prędkość ruchu osiowego wirnika wynosi zero. Dla  $x_{40} = 0$  działa tylko górny siłownik, który równoważy działanie siły grawitacji. Ustalenie odpowiedniej wartości  $x_{40}$  ma znaczący wpływ na sztywność łożyska.

Ze względu na istnienie czterech osi sterowania równania są stosowane czterokrotnie, dając ostatecznie szesnaście zmiennych stanu dla całego systemu łożysk magnetycznych.

### 3.2. Model lokalny - liniowy

Stosując standardową metodę linearyzacji, otrzymano równania modelu liniowego w postaci:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{x} &= J \Delta x + B \Delta u \\ y &= C \Delta x\end{aligned}\quad (3.3)$$

gdzie:  $\Delta x = x - \bar{x}$  - różnica stanu rzeczywistego i stanu równowagi,  
 $\Delta u = u - \bar{u}$  - różnica sterowania rzeczywistego i sterowania w punkcie równowagi,

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ J_{2,1} & 0 & J_{2,3} & J_{2,4} \\ 0 & 0 & J_{3,3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{4,4} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix},$$

$$J_{2,1} = \frac{1}{2m_t} \left[ L^{(2)}(\bar{x}_1) \bar{x}_3^2 + L^{(2)}(d - \bar{x}_1) \bar{x}_4^2 \right],$$

$$J_{2,3} = \frac{\bar{x}_3}{m_t} L^{(1)}(\bar{x}_1), \quad J_{2,4} = -\frac{\bar{x}_4}{m_t} L^{(1)}(d - \bar{x}_1), \quad J_{3,3} = -\frac{P1_3}{P2_3}, \quad J_{4,4} = -\frac{P1_4}{P2_4},$$

$$B_3 = -\frac{a_3}{P2_3}, \quad B_4 = \frac{a_4}{P2_4},$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 1].$$

Rząd systemu liniowego (3.3) wynosi  $n=4$ , a dla rozważanego zestawu łożysk magnetycznych  $n=16$ . Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że system ten jest sterowalny i obserwowalny, a wartości własne zależą od położenia wirnika i prądu płynącego w cewkach siłowników; jedna wartość własna jest dodatnia, co jest cechą charakterystyczną układów magnetycznej lewitacji.

#### 4. Regulator LQ dla lokalnego modelu liniowego

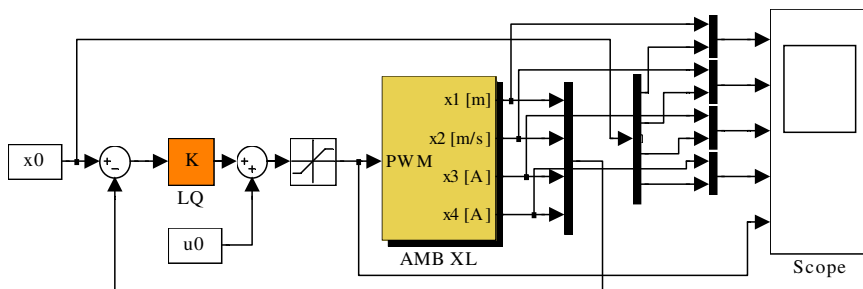
Do realizacji regulatora liniowo-kwadratowego stabilizującego wirnik w stanie roboczym (wirowanie) wykorzystano model zlinearyzowany (3.3). Macierze wagowe występujące w kwadratowym wskaźniku jakości są określone następująco:  $Q$  ma wymiar  $4 \times 4$ , a  $R$  jest skalarem. Syntezę regulatora przedstawiono dla jednej z osi sterowania. Dla ustalonego punktu pracy  $x_0 = \text{col}(4, 0 \cdot 10^{-4}; 0; 1,5047; 0,8)$ ,  $u_0 = 0$ ,  $u_{c3} = 0,3533$ ,  $u_{c4} = 0,2656$  otrzymano optymalne współczynniki regulatora:

$$K = \left[ 9,8499 \cdot 10^2 \quad 4,0054 \quad -7,5880 \cdot 10^{-2} \quad 6,163 \cdot 10^{-2} \right],$$



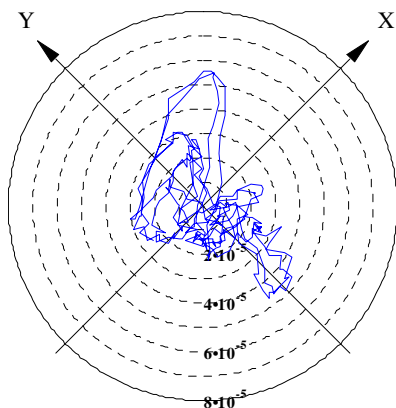
dla  $Q = \text{diag}(1 \cdot 10^4; 1 \cdot 10^{-4}; 1 \cdot 10^{-4}; 1 \cdot 10^{-4})$ ,  $R = 1$ .

Regulator LQ uzupełniono o człon całkujący, celem wyeliminowania błędu ustalonego. Zrealizowany model symulacyjny z wykorzystaniem regulatora LQ przedstawiono na rysunku (4.1). Model ten posłużył do syntezy regulatora i zbadania jego działania. Został on użyty czterokrotnie dla każdej osi sterowania obu łożysk magnetycznych.

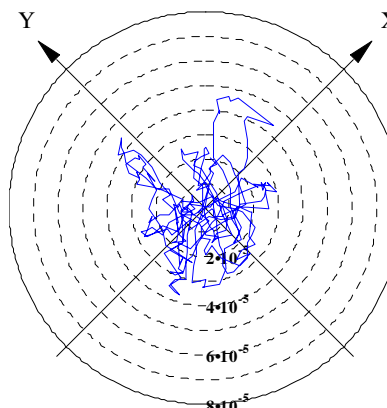


Rys. 4.1. Lokalny model jednej osi łożyska magnetycznego sterowanej regulatorem LQ

Działanie systemu zbadano podczas pracy roboczej z zastosowaniem regulatorów lokalnych. Na rysunkach 4.2 i 4.3 przedstawiono położenia wirnika podczas wirowania z prędkością 9,1667 obr/s (550 obr/min).



Rys. 4.2. Stabilizacja położenia wirnika w lewym łożysku ( $\Omega = 550$  obr/min)



Rys. 4.3. Stabilizacja położenia wirnika w prawym łożysku ( $\Omega = 550$  obr/min)

Analizę jakości stabilizacji w sensie kryterium  $J_4$  (maksymalnej odległości od centralnego położenia wirnika) przedstawiono w tabeli 4.1.

**Tab. 4.1.** Wartości wskaźnika jakości uzyskane z eksperymentu.

Łożysko	$J_4$
Lewe	$5,5242 \cdot 10^{-5}$
Prawe	$4,4425 \cdot 10^{-5}$

Wyniki eksperymentów pozwalają stwierdzić, że pomimo uproszczeń modelowania, możliwe jest zastosowanie lokalnych regulatorów liniowych do sterowania systemem łożysk magnetycznych. Wiedza ta pozwala, by w praktyce można było opracować autonomiczne łożysko magnetyczne. Przy zachowaniu takich samych gabarytów, łożyska magnetyczne można stosować powszechnie w różnych dotychczasowych urządzeniach, zwłaszcza tych, w których mamy do czynienia z częstą awarią systemów łożyskowania.

#### 4.1. Regulator nieliniowy dla lokalnego modelu nieliniowego

Na podstawie doświadczeń zdobytych podczas realizacji zadań sterowania dla pojedynczego siłownika AZM stwierdzono, że jest możliwe opracowanie regulatora nieliniowego zapewniającego stabilizację w szerokim otoczeniu punktu stabilizacji. Metodą umożliwiającą otrzymanie tych pożądaných efektów jest linearyzujące sprzężenie zwrotne. Zdecydowano się na opracowanie optymalnego regulatora liniowo-kwadratowego od stanu z wewnętrznym linearyzującym sprzężeniem zwrotnym (LSZ+LQ) dla lokalnego modelu nieliniowego.

Lokalny model łożyska magnetycznego sterowanego różnicowo w jednej osi zapisano w ogólnej postaci:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x) u \\ y &= h(x) \end{aligned} \tag{4.1}$$

gdzie:

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{1}{2m_t} L^{(1)}(x_1)x_3^2 - \frac{1}{2m_t} L^{(1)}(r-x_1)x_4^2 + \frac{1}{m_t} F_{gx} \\ \frac{a_3 u_{c3} + b_3 - P1_3 x_3}{P2_3} \\ \frac{a_4 u_{c4} + b_4 - P1_4 x_4}{P2_4} \end{bmatrix},$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{a_3}{P2_3} \\ \frac{a_4}{P2_4} \end{bmatrix}, h(x) = x_1.$$

Można zauważyć, że analizowany model jest układem SISO, a zatem możliwe jest zastosowanie teorii dotyczącej linearyzującego sprzężenia zwrotnego, opisaną w:

$$L_g h(x) = 0$$

$$L_g L_f h(x) = 0$$

$$L_g L_f^2 h(x) = -\frac{a_3 x_3 L^{(1)}(x_1)}{m_t P2_3} - \frac{a_4 x_4 L^{(1)}(d-x_1)}{m_t P2_4} \neq 0$$

Stopień względny wynosi 3 i jest mniejszy od rzędu układu, a zatem istnieje dodatkowa (wewnętrzna) dynamika. Prawo sterowania dekomponujące wejście-wyjście układ nieliniowy jest opisane zależnością:

$$u = \frac{1}{L_g L_f^2 h(x)} (v - L_f^3 h(x)) \quad (4.2)$$

gdzie:

$$L_g L_f^2 h(x) = -\frac{x_3 L^{(1)}(x_1)}{m_t} \frac{a_3}{P2_3} - \frac{x_4 L^{(1)}(d-x_1)}{m_t} \frac{a_4}{P2_4}$$

$$L_f^3 h(x) = \frac{x_2}{2m_t} \left[ L^{(2)}(x_1) x_3^2 + L^{(2)}(d-x_1) x_4^2 \right] + \\ + \frac{x_3 L^{(1)}(x_1) a_3 u_{c3} + b_3 - P1_3 x_3}{m_t P2_3} - \frac{x_4 L^{(1)}(d-x_1) a_4 u_{c4} + b_4 - P1_4 x_4}{m_t P2_4}$$

Wtedy układ nieliniowy wraz ze sprzężeniem zwrotnym ma postać:

$$y^{(3)} = v = \frac{1}{2m_t} \left[ L^{(2)}(x_1) x_2 x_3^2 + 2L^{(1)}(x_1) x_3 \frac{a_3(u_{c3} - u) + b_3 - P1_3 x_3}{P2_3} \right] + \\ + \frac{1}{2m_t} \left[ L^{(2)}(d-x_1) x_2 x_4^2 + 2L^{(1)}(d-x_1) x_4 \frac{a_4(u_{c4} + u) + b_4 - P1_4 x_4}{P2_4} \right]$$

Nowe współrzędne mają postaci:

$$z_1 = x_1, \\ z_2 = x_2, \\ z_3 = \frac{1}{2m_t} L^{(1)}(x_1) x_3^2 - \frac{1}{2m_t} L^{(1)}(d-x_1) x_4^2 + \frac{1}{m_t} F_{gx}.$$

Aby wyznaczyć czwartą współrzędną, przy założeniu, że  $L_g \phi_4(x) = 0$ , należy rozwiązać następujące równanie cząstkowe:

$$\frac{\partial \phi_4(x)}{\partial x_3} \left( -\frac{a_3}{P2_3} \right) + \frac{\partial \phi_4(x)}{\partial x_4} \left( \frac{a_4}{P2_4} \right) = 0.$$

Zaproponowana funkcja, która spełnia powyższe równanie jest określona następująco:

$$z_4 = \phi_4(x) = \frac{a_4}{P2_4} x_3 + \frac{a_3}{P2_3} x_4.$$

Konieczne jest sprawdzenie, czy macierz Jakobiego odwzorowania  $\Phi(x)$  jest nieosobliwa.

$$J(\Phi(x)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ J_{3,1} & 0 & J_{3,3} & J_{3,4} \\ 0 & 0 & J_{4,3} & J_{4,4} \end{bmatrix},$$

gdzie:

$$J_{3,1} = \frac{1}{2m_t} L^{(2)}(x_1) x_3^2 + \frac{1}{2m_t} L^{(2)}(d-x_1) x_4^2,$$

$$J_{3,3} = \frac{1}{m_l} L^{(1)}(x_1) x_3, \quad J_{3,4} = \frac{1}{m_l} L^{(1)}(d - x_1) x_4, \quad J_{4,3} = \frac{a_4}{P2_4}, \quad J_{4,4} = \frac{a_3}{P2_3}.$$

Można zauważyć, że powyższy warunek nie jest spełniony jedynie w przypadku  $J_{4,4} J_{3,3} = J_{4,3} J_{3,4}$ , czyli gdy oba siłowniki są elektrycznie identyczne, wirnik znajduje się w centralnym położeniu i w cewkach płyną prądy o identycznym natężeniu. W ten sposób określona funkcja  $\phi_4(x)$  zapewnia, że Jakobianem odwzorowania  $\Phi(x)$  jest czwartego rzędu. Istnieje zatem odwzorowanie, umożliwiające transformację systemu nieliniowego do postaci liniowej. Dynamika układu liniowego jest opisana równaniem:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= z_3 \\ \dot{z}_3 &= v \end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\dot{z}_4 = \frac{a_4}{P2_4} \frac{a_3 u_{c3} + b_3 - P1_3 x_3}{P2_3} + \frac{a_3}{P2_3} \frac{a_4 u_{c4} + b_4 - P1_4 x_4}{P2_4}$$

Współrzędne  $x_3$  i  $x_4$  w równaniach (4.3) są rozwiązaniami układu równań opisujących  $z_3$  i  $z_4$ . Rozwiązanie wspomnianego układu równań daje dwie zależności dla każdej zmiennej. Oznaczając:

$$\alpha = \frac{1}{2m_l} L^{(1)}(x_1), \quad \beta = -\frac{1}{2m_l} L^{(1)}(d - x_1), \quad \chi = \frac{F_{gx}}{m_l}, \quad \delta = \frac{a_3}{P2_3}, \quad \kappa = \frac{a_4}{P2_4},$$

$$\rho = \alpha\kappa^2 + \beta\delta^2,$$

otrzymamy równania opisujące współrzędne  $x_3$  i  $x_4$  w funkcji zmiennych  $z_3$  i  $z_4$  w postaci:

$$x_{3_1} = -\frac{\kappa\delta \left( -\delta^2 \sqrt{\rho\chi - \rho z_3 + \alpha\beta z_4^2} + \beta\delta^2 z_4 \right)}{\rho} \text{ lub}$$

$$x_{3_2} = \frac{\kappa\delta \left( -\delta^2 \sqrt{\rho\chi - \rho z_3 + \alpha\beta z_4^2} + \beta\delta^2 z_4 \right)}{\rho},$$

$$x_{4_1} = \frac{\alpha\kappa z_4 + -\delta^2 \sqrt{\rho\chi - \rho z_3 + \alpha\beta z_4^2} + \beta\delta^2 z_4}{\rho} \text{ lub}$$

$$x_{3_2} = \frac{\alpha\kappa z_4 + \delta^2 \sqrt{\rho\chi - \rho z_3 + \alpha\beta z_4^2} + \beta\delta^2 z_4}{\rho}.$$

Z przeprowadzonej analizy wynika, że tylko  $x_{31}$  i  $x_{41}$  spełniają ograniczenia (3.1). Podstawiając otrzymane rozwiązania do (4.3) otrzymano pełne równania dynamiki w funkcji zmiennej  $z$ .

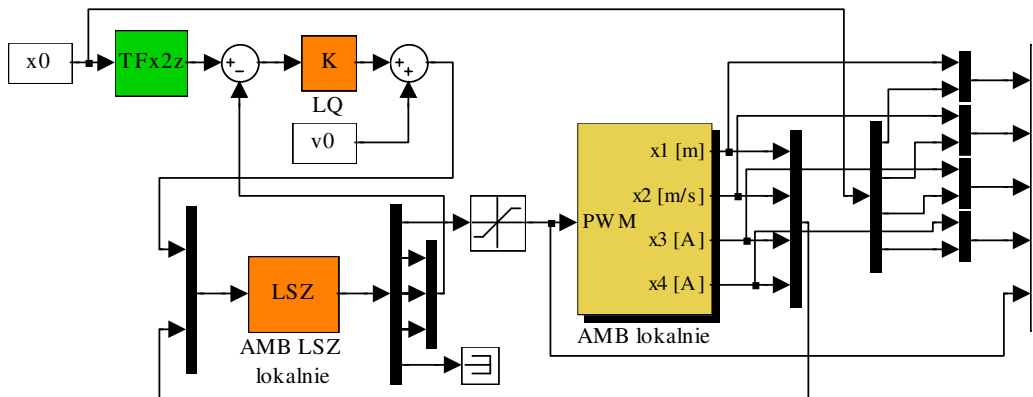
Należy jednak zauważyć, że dla analizowanego przypadku - jednej osi siłownika różnicowego AZM - istnieje możliwość pominięcia dynamiki opisanej czwartym równaniem układu (4.3), ponieważ nie zawiera ono sterowania oraz nie wpływa na pozostałe zmienne układu liniowego. Znając ograniczenia systemu nieliniowego, obliczono ograniczenia systemu zlinearyzowanego i zestawiono je w tabeli 4.2. Wyznaczenie ograniczeń na sterowanie  $v$  było możliwe w wyniku przeprowadzenia symulacji. Ograniczenia na stan  $z_1$  i  $z_2$  odpowiadają ograniczeniom na stan  $x_1$  i  $x_2$ .

**Tab. 4.2.** Ograniczenia dla jednej osi łożyska magnetycznego

Ograniczenie	Wartość
$z_{3\min}$	$-3.606 \cdot 10^{-13}$
$z_{3\max}$	$3.215 \cdot 10^{-13}$
$v_{\min}$	0.000
$v_{\max}$	$1.769 \cdot 10^6$

Parametry regulatora były wyznaczone dla systemu liniowego (4.3) z pominięciem czwartego równania. Wykorzystano w tym celu funkcję *lqr* z przybornika *Control* pakietu MATLAB. Macierze  $Q$  i  $R$  (występujące w liniowo-kwadratowym wskaźniku jakości) zostały dobrane tak, aby sterowanie w układzie rzeczywistym nie przekroczyło ograniczeń. Dla jednej osi sterowania przy  $Q = \text{diag}(1, 2 \cdot 10^{15}; 1 \cdot 10^6; 1 \cdot 10^6)$ ,  $R = 1$  uzyskano w ten sposób współczynniki regulatora  $K = [8, 7702 \cdot 10^{-2} \quad 5, 3518 \quad -1, 2449 \cdot 10^{-1} \quad 1, 8629 \cdot 10^{-2}]$ .

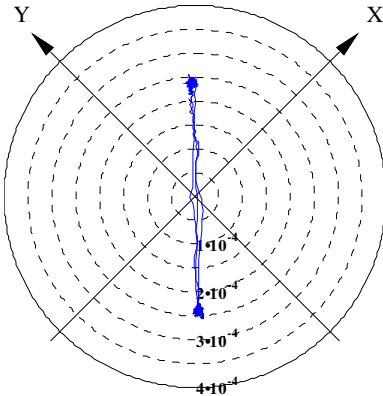
Regulator LQ uzupełniono o człon całkujący, celem wyeliminowania błędu ustalonego. Dla tak opracowanego algorytmu sterowania przeprowadzono badania symulacyjne oraz eksperymenty na obiekcie rzeczywistym.



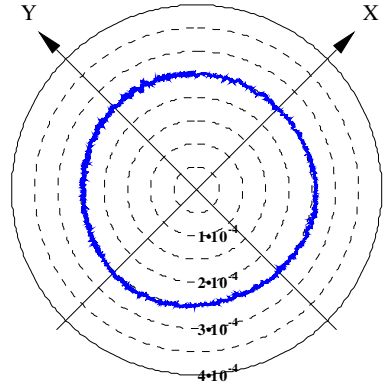
Rys. 4.4. Lokalny model jednej osi łożyska magnetycznego sterowanej z wykorzystaniem linearyzującego sprzężenia zwrotnego i regulatora LQ

Regulator ten można z powodzeniem zastosować np. w obrabiarkach z wrzecionami łożyskowanymi magnetycznie. Działanie takiego urządzenia polega na śledzeniu trajektorii wrzeciona w jednym z łożysk. Ze względu na otrzymane cechy takiego układu regulacji możliwe jest uzyskanie znacznego obszaru stabilizacji. A zatem, konstrukcyjne wydłużanie wirnika może zostać zastąpione poprzez odpowiedni algorytm sterowania, umożliwiającą uzyskanie tego samego efektu.

Na rysunku 4.5 przedstawiono stabilizację położenia wirnika w prawym łożysku magnetycznym przy skokowej zmianie wartości zadanej o  $\pm 2,5 \cdot 10^{-4}$  m względem środka łożyska. Rysunek 4.6 przedstawia śledzenie okręgu o promieniu  $2,5 \cdot 10^{-4}$  m, końcówką wirnika zawieszoną w prawym łożysku magnetycznym. Zadaniem algorytmu sterowania lewym łożyskiem w obu przypadkach było zapewnienie stabilizacji wirnika w centralnym położeniu.

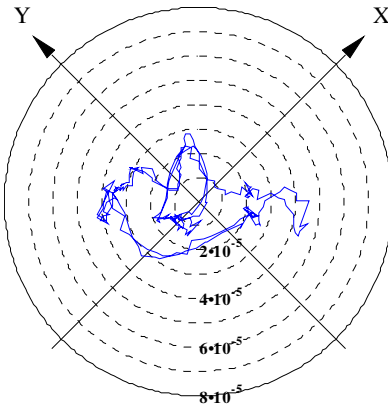


Rys. 4.5. Łożysko prawe – stabilizacja położenia wirnika w pionie o  $\pm 2,5 \cdot 10^{-4}$  m

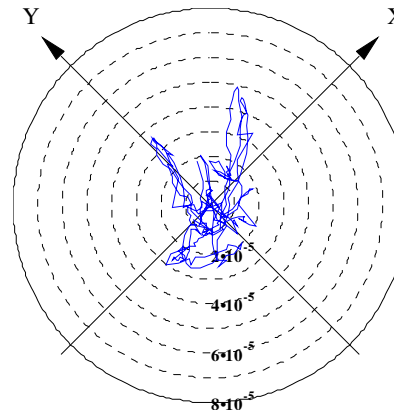


Rys. 4.6. Łożysko prawe – zmiana położenia wirnika – śledzenie okręgu o promieniu  $2,5 \cdot 10^{-4}$  m

Następnym eksperymentem było zbadanie jakości regulacji w stanie roboczym wirnika. Na rysunkach 4.7 i 4.8 przedstawiono położenie wirnika podczas wirowania z prędkością 9,1667 obr/s (550 obr/min).



Rys. 4.7. Położenie wirnika w lewym łożysku ( $\Omega = 550$  obr/min)



Rys. 4.8. Położenie wirnika w prawym łożysku ( $\Omega = 550$  obr/min)

W tabeli 4.3 przedstawiono wyniki analizy jakości stabilizacji w sensie kryterium  $J_4$ .



**Tab. 4.3.** Wartości wskaźnika jakości uzyskane na podstawie eksperymentu.

Łożysko	$J_4$
Lewe	$4,3335 \cdot 10^{-5}$
Prawe	$4,9482 \cdot 10^{-5}$

Podsumowując rezultaty przeprowadzonych eksperymentów, należy stwierdzić, że metoda linearyzującego sprzężenia zwrotnego umożliwia stabilizację położenia wirnika w szerokim zakresie. Możliwe jest również zastosowanie tej metody w przypadku obrotów wirnika. Uzyskanie modelu liniowego systemu pozwala zastosować wiele innych rodzajów regulatorów liniowych.

## 5. Podsumowanie

Zestawienie wartości wskaźnika jakości  $J_4$  oraz jego średnich wartości prezentuje tabela 5.1.

**Tab. 5.1.** Porównanie wskaźników jakości ( $\Omega = 550$  obr/min).

Regulator	Łożysko	$J_4$	$J_4$ średnie
Lokalny liniowy LQ	Lewe	$5,5242 \cdot 10^{-5}$	$4,9833 \cdot 10^{-5}$
	Prawe	$4,4425 \cdot 10^{-5}$	
Lokalny nieliniowy	Lewe	$4,3335 \cdot 10^{-5}$	$4,6409 \cdot 10^{-5}$
	Prawe	$4,9482 \cdot 10^{-5}$	

Podsumowując wyniki badań należy stwierdzić, że możliwe jest realizowanie sterowania lokalnego z wykorzystaniem regulatora LQ. Zastosowanie różnych metod linearyzacji prowadzi do realizacji odmiennych algorytmów sterowania. Linearyzacja systemu nieliniowego dla wybranego punktu pracy zawęża obszar działania regulatora poprzez uproszczenie silne nieliniowości związanej z siłą elektromagnetyczną.

Zastosowanie techniki linearyzującego sprzężenia zwrotnego pozwala uwzględnić dynamikę całego systemu i otrzymać system liniowy w obrębie całego łożyska magnetycznego. Zastosowanie wówczas regulatora typu LQ pozwala stabilizować położenie wirnika w dowolnym punkcie przestrzeni łożyskowej. Należy podkreślić, że opracowany algorytm wykorzystujący technikę linearyzującego sprzężenia zwrotnego wykazał swoje pozytywne cechy – możliwość stabilizacji położenia wirnika w szerokim zakresie i uzyskanie odporności na zakłócenia. Regulator ten może być z powodzeniem zastosowany np. w obrabiarkach wykorzystujących łożyska magnetyczne. Ze względu na otrzymane cechy takiego układu regulacji możliwe jest uzyskanie znacznego obszaru stabilizacji. A zatem, konstrukcyjne wydłużanie wirnika może być

zastąpione poprzez odpowiedni algorytm sterowania, umożliwiającą uzyskanie tego samego efektu.

Opracowane modele lokalne działają zadowalająco i mogą być powszechnie stosowane w systemach łożyskowych. Ich dodatkowym atutem jest mała złożoność obliczeniowa. Optymalne parametry pracy maszyny wirującej można jednak uzyskać, wykorzystując sterowanie globalne z uwzględnieniem prędkości obrotowej.

## LITERATURA

1. *Control System Toolbox User's Guide*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts 1999.
2. Górecki H., Fuksa S., Korytowski A., Mitkowski W.: *Sterowanie optymalne w systemach liniowych z kwadratowym wskaźnikiem jakości*. PWN, Warszawa 1983.
3. Isidori A.: *Nonlinear Control Systems*. 2<sup>nd</sup> Edition, Springer-Verlag 1989.
4. Piłat A.: *Feedback Linearization and LQ Control for Magnetic Levitation System*. 6<sup>th</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 28-31 August 2000, Międzyzdroje, Poland, str. 407 ÷ 412.
5. Piłat A., *Sterowanie systemami magnetycznej lewitacji*. Rozprawa doktorska AGH, 2002
6. *Proximity Transducer System 3300XL 8mm*. Bently, Nevada, July 2001.
7. *RT-DAC3 - User's Guide*. INTECO Ltd, Kraków 2000.

## COMPARISON OF LINEARIZATION METHODS AND LQ CONTROL STRATEGY APPLIED TO ACTIVE MAGNETIC BEARING

**Abstract:** The architecture of the laboratory test-rig hardware and software components is presented. Two radial active magnetic bearings are controlled by the algorithm running in the real-time software and communicating with the hardware via dedicated FPGA based I/O board with implemented custom logic. The local LQ type controllers applied to active magnetic bearings are compared. Both controllers are designed for every bearing axis separately using two linearization methods. The choice of the linearization method affects in totally different control law. The Lyapunov linearization strongly simplifies the nonlinear electromagnetic force characteristics. Thus the designed controller operates in a small region around the selected operating point. The feedback linearization method allows to obtain only one set of controller parameters valid for many operating points in the considered axis but is very sensitive on model mismatches. Both controllers were designed and applied in the experimental setup. Plots, quality criterion values are presented and discussed. Practical application features are pointed out.

**Keywords:**

Stanisław Piróg

## Elektromechaniczne magazyny energii

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono stosowane w technice sposoby magazynowania energii oraz opisano założenia do realizacji celowego projektu badawczego pt. „Elektromechaniczny wysokoobrotowy zasobnik energii” finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki. Ponadto przeprowadzono uproszczoną analizę właściwości bezwładnika oraz zaproponowano rodzaj maszyny elektrycznej, przekształtników energoelektronicznych i ich parametrów granicznych.

### 1 Zasobniki (magazyny) energii

W wielu obszarach działalności technicznej występuję problem magazynowania energii. Przykładowe zastosowania magazynów energii to:

1. Gromadzenie energii lub nadwyżek energii pozyskiwanej z autonomicznych źródeł energii elektrycznej, takich jak ogniwa fotowoltaiczne lub elektrownie wiatrowe małej mocy, dla jej przetwarzania w dogodnym czasie.
2. Kompensacja udarów mocy czynnej w liniach zasilających. W zastosowaniu takim energia jest pobierana z sieci elektroenergetycznej, przy zmniejszonym obciążeniu linii przesyłowej i oddawana odbiornikom zasilanym z tej linii w czasie krótkotrwałych szczytowych obciążeń.
3. Kompensacja spadków napięcia, w liniach zasilających, wywołanych krótkotrwałymi udarowymi obciążeniami mocą czynną
4. Optymalizacja energetyczna pojazdów (np. samochód hybrydowy).
5. Pojazdy zbiorowej komunikacji miejskiej poruszane energią uzupełnianą na przystankach (np. pojazdy inercyjne)
6. Zasilanie sztucznych satelitów pozostających w cieniu ziemi energią pozyskiwaną z baterii słonecznych w czasie ich ruchu nad oświetloną stroną planety.
7. Zasilanie „czystych” pojazdów poruszających się w zamkniętych pomieszczeniach (wózki inwalidzkie).

8. Całodobowe zasilanie sygnalizacji na drogach lądowych i wodnych oraz systemów telekomunikacyjnych energią pozyskiwaną z baterii słonecznych.

## **2. Sposoby gromadzenia energii**

### **2.1 Akumulatory chemiczne (np. akumulatory kwasowe lub zasadowe)**

Zastosowanie akumulatorów chemicznych jest ograniczone z powodu:

- a. niskiej sprawności ładowania i rozładowania,
- b. kłopotliwej obsługi (wydzielanie się gazów),
- c. krótkiej żywotności (skończona liczba cykli przeładowań),
- d. braku możliwości dokładnego określenia ilości energii znajdującej się w akumulatorze i zależności ilości energii możliwej do odzyskania od temperatury akumulatora,
- e. braku możliwości wyłączenia z eksploatacji (przez akumulator musi przepływać przynajmniej tzw. prąd konserwujący).

### **2.2 Elektromagnetyczne zasobniki energii**

W zasobnikach tych energia jest akumulowana w polu magnetycznym nadprzewodzącej cewki.

Zastosowanie elektromagnetycznych zasobników energii nie wychodzi poza fazę badań laboratoryjnych z powodu:

- a. bardzo niskiej sprawności wynikającej z zapotrzebowania na dużą energię niezbędną do utrzymania niskich temperatur (w ciekłym helu lub azocie),
- b. skomplikowanego sposobu ładowania i odzyskiwania energii,
- c. niebezpieczeństwa awarii niszczącej zasobnik przy przekroczenia temperatury krytycznej.

### **2.3 Zasobniki energii z superkondensatorami**

Superkondensator (supercapacitor) jest to specjalny kondensator o bardzo dużej jednostkowej pojemności (od kilku do kilkuset faradów), a co ważniejsze o dużym stosunku energii pola elektrycznego do objętości lub masy. Wykonywane kondensatory przewidywane są na bardzo niskie napięcie (2÷2,5V).

Korzystną cechą takich magazynów energii jest to, że gromadzi się w nich energię w postaci energii potencjalnej.

Wady:

- a. bardzo niskie napięcie robocze,
- b. trudności z realizacją bezpiecznej pracy szeregowej.

## **2.4 Elektromechaniczne zasobniki (magazyny) energii**

Akumulatory magazynują energię w postaci energii kinetycznej wirującej masy i przetwarzają energię elektryczną na energię mechaniczną i mechaniczną na elektryczną. Zasobniki te mogą być wykonane jako urządzenia wysokoobrotowe na łożyskach magnetycznych, próżniowe o bardzo dużym stosunku gromadzonej energii do masy i o wysokiej sprawności lub wolnoobrotowe wirujące w powietrzu na łożyskach tocnych - o mniejszej sprawności. Zasobniki wolnoobrotowe można budować na bazie tradycyjnych maszyn elektrycznych; np. dużej mocy pierścieniowa maszyna indukcyjna o 3 lub 6 parach biegunów z dwustronnym zasilaniem, wyposażona w duży bezwładnik (koło zamachowe). Zasobniki takie mają niską sprawność (straty aerodynamiczne i łożyskowe oraz straty energii w maszynie elektrycznej), ale można je budować do gromadzenia dużych ilości energii (MJ) i duże moce szczytowe (MW).

## **2.5 Elektrownie wodne szczytowo pompowe**

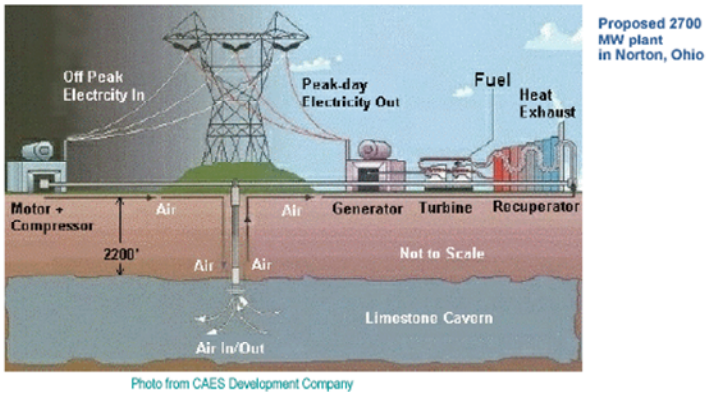
Elektrownie szczytowo pompowe budowane na rzekach (np.: Nidzica-Sromowce, Solina –Myczkowce i inne) lub jako konstrukcje przeznaczone tylko do gromadzenia energii (np. Porąbka-Żar) mają niską sprawność, zajmują duży obszar i są przyczyną zmian krajobrazu oraz środowiska ekologicznego.



**Rys. 1.** Górny zbiornik elektrowni Nidzica-Sromowce

## 2.6 Zasobniki ciśnieniowe (sprężone powietrze)

Zasobniki takie mogą być realizowane z myślą o gromadzeniu małych wartości energii w postaci stalowych zbiorników wysokociśnieniowych, o pojemności od kilku do kilkunastu metrów sześciennych, do których dla akumulacji energii włącza się przez turbinę powietrze. Energię odzyskuje się za pomocą tej samej turbiny, pracującej jako silnik pneumatyczny. Do gromadzenia większych energii mogą być wykorzystane jako zbiorniki szczelne wyrobiska górnicze (po wyflukanej soli lub siarce). Procesowi sprężania powietrza towarzyszą duże straty energii w postaci wydzielającego się ciepła. W trakcie odzyskiwania energii temperatura rozprężanego powietrza znacznie się obniża. Dla zapewnienia bezpiecznej pracy należy turbinę pogrzewać np. przez dodawanie gazu ziemnego i jego spalanie. Przykład takiej instalacji przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Przykład instalacji do gromadzenia energii w postaci sprężonego powietrza

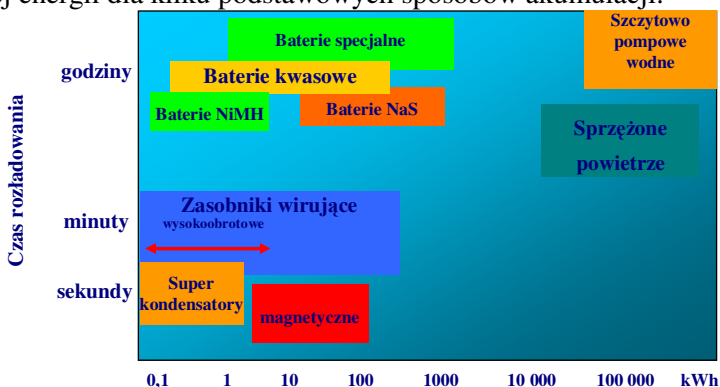
Sprawność takich systemów gromadzenia energii jest niska, ale ich zaletą, w porównaniu z elektrowniami szczytowo pompowymi wodnymi, jest mniejszy koszt inwestycyjny (jeżeli istnieje szczelne nieczynne wyrobisko górnicze).

## 2.7 Wytwarzanie wodoru i ogniwa paliwowe

Jednym z badanych dziś sposobów magazynowania energii, z myślą o transporcie (silniki spalinowe), jest wytwarzanie wodoru, jego przechowywanie i odzyskiwanie energii w ogniwach paliwowych. Wytwarzaniu wodoru metodą elektrolizy towarzyszy powstawanie dużej ilości ciepła. Czyni to tę metodę gromadzenia energii bardzo niskosprawną.

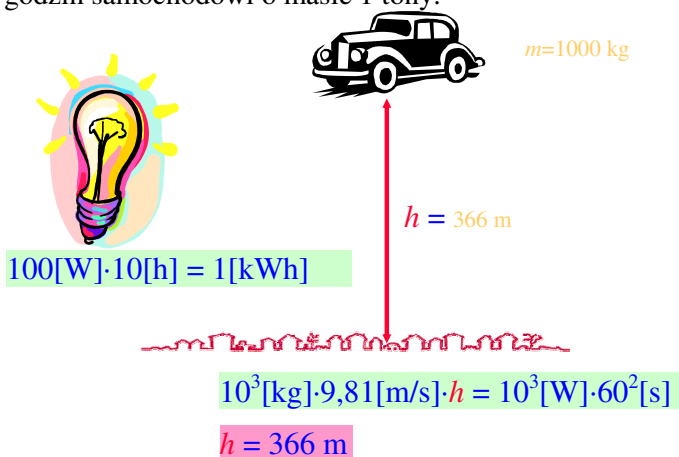
### 3 Porównanie magazynów energii

Na rysunku 3 przedstawiono zakres gromadzonej energii i możliwy czas odzyskania tej energii dla kilku podstawowych sposobów akumulacji.



Rys. 3. Porównanie podstawowych zasobników energii

Działanie magazynu gromadzącego energię w postaci energii kinetycznej (wirującej masy lub przepływającego w cewce nadprzewodzącej prądu) musi być bardzo dokładnie i odpowiedzialnie kontrolowane. Utrata kontroli nad poruszającym się obiektem kończy się poważną katastrofą. Energii 1 kWh (3,6 MJ) odpowiada energia potencjalna masy 1000 kg na wysokości 366 m. Na rysunku 4 przedstawiono obrazowo skutki nadania energii zużywanej przez 100 W żarówkę w czasie 10 godzin samochodowi o masie 1 tony.

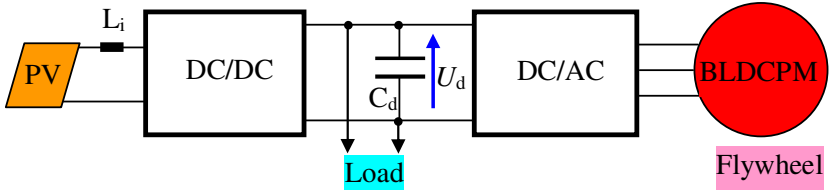


Rys. 4. 1 kWh energii odpowiada energii potencjalnej masy 1 tony na wysokości 366m

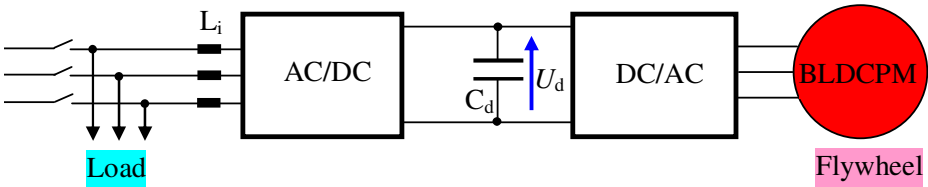
## 4. Elektromechaniczne zasobniki wirujące

### 4.1 Przykłady zastosowania zasobników wirujących

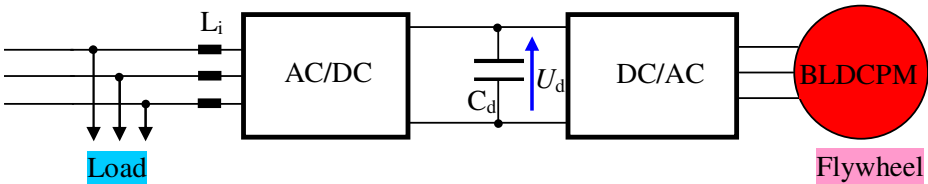
a. Obsługa alternatywnych źródeł energii elektrycznej (PV – ogniwo słoneczne)



b. Bezprzerwowe zasilanie wybranych odbiorników prądu przemiennego



c. Kompensacja wahań obciążeń czynnych i stabilizacja napięcia



**Rys. 5.** Przykłady zastosowania zasobników wirujących; AC/DC, DC/AC – przetworniki energoelektryczne, BLDCMP – maszyna elektryczna (bezszytkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi), Flywheel – masa wirująca (bezwładnik), Load – odbiorniki energii elektrycznej

W systemie autonomicznym z alternatywnym źródłem energii elektrycznej (rys. 5a) zasobnik umożliwia zasilanie odbiorników w czasie braku zasilania przez źródło energii. Zasobnik może być zastosowany w układach bezprzerwowego zasilania (UPS) wybranych odbiorników (rys. 5b). Po zaniku lub obniżeniu się wartości napięcia w linii zasilającej następuje bezzwłoczne (za pomocą łączników tyrystorowych) odłączenie odbiornika i systemu gromadzenia energii od linii zasilającej i przejście zasobnika do pracy generatorowej, umożliwiając tym samym kontynuowanie zasilania wrażliwych (ważnych) odbiorników. Innym zastosowaniem zasobnika może być stabilizacja napięcia zasilania (lub ograniczenie szczytowych



wartości prądu linii zasilającej) odbiornika o szybkozmiennym obciążeniu charakteryzującym się krótkotrwałymi udarowymi zmianami obciążenia, które wielokrotnie przekraczającymi obciążenia średnie.

## 4.2 Wymagane energie i moce zasobników

Ze względu na potencjalne zastosowania maksymalne energie i moce szczytowe potrzebnych zasobników można oszacować następująco:

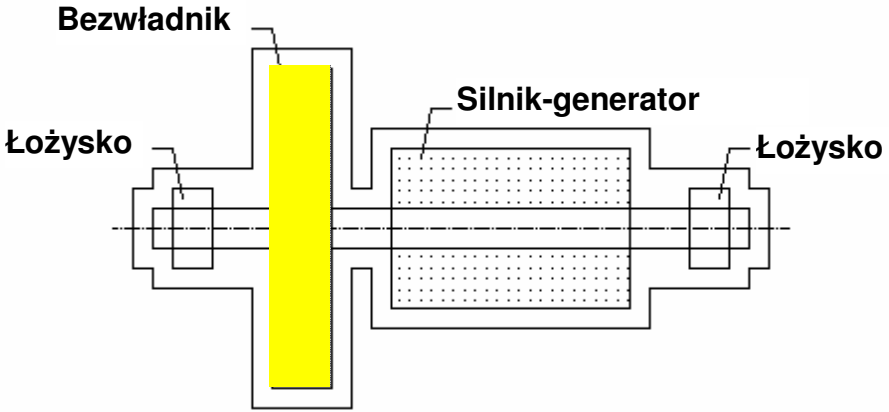
	Zastosowanie	Maksymalna energia $W_{\max}$ [MJ]	Moc szczytowa $P_{\max}$ [kW]
1.	Autonomiczna elektrownia alternatywna do obsługi jednego gospodarstwa domowego	7÷9	3
2.	Układy do poprawy jakości energii elektrycznej (kompensacja szczytowych obciążeń czynnych)	5÷20	100÷1000
3.	Autobus hybrydowy (spalinowo-elektryczny)	7÷9	100÷120
4.	Pociąg podmiejski	70	1000
5.	Pociąg podmiejski	500	2000

## 4.3 Wysokoobrotowe zasobniki elektromechaniczne

Zasobniki takie powinny mieć prędkość wirowania:  $20 \cdot 10^3 \div 60 \cdot 10^3$  obr/min, ich maszyna elektryczna zintegrowana z bezwładnikiem powinna być zawieszona na łożyskach magnetycznych i powinna wirować w przestrzeni pozbawionej powietrza. Maszyna ta powinna być obsługiwana przez wysokosprawne przekształtniki energoelektroniczne, a pośredniczący obwód prądu stałego powinien umożliwiać równoległe łączenie wielu takich zasobników. Urządzenie powinno mieć wytrzymałą obudowę na wypadek utraty kontroli nad wirującą masą. Na rysunku 6 przedstawiono przykładową konstrukcję elektromechanicznego zasobnika energii. Ze względu na obciążenie łożysk zasobnik taki powinien pracować w pozycji pionowej.

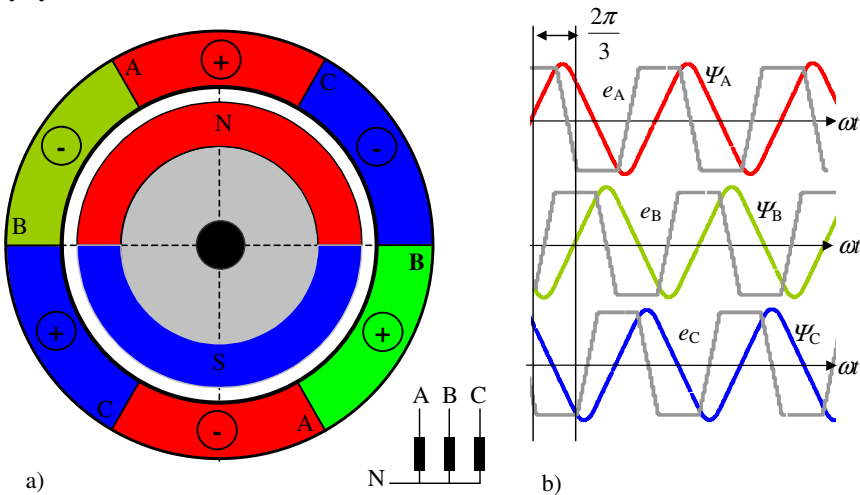
Ze względu na wysoką częstotliwość napięcia trójfazowej maszyny elektrycznej obsługującej wysokoobrotowe zasobniki wirujące proponuje się zastosowanie bezszczotkowej maszyny prądu stałego. Maszyna taka ma niesinusoidalne przebiegi napięć i przy ograniczonej częstotliwości impulsowania falownika łatwiej można ukształtować wymagane przebiegi prądów fazowych niż w maszynie

synchronicznej (o sinusoidalnych przebiegach napięć i prądów). Na rys. 7. przedstawiono przekrój poprzeczny przez taką maszynę (a) oraz przebiegi strumieni skojarzonych z poszczególnymi fazami i przebiegi napięć fazowych (b).

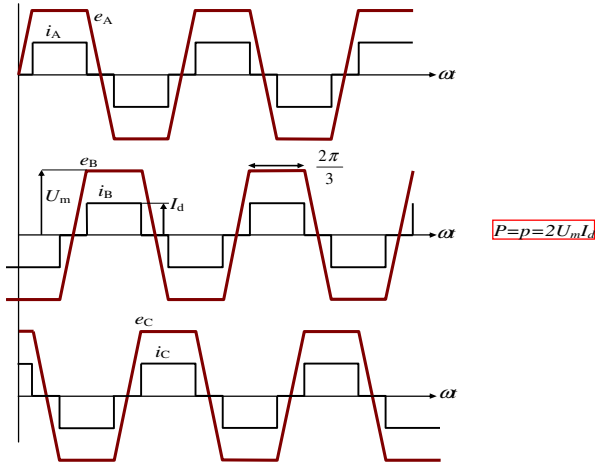


Rys. 6. Elektromechaniczny zasobnik energii

Na rys. 8. przedstawiono wyidealizowane przebiegi prądów i napięć takiej maszyny.



Rys. 7. a) przekrój poprzeczny przez maszynę bezszczotkową (z jedną parą biegunów), b) przebiegi strumieni skojarzonych i napięć fazowych

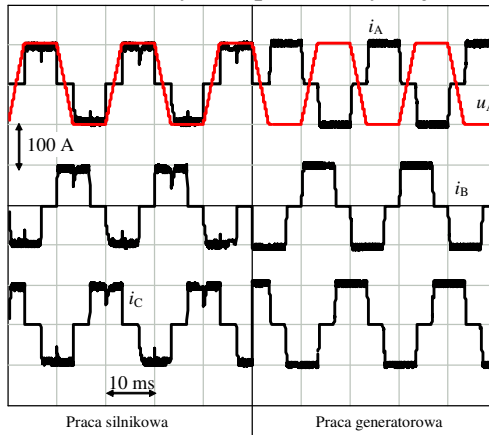


Rys. 8. Wyidealizowane przebiegi prądów fazowych bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi

Dla przebiegów przedstawionych na rys. 8 moc chwilowa jest równa mocy średniej i ma wartość:

$$p = P = 2U_m I_d \quad (1)$$

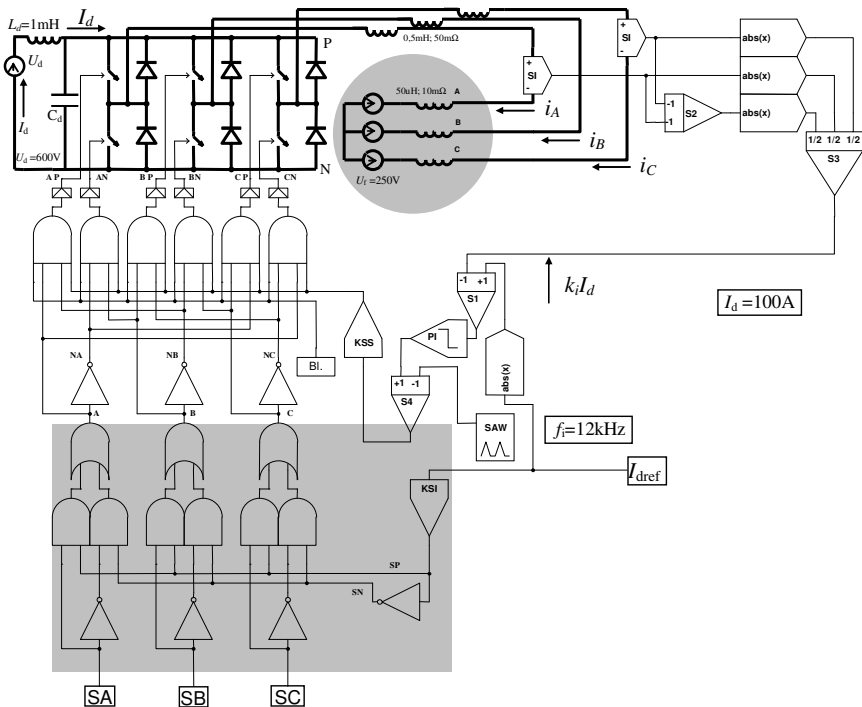
Brak składowej zmiennej w mocy chwilowej oznacza, że nie występuje przy takich przebiegach składowa zmienna w momencie elektrycznym maszyny. Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi uzyskane w wyniku symulacji komputerowej dla maszyny o napięciu wewnętrznym trapezoidalnym (jak na rys. 8).



Rys. 9. Przebiegi prądów fazowych maszyny bezszczotkowej i skokowe przejście z pracy silnikowej na pracę generatorową

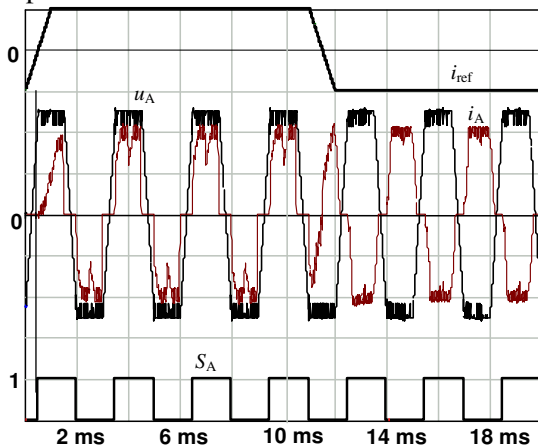
Z przebiegów przedstawionych na rysunku 9 wynika, że procesy komutacji zachodzące w rzeczywistym układzie powodują pewne odkształcenie przebiegów prądów fazowych, a zatem wywołują składowe zmienne w momencie elektrycznym.

Na rysunku 10 przedstawiono schemat układu sterowania i regulacji prądu maszyny bezszczotkowej. Regulacja prądu realizowana jest podobnie jak w klasycznej maszynie prądu stałego. Sygnałem sprzężenia zwrotnego jest ekwiwalentny prąd maszyny uzyskany w wyniku prostowania przebiegów prądów wszystkich faz maszyny. W każdej 1/6 okresu napięcia wyjściowego impulsowana jest inna para sterowanych elementów półprzewodnikowych falownika. Wybór przewodzących faz odbywa się na podstawie sygnałów logicznych uzyskiwanych z czujnika położenia wirnika. Czujnik położenia może być zastąpiony układem elektronicznym określającym położenie wirnika na podstawie chwilowych wartości napięć faz w punkcie określonym przez 1/6 okresu dla stanu nieprzewodzenia prądu.



Rys. 10. Struktura układu sterowania i regulacji prądu (momentu) bezszczotkowego silnika prądu stałego

Na rys. 11 przedstawiono przebiegi uzyskiwane w układzie z rys.10 w odpowiedzi na zadawanie prądu (momentu). Na rysunku tym zaznaczono sygnał z jednego z czujników położenia wirnika.



Rys. 11. Przebiegi w układzie z rys. 10

#### 4.4 Elektromechaniczne zasobniki niskoobrotowe

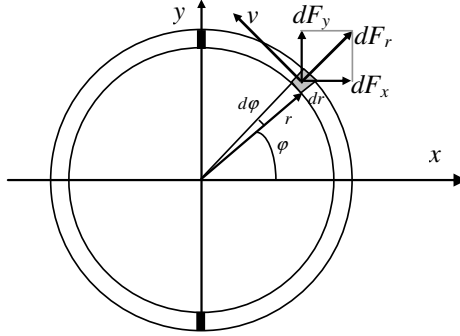
Prędkości obrotowe niskoobrotowych zasobników energii to  $500 \div 900$  obr/min. Do obsługi takich zasobników stosuje się asynchroniczne maszyny pierścieniowe dwustronnie zasilane. W układach takich gromadzi się energię o wartości do 200 MJ (55,5 kWh), a ich szczytowa moc dochodzi do 20 MW. Przykładem może być zasobnik o parametrach: masa bezwładnika  $m = 74\ 000$  kg, jego średnica  $D = 4$  m,  $n_{\max} = 700$  obr/min,  $P_{\max} = 20$  MW,  $W_{\max} = 200$  MJ = 55 kWh skonstruowany przez Okinawa Electric Power Company.

#### 4.5 Związek pomiędzy wymiarami bezwładnika i wartością gromadzonej energii

Na elementarny wycinek wirującego pierścienia (rys. 12) działa siła:

$$dF_r = dm \cdot \frac{v^2}{r} = \rho \cdot h \cdot d\varphi \cdot dr \cdot v, \quad (2)$$

gdzie:  $\rho$  - masa właściwa materiału pierścienia,  $h$  - wysokość walca zasobnika,  $r$  - promień,  $v$  - prędkość obwodowa,  $\varphi$  - kąt,  $F$  - siła,  $m$  - masa



Rys. 12. Siły działające na wycinek pierścienia wirującego

Wypadkowa siła działająca w kierunku osi  $x$ , będąca wynikiem sił elementarnych, ma wartość:

$$F_x = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} dF_r \cos \varphi \cdot d\varphi = 2\rho \cdot h \cdot dr \cdot v^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi \cdot d\varphi = 2\rho \cdot h \cdot dr \cdot v. \quad (1)$$

Naprężenie rozrywające w zaciemnionych przekrojach pierścienia (rys. 12):

$$\sigma_r = \frac{F_x}{2 \cdot h \cdot dr} = \frac{2\rho \cdot h \cdot dr \cdot v^2}{2 \cdot h \cdot dr} = \rho \cdot v^2. \quad (4)$$

Stąd maksymalna dopuszczalna wartość prędkości obwodowej dla materiału o gęstości  $\rho$  i dopuszczalnym naprężeniu na rozciąganie  $R_e = \sigma_{r \max}$ :

$$v_{\max}^2 = \frac{R_e}{\rho} \quad (5)$$

Tab. 1: Parametry typowych materiałów na bezwładnik

	Gęstość $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Wytrzymałość Re [GPa]	$v_{\max}$ [m/s]	W/m [MJ/kg]
stal	$7,8 \cdot 10^3$	1,8	480,4	0,23
tytan	$4,5 \cdot 10^3$	1,2	516	0,27
Kompozyt włókno szklane	$2,0 \cdot 10^3$	1,6	894,4	0,8
Kompozyt włókno węglowe	$1,5 \cdot 10^3$	2,4	1256	1,6

Maksymalna wartość gromadzonej energii kinetycznej w zasobniku wirującym:

$$W_{k \max} = \frac{1}{2} J \omega_{\max}^2 \quad (6)$$

gdzie:  $W$  – energia,  $J$  – moment bezwładności,  $\omega$  – prędkość kątowna

Moment bezwładności wydrążonego walca o promieniu zewnętrznym  $r_z$  wewnętrznym  $r_w$  ma wartość:

$$J = \frac{1}{2} \pi h \rho (r_z^4 - r_w^4) \quad (7)$$

Maksymalna prędkość obrotowa bezwładnika zależy od dopuszczalnej prędkości na jego powierzchni (3):

$$\omega_{\max}^2 = \frac{v_{\max}^2}{r_z^2} = \frac{R_e}{r_z^2 \rho} \quad (8)$$

Po podstawieniu (8) i (7) do (6) można obliczyć objętość bezwładnika:

$$V = \pi \cdot h \cdot (r_z^2 - r_w^2) = \frac{4W_{k \max}}{R_e} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{r_w}{r_z}\right)^2} \quad (9)$$

Objętość (masę) bezwładnika minimalizuje się wykonując go w postaci cienkościennego cylindra.

Z zależności (9) wynika, że stosunek maksymalnej gromadzonej energii do masy wyraża się wzorem:

$$\frac{W_{k \max}}{m} = \frac{W_{k \max}}{\rho V} = \frac{R_e}{\rho} \cdot \frac{1 + \left(\frac{r_w}{r_z}\right)^2}{4} \quad (10)$$

dla  $r_z \approx r_w$  zależność (10) upraszcza się do następującej postaci:

$$\frac{W_{k \max}}{m} \approx \frac{R_e}{2\rho} = \frac{v_{\max}^2}{2} \quad (11)$$

Z (11) wynika, że w celu uzyskania konstrukcji lekkiej (dużej wartości energii na jednostkę masy) należy poszukiwać materiału o możliwie niewielkiej masie właściwej  $\rho$  i o dużej wytrzymałości na rozciąganie  $R_e$ .

Bezwładnik o większej energii na jednostkę masy musi wirować z większą prędkością liniową na obwodzie (11), a zatem z większą prędkością kątowną (8) przy danej założonej, ze względów konstrukcyjnych, wartości promienia zewnętrznego  $r_z$ .

Prędkości obwodowe bezwładników są w tym wypadku wyższe od prędkości dźwięku w powietrzu (tabela 1), w związku z tym należy bezwładnik umieścić w hermetycznej komorze próżniowej. Komplikuje to konstrukcję zasobnika, a szczególnie łożysk (ze względu na próżnię utrzymywaną wewnątrz zasobnika należy stosować łożyska magnetyczne z układem stabilizacji położenia osi wirnika w przestrzeni). Zintegrowany z maszyną elektryczną bezwładnik powinien wirować bez kontaktu z nieruchomymi elementami (lewitacja magnetyczna). Łożyska magnetyczne powinny być wykonane z magnesów trwałych (wymagana duża sprawność), a układ elektromagnetyczny może tylko w niewielkim stopniu wspomagać łożyska i zapewniać stabilizację położenia osi. Ze względu na żadaną bardzo wysoką sprawność bezwładnik powinien być napędzany silnikiem z magnesami trwałymi, zabudowanymi wewnątrz zasobnika.

Próżnia wewnątrz zasobnika uniemożliwia swobodną wymianę ciepła pomiędzy elementami zasobnika, co stwarza poważne trudności z odprowadzeniem ciepła od uzwojeń maszyny elektrycznej pełniącej funkcję silnika i generatora. Zaletą próżni w zasobniku jest brak strat tarcia bezwładnika o powietrze (przy prędkościach obwodowych 700-1000m/s) oraz brak hałasu.

Maszyna elektryczna musi być obsługiwana przez układ energoelektroniczny, czyniący zamiennie z urządzenia układ napędowy lub generator i dostosowujący parametry energii elektrycznej przemiennie do wymagań rozprędzanej masy wirującej lub zasilanych z zasobnika odbiorników energii (lub sieci elektrycznej).

Energia zgromadzona w zasobniku jest proporcjonalna do drugiej potęgi prędkości wirowania. Oznacza to, że przy 1/3 maksymalnej prędkości w zasobniku pozostaje ok. 10 % maksymalnej energii. Zasobnik powinien być więc eksploatowany w zakresie od 1/3 do 3/3 prędkości maksymalnej. W proporcji 1:3 zmienia się napięcie na uzwojeniu maszyny elektrycznej i do takich zmian musi być przystosowany układ energoelektroniczny. Ze względu na minimalizację strat (w układzie energoelektronicznym strat przewodzenia na elementach półprzewodnikowych) należy dążyć do uzyskania w miarę dużego napięcia maksymalnego na maszynie (do 500V).

## 6. Planowany eksperyment

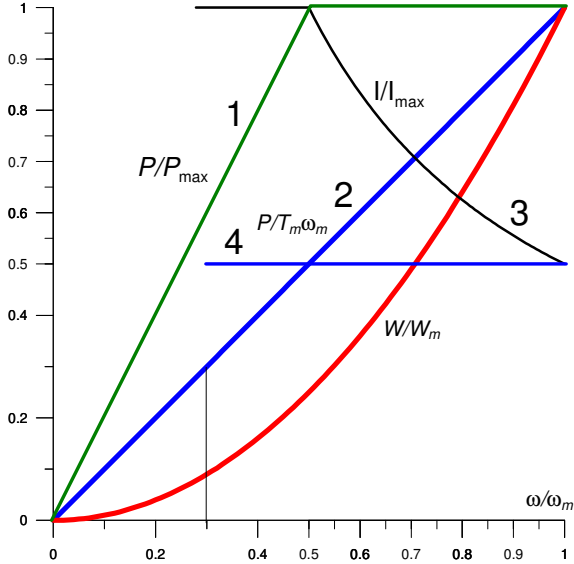
Przewiduje się opracowanie, wykonanie i przebadanie wysokoobrotowego zasobnika energii o następujących parametrach:

1. Maksymalna wartość gromadzonej energii:  $W_{max}=7\div9$  MJ (1,94÷2,5 kWh)
2. Chwilowa moc szczytowa  $P_{max}=100$  kW
3. Maksymalna prędkość obrotowa  $n_{max}=40\ 000$  obr/min ( $\omega_{max}=4200$  1/s)
4. Częstotliwość wirowania:  $f_{max}=666,7$  Hz



5. Częstotliwość napięcia maszyny ( $2p=4$ )  $f_{U_{\max}}=1333,3$  Hz

Przyjęto, że bezwładnik będzie sprzęgnięty z dwiema maszynami; każda o mocy maksymalnej 50 kW i szczytowej wartości napięcia fazowego  $U_m = 500$  V (przy prędkości znamionowej  $n_N = 30000$  obr/min).



Rys. 13. Charakterystyka zasobnika

Na rysunku 13 przedstawiono zależność względnej energii ( $W/W_m$ ) i mocy ( $P/P_m$ ) w funkcji względnej prędkości kątowej ( $\omega/\omega_m$ ). Linia (1) przedstawiono charakterystykę dla układu pracującego w zakresie  $(0,5 \div 1)\omega_{\max}$  z ograniczoną mocą. Konsekwencją ograniczenia mocy jest konieczność ograniczania maksymalnej wartości prądu wg zależności  $I_{d \max} = P_{\max} / U_m$ , jak to ilustruje krzywa 3. Linia 2 przedstawia zmianę mocy dla pracy z ograniczoną maksymalną wartością prądu na poziomie wyznaczonym przez prostą 4.

Maksymalna wartość prądu na charakterystyce 3 jest równa:

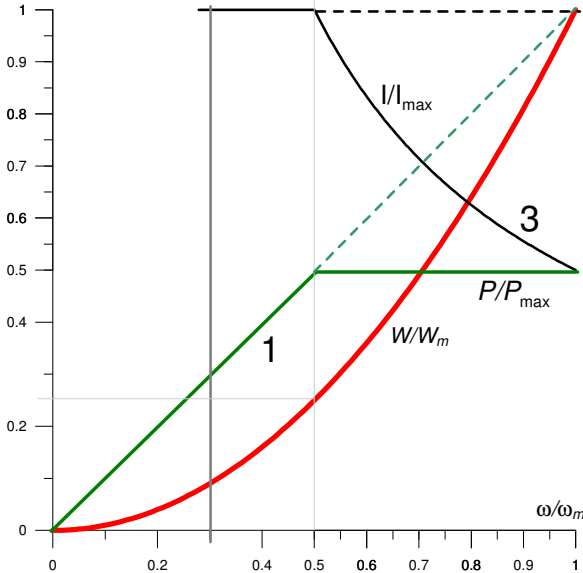
$$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{0,5U_m} = \frac{50 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 500} = 200 \text{ A} \quad (12)$$

Jeżeli przyjąć, że moc szczytowa zostanie osiągnięta tylko przy prędkości znamionowej, to maksymalna wartość prądu fazowego powinna się równać 100 A.

Skuteczna wartość prądu o wyidealizowanym przebiegu przedstawionym na rys. 8 jest równa:

$$I = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \approx 0,82 I_d \quad (13)$$

Innym sposobem sterowania jest praca ze stałą wartością mocy maksymalnej w zakresie prędkości kątowej  $(0,5 \div 1) \omega_{\max}$ . Na rys. 14 przedstawiono charakterystyki dla tak sterowanego układu.



**Rys. 14.** Charakterystyka zasobnika pracującego ze stałą wartością mocy maksymalnej w górnej połowie zakresu zmian prędkości

Tak sterowany zasobnik ma możliwość uzyskania szczytowej mocy 100 kW lub może pracować w szerokim zakresie oddawanej (i pobieranej) energii  $(0,25 \div 1,0) W_m$  ze stałą mocą, równą  $1/2$  wartości mocy szczytowej. W zakresie prędkości wirowania  $(0 \div 0,5) \omega_{\max}$  będzie realizowana praca z ograniczonym prądem (momentem), a w przedziale  $(0,5 \div 1) \omega_{\max}$  - z ograniczoną maksymalną wartością mocy. Na rysunku tym zaznaczono liniami przerywanymi sterowanie z ograniczoną maksymalną wartością prądu w całym zakresie prędkości (energii).

Przyjmując maksymalną szczytową wartość prądu fazowego maszyny 100A uzyskuje się szczytową moc  $2 \times 50 \text{ kW} = 100 \text{ kW}$ . Przy tej wartości prądu można uzyskać pracę z ograniczoną mocą do 50 kW w zakresie energii  $(0,25 \div 1,0) W_m$ .

Przekształtnik obsługujący każdą maszynę zasilany będzie napięciem stałym o wartości około 700 V z sieci 3x400 V poprzez wspólny przekształtnik sieciowy o maksymalnej mocy 100 kW.

Maksymalna skuteczna wartość prądu linii zasilającej przy sprawności przekształcania energii przez przekształtnik sieciowy i przekształtniki maszyn  $\eta = 0,9$ :

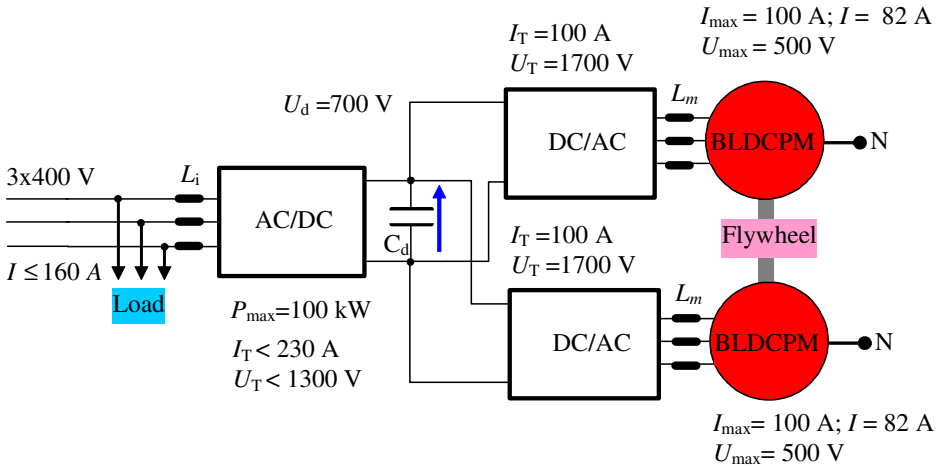
$$I_{s \max} = \frac{2P_{\max}}{\eta\sqrt{3}U_p} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 10^3}{0,9 \cdot \sqrt{3} \cdot 400} = 160 \text{ A} \quad (14)$$

Maksymalna wartość amplitudy prądu linii zasilającej, a tym samym prąd szczytowy elementów tego przekształtnika:

$$I_{\max} = \sqrt{2} \cdot I_{s \max} = \sqrt{2} \cdot 160 = 227 \approx 230 \text{ elementach} \quad (15)$$

Na elementach półprzewodnikowych przekształtnika sieciowego wystąpi napięcie o wartości:

$$U_{T_s \max} \geq \sqrt{2} \cdot U_p + U_d = \sqrt{2} \cdot 400 + 700 = 1266 \text{ V} \quad (16)$$



Rys. 15. Schemat planowanego eksperymentu

Na rysunku 15 przedstawiono schemat zasilania wirującego zasobnika energii zawierającego dwie identyczne maszyny bezszczotkowe prądu stałego. Sterowanie tych maszyn może być realizowane tak, że do pewnego poziomu mocy pojedynczej maszyny (np. 0,8) pracuje tylko jedna z nich, a po przekroczeniu tej wartości mocy obciążenie zostanie rozłożone równo na obie maszyny. Sterowanie takie zmniejszy straty mocy w przekształtnikach (zostaną wyeliminowane straty stałe jednego przekształtnika przy małych obciążeniach) oraz umożliwi chłodzenie maszyny nieobciążonej. Na rysunku tym nie zaznaczono aparatury stykowej i układu wstępnego ładowania kondensatora w pośredniczącym obwodzie napięcia stałego oraz układu do rozpraszania energii zgromadzonej w zasobniku, gdy nastąpi awaria łożysk magnetycznych.

Dla uproszczenia układów bezczujnikowego wyznaczania położenia wirnika powinien być dostępny wspólny punkt uzwojeń każdej maszyny (N1, N2).

Na elementach półprzewodnikowych przekształtnika maszyny wystąpi napięcie o wartości:

$$U_{TM \max} \geq 2U_m + U_d = 2 \cdot 500 + 700 = 1700 \text{ V} \quad (17)$$

Maksymalna skuteczna wartość fazowego prądu maszyny:

$$I = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 100 \sqrt{\frac{2}{3}} = 81,6 \text{ A} \quad (18)$$

**Tabela 2.** Graniczne parametry robocze elementów półprzewodnikowych

Przekształtnik:	Maksymalna wartość napięcia roboczego na elementach półprzewodnikowych (bez przepięć)	Maksymalna chwilowa wartość prądu elementów półprzewodnikowych
sieciowy	1300 V	230 A
maszyny	1700 V	100 A

Wartość bezpośrednio dostępnego napięcia stałego: 500V.

### Odpowiedzialni za realizację projektu:

1. W zakresie energoelektroniki, napędu elektrycznego i automatyki urządzenia:  
prof. dr hab. inż. **Stanisław Piróg** - Kierownik projektu  
Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych AGH Kraków,
2. W zakresie projektowania i konstrukcji łożysk magnetycznych:  
prof. dr hab. inż. **Zdzisław Gosiewski**  
Katedra Automatyki i Robotyki Politechniki Białostockiej,
3. W zakresie konstrukcji mechanicznej zasobnika i technologii materiałowych:  
dr inż. **Witold Perkowski**  
Instytut Lotnictwa Warszawa,
4. W zakresie projektowania i konstrukcji maszyny elektrycznej:  
prof. dr hab. inż. **Grzegorz Kamiński**  
Zakład Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej.

**Planowany czas realizacji projektu: 18. 08. 2005 ÷ 18. 08. 2008**

### LITERATURA

1. Aanstoos, T.A. Kajs, Brinkman J. P., Liu W.G., Ouroua H. P., Hayes A., Hearn R.J., Sarjeant C., Gill J., H.: *High voltage stator for a flywheel energy storage system*; Center for Electro-

- mech., Texas Univ., Austin, TX ; Magnetics, IEEE Transactions on 04/25/2000 -04/28/2000, Jan 2001 Location: San Francisco, CA, USA
2. Acarnley P.P., Mecrow B. C., Burdess J. C., Fawcett J. N., Kelly J. G., Dickinson P. G.: *Design Principles for a Flywheel Energy Store for Road Vehicles*, IEEE Transactions on Industry Application vol. 32, no 6, 1996,
  3. Akagi H., Sato H.: *Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system*, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 17 Issue: 1 , Jan 2002,
  4. Curtiss, D.H. Mongeau, P.P. Puterbaugh, R.L.: *Advanced composite flywheel structural design for a pulsed disk alternator* ; Kaman Electromagnetics Corp., Hudson, MA; Magnetics, IEEE Transactions on 04/20/1994 -04/24/1994, 20-24 Apr 1994 San Diego, CA, USA
  5. Davies T. A., Jefferson C. M.: *Wind-power flywheel integration* Dept. of Eng., Bristol Polytech: Energy Conversion Engineering Conference, 1989. IECEC-89. Proceedings of the 24th Intersociety 08/06/1989 -08/11/1989, 6-11 Aug 1989 Washington, DC, USA; page(s): 2071-2076 vol.4
  6. Davies, T.S. Larsen, N. A: *Regenerative drive for incorporating flywheel energy storage into wind generation systems*; Energy Conversion Engineering Conference, 1989. IECEC-89. Proceedings of the 24th Intersociety 08/06/1989 -08/11/1989, 6-11 Aug 1989 Washington, DC, USA; page(s): 2065-2069 vol.4 6-11 Aug 1989,
  7. Ginter, S. Gisler, G. Hanks, J. Havenhill, D. Robinson, W. Spina, L. SatCon Technol. Corp., Tucson, AZ; *Spacecraft energy storage systems*: IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine; page(s): 27-32 Volume: 13, May 1998,
  8. Gully, J.H. Pratap, S.B. Headifen, R.N. Marinos, C. Dick, W. Goodel, B.: *Investigation of an alternator charged pulse forming network with flywheel energy storage* Center for Electro-mech., Texas Univ., Austin, TX ; Magnetics, IEEE Transactions on 04/28/1992 -04/30/1992, 28-30 Apr 1992,
  9. Hall C. D.: *High Speed Flywheels for Integrated Energy Storage and Attitude Control*. Department of Aeronautics and Astronautics Air Force Institute of Technology/ENY Wright-Patterson Air Force Base, Ohio 45433, Sept. 24, 1997,
  10. Hebner R., Beno J., Walls A.: *Flywheel Batteries Come Around Again*, IEEE Spectrum April, 2002,
  11. Mason L.: *Flywheel Power System*, NASA Lewis Research Center, Flywheel Workshop, Oct. 7, 1998,
  12. Mulcahy, T.M. Hull, J.R. Uherka, K.L. Abboud, R.G. Juna, J.J.: *Test results of 2-kWh flywheel using passive PM and HTS bearings*, Argonne Nat. Lab., IL; Applied Superconductivity, IEEE Transactions on 09/17/2000 -09/22/2000, Mar 2001,
  13. Plater B. B., Andrews J. A. (Active Power, Inc. Austin Texas): *Advances in Flywheel Energy-Storage Systems*, Jarnell Com Power Pulse, 2001 (Darnell Group Inc.),
  14. Szabodos, B. Schaible, U.: *Peak power bi-directional transfer from high speed flywheel to electrical regulated bus voltage system: a practical proposal for vehicular technology*; Energy Conversion, IEEE Transactions on; page(s): 34-41 Volume: 13, Mar 1998,
  15. Tarrant, C. Urenco, Capenhurst; *Revolutionary flywheel energy storage system for quality power* This Power Engineering Journal; page(s): 159-163 Volume: 13, Jun 1999.

Sławomir Poskrobko<sup>1</sup>, Jan Łach<sup>2</sup>, Grzegorz Woroniak<sup>3</sup>

## CHARAKTERYSTYKA PALIWA Z ODPADÓW CELULOZOWO-PAPIERNICZYCH

**Słowa kluczowe:** Odpady celulozowo-papiernicze, paliwa formowane, skład elementarny, chlor, wartość opałowa, recykling energetyczny, stechiometria spalania, niska emisja.

**Streszczenie:** Niniejsza praca poświęcona jest rozeznaniu możliwości produkcji paliwa z odpadów celulozowo-papierniczych. Problem ten jest istotny z punktu widzenia zarówno lokalnej gospodarki odpadami jak i gospodarki energetycznej, albowiem konieczna jest znacząca redukcja ilości odpadów deponowanych na składowiskach. Przed przystąpieniem do badań eksperymentalnych wykonano obliczenia stechiometryczne przy zupełnym i całkowitym spalaniu odpadów celulozowo-papierniczych. Otrzymane wyniki odpowiadają takim kompozycjom paliwa, które umożliwiają uzyskanie pożądanej wartości opałowej i zarazem zapewniają niskoemisyjność spalania.

### 1. Wstęp

Przedmiotem niniejszej pracy jest rozeznanie najważniejszych cech paliwa stałego z biomasy odpadowej i innych odpadów polimerowych niestanowiących wartościowych surowców wtórnych. W danym przypadku skupia się uwagę na paliwie z odpadów celulozowo-papierniczych. Wiadomo, że o przydatności każdego paliwa rozstrzygają przede wszystkim takie jego cechy, jak ciepło spalania i wartość opałowa, które są funkcjami składu chemicznego danego paliwa. Znajomość składu elementarnego umożliwia ponadto określenie teoretycznego zapotrzebowania na tlen i powietrze do spalania oraz ilości i składu spalin mokrych i su-

---

<sup>1</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, ul. Wiejska 45C, 15-311 Białystok

<sup>2</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii i Ochrony Środowiska, ul. H. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa

<sup>3</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, ul. Wiejska 45E, 15-311 Białystok

chych. Obliczenia stechiometryczne przeprowadza się przy założeniu, że spalanie jest zupełne i całkowite.

Wytwarzanie paliwa z odpadów wpływa na zmniejszenie ilości i objętości odpadów deponowanych na składowiskach, ogranicza – dzięki odzyskowi energii – zużycie coraz droższych paliw kopalnych oraz – co ciekawe – może również doprowadzić do redukcji emisji zanieczyszczeń. Panuje przekonanie, że produkcja paliw alternatywnych jest perspektywicznym kierunkiem badawczym, albowiem tradycyjne źródła energii będą coraz trudniej dostępne w związku z racjonalizacją ich podaży na rynek.

Punktem wyjścia jest tu charakterystyka odpowiednio skalibrowanego paliwa, kreowana za pomocą częściowej analizy elementarnej, która określa udziały masowe: (1).pierwiastków palnych: węgla, siarki i wodoru, przy czym głównym składnikiem palnym paliw stałych jest węgiel; (2).tlenu i azotu; (3).balastu w postaci wilgoci i popiołu [1]. Obliczenia stechiometryczne obejmują: paliwo z odpadów z przerobu makulatury (paliwo A1), paliwo z tzw. masy łapanej, tzn. włókien i osadów z papieru (paliwo A2) oraz paliwo będące jednorodną mieszaniną paliw: A1 i A2, któremu przyporządkowuje się oznaczenie A1+A2. Przewiduje się, że istnieje możliwość energetycznego wykorzystania odpadów przemysłu celulozowo-papierniczego w lokalnej energetyce zawodowej i komunalnej, a odpowiednia kompozycja paliwa A1+A2 umożliwi uzyskanie określonego efektu ekologicznego. Produkcja paliwa z odpadów, czyli tzw. paliwa alternatywnego, wpisuje się bowiem w ogólną strategię racjonalnego gospodarowania i zarządzania odpadami, której myślą przewodnią musi być właśnie minimalizacja zagrożenia dla środowiska naturalnego, realizowana w ramach tzw. zrównoważonego rozwoju jako jego filar ekologiczny (środowiskowy).

Skala rozważanego problemu ma istotne znaczenie lokalne. Celulozownia INTERCEL w Ostrołęce wytwarza np. około 60 000ton rocznie odpadów (pomijając korę drzewną), które można przetworzyć na paliwo alternatywne. Zagospodarowanie takiej masy paliwa w lokalnym systemie energetycznym może przynieść duże korzyści, tym bardziej że aktualnie odpad ten deponuje się na wysypisku śmieci, jak to zresztą ma na ogół miejsce i w innych krajach europejskich. Należy tu jednak przywołać znany powszechnie fakt, że w ostatnich latach odnotowuje się znaczący wzrost zużycia papieru, co ma bezpośrednie przełożenie na ilość odpadów wytwarzanych przez przemysł celulozowo-papierniczy, a więc i na koszt ich deponowania na składowisku, który – w powszechnej ocenie – będzie sukcesywnie rósł z uwagi na nieuniknione zamykanie już istniejących oraz brak wolnych terenów i akceptacji społecznej dla budowy i eksploatacji nowych wysypisk odpadów, które muszą już spełniać normy unijne.

Przed rozpoczęciem eksperymentalnego badania procesów spalania kalibrowanych paliw z odpadów celulozowo-papierniczych w kotle wodnym z rusztem

schodkowym przeprowadza się analizę techniczną i elementarną składników stanowiących kompozycję paliwa oraz obliczenia stechiometryczne procesu spalania, przy czym w pierwszej kolejności zakłada się, że jest ono zupełne i całkowite. W efekcie końcowym zamierza się dokonać doboru optymalnego udziału poszczególnych składników paliwa A1+A2 oraz określenie emisji zanieczyszczeń gazowych odprowadzanych do atmosfery, w tym chlorowodoru. Tym samym zamierza się wykazać możliwość efektywnego spalania odpadów przemysłowych z przetwórstwa celulozy. Nadmienmy, że do produkcji paliw alternatywnych mogą być wykorzystane nie tylko odpady z przerobu makulatury czy też tzw. masa łapana, ale i odpady komunalne, odpady z tworzyw sztucznych, zużyte opony, opakowania (np.: palety, tektura, papier) i odpady opakowaniowe itp.

## **2. Wyniki obliczeń stechiometrycznych przy spalaniu wybranych kompozycji paliwa z przerobu makulatury i masy łapanej**

W pierwszej kolejności przytacza się – w tablicy 1 – wyniki częściowej analizy elementarnej takich substancji, jak: odpady z przerobu makulatury i tzw. masa łapana (tzn. włókna i osady z papieru). Zakłada się, że charakterystyki tych substancji odpowiadają odpadom dostarczonym przez ich producentów, a taki ich skład chemiczny potwierdzają analizy wykonywane bezpośrednio przed wykorzystaniem tych substancji w charakterze składników do produkcji kalibrowanego paliwa alternatywnego. Wstępnie postawimy tezę, że odpady te można uważać za paliwa, aczkolwiek efekt termiczny reakcji masy łapanej z tlenem nie jest zbyt duży, co może budzić pewne wątpliwości. W związku z tą umową wprowadza się określenia: paliwo A1 (odpady z przerobu makulatury), paliwo A2 (włókna i osady z papieru) i paliwo A1+A2 (jednorodna mieszanina paliw: A1 i A2). W tablicach od 2 do 7 zestawia się wyniki obliczeń stechiometrycznych przy spalaniu zupełnym i całkowitym trzech różnych kompozycji paliwa A1+A2, którym nadaje się oznaczenia: paliwo I, paliwo II i paliwo III. Różnią się one masowymi udziałami substancji: A1 i A2, które oznacza się  $g_1$  i  $g_2$  oraz dobiera w sposób, opisany w dalszej części niniejszego rozdziału. Prezentowane wyniki otrzymano na gruncie metodologii przedstawionej w [1, 3, 4, 5] i na podstawie zawartych tam danych odnośnie właściwości fizycznych składników spalin, przy czym preferowano wielkości wyznaczone na drodze doświadczalnej. Należy wyraźnie zaznaczyć, że właściwości wyprodukowanych paliw z odpadów podlegają ścisłej weryfikacji, porównując od ich składu chemicznego (tablica 2).



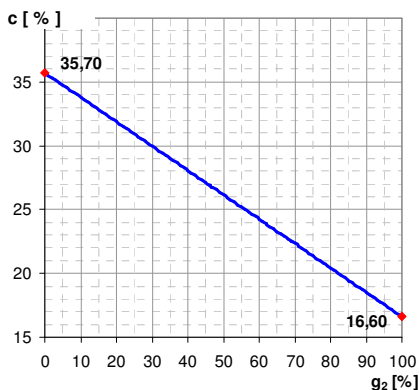
**Tab. 1.** Charakterystyka paliw: A1 i A2:  
masowe (gramowe) udziały pierwiastków palnych, azotu, tlenu i balastu [2]

Składnik	Oznaczenie	Jednostka	Wartość liczbową dla paliwa	
			A1	A2
Węgiel	<i>c</i>	[kg C/kg paliwa]	0,357	0,166
Wodór	<i>h</i>	[kg H <sub>2</sub> /kg paliwa]	0,041	0,015
Siarka	<i>s</i>	[kg S/kg paliwa]	0,0008	0,0005
Tlen	<i>o</i>	[kg O <sub>2</sub> /kg paliwa]	0,148	0,1015
Azot	<i>n</i>	[kg N <sub>2</sub> /kg paliwa]	0,0004	0
Chlor	<i>cl</i>	[kg Cl <sub>2</sub> /kg paliwa]	0,0188	0
Wilgoć	<i>w</i>	[kg H <sub>2</sub> O/kg paliwa]	0,416	0,501
Popiół	<i>w</i>	[kg s.min./kg paliwa]	0,018	0,216

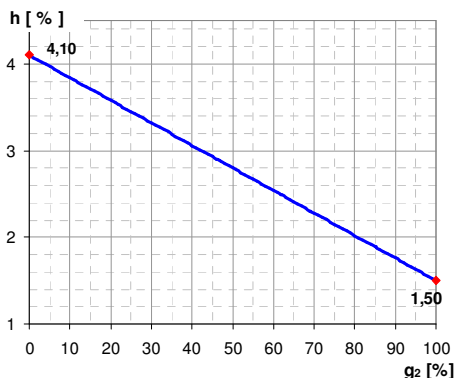
**Tab. 2.** Charakterystyka różnych kompozycji paliwa A1+A2:  
masowe (gramowe) udziały pierwiastków palnych, azotu, tlenu i balastu

Składnik	Oznaczenie	Jednostka	Wartość liczbową dla paliwa A1+A2		
			I	II	III
Węgiel	<i>c</i>	[kg C/kg paliwa]	0,26759	0,22536	0,19403
Wodór	<i>h</i>	[kg H <sub>2</sub> /kg paliwa]	0,02883	0,02308	0,01882
Siarka	<i>s</i>	[kg S/kg paliwa]	0,00066	0,00059	0,00054
Tlen	<i>o</i>	[kg O <sub>2</sub> /kg paliwa]	0,12623	0,11595	0,10832
Azot	<i>n</i>	[kg N <sub>2</sub> /kg paliwa]	0,00021	0,00012	0,00006

Chlor	$cl$	[kg $Cl_2$ / kg paliwa]	0,01000	0,00584	0,00276
Wilgoć	$w$	[kg $H_2O$ / kg paliwa]	0,45579	0,47458	0,48853
Popiół	$w$	[kg s.min. / kg paliwa]	0,11068	0,15447	0,18694



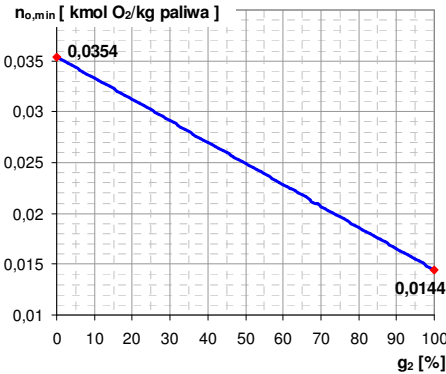
Rys. 1. Udział masowy węgla w funkcji udziału masowego substancji A2



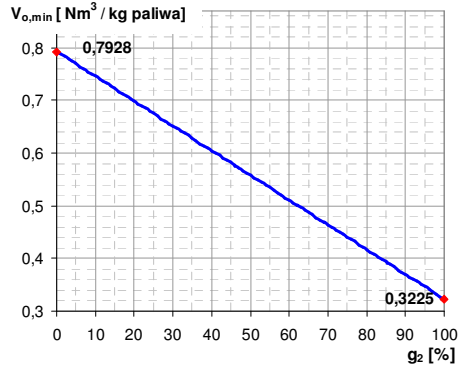
Rys. 2. Udział masowy wodoru w funkcji udziału masowego substancji A2

Najpierw przedstawia się (tablica 2) charakterystykę paliw: I, II i III, tzn.: udziały masowe: (1).pierwiastków palnych:  $c$ ,  $h$ ,  $s$ ; (2).azotu  $n$ , tlenu  $o$ ; (3).balastu, tzn. wilgoci  $w$  i popiołu  $a$ . Przypomnijmy, że np. zawartość popiołu jest niezmiernie istotną cechą paliwa, albowiem znacząco stanowi o jego wartości opałowej i skali trudności w eksploatacji komory paleniskowej. Gwoli ścisłości należy odnotować, że – na równi z zawartością – kluczową kwestią jest skład chemiczny popiołu, albowiem rozstrzyga on o temperaturze mięknięcia popiołu. Dodatkowo, na rys.1 i 2 uwidoczniono przebiegi funkcji:  $c = c(g_2)$  i  $h = h(g_2)$ . Natomiast ilość substancji poszczególnych pierwiastków w 1kg paliwa zawarto w tablicy 3. Znajomość składu chemicznego paliwa umożliwia określenie tak ważnych wielkości, jak: dolna wartość opałowa  $W_d$ , górna wartość opałowa (entalpia spalania)  $W_g$ , liczby znamienne paliwa ( $\sigma$  – liczba Molliera,  $\nu$ ), teoretyczne (minimalne)  $n_{o,min}$  i rzeczywiste  $n_o'$  zapotrzebowanie tlenu oraz teoretyczne (minimalne)  $n_{a,min}$  i rzeczywiste  $n_a'$  zapotrzebowanie powietrza do spalania (tablica 4). Ponadto: (a) na rys.3 i 4 przedstawiono zależność teoretycznego zapotrzebowania tlenu ( $n_{o,min}$ ,

$V_{o,\min}$ ) od masowego udziału substancji A2 w paliwie A1+A2; (b).rys.5 i 6 przedstawiają wykresy funkcji:  $n_{o,\min} = n_{o,\min}(g_2)$  i  $V_{o,\min} = V_{o,\min}(g_2)$ . Dodajmy, że rzeczywiste zapotrzebowanie tlenu  $n'_o$  i powietrza  $n'_a$  określono dla współczynnika nadmiaru powietrza (tlenu)  $\lambda = 1,5$  (paliwo A1+A2 ma być spalane w palenisku z rusztem mechanicznym). Przyjęto, że tlen doprowadza się do komory spalania z powietrzem atmosferycznym. W tabelicy 5 zamieszczono zaś wyniki obliczeń dotyczące: jednostkowej ilości  $n''_{ss}$  spalin suchych i jej objętości  $V''_{ss}$ , udziałów molarowych i objętościowych (w warunkach normalnych) składników spalin suchych oraz objętości ich jednostkowych ilości. Analogiczne wielkości dla spalin wilgotnych zestawiono w tabelicy 6. Natomiast na rys.7 i 8 pokazano teoretyczną – a więc przy  $\lambda = 1$  – objętość spalin wilgotnych  $V''_{s,\min}$  i suchych  $V''_{ss,\min}$  w warunkach normalnych, tzn. w  $Nm^3 / kg$  paliwa. Odnotujmy, że  $V''_{s,\min} \in [3,5354; 7,4103]$  a  $V''_{ss,\min} \in [2,7434; 6,8542]$ . Wielkości te nie zostały bowiem zamieszczone w tabelicach, w których wyspecyfikowano ilość i skład spalin suchych oraz wilgotnych. Ich ważniejsze właściwości termiczne zestawiono zaś w tabelicy 7.



**Rys. 3.** Teoretyczne zapotrzebowanie tlenu w funkcji udziału masowego substancji A2



**Rys. 4.** Teoretyczne zapotrzebowanie tlenu w funkcji udziału masowego substancji A2

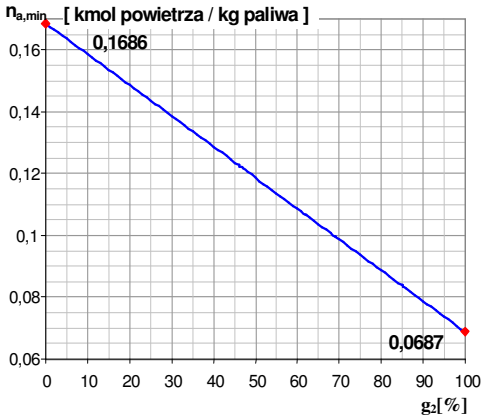
**Tab. 3.** Wyniki obliczeń stechiometrycznych spalania różnych kompozycji paliwa A1+A2: ilość kilomoli substancji poszczególnych składników w jednostce paliwa

Zawartość	Oznaczenie	Jednostka	Wartość liczbowa dla paliwa A1+A2		
			I	II	III

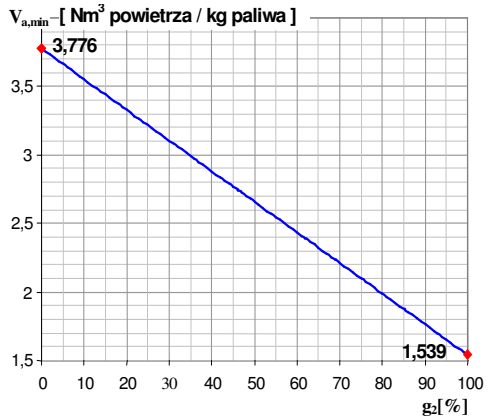
*Charakterystyka paliwa z odpadów celulozowo-papierniczych*

Węgla	$n'_C = c/12$	$\left[ \frac{\text{kmol } C}{\text{kg paliwa}} \right]$	0,022300	0,018780	0,016169
Wodoru	$n'_{H_2} = h/2$	$\left[ \frac{\text{kmol } H_2}{\text{kg paliwa}} \right]$	0,014415	0,011540	0,009408
Siarki	$n'_S = s/32$	$\left[ \frac{\text{kmol } S}{\text{kg paliwa}} \right]$	0,000021	0,000019	0,000017
Tlenu	$n'_{O_2} = o/32$	$\left[ \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kg paliwa}} \right]$	0,003945	0,003623	0,003385
Azotu	$n'_{N_2} = n/28$	$\left[ \frac{\text{kmol } N_2}{\text{kg paliwa}} \right]$	0,000008	0,000004	0,000002
Chloru	$n'_{Cl_2} = cl/71$	$\left[ \frac{\text{kmol } Cl_2}{\text{kg paliwa}} \right]$	0,000141	0,000082	0,000039
Wilgoci	$n'_{H_2O} = w/18$	$\left[ \frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kg paliwa}} \right]$	0,025322	0,026366	0,027140
Popiołu	$n'_a = a/12$	$\left[ \frac{\text{kmol s.min.}}{\text{kg paliwa}} \right]$	0,009223	0,012872	0,015579
Razem	$n'_{pal}$	$\left[ \frac{\text{kmol paliwa}}{\text{kg paliwa}} \right]$	0,075373	0,073287	0,071739

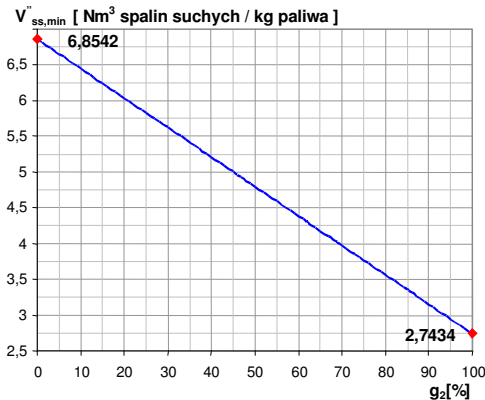
Substancje: A1 i A2, tworzące określoną kompozycję paliwa A1+A2, powinny być tak dobrane, aby zapewniały: (1).dużą wartość opałową paliwa, co stanowi o maksymalnym udziale masowym substancji A2 i zarazem o minimalnym udziale masowym substancji A1; (2).niskoemisyjność procesu spalania, którą wiąże się z udziałem masowym chloru w paliwie do nie więcej niż 1% ( $cl \leq 1$ ), co z kolei stanowi o minimalnym udziale masowym substancji A2 i zarazem o maksymalnym udziale masowym substancji A1. W procedurze tej należałoby także wziąć pod uwagę konieczność utrzymania na niskim poziomie emisji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) i substancji chlorowcoorganicznych (np. dioksyn i furanów). Jednocześnie chlor nie oddziaływałby wówczas korodująco w sposób znaczący na elementy stalowe kotła.



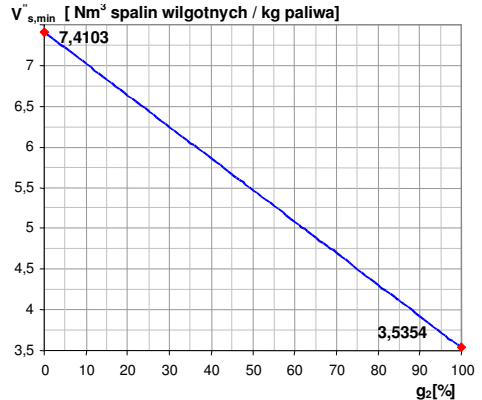
Rys. 5. Minimalne zapotrzebowanie powietrza w funkcji udziału masowego substancji A2



Rys. 6. Minimalne zapotrzebowanie powietrza w funkcji udziału masowego substancji A2



Rys. 7. Teoretyczna objętość spalin suchych w funkcji udziału masowego substancji A2



Rys. 8. Teoretyczna objętość spalin wilgotnych w funkcji udziału masowego substancji A2

Określmy najpierw orientacyjną wartość zakresu udziału masowego substancji A1, która zapewniałaby niskoemisyjność procesu spalania paliwa A1+A2. W tym celu – zgodnie z powyżej sformułowanym postulatem – żąda się, aby udział masowy chloru w paliwie był nie większy niż 1%, tzn.  $cl_{A1+A2} \leq 1$ . Jeśli wziąć pod uwagę (zob. tablica 1), że:  $cl_{A1} = 1,88\%$ , a  $cl_{A2} = 0$ , to stawiany postulat realizowany jest przez nierówność  $cl_{A1} \cdot g_1 \leq cl_{A1+A2}$ , która może być także zapisana jako  $cl_{A1} \cdot (1 - g_2) \leq cl_{A1+A2}$ , albowiem  $g_1 + g_2 = 100\%$ . W efekcie dochodzi się do wniosku, że niskoemisyjność procesu spalania paliwa A1+A2 może być zapewniona

wówczas, gdy minimalny udział masowy tzw. masy łapanej (tzn. substancji **A2**) będzie wynosił  $g_{2,\min} = 46.809\%$ . Udział masowy odpadów z przerobu makulatury (tzn. substancji **A1**) w takiej kompozycji paliwa **A1+A2** będzie oczywiście maksymalnym udziałem masowym i równym  $g_{1,\max} = 53,191\%$ . Natomiast w przypadku ogólnym powinno być:

$$g_1 \leq 53,191\%, \quad g_2 \geq 46,09\% . \quad (1)$$

**Tab. 4.** Wyniki obliczeń stechiometrycznych spalania różnych kompozycji paliwa **A1+A2**: charakterystyka energetyczna oraz zapotrzebowanie tlenu i powietrza

Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Wartość liczbowa dla paliwa <b>A1+A2</b>		
			I	II	III
Wartość opałowa	$W_d$	$\left[ \frac{kJ}{kg \text{ paliwa}} \right]$	9522	7500	6000
Entalpia spalania	$W_g$	$\left[ \frac{kJ}{kg \text{ paliwa}} \right]$	10666	8691	7226
Teoretyczne zapotrzebowanie tlenu	$n_{o,\min}$	$\left[ \frac{kmol O_2}{kg \text{ paliwa}} \right]$	0,0256	0,0209	0,0175
Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza	$n_{a,\min}$	$\left[ \frac{kmol \text{ powietrza}}{kg \text{ paliwa}} \right]$	0,1218	0,0997	0,0834
	$V_{a,\min}$	$\left[ \frac{Nm^3 \text{ powietrza}}{kg \text{ paliwa}} \right]$	2,7290	2,2342	1,8673
Współczynnik nadmiaru powietrza	$\lambda$		1,5		
Rzeczywiste zapotrzebowanie tlenu	$n'_o$	$\left[ \frac{kmol O_2}{kg \text{ paliwa}} \right]$	0,0384	0,0314	0,0263
Rzeczywiste zapotrzebowanie powietrza	$n'_a$	$\left[ \frac{kmol \text{ powietrza}}{kg \text{ paliwa}} \right]$	0,1827	0,1496	0,1250
	$V'_a$	$\left[ \frac{Nm^3 \text{ powietrza}}{kg \text{ paliwa}} \right]$	4,0934	3,3513	2,8009
Liczba Molliera	$\sigma$	-	1,1472	1,1153	1,0826
Druga liczba znamienna paliwa	$\nu$	-	0,00034	0,00024	0,00013

Masowe udziały substancji: A1 i A2, tzn.:  $g_1$  i  $g_2$ , tworzące określoną kompozycję paliwa A1+A2, powinny być także tak dobrane, aby gwarantowały na tyle dużą minimalną wartość opałową  $W_d$  paliwa A1+A2, która umożliwiałaby spalanie go na ruszcie bez konieczności użycia paliwa dodatkowego. Przyjmijmy za [7], że ta minimalna wartość opałowa wynosi  $W_{d,\min} = 6 [MJ/kg]$ . Zauważmy, że warunek ten determinuje minimalną wartość udziału masowego  $g_{1,\min}$  i maksymalną wartość udziału masowego  $g_{2,\max}$  substancji: A1 i A2 w paliwie A1+A2. Z danych zawartych w Tabelicy 4 wynika, że wówczas:

$$13803 \cdot g_1 + 4658 \cdot g_2 \geq 6000, \quad (2)$$

$$g_1 + g_2 = 100. \quad (3)$$

**Tab. 5.** Wyniki obliczeń stechiometrycznych spalania różnych kompozycji paliwa A1+A2: ilość i skład spalin suchych

Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Wartość liczbowa dla paliwa A1+A2		
			I	II	III
Jednostkowa ilość spalin suchych	$n''_{ss}$	$\left[ \frac{\text{kmol spalin suchych}}{\text{kg paliwa}} \right]$	0,1846	0,1505	0,1251
Objętość jednostkowej ilości spalin suchych	$V''_{ss}$	$\left[ \frac{\text{Nm}^3 \text{ spalin suchych}}{\text{kg paliwa}} \right]$	4,1325	3,3680	2,8009
Udziały molowe składników spalin suchych	$[CO_2]$	-	0,1208	0,1248	0,1292
	$[SO_2]$	-	0,00011	0,00012	0,00014
	$[O_2]$	-	0,09637	0,08901	0,08097
	$[N_2]$	-	0,78197	0,78551	0,78938
	$[HCl]$	-	0,00076	0,00055	0,00031
Objętości jednostkowych	$V''_{CO_2}$	$\left[ \frac{\text{Nm}^3 CO_2}{\text{kg paliwa}} \right]$	0,49646	0,41810	0,35998

Charakterystyka paliwa z odpadów celulozowo-papierniczych

ilości składników spalin	$V_{SO_2}''$	$\left[ \frac{Nm^3 SO_2}{kg \text{ paliwa}} \right]$	0,00045	0,00041	0,00037
	$V_{O_2}''$	$\left[ \frac{Nm^3 O_2}{kg \text{ paliwa}} \right]$	0,39842	0,29994	0,22689
	$V_{N_2}''$	$\left[ \frac{Nm^3 N_2}{kg \text{ paliwa}} \right]$	3,2340	2,6477	2,2128
	$V_{HCl}''$	$\left[ \frac{Nm^3 HCl}{kg \text{ paliwa}} \right]$	0,00313	0,00183	0,00086
Objętościowe udziały składników spalin suchych w warunkach normalnych	$r_{CO_2}^{ss}$	-	0,12014	0,12414	0,12852
	$r_{SO_2}^{ss}$	-	0,00011	0,00012	0,00013
	$r_{N_2}^{ss}$	-	0,78259	0,78614	0,79003
	$r_{O_2}^{ss}$	-	0,09641	0,08906	0,08101
	$r_{HCl}^{ss}$	-	0,000758	0,000544	0,000309

**Tab. 6.** Wyniki obliczeń stechiometrycznych spalania różnych kompozycji paliwa A1+A2: ilość i skład spalin wilgotnych

Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Wartość liczbową dla paliwa A1+A2		
			I	II	III
Jednostkowa ilość spalin wilgotnych	$n_s''$	$\left[ \frac{kmol \text{ spalin wilgotnych}}{kg \text{ paliwa}} \right]$	0,2144	0,1825	0,1589
Objętość jednostkowej ilości spalin wilgotnych	$V_s''$	$\left[ \frac{Nm^3 \text{ spalin wilgotnych}}{kg \text{ paliwa}} \right]$	5,0400	4,34650	3,8321
Stopień zawilżenia spalin	$[H_2O]$	-	0,1611	0,2131	0,2700
Objętość jednostkowej ilości wilgoci w spalinach wilgotnych	$V_{H_2O}''$	$\left[ \frac{Nm^3 H_2O}{kg \text{ paliwa}} \right]$	0,9075	0,9785	1,0312
Udziały molowe składników spalin wilgotnych	$(CO_2)$	-	0,10403	0,10289	0,10174



	(SO <sub>2</sub> )	-	0,00010	0,00010	0,00011
	(O <sub>2</sub> )	-	0,08300	0,07338	0,06375
	(N <sub>2</sub> )	-	0,67349	0,64752	0,62155
	(HCl)	-	0,00066	0,00045	0,00024
	(H <sub>2</sub> O)	-	0,13872	0,17566	0,21261
Objętościowe udziały składników spalin wilgotnych w warunkach normalnych	$r_{CO_2}^s$	-	0,09850	0,09619	0,09394
	$r_{SO_2}^s$	-	0,00009	0,00009	0,00010
	$r_{N_2}^s$	-	0,64167	0,60916	0,57744
	$r_{O_2}^s$	-	0,07905	0,06901	0,05921
	$r_{H_2O}^s$	-	0,18006	0,22513	0,26909
	$r_{HCl}^s$	-	0,00062	0,00042	0,00023

**Tab. 7.** Wyniki obliczeń stechiometrycznych spalania różnych kompozycji paliwa A1+A2: właściwości spalin suchych i wilgotnych

Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Wartość liczbową dla paliwa A1+A2		
			I	II	III
Zastępcza (pozorna) masa drobinowa spalin suchych	$M_{ss}''$	$\left[ \frac{kg}{kmol} \right]$	30,33	30,36	30,40
Zastępcza (pozorna) masa drobinowa spalin wilgotnych	$M_s''$	$\left[ \frac{kg}{kmol} \right]$	28,11	27,58	27,07
Zastępcza (pozorna) stała gazowa spalin suchych	$R_{ss}''$	$\left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$	274,1	273,8	273,5
Zastępcza (pozorna) stała gazowa spalin wilgotnych	$M_s''$	$\left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$	295,8	301,4	307,2

Gęstość spalin suchych w warunkach normalnych	$(\rho_n)''_{ss}$	$\left[ \frac{kg}{Nm^3} \right]$	1,3554	1,3570	1,3586
Gęstość spalin wilgotnych w warunkach normalnych	$(\rho_n)''_s$	$\left[ \frac{kg}{Nm^3} \right]$	1,2177	1,1844	1,1519
Właściwa pojemność cieplna spalin suchych w warunkach normalnych	$(C_p^{ss})_n$	$\left[ \frac{kJ}{kmol \cdot K} \right]$	30,18	30,21	30,24
		$\left[ \frac{kJ}{Nm^3 \cdot K} \right]$	1,3466	1,3479	1,3493
Właściwa pojemność cieplna spalin wilgotnych w warunkach normalnych	$(C_p^s)_n$	$\left[ \frac{kJ}{kmol \cdot K} \right]$	30,78	30,95	31,12
		$\left[ \frac{kJ}{Nm^3 \cdot K} \right]$	1,3731	1,3808	1,3883
Właściwa pojemność cieplna spalin suchych w warunkach normalnych	$(C_v^{ss})_n$	$\left[ \frac{kJ}{kmol \cdot K} \right]$	21,77	21,80	21,83
		$\left[ \frac{kJ}{Nm^3 \cdot K} \right]$	0,9714	0,9726	0,9740
Właściwa pojemność cieplna spalin wilgotnych w warunkach normalnych	$(C_v^s)_n$	$\left[ \frac{kJ}{kmol \cdot K} \right]$	22,39	22,56	22,73
		$\left[ \frac{kJ}{Nm^3 \cdot K} \right]$	0,9988	1,0066	1,0142
Wykładnik adiabaty Poissona spalin suchych	$\kappa''_{ss}$	-	1,3865	1,3861	1,3856
Wykładnik adiabaty Poissona spalin wilgotnych	$\kappa''_s$	-	1,3750	1,3719	1,3689

W efekcie otrzymuje się:  $g_{1,min} = 14,664\%$  a  $g_{2,max} = 85,336\%$ . To zaś oznacza, że:

$$g_1 \geq 14,664\% , \quad g_2 \leq 85,336\% . \quad (4)$$

Jeśli dokona się superpozycji warunków: (1) i (4), to dostaje się:

$$14,664\% \leq g_1 \leq 53,191\% , \quad (5)$$

$$46,809\% \leq g_2 \leq 85,336\% . \quad (6)$$

Równie dobrze można by postulować, aby  $W_{d,\min}=7,5\text{MJ/kg}$ , co praktycznie zapewni osiągnięcie temperatury równej  $850^{\circ}\text{C}$  w komorze spalania [7]. Zależności: (2) i (3) przyjmą wówczas postać:

$$13803 \cdot g_1 + 4658 \cdot g_2 \geq 7500, \quad (7)$$

$$g_1 + g_2 = 100. \quad (8)$$

Stąd:  $g_{1,\min} = 31,066\%$  a  $g_{2,\max} = 68,934\%$ , a więc:

$$g_1 \geq 31,066, \quad g_2 \leq 68,934\%. \quad (9)$$

Jeśli dokona się superpozycji warunków: (1) i (9), to dostaje się:

$$31,077\% \leq g_1 \leq 53,191\%, \quad (10)$$

$$46,809\% \leq g_2 \leq 68,934\%. \quad (11)$$

W tablicach od 2 do 7 przedstawiono wyniki stechiometrycznych obliczeń przy zupełnym i całkowitym spalaniu paliwa  $A1+A2$ , w którym udziały masowe substancji  $A2$  przyjęto jako równe granicznym wartościom wynikającym z zależności: (6) i (11), a więc: (1).paliwo I –  $g_2 = g_{2,\min} = 46,809\%$ ; (2).paliwo II –  $g_2 = g_{2,\max} = 68,923\%$ , (3).paliwo III –  $g_2 = g_{2,\max} = 85,325\%$ . Przedstawiony tok postępowania może być uogólniony na przypadek paliwa więcej niż dwuskładnikowego i na większą liczbę ograniczeń.

## LITERATURA

1. Madejski J.: Termodynamika techniczna, Wydanie IV, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2000.
2. Instytut Przeróbki Chemicznej Węgla, informacja prywatna.
3. Szargut J.: Termodynamika, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998.
4. Wiśniewski S.: Termodynamika techniczna, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 1987.
5. Kordylewski W.: Spalanie i paliwa, Wydanie III poprawione i uzupełnione, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2001.
6. Gogół W.: Wymiana ciepła – tablice i wykresy, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Wydanie VI, Warszawa, 1984.

7. Wandrasz J.W., Wróblewicz T: Wartość opałowa odpadów przeznaczonych do utylizacji termicznej w funkcji rozwiązań systemowych zintegrowanej gospodarki stałymi odpadami komunalnymi, *Gospodarka Paliwami i Energią*, Nr 11, 1996, s. 7-14.

### **CHARACTERISTICS OF FUEL FROM PULP- AND PAPER WASTE**

**Abstract:** This paper is devoted to the recognition of possibility of fuel production from pulp and paper waste. Since it is necessary to reduce such waste disposal at land fills, the problem is very important from local both waste and energy management point of view. Before experimental investigation, stoichiometric calculation of pulp and paper waste firing has been performed but under simplifying assumption that it is perfect and complete. The results obtained is related to fuel compositions making both required net calorific value and low-emission of pollutants possible.

**Key words:** Fuel production, pulp- and paper waste, reduce waste, land fills, fuel compositions, calorific value, low-emission .

Praca wykonana w ramach pracy statutowej S / WM / 1 / 05

Sławomir Poskrobko<sup>1</sup>, Jan Łach<sup>2</sup>

## O TERMICZNEJ UTYLIZACJI ODPADÓW OPAKOWANIOWYCH

**Streszczenie:** W niniejszej pracy odniesiono się do możliwości termicznej utylizacji odpadów opakowaniowych poprzez ich spalanie lub zgazowanie. Przedstawiono także charakterystykę energetyczną tych odpadów oraz omówiono ich niektóre właściwości, które są istotne dla prowadzenia procesów termicznych, charakteryzujących się niską emisją gazowych produktów spalania do atmosfery. Potencjał energetyczny odpadów opakowaniowych oszacowano na podstawie krajowego bilansu materiałowego za 2004 rok. Ustosunkowano się również do kwestii wytwarzania paliw formowanych z danej kategorii odpadów. Ponadto oszacowano koszty inwestycyjne budowy elektrociepłowni spalającej i współspalającej odpady opakowaniowe.

**Słowa kluczowe:** termiczna utylizacja, odpady opakowaniowe, tworzywa sztuczne, wartość opałowa, spalanie, zgazowanie, emisja produktów spalania, koszty utylizacji, elektrociepłownia

### 1. Wprowadzenie

Niniejsza praca poświęcona jest rozeznaniu możliwości wytwarzania energii z odpadów opakowaniowych, które – jak się dość powszechnie szacuje – przedstawiają około 40% (objętościowo) i 20% (wagowo) odpadów komunalnych, mimo wyraźnej zmiany na lepsze w zakresie oszczędnego używania opakowań. Wiadomo, że odpady opakowaniowe posiadają właściwości, które umożliwiają efektywny odzysk zawartej w nich energii, a więc i wykorzystanie ich w lokalnej energetyce komunalnej i zawodowej, co w warunkach krajowych wydaje się uzasadnione, zarówno pod względem ekonomicznym, jak i ekologicznym oraz społecznym. Uściślijmy, że w danym przypadku chodzi o segregowane odpady komunalne, których frakcję palną stanowią: papier i tektura, tworzywa sztuczne, tekstylia,

---

<sup>1</sup> Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45C, 15-311 Białystok

<sup>2</sup> Wydział Inżynierii i Ochrony Środowiska, Politechnika Częstochowska, ul. H. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa

opakowania Tetra Pak, drewno, itp. [1]. Można pokazać, że udział palnych odpadów opakowaniowych w palnych segregowanych odpadach komunalnych jest stosunkowo duży.

Mimo obowiązkowego odzysku surowców i recyklingu odpadów opakowaniowych ma się na ogół do czynienia z taką sytuacją, że ich wartościowa, pod względem energetycznym, frakcja jest niemal w całości deponowana na składowiskach odpadów komunalnych, a to z uwagi na brak innych metod unieszkodliwiania. Z wolna rysuje się jednak realna możliwość energetycznego wykorzystania tej masy odpadów opakowaniowych, których duża część da się efektywnie przetworzyć na paliwa o ściśle określonym składzie pierwiastkowym (składzie elementarnym) oraz właściwościach fizykochemicznych. Jeśli dokona się wstępnej selekcji odpadów, to ich recykling energetyczny w komorach ciśnieniowych w warunkach wysokiej temperatury może nie oddziaływać znacząco na środowisko naturalne. Ambitna idea przetwarzania odpadów w substancję palną i paliwa oraz wykorzystanie paliw z odpadów opiera się na przesłankach wielokrotnie i szczegółowo omawianych w literaturze, z których najistotniejsze to: (1).ściśle zdefiniowane właściwości chemiczne substancji wchodzących w skład paliwa; (2).znane zachowanie się substancji palnych w warunkach spalania i ich właściwości emisyjne; (3).określona wartość opałowa, świadcząca o możliwości autotermicznego spalania wytworzonego paliwa, oraz gwarancja uzasadnionego ekonomicznie zastosowania go w procesie wytwarzania energii w warunkach przemysłowych (wynikająca z możliwości jednoznacznego określenia np. warunków spalania, rodzaju paleniska itp.). Nadmienmy, że paliwa z odpadów, w zależności od sposobu ich wytwarzania, mogą charakteryzować się stosunkowo niską – w porównaniu z paliwami konwencjonalnymi (węglem, olejem opałowym, gazem ziemnym, LPG) – wartością opałową, ale ich skład elementarny powinien gwarantować niską emisję substancji szkodliwych, a w szczególności związków siarki i chloru [2] oraz metali ciężkich.

Powyższe działania, wsparte określonymi bodźcami finansowymi, wymuszającymi racjonalne stosowanie opakowań, w tym ich wytwarzanie z surowców odzyskanych z odpadów opakowaniowych, powinny się przyczynić nie tylko do poprawy stanu środowiska naturalnego, ale i przynieść określone efekty ekonomiczne i społeczne.

W ramach systemowych rozwiązań gospodarki odpadami w zakresie ich termicznego unieszkodliwiania, w tym spalania, należy również brać pod uwagę ten sposób utylizacji odpadów opakowaniowych, tzn. poza systemem energetyki komunalnej i zawodowej, w typowych spalarniach odpadów komunalnych i niebezpiecznych. Taka procedura termicznej utylizacji i przetwarzania może dotyczyć np. takich odpadów, które powstały w procesie wytwarzania paliwa bądź też odpadów z tworzyw sztucznych, które mogą być przetwarzane na paliwa ciekłe.

## **2. Charakterystyka palnych odpadów opakowaniowych**

Odpady opakowaniowe stanowią średnio około 20÷30% masy stałych odpadów komunalnych. Do grupy palnych odpadów opakowaniowych zalicza się: tworzywa sztuczne, papier i tekturę, materiały naturalne (drewno, tekstylia) oraz tzw. opakowania wielomateriałowe.

### **2.1. Odpady opakowaniowe z tworzyw sztucznych**

Do wytwarzania opakowań z tworzyw sztucznych stosowane są najczęściej:

- polimery, których skład chemiczny tworzą takie pierwiastki, jak: węgiel, wodór i tlen, a więc: (1).polietylen o bardzo małej gęstości (ang. Very Low Density PolyEthylene) – VLDPE bądź PE-VLD, polietylen o małej gęstości (ang. Low Density PolyEthylene) – LDPE bądź PE-LD, polietylen o średniej gęstości (ang. Mean Density PolyEthylene) – MDPE bądź PE-MD i polietylen sieciowany o dużej gęstości (tzw. centrolen, ang. High Density PolyEthylene) – HDPE bądź PE-HD, uzyskiwane w efekcie trojkiego rodzaju polimeryzacji etylenu; (2).polietylen liniowy o małej gęstości – PELLD bądź PE-LLD, polietylen metalocenowy (mPE); (3).kopolimery etylenowe (E/VAC, E/AA, E/MA, E/EA, E/VAL); (4).polipropylen (PP) i polistyren (PS); (5).politereftalan etylenu (PET), (CPET) i (OPET) oraz pochodne poliestry: politereftalan etylenu z kwasem izoftalowym (APET) i kopolimer kwasu tereftalowego z glikolem etylenowym i dwumetanocykloheksanem – (PETG); (6).polimer naturalny (celuloza);
- polimery, których skład chemiczny tworzą takie pierwiastki, jak: węgiel, wodór, tlen i azot, a więc termoplastyczne tworzywa sztuczne: poliamidy (PA) bądź nylony i poliwęglany (PC);
- polimery, których skład chemiczny tworzą takie pierwiastki, jak: węgiel, wodór i chlor, a więc: polichlorek winylu – PCV i polichlorek winylidenu (PVDC);
- inne polimery, jak np. kopolimery termoplastyczne określane mianem jonomerów polimerowych (uretanowych, poliuretanowych czy styrenowych);
- polimery z niewielkim udziałem (200–1200ppm) takich substancji pomocniczych, jak: przeciwtleniacze, stabilizatory, dodatki poślizgowe, plastyfikatory, pigmenty, wypełniacze.

Wartość opałową opakowań z tworzyw sztucznych szacuje się średnio na około 30÷35MJ/kg. Można więc stwierdzić, że jest to odpad wysokokaloryczny, a jego wartość opałową można porównywać z kalorycznością oleju opałowego lub gazu, np. LPG. Jeśli w wysokosprawnych paleniskach spalać opakowania z tworzyw sztucznych niezawierających chloru (Cl), to bez większych trudności uzyskuje się niską emisję gazowych produktów spalania, szczególnie dioksyn i chlorowodoru (HCl). Produkty stałe procesu, takie jak żużel i popiół, spełniają normy obowiązujące w krajach UE, a dotyczące zawartości metali ciężkich i palnych substancji organicznych, np. węgla.

## **2.2. Odpady opakowaniowe z papieru i tektury**

Opakowania papierowe i tekturowe wykonywane są z masy celulozowej, szmacianej, makulatury, ścieru drzewnego, wypełniaczy (kredy, kaolinu itp.), klejów zwierzęcych i żywicznych, skrobi, barwników organicznych i mineralnych oraz dodatków uszlachetniających (np. parafiny, asfaltu, żywic syntetycznych, itp.). W skład powłok uszlachetniających opakowania papierowe i tekturowe wchodzi najczęściej: aluminium, pigmenty, impregnaty, parafiny, preparaty fluorowęglowodorowe (HFC), chlorek winylidenu (VDC), termozgrzewalne tworzywa sztuczne, silikon. Opakowania te mają lakierowane etykiety wykonane z papieru lub z tworzyw sztucznych. Farby pokrywające opakowania lub etykiety zawierają w swoim składzie metale ciężkie, przy czym najczęściej – ołów. Wartość opałowa suchej masy wynosi około 13MJ/kg, co predestynuje opakowania papierowe i tekturowe do grupy materiałów o dobrych właściwościach palnych. Oznacza to, że rozważane odpady opakowaniowe stanowią odpad średniokaloryczny, a więc wartościowy pod względem energetycznym. Po stronie produktów spalania, zarówno gazowych jak i stałych (popiołów i żużli), nie należy spodziewać się wysokich emisji substancji toksycznych.

## **2.3. Odpady opakowaniowe z materiałów naturalnych (drewno, tekstylia)**

Opakowania z materiałów naturalnych wytwarzane są w przeważającej mierze z drewna i tekstyliów. W zasadzie nie stanowią one potencjalnych surowców do wtórnego przetworzenia. Ze względu na dobre właściwości energetyczne (wartość opałowa rzędu 14÷17MJ/kg), odpady opakowaniowe z materiałów naturalnych mogą być niemal w całości przeznaczone do celów energetycznych. Opakowania z drewna i tekstyliów, podobnie jak odpady z papieru i tektury, mogą zawierać niewielkie ilości zanieczyszczeń, głównie w postaci substancji chemicznych związanych z ich oznakowaniem (nalepki, nadruki, etykiety itp.) i odpowiednią barwą.



Odwołując się do nomenklatury niemieckiej, można dokonać – na podstawie zawartości, np. syntetycznych dodatków balastowych – podziału poużytkowego drewna opakowaniowego na cztery grupy [3]:

- odpady z „czystego” naturalnego drewna bez żadnych dodatków syntetycznych;
- odpady drzewne inne niż naturalne, zawierające w swym składzie PCV, ale nie zawierające impregnatów do drewna, w tym także farb i lakierów;
- odpady drzewne inne niż naturalne, niezawierające PCV i impregnatów do drewna, w tym także farb i lakierów;
- odpady drzewne zawierające impregnaty, w tym także farby i lakiery.

Jeśli jednak chodzi o opakowania, to podział ten można uznać za uzasadniony tylko wówczas, gdy badania składu elementarnego wykażą istotne udziały substancji szkodliwych. Odnotujmy tu, że w przypadku odpadów z tekstyliów ma się do czynienia z taką sytuacją, że niezmiernie trudno jest dokonać podziału systemowego, albowiem udział tych odpadów w grupie odpadów opakowaniowych jest znikomy, a ponieważ nie stanowią one wartościowego materiału do wtórnego przetworzenia, to ich charakter i właściwości są „wkomponowane” w masę odpadów komunalnych.

#### **2.4. Odpady opakowaniowe wielomateriałowe**

Możliwości użytecznego przetwarzania wielomateriałowych i wielowarstwowych odpadów opakowaniowych, wśród których największy udział stanowią opakowania typu Tetra Pak, są w znacznej mierze ograniczone. Wynika to głównie ze struktury budowy tych opakowań, których konstrukcję tworzą kolejne, spójne warstwy polietylenu, papieru, papieru makulaturowego, polietylenu, folii aluminiowej i polietylenu, przy czym w miejsce polietylenu może ewentualnie występować polipropylen. Ta wielowarstwowa spójna konstrukcja laminatu z udziałem folii aluminiowej znacząco utrudnia mechaniczny odzysk tak cennego składnika, jak aluminium. Skład chemiczny tych opakowań, poza znaczącym udziałem aluminium, można w zasadzie porównywać ze składem zmieszanych odpadów makulaturowych i odpadów opakowaniowych z polipropylenu lub polietylenu. W technice pakowania ma się także często do czynienia z laminatami opakowaniowymi z udziałem papieru (co najmniej dwie warstwy) i folii poliamidowej lub poliestrowej. Spójność tych laminatów uzyskuje się za pomocą substancji wiążących w postaci klejów wodnych, skrobiowych, kazeinowych oraz szkła wodnego. Opakowania wielomateriałowe charakteryzują się wysoką wartością opałową, którą szacuje się na około 25÷27MJ/kg.

### **3. Bilans materiałowy palnych odpadów opakowaniowych i ich potencjał energetyczny**

Szacunkowego bilansu masy palnych odpadów opakowaniowych dokonano na podstawie danych zawartych w opracowaniu [4]. Sporządza się go w celu określenia orientacyjnego strumienia masy tych odpadów, które w przyszłości można by ewentualnie przeznaczyć do energetycznego wykorzystania (recyklingu).

Jeśli chodzi o strukturę masy palnych odpadów opakowaniowych wprowadzonych na rynek w Polsce w roku 2004, to przedstawia się ona następująco:

- odpady opakowaniowe z tworzyw sztucznych – 488245,683Mg (28,0%),
- odpady opakowaniowe z papieru i tektury – 782901,585Mg (44,9%),
- odpady opakowaniowe z materiałów naturalnych – 389013,175Mg (22,3%),
- odpady opakowaniowe wielomateriałowe – 83111,367Mg (4,8%).

Oznacza to, że łączna masa tych odpadów palnych wyniosła około 1743270Mg. Natomiast recyklingowi poddano w tymże 2004 roku następujące masy poszczególnych odpadów opakowaniowych:

- odpady opakowaniowe z tworzyw sztucznych – 88686,427Mg (18.16%),
- odpady opakowaniowe z papieru i tektury – 385760,724Mg (49,27%),
- odpady opakowaniowe z materiałów naturalnych – 17275,669Mg (44,41%),
- odpady opakowaniowe wielomateriałowe – 8039,143Mg (9,67%),

co daje łącznie 499762Mg. W rezultaci różnica między masą palnych odpadów opakowaniowych wprowadzonych na rynek i poddanych recyklingowi, wynosząca około 1243510Mg, rozkłada się następująco na poszczególne grupy odpadów opakowaniowych:

- odpady opakowaniowe z tworzyw sztucznych – 399559,255Mg (32,1%),

- odpady opakowaniowe z papieru i tektury – 397140,860Mg (32,0%),
- odpady opakowaniowe z materiałów naturalnych – 371737,506Mg, (29,9%)
- odpady opakowaniowe wielomateriałowe – 75072,224Mg, (6,0%).

Z powyższego bilansu dla 2004 roku wynika, że około 1243510Mg palnych odpadów opakowaniowych nie podlegało procedurom recyklingu. Można więc postawić tezę, że odpady te są w większości zdeponowane na składowiskach odpadów komunalnych bez radykalnej redukcji ich objętości i ciężaru. Część z nich została prawdopodobnie wysegregowana w zakładach gospodarki komunalnej, wyposażonych w linie do segregacji, przy czym pewna ich ilość mogła być odzyskana jako surowce wtórne. Ogólnie rzecz biorąc, te 1243510Mg wysokokalorycznych odpadów istotnie stanowi o wartości opałowej odpadów komunalnych przeznaczonych do zdeponowania na składowisku, którą szacuje się na poziomie około 7 – 9MJ/kg, co przemawia za potencjalną autotermicznością procesu spalania. W danym przypadku – do obliczeń szacunkowych – przyjmuje się średnią wartość opałową zmieszanych odpadów opakowaniowych jako równą 20MJ/kg, którą zaniżono ze względu na ich zawilgocenie. Energię chemiczną zawartą w masie 1243510Mg odpadów opakowaniowych szacuje się na około  $2487 \cdot 10^4$ GJ. Tytułem porównania, analogiczny zasób energii chemicznej zawarty jest w około 994800Mg wysokokalorycznego węgla kamiennego o wartości opałowej około 25MJ/kg. Ocena przydatności odpadów opakowaniowych do celów energetycznych musi także brać pod uwagę szacunkowe wartości stężeń zanieczyszczeń emitowanych do środowiska [5], [6], które mogą być zdefiniowane po uprzednim określeniu charakterystyki paliwa za pomocą częściowej analizy elementarnej, bądź tzw. analizy technicznej poszczególnych odpadów lub ich mieszanin.

Dla frakcji palnej odpadów komunalnych, w której znaczny procent stanowią odpady opakowaniowe, można przyjąć do celów bilansowych [5], że w ramach np. skojarzonej produkcji ciepła i elektryczności uzyskuje się – w optymalnych warunkach – około 24 – 28 % energii elektrycznej i 72 – 76% energii cieplnej. W planach zakłada się, że wartość opałowa odpadów jest równa 7MJ/kg, a ilość energii wytworzonej na sprzedaż z jednej tony odpadów dostarczonych do spalarni wynosi:

1. w produkcji ciepła – 5320MJ/Mg;
2. w produkcji energii elektrycznej – 590kWh/Mg;
3. w skojarzeniu: energia elektryczna – 370kWh/Mg, energia cieplna – 4200MJ/Mg.

Jeśli przyjąć godzinową wydajność komory spalania jako równą 4,133Mg/h i założyć, że spalarnia pracuje w ciągu roku przez 6000h, to może ona zutilizować 24798Mg odpadów komunalnych. Wówczas szacunkowa ilość energii cieplnej i elektrycznej wyprodukowanej w ciągu roku przedstawia się następująco:

1. produkcja ciepła –  $132000 \cdot 10^9$  MJ/a;
2. produkcja elektryczności –  $146310 \cdot 10^2$  MWh/a;
3. produkcja skojarzona:
  - energia elektryczna –  $91752 \cdot 10^2$  MWh/a;
  - energia cieplna –  $104151 \cdot 10^6$  MJ/a.

#### **4. Termiczna utylizacja odpadów opakowaniowych**

Proces spalania odpadów jest jednym ze sposobów recyklingu, który w tym wypadku można określić jako recykling energetyczny, pozwalający efektywnie wykorzystać zawartą w odpadach energię chemiczną do wytwarzania ciepła i elektryczności. W warunkach polskich, co zostanie wykazane w dalszej części pracy, uzasadniona jest budowa „spalarni” w istniejącej infrastrukturze technologicznej i logistycznej elektrociepłowni opalanych węglem. Koncepcja ta, biorąc pod uwagę niskoemisyjne technologie spalania spełniające wymogi dyrektyw unijnych, nie spowoduje istotnych zmian jakości środowiska naturalnego w obrębie aglomeracji miejskich gdzie zazwyczaj są lokalizowane elektrociepłownie.

##### **4.1. Termiczna utylizacja odpadów z tworzyw sztucznych**

Recykling tworzyw sztucznych wymaga dużych nakładów finansowych, a odpady pozyskiwane w ramach wielokrotnego recyklingu surowcowego (tzw. recykulaty) charakteryzują się złą jakością i trudno jest dla nich znaleźć racjonalne zastosowanie. Wyjątek stanowią opakowania, stosowane często w przemyśle chemicznym i spożywczym, na ogół w formie butelek, wykonane z polietylenotereftalanu (politereftalanu etylenu) – PET, których udział w procesie recyklingu jest największy. Zdecydowana większość pozostałych opakowań z tworzyw sztucznych, zwykle o dużej objętości, kieruje się bezpośrednio na składowiska odpadów, a to ze względu na trudności identyfikacyjne oraz wysoki stopień zabrudzenia. Faktem jednak jest, że odpady te przysparzają wiele problemów, albowiem na ogół nie ulegają rozkładowi biochemicznemu (tzn. biodegradacji) i znacząco przyspieszają zapełnianie wysypisk.

Tworzywa sztuczne niezawierające chloru (poliolefiny, czyli węglowodory polimeryczne, stosowane do produkcji np. folii spożywczej), mające pewien udział

w odpadach komunalnych, doskonale nadają się – ze względu na wysoką wartość opałową (około 35MJ/kg, a więc porównywalną z wartością opałową oleju napędowego) – do recyklingu termicznego (energetycznego), tzn. termicznej utylizacji takimi metodami, jak: (1).spalanie; (2).współspalanie (w postaci wysegregowanej) z węglem kamiennym; (3).zgazowanie niskociśnieniowe w temperaturze 400 – 600<sup>0</sup>C (stosowane w energetyce); (4).zgazowanie wysokociśnieniowe w temperaturze około 1600<sup>0</sup>C przy ciśnieniu 15MPa (stosowane w przemyśle petrochemicznym). Należy zaznaczyć, że technologie wysokociśnieniowego zgazowania są jednak rzadko stosowane, a to ze względu na wysokie nakłady inwestycyjne. Doskonałe właściwości kaloryczne opakowań z poliolefin i sprzyjające właściwości emisyjne produktów ich spalania sprawiają, że tworzywa te mogą stanowić ważny komponent do wytwarzania paliw z odpadów, co w warunkach krajowych może mieć – nawet w niedalekiej już przyszłości – niebłahe znaczenie ekonomiczne.

Na szczególną uwagę zasługuje – opracowana w Polsce – technologia termicznego (energetycznego) recyklingu odpadowych opakowań z tworzyw poliolefinowych [7] (polietylenu, polipropylenu, polistyrenu), która umożliwia termokatalityczne przetwarzanie wspomnianych tworzyw sztucznych na węglowodory proste nasycone, o stosunkowo dużej ilości grup metylenowych (CH<sub>2</sub>). Wysoka czystość chemiczna uzyskanego produktu, który np. nie zawiera znaczących ilości związków aromatycznych, alkoholi, grup karboksylowych, azotu, siarki i chloru oraz odznacza się brakiem wiązań potrójnych i sprzężonych wiązań podwójnych, pozwala wykorzystać ten produkt do produkcji paliw w przemyśle petrochemicznym. Podstawowym surowcem produkcyjnym są folie, folie z napyłonym aluminium, opakowania barwione z nalepkami, przy czym dopuszcza się zanieczyszczenia mineralne (np. piasek, kurz, szkło, drobne zanieczyszczenia metalowe). Na uwagę zasługuje fakt, że proces umożliwia optymalne wykorzystanie energii, w tym energii powstałej z przetwarzania odpadów. Instalacje tego rodzaju torują drogę dla prowadzenia działalności produkcyjnej na skalę przemysłową i o wysokim stopniu rentowności. Doświadczenia nabyte w trakcie jej eksploatacyjne świadczą o wysokich walorach ekologicznych danej technologii recyklingu termicznego.

Odpały opakowaniowe z tworzyw sztucznych zawierających chlor (tzn. polichlorowane, np. folie ogrodowe czy też butelki z polichlororku winylu PVC czy PVDC) mogą być utylizowane metodami termicznymi z wykorzystaniem hydrokrakingu, który nie wymaga wstępnego sortowania utylizowanych odpadów. Metoda ta, podobna do uwodorniania węgla metodą Bergiusa i Piera, polega na uwodornieniu surowca w podwyższonej temperaturze, które powoduje jego upłynnienie. W trakcie procesu depolimeryzacji następuje odchlorowanie polichlororków z wydzielaniem chlorowodoru, który z kolei oddzielany jest metodami absorpcyjnymi [7]. Jak dotąd, technologie hydrokrakingu nie znalazły szerszego zastosowa-

nia w kraju, a to ze względu na wysokie nakłady inwestycyjne na aparaturę ciśnieniową i koszty jej eksploatacji w warunkach obecności wodoru. Niejako na marginesie odnotujemy, że niskoemisyjne i zarazem efektywne energetycznie technologie spalania nie należą do tanich, i to nawet w warunkach gospodarki skojarzonej, co stanowi o stosunkowo powolnym ich rozpowszechnianiu w kraju.

Recykling energetyczny opakowań z tworzyw sztucznych (tzn. polimerów syntetycznych) musi odbywać się w sposób kontrolowany. W przeciwnym bowiem razie można mieć do czynienia z emisją toksycznych produktów spalania (np. najbardziej trujących związków syntetycznych, czyli dioksyn) oraz tworzeniem się aerozoli atmosferycznych i kwaśnych opadów atmosferycznych. Większość technologii do termicznej utylizacji opakowań z tworzyw sztucznych stanowi problem emisji metali ciężkich (np. kadmu, antymonu czy rtęci). Występują one w opakowaniach opatrzonych wszelkiego rodzaju nadrukami np. z laminatów, polistyrenu itp. Z recyklingiem energetycznym polistyrenu wiąże się wydzielanie sadzy, poliamidów czy poliuretanów – znaczna emisja tlenków azotu NO<sub>x</sub> a poliakrylonitrylu – obecność kwasu cyjanowodorowego w spalinach. Odpady z tworzyw sztucznych mogą być także wykorzystane w hutnictwie jako wsad paliwowy do wielkiego pieca [8].

## **4.2. Termiczna utylizacja odpadów z papieru i tektury**

Pomimo niskiej opłacalności przerobu makulatury ma się do czynienia w Polsce z recyklingiem surowcowym opakowań makulaturowych (tzn. odpadów z papieru i tektury) realizowanym na stosunkowo wysokim poziomie, albowiem wskaźnik odzysku np. w 2003 roku przekroczył 36% a wskaźnik recyklingu (procentowy udział makulatury zużytej do produkcji papieru i tektury w całkowitym ich zużyciu) osiągnął ponad 30%, tzn. poziom wyższy niż np. w Danii i tylko nieznacznie niższy niż w Anglii. Prawdą jest jednak, że wskaźniki te nie są imponujące, jeśli porównać je z danymi dla takich państw, jak Finlandia czy Niemcy, w których ten ekonomiczno-ekologiczny sposób zagospodarowania makulatury jest powszechnie doceniany i respektowany. Można przewidywać, że większość spośród pozostałych ponad 60% opakowaniowych odpadów papierowych i tekturowych trafiła w większości na składowiska odpadów komunalnych, a więc nie stała się cennym surowcem wtórnym (makulatura), a przecież wiadomo, że makulatura znajduje się w Unii Europejskiej na „zielonej liście odpadów”. Podstawowych przyczyn tego stanu rzeczy należy upatrywać we wciąż poważnych trudnościach związanych z selektywną zbiórką odpadów. Odnotujemy jeszcze, że tylko niewielka część makulatury jest kompostowana.

Odpady z papieru i tektury mogą być także utylizowane termicznie w spalarniach odpadów, albowiem są dobrym materiałem palnym. W odpadach komu-

nalnych występują w postaci mocno zawilgoconej, przez co ich wartość opałowa jest stosunkowo niewielka w porównaniu z jej wielkością dla przypadku wysegregowanych opakowań w ramach selektywnej zbiórki odpadów. Mimo to, makulatura stanowi wartościowy materiał paliwowy, który cieszy się szczególnym uznaniem jako składnik do wytwarzania paliw z odpadów. Termiczna utylizacja odpadów z papieru i tektury może być jednak źródłem takich zanieczyszczeń w emitowanych spalinach, jak metale ciężkie, a w szczególności ołów (zawarty w farbach drukarskich). Odpady te da się mimo wszystko współspalać w odpowiednich proporcjach z biomasą drzewną bądź węglem kamiennym w typowych kotłach energetycznych, i to z dobrym skutkiem tak energetycznym jak i ekologicznym. Jeśli mieszać je z odpadem komunalnym, to spalanie staje się wówczas bardziej efektywne energetycznie oraz obniża się emisja związków siarki i chloru do atmosfery.

### **4.3. Termiczna utylizacja odpadów wielomateriałowych**

Odzysk odpadów opakowaniowych wielomateriałowych (np. tektura/aluminium) szacuje się na około 7%. Tak niski wskaźnik recyklingu jest spowodowany tym, że większość tych odpadów stanowią opakowania kombinowane jednorazowego użytku np. z udziałem folii aluminiowej typu Tetra Pak. Odzysk aluminium wymaga wówczas budowy kosztownych instalacji do separacji materiałów o różnych ciężarach właściwych np. typu „ORFA”, które – mimo wysokich nakładów inwestycyjnych – nie spełniają oczekiwanych rezultatów. Trudności te skłaniają do rozważenia możliwości wykorzystania zużytych opakowań wielomateriałowych o dużej wartości opałowej w charakterze dobrego paliwa energetycznego, aczkolwiek zawartość folii aluminiowej istotnie utrudnia ich spalanie, gdyż proces taki charakteryzuje się m.in. wysoką temperaturą (ponad 1000<sup>0</sup>C) w okolicy rusztu, która powoduje topienie się aluminium, co przyspiesza upłynnianie żużla na ruszcie kotła, a to z kolei obniża sprawność procesu spalania. Aktualnie prowadzone są badania zmierzające do określenia technologicznych parametrów procesów termicznej utylizacji opakowań Tetra Pak [9], a publikowane wyniki dowodzą, że wielomateriałowe odpady opakowaniowe mogą być poddane procesowi zgazowania (spopielania) w temperaturze bliskiej temperatury topnienia aluminium równej 600<sup>0</sup>C. Frakcje: papierowa i z tworzyw sztucznych ulegają termicznej degradacji do postaci popiołu z odzyskiem energii zawartej w niemetalicznych laminatach, natomiast aluminium pozostaje w popiele jako tlenek glinu i w takiej postaci daje się odzyskać. Natomiast metale ciężkie, podobnie jak w przypadku innych opakowań, stanowią składnik farb drukarskich i pozostają w popiele w postaci związków soli bądź w postaci par przechodzą do gazów spalinowych.

Odpady opakowaniowe niezawierające wkładek aluminiowych (papier, folie z tworzyw sztucznych, kleje) mogą z powodzeniem podlegać procesom energe-

tycznej utylizacji w strumieniu odpadów komunalnych, jak również mogą stanowić wysokokaloryczny składnik paliw z odpadów.

## 5. Paliwa z odpadów

Interesującą formą energetycznego recyklingu odpadów komunalnych, w tym palnych odpadów opakowaniowych, jest możliwość wytwarzania paliw, które muszą spełniać określone wymagania w zakresie właściwości zarówno fizykochemicznych i paliwowych jak i emisyjnych, formułowane na podstawie obowiązującego prawodawstwa Unii Europejskiej i sukcesywnie wdrażanego w Polsce, a zawierającego określone normy dotyczących spalania paliw konwencjonalnych i formowanych. Warunki wytwarzania i termicznego przetwarzania (np. spalania czy zgazowania) paliw z odpadów powinny określać właściwości substratów, komponentów oraz produktu finalnego (paliwa), a także normy emisji zanieczyszczeń gazowych do atmosfery oraz właściwości produktów stałych, tzn. żużli i popiołów.

W tabelicy 1 przytoczono przykładowe wyniki analizy elementarnej paliwa wytworzonego z odpadów komunalnych, których wartość opałową oszacowano na 21 – 23MJ/kg [10]. Natomiast maksymalne stężenia zanieczyszczeń zawartych w paliwie – wg badań angielskiej firmy „ENER – G” [6] – przedstawiono w tabelicy 2. Dane zawarte w tych tablicach nie są objęte żadnym systemem normalizacji. Należy je traktować tylko jako przykładowe dla paliwa z odpadów komunalnych. Nie mogą więc być obowiązujące dla użytkowników instalacji do termicznego unieszkodliwiania odpadów. Jednak paliwo RDF o składzie jak w tabelicy 1 zapewnia niskoemisyjność spalania i minimalne oddziaływanie na środowisko naturalne.

**Tab. 1.** Charakterystyka paliwa RDF  
(masowe udziały: pierwiastków palnych, azotu, tlenu i balastu)

Lp.	Składnik	Oznaczenie	Jednostka	Wartość liczbową
1	Węgiel	C	%	45 ÷ 55
2	Wodór	H	%	6,5 ÷ 7,5
3	Siarka	S	%	0,2 ÷ 0,4
4	Tlen	O	%	25 ÷ 35
5	Azot	N	%	0,6 ÷ 1,0
6	Chlor	Cl	%	0,3 ÷ 0,7
7	Fluor	F	%	0,004 ÷ 0,01
8	Popiół	A	%	13
9	Wilgoć*	W	%	3 ÷ 5

\*W ciągu technologicznym zainstalowana jest suszarnia bębnowa.



**Tab. 2.** Maksymalne stężenia zanieczyszczeń w paliwie RDF

Lp	Składnik	Jednostka	Wartość maksymalna
1	Ołów [Pb]	g/tonę paliwa w stanie suchym	450
2	Kadm [Cd]	g/tonę paliwa w stanie suchym	25
3	Chrom [Cr]	g/tonę paliwa w stanie suchym	500
4	Miedź [Cu]	g/tonę paliwa w stanie suchym	500
5	Nikiel [Ni]	g/tonę paliwa w stanie suchym	120
6	Rtęć [Hg]	g/tonę paliwa w stanie suchym	2
7	Cynk [Zn]	g/tonę paliwa w stanie suchym	400
8	Tal [Tl]	g/tonę paliwa w stanie suchym	7
9	Antymon [Sb]	g/tonę paliwa w stanie suchym	750
10	Kobalt [Co]	g/tonę paliwa w stanie suchym	45
11	Arsen [As]	g/tonę paliwa w stanie suchym	15
12	Mangan [Mn]	g/tonę paliwa w stanie suchym	300
13	Cyna [Sn]	g/tonę paliwa w stanie suchym	225
14	Wanad [V]	g/tonę paliwa w stanie suchym	120
15	Sód [Na]	g/tonę paliwa w stanie suchym	4000
16	Potas [K]	g/tonę paliwa w stanie suchym	2800
17	Glin [Al]	g/tonę paliwa w stanie suchym	15000
18	Polichlorowane bifenyle [PCB]	g/tonę paliwa w stanie suchym	2

Paliwo z odpadów może być wytwarzane z frakcji palnej wysegregowanej z odpadów komunalnych i składającej się z papieru i tektury, tworzyw sztucznych, tekstyliów, drewna itp., a także z Tetra Pak. Udziały procentowe tych składników przytacza się na podstawie danych PUHP „LECH” Spółka z o.o. w Białymstoku [1]. Przedsiębiorstwo to zarządza składowiskiem odpadów komunalnych dla tego miasta. Skład frakcji palnej przedstawia się zaś następująco:

- papier, tektur – 38,72 %,
- tworzywa sztuczne – 39,28 %,
- tekstylia – 14,27 %,
- drewno i podobne – 3,91 %,
- Tetra Pak – 3,82 %.

W danym przypadku, udział odpadów palnych w tzw. odpadach balastowych wynosi 64,33%, a te ostatnie zawierają 23,49% odpadów bioorganicznych i 12,18% odpadów twardych (szkła, metali, gruzu, ziemi, piasku) [1]. Należy tu dodać, że Białystok posiada zmechanizowany system do segregacji odpadów komunalnych, który znajduje się na polu wysypiskowym, a ponadto – w mieście prowadzona jest selektywna zbiórka odpadów. Aktualnie zlecono badania składu elementarnego wyżej wymienionej frakcji palnej. PUHP „LECH” przetwarza 85000Mg odpadów komunalnych rocznie.

Poszczególne substancje frakcji palnej, tworzące jednorodną mieszaninę paliwową, powinny być tak dobrane, aby zapewnić: (1).możliwie dużą wartość opałową paliwa, związaną z udziałem masowym pierwiastka węgla i balastu (popiołu, wilgoci); (2).niskoemisyjność procesu spalania, która wiąże się z udziałem masowym chloru i siarki, a przede wszystkim chloru do nie więcej niż 1%, co z kolei stanowi o minimalnym udziale masowym tworzyw sztucznych (np. PCV) zawierających chlor i zarazem o maksymalnym udziale tworzyw sztucznych o składzie chemicznym: C, H i O, co zapewnia możliwie maksymalny udział węgla pierwiastkowego. Taka procedura doboru składników paliwa powinna umożliwić utrzymanie niskiej emisji węglowodorów wielopierścieniowych (WWA) i substancji chlorowcoorganicznych (np. dioksyn), utrzymując przy tym wysoką sprawność termodynamiczną paleniska. Jednocześnie chlor nie oddziaływałby wówczas korozyjnie w sposób znaczący na elementy stalowe kotła. Istotnym elementem ekologicznym kompozycji paliw z odpadów jest dążenie do ograniczania w nich zawartości metali ciężkich.

## **6. Dobór technologii dla termicznej utylizacji odpadów**

Problem doboru technologii dla termicznej utylizacji odpadów z efektywnym wykorzystaniem zawartej w nich energii dotyczy przede wszystkim organizacji zintegrowanego systemu racjonalnej gospodarki odpadami. W szczególności, należy określić: (1).jaka część odpadów komunalnych, w tym zużytych opakowań, zostanie przetworzona na paliwa; (2).jaki udział będą stanowić odpady spalane w postaci surowej po wstępnej segregacji; (3).na ile, w warunkach krajowych, selektywna zbiórka odpadów znajduje uzasadnienie ekonomiczne; (4).w jakim stopniu paliwa z odpadów o wysokiej jakości staną się konkurencyjne w stosunku do paliw konwencjonalnych. Faktem jest, że tworzenie krajowego systemu gospodarki odpadami niebezpiecznymi, w tym medycznymi, nie przyniosło zadowalających rezultatów, a przeciż skala problemu była znacznie mniejsza. Spalarnie odpadów niebezpiecznych, lokalizowane zazwyczaj na terenie szpitali, w większości nie spełniają oczekiwań. Wiele z nich okazało się nieekonomicznymi.

Jeśli stawia się problem budowy spalarni, to już na wstępie należy zdawać sobie sprawę z faktu, że obiekt ten – poza uciążliwościami ekologicznymi (głównie z powodu potencjalnej emisji dioksyn) – może posiadać zalety energetyczne (jako że dała czynne źródło ciepła i elektryczności). Istotnym zagadnieniem staje się więc kwestia konkurencyjności elektrociepłowni spalającej odpady lub paliwa z odpadów w stosunku do typowej elektrociepłowni opalanej paliwem konwencjonalnym, przy czym chodzi tu o typowe analizy ekonomiczne, uzasadniające celowość istnienia dodatkowego źródła ciepła na lokalnym rynku energii. Należy również roz-

patrzeć możliwość budowy i funkcjonowania zakładów termicznej utylizacji odpadów w istniejących obiektach energetycznych (ciepłowniach, elektrociepłowniach), dysponujących niezbędną infrastrukturą technologiczną. Taka lokalizacja wymagałaby zdecydowanie niższych nakładów inwestycyjnych, a ponadto można oczekiwać niższych kosztów wytwarzania energii, co ma istotne znaczenie społeczne. Trzeba także brać pod uwagę racjonalną inicjatywę organów ustawodawczych, które – biorąc pod uwagę szybko kurczące się zasoby biomasy drzewnej – doprowadzą do takiej sytuacji, że energia lub część energii wytworzonej z odpadów zostanie usankcjonowana prawnie jako energia odnawialna.

Podstawowym kryterium weryfikacji i doboru technologii dla energetycznego wykorzystania odpadów komunalnych (termicznej utylizacji odpadów) są wiążące ustalenia Dyrektywy Unii Europejskiej (Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, która jest znana pod polskim tytułem jako Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/76/WE z 4 grudnia 2000 roku w sprawie spalania odpadów) [11]. Ogranicza ona wpływ instalacji spalania i spalania łączonego na środowisko naturalne (powietrze, glebę, wody powierzchniowe i gruntowe) i na zdrowie ludzi. Dobór technologii powinien w pierwszej kolejności gwarantować spełnienie wymogów stawianych w tej dyrektywie. Następną kwestią jest ocena jakości oferowanej technologii, przy czym należy pamiętać, że powinna ona spełniać znane i precyzyjnie określone wymagania techniczne i warunki eksploatacji instalacji energetycznych. Pomijając szczegóły techniczne, dotyczą one m.in.:

- ścisłego zdefiniowania właściwości paliwa (np. wartości opałowej, składu elementarnego),
- sprawności procesu spalania (paleniska) oraz sprawności kotła przystosowanego do spalania odpadów czy też paliw z odpadów,
- konfiguracji oraz efektywności instalacji oczyszczania spalin do określonych warunków spalania,
- symulacji kosztów wytwarzania 1GJ ciepła i 1kWh elektryczności [12] dla określonych warunków pracy instalacji,
- określenia długowieczności instalacji (gwarancji, napraw, remontów itp.).

Wymogi te z pewnością mogą spełnić produkty tych firm, które od wielu lat funkcjonują na światowych rynkach, zaopatrując elektrownie, elektrociepłownie i ciepłownie w niezbędne urządzenia energetyczne.

Śród firm o światowej renomie należy wymienić Raciborską Fabrykę Kotłów RAFAKO S.A., w której – oprócz typowych urządzeń energetycznych – produkowane są wodne i parowe tzw. kotły odzysknicowe do spalania odpadów. Podstawowym produktem są kotły rusztowe, ale przedsiębiorstwo produkuje rów-

niez niskoemisyjne kotły fluidalne nowej generacji do spalania odpadów komunalnych i przemysłowych. Kotły z RAFAKO S.A., szczególnie rusztowe, pracują od wielu lat, i to z dobrym skutkiem, w energetyce zawodowej w wielu krajach świata. Przystosowane są do spalania odpadów wstępnie segregowanych oraz paliwa z odpadów. Fabryka produkuje również zawansowane technologicznie instalacje do oczyszczania spalin.

Następnym światowym liderem w produkcji kotłów jest szwedzka firma KVEARNER POWER. Jej kotły fluidalne stanowią wyposażenie wielu dużych spalarni odpadów na świecie i cieszą się dobrą opinią. Firma dokonuje również wielu modernizacji kotłów rusztowych na fluidalne. Fluidalne technologie spalania charakteryzują się wysoką sprawnością, niską temperaturą spalania oraz stosunkowo niską emisją produktów spalania do atmosfery, a szczególnie – NO<sub>x</sub>. Odpad komunalny przed podaniem do kotła powinien być jednak rozdrobniony. W paleniskach fluidalnych doskonale spala się paliwo z odpadów.

Technologie złoża fluidalnego dla termicznego wykorzystania paliw z odpadów i odpadów oferowane są również przez amerykańską firmę Foster Wheeler. Szczególne miejsce w jej ofercie zajmują niskoemisyjne kotły fluidalne ze złożem cyrkulacyjnym CFB, które są szczególnie przystosowane do spalania kalibrowanych paliw z odpadów, np. RDF. Nowoczesnym rozwiązaniem, wykorzystującym technologię złoża fluidalnego, jest zgazowywacz CFB. Główną zaletą tej technologii (zgazowania) jest możliwość przetwarzania biomasy i innych paliw pochodzenia odpadowego w palny gaz niskokaloryczny, który może być współspalany z pyłem węglowym w istniejących kotłach energetycznych, stanowiących wyposażenie elektrowni lub elektrociepłowni. Pozwala to zastąpić część paliwa podstawowego (pyłu węglowego) gazem produkowanym w zgazowywaczu, co zmniejsza zużycie węgla kamiennego o około 20%.

Do termicznej utylizacji tworzyw sztucznych metodą zgazowania wysokociśnieniowego można z powodzeniem stosować instalację MPG (ang. Multi Purpose Gas) niemieckiej firmy Lurgi oraz rozwiązania technologiczne wielu innych koncernów związanych z przemysłem petrochemicznym. Technologie te, ze względu na wysokie koszty inwestycyjne, nie są powszechnie stosowane do utylizacji odpadów (np. opakowaniowych z tworzyw sztucznych). Częściej są zaś używane w przemyśle petrochemicznym do przetwarzania smół i olejów węglowych, ciężkich pozostałości procesu rafinacji oraz do unieszkodliwiania odpadów chemicznych.

**Tab 3.** Dopuszczalne wartości emisji zanieczyszczeń do powietrza

Składniki	Jednostka	Dyrektywa 2000/76/EC Półgodzinna wartość średnia	Dyrektywa 2000/76/EC Dzienna wartość średnia
CO	mg/Nm <sup>3</sup>	100	50
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	400	200

TOC*	mg/Nm <sup>3</sup>	20	10
Pył	mg/Nm <sup>3</sup>	30	10
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	200	50
HCl	mg/Nm <sup>3</sup>	60	10
HF	mg/Nm <sup>3</sup>	4	1
Cd + Tl	mg/Nm <sup>3</sup>	–	0,05
Hg	mg/Nm <sup>3</sup>	0,03	10
Metale ciężkie**	mg/Nm <sup>3</sup>	–	0,5
Dioksyny, fura- ny	ng/Nm <sup>3</sup>	–	0,1

\* - Całkowity węgiel organiczny

\*\* - Metale ciężkie (emisja: Pb, Cr, Cu, Sb, As, Co, Ni, V i Sn).

Technologie zgazowania odpadów i paliw z odpadów w warunkach ciśnieniowych typowych dla palenisk kotłowych oferuje australijska firma ENTECH. Jest ona szczególnie interesująca w przypadku zastosowania poziomych komór zgazowujących jako przedpalenisk, umożliwiających ciągłe przepychanie i mieszanie paliwa (odpadów) i współpracujących z kotłami energetycznymi opalanymi pyłem węglowym. Podobnie jak w technologii Foster Wheeler, niskokaloryczny gaz syntezowy – wytwarzany w procesie zgazowania substancji organicznej (odpadów) – kierowany jest do strefy opromieniowanej kotła pyłowego, w której jest współspalany z pyłem węglowym, dzięki czemu zmniejsza się zużycie węgla kamiennego. Komory zgazowujące koncernu ENTECH mogą być zastosowane do utylizacji opakowań Tetra Pak z odzyskiem folii aluminiowej, albowiem – w danym przypadku – temperatura procesu zgazowania może wynosić około 600<sup>0</sup>C. Instalację taką można wykorzystać do zgazowania biomasy drzewnej. Komora zgazowująca może pracować jako niezależny system, realizujący proces termicznej utylizacji odpadów komunalnych zgodnie z wymogami Unii Europejskiej. Technologia taka zalicza się do niskoemisyjnych.

Wymienione powyżej technologie gwarantują spełnienie wymogów w zakresie dopuszczalnych wartości emisji zanieczyszczeń określonych przez wspomnianą dyrektywę 2000/76/EC. Dopuszczalne wartości emisji zanieczyszczeń do powietrza przedstawiono w tablicy 3. Należy tu jednak dodać, iż spełnienie unijnych norm jest możliwe przy założeniu, że właściwości paliwa są zgodne z wytycznymi określonymi przez dostawców i producentów instalacji.

Faktem jest, że dyrektywa nakłada bardzo rygorystyczne wymagania w zakresie monitoringu procesu, obejmującego parametry procesu spalania oraz emisję zanieczyszczeń do atmosfery. Jeśli chodzi o monitoring parametrów procesowych, to wymagany jest ciągły pomiar temperatury, stężenia tlenu, ciśnienia oraz wilgotności gazów w komorze dopalania (za ostatnim doprowadzeniem powietrza wtór-

nego). Natomiast monitoring emisji do atmosfery winien obejmować ciągły pomiar stężenia w emitorze następujących zanieczyszczeń:

- całkowitego pyłu,
- chlorowodoru HCl,
- fluorowodoru HF,
- dwutlenku siarki SO<sub>2</sub>,
- tlenku węgla CO.

Ponadto, wymagane są okresowe pomiary emisji takich metali ciężkich, jak: kadm, tal, rtęć, antymon, arsen, ołów, chrom, kobalt, miedź, mangan, nikiel, wanad i cyna oraz polichlorowanych dibenzo-p-dioksyn i polichlorowanych dibenzofuranów (popularnie określanych mianem dioksyn i furanów). Pomiary te należy wykonywać dwa razy w roku, przy czym przez pierwsze 12 miesięcy eksploatacji instalacji – co dwa miesiące. Natomiast ogólne warunki eksploatacji instalacji spalania odpadów określone są następująco:

- zawartość substancji organicznych w żużlu, w przeliczeniu na węgiel (TOC), nie może przekraczać 3%, straty podczas prażenia żużła powinny być mniejsze niż 5%;
- parametry procesowe muszą spełniać następujące ograniczenia: temperatura – min. 850<sup>0</sup>C, czas przebywania gazu w tej temperaturze powinien wynosić minimum dwie sekundy, przy czym minimalna temperatura powinna wynosić 1100<sup>0</sup>C w przypadku odpadów zawierających ponad 1% halogenów organicznych;
- bezwzględnie wymaga się obecności takich układów automatyki, które są w stanie zapewnić bezawaryjną pracę i sprostać wymogom temperaturowym procesu spalania, w tym wymaga się samoczynnego włączania się palników w przypadku spadku temperatury poniżej 850<sup>0</sup>C bądź 1100<sup>0</sup>C (w przypadku odpadów zawierających powyżej 1% chloru);
- bezwzględnie wymaga się, aby procesowi spalania odpadów towarzyszył odzysk ciepła;
- dopuszczalne stężenia zanieczyszczeń w spalinach nie mogą przekraczać norm przytoczonych w tablicy 3;
- wymagana jest również odpowiednia jakość ścieków ciekłych odprowadzanych ze spalarni;
- wartość dopuszczalnych stężeń w przypadku współspalania odpadów ze stałym paliwem kopalnym (np. węglem kamiennym) określa się jako średnie ważone z wagami równymi udziałom objętościowych strumieni spalin ze spalania

odpowiednio: odpadów i paliwa w całkowitym objętościowym strumieniu tych spalin:

Dyrektywa zobowiązuje także użytkowników instalacji do wykonywania szeregu pomiarów, których wyniki muszą świadczyć o prawidłowym przebiegu procesów termicznych (spalania, współspalania, zgazowania, spalania w piecach cementowych) i prawidłowym funkcjonowaniu instalacji oczyszczania spalin (np. instalacji mokrego oczyszczania). Względy te przemawiają za tym, aby w ramach doboru technologii zwracać baczność uwagę na to, czy określona firma dysponuje wieloletnią i ugruntowaną tradycją w produkcji urządzeń energetycznych (np. kotłów, instalacji odsiarczania spalin itp.), a w szczególności doświadczeniem w zakresie spalania lub zgazowania paliw niskokalorycznych (np. mułów węglowych, odpadów z przemysłu celulozowo-papierniczego, odpadów drzewnych, paliw z odpadów i odpadów komunalnych). Istotnym warunkiem powodzenia przedsięwzięcia w zakresie doboru technologii, w tym wyboru producenta i dostawcy urządzeń, jest tzw. długowieczność poszczególnych urządzeń i elementów konstrukcyjnych, z których składa się instalacja. Materiały konstrukcyjne i urządzenia stosowane w energetyce powinny bowiem zapewniać tzw. bezpieczeństwo energetyczne w zakresie ciągłości dostaw energii dla odbiorców. Istotnym kryterium oceny jest więc bezawaryjność podstawowych elementów instalacji (np. wymurówki żaroodpornej, rusztu, części wymiennikowych kotłów, instalacji doprowadzających media, systemów podawania paliwa itp.) w ciągu minimum 15 lat eksploatacji.

## **7. Uwarunkowania ekonomiczne**

Budowa elektrociepłowni opalanej odpadami komunalnymi lub paliwem z odpadów w ramach kompleksowego systemu gospodarki odpadami wiąże się z określonymi nakładami inwestycyjnymi i kosztami eksploatacyjnymi. Na podstawie danych z literatury [13] można podać tytułem przykładu, że koszt budowy elektrociepłowni opalanej odpadami komunalnymi o wydajności 100000Mg odpadów/rok w tzw. systemie „pod klucz” dla gminy Kraków oszacowano na około 200mln PLN. Szacunek ten można odnieść do budowy bloków energetycznych w tzw. technologii tradycyjnej z wykorzystaniem rusztowych kotłów odzysknicowych (np. RAFAKO). Jeśli chodzi o technologię, polegającą na zgazowaniu odpadów w komorach poziomych (ENTECH), to koszt takiej inwestycji, jak elektrociepłownia o wydajności 60000Mg odpadów/rok, szacuje się na około 40mln EUR, a w przypadku wydajności 120000Mg odpadów/rok – na około 70mln EUR.

Na podstawie cytowanej powyżej literatury można szacunkowo określić, część ogólnych nakładów inwestycyjnych jakie pochłaniają poszczególne etapy realizacji inwestycji. I tak:

- prace budowlano-montażowe, bunkier na odpady – 18 ÷ 25%,
- ruszt, komora spalania, kocioł, elektrofiltr, układ odzuzłania i odpopielani – 20 ÷ 25%,
- węzeł oczyszczania spalin – 20 ÷ 30%,
- instalacja odzysku energii, obieg parowo-wodny, turbozespół – 8 ÷ 12%,
- oprzyrządowanie elektryczne, układy sterowania, automatyka, monitoring spalin – 8 ÷ 16%,
- instalacja neutralizacji i unieszkodliwiania stałych produktów spalania – 4 ÷ 6%,
- urządzenia towarzyszące (waga, suwnica, ochrona ppoż.) – 4 ÷ 8%,
- koszt przygotowania projektu i uzgodnienia – 2 ÷ 6%.

Koszty eksploatacyjne elektrociepłowni opalanej odpadami komunalnymi można przyjąć – do obliczeń szacunkowych – następująco:

- koszty obsługi kapitału – 55 ÷ 65%,
- składowanie lub unieszkodliwianie stałych produktów spalania – 15 ÷ 20%,
- zużycie materiałów procesowych (np. sorbentów oczyszczania spalin) – 6 ÷ 10%,
- koszty osobowe – 8 ÷ 15%,
- koszty remontów i konserwacji – 5 ÷ 10%.

Koszty eksploatacyjne mają bezpośredni związek z kosztem unieszkodliwienia 1Mg odpadów komunalnych. Jednak w warunkach krajowych, gdy nie funkcjonują jeszcze systemy związane z kompleksową gospodarką odpadami, trudno jest odpowiedzialnie mówić o możliwie minimalnych kosztach, które byłyby akceptowalne społecznie. Dla przykładu, w cytowanej tu już publikacji, koszt termicznej utylizacji 1Mg odpadów komunalnych dla miasta Krakowa oszacowano na 70PLN rocznie w przeliczeniu na mieszkańca, co stanowi 6PLN miesięcznie. W tym miejscu odnotujemy, że aktualna opłata miesięczna za składowanie odpadów na wysypiskach wynosi od 1 do 2PLN w przeliczeniu na jednego mieszkańca.

Odmiennie będą się kształtować koszty inwestycyjne i eksploatacyjne w przypadku współspalania odpadów komunalnych z węglem kamiennym. Chodzi tu o instalację (montaż) modułu do zgazowania odpadów jako przedpaleniska (np. komory zgazowania ENTECH), współpracującego z energetycznym kotłem opalanym pyłem węglowym. Polskie elektrownie i elektrociepłownie węglowe wyposażone są w kotły pyłowe typu OP produkcji RAFAKO. Współpraca takiego kotła z



przedpaleniskiem polega na zgazowaniu odpadów w komorze stacjonarnej przedpaleniska, a palny gaz syntezowy jest następnie podawany do strefy opromienionej kotła, w której spala się z pyłem węglowym. Na podstawie bilansów: masy i energii oraz zależności stechiometrycznych procesu spalania dobierana jest – w zależności od typu kotła OP – wielkość (wydajność) komory zgazowującej odpady. Z bilansu energii dla procesu współspalania wynika zmniejszenie zużycia węgla kamiennego podawanego do kotła. Inwestycja związana z realizacją tej koncepcji, połączona z wykorzystaniem istniejącej infrastruktury elektrociepłowni węglowej, sprowadza się w zasadzie do montażu komory zgazowującej, bunkra zasypowego do odpadów, systemu podawania odpadów do komory (np. suwnicy, przenośników taśmowych itp.) i aparatury kontrolno-pomiarowej (AKP) oraz uzupełnienia instalacji monitoringu spalin zgodnie z wymaganiami dyrektywy UE. Koszt inwestycji można wówczas oszacować na sumę od 70% do 80% niższą niż koszty budowy nowego obiektu. I tak, stosownie do przedstawionych powyżej szacunków, koszt inwestycji zawartej w strukturze istniejącej elektrociepłowni wyniesie od 10 do 15mln EUR dla wydajności np. 100000Mg odpadów/rok, od 8 do 12mln EUR dla wydajności 60000Mg odpadów/rok i od 14 do 21mln EUR dla wydajności 120000Mg odpadów/rok.

Można oszacować, jaką część ogólnych nakładów inwestycyjnych pochłaniają poszczególne etapy realizacji inwestycji spalarni odpadów, funkcjonującej w strukturze elektrociepłowni. I tak:

- bunkier na odpad – 10 ÷ 12%,
- komora zgazowania, system podawania paliw – 20 ÷ 25%,
- oprzyrządowanie elektryczne, układy sterowania, monitoring spalin – 5 ÷ 8%,
- instalacja neutralizacji i unieszkodliwiania produktów spalania – 4 ÷ 6%,
- urządzenia towarzyszące – 4 ÷ 8%,
- koszty projektu i uzgodnień – 2 ÷ 6%.

Koszty eksploatacyjne proponowanego rozwiązania można przyjąć według następującego schematu:

- koszty obsługi kapitału – 55 ÷ 65%,
- składowanie lub unieszkodliwianie stałych produktów spalania – 15 ÷ 20%,
- zużycie materiałów procesowych (np. sorbenty oczyszczania spalin) – 3 ÷ 5%,
- koszty osobowe – 8 ÷ 15 %,
- koszty remontów i konserwacji – 5 ÷ 10%.

Koszt przyjęcia do termicznego unieszkodliwienia 1Mg odpadów komunalnych – wg zgrubnego szacunku Elektrociepłowni Białystok S.A. – może wówczas wynieść około 200PLN. Podobny wynik uzyskano w Elektrociepłowni Poznań S.A.

## **8. Wnioski**

Z danych jakościowych, uzyskanych w Spółce „Lech” w Białymstoku, wynika, że odpady opakowaniowe, niepodlegające procesowi recyklingu, stanowią znaczny udział w odpadach komunalnych segregowanych, które ze względu na dobre właściwości palne z powodzeniem mogą być termicznie unieszkodliwiane, przy czym z efektywnym wykorzystaniem energii do celów komunalnych i przemysłowych. Z punktu widzenia ekologii (wielkości emisji) należy stwierdzić, że biorąc pod uwagę ogromne możliwości technologiczne zarówno po stronie niskoemisyjnych technik spalania jak i oczyszczania spalin, proces ich termicznego unieszkodliwiania – przy założeniu racjonalnej gospodarki energetycznej – nie spowoduje istotnych zmian w otaczającym środowisku. Istnieje realna możliwość, potwierdzona działaniem krajów Unii Europejskiej i badaniami przeprowadzonymi w Polsce, że poważne ograniczenia w zakresie emisji substancji szkodliwych do środowiska można uzyskać poprzez przetwarzanie odpadów w paliwa, a odpady opakowaniowe są jak najbardziej do tego predestynowane, ze względu na swoje właściwości chemiczne i paliwowe. Efektywne wykorzystanie odpadów w energetyce w charakterze odnawialnych źródeł energii wydaje się być uzasadnione choćby ze względu na możliwość zmniejszenia zużycia droższych w szybkim tempie konwencjonalnych nośników energetycznych (ropy, węgla, gazu). Jednak należy mieć świadomość faktu, że odpady nie będą spełniać roli paliw alternatywnych. Ich rola będzie tylko i wyłącznie komplementarna.

Z analizy szacunkowych kosztów inwestycyjnych jednoznacznie wynika, że znacznej ich redukcji można dokonać poprzez współspalanie odpadów czy paliw z odpadów z węglem kamiennym w kotłach energetycznych, stanowiących wyposażenie polskich elektrowni i elektrociepłowni. Możliwość taką daje m.in. technologia oparta na współpracy kotła typu OP, opalanego pyłem węglowym, z przedpaleniskiem zgazowującym odpady.

Efektywne wdrożenie technik termicznej utylizacji odpadów komunalnych w Polsce zależy od ustanowienia, głównie w skali lokalnej, efektywnie działającej systemowej gospodarki odpadami. Z punktu widzenia energetyki, wykorzystującej odpady jako paliwa uzupełniające, rozwiązanie to pozwoli m.in. wystarczająco dokładnie określić realny potencjał energetyczny odpadów. Odpady jako paliwa,

mimo swojej komplementarnej roli, mogą stanowić o bezpieczeństwie energetycznym w skali lokalnej.

## LITERATURA

1. PUHP „Lech” Sp. z o.o.: Sprawozdanie z badań morfologii odpadów balastowych, Białystok 11.03.2005r.
2. Poskrobko S., Łach J., Woroniak G.: Paliwo z odpadów celulozowo-papierniczych, Paliwa z odpadów. Tom V, Praca zbiorowa pod redakcją J.W. Wandrasza, Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2005, w druku.
3. Cichy W., Wróblewska H.: Paliwa drzewne z odpadów poużytecznych – potencjał, właściwości, zagrożenie, Paliwa z odpadów. Tom IV, Praca zbiorowa pod redakcją J.W. Wandrasza i K. Pikonina, Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2003, s. 125-130.
4. Ministerstwo Środowiska: Informacja o wielkościach wprowadzonych na rynek krajowy opakowań i produktów, osiągniętych wielkościach odzysku i recyklingu odpadów opakowaniowych i poużytecznych oraz wpływach produktowych za 2004 rok.
5. Poskrobko S., Łach J., Piławski A.: Thermal neutralizing of municipal waste in base unit chambers, Proceedings of the Tenth International Symposium „Heat Transfer and Renewable Sources of Energy HTRSE-2004”, Szczecin-Międzyzdroje, September 8–11, 2004, J. Mikielwicz and W. Nowak (Editors), pp.97-104.
6. Opracowanie wewnętrzne firmy “ENER – G”: Description of an energy from waste plant Type 42 for electricity production, Manchester 2005.
7. Informacja firm: Speranda Sp. z o.o., Ekosystem Sp. z o. o.: Specjalistyczna instalacja do katalitycznego przerobu odpadowych tworzyw sztucznych na komponent, szeroką frakcję KTS-F.
8. Ziębik A., Stanek W.: Odpady plastikowe – paliwo zastępcze w wielkim piecu, Paliwa z odpadów. Tom III, Praca zbiorowa pod redakcją J.W. Wandrasza i J. Nadziakiewicz, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2001, s. 65-74.
9. Nowakowski J.: Wpływ niektórych parametrów na proces termicznego przetwarzania odpadów, Paliwa z odpadów. Tom IV, Praca zbiorowa pod redakcją J.W. Wandrasza i K. Pikonina, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2003, s. 387-393.
10. Prospekt emisyjny firmy Visno Machinefabriek B.V.: RDF – technology: fuel pellets production plant, Targi POLEKO, Poznań, 2004.
11. <http://eulex.parp.gov.pl>
12. Poskrobko S., Łach J.: Technical and economical analysis of co-combustion of wood waste with fine hard coal, Proceedings of the Tenth International Symposium „Heat Transfer and Renewable Sources of Energy HTRSE-2004”, Szczecin-Międzyzdroje, September 8–11, 2004, J. Mikielwicz and W. Nowak (Editors), pp.117-128.
13. Pająk T.: Termiczna utylizacja odpadów komunalnych, Przegląd Komunalny, nr 3 (78) 1998, s.26-27.

## ON THERMAL UTILIZATION OF PACKAGE MATERIALS WASTE

**Abstract:** This paper is devoted to the discussion of possible means of thermal utilization of package materials waste via their firing or gasification. Energy parameters of such a waste as well as some of their properties, being important from point of

view of technical realization of thermal processes with low-emission of pollutants, have been presented, too. Potential of package materials waste energy has been estimated based on latest national material balance. Such a question as production of refuse derived fuels has been discussed, too. Besides, attention has been paid to estimation of capital costs of construction of thermal-electric power station in which package materials waste would be fired or co-fired with mineral fuel.

**Key words:** Thermal utilization, package materials waste, firing, gasification, energy parameters, technical realization, thermal processes, low-emission, refuse derived fuels, capital costs, thermal-electric power station .

Praca wykonana w ramach pracy statutowej S / WM / 1 / 05

Roman Trochimczuk<sup>\*</sup>, Marek Gawrysiak<sup>\*</sup>

## MECHATRONICZNE UJĘCIE KOMPONENTÓW STANOWISKA DO LASEROWEGO GRAWEROWANIA SZKŁA

**Streszczenie:** Artykuł prezentuje mechatroniczny model laserowego stanowiska do formowania trójwymiarowych obiektów wewnątrz szkła lub innych przezroczystych dielektryków. Opisuje również hybrydowy elektro-pneumatyczny układ pozycjonera wraz z kartą sterującą oraz charakteryzuje oprogramowanie sterujące procesem grawerowania laserowego.

**Słowa kluczowe:** mechatronika, laserowe formowanie obiektów, grawerowanie szkła, pozycjoner planarny, laserowy system grawerujący

### 1. Wprowadzenie

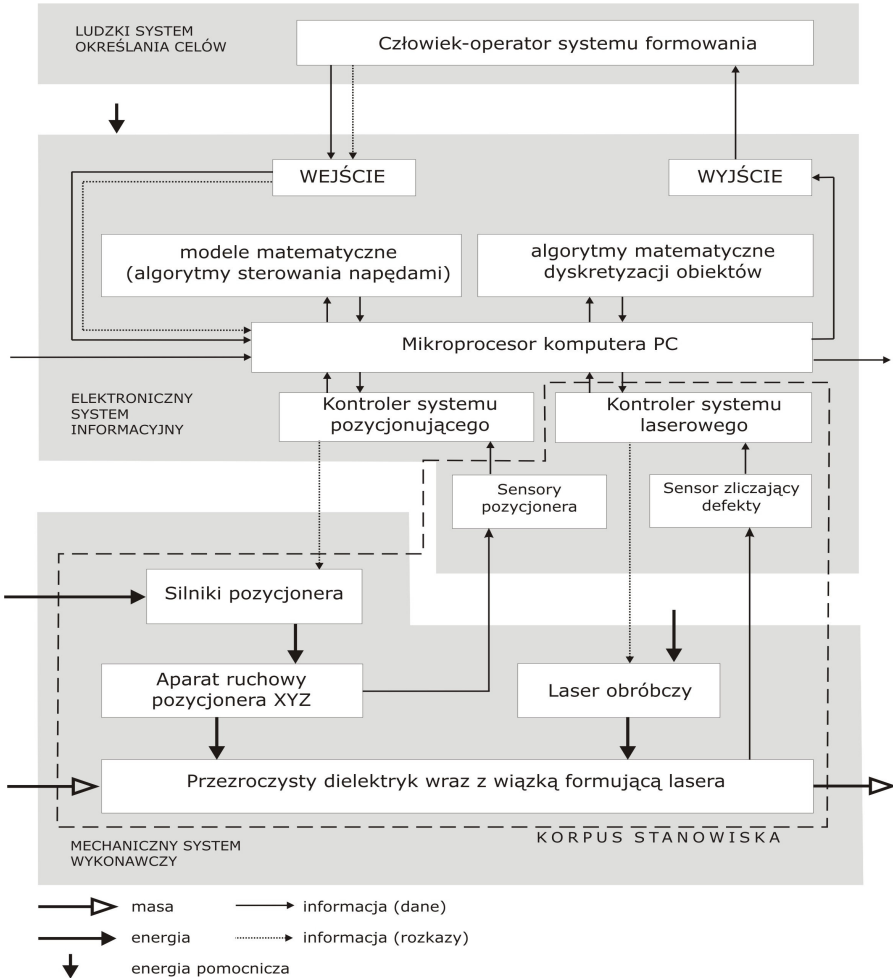
Grawerowanie laserem jest obecnie jedną z najlepszych technologii opisywania różnorodnych przedmiotów, zarówno na potrzeby przemysłu, jak i reklamy. Technika laserowa zapewnia niezwykłą trwałość oznakowania na przedmiotach, zarówno podpowierzchniowo, jak i na zewnętrznych powierzchniach. Obiekty dwuwymiarowe i trójwymiarowe wykonane w taki sposób są trwałe i czytelne. Ważnym kryterium oceny urządzeń służących wymienionym celom jest ich wydajność. Chodzi tu o wydajność (produkcyjność) laserowego systemu formującego przy zapewnieniu wysokiej jakości powierzchni formowanego odwzorowania 3D. Aby można było w poprawny sposób opisać i poznać zależności pomiędzy komponentami urządzenia, konieczne jest zbudowanie modelu opierającego się na mechatronicznym ujęciu komponentów urządzenia [2].

---

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

## 2. Model mechatroniczny stanowiska do laserowego grawerowania szkła

Aby w pełni przedstawić najważniejsze aspekty związane z mechatronicznym ujęciem urządzenia do formowania obiektów trójwymiarowych w szkłe (ELS – Engrave Laser System) [1], opracowano model zgrubnej struktury mechatronicznej takiego urządzenia (rys. 1).

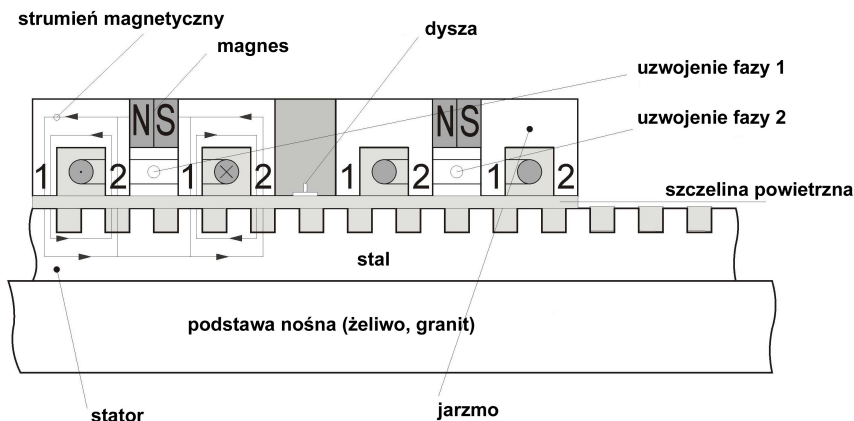


**Rys. 1.** Struktura mechatronicznego laserowego stanowiska do formowania obiektów wewnątrz szkła

Model ten opiera się na modelu mechatronicznego systemu działaniowego [2]. Ukazuje on połączenia pomiędzy komponentami systemu i daje jednocześnie możliwość prześledzenia relacji między nimi. Przy odrzuceniu od prezentowanego modelu ludzkiego podsystemu określania celów, w prosty sposób daje się on rozpatrywać jako mechatroniczny system rzeczowy.

### **3. Hybrydowy elektropneumatyczny pozycjoner stanowiska do laserowego grawerowania obiektów**

Wychodząc z przestawionego modelu struktury mechatronicznej laserowego stanowiska do formowania obiektów wewnątrz szkła, scharakteryzujemy teraz komponent należący do mechanicznego systemu wykonawczego. Jest nim pozycjoner planarny XY związany z aparatem ruchowym stanowiska. Oś Z (pionowa) aparatu ruchowego tworzy hybrydowy silnik o wysokiej gęstości energii, wbudowany do układu precyzyjnej przekładni śrubowej [7], [3]. Na pozycjonerze XY zamocowany jest stół obróbczy, na którym umieszczony jest materiał obrabiany. Drugi aktor stanowiska (laser obróbczy) pozostaje nieruchomo zamocowany wewnątrz korpusu stanowiska i tworzy wraz z aparatem ruchowym pozycjonera XYZ parę roboczą.



**Rys. 2.** Widok hybrydowego elektropneumatycznego napędu bezpośredniego działania

Hybrydowe elektropneumatyczne pozycjonery użyte do budowy aparatu ruchowego stworzone zostały na bazie liniowych silników krokowych. Pozwalają

one realizować złożone współrzędnościowe układy o dużej dokładności przemieszczeń, o szerokim zakresie zmian parametrów ruchu oraz wysokiej wydajności. Charakteryzują się modułowością, niezależnością sterowania przemieszczeniami, możliwością zaprogramowania cyklu pracy, zarówno w układzie otwartym jak i układzie sterowania ze sprzężeniem zwrotnym. Użycie poduszki powietrznej, oddzielającej stator od induktora, pozwala zlikwidować tarcia w systemie, co gwarantuje stabilność parametrów, charakterystyk dynamicznych oraz wydłużyć okres eksploatacji.

Zunifikowany moduł liniowego silnika krokowego pozwala w praktyce maksymalnie uprościć konstrukcję pozycjonera współrzędnościowego, dając równocześnie możliwość skalowania charakterystyk mocy napędu oraz otrzymania układu bez kinematycznych przekładni i przekształceń dzięki zastosowaniu typowych bloków elektromagnetycznych.

Planarny dwuosiowy system przemieszczeń  $XY$  [7], składa się z induktora oraz statora (rys. 2) [6]. Stator jest w postaci płaskiej żeliwnej płyty z naniesioną periodycznie zębową strukturą na powierzchni. W skład induktora wchodzi dwie ortogonalnie rozłożone grupy modułów elektromagnetycznych. Robocza powierzchnia modułów elektromagnetycznych (biegunów) ma periodyczną strukturę zębową z przydzielonym fazowym przesunięciem od bieguna do bieguna. W celu otrzymania poduszki powietrznej pomiędzy induktorem a statorem wmontowane są w induktor dysze eżektorowe, połączone z układem pneumatycznym dostarczającym sprężone powietrze.

#### **4. Karta sterująca pozycjonerem planarnym**

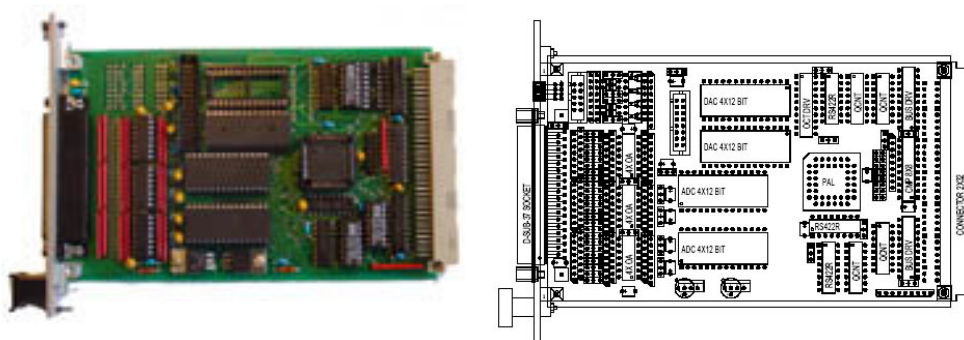
W przedstawionym w punkcie 2 modelu widoczna jest również relacja pomiędzy samym aparatem ruchowym pozycjonera a kontrolerem systemu pozycjonującego, sterowanym przez mikroprocesor. Komputer PC steruje przemieszczeniami napędów, za pomocą specjalnego oprogramowania z algorytmami generującymi trajektorie obróbki [4], uwzględniając przy tym informacje o bieżącym stanie układu lasera. Kontroler systemu pozycjonującego rozpatruje się w tym modelu jako komponent należący do grupy elektronicznego systemu informacyjnego.

Do budowy zamkniętego układu sterowania z pozycjonerem opartym na napędzie planarnym, przedstawionego w punkcie 3, wykorzystano specjalnie aplikowaną do tego celu kartę sterującą typu UC 48 (rys. 3).

Wśród głównych cech technicznych charakteryzujących prezentowany układ wyróżnić można [8]:



- możliwość sterowania układami pozycjonerów opartych na krokowych napędach liniowych oraz napędami synchronicznymi;
- możliwość pełnego sterowania w czterech serwoosiach (np. system portalo- wy X1,X2,Y,Z);



**Rys. 3.** Widok karty sterującej UC48

- programowa interpolacja dla sensorów pracujących z rozdzielczością do 4096;
- 4 wejścia typu RS-422 dla 4 sinusoidalnych sensorów położenia;
- 8 analogowych wyjść bipolarnych (12 Bit, 10V) dla zadawania wartości prądu lub prędkości w każdej z osi;
- 4 galwanicznie połączone wejścia 24V dla przełączników krańcowych;
- możliwość podłączenia kilku kart do tej samej szyny.

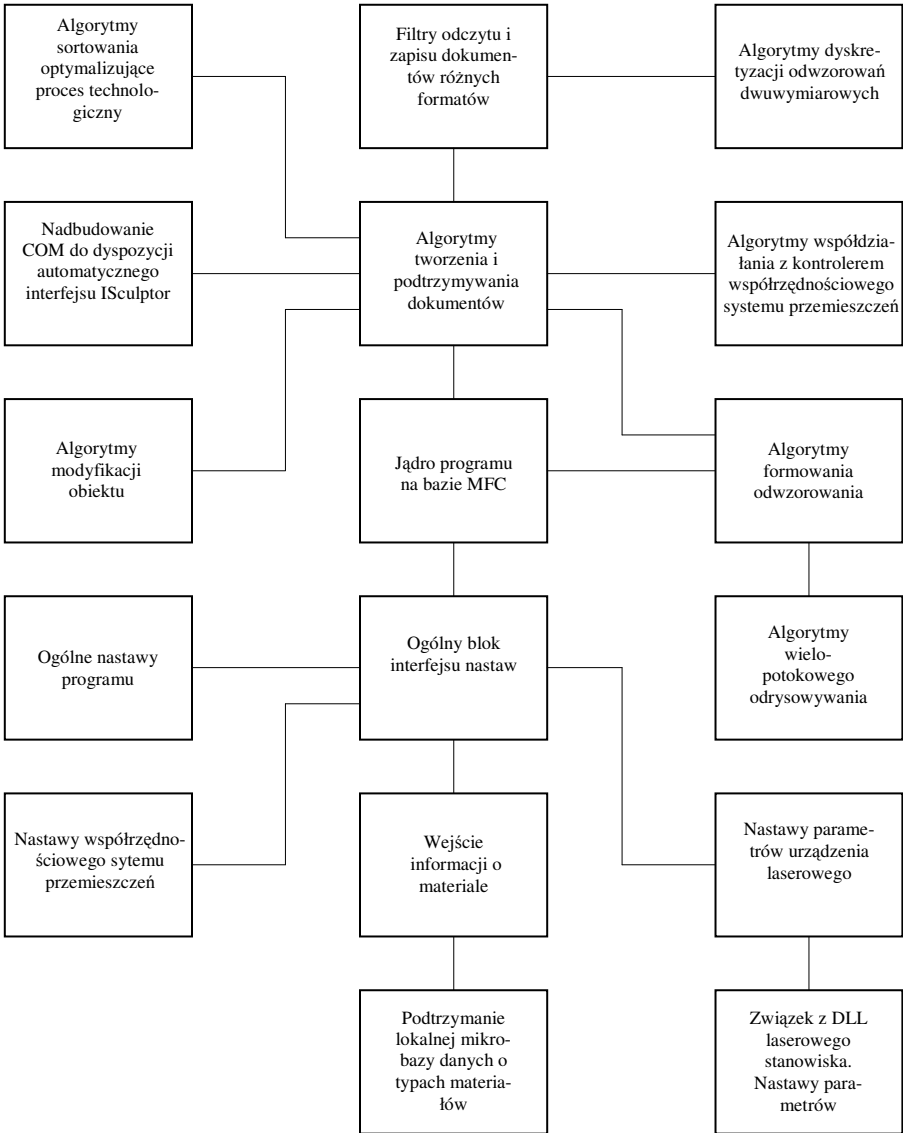
## **5. Struktura oprogramowania sterującego procesem grawerowania**

Istotną pozycję w modelu mechatronicznym stanowiska do laserowego grawerowania szkła zajmuje oprogramowanie sterujące procesem obróbki odwzorowań przestrzennych. Obiekty składają się z dużej ilości drobnych, praktycznie jednakowych pod względem rozmiaru, defektów w jednorodnym ośrodku. Otrzymuje się je w wyniku lokalnego nagrzewania obszaru dielektryka skupioną wiązką laserową.

Oprogramowanie sterujące obróbką przy laserowym grawerowaniu składa się z dwóch podstawowych części [5]:

- części formowania odwzorowania do obróbki, włączając w to: przygotowanie, edycję oraz budowę komend sterujących kontrolerem stanowiska laserowego;

- części bezpośredniego sterowania urządzeniami wchodzącymi w skład stanowiska, włączając w to: nastawianie i sterowanie żądanymi parametrami.



**Rys. 4.** Schemat funkcjonalny oprogramowania Sculptor sterującego procesem laserowej obróbki szkła

Należy przy tym wymienić, że część programowa realizuje następujące funkcje:

- dyskretyzację płaskich odwzorowań (czyli odwzorowanie rastrowego obrazu do wektorowego, za pomocą tworzenia geometrycznych obiektów (punktów), w tych punktach przestrzeni, które odpowiadają częściom odwzorowania rastrowego);
- dykretyzację przestrzennych odwzorowań (odwzorowanie trójwymiarowych obiektów przez zgrupowanie punktów, które swoim rozkładem oddają zarys obiektu);
- odwzorowanie otrzymanego punktowego obrazu z możliwością wpływania na nastawy parametrów;
- edycję otrzymanego punktowego obrazu z możliwościami przesunięcia, obrotu wokół osi układu współrzędnych, a także zmiany skali odwzorowania;
- nastawę parametrów części sprzętowej oraz sterowanie współrzędnościowym systemem pozycjonującym w trakcie procesu technologicznego (na modelu - algorytmy sterowania napędami).

Funkcjonalny schemat blokowy opracowanego oprogramowania sterującego zamieszczono na rys. 4.

Za pomocą specjalnego oprogramowania - scenariusza, obiekt dzielony jest na warstwy, na których naniesione są punkty. Możliwe jest też pokrywanie obiektu siatką złożoną z punktów, tak aby zbiór punktów odwzorowywał pierwowzór.

Scenariusze dają następujące możliwości [5]:

- rozbicia krzywych na punkty (*Divide Curves*);
- rozbicia powierzchniowych obiektów na punkty, przy czym punkty automatycznie rozstawiane są tylko na powierzchniach, a nie wewnątrz obszarów zajmowanych przez nie (*Divide Meshes*);
- naniesienia punktów wiązką nakładającą (rzutowaną do kierunku osi - *Cutting Direction Axis*) siatkę z równomiernym krokiem między punktami (*Vertex Distance*) na powierzchnioryginału (*Filling Faces*);
- eksport punktowych obiektów do programu sterującego procesem formowania (grawerowania) (*Export Data*), przy określeniu skali odwzorowania procentowo albo z zadanymspółczynnikiem.

Głównym modułem oprogramowania sterującego obróbką jest jego jądro [5]. Realizuje ono wszystkie czynności inicjujące wszystkie obiekty oprogramowania (obiekty OLE, osobliwości interfejsu i inne). Wykonuje obróbkę parametrów w wierszach poleceń, odczytuje parametry rejestru systemowego i tworzy odpowiednie okna dialogowe do nastaw parametrów systemu. Oprócz tego jądro inicjuje dopełniający moduł (DLL) dla powiązania kontrolera ze stanowiskiem laserowym.

Ważnym funkcjonalnym blokiem oprogramowania są algorytmy tworzące i podtrzymujące dokumenty. Przez dokumenty rozumie się bezpośrednie dane o obiekcie, w stosunku do którego przeprowadza się operacje modyfikujące. Blok przeprowadza inicjalizację wszystkich parametrów, niezbędnych do zapisu i sterowania obiektem, przedstawionym jako zbiór punktów (powyżej 400 tys.). Zaletą specjalnie opracowanego algorytmu pracy z wirtualną pamięcią i sterowania stronicowaniem fragmentacji jest wyeliminowanie problemu fragmentacji dużego zbioru punktów.

Algorytmy zapisu i operowania dokumentami są ściśle powiązane z blokiem filtrów, przeznaczonych do konwertowania danych w celu przekształcenia ich do wewnętrznego formatu. Filtry zaczynają działać w momencie odczytu danych z nośnika magnetycznego, a także przy zapisie danych w dowolnym spośród obsługiwanych formatów.

Przygotowanie procesu laserowej obróbki obiektu włącza w siebie jeszcze jeden ważny krok – sortowanie punktów w zakresach specyficznych zastosowań:

- system powinien przejść przez wszystkie punkty przy warunku minimalnego, przemieszczenia sumarycznego;
- początkowo powinno się obrabiać najniżej położone punkty, potem wyżej, ponieważ część dolna nie może być obrobiona w wypadku, gdy pojawi się chociaż jeden punkt (defekt) powyżej. Energia wiązki laserowej, będzie rozproszona na zrobionym wcześniej defekcie i w rezultacie zgubi się informacje o danej części obiektu.

W związku z tym algorytmy sortowania okazują się bardzo ważnym blokiem funkcjonalnym.

Oprogramowanie automatycznie zapamiętuje wszystkie wykorzystywane rodzaje materiałów z ich współczynnikami załamania w lokalnej mikrobazie danych. Baza ta jest przedstawiona w postaci tablicy, w której realizowane są operacje wstawienia, wykasowania i zamiany. Możliwe jest również wykorzystywanie innego pliku z gotowymi parametrami używanych materiałów.

Dla lepszej eksploatacji korzysta się z mechanizmów wielopotokowej obróbki wyrysowania. W momencie kiedy realizuje się wyrysowanie w buforze, użytkownik może przedłużać redagowanie odwzorowania. Przy tworzeniu późniejszych zmian potok odświeżający główny kadr odwzorowania zatrzymuje się i sterowanie przekazywane jest tylko tak, że utworzony potok koryguje w danym momencie odwzorowanie.

## **6. Podsumowanie**

Przedstawiony w pracy model mechatroniczny urządzenia do laserowego grawerowania obiektów ukazuje różne poziomy syntezy. Urządzenie do laserowego formowania obiektów w dielektrykach ujęte jest całościowo – jako system mechatroniczny, z jego funkcją, strukturą i hierarchią. Daje on możliwość prześledzenia interesujących, z punktu widzenia osoby zarówno projektującej jak i obsługującej system zależności oraz pozwala sformułować potrzeby co do komponentów stanowiska. Pozwala też uporządkować dotychczasową wiedzę techniczną i naukową w tym zakresie. Jak starano się przedstawić, każdy element składowy tego modelu może być oddzielnie rozwijany i w zależności od potrzeb modyfikowany. I to właśnie daje interdyscyplinarną płaszczyznę na której można znaleźć wspólny cel działania specjalistów z różnych dziedzin, aby mogli budować, a następnie optymalizować parametry i komponenty składowe systemu mechatronicznego.

## **LITERATURA**

1. Trochimczuk R., Karpowicz S.E.: Wybrane aspekty formowania obiektów 3D w szkłe i innych przezroczystych dielektrykach za pomocą lasera, *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn*, Z.10 (2002), s.153-160.
2. Gawrysiak M.: *Analiza systemowa urządzenia mechatronicznego*, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2003.
3. Trochimczuk R., Karpovich S.E.: Mechatroniczny system przemieszczeń dla technologii laserowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn*, Z.11 (2003), Białystok, 2003.
4. Trochimczuk R.: *Oprogramowanie sterujące SCULPTOR dla laserowego formowania obiektów trójwymiarowych*, *Projektowanie mechatroniczne : zagadnienia wybrane*, Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej. Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn, Kraków, 2003.
5. Dostanko A.P., Tolochko N.K., Karpovich S.E.: *Technology and technigue of precise laser modification of solid-state structures*, Technoprint, Mińsk, 2002.
6. Karpovich S.E., Żarski W.W., Ljaszuk J.F., Mierzyński J.M.: *Precyzjonnyje koordinatnyje systemy na osnowie elektropriwoda priamogo dejstwa*, GNPKTM „Planar”, Mińsk, 2001.
7. Trochimczuk R., Karpovich S.E.: *System pozycjonowania wiązki lasera impulsowego*, [rozdz.] w *Projektowanie mechatroniczne : zagadnienia wybrane : [IV Warsztaty Projektowania Mechatronicznego]* pod red T. UHL, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom, 2004, s.179-185.
8. materiały katalogowe firmy Ruch Servomotor.

**MECHATRONIC APPROACH TO COMPONENTS  
OF LASER ENGRAVE SYSTEM OF GLASS**

**Abstract:** A mechatronic model of laser engraving system for three-dimensional object forming in glass or other transparent dielectrics is presented. The hybrid electric-pneumatic positioning system with applied control card and control software is discussed.

**Keywords:** mechatronic, laser engraving system, object forming in glass, planar positioning system

Pracę wykonano w ramach pracy własnej nt: *Mechatroniczne pozycjonowanie wiązki lasera impulsowego w systemach formowania trójwymiarowych obiektów w szkle*, nr W/WM/12/06 Politechniki Białostockiej