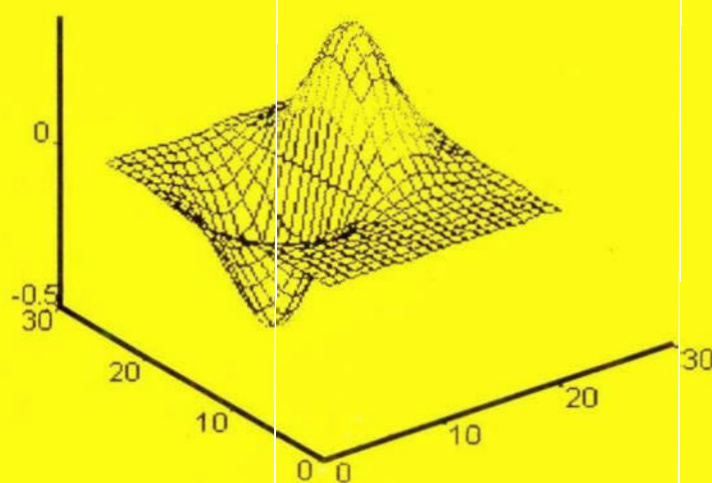


Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie  
Katedra Projektowania Systemów technicznych

Materiały XIII Ogólnopolskiej Konferencji

**Poliptymalizacja i Komputerowe  
Wspomaganie Projektowania  
KOŁOBRZEG `95**

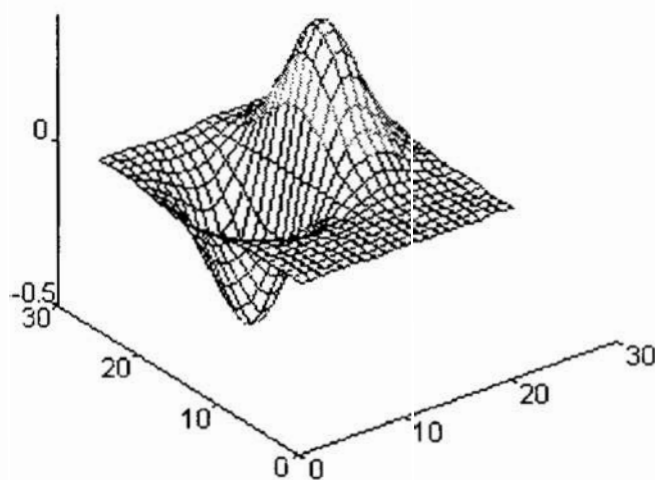


Koszalin-Kołobrzeg

Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie  
Katedra Projektowania Systemów Technicznych

Materiały XIII Ogólnopolskiej Konferencji

# **Poliptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania KOŁOBRZEG '95**



Koszalin – Kołobrzeg



Zeszyt Naukowy Wydziału Mechanicznego nr **19**

ISSN 0860-0325

Materiały recenzowane

Redaktor: **Wojciech TARNOWSKI**  
**Tomasz KICZKOWIAK**

Wydano za zgodą Rektora WSInż. w Koszalinie

Wydanie Materiałów dofinansowane przez KBN

Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie  
75-620 KOSZALIN, ul. Raclawicka 15-17, tel. 427-881

---

1995, wyd.1, ark. wyd. 12,33, nakład 150 egz., format B5  
Druk: Zakład Poligraficzno-Wydawniczy INNOWEX w Koszalinie

## SPIS TREŚCI

1. Arendt R.: *Modelowanie układów sterowania binarnego z zastosowaniem programu SIMULINK* ...7
2. Balicki J.: *Neuronowe metody wyznaczania rozwiązań optymalnych w sensie pareto* ...17
3. Chudy C., Sielicki A.: *Symulacja procesów cyklicznych w elastycznych systemach produkcyjnych* ...25
4. Czader W., Czernek M., Zembaty L.: *Obiektowe projektowanie reduktorów o cechach typoszeregu z wykorzystaniem systemu CAD* ...33
5. Diakun J., Bil T.: *Optymalizacja energetyczna aktywnej strefy zasilania wylączarki* ...41
6. Gnaciński P.: *Algorytmy wyznaczania strumienia optymalnego w silniku indukcyjnym* ...55
7. Gnaciński P., Kostyszyn R.: *Symulacja rozkładu temperatur w silniku elektrycznym* ...65
8. Grymek Sz.: *Sterowanie obiektami nieliniowymi. Podejście neuronowe* ...75
9. Gwiazda A., Knosala R.: *Określenie podobieństwa postaci konstrukcyjnej z wykorzystaniem sieci Kohonena* ...81
10. Jakubik K., Jankowski P.: *Praktyczne sposoby optymalizacji programu w „języku MATHCAD” dynamicznego modelu quasi-stacjonarnego* ...89
11. Jendo S., M. Paczkowski W.: *Optymalizacja wielokryterialna kratownic przestrzennych za pomocą katalogu* ...99
12. Knopik L., Styp-Rekowski M.: *Optymalizacja cech konstrukcyjnych rowerowych łożysk tocznych* ...111

13. Kozak J., Dąbrowski L.: *Zagadnienie optymalizacji obróbki elektrochemicznej (ECM)* ...119
14. Łubkowski K., Zawora J.: *Optymalizacja impulsowej obróbki elektrochemicznej (PECM)* ...127
15. Łubkowski K., Pogorzelski W.: *Ranking wariantów impulsowej obróbki elektrochemicznej* ...135
16. Montusiewicz J., Surdacki P.: *Wspomagany komputerowo dobór warunków pracy kriomagnesu w stanach przejściowych* ...139
17. Ostwald M.: *Optymalizacja wektorowa płyt trójwarstwowych* ...147
18. Paczkowski W., Dorobczyński J.: *Identyfikacja modelu obliczeniowego przęsła mostu zwodzonego w Dzidnowie* ...155
19. Paszek A., Knosala R.: *Wnioskowanie przybliżone w systemie doradczym wspomagającym projektowanie procesów technologicznych* ...163
20. Pawlak G., Pułaczewski J.: *Strojenie regulatora lingwistycznego z wykorzystaniem genetycznego algorytmu optymalizacji* ...171
22. Płonka S., Stryczek R.: *Wybór metody polioptymalizacji struktury procesu technologicznego* ...183
23. Siwek B.: *Wspomaganie konstruowania w środowisku edytorów graficznych* ...191
24. Tarnowski W.: *Symulacja układów o statych rozłożonych za pomocą SIMULINK'a* ...197
25. Weiss Z., Rojek-Mikołajczyk I., Kwiatkowski R.: *Metodyka tworzenia baz wiedzy technologicznej* ...207

## CONTENTS

1. Arendt R.: *The modelling of binary control systems with an application of program SIMULINK* ...7
2. Balicki J.: *Neural methods for finding optimal solutions in pareto sense* ...17
3. Chudy C., Sielicki A.: *Simulation of cyclic processes in flexible manufacturing systems* ...25
4. Czader W., Czernek M., Zembaty L.: *Object oriented design of types of reducers using CAD system* ...33
5. Diakun J., Bil T.: *Optimisation of the active supplying zone of the screw extruder on criteria* ...41
6. Gnaciński P.: *Algorithms of flux optimization in an induction machine* ...55
7. Gnaciński P., Kostyszyn R.: *Simulation methods of temperatures in electrical machines* ...65
8. Grymek Sz.: *Control of nonlinear plant neural approach* ...75
9. Gwiazda A., Knosala R.: *Investigation of constructional forms similarity using the Kohonen net* ...81
10. Jakubik K., Jankowski P.: *Optimalization of the program for the circular quasi-stationary model in "MATHCAD language"* ...89
11. Jendo S., M. Paczkowski W.: *Multicriterion optimum space truss design by catalogue* ...99
12. Knopik L., Styp-Rekowski M.: *Optimization of bicycle's rolling bearings constructional features* ...111

13. Kozak J., Dąbrowski L.: *Problem of electrochemical machining (ECM) optimisation* ...119
14. Łubkowski K., Zawora J.: *The optimization of the pulse electrochemical machining (PECM)* ...127
15. Łubkowski K., Pogorzelski W.: *Ranking of variants of the pulse electrochemical machining* ...135
16. Montusiewicz J., Surdacki P.: *Computer aided performance design of cryomagnet in transients* ...139
17. Ostwald M.: *Vector optimization of sandwich plates* ...147
18. Paczkowski W., Dorobczyński J.: *The mathematical model identification procedure for a drawbridge span in Dziwnów* ...155
19. Paszek A., Knosala R.: *Approximate reasoning in the expert system for the engineering processes design* ...163
20. Pawlak G., Pułaczewski J.: *Application of genetic algorithm for tuning of fuzzy logic controller* ...171
22. Płonka S., Stryczek R.: *An expert system aiding the choice of an optimizing method for processing structure* ...183
23. Siwek B.: *Computer assisted design in graphic editor environment* ...191
24. Tarnowski W.: *Computer simulation of continuous systems by means of SIMULINK package* ...197
25. Weiss Z., Rojek-Mikołajczyk I., Kwiatkowski R.: *Methodology of creation of manufacturing knowledge bases* ...207

## MODELOWANIE UKŁADÓW STEROWANIA BINARNEGO Z ZASTOSOWANIEM PROGRAMU SIMULINK

### 1. Wstęp

Binarnymi układami sterowania nazywamy układy oparte o zasady sterowania sygnałami dwustanowymi. W zależności od konstrukcji obiektu i wymaganych mocy sygnałów sterujących stosowane są nośniki sygnałów: hydrauliczne, pneumatyczne, elektryczne silnopiędowe i elektryczne słabopiędowe. Binarny układ sterowania złożony jest z układu sterującego - sieci logicznej zbudowanej na elementach dwustanowych tj.: zaworach, przekaźnikach, stycznikach i elementach elektronicznych oraz obiektu sterowania o charakterze ciągłym lub dyskretnym. W zamkniętych układach sterowania ciągle sygnały obiektu poprzez progowe lub położeniowe przetworniki zamykają pętle sprzężenia zwrotnego obiektu z układem. Sterowanie binarne jest powszechnie stosowane w różnych gałęziach przemysłu, gdzie wymagane jest cykliczne powtarzanie operacji, zmiana reżimu pracy obiektu, kontrola parametrów granicznych procesu technologicznego oraz sygnalizacja normalnych i awaryjnych stanów pracy.

Przy projektowaniu binarnych układów sterowania, gdy szybkość przesyłania sygnałów dwustanowych i czasy opóźnień działania elementów mogą mieć znaczenie dla prawidłowego sterowania obiektu, duże znaczenie ma zastosowanie badań symulacyjnych. Metody symulacyjne są również używane przy opracowywaniu testów diagnostycznych i badaniu wpływu uszkodzeń elementów dwustanowych na zachowanie się obiektu [1].

Prowadzenie badań symulacyjnych binarnych układów sterowania sprawia pewne trudności, ponieważ należy jednocześnie modelować układ sterujący (opisywany funkcjami boolowskimi i opóźnieniami) oraz obiekt sterowania (opisywany zwykle równaniami różniczkowymi).

Licencjonowane programy symulacyjne jak: SIMNON (Lund University, Sweden), ACSL (Mitchel & Gauthier Associates, Inc.), SIMULINK MATLAB (MathWork, Inc.) [2] ukierunkowane są na modelowanie układów opisanych wielkościami ciągłymi. Druga grupa programów jak: np: ORCAD/SIMULATE (OrCAD System, Corp.) [3] służy do symulacji głównie komputerowych sieci logicznych. Możliwość jednoczesnej symulacji binarnego układu sterującego i wybranych obiektów sterowania o charakterze ciągłym posiada opracowany przez autora program SLOG [4]. Dużą niedogodnością aktualnej wersji programu jest złożona edycja modeli i nieliczny zbiór modeli bibliotecznych obiektów sterowania.

Referat jest próbą oceny przydatności programu SIMULINK do edycji i symulacji dość nietypowych dla tego programu obiektów, jakimi są binarne układy sterowania. Przedstawiono stosowane modele i opracowaną bibliotekę elementów dwustanowych w programie SIMULINK, obiekty sterowania binarnego - wysokopiędny okrętowy silnik spalinowy i regulator prędkości obrotowej oraz przeprowadzone przykładowe badania

\* Katedra Automatyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej, Gdańsk ul. Narutowicza 11/12



symulacyjne dla układu zdalnego sterowania wysokoprężnym nienawrotnym okrętowym silnikiem spalinowym Zgoda-Sulzer typu ZB 40/48 [5]

## 2. Modele elementów dwustanowych

Program SIMULINK zanurzony jest w środowisku programowym MATLAB'a opartym o algebrę liniową i rachunek macierzowy. Przy symulacji układów automatyki obliczenia numeryczne prowadzone są na liczbach zmiennoprzecinkowych. Do reprezentowania sygnałów logicznych stosuje się zmienne logiczne.

W programie SIMULINK do modelowania zmiennych o charakterze logicznym przyjęto umownie dwie wartości algebraiczne przyporządkowane wysokiemu stanowi sygnału (HL) i niskiemu stanowi sygnału (LL) w sposób następujący: HL - 1; LL - 0.

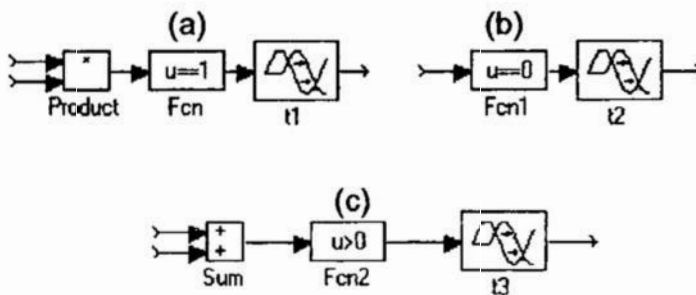
Przy opisie działania elementów dwustanowych przyjęto strukturę modelu, w której wartość wyjściowa sygnału logicznego jest funkcją boolowską zmiennych wejściowych, a występujące opóźnienie sygnału modelowane jest skupionym opóźnieniem załączonym na wyjściu elementu (1) [4],

$$y = \begin{cases} y_i & \text{dla } t < t_0 \\ f_i(u_1, \dots, u_n) & \text{dla } t \geq t_0 \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:  $y$  - wartość sygnału logicznego na wyjściu elementu,  
 $y_i$  - wartość sygnału logicznego na wyjściu przed zmianą sygnałów pobudeń,  
 $u_n$  - wartości sygnałów logicznych na kolejnych wejściach elementu,  
 $t_0$  - czas opóźnienia propagacji sygnału przez element.

Edycja modeli elementów dwustanowych w programie SIMULINK wiąże się z modelowaniem funkcji logicznych, przy przyjętym umownie przyporządkowaniu stanów logicznych wartościom algebraicznym. Opóźnienie sygnału logicznego można modelować standardowym blokiem opóźnienia transportowego. Przy opracowywaniu biblioteki elementów dwustanowych zastosowano elementy standardowe biblioteki programu SIMULINK, rezygnując z możliwości edycji opisu działania elementu za pomocą języka środowiska MATLAB'a.

Z twierdzeń arytmetyki Boole'a wynika, że można utworzyć dowolnie złożoną



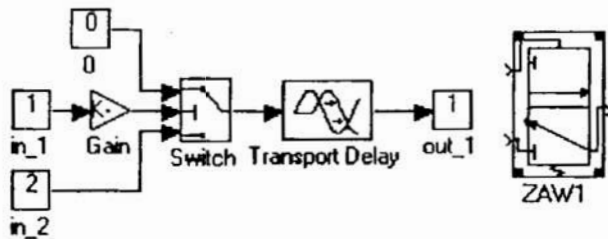
Rys. 1. Modele elementów logicznych: (a) bramki AND, (b) negacji NOT, (c) bramki OR

Fig. 1. The models of logical parts: (a) the gate AND, (b) the negator NOT, (c) the gate OR

funkcję logiczną dysponując iloczynem logicznym AND lub sumą logiczną OR oraz negacją NOT. Na rys.1 pokazano struktury modeli elementów realizujących funkcję AND (rys. 1a), funkcję NOT (rys.1b) oraz funkcję OR (rys.1c). Do zrealizowania negacji sygnału logicznego wystarczy zastosować blok Fcn z funkcją typu relacja  $u = 0$ .

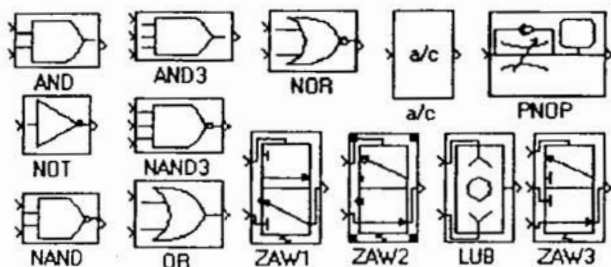
W przypadku spełnienia relacji tj., gdy wartość sygnału wejściowego wynosi 0, na wyjściu bloku pojawia się wartość 1. W przeciwnym przypadku (sygnał logiczny równy 1), na wyjściu bloku pojawia się wartość 0. Do realizacji funkcji AND użyto bloku iloczynu (Product) oraz bloku funkcyjnego z relacją  $u = 1$ .

Można zauważyć, że iloczyn sygnałów logicznych podobnie jak i arytmetycznych, przy



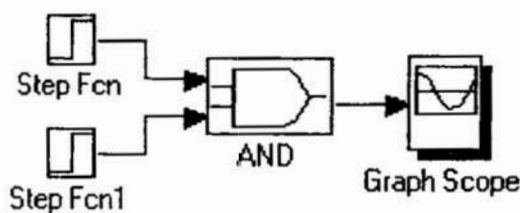
Rys.2. Model elementu dwustanowego - zaworu  
Fig.2. The model of a two-stable part - the valve

przyjętych założeniach jest równy 1 (HL), gdy oba sygnały wejściowe mają wartość 1 (HL). Zastosowany blok funkcyjny z relacją dołączony do wyjścia bloku mnożącego umożliwia otrzymanie skokowej zmiany sygnału wejściowego, przy czym czas narastania sygnału jest zerowy i nie zależy od długości kroku oraz wyboru procedury całkowania numerycznego. Funkcję OR (rys.1c) złożono z bloku sumy i bloku funkcyjnego z relacją  $u > 0$ . Relacja nie jest spełniona jedynie wtedy, gdy na wejściach sumatora wystąpią oba sygnały o wartościach 0 (LL). Zmiana relacji w funkcjach AND i OR na przeciwną powoduje uzyskanie modeli elementów opisanych funkcjami NAND i NOR. Do modelowania działania zaworów hydraulicznych i pneumatycznych zastosowano bloki kluczy (Switch). Przykład modelowanego zaworu przedstawia rys.2.

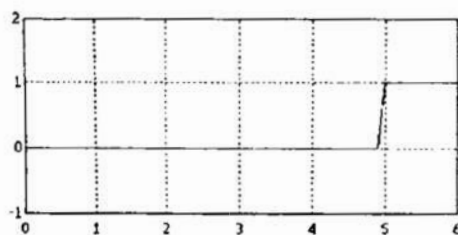


Rys.3. Biblioteka elementów dwustanowych  
Fig.3. The library of two-stable parts

W analogiczny sposób edytowano modele innych elementów dwustanowych, które zestawiono w postaci biblioteki (rys.3). Do biblioteki dołączono również przetwornik progowy zrealizowany na bazie bloku funkcyjnego z relacją  $u_1 > u_2$ , gdzie  $u_1$  jest parametrem przetwornika.



Rys.4. Badanie bramki AND  
Fig4. The investigation of AND gate



Rys.5. Symulowany przebieg wyjścia bramki AND  
Fig.5. The simulated output response of the AND gate

Do obliczeń symulacyjnych zastosowano procedurę Eulera, o minimalnym kroku 0,0001, maksymalnym kroku 0,1 i tolerancji 0,001. Jak widać na przebiegu modelowanego sygnału wyjściowego bramki AND (rys.5), niedokładność modelowania (narastania przebiegu) wynosi również 0,1s. Należy stwierdzić, że elementy dwustanowe posiadają silnie

nieliniowy charakter i dla właściwej symulacji konieczne jest stosowanie bardzo małych kroków w procedurach całkowania numerycznego.

### 3. Modelowanie obiektów sterowania binarnego

Obiekty sterowania binarnego wykonują zwykle wiele zadań (mają wiele reżimów pracy), które są zależne od wartości binarnych sygnałów sterujących i wartości wybranych zmiennych obiektu (stanu obiektu) [6]. Obiekt sterowania binarnego opisuje się zbiorem funkcji - modeli cząstkowych, które modelują wszystkie możliwe zadania. Działanie obiektu w danej chwili czasu opisuje jeden model cząstkowy przyporządkowany funkcji logicznej, której argumentami są binarne sygnały sterujące oraz zmienne logiczne określające spełnienie relacji porządku między wybranymi zmiennymi obiektu i parametrami technologicznymi (konstrukcyjnymi).

$$M(t) = \begin{cases} f_1(t) & \text{dla } g_1(b_1, b_2, \dots, b_m, \{x_i \varphi_k x_j\}) \\ f_2(t) & \text{dla } g_2(b_1, b_2, \dots, b_m, \{x_i \varphi_k x_j\}) \\ \vdots & \vdots \\ f_n(t) & \text{dla } g_n(b_1, b_2, \dots, b_m, \{x_i \varphi_k x_j\}) \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:  $M(t)$  - model matematyczny obiektu sterowania binarnego;  
 $f_i(t)$  - model matematyczny zadania (reżimu) obiektu;  
 $g_i(t)$  - funkcja logiczna „identyfikująca” wykonywane zadanie;  
 $\varphi_i$  - relacja porządku ( $>$ ,  $\geq$ ,  $=$ ,  $\neq$ ,  $<$ ,  $\leq$ );  
 $x_i, x_j$  - wybrane zmienne obiektu i parametry technologiczne;  
 $b_i$  - sygnały sterowania binarnego.

#### Model wysokoprężnego silnika spalinowego jako obiektu sterowania binarnego

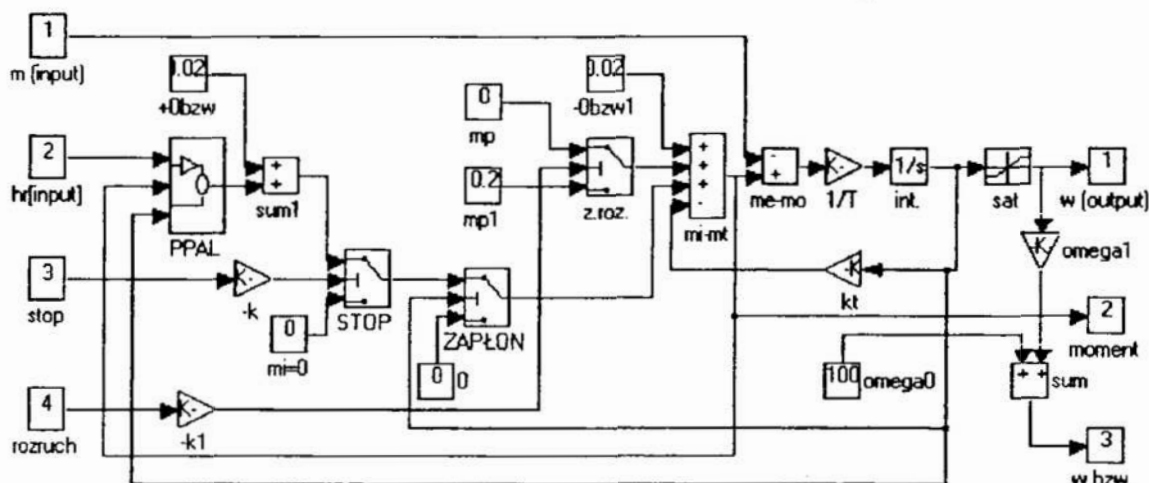
W okrętowym wysokoprężnym nienawrotnym silniku spalinowym  $M_s$  można wyróżnić następujące reżimy pracy: postój, rozruch, praca, zatrzymanie. Silnik jest sterowany dwoma sygnałami binarnymi:  $b_1$  - sygnał stopu, powodujący blokadę pomp paliwowych wtryskiwaczy i  $b_2$  - sygnał rozruchu, który otwiera drogę przepływu powietrza rozruchowego do cylindrów. Silnik można opisać parametrami konstrukcyjnymi  $\omega_z$  - prędkość obrotowa zapłonowa i  $\omega = 0$  - zerowa prędkość silnika. Podtrzymanie reżimu pracy silnika jest możliwe przy spełnieniu relacji  $\omega \geq \omega_z$ . Informacje dotyczące silnika można zestawić następująco:

$$M_s = \begin{cases} \text{stop silnika} & \text{dla } b_2 = 0 \text{ i } \omega = 0 \\ \text{rozruch silnika} & \text{dla } b_1 = 1 \text{ i } b_2 = 1 \\ \text{praca silnika} & \text{dla } b_1 = 0 \text{ i } b_2 = 0 \text{ i } \omega \geq \omega_z \\ \text{zatrzymanie silnika} & \text{dla } b_1 = 1 \text{ i } b_2 = 0 \text{ i } \omega > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Wszystkie wymienione reżimy silnika (3) wiążą się bezpośrednio z opisem dynamiki silnika. Dla reżimu stop występuje zerowy moment i prędkość obrotowa, reżim rozruchu związany jest z momentem indykowanym przez powietrze rozruchowe  $m_p$ , reżim pracy uwarunkowany jest momentem indykowanym w podzespole spalania i turbodoładowania  $m_t$ , natomiast reżim zatrzymania opisuje zerowy moment, dla innej niż przy reżimie stopu relacji zachodzącej między prędkością obrotową i parametrem technologicznym. Nie istnieje potrzeba tworzenia od podstaw modelu silnika jako

obiekty sterowania binarnego, ponieważ można wykorzystać podzespoły modelu reżimu pracy silnika [7]. Pewną niedogodność stwarzają stosowane w modelu silnika wartości względne sygnałów. Wartość względna 0 oznacza w istocie  $\omega_0$ , a wartość  $x \in [0, 1]$  oznacza  $x \omega_1 + \omega_0$ .

Przy opracowywaniu modelu silnika jako obiektu sterowania binarnego (rys.6) przy-



Rys.6. Model silnika jako obiektu sterowania binarnego  
Fig.6. The model of Diesel engine as a binary control object

jęto wartości  $\omega_0 = 100\text{obr/min}$ ,  $\omega_1 = 400\text{obr/min}$ , co daje maksymalną prędkość  $\omega_{\max} = 500\text{obr/min}$  - typową wartość dla silnika średnioobrotowego. Podzespół spalania i mas wirujących modelują bloki sumatora  $mi+mt$ ,  $me-m0$ , człony proporcjonalne  $1/T$  i  $kt$  oraz człon integratora. Integrator ma początkową wartość  $-0,25$ , co odpowiada wartości bezwzględnej  $0\text{obr/min}$ . Przy brakuysterowania podzespołu wartość  $-0,25$  jest podtrzymywana przez blok stałej wartości  $-0.025$ , którego parametr wynika ze wzmacnienia członu  $kt$  ( $0,1$ ). Człon proporcjonalny  $omega1$  (wzmocnienie  $400$ ), blok stałej wartości  $omega0$  ( $100$ ) oraz sumator  $sum$  służą do odtworzenia bezwzględnej wartości prędkości obrotowej silnika. Zdolność silnika do zapłonu  $\omega \geq \omega_z$  modeluje klucz ZAPŁON, który sterowany jest wartością względnej prędkości obrotowej. Dla  $\omega < \omega_z$  klucz przyjmuje dolne położenie przesyłając zerową wartość indykowanego momentu do sumatora  $mi+mt$ . Po przekroczeniu wartości zapłonowej klucz przyjmuje górne położenie otwierając drogę przepływu sygnału  $m_i$ .

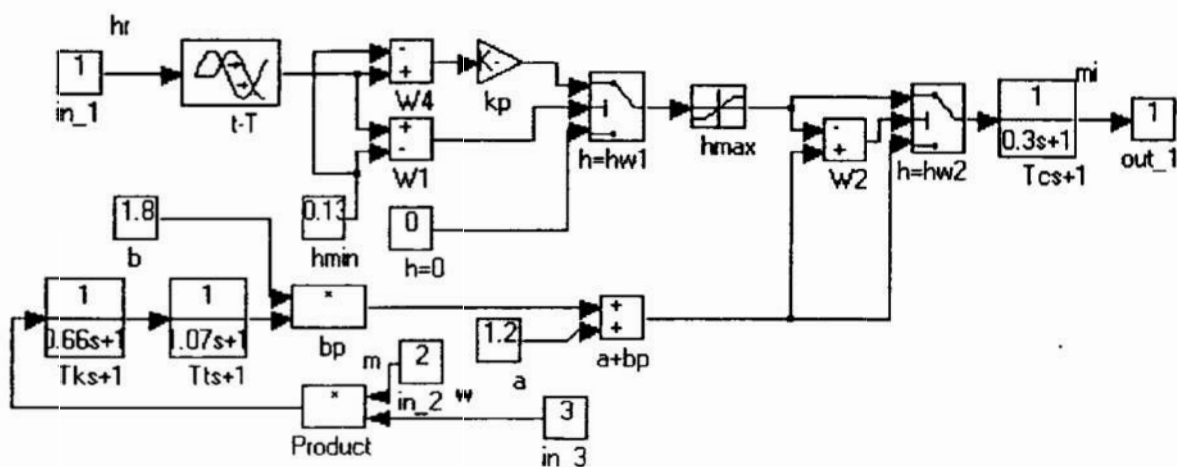
Do modelowania rozruchu służy klucz z.roz. Klucz sterowany jest z wejścia 4 modelu silnika poprzez człon proporcjonalny o wzmacnieniu  $-1$ . Przy pobudzonym wejściu sygnałem wysokim (HL) sygnał sterujący posiada wartość  $-1$  i klucz przyjmuje dolne położenie. Do podzespołu spalania i mas wirujących zostaje przesłana zadania w bloku  $mp1$  wartość momentu indykowanego przez powietrze rozruchowe ( $0,2$ ), powodując inercyjne narastanie sygnału prędkości obrotowej. Przy brakuysterowania klucza wartość  $m_p$  wynosi  $0$ .

Zatrzymanie silnika modelowane jest za pomocą klucza STOP, który sterowany jest z wejścia 3 modelu silnika poprzez człon proporcjonalny o wzmacnieniu  $-1$ . Przy pobudzeniu wejścia sygnałem wysokim (HL) klucz przyjmuje dolne położenie przesyłając zerową wartość  $m_i$ . Jeżeli wejście 3 nie jest pobudzone (LL) klucz znajduje



się w górnym położeniu, przesyłając modelowaną wartość momentu indykowanego do podzespołu spalania i mas wirujących. Sumator sum1 i blok stałej wartości +0bzw (+0,025) służy do skompensowania sygnału -0bzw (-0,025) przy pracy silnika.

Podzespół paliwowy i turbodoładowania przedstawiony został w postaci makrobloku PPAL. Rozwiniętą strukturę podzespołu przedstawiono na rys.7.



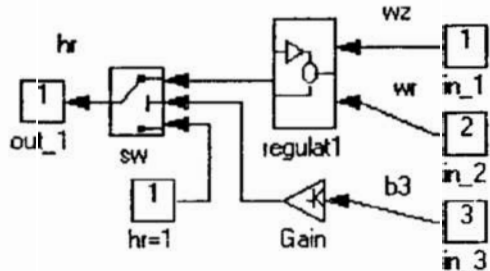
Rys. 7. Model podzespołu paliwowego i turbodoładowania  
Fig. 7. The model of a fuel and turboload subunit

#### Model regulatora prędkości obrotowej jako obiektu sterowania binarnego

Przy rozruchu silnika spalinowego, w celu osiągnięcia większej pewności zapłonu stosuje się silowniki wymuszające pełną nastawę listwy paliwowej - tzw. booster. Model regulatora z uwzględnieniem sterowania binarnego można przedstawić następująco:

$$M_r = \begin{cases} \text{model regulatora dla } b_3 = 0 \\ h_r = 1 & \text{dla } b_3 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

Utworzony model (rys.8) zawiera makroblok regulatora prędkości obrotowej wysokoprężnego silnika spalinowego [7].

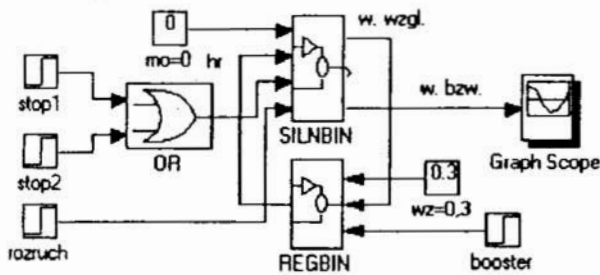


Rys. 8. Struktura modelu regulatora jako obiektu sterowania binarnego  
Fig. 8. The model of the governer as a binary control object

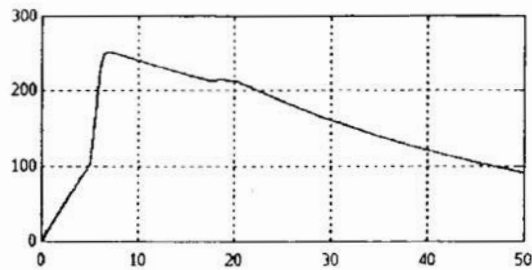
Przyysterowaniu wejścia 3 wysokim stanem logicznym (HL) klucz sw przyjmuje dolne położenie, przesyłając na wyjście wartość  $h_r = 1$ . W przeciwnym przypadku wartość  $h_r$  jest modelowana przez makroblok Regulat1. Rozwinięty schemat makrobloku Regulator 1 przedstawiony jest w [7].

W celu sprawdzenia poprawności redagowanych modeli zestawiono układ regulacji prędkości obrotowej z dwóch makrobloków: SBIN - modelu silnika jako obiektu

sterowania binarnego i REGBIN - regulatora prędkości obrotowej jako obiektu sterowania binarnego (rys.9). Wykonano badania symulacyjne układu regulacji (rys.10) dla manewrów silnika: rozruch, praca, zatrzymanie. Przebieg prędkości obrotowe przedstawia pracę układu regulacji bez działania booster'a. W blokach wejściowych skoków jednostkowych przyjęto następujące parametry: w chwili 0s sygnały stopu i



Rys. 9. Struktura układu regulacji prędkości silnika jako obiektu sterowania binarnego  
Fig. 9. The structure of the speed control system as a binary control object



Rys. 10. Symulowany przebieg prędkości obrotowej układu  
Fig. 10. The simulated rotational speed of the control system

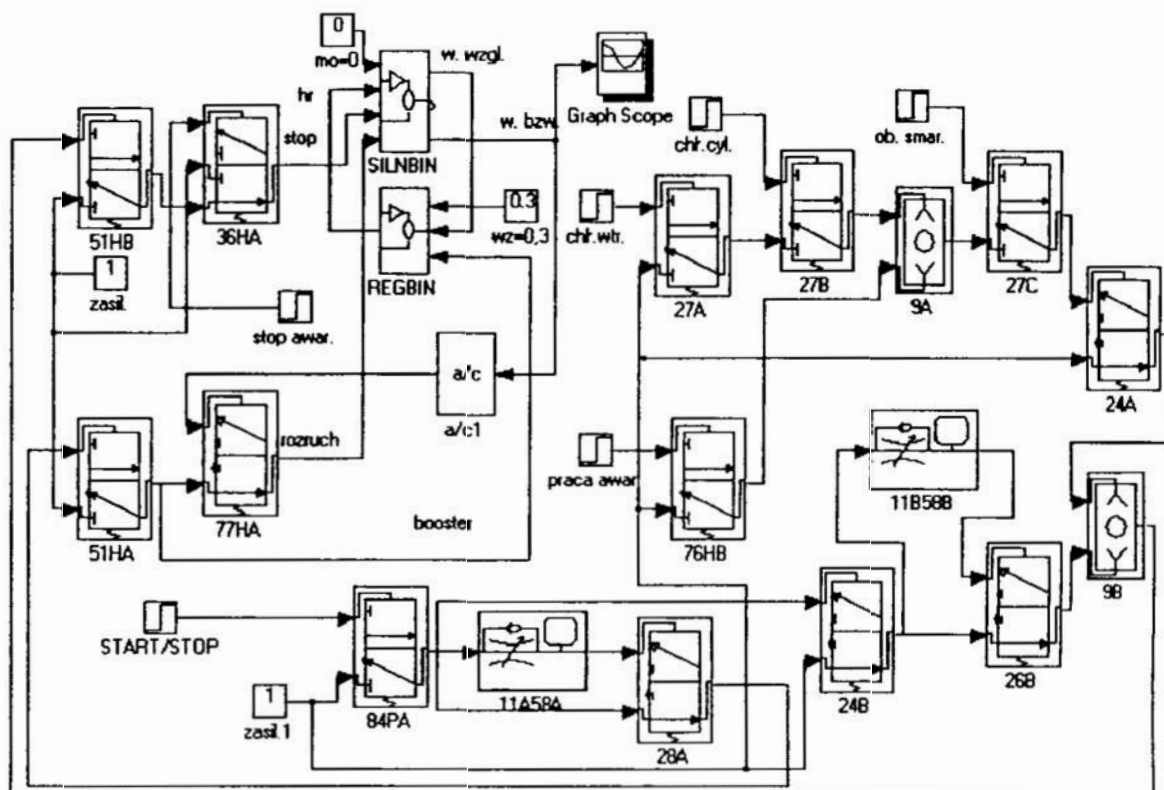
rozzuchu mają wartość 1 (stop1 - HL, stop2 - LL); w chwili 5s oba sygnały mają wartość 0 (LL); w chwili 20s sygnał stopu przyjmuje ponownie wartość 1 (stop1 - LL, stop2 - HL). Przyjęte stany logiczne wejść modelują dopuszczalne sterowanie binarne silnika przy manewrach: 0 - 5s rozzuch, 5 - 20s praca silnika, 20 - 50s zatrzymanie silnika. Wartość zadanej prędkości obrotowej silnika wynosi  $\omega_{zad} = 0,3$ , co odpowiada bezwzględnej wartości 220obr/min. Na wykresie widać strome narastanie przebiegu w przedziale 5 - 8s związane z zapłonem silnika i występujące przeregulowanie. Prędkość obrotowa w przedziale 17 - 20s osiąga stan ustalony ok. 220obr/min - regulator wykazuje uchyb statyczny.

#### 4. Badania symulacyjne binarnego układu sterowania

Przykładowe badania symulacyjne binarnego układu sterowania wykonano dla układu zdalnego sterowania wysokoprężnym nienawrotnym silnikiem spalinowym Zgoda-Sulzer ZB 40/48 [5]. Na podstawie schematu ideowego zestawiono strukturę uproszczonego modelu układu w programie SILMULINK (rys.11). Pominięto część obwodów elektronicznych, łączniki ciśnieniowe oraz elementy dwustanowe zainstalowane na silniku. Jako obiekt sterowania binarnego przyjęto omówiony w p.3 wysokoprężny silnik spalinowy oraz regulator prędkości obrotowej. Dla wszystkich zaworów przyjęto jednakowe opóźnienia propagacji sygnałów 0,1s.

Do programowego załączania zaworu rozzuchowego 84PA użyto blok skoku jednostkowego START/STOP, który zmienia wartość 1 na 0 w chwili 60s. Bloki stałej wartości zasil. i zasil.1 odpowiadają dwóm obiegom zasilania pneumatycznego układu. Przy rozzuchu silnika zawór 84PA zasila element opóźniający 11A58A, zawór 28A i wysterowuje zawór 24B. Czas opóźnienia elementu 11A58A wynosi 8s. W przedziale czasu 0 - 8s zawór 28A nie jest wysterowany i przesyła sygnał sterujący do zaworu 51HA, który otwiera drogę przepływu sygnału do zaworu 77HA. Zawór 77HA sterowany jest z przetwornika progowego (HL dla 100obr/min). Przy prędkości  $\omega < 100\text{obr/min}$  zawór przesyła powietrze rozzuchowe do silnika powodując inercyjny wzrost prędkości obrotowej. Po przekroczeniu 100obr/min zawór odcina powietrze rozzuchowe i następuje zapłon silnika. W przedziale czasu 0 - 8s z wyjścia zaworu 51HA zasilany jest booster podając pełną dawkę paliwa do silnika. Po 8s sygnał wyjściowy elementu 11A58A przyjmuje stan wysoki i odpowietrza zawory 51HA, 77HA biorące udział przy rozzuchu; sygnał booster'a zmienia się na 0.



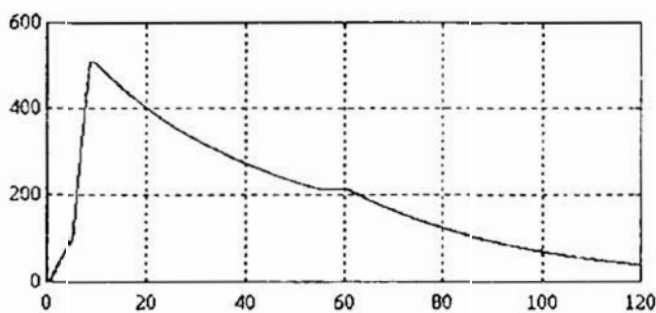


Rys. 11. Struktura układu zdalnego sterowania silnikiem Zgoda-Sulzer ZB40/48  
 Fig. 11. The structure of a remote control system of the Diesel engine ZB40/48

Omówione obwody realizujące rozruch nie są modelowane w pełni poprawnie zamodelowane, ponieważ do chwili możliwości zapłonu silnika obwody elektroniki blokują pompy paliwowe (wysterowany zawór 76HA), a rozruch może być kilkakrotnie powtarzany przez czas trwania opóźnienia elementu 11A58A.

Po wyłączeniu zaworu rozruchowego 84PA zawór 24B nie jest wysterowany. Na jego wyjściu pojawia się ciśnienie zasilające element opóźniający 11B58B oraz zawór 26B. Wartość opóźnienia wynosi 40s. W przedziale czasu wyznaczonym przez opóźnienie poprzez zawory 26B, 9B, 51HB, 76HA blokowane są pompy paliwowe silnika (sygnal stopu). Po upływie 40s zawór 26B przełącza się odcinając sygnal stopu.

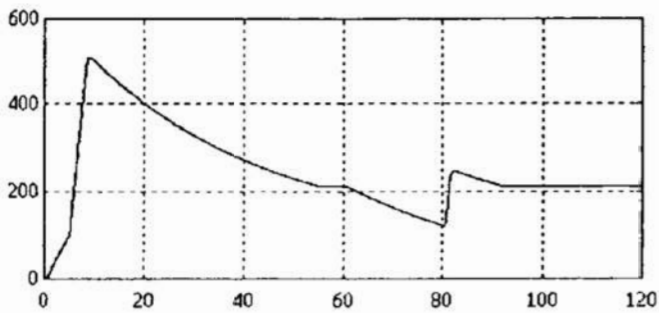
Zawory 27A, 27B, 9A, 27C, 24A spełniają funkcje zabezpieczeń silnika przed zanikiem ciśnienia wody chłodzącej wtryskiwacze i cylindry oraz przed zanikiem ciśnienia obiegu smarowania.



Rys. 12. Symulowany przebieg prędkości obrotowej silnika  
 Fig. 12. The simulated rotational speed of the Diesel engine

Dla podanych powyżej parametrów wykonano badania symulacyjne układu (rys. 12), rejestrując bezwzględną wartość prędkości obrotowej. W następujących przedziałach czasu można zauważyć: 0 - 4s narastanie prędkości obrotowej na skutek momentu inderowanego przez powietrze rozruchowe; 4 - 8s zapłon

silnika i widoczny efekt działania booster'a - prędkość obrotowa przekracza wartość zadaną i osiąga ok. 500obr/min; 8 - 60s praca regulatora dla przeregulowania - zadana wartość prędkości obrotowej 220obr/min osiągnięta jest w chwili 55s; 60 - 100s blokada pomp paliwowych - prędkość obrotowa maleje inercyjnie do wartości mniejszej od obrotów zapłonowych; 100 - 120 dalsze zmniejszanie się prędkości obrotowej.



Rys.13. Symulowany przebieg prędkości obrotowej dla innego opóźnienia elementu 11B58B

Fig.13. The simulated rotational speed of the Diesel engine for the faulty chosen time delay of part 11B58B

W celu ilustracji wpływu doboru parametrów na działanie układu, zmieniono opóźnienie elementu 11B58B w torze "stopu" na wartość 20s. Symulowany przebieg prędkości obrotowej przedstawia rys.13. Do chwili 80s oba symulowane przebiegi są identyczne. W chwili 80s wyłączony zostaje sygnał stopu blokujący pompy paliwowe. Ponieważ prędkość obrotowa silnika jest większa od zapłonowej, silnik powraca do reżimu pracy i można go zatrzymać jedynie przyciskiem stop awaryjny.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że program SIMULINK jest profesjonalnym narzędziem do edycji i symulacji nietypowych dla tego programu obiektów, jakimi są binarne układy sterowania. Użytkownik ma możliwość tworzenia bibliotek modeli elementów i podzespołów, które można "maskować" tworząc ikony makrobloków. Przy edycji złożonych obrazów (ikon) makrobloków jest wygodnie posługiwać się programem ICONEDIT dostępnym w oknie programu MATLAB.

Do symulacji binarnych układów sterowania dobre właściwości wykazuje procedura Eulera. W trakcie badań symulacyjnych zauważono, że po przerwaniu symulacji (stop w oknie symulacja) procedura pamięta ostatni używany krok symulacji. Po wznowieniu symulacji zdarza się, że liniowe odcinki są symulowane z bardzo małym krokiem, co potrafi nieraz bardzo wydłużać czas oczekiwania na wyniki. Procedura Adams'a-Gear'a, przy takich samych parametrach co w procedurze Euler'a, zastosowana do symulacji układu regulacji (rys.9) okazała się na tyle niedokładna, że nie osiągnięto zapłonu silnika. Przedstawione w referacie modele obiektów sterowania binarnego służą jedynie do ilustracji zaproponowanej metodyki badań symulacyjnych. W modelu silnika jako obiektu sterowania binarnego ważną rolę odgrywa poprawne modelowanie podzespołu mas wirujących. Używany w badaniach symulacyjnych liniowy model podzespołu mas wirujących nie odzwierciedla dokładnie właściwości dynamicznych silnika, co można zauważyć na przebiegu symulowanej prędkości obrotowej przy manewrze stop (zatrzymanie silnika).

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych okazały się na tyle zachęcające, że obecnie opracowywana jest biblioteka modeli elementów dwustanowych obejmująca elementy: pływowe, stykowe oraz elementy elektroniczne serii TTL - bramki logiczne, przerzutniki i inne. Modele elementów opisywane są w języku środowiska MATLAB'A.

## Literatura

1. Arendt R.: *Diagnostyka binarnych układów sterowania okrętowych zespołów napędowych*. IV Sympozjum Wojskowej Techniki Morskiej, Gdynia, 26-27 października 1993.
2. Szymkat M.: *Komputerowe wspomaganie w projektowaniu układów regulacji*. Warszawa, WNT 1993.
3. Zieliński *ORCAD VST*. PWN Warszawa 1990.
4. Arendt R.: *Zastosowanie programu SLOG do symulacji binarnych układów sterowania*. XI Ogólnopolska Konferencja Polioptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania Mielno 1993.
5. Z.U.T. Zgoda, *Dokumentacja techniczno-ruchowa silnika wysokoprężnego Zgoda - Sulzer typu ZB 40/48 i ZBU 40/48*.
6. Arendt R.: *Metoda modelowania symulacyjnego obiektów o charakterze ciągłym z opisem matematycznym zależnym od dyskretnych sygnałów sterujących*. VII Krajowa Konferencja Dyskretnych Procesów Przemysłowych, Kozubnik k. Porąbki 16 - 19 września 1992.
7. Arendt R. *Modelowanie właściwości okrętowych zespołów napędu głównego statku z zastosowaniem programu SIMULINK*. XII Ogólnopolska Konferencja Polioptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania Mielno 1994.

## Streszczenie

W referacie przedstawiono zastosowanie programu SIMULINK do symulacji binarnych układów sterowania. Do modelowania sygnałów logicznych przyporządkowano wartości arytmetyczne 0 i 1 stanom logicznym HL i LL. Dla tak postawionych założeń opracowano modele bramek logicznych, zaworów oraz progowego przetwornika A/C, które zestawiono w bibliotece programu. Zaprezentowano obiekty sterowania binarnego: wysokoprężny silnik spalinowy oraz regulator prędkości obrotowej. Przeprowadzono badania symulacyjne układu zdalnego sterowania silnikiem Zgoda-Sulzer ZB40/48. Omówiono otrzymane wyniki i przydatność programu SIMULINK do symulacji binarnych układów sterowania.

## THE MODELLING OF BINARY CONTROL SYSTEMS WITH AN APPLICATION OF PROGRAM SIMULINK

### Summary

In the paper an application of program SIMULINK for a simulation of binary control systems is presented. For logical signals modelling, arithmetical values 0 and 1 to logical states are assigned. Using above assumptions, models of: logical gates, valves and a threshold A/D converter are worked out and set up in the program library. Binary control objects: a marine Diesel engine and a rotational speed governor are presented. Simulation investigations of a remote control system of the Zgoda-Sulzer 's Diesel engine are carried out. Results of simulation investigations and usefulness of the program SIMULINK for binary control systems simulation are discussed.

## NEURAL METHODS FOR FINDING OPTIMAL SOLUTIONS IN PARETO SENSE

### 1. Introduction

Designers must deal with the process of selecting a possible solution from all the available alternatives [14]. Multicriteria optimization addresses the simultaneous minimization or maximization of all design objectives or goals [2]. Generally, these objectives are conflicted so that the final design must be a compromise among them. There are many methods for generating Pareto-optimal alternatives [15]. The nonnegative convex combination method [5] is very useful for computer programming. There are two main disadvantages of this method. The efficient points on nonconvex part of efficient frontier cannot be generated by this method. It is impossible to generate the efficient frontier that remains after excluding the efficient points with the same direction parameter [7]. The  $\varepsilon$ -constraint method [11] eliminates these disadvantages. In this method one particular objective function is the primary objective function and all other objective functions act as constraints. A weighted minimax method [9] overcomes convexity limitations of the nonnegative convex combination method. The radial method has been proposed by Ameljańczyk [2]. It uses set of lines, which contain an ideal point and points of the efficient frontier. The radial method gives the representation of the concave Pareto frontier.

The intensive investigations into the applications of artificial neural networks (ANN) for solving optimization problems proved that it can solve some optimization problems in real time [4]. A Traveling Salesman Problem has been discussed in [1,12,17]. Minimization method to linear optimization problem has been presented in [4]. Lagrange Programming Neural Networks based on a Lagrange function have been constructed by Zhang and Constantindes [18]. The neural technique for a nonlinear optimization problem has been elaborated by Lillo, Hui and Źak [10]. The ANN for solving discrete optimization problem has been given in [3,16]. ANN are described in [8,13].

In the paper, the most useful methods for generating efficient solution have been described. The new threshold algorithm for Pareto solutions has been proposed. Finally, ANN based on nonnegative convex method algorithm for finding Pareto-optimal solution has been presented. The recurrent ANN in equilibrium point represents an efficient point.

---

\* *Akademia Marynarki Wojennej, 81-919 Gdynia 19, ul. Śmidowicza*

## 2. METHODS FOR FINDING PARETO-OPTIMAL SOLUTIONS

The form of a multicriterion optimization problem is related with the decision situation, especially with decision preferences. Decision preferences determine scalar particular criteria and the domination relation. In multicriterion optimization problem of finding Pareto-optimal solutions all scalar functions are simultaneously minimized or maximized. Consider the multicriterion optimization problem of finding Pareto-optimal solutions in the following form:

$$(X, F, " \leq " ), \quad (1)$$

where

1)  $X$  - an feasible solutions set

$$X = \{x \in \mathbb{R}^M \mid x = (x_1, \dots, x_m, \dots, x_M)^T\}$$

2)  $F$  - a quality criterion

$$F : X \rightarrow \mathbb{R}^N$$

$$F(x) = [F_1(x), \dots, F_n(x), \dots, F_N(x)]^T \quad x \in X$$

$$F_n : X \rightarrow \mathbb{R}^1 \quad n = \overline{1, N}$$

$$Y = F(X) \text{ - a criterion space (output set)}$$

3) " $\leq$ " - a domination relation in Pareto sense in the criterion space

$$a, b \in Y, \quad a = (a_1, \dots, a_n, \dots, a_N)^T, \quad b = (b_1, \dots, b_n, \dots, b_N)^T,$$

$$" \leq " = \{ (a, b) \in Y \times Y \mid a_n \leq b_n, \quad n = \overline{1, N} \} \in Y \times Y$$

A point  $x^* \in X$  is a global efficient point (Pareto-optimal solution) for the mapping  $F : X \rightarrow \mathbb{R}^N$  if there exists no other point  $x \in X$  such that

$$F_n(x) \leq F_n(x^*), \quad n = \overline{1, N}$$

$$F_i(x) \leq F_i(x^*), \quad \text{for some } j \in \overline{1, N}.$$

A point  $x^* \in X$  is a local efficient point for the mapping  $F : X \rightarrow \mathbb{R}^N$  if there exists an  $\varepsilon_0 > 0$ , such that in the neighborhood  $N(x^*, \varepsilon_0)$  of  $x^*$ , there exists no other point  $x \in X$  such that

$$F_n(x) \leq F_n(x^*), \quad n = \overline{1, N}$$

$$F_i(x) \leq F_i(x^*), \quad \text{for some } j \in \overline{1, N}.$$

When no distinction is made between local and global efficient points the point is simply called efficient point. The efficient set  $X^*$  contains all efficient points. The efficient frontier of the output set  $Y$  is the picture of the feasible solutions set  $X$ :

$$Y^* = \{y^* \in Y \mid y^* = F(x^*), \quad x^* \in X\}$$

The most widely used method of generating efficient points is by minimizing a nonnegative convex combination of the scalar particular functions as below.



$$\min_{x \in X} \left\{ \sum_{n=1}^N \alpha_n F_n(x) \right\} \quad (2)$$

where

$$\alpha_n \geq 0 \quad n = \overline{1, N}$$

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n = 1$$

The gradient vector of  $\sum_{n=1}^N \alpha_n F_n(x)$  with respect to  $F$  is  $\alpha$ . Due to constraints

imposed on  $\alpha$ ,  $\alpha \neq 0$ , and it must lie in the first orthant. At the solution point  $y^*$  of problem (2) for a given value of  $\alpha$ , the vector  $\alpha$  must be orthogonal to tangent hyperplane of the boundary of the output set  $Y$ . However, the nonnegative convex combination method has two main disadvantages. Firstly, there are points that cannot be generated irrespective to what values of the components of the vector  $\alpha$  are used and the non-convex part of the efficient frontier cannot be generated. Since present methods of minimizing a single objective function can find only one solution point, it is impossible to generate the efficient frontier that remains after excluding the efficient points. In  $\varepsilon$ -constrained method one of the objective functions constitutes the primary objective function and all other objectives act as constraints. It solves the following constrained optimization problem:

$$\min_{x \in X} F_i(x) \quad (3)$$

subject to

$$F_n(x) \leq \varepsilon_n, \quad n \in \{1, \dots, N\} \setminus \{i\} \text{ for different values of } \varepsilon_n.$$

Assuming problem (3) has a solution, the solution obtained is a local efficient point. The systematic variation of  $\varepsilon_n$  generates the efficient frontier. This method overcomes the first disadvantage of the nonnegative convex combination method.

The weighted minimax method solves the following minimization problem:

$$\min_{x \in X} \left\{ \max_{n=1, N} \alpha_n F_n(x) \right\} \quad (4)$$

subject to

$$\alpha_n \geq 0 \quad n = \overline{1, N}$$

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n = 1$$

The solution obtained in this way is a local efficient point. A systematic variation of the  $\alpha$  generates the efficient frontier. This method overcomes convexity limitation of the nonnegative convex combination method.

The radial method [2] uses set of lines, which contains an ideal point and points of the efficient frontier. The radial method gives the representation of the concave Pareto frontier. The radial method solves the following minimization problem:



$$\min_{y \in Y \cap l} \|y^0 - y\|_2 \quad (5)$$

where

$l = \{y \in \mathbb{R}^N \mid y = y^0 + s^1 \in \mathbb{R}^N, t \in \mathbb{R}\}$  - the radius (line) from the ideal point,

$s^1$  - the direction of line  $l$ ,

$t$  - a real parameter,

$y^0$  - an ideal point,

$\|\cdot\|_2$  - an Euclid norm.

The direction of radius is changed and the representation of Pareto-optimal solutions is generated.

Moreover, there exist methods, which find the hierarchical solutions for different permutations of scalar particular criteria. Similarly, we can change the parameter  $p \geq 1$ , and get the representation of Pareto-optimal solutions.

### 3. THE THRESHOLD MINIMAX METHOD FOR FINDING PARETO-OPTIMAL SOLUTIONS

Let us consider the following minimization problem:

$$\min_{x \in X} U(x, \eta) \quad (6)$$

where

$U(x, \eta) = \max_{n=1, N} \{(F_n(x) - \eta_n)\}$  - the scalar threshold function,

$\eta_n$  - the threshold value for scalar criterion  $F_n(\cdot)$ ,

$\eta = (\eta_1, \dots, \eta_n, \dots, \eta_N)^T$ .

We can prove the following theorems.

*Theorem 1.* If  $x^*$  is a strong local minimum point of the threshold function  $U(x, \eta)$  for a given value of  $\eta$ , then  $x^*$  is a local efficient point of  $(X, F, \leq)$ .

*Theorem 2.* If  $x^*$  is an efficient point, then there exists a value of  $\eta = \eta^*$  such that  $x^*$  is a local minimum point of  $U(x, \eta)$ .

From theorems 1 and 2 it can be concluded that using the threshold function we can generate all efficient points regardless of the convexity of the efficient frontier.

*Corollary 1.* A point  $y^* \in Y$  is a local efficient point if and only if there exists an  $\varepsilon_0$ -neighborhood of  $f^*$ ,  $N(f^*, \varepsilon_0)$ , and a value of  $\eta^*$  such that  $M(y^*) \cap Y \cap N(f^*, \varepsilon_0) = \{y^*\}$ , where  $M(y^*) = \{y \in Y \mid U(x, \eta) \leq U(x^*, \eta), y^* = F(x^*)\}$ .

Using the results of theorems 1 and 2, it is straightforward to obtain the necessary and sufficient conditions for optimality for multicriterion optimization problem.

### 4. THE NEURAL NONNEGATIVE CONVEX METHOD FOR FINDING PARETO OPTIMAL SOLUTION

Methods presented in this paper can be implemented as artificial neural networks. It can be possible to use one of known neural methods for minimization programming with only one criterion. The intensive investigations into the applications of artificial

neural networks for solving optimization problems proved that it can solve some optimization problems in real time [4]. A Traveling Salesman Problem has been discussed in [1,12,17]. Minimization method to linear optimization problem has been presented in [4]. Lagrange Programming Neural Networks based on the Lagrange function have been constructed by Zhang and Constantindes [18]. The neural technique for nonlinear optimization problem has been submitted by Lillo, Hui and Zak [10]. The ANN for solving discrete optimization problem have been given in [3,16]. ANN are described in [8,13]. Unfortunately, designers have to prepare own neural methods in many cases. The most important rules of preparation the neural method for finding Pareto-optimal solution will be presented below.

The most popular nonnegative convex method for finding efficient points is considered. In this method the minimization problem (2) is solved. Let us consider the following particular problem (X,F,"≤") of design the allocations of program modules and processor types. Details of it are given in [3].

1) X - a feasible solutions set

$$X = \{x \in B^{2V+J} \mid x = (x_{11}, \dots, x_{v1}, \dots, x_{v2}, x_{11}^\pi, \dots, x_{ij}^\pi, \dots, x_{2J}^\pi)^T;$$

$$\sum_{i=1}^2 x_{vi} = 1 \quad v = \overline{1, V};$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{j=1}^J c_v x_{vi} x_{ij}^\pi \leq \sum_{j=1}^J d_j x_{ij}^\pi \quad i = \overline{1, 2};$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij}^\pi \leq \quad i = \overline{1, 2}; \quad \}$$

2) F - a quality criterion

(7)

$$F : X \rightarrow R^2$$

$$F(x) = [F_1(x), F_2(x)]^T \quad x \in X$$

$$F_1(x) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^J \delta_j x_{ij}^\pi$$

$$F_2(x) = \sum_{v=1}^V \sum_{i=1}^2 t_{vi} x_{vi} + \sum_{v=1}^V \sum_{u=1}^V \sum_{i=1}^2 \tau_{vu} x_{vi} (1 - x_{ui})$$

For finding one local efficient point of problem (7) we can use the Hopfield's ANN (PHANN). PHANN contains  $M=2V+I(J+2)+2N$  neurons. The outputs of neurons represent decision variables  $x_{vi}$ ,  $x_{ij}^\pi$ , (and related dummy variables  $s_j$ ,  $z_i$ ), and parameters  $\alpha_n$  (and related dummy variables  $\beta_n$ ). PHANN can represent one Pareto-optimal solution in equilibrium point. PHANN satisfies the Cohen-Grossberg's conditions of global stability [6] as a Hopfield's ANN. In an analog model of Hopfield's ANN the behavior of neurons is described by the differential equations [17]. The synaptic weights are symmetric. The activation function is a sigmoid

function [8]. If external inputs are constant in time, then Hopfield's ANN reaches the equilibrium point. Hopfield proposed the following an energetic function:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^M w_{rm} g_r(u_r) g_m(u_m) + \sum_{r=1}^M I_r g_r(u_r) \quad (8)$$

where

$w_{rm}$  - the synaptic weight from the neuron  $x_r$  to the neuron  $x_m$ ,

$g_r(u_r)$ - the output value of neuron  $x_r$  after activation the value  $u_r$  by the logistic function  $g_r$ ,

$I_r$  - the value of external input to neuron  $x_r$ .

## 5. THE NEURAL ENERGETIC FUNCTION FOR PHANN

The energetic function for PHANN are constructed as below:

$$E(x, \alpha) = \sum_{n=1}^N \alpha_n F_n(x) + \beta \sum_{l=1}^L h_l(x) \quad (9)$$

where

$\beta$  - a punish parameter for no satisfaction of constraints,

$h_l(x)$  - a nonnegative punish function for no satisfaction  $l$ th constraint for solution  $x$ .

The objective function and punish functions can be presented by the separate particular energetic functions. For the objective function we get the following form of separate energetic function:

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n F_n(x) = -\frac{1}{2} \sum_{r=1}^M \sum_{m=1}^M w_{rm}^f x_r x_m - \sum_{r=1}^M I_r^f x_r \quad (10)$$

where

$w_{rm}^f$  - the synaptic weight from  $r$ th neuron to  $m$ th neuron related with the objective function  $f(x, \alpha)$ ,

$I_r^f$  - the external input of  $r$ th neuron related with the objective function  $f(x, \alpha)$ ,

In the similar way we can obtain the forms of particular energetic functions for the punish functions. So, we have the global energetic function of PHANN:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{r=1}^M \sum_{m=1}^M (w_{rm}^f + \beta \sum_{l=1}^L w_{rm}^l) x_r x_m - \sum_{r=1}^M (I_r^f + \beta \sum_{l=1}^L I_r^l) x_r \quad (11)$$

We can calculate the particular weights and particular external inputs as follow. For instance, let us consider the chosen constraint:

$$\sum_{j=1}^J x_{ij}^\pi < 1, \quad i = \overline{1, I};$$

This constraint has to be transformed:

$$\left( \sum_{j=1}^J x_{ij}^\pi \right) + s_i = 1, \quad i = \overline{1, I}; \quad (12)$$

The particular energetic function related with this type of constraints is as follow:

$$h_i(x) = (1 - \sum_{j=1}^J x_{ij}^\pi - s_i)^2 + \sum_{j=1}^J x_{ij}^\pi (1 - x_{ij}^\pi) + \sum_{j=1}^J s_j (1 - s_j), \quad i = \overline{1, I};$$

Using the method [3] for calculating weights and the external inputs we get:

$$r_{j, rk}^i = \begin{cases} -2 & \text{when } j \neq k \\ 0 & \text{in the other case} \end{cases}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (13)$$

$$I_{ij}^i = 2J + 1 \quad (14)$$

Similarly, we can obtain the others synaptic weights and external inputs which are related with the others constraints and the objective function.

## 6. CONCLUDING REMARKS

In the paper, the most widely used methods for finding efficient solutions have been described. The new threshold algorithm for Pareto solutions has been proposed. These methods can be implemented as artificial neural networks. ANN based on nonnegative convex method algorithm for finding Pareto-optimal solution has been presented. The recurrent ANN in equilibrium point represents an efficient point. The rules of elaborating the Hopfield's energetic functions related with the minimization problem have been presented. Proposed approach was applied for solving compromise optimization problems with parameter  $p=1$  and obtained results have shown that this way is very promising.

## References

1. Aiyer S.V.B., Niranjana M., Fallside F.: *A Theoretical Investigation into the Performance of Hopfield Model*. IEEE Trans. on Neural Networks, vol.1, No.2, 1990, pp. 204-215.
2. Ameljańczyk A.: *Multicriterion Optimization*. WAT, Warszawa 1986.(in polish)
3. Balicki J.: *Neural Optimization of Programs Allocations in Distributed Computer Systems*. Proc. in The First Conference "Neural Networks and Their Applications", vol.1, Częstochowa 1994, pp.136-141.(in polish)
4. Cichocki A., Unbehauen R.: *Neural Networks for Solving Systems of Linear Equations and Related Problems*. IEEE Trans. on Circuits and Systems, vol. 39, No.2, February 1992, pp. 124-137.
5. Charalambous C.: *A New Approach to Multicriterion Optimization Problem and Its Application to the Design of 1-D Digital Filters*. IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. 36, No. 6, June 1989, pp. 773-784.
6. Cohen M.A., Grossberg S.: *Absolute Stability of Global Pattern Formation and Parallel Memory Storage by Competitive Neural Networks*. IEEE Trans. Syst., Man, and Cybern., vol. SMC-13, September/October 1983, pp.815-825.
7. Ferreira P.A.V., Borges T.C.D.: *System Modeling and Optimization Under Vector-Valued Criteria*. Automatica, Vol. 30, No. 2, 1994, pp. 331-336.
8. Hertz J., Krogh A., Palmer R.: *An Introduction to Neural Calculations Theory*. WNT, Warszawa 1993. (in polish)

9. Hipel K.H., Radford K.J., Fang L.: *Multiple Participant - Multiple Criteria Decision*. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, No.4, July/August 1993, pp. 1184-1189.
10. Lillo W.E., Hui S., Żak H.: *Neural Networks for Constrained Optimization Problems*. Int. J. of Circuit Theory and Applications, vol.21, 1991, pp.385-399.
11. Seaman C. M., Desrochers A. A.: *A Multiobjective Optimization Approach to Plastic Injection Molding*. IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 2, March/April 1993, pp.414-425.
12. Sun K.T., Fu H.C.: *A Hybrid Neural Model for Solving Optimization Problems*. IEEE Trans. on Computers, vol.42, No.2, February 1993, pp.219-227.
13. Tadeusiewicz R: *Neural Networks*. AOW, Warszawa 1993.
14. Tarvainen K.: *Generating Pareto - Optimal Alternatives by a Nonfeasible Hierarchical Method*. JOTA, vol. 80, No. 1, January 1994, pp. 181-185.
15. Tarnowski W., Kiczkowski T.: *Computer Design Support*. WSI, Koszalin 1994. (in polish)
16. Tagliarini A., Christ J.F., Page W.: *Optimization Using Neural Networks*. IEEE Trans. on Computers, vol.40, No.12, December 1991, pp.1347-1357.
17. Tank D.W., Hopfield J.J.: *Simple "Neural" Optimization Networks: An A/D Converter, Signal Decision Circuit, and Linear Programming Circuit*. IEEE Trans. on Circuits and Systems, vol.CAS-33, May 1986, pp.533-541.
18. Zhang S., Constantines A.G.: *Lagrange Programming Neural Networks*. IEEE Trans. on Circuits and Systems, vol.39, No.7, July 1992.

## NEURONOWE METODY WYZNACZANIA ROZWIĄZAŃ OPTYMALNYCH W SENSIE PARETO

### Streszczenie

W pracy scharakteryzowano najbardziej rozpowszechnione metody wyznaczania rozwiązań optymalnych w sensie Pareto. Zaproponowano algorytm "progowy" do generowania reprezentacji zbioru Pareto. Powyższe metody mogą zostać zaimplementowane za pomocą sztucznych sieci neuronowych. Opracowano sieć Hopfielda PHANN na podstawie metody kombinacji wypukłej wyznaczania rozwiązań optymalnych w sensie Pareto. Rekurencyjna PHANN w stanie równowagi reprezentuje punkt lokalnie optymalny w sensie Pareto. Na zakończenie zaprezentowano zasady wyprowadzenia funkcji energetycznych Hopfielda dla odpowiednich pomocniczych problemów programowania matematycznego.

### Summary

In the paper, the methods for finding Pareto-optimal solutions have been described. The new threshold algorithm for generating Pareto solutions has been proposed. These methods can be implemented as artificial neural networks. PHANN based on nonnegative convex method for finding Pareto-optimal solution has been presented. The recurrent PHANN in equilibrium point represents an efficient point. Finally, the rules of elaborating the Hopfield's energetic functions related with the minimization problems have been presented.



## SYMULACJA PROCESÓW CYKLICZNYCH W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH

### 1. Wprowadzenie

Rozwój i zastosowanie nowoczesnych metod wytwarzania wiąże się z automatyzacją wszystkich etapów procesu produkcyjnego, która ma doprowadzić do zwiększenia wydajności produkcji przy lepszym wykorzystaniu zasobów. Przykładem praktycznej realizacji tego postulatu jest elastyczny system produkcyjny (ESP) złożony ze zbioru stanowisk montażowych lub obróbczych, urządzeń pomiarowych, manipulacyjnych i transportowych, przez który przepływają detale i półprodukty według ustalonych marszrut technologicznych.

W większości istniejących systemów produkcyjnych istnieją duże rezerwy zasobów, które mogą być uruchomione poprzez zmiany funkcjonalne lub strukturalne systemu. O skali tych rezerw świadczą badania statystyczne, które mówią, że rzeczywisty czas obróbki wynosi 15-30% czasu przebywania detalu na maszynie [1].

Większość procesów produkcyjnych w ESP ma charakter cykliczny, bowiem wykonanie serii wytworów to cykliczne powtarzanie określonego ciągu operacji. Często się zdarza, że w jednym ESP wykonuje się kilka procesów produkcyjnych prowadzących do powstania różnych wytworów. Jeżeli liczba zasobów (maszyn, manipulatorów itp.) jest ograniczona, to niektóre z nich mogą występować w marszrutach technologicznych więcej niż jednego procesu. Wobec tego musi być zapewniony pewien mechanizm gwarantujący wzajemne wykluczanie w dostępie procesów do zasobów. To z kolei oznacza, że mogą istnieć przedziały czasu, w których pewne procesy są wstrzymywane i bezproduktywnie zajmują zasoby. Są to oczywiście sytuacje szkodliwe, ograniczające przepustowość systemu i wykorzystanie zasobów.

Aby zmniejszyć do minimum występowanie takich sytuacji, w pierwszej kolejności trzeba poznać naturę zjawisk zachodzących w systemach z cyklicznymi procesami z wzajemnym wykluczeniem i umieć odpowiedzieć na pytanie jak poszczególne parametry systemu wpływają na jego wydajność i wykorzystanie zasobów. Kluczową rolę w obliczeniach tych wielkości odgrywa czas cyklu systemu w stanie ustalonym. Niestety, w ogólnym przypadku procesów cyklicznych z wzajemnym wykluczeniem jest to problem NP-zupełny [5,6], dlatego metodą jego rozwiązania jest symulacja wybranych przypadków szczególnych.

Praca niniejsza jest kontynuacją badań nad procesami cyklicznymi [2,3,4]. Rozważa się układ dwóch procesów cyklicznych z jednym zasobem wspólnym. Głównym celem jest wyznaczenie modelu układu oraz sformułowanie procedury symulacyjnej bardziej efektywnej niż tradycyjne procedury symulacji zdarzeniowej [7,8].

---

\* Instytut Cybernetyki Technicznej, Politechnika Wroclawska, ul. Janiszewskiego 11/17, 50-372 Wrocław.



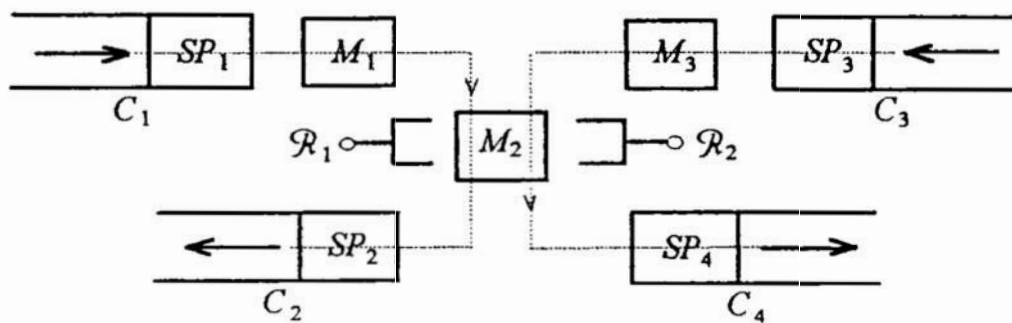
## 2. Opis rozważanego układu

Rozważmy ESP pokazany na rys. 1 ( $C_i, i = \overline{1,4}$  -  $i$ -ty podajnik,  $SP_i, i = \overline{1,4}$  -  $i$ -ty bufor,  $M_i, i = \overline{1,3}$  -  $i$ -ta maszyna,  $\mathcal{R}_i, i = \overline{1,2}$  -  $i$ -ty robot), w którym wykonują się jednocześnie dwa procesy produkcyjne prowadzące do wytworzenia dwóch serii różnych wytworów. Każdy proces zadany jest następującą sekwencją uprzykrdowanych par: (operacja, zasób):

Proces 1:  $(O_1, \mathcal{R}_1), (O_2, M_1), (O_3, \mathcal{R}_1), (O_4, M_2), (O_5, \mathcal{R}_1),$

Proces 2:  $(O_6, \mathcal{R}_2), (O_7, M_3), (O_8, \mathcal{R}_2), (O_9, M_2), (O_{10}, \mathcal{R}_2),$

gdzie  $O_i$  oznacza  $i$ -tą operacją maszynową lub transportową wykonywaną przy użyciu odpowiedniej maszyny lub robota.



Rys. 1. Elastyczny system produkcyjny z marszrutami technologicznymi.  
Fig. 1. Flexible manufacturing system with production routes.

Załóźmy, że do buforów  $SP_1, SP_3$  dostarczane są przez podajniki  $C_1, C_3$  nowe elementy do obróbki, natomiast z buforów  $SP_2, SP_4$  - odbierane przez transportery  $C_2, C_4$  elementy po obróbce. Jeżeli czasy wykonania poszczególnych operacji są ściśle określone i niezmiennie, to czas potrzebny do obróbki pojedynczego elementu, a zatem czas cyklu odpowiedniego procesu produkcyjnego można łatwo obliczyć. Wobec tego każdy z procesów produkcyjnych można potraktować jako proces cykliczny.

W rozważanym przykładzie maszyna  $M_2$  jest zasobem wspólnym. Oznacza to, że musi być użyty pewien mechanizm zapewniający wzajemne wykluczanie w dostępie do niej.

Podstawowe pytania pojawiające się na etapie projektowania a potem eksploatacji rozważanego systemu dotyczą:

- wpływu wspólnego zasobu na czasy cyklu poszczególnych procesów składowych, a także na czas cyklu systemu jako całości,
- wpływu zmian parametrów procesów składowych na ich czasy cyklu oraz na czas cyklu systemu.

### 3. Model formalny

#### Definicja 1:

Niech  $Z = ((O_1, R_1), (O_2, R_2))$  będzie sekwencją dwóch naprzemiennie wykonywanych operacji, gdzie  $O_i$  oznacza  $i$ -tą operację wykonywaną przy użyciu zasobu  $R_i$ ,  $i = \overline{1, 2}$ . nieskończona sekwencja  $P$  stanów  $S = (X_1, X_2)$ , gdzie

$$X_i = \begin{cases} 0 & \text{jeżeli zasób } R_i \text{ jest wolny,} \\ 1 & \text{jeżeli zasób } R_i \text{ jest zajęty,} \\ & \text{tzn. operacja } O_i \text{ jest właśnie wykonywana,} \end{cases}$$

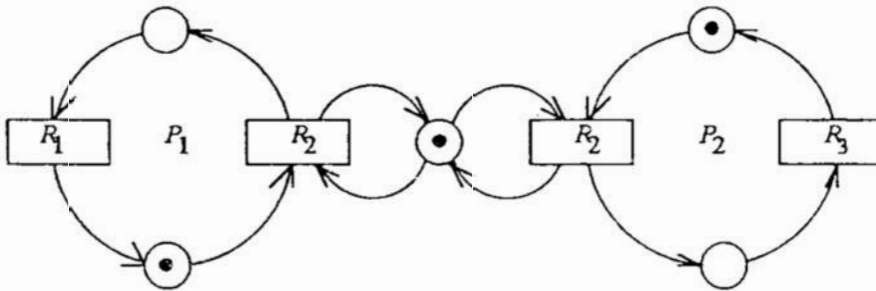
nazywana będzie *pojedynczym cyklicznym procesem (1-CP)*.

#### Definicja 2:

Niech  $P_1$  i  $P_2$  będą pojedynczymi cyklicznymi procesami określonymi odpowiednimi sekwencjami operacji  $Z_i = ((O_{i,1}, R_{i,1}), (O_{i,2}, R_{i,2}))$ ,  $i = \overline{1, 2}$ . Niech w każdej sekwencji  $Z_i$ ,  $i = \overline{1, 2}$ , wyróżniona będzie jedna operacja  $(O_{i,k_i}, R_{i,k_i})$ . nieskończona sekwencja  $P$  stanów  $S = (X_{1,1}, X_{1,2}, X_{2,1}, X_{2,2})$ , gdzie

$$X_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{jeżeli } j\text{-ty zasób wykorzystywany przez } i\text{-ty 1-CP jest wolny,} \\ 1 & \text{jeżeli } j\text{-ty zasób wykorzystywany przez } i\text{-ty 1-CP jest aktywnie zajęty,} \\ & \text{tzn. operacja } O_{i,j} \text{ jest właśnie wykonywana,} \\ 2 & \text{jeżeli } j\text{-ty zasób wykorzystywany przez } i\text{-ty 1-CP jest pasywnie zajęty,} \\ & \text{tzn. nie zwolniony po ukończeniu operacji } O_{i,j} \end{cases}$$

nazywana będzie *parą cyklicznych procesów (2-CP)* jeżeli  $R_{1,k_1} = R_{2,k_2}$ , tzn. oba 1-CP wykonują operację przy użyciu wyróżnionego wspólnego zasobu.



Rys. 2. Sieć Petriego 2-CP;  $R_2$  - zasób wspólny,  $R_1, R_3$  - zasoby własne, odpowiednio, procesu  $P_1$  i  $P_2$ .

Fig. 2. A Petri net of a 2-CP;  $R_2$  - shared resource,  $R_1, R_3$  - dedicated resources of a process  $P_1$  and  $P_2$ , respectively.

Przejścia pomiędzy stanami następują pod wpływem zdarzeń (o zerowym czasie trwania), które podzielono na dwie klasy WZ i NWZ. Do klasy WZ zaliczono zdarzenia

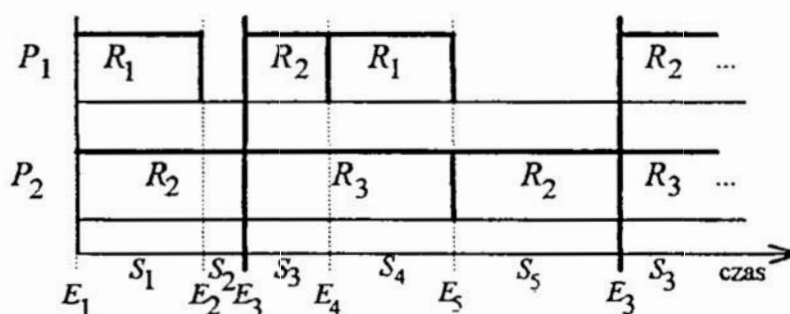
powodujące współzawodnictwo procesów w dostępie do wspólnego zasobu. (Jeden z procesów, po zakończeniu wykonywania operacji przy użyciu zasobu własnego, musi czekać na zwolnienie wspólnego zasobu przez proces konkurencyjny.) Do klasy NWZ należą zdarzenia nie powodujące współzawodnictwa procesów w dostępie do wspólnego zasobu (w momencie zakończenia wykonywania aktualnej operacji zasób potrzebny do wykonania kolejnej jest wolny i może być natychmiast przez proces zajęty). Ponadto, klasę WZ podzielono na dwie podklasy: KZ - zdarzeń konfliktowych i PKZ - zdarzeń prawie konfliktowych. Pod wpływem zdarzenia konfliktowego, gdy oba procesy jednocześnie kończą wykonywanie operacji przy użyciu swoich zasobów własnych i w jednej chwili żądają przydzielenia zasobu wspólnego, proces może się znaleźć w jednym z dwóch możliwych stanów następnych. Zależy to od pewnego sterowania zewnętrznego (reguła rozstrzygania konfliktów w dostępie do wspólnego zasobu), które wymusi przejście do odpowiedniego stanu. Zdarzenia prawie konfliktowe prowadzą do sytuacji, w której jeden z procesów składowych żąda dostępu do zasobu wspólnego, który przydzielony jest w danej chwili drugiemu procesowi.

Rozważmy przykładową realizację 2-CP (rys. 3;  $S_i, i = \overline{1,5}$  -  $i$ -ty stan,  $E_i, i = \overline{1,5}$  -  $i$ -te zdarzenie) dla następujących wartości parametrów:

$$P_1: T_{11} = 3, \quad T_{12} = 2,$$

$$P_2: T_{22} = 4, \quad T_{23} = 5,$$

gdzie  $T_{ij}$  oznacza czas wykonania przez proces  $P_i$  operacji przy użyciu zasobu  $R_j$ .



Rys. 3. Przykładowy przebieg 2-CP ze zdarzeniem konfliktowym.  
Fig. 3. An exemplary flow of a 2-CP with conflict event.

2-CP rozpoczął realizację ze stanu  $S_1=(1,0,1,0)$ . Reguła wyboru, stosowana w przypadku wystąpienia zdarzenia konfliktowego, zawsze preferowała proces  $P_2$ . Stan ustalony (cykliczny) został osiągnięty po 4 jednostkach, a długość cyklu wynosiła 9 jednostek.

Na rys. 3,  $E_5$  jest zdarzeniem konfliktowym. W zależności od reguły wyboru, stanem następnym może być  $(2,0,1,0)$ , tak jak na rys. 3 lub  $(0,1,0,2)$ . Zdarzenie  $E_2$  należy do klasy PKZ, a zdarzenia  $E_1, E_3, E_4$  - do klasy NWZ.

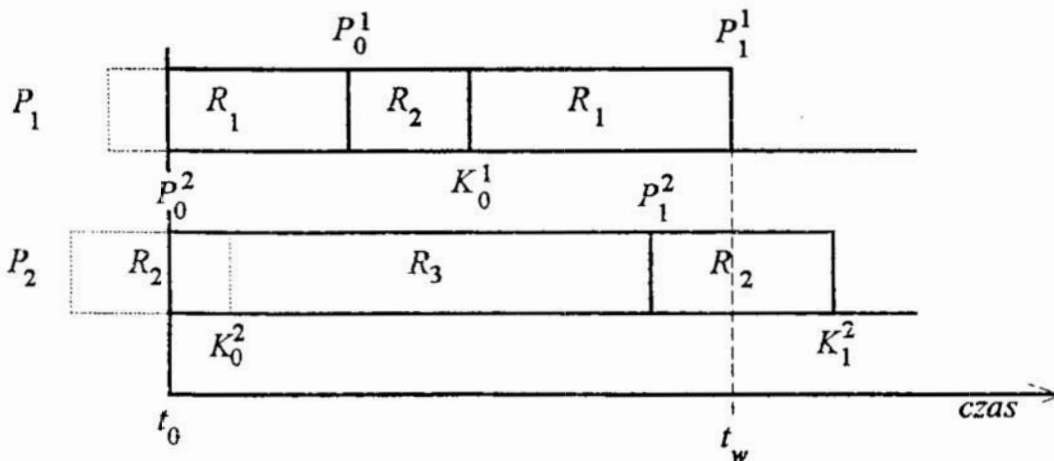
#### 4. Metoda symulacji 2-CP

Tradycyjna symulacja zdarzeniowa polega na wyznaczaniu kolejnych zdarzeń powodujących zmianę stanu symulowanego systemu. W ten sposób można wyznaczyć trajektorię stanów i zdarzeń. Ponadto, na podstawie określonych w trakcie procesu symulacyjnego czasów wystąpienia zdarzeń, można wyznaczyć charakterystyki czasowe, np. wydajność (przepustowość) systemu, wykorzystanie zasobów itp.

Ponieważ badania symulacyjne obejmują systemy o złożonej naturze (dla których nie znaleziono odpowiednich metod analitycznych) sam proces symulacji jest przeważnie czasochłonny i kosztowny.

W wielu przypadkach, wykorzystując znajomość struktury i funkcji badanego układu, można usprawnić procedurę symulacyjną. Polega to na takiej modyfikacji algorytmu symulacyjnego, który nie uwzględniałby wszystkich zdarzeń, a jedynie te, które odgrywają kluczową rolę w wyznaczaniu charakterystyk jakościowych i ilościowych badanego układu. W przypadku rozważanego w pracy 2-CP taką rolę odgrywają zdarzenia powodujące współzawodnictwo.

Rozważmy realizację 2-CP, w której stanem początkowym był  $(1,0,1,0)$  (rys. 4;  $P_i^j / K_i^j$  - moment  $i$ -tego przydzielenia/zwolnienia zasobu wspólnego  $R_2$  przez proces składowy  $P_j$ ,  $j = \overline{1,2}$ ). Zauważmy, że w ogólnym przypadku za początek realizacji można przyjąć chwilę, w której procesy składowe nie koniecznie rozpoczynały wykonywanie operacji. Jasne jest, że niezależne przebiegi procesów składowych zostaną zaburzone w momencie pierwszego pojawienia się zdarzenia powodującego współzawodnictwo, kiedy realizacja jednego z procesów składowych zostanie zawieszona. Na rys. 4, od momentu rozpoczęcia realizacji 2-CP ( $t_0$ ) do chwili  $t_w$ , przebiegi procesów składowych nie kolidowały ze sobą. W chwili  $t_w$ , proces składowy  $P_1$  próbował rozpocząć wykonywanie operacji przy użyciu zasobu  $R_2$ . Ponieważ zasób  $R_2$  był w tym momencie zajęty przez proces składowy  $P_2$ , realizacja procesu  $P_1$  musiała zostać zawieszona do chwili zwolnienia zasobu  $R_2$  przez proces  $P_2$ .



Rys. 4. Fragment realizacji 2-CP.

Fig. 4. A piece of realization of a 2-CP.

W celu określenia, jakie zdarzenia (i w którym momencie) wystąpią w realizacji 2-CP, należy rozważyć cztery poniższe przypadki.

**Przypadek 1.** Proces  $P_1$  żąda zasobu  $R_2$  przydzielonego procesowi  $P_2$  (PKZ).  
Rozważane zdarzenie może mieć miejsce, gdy prawdziwa jest następująca zależność:

$$\exists(i, j \geq 0) \quad P_j^2 < P_i^1 < K_j^2. \quad (1)$$

Wystąpi ono w chwili  $t_w = P_i^1$ , a więc należy znaleźć minimalne  $i \geq 0$  spełniające zależność (1).

**Przypadek 2.** Proces  $P_2$  żąda zasobu  $R_2$  przydzielonego procesowi  $P_1$  (PKZ).  
Sytuacja taka może wystąpić, gdy następujący warunek jest prawdziwy:

$$\exists(i \geq, j > 0) \quad P_i^1 < P_j^2 < K_i^1. \quad (2)$$

Zdarzenie to może wystąpić w chwili  $t_w = P_j^2$ , należy więc określić minimalne  $j > 0$  spełniające zależność (2).

**Przypadek 3.** Procesy  $P_1$  i  $P_2$  w tym samym momencie żądają zasobu  $R_2$  (KZ).  
Może to mieć miejsce, gdy spełniony jest następujący warunek:

$$\exists(i \geq, j > 0) \quad P_i^1 = P_j^2. \quad (3)$$

Rozważane zdarzenie może wystąpić dla  $t_w = P_i^1 = P_j^2$ , czyli należy znaleźć minimalne  $i$  lub  $j$  spełniające zależność (3).

**Przypadek 4.** Procesy  $P_1$  i  $P_2$  nie będą współzawodniczyć w dostępie do zasobu  $R_2$ .  
Warunek prawdziwości przypadku 4 otrzymuje się poprzez zaprzeczenie alternatywy warunków prawdziwości trzech pierwszych przypadków (dopełnienie logiczne).

Na podstawie powyższej analizy można sformułować algorytm będący podstawą symulacji 2-CP. Przewagą tego algorytmu w stosunku do tradycyjnej symulacji zdarzeniowej jest to, że wyznaczane są jedynie kolejne zdarzenia powodujące współzawodnictwo, co przyczynia się do znacznego skrócenia czasu symulacji. Jest oczywiste, że pomiędzy kolejnymi zdarzeniami WZ (powodującymi współzawodnictwo) występują tylko stany NWZ (nie powodujące współzawodnictwa), a więc wyznaczenie sekwencji stanów pomiędzy kolejnymi zdarzeniami WZ oraz czasu ich trwania jest proste.

#### Algorytm symulacyjny

Rozważmy 2-CP z zadaną regułą rozstrzygania konfliktów (regułą wyboru) i zadanym stanem początkowym  $S$ .

##### Krok 1.

Przyjmij rozważany stan  $S$  jako stan początkowy  $S_0$ .

Wpisz  $S_0$  na pierwszą pozycję pomocniczej listy  $H$ .

##### Krok 2.

Dla ustalonego stanu początkowego  $S_0$  sprawdź, czy przypadek 4 jest spełniony.



Jeżeli tak, to w przebiegu 2-procesu nie pojawiają się zdarzenia powodujące współzawodnictwo. Przejdź do kroku 5.

Jeżeli nie, to sprawdzając przypadki 1, 2, i 3, określ klasę i moment pojawienia się najbliższego zdarzenia powodującego współzawodnictwo. Jeżeli jest to zdarzenie konfliktowe, to zastosuj zadaną regułę rozstrzygnięcia konfliktów.

### Krok 3

Określ stan następny  $S$ .

Dołącz  $S$  do listy  $H$  i przyjmij  $S$  jako  $S_0$ .

### Krok 4

Sprawdź, czy lista  $H$  zawiera powtarzającą się sekwencję stanów.

Jeżeli tak, to przejdź do kroku 5.

Jeżeli nie, to przejdź do kroku 2.

### Krok 5

Stop.

Zaprezentowany algorytm umożliwia symulacyjne badanie przebiegu 2-CP od początku realizacji poprzez stany składające się na przebieg przejściowy (poprzedzający stan cykliczny) do momentu stwierdzenia, że dalszy przebieg jest cykliczny. Oprócz struktury cyklu (sekwencji stanów tworzących cykl) i czasu cyklu, można również wyznaczyć strukturę i długość stanu przejściowego 2-CP.

## **5. Uwagi końcowe**

Złożona natura dyskretnych procesów przebiegających w elastycznych systemach produkcyjnych sprawia, że wciąż brak jest analitycznych metod ich analizy. Oznacza to, że symulacja nadal pozostaje podstawową metodą określania pewnych użytecznych parametrów systemu, których znajomość jest niezbędna podczas projektowania i eksploatacji ESP. Niestety, tradycyjna symulacja zdarzeniowa jest czasochłonna, dlatego każde jej usprawnienie jest niezwykle pożądane.

Szczegółowa analiza zaproponowanego modelu układu dwóch cyklicznych procesów produkcyjnych wykonujących naprzemiennie dwie operacje i korzystających ze wspólnego zasobu doprowadziła do przedstawienia analitycznej metody określania kolejnych zdarzeń powodujących współzawodnictwo. Na tej podstawie sformułowano algorytm symulacyjny umożliwiający badanie zachowania układu i obliczania jego parametrów (czasu cyklu, długości stanu przejściowego). Zaletą tego algorytmu jest to, że uwzględnia on tylko zdarzenia powodujące współzawodnictwo, skracając w ten sposób znacząco czas symulacji.

Wstępne badania wykazały, że w podobny sposób można analizować bardziej złożone układy procesów cyklicznych i w ten sposób usprawnić ich symulację.

## **Literatura**

1. Banaszak Z (ed.): *Modelling and Control of FMS. Petri Net Approach*. Wrocław Technical University Press, Wrocław 1991.
2. Banaszak Z., Chudy C.: *Modelowanie i ocena przebiegu współbieżnych procesów cyklicznych*. Rap. serii PREPRINTY nr 16/92, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1992.

3. Chudy C.: *Modelowanie i analiza procesów cyklicznych w systemach wieloprocesorowych z rekonfigurowalną siecią połączeń*. Rozpr. dokt., Rap. serii PREPRINTY nr 35/94, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994.
4. Chudy C., Jeleniewski T.: *Performance Evaluation of Cyclic Processes in Parallel Computers*. Proc. of the Ninth International Symposium on Computer and Information Sciences, Antalya, Turkey, Nov. 7-9, 826-832, 1994.
5. Magott J.: *Sieci Petriego w ocenie wydajności systemów komputerowych*. Prace naukowe ICT PWr, Seria: MONOGRAFIE 80/15, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989.
6. Ramamoorthy C., Ho G.: *Performance Evaluation of Asynchronous Concurrent Systems Using Petri Nets*. IEEE Trans. on Soft. Eng., Vol. 6, No. 5, 440-449, 1980.
7. Righter R., Walrand J.C.: *Distributed Simulation of Discrete Event Systems*. Proc. of the IEEE, Vol. 77, No. 1, 99-113, 1989.
8. Zeigler B.P.: *Teoria modelowania i symulacji*. PWN, Warszawa 1984.

### **Streszczenie**

W pracy opisano układ dwóch cyklicznych procesów produkcyjnych połączonych wspólnym zasobem. Wprowadzono model formalny takiego układu, a następnie sformułowano algorytm symulacyjny bardziej efektywny od tych, które stosuje się w tradycyjnej symulacji zdarzeniowej.

### **SIMULATION OF CYCLIC PROCESSES IN FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS**

#### **Summary**

In the paper an assemble of two cyclic production processes linked with the common resource is considered. A formal model is introduced. Next, a simulation algorithm, more effective then that normally used in event simulation, is formulated.



**Wiesław CZADER \* Polioptymalizacja i CAD '95**  
**Marek CZERNEK \***  
**Leszek ZEMBATY \***

## **OBIEKTOWE PROJEKTOWANIE REDUKTORÓW O CECHACH TYPOSZEREKU Z WYKORZYSTANIEM SYSTEMU CAD .**

W przedstawionej publikacji opisano obiektowo zorientowane projektowanie napędów zębatych .

Proces ten jest przedstawiony za pomocą grafów zależności poszczególnych klas względem siebie - rysunek nr 1 . Klasy te tworzą hierarchiczną strukturę drzewiastą przy czym każda z klas składa się z metod i zmiennych własnych oraz dziedziczonych z klas nadrzędnych .

Po nadaniu zmiennym dopuszczalnych wartości otrzymuje się obiekt danej klasy np. z klasy wałków - rysunek nr 2 - otrzymujemy wałek pośredni o określonych parametrach - rysunek 3 .

Wartości parametrów określane są w czasie projektowania przy pomocy procedur obliczeniowych .

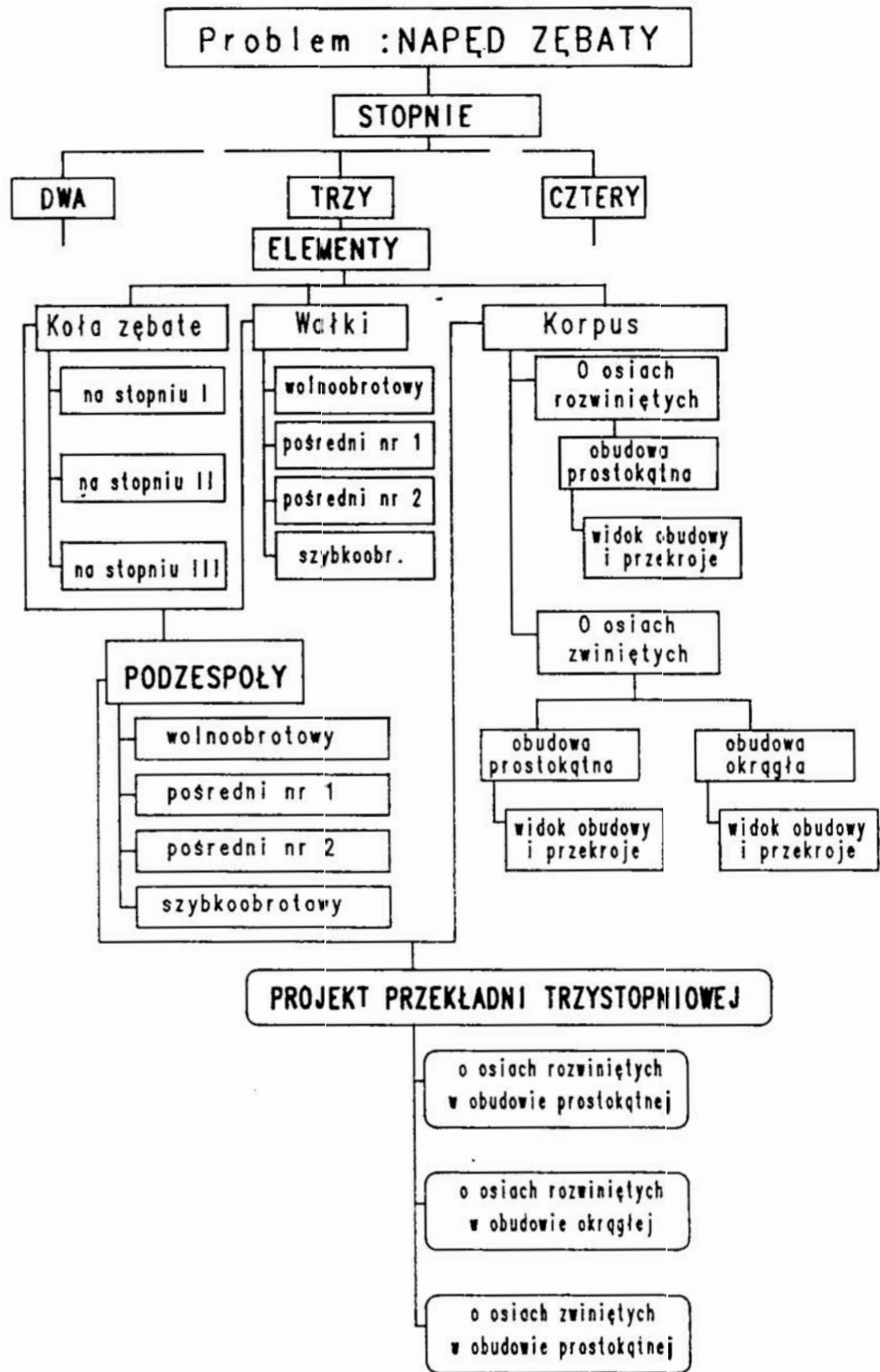
Następnie za pomocą klas powstają obiekty, które system LOGOCAD wykona w postaci rysunków.

Projektowanie takie jest procesem sekwencyjnym i wymaga współpracy konstruktora z technologiem. Zadaniem tego procesu jest przekształcenie danych wejściowych za pomocą bloków obliczeniowych w wyniki , które są danymi wyjściowymi .

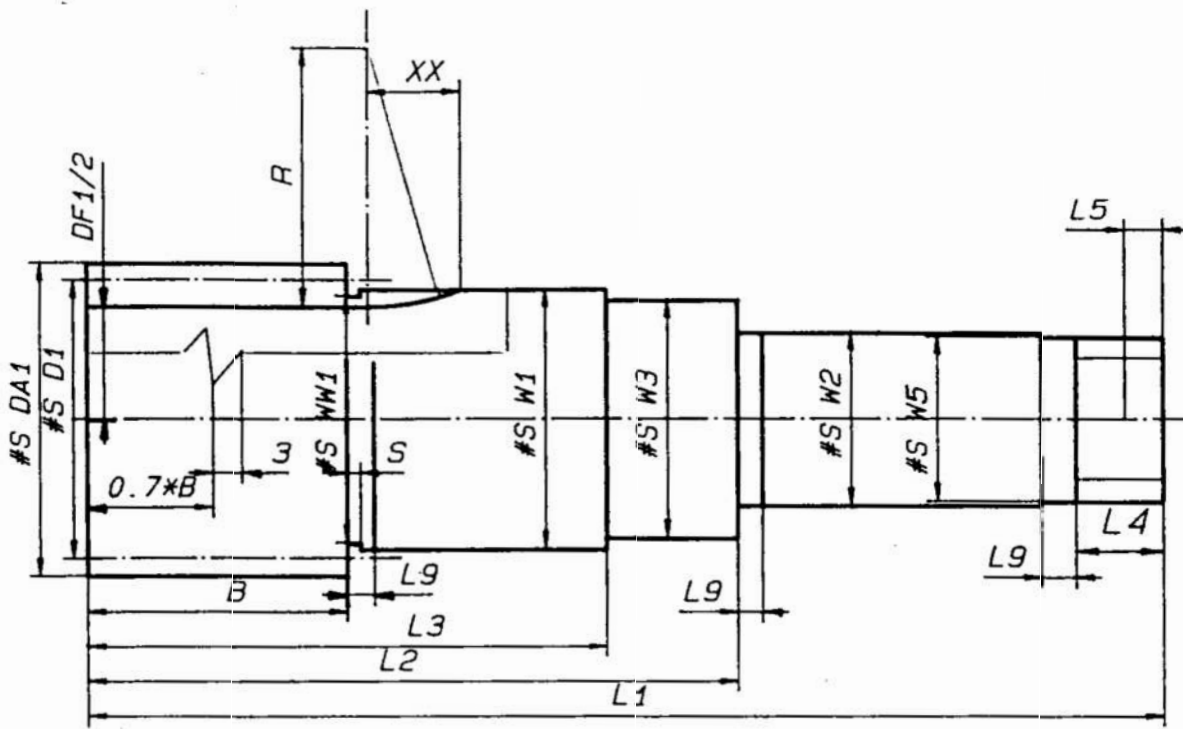
Danymi tymi są wartości parametrów i atrybutów np. odległości osi , średnice kół , numery łożysk , ilości zębów kół , itd .

Do przechowania danych służą tzw. kontenery, które pozwalają na składowanie , modyfikowanie i pobieranie danych w innym porządku niż były do nich dostarczone . W procesie analizy i projektowania kontenerami są pliki tekstowe .

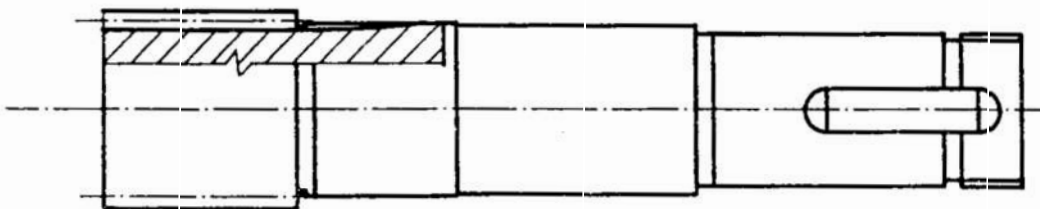
**\*OBR REDOR Bielsko-Biała ul.I.J.Paderewskiego 11**



Rys.1. Diagram stanów projektowania napędów zębatych  
 Fig.1. Diagram of design state teeth drives .



Rys.2. Warianr wałka pośredniego.  
 Fig.2. Pinion variant .



Rys.3. Wałek pośredni do złozenia .  
 Fig.3. Pinion for assembly drawing .

Projektowanie obiektowe powoduje konieczność wzajemnego oddziaływania klas w sposób hierarchiczny, zorganizowany i wymieniający między sobą informacje. Klasa musi być tak określona aby w prosty sposób można ją łączyć lub dzielić. Musi również umożliwić jednoznaczne określenie przynależności obiektu do klasy przy czym obiekty należące do danej klasy mają tą samą strukturę.

Taki sposób zrealizowania postawionego wyżej problemu umożliwił nam system LOGOCAD, który od kilku lat jest wykorzystywany w procesie konstruowania napędów zębatych w naszych pracowniach. Za jego pomocą można tworzyć klasy zwane wariantami, symbolami i fleksogramami, składającymi się z procedur, subwariantów i bloków danych pobieranych odpowiednimi instrukcjami z plików, tabel lub bezpośrednio z klawiatury.

Uszczegółowieniem i powiązaniem klas są gotowe obiekty (elementy, detale, podzespoły czy zespoły).

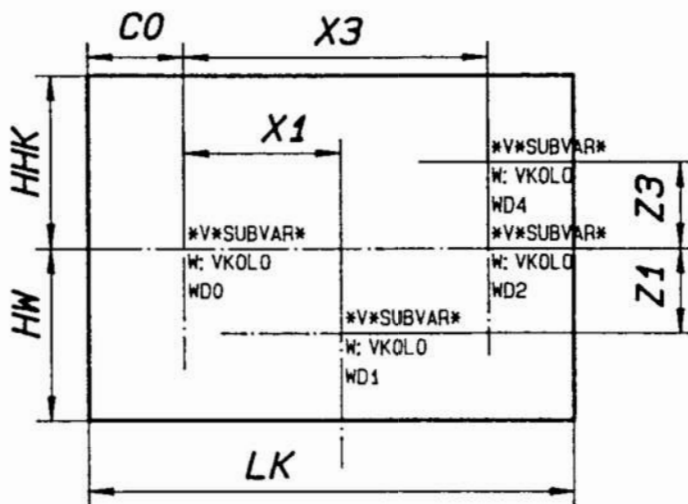
Wynikiem analizy problemu jakim w naszej pracy był projekt napędu zębatego są trzy modele związane z liczbą stopni przełożeń napędu (dwa, trzy, cztery), przedstawione w diagramach stanu projektowania napędów zębatych - rysunek nr 1. Modele te określają klasy oraz sposób tworzenia obiektów zaś grafy obiektów łączą klasy i związki między nimi w jedną całość.

Występują tu związki między klasami nie należące do wspólnej hierarchii (koła, wałki, podzespoły) jak i związki hierarchiczne (korpusy o osiach zwiniętych, rozwiniętych, o obudowach prostokątnych i okrągłych).

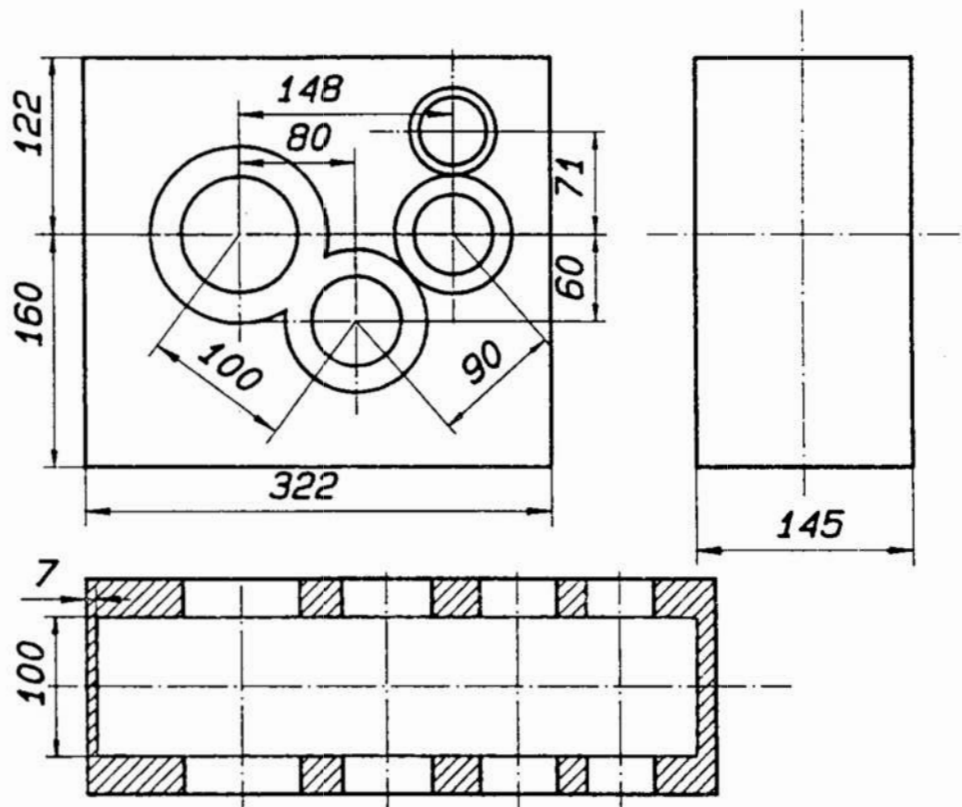
Powstały w ten sposób model ulega kolejnym przekształceniom tak aby w końcowym efekcie uzyskać rozwiązanie konkretnego problemu, którym

jest przekładnia zębata o określonej ilości stopni przełożeń , kształcie i budowie .  
W naszym przypadku każdy model napędu składa się z podstawowych elementów takich jak koła zębate, wałki i korpusy , które stanowią klasy w projektowaniu obiektowym . Uszczegółowienie tych klas powoduje powstanie obiektów globalnych ( np. koła i wałki zębate ) i lokalnych ( np. korpusy ) . Obiekty lokalne przypisane są odpowiednim atrybutom ( np .ilość stopni przekładni, usytuwanie osi ) zaś ich podstawę stanowią warianty bazowe ( np. widoki , przekroje ) .  
Przykładowo dla projektowanej wielkości przekładni trzystopniowej w obudowie prostokątnej o osiach zwiniętych , klasę zobrazowano na rysunku nr 4 zaś obiekt na rysunku nr 5 .  
Opisane powyżej obiekty komunikują się między sobą poprzez wspólną akcję klas zwaną dziedziczeniem przy czym z klas bazowych tworzone są klasy pochodne pozwalające na określenie wariantów .  
Obiektowe projektowanie wpływa na cechy określonego podobieństwa i zapewnia unifikację , co ma szczególne znaczenie przy tworzeniu napędów o cechach typoszeregu .





Rys.4. Klasa widoku przekładni .  
 Fig.4. Alternative view of gear .



Rys.5. Obiekt widoku obudowy reduktora .  
 Fig.5. Object of view of casing gear .

## **Wnioski :**

1. Biorąc powyższe pod uwagę można oczekiwać , że metody obiektowe wyeliminują oddzielne diagramy dla poszczególnych etapów, wprowadzając jeden dla całego procesu rozwiązania problemu . Ułatwi to kontrolę wszystkich fragmentów procesu projektowania oraz istniejących między nimi relacji zwiększając czytelność projektu.
2. Każde projektowanie jest procesem liniowym i wymaga współpracy konstruktora z klientem oraz ekspertami z dziedziny danego problemu . Nieustanne konsultacje oraz dokładniejsza analiza problemu pozwalają na przechodzenie do rozwiązań bardziej szczegółowych .
3. Wyznaczone w fazie analiz i projektowania obiekty i ich klasy zachowują swą ważność przez cały cykl życia modelu .
4. Projektowanie obiektowe jest kolejnym ulepszeniem modelu poprzez dodanie do niego nowych szczegółów .
5. Kończącym etapem projektowania obiektowego jest powstanie obiektu docelowego , jakim w naszym opracowaniu jest konstrukcja napędu zębatego określonej wielkości typoszeregu .

## **Literatura:**

- 1 Booch G. : Object-oriented development. IEEE Transactions on Software Engineering 1986, pp. 211-221 .
- 2 Winblad A.L. : Object - Oriented Software , Addison-Wesley , 1990 .
- 3 Rumbaugh J.: Object-Oriented Modelling and Design. Prentice - Hall Inc. , Engelwood Cliffs , New Jersey , 1991 .

4. Czader, Czernek, Kukuczka, Zawiślak : Variants of basic structural components and calculations of toothed elements of geared motors and reducers in the LOGOCAD system , 1994 International Gearing Conference , University of Newcastle upon Tyne , UK .

### **Streszczenie**

Warianty części przekładni zębatych opracowano jako obiekty ogólne w postaci sparametryzowanej. Obiektom przyporządkowano procedury obliczeń wtrzymałościowych elementów zębatych . Zostały opracowane bazy danych łożysk tocznych i innych elementów standartowych czy znormlizowanych , wraz z rysunkami tych elementów konstrukcyjnych. Wszelkie czynności projektowe są realizowane przy zastosowaniu nowoczesnego systemu LOGOCAD .

**OBJECT ORIENTED DESIGN OF SERIES OF TYPES OF REDUCERS USING CAD SYSTEM .**

### **Summary**

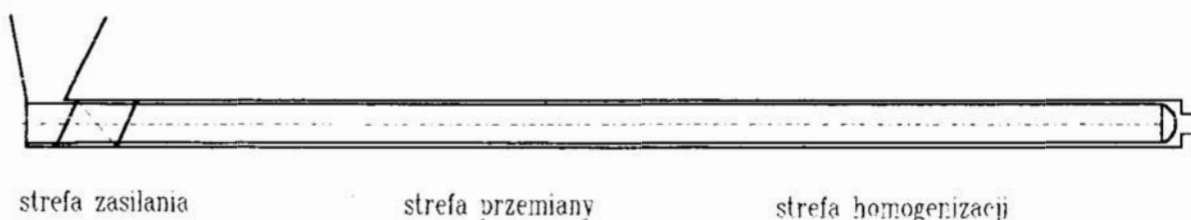
Variants of parts of gears have been prepared as general objects in parametrical form . Procedures of strength calculation of toothed elements have been linked with variants method. The data bases of the bearings and other standard parts are prepared with drawings of these parts. All design tasks have been performed using modern German CAD system LOGOCAD.

Badania zrealizowano w ramach projektu Nr 7 S101 021 04 finansowanego w latach 1993-1994 przez Komitet Badań Naukowych .

## Optymalizacja energetyczna aktywnej strefy zasilania wylączarki

### 1. Wprowadzenie

Układ uplastyczniający wylączarki ślimakowej do przetwórstwa tworzyw polimerowych to długi cylinder (długość jest wielokrotnością 20 - 35 średnic), w którym obracający się ślimak przemieszcza i przetwarza tworzywo. Ze względu na specyfikę zachodzących zjawisk na długości układu uplastyczniającego wydziela się strefy zasilania, przemiany i homogenizacji - rys. 1. W strefie zasilania tworzywo w postaci granulatu pobierane jest z kosza zasypowego i w takiej postaci (ciało stałe sypkie) przemieszczane jest na długości czterech do pięciu średnic. W tej strefie wytwarzane może być wysokie ciśnienie. W następnej strefie (przemiany) na skutek ciepła tarcia i ciepła dostarczanego przez grzejniki znajdujące się na cylindrze następuje przejście tworzywa w stan ciekły. W strefie homogenizacji następuje ujednorodnianie tworzywa pod względem termicznym i składu. Uplastycznione i zhomogenizowane tworzywo jest następnie wylączane przez głowicę formującą określony wyrób (pręt, rurę, kształtownik, folię).



Rys. 1. Schemat układu uplastyczniającego wylączarki ślimakowej

Fig. 1. Plasticization system of the screw extruder

Strefa zasilania obejmująca, w układzie klasycznym, około 16 % długości układu uplastyczniającego (4 ÷ 5 średnic cylindra), może przejmować 60 - 70% mocy napędu ślimaka [10]. Jej funkcjonowanie w dużej mierze wpływa na efektywność energetyczną wylączarki.

Publikowane wyniki badań optymalizacyjnych układu uplastyczniającego wylączarki ślimakowej uwzględniające wpływ konstrukcji strefy zasilania na efekty energetyczne są efektem badań eksperymentalnych [6, 7, 8, 10, 11]. Jedyne Autorzy opublikowali serię wyników obliczeń optymalizacyjnych przeprowadzonych na podstawie własnego modelu analitycznego strefy zasilania z rowkowanym cylindrem. Zakres optymalizacji rozszerzany był w miarę rozbudowywania modelu analitycznego. Pierwsze obliczenia

\* Wyższa Szkoła Inżynierska, 75-620 Koszalin, ul. Raclawicka 15/17

dotyczyły tylko optymalizacji wartości skoku ślimaka i były bezpośrednim wnioskiem z przebiegu funkcji ciśnienia w zależności od stromości zwoju ślimaka [2]. W następnych etapach wykorzystano metody rachunku optymalizacyjnego i analizy polioptymalizacyjnej. W pracy [3] uwzględniono dwie wielkości optymalizowane (skok ślimaka i skrętność rowków na wewnętrznej powierzchni cylindra) przyjmując dwa kryteria (maksymalizacja sprawności wytłaczania i minimalizacja długości cylindra). W następnym etapie [4] przyjęto trzy zmienne decyzyjne (jak poprzednio plus wysokość zwoju ślimaka) i trzy kryteria optymalizacji (jak poprzednio plus maksymalizacja wydajności)

Niniejszy artykuł jest kolejnym krokiem analizy optymalizacyjnej strefy zasilania wytłaczarki. Rozwinięcie modelu analitycznego przez uwzględnienie zjawisk cieplnych [5] umożliwi uwzględnienie kryteriów energetyczno-cieplnych w obliczeniach optymalizacyjnych.

## 2. Funkcja i konstrukcja strefy zasilania

Tworzywo polimerowe w postaci granulatu podawane jest do układu uplastyczniającego wytłaczarki przez otwór zasypowy. Pobierane jest następnie przez obracający się ślimak. W wyniku oddziaływań obracającego się ślimaka i powierzchni cylindra tworzywo przemieszcza się w cylindrze, przy tym następuje wygenerowanie ciśnienia (nawet do 100 MPa przy aktywnej strefie zasilania - cylinder rowkowany wewnątrz i chłodzony). W wyniku tarcia tworzywa o ścianki cylindra i ślimaka następuje jego nagrzewanie i następnie stapianie. Stopiona warstewka tworzywa zmienia istotnie charakter zachodzących zjawisk (następuje przejście do strefy przemiany). Funkcją strefy zasilania w układzie uplastyczniającym jest pobranie tworzywa przez ślimak i następnie, w przypadku aktywnej strefy zasilania, wytworzenie ciśnienia tak wysokiego, aby tworzywo z określoną wydajnością przetłoczył przez pozostałe strefy układu uplastyczniającego i głowicę wytłaczarską.

Rowki na wewnętrznej powierzchni cylindra ukierunkowują ruch tworzywa w cylindrze. Tworzywo powinno przemieszczać się zgodnie z kierunkiem rowków, a więc przy rowkach prostych powinno się przemieszczać prosto (osiowo) bez wykonywania obrotu, natomiast w przypadku rowków śrubowych przemieszcza się osiowo i wykonuje obrót. Przy zbyt mocnym zadławieniu wypływu tworzywa może nastąpić zerwanie określonego rowkami kierunku ruchu. Rowki przestają wtedy właściwie oddziaływać oraz następuje rozcieranie granul tworzywa między krawędziami rowków i grzbietem zwoju ślimaka. Sytuacja taka jest niekorzystna, a nawet niedopuszczalna i ogranicza ciśnienie jakie może wygenerować strefa zasilania.

Szkic konstrukcyjny strefy zasilania z zaznaczeniem istotnych wielkości przedstawiono na rys. 2. Istotnym elementem konstrukcji aktywnej strefy zasilania są rowki wykonane na wewnętrznej powierzchni cylindra.

Jako cechy konstrukcyjne decydujące o postaci strefy zasilania przyjęto następujące wielkości bezwymiarowe:

$$\gamma_s = S / \pi \cdot d_s = \operatorname{tg} \alpha_s - \text{stromość zwoju ślimaka,}$$

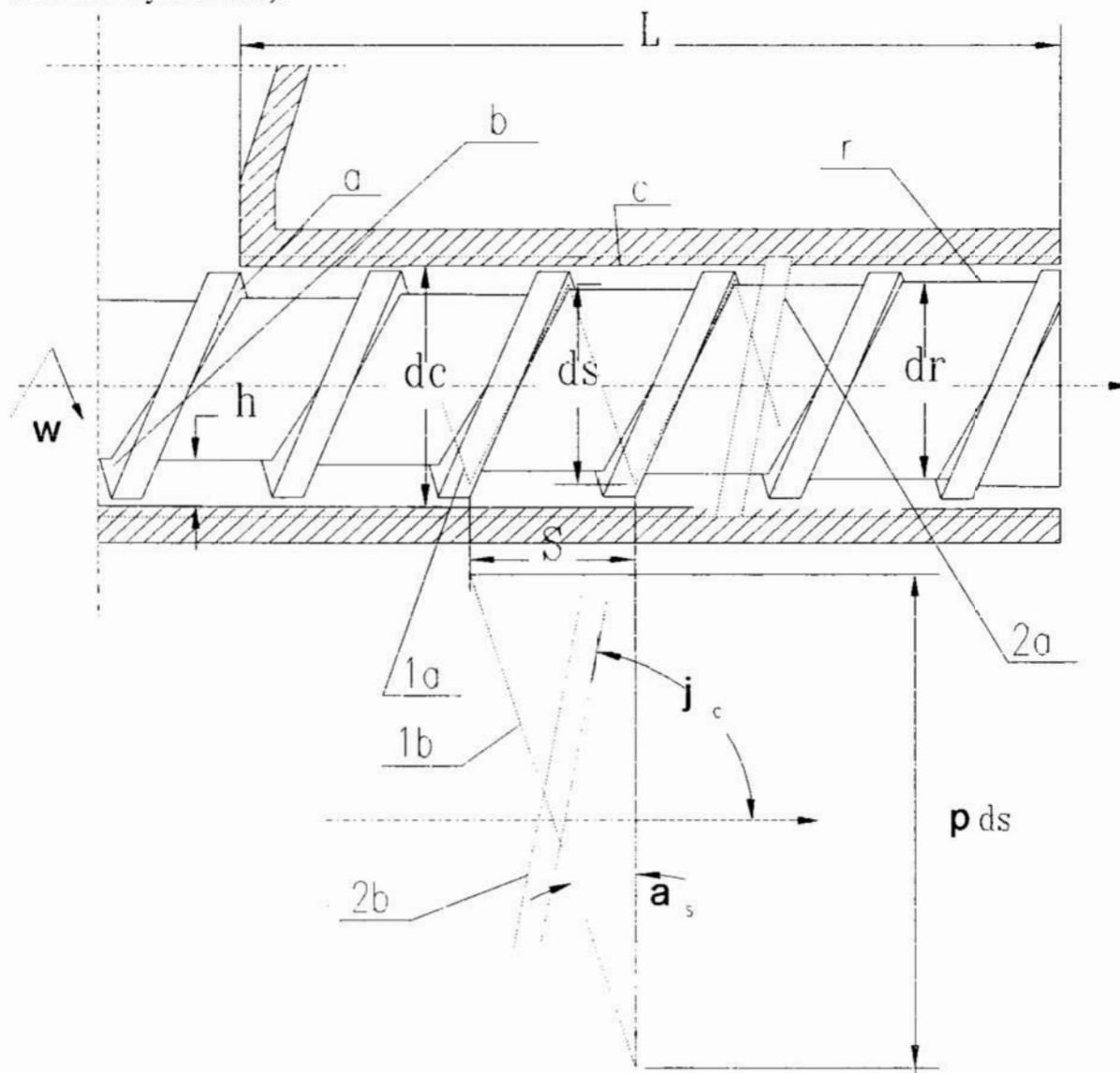
$$x_h = h / d_c - \text{względna wysokość zwoju ślimaka,}$$

$$z_c = L / d_c - \text{długość cylindra określona wielokrotnością średnic,}$$



$\varphi$  - kąt skrętności rowków cylindra.

Cechą konstrukcyjną wymiarową, za pomocą której określić można wielkość wylączarki może być średnica cylindra  $d_c$  (podawana w katalogach charakteryzuje wielkość wylączarki).



Rys. 2. Schemat konstrukcyjny strefy zasilania: 1a - średnia linia śrubowa ślimaka i jej rozwinięcie na płaszczyznę - 1b; 2a - krawędzie rowków na wewnętrznej powierzchni cylindra i ich rozwinięcie na płaszczyznę - 2b; Powierzchnie robocze układu ślimakowego: a - aktywna zwoju ślimaka, b - bierna zwoju ślimaka, r - rdzenia ślimaka, c - cylindra.

Fig. 2. Supplying zone design: 1a - mean screw line and its projection onto the plane 1b; 2a - grooves edges on the inner surface of the cylinder and their projection onto the plane - 2b; Working surfaces of the screw system: a - active surface of the screw coil, b - passive surface of the screw coil, r - core surface of the screw coil, c - cylinder surface

### 3. Model obliczeniowy

Do strefy zasilania doprowadzana jest energia jedynie w postaci mocy mechanicznej momentu obrotowego od wału napędu ślimaka. Moc ta jest następnie zużytkowywana jako moc wytłaczania oraz moc ciepła tarcia tworzywa o ścianki ślimaka i cylindra i tarcia wewnętrznego deformacji tworzywa.

Poszczególnymi składowymi mocy napędu ślimaka są:

♦ moc wytłaczania (iloczyn wydatku objętościowego tworzywa  $\dot{V}$  i generowanego ciśnienia  $p_s$ )

$$N_v = \dot{V} \cdot p_s \quad (1)$$

♦ moce ciepła tarcia tworzywa o poszczególne powierzchnie (ze względu na złożoność wzorów przedstawiono je w postaci ogólnego zapisu funkcji wielkości konstrukcyjnych, generowanego ciśnienia i współczynnika tarcia tworzywa o określone powierzchnie; szczegółowe postacie wzorów przedstawione są w pracy [5]):

$$\dot{Q}_{(-)} = f(\gamma_s, z_c, x_h, \varphi_c, d_c, \omega, p_s, \mu_{(-)}) \quad (2)$$

gdzie:  $\mu_{(-)}$  - współczynnik tarcia tworzywa o powierzchnie konstrukcji  
(-) = {c, a, b, r} - indeksy odnoszące wartości do poszczególnych powierzchni

♦ moc ciepła tarcia wewnątrz tworzywa

$$\dot{Q}_w = f(\gamma_s, z_c, x_h, \varphi_c, p_{(s)}, \mu_{(w)}, \dot{V}) \quad (3)$$

gdzie:  $\mu_{(w)}$  - współczynnik tarcia wewnętrznego tworzywa.

Ciepło tarcia o ścianki układu ślimakowego częściowo zostaje przejmowane przez tworzywo a częściowo jest odprowadzane na zewnątrz przez ścianki elementów konstrukcyjnych. Ciepło przejmowane przez tworzywo powoduje wzrost jego temperatury przy ściance. Jak zaobserwowano, stopienie warstewki tworzywa o grubości 0,5 mm (grubość większa od luzu między zwojem ślimaka i cylindrem) powoduje zaburzenie procesów strefy zasilania (m.in. wykładnicze narastanie ciśnienia) i zapoczątkowanie procesów strefy przemiany (cyrkulacyjny ruch stopionego tworzywa). Można przyjąć, że ciepło doprowadzające do stopienia przy ściance warstewki tworzywa o grubości 0,5 mm jest **granicznym ciepłem tarcia** dla strefy zasilania. Uwzględniając tę grubość, **jednostkowe powierzchniowe ciepło stapiania** obliczone dla PELD (polietylen małej gęstości) wynosi  $q_{stp} = 2 \cdot 10^5 \text{ J/m}^2$ .

Określić można **graniczny strumień ciepła tarcia**, jakie doprowadza tworzywo do stopienia przy określonej powierzchni, jako iloczyn jednostkowego powierzchniowego ciepła stapiania  $q_{stp}$ , prędkości przepływu tworzywa w kanale ślimaka  $w_k$  i długości określonej ścianki obwodu kanału, przez które wypływa tworzywo  $l_{(-)}$

$$\dot{Q}_{g(-)} = q_{stp} \cdot w_k \cdot l_{(-)} = q_{stp} \cdot \frac{\dot{V}}{h \cdot S \cdot \cos \alpha_s} \cdot l_{(-)} \quad (4)$$

Ogólnie zależność tę można wyrazić funkcją

$$\dot{Q}_{g(-)} = f(\gamma_s, z_c, x_h, \varphi_c, \dot{V}, q_{stp}) \quad (5)$$

Ciepło tarcia tworzywa o powierzchni, o wielkości mniejszej lub równej granicznemu ciepłu tarcie jest w strefie zasilania **ciepłem użytecznym**. Jeżeli w wyniku tarcia nastąpi wytworzenie większej ilości ciepła, to w strefie zasilania powinno być ono odprowadzone poprzez chłodzenie cylindra i ślimaka. W przypadku nie odprowadzania nadmiaru ciepła nastąpi zbyt szybkie zapoczątkowanie strefy przemiany, przed wygenerowaniem dostatecznego (potrzebnego) ciśnienia. Może również nastąpić zbyt wysokie podniesienie temperatury tworzywa przy powierzchni, doprowadzające do jego degradacji termicznej.

Wartość ciepła użytecznego można określić zależnością:

$$Q_{(-)u} = \begin{cases} Q_{(-)u} & \text{dla } Q_{(-)} \leq Q_{g(-)} \\ Q_{g(-)} & \text{dla } Q_{(-)} > Q_{g(-)} \end{cases} \quad (6)$$

Ciepło tarcia tworzywa o poszczególne powierzchnie można traktować jako sumę ciepła użytecznego (które może przejść tworzywo) i ciepła  $Q_{(-)z}$ , które w strefie zasilania należy odprowadzić:

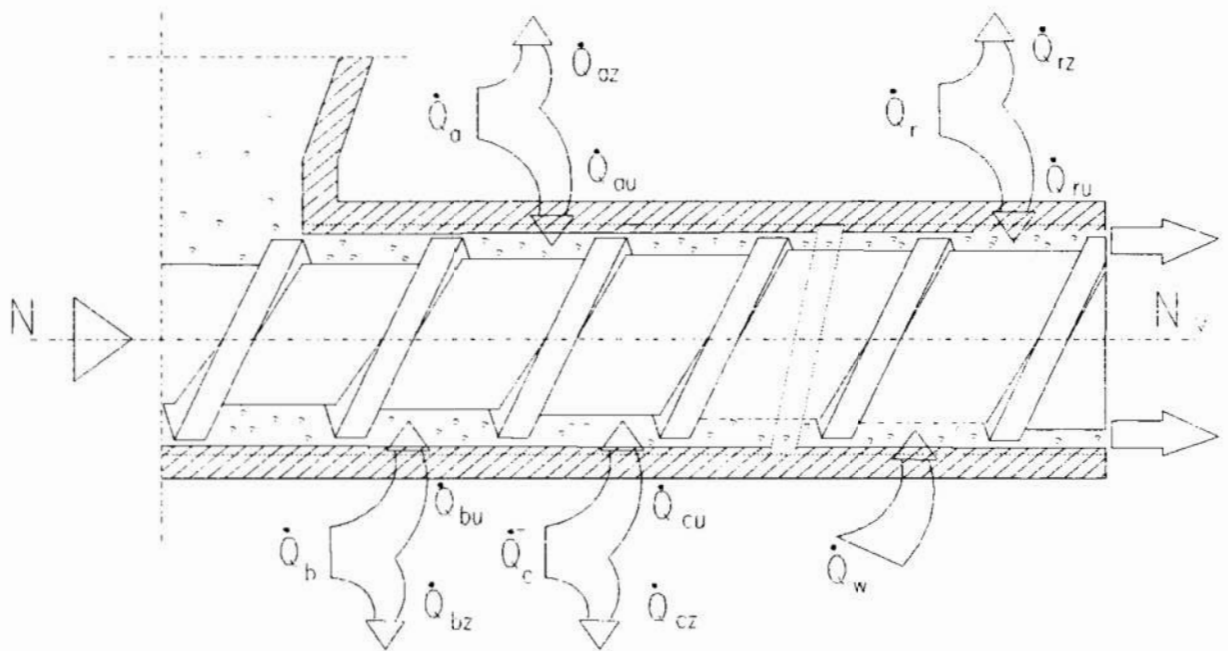
$$Q_{(-)} = Q_{(-)u} + Q_{(-)z} \quad (7)$$

Spełnienie warunku odprowadzenia nadmiaru ciepła, umożliwia przyjęcie założenia o utrzymaniu procesów strefy zasilania w analizowanym obszarze.

Graficzne przedstawienie rozdziału ciepła tarcia generowanego przy powierzchniach na strumienie użyteczny (możliwy do przejścia przez tworzywo) i konieczny do odprowadzenia, zilustrowano na rys. 3.

Jeżeli do stopienia jednostkowej objętości tworzywa potrzebne jest ciepło  $q_{st}$  (dla PELD =  $q_{st} \cdot 4 \cdot 10^8 \text{ J/m}^3$ ), to strumień ciepła jaki jest potrzebny do stopienia tworzywa wytłaczanego z wydajnością  $\dot{V}$  określa zależność:

$$\dot{Q}_{st} = \dot{V} \cdot q_{st} \quad (8)$$



Rys. 3. Graficzna ilustracja rozdziału ciepła tarcia na strumienie użyteczny  $Q_{(-)u}$  i konieczny do odprowadzenia w strefie zasilania  $Q_{(-)z}$

Fig. 3. Graphic illustration of the friction heat distribution into two streams: the usable one  $Q_{(-)u}$  and the exhausted one  $Q_{(-)z}$

#### 4. Model optymalizacyjny

##### Zmienne decyzyjne

Jako zmienne decyzyjne optymalizacji przyjęto następujące cechy konstrukcyjne w podanych zakresach wartości:

- ◆ stromość zwoju ślimaka  $\gamma_s = 0,01 - 0,50$
- ◆ względna wysokość zwoju ślimaka  $x_h = 0,01 - 0,40$
- ◆ długość cylindra określona wielokrotnością średnic  $z_c = 0,5 - 6,0$
- ◆ kąt skrętności rowków  $\varphi = 0 - \pi/2$
- ◆ średnica cylindra  $d_c = 0,020\text{m} - 0,500\text{m}$

##### Kryteria

Do oceny konstrukcji używa się parametrów określających wydajność oraz efektywność energetyczną. Z tego zakresu wielkości przyjęto następujące kryteria optymalizacji charakteryzujące właściwości konstrukcji:

- ◆ wydajność względna  $v = \frac{\dot{V}}{d_c^3 \cdot z_c \cdot \omega}$  ;[max]; (9)

Wielkość ta odnosi wydajność objętościową do objętości przestrzeni roboczej układu ślimakowego i do prędkości obrotowej ślimaka. Wyraża wydajność w postaci liczby bezwymiarowej i umożliwia względne porównywanie urządzeń o różnej wielkości. W obliczeniach optymalizacyjnych wielkość ta jest maksymalizowana;

$$\diamond \text{ sprawność energetyczna } \eta = \frac{Q_w + \sum Q_{(-)u} + N_v}{Q_w + \sum Q_{(-)} + N_v} ; [\text{max}]; \quad (10)$$

Ta wielkość określa jaka część energii mocy napędu ślimaka jest energią użyteczną (ciepło przejmowane przez tworzywo w tym ciepło tarcia wewnętrznego oraz użyteczna część ciepła tarcia przy powierzchniach i moc wytłaczania). W obliczeniach optymalizacyjnych wielkość ta jest maksymalizowana;

$$\diamond \text{ udział ciepła stapiania } u = \frac{Q_w + \sum Q_{(-)u}}{Q_{st}} \leq 1; [\text{max}]; \quad (11)$$

Wielkość ta określa jaka część ciepła, potrzebnego do stopienia tworzywa, dostarczona może być w strefie zasilania. Charakteryzuje ona również efekty jakościowe działania wytłaczarki, gdyż możliwie szybkie i całkowite stopienie tworzywa decyduje o jakości wytłoczyny. Korzystnym jest, aby wielkość ta była możliwie duża (w obliczeniach optymalizacyjnych wielkość ta jest maksymalizowana). Jednocześnie nie jest celowym, aby ciepło przejmowane przez tworzywo było większe od ciepła jakie jest potrzebne do jego stopienia, stąd w obliczeniach optymalizacyjnych zastosowano ograniczenie tej wielkości.

### Ograniczenia

Istotną funkcją aktywnej strefy zasilania jest wygenerowanie określonego, wysokiego ciśnienia. Stąd w obliczeniach zastosowano ograniczenie dopuszczające takie zmienne decyzyjne (cechy konstrukcyjne), dla których możliwe będzie wytworzenie ciśnienia  $p = 5 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ . Ograniczenie to realizowane będzie przez spełnienie funkcji na wartość ciśnienia

$$p = f(\gamma_s, z_c, x_h, \varphi_c, d_c, \mu_p), \quad (12)$$

w zależności od cech konstrukcyjnych oraz od parametru  $\mu_p$ , określającego pewność utrzymania kierunku ruchu tworzywa zgodnie z rowkami na cylindrze.

Aby układ ślimakowy właściwie funkcjonował koniecznym jest, żeby posiadał minimum dwa skoki zwoju ślimaka. Stąd ograniczenie procesu optymalizacji na minimalną ilość zwojów ślimaka  $L > 2 \cdot S$ .

### Metoda obliczeń

Optymalizację przeprowadzono przy pomocy programu POLIOPT [1]. Program ten umożliwia optymalizację metodą gradientową i metodami zmiennej metryki: Dawidona - Fletchera - Powella (DFP), Broydena i Pearsona-2 [ 9]. W trakcie obliczeń posługiwano się głównie algorytmem DFP, który okazał się najskuteczniejszy spośród wymienionych.

Ograniczenia funkcjonalne i ograniczenia zakresów zmiennych decyzyjnych uwzględniono metodą zewnętrznej funkcji kary postaci:

$$Kara_i = \begin{cases} 0 & \text{dla } ogr_i \geq 0 \\ (ogr_i)^2 & \text{dla } ogr_i < 0 \end{cases} \quad (13)$$



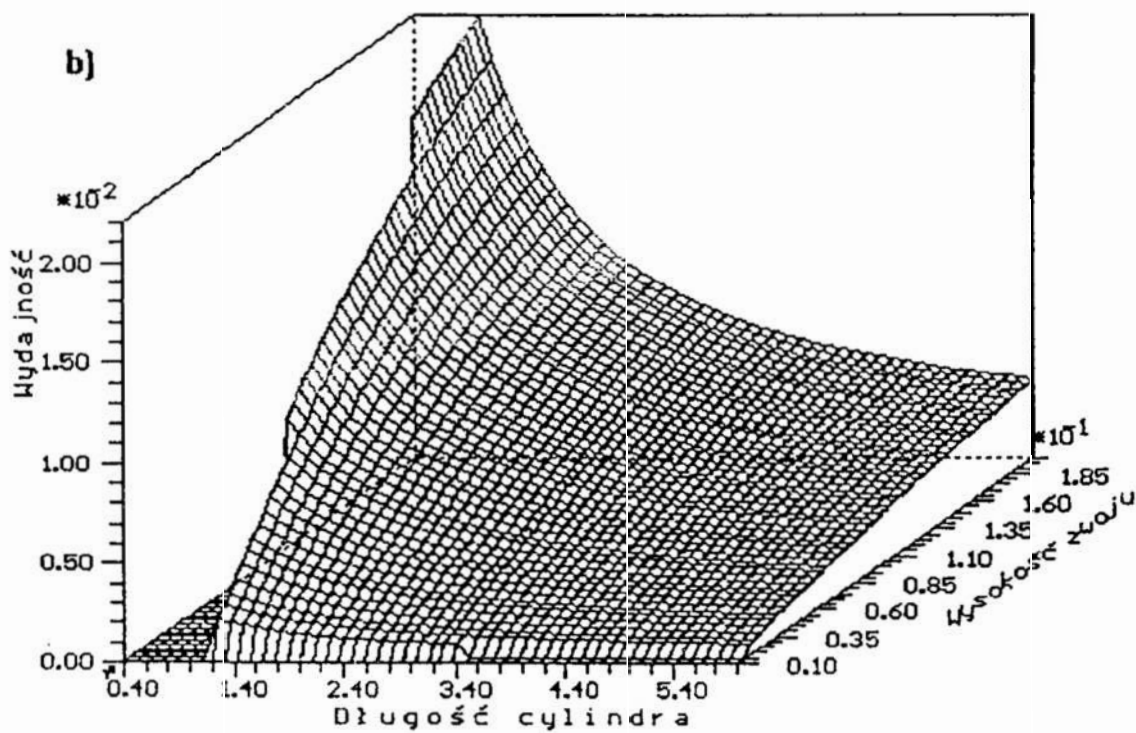
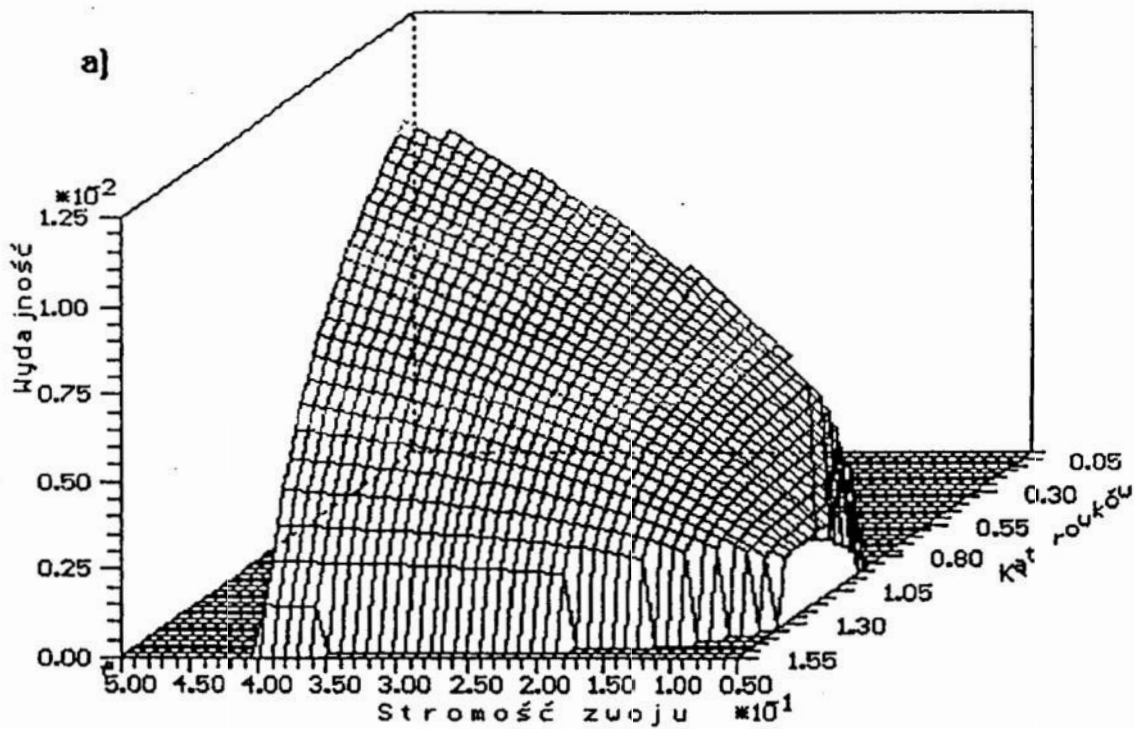
## 5. Charakter zależności i wyniki optymalizacji

Kryteria optymalizacji określone są jako funkcje pięciu zmiennych. Aby w pełni móc przedstawić charakter zmienności wartości kryterium w funkcji przyjętych pięciu zmiennych należało by zobrazować to na dziesięciu wykresach przestrzennych dla każdego kryterium. Na rysunkach 4,5,6 zaprezentowane zostały wybrane wykresy przebiegu funkcji kryterialnych obrazujące charakter zależności, wpływ ograniczeń i problemy optymalizacji.

Na rysunkach uwidocznione są obciążenia powierzchni określających przebieg funkcji. Wynikają one z działania ograniczeń określonych w obliczeniach optymalizacyjnych. Ograniczenia dla małych długości cylindra, małych kątów skrętności rowków i dużych wysokości zwoju ślimaka, wynikają z uwzględnienia ograniczenia na przyjętą wartość ciśnienia jakie ma być wygenerowane w strefie zasilania. Dla wartości cech konstrukcyjnych, dla których obcięte zostały zakresy funkcji nie można by było otrzymać założonego ciśnienia. Na rys. 4 i 5 występują również ograniczenia przebiegu funkcji dla dużych długości cylindra, dużych kątów skrętności rowków i małych wysokości zwoju ślimaka. Te ograniczenia wynikają z przyjętego warunku, że ciepło które może przejść tworzywo nie powinno być większe od ciepła potrzebnego do zapoczątkowania jego stopienia.

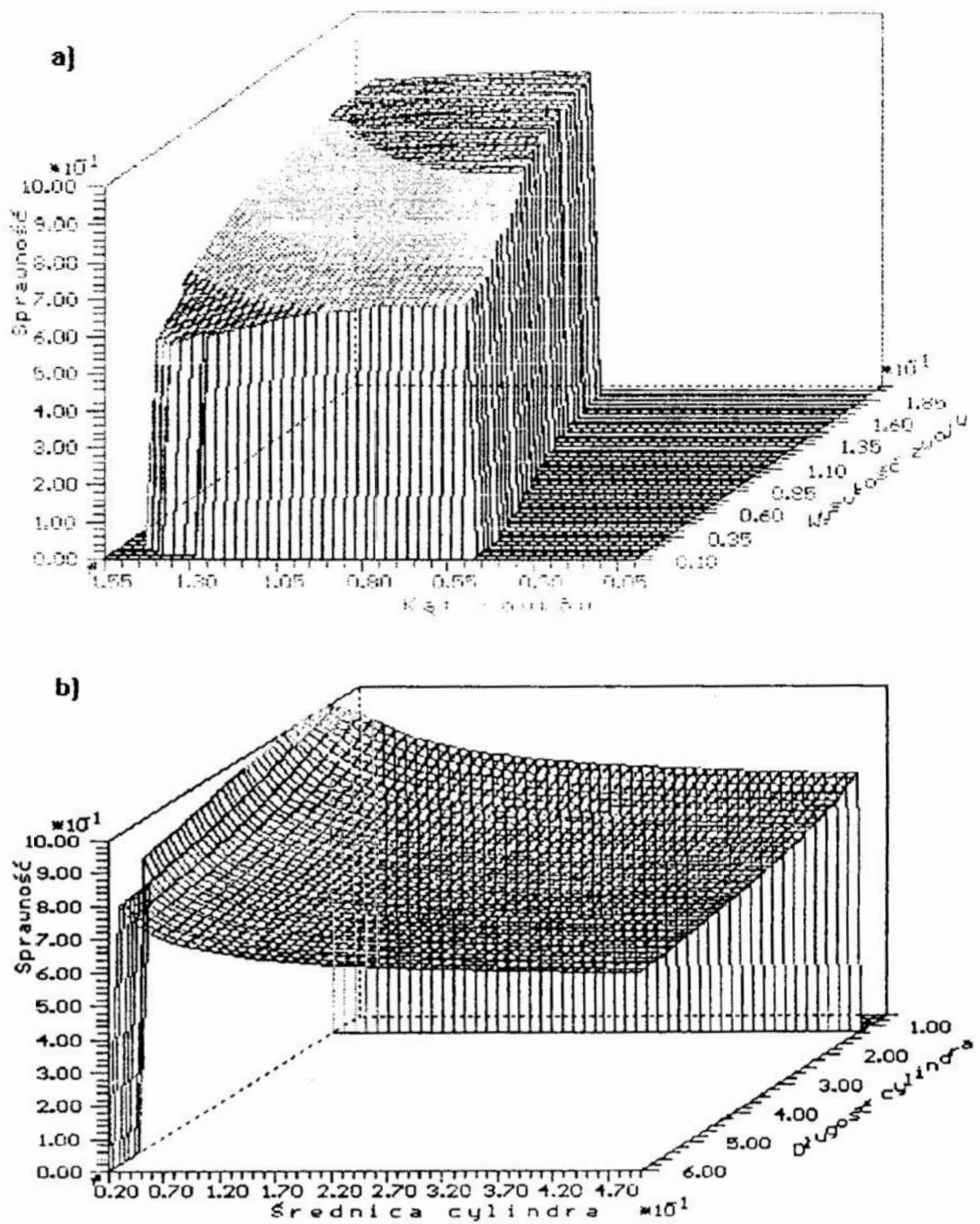
Maksymalną wartość wydajności względnej  $v = 0,0262$  otrzymano dla następujących cech konstrukcyjnych: stromości ślimaka  $\gamma = 0,124$ , wysokości zwoju ślimaka  $x_h = 0,199$ , kąta skrętności rowków  $\varphi = 1,175$  ( $\text{tg } \varphi = 2,40$ ), długości cylindra  $z_c = 0,624$ . Średnica cylindra nie wpływa na wartość wydajności względnej. Przy wielkościach optymalnych ze względu na wydajność, układ ślimakowy ma sprawność  $\eta = 0,890$  oraz względna ilość ciepła  $u = 0,145$  wykorzystana może być w strefie zasilania do podniesienia temperatury tworzywa. Z rys. 4 widać, że optymalne wartości wydajności otrzymano na ograniczeniach funkcji kryterialnej. Ze względu na maksymalizację wydajności względnej korzystniejsze są rozwiązania z krótkimi cylindrami.

Optymalizacja ze względu na sprawność energetyczną wykazała, że teoretycznie możliwe jest uzyskanie sprawności  $\eta = 1,00$ . Przy przyjętych założeniach dotyczących budowy modelu analitycznego oznacza to, że można dobrać taki zestaw cech konstrukcyjnych, przy których całość energii dostarczanej przez ślimak, przy idealnej izolacji odpływu ciepła (bez strat ciepła), może zostać przejęta przez tworzywo bez zagrożenia przegrzania tworzywa (bez konieczności chłodzenia strefy zasilania). Wielkościami optymalnymi dla tego kryterium są: stromość ślimaka  $\gamma = 0,267$ , wysokość zwoju ślimaka  $x_h = 0,191$ , kąt skrętności rowków  $\varphi = 1,190$  ( $\text{tg } \varphi = 2,50$ ), długość cylindra  $z_c = 1,871$ . Przy tych wielkościach optymalnych układ ślimakowy charakteryzuje się wydajnością względną  $v = 0,0117$  oraz udziałem ciepła stapiania  $u = 0,275$ , który może być wykorzystany w strefie zasilania do podniesienia temperatury tworzywa. Jak widać z przebiegu funkcji kryterialnej przedstawionej na rys. 5 wartości optymalne uzyskano na ograniczeniach. Ze względu na sprawność energetyczną korzystniejsze są układy ślimakowe krótkie oraz o małych średnicach i dla tych zakresów otrzymano teoretyczne maksymalną sprawność - rys. 5b.



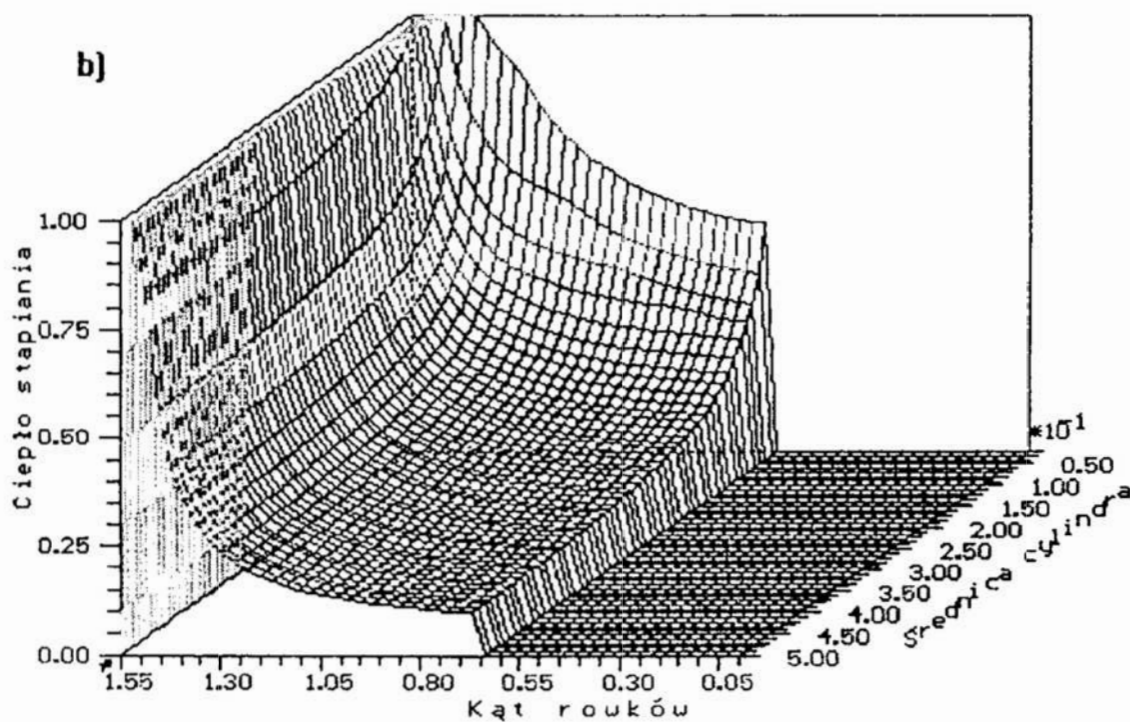
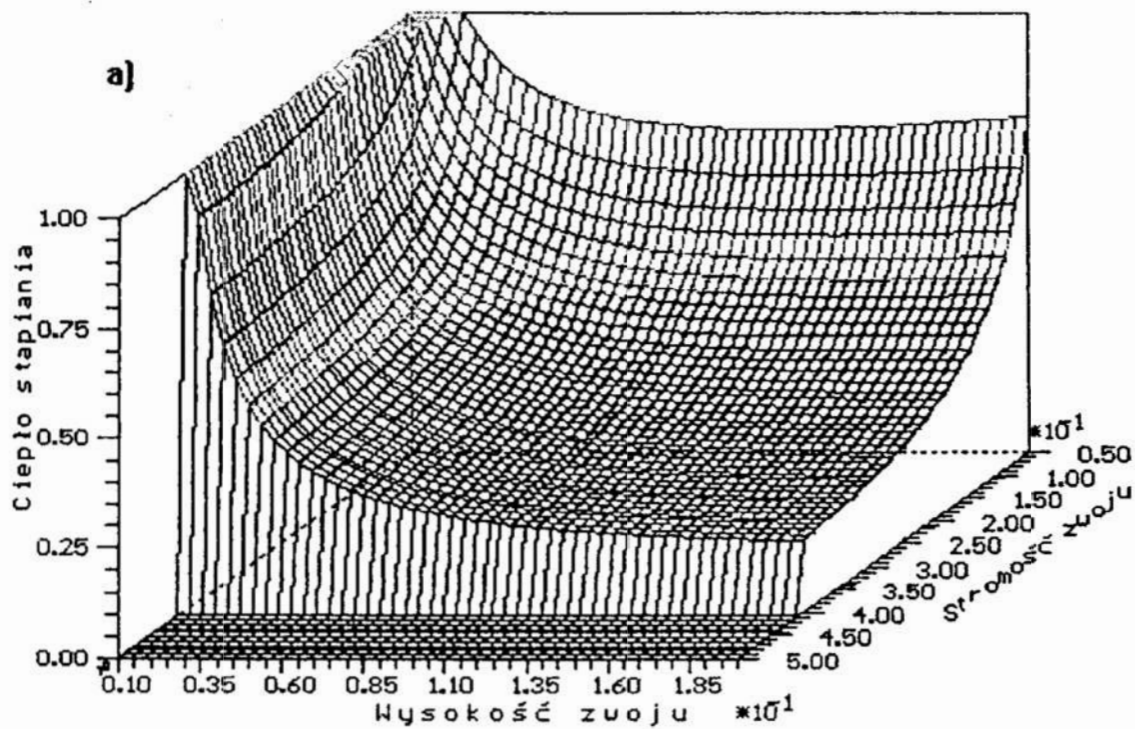
Rys. 4. Wykres wydajności jednostkowej  $v$ : a) w funkcji stromości zwoju ślimaka  $\gamma$  i kąta rowków cylindra  $\varphi$ , b) w funkcji długości cylindra  $z_c$  i wysokości zwoju ślimaka  $x_h$

Fig. 4. Diagram of unit capacity  $v$ : a) versus angle of screw coil  $\gamma$  and angle of cylinder grooves  $\varphi$ , b) versus the cylinder length  $z_c$  and the screw coil height  $x_h$



Rys. 5. Wykres sprawności energetycznej  $\eta$ : a) w funkcji kąta rowków cylindra  $\varphi$  i wysokości zwoju ślimaka  $x_h$ , b) w funkcji długości cylindra  $z_c$  i średnicy cylindra  $d_c$

Fig. 5. Diagram of energetic efficiency  $\eta$ : a) versus angle of cylinder grooves  $\varphi$  and the screw coil height  $x_h$ , b) versus the cylinder length  $z_c$  and the cylinder diameter  $d_c$



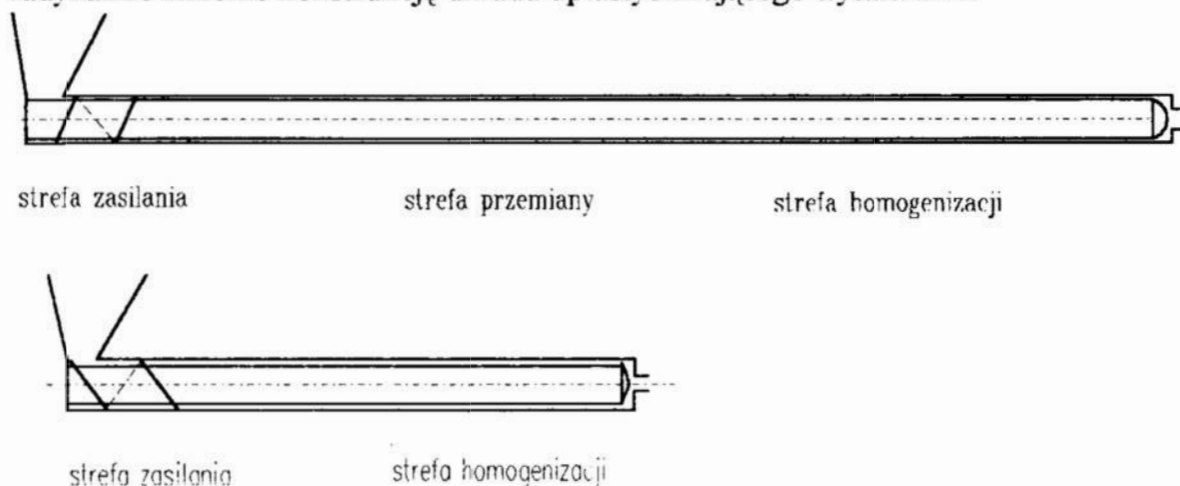
Rys. 6. Wykres udziału ciepła stapienia  $u$ : a) w funkcji wysokości zwoju ślimaka  $X_h$ , i stromości zwoju ślimaka  $\gamma$ , b) w funkcji kąta rowków cylindra  $\varphi$ , i długości cylindra  $z_c$

Fig. 6. Diagram of share of melting heat  $u$ : a) versus the screw coil height  $X_h$  and angle of screw coil  $\gamma$ , b) versus angle of cylinder grooves  $\varphi$  and the cylinder length  $z_c$

Ze względu na udział ciepła stapiania  $u$  nie otrzymano jednej wartości optymalnej. Z przebiegu zależności na rys. 6 widać, że szczególnie dla dużych kątów skrętności rowków i małych wysokości zwoju ślimaka otrzymuje się zakres wielkości zmiennych decyzyjnych (cech konstrukcyjnych), dla których otrzymuje się potrzebną maksymalną ilość ciepła stapiania  $u = 1$ . Oznacza to, że możliwe są takie konstrukcje strefy zasilania, w których oprócz wygenerowania określonego ciśnienia i wydajności uzyskać można przeżytą przez tworzywo taką ilość ciepła tarcia, która doprowadzi do stopienia tworzywa.

## 6. Wnioski

Opracowany model analityczny strefy zasilania umożliwił przeprowadzenie obliczeń optymalizacyjnych zarówno pod względem kryterium wydajności jak i efektów energetycznych. Potrzeba wygenerowania określonego ciśnienia w strefie zasilania ogranicza istotnie zakres dopuszczalnych rozwiązań konstrukcyjnych. Ograniczony jest szczególnie zakres kątów skrętności rowków i niekorzystne są konstrukcje z kątami skrętności  $\varphi = 0$  (rowki proste, osiowe). Obliczenia wykazały teoretyczną możliwość otrzymania bardzo korzystnych konstrukcji ze względów efektów energetycznych (maksymalna sprawność  $\eta = 1$ ) i funkcjonalnych (uzyskanie stopienia tworzywa w strefie zasilania  $u = 1$ ). Możliwość wykorzystania ostatniego z wyników ( $u = 1$ ) pozwala radykalnie zmienić konstrukcję układu uplastyczniającego wylączarki.



Rys. 7. Porównanie postaci konstrukcji tradycyjnego układu uplastyczniającego (a) i układu po wyeliminowaniu strefy przemiany (b)

Fig.7. Comparison of the desing form of traditional Plasticization system of the screw extruder (a), and the system after eliminating melting zone (b)

Umożliwia to uzyskanie efektu autotermiczności działania wylączarki (praca bez potrzeby stosowania grzejników na cylindrze) już w strefie zasilania. Stopienie tworzywa w strefie zasilania pozwala wyeliminować strefę stapiania (rys. 7), a to znacznie skraca długość układu uplastyczniającego przy uzyskaniu nawet lepszych



efektów jakościowych związanych z całkowitym i równomiernym stopieniem tworzywa już w strefie zasilania.

Otrzymano w ramach analizy teoretycznej efekt stopienia tworzywa w strefie zasilania otrzymano przy założeniu, że utrzymane są procesy tej strefy, poprzez odprowadzenie nadmiaru ciepła tarcia tworzywa o ścianki. Mimo tego założenia wykazano, że teoretycznie możliwe jest przejście przez tworzywo w strefie zasilania znacznej ilości ciepła w porównaniu do ciepła potrzebnego do stopienia. Uzyskuje się to w wyniku ciepła tarcia wewnętrznego oraz nagrzewania tworzywa równomiernie od wszystkich powierzchni cylindra i ślimaka, a nie jak to jest realizowane w konstrukcjach standardowych tylko od powierzchni cylindra, na którym montowane są grzejniki.

## Literatura

1. Bil T.: Opis programu POLIOPT; w skrypcie: Tarnowski W. i inni: Komputerowe wspomaganie projektowania. Wydawnictwa Uczelniane WSInż. Koszalin 1994
2. Diakun J. : Optymalny skok ślimaka w strefie zasilania wylączarki. Polimery 32, 1987, nr 5, s. 199- 201
3. Diakun J., Bil T.: Die Druckerzeugung in der Einzugszone optimieren. Plastverarbeiter 39, 1988 nr 4, s. 100 - 104
4. Diakun J., Bil T.: Polioptymalizacja wybranych elementów konstrukcyjnych ślimakowego układu zasilania. Z. N. Wydziału Mechanicznego WSInż. Koszalin nr 14, 1990, s. 29 - 44
5. Diakun J.: Podstawy uaktywnienia strefy zasilania w konstrukcji wylączarki ślimakowej. Monografie 30, Wydawnictwo Uczelniane WSInż. Koszalin, 1991
6. Fritz H. G., Hillenbrand H.: Zur energetischen und verfahrenstechnischen Optimierung von Nutzenextrudern. Kunststoffberater 21, 1976, nr 11, s. 612 - 617
7. Grünschloß E. Optimieren der Geometrie an Schnecken von Extrudern mit genuteten Einzug. Maschinenmarkt 91, 1985, nr 69, s. 1347 - 1350
8. Haberstroh E., Mayer A., Pesch M.: Möglichkeiten zur Energieeinsparung. Plastverarbeiter 36, 1985, nr 6, s. 74 - 80
9. Himmelblau D. M.: Applied nonlinear programming. Mc Graw - Hill Book Company, 1972
10. Menges G., Hegele R.: Temperatur und Energiemessung in der Einzugszone eines Einschnecken- Extruder. Plastverarbeiter 23, 1972, nr 5, s. 332 - 338
11. Menges G., Mayer A., Baur E., Laugwitz W.: Optimierung eines Nutbuchsenextruder zur Verarbeitung von PP und LLDPE. Plastverarbeiter 35, 1984, nr 9, s. 97 -106

### *Streszczenie*

Na bazie już opublikowanego przez autora modelu analitycznego strefy zasilania wylączarki ślimakowej z rowkowanym cylindrem przedstawiony został model optymalizacyjny. Jako zmienne decyzyjne przyjęto pięć cech konstrukcyjnych określających istotne proporcje wymiarowe i wielkość urządzenia. Kryteriami optymalizacji są przyjmowane wariantowo wielkości określające: wydajność, sprawność energetyczną i efekty jakościowe, analizowanej konstrukcji. Na wykresach przestrzennych zilustrowano charakter zależności funkcji kryteriów optymalizacji od zmiennych decyzyjnych przy uwzględnieniu ograniczeń wynikających z generowanego przez układ ślimakowy ciśnienia. Jako wynik obliczeń otrzymano zestaw optymalnych wartości cech konstrukcyjnych dla określonych kryteriów. Istotnym wynikiem obliczeń i analizy są wnioski o możliwości opracowania niekonwencjonalnej konstrukcji wylączarki ślimakowej efektywniejszej energetycznie i o lepszej jakości uplastyczniania tworzywa.

### **OPTIMIZATION OF THE ACTIVE SUPPLYING ZONE OF THE SCREW EXTRUDER ON ENERGY CRITERIA**

#### *Summary*

Optimization problem is formulated on the basis of a mathematical model of the supplying zone of the screw extruder, which has been published by the first author. Five main design parameters concerning dimensional proportions of the system were adopted as the decision variables. Optional three criteria of optimality are proposed, which are: the capacity, the watt-hour efficiency and the product quality index. On 3-D diagrams the relations between the optimality criteria and the decisions variables are shown with respect to the pressure generated by the extruder which is the constraint. As the final result it is obtained a set of the decision variables values for the given criteria. A substantial part of the analysis and computations is a concluding proposal of an unconventional design of the extruder which is more energy efficient and yields better plasticization of being processed plastics.

## ALGORYTMY WYZNACZANIA STRUMIENIA OPTYMALNEGO W SILNIKU INDUKCYJNYM

### 1. Wstęp

W napędach okresowo niedociążonych, zasilanych ze źródła o regulowanym napięciu, zastąpienie tradycyjnego sterowania  $U/f=\text{const}$  sterowaniem z napięciem (strumieniem) optymalnym umożliwia osiągnięcie znacznych korzyści energetycznych w postaci obniżenia prądu, strat i temperatury uzwojeń, zwiększenia przeciążalności silnika. Strumienia optymalnego poszukuje się według jednego z trzech kryteriów energetycznych: minimalnego prądu stojana, najmniejszej temperatury uzwojeń i minimalnych strat całkowitych. [3]. Minimum wybranej funkcji celu poszukuje się na modelu matematycznym jak również możliwe są poszukiwania na rzeczywistym obiekcie [3]. Przy poszukiwaniu strumienia optymalnego wprowadza się szereg ograniczeń: maksymalnego i minimalnego strumienia, maksymalnego napięcia zasilania. Najważniejsze informacje na temat optymalizacji strumienia w silniku indukcyjnym, warunków stosowania i kryteriów energetycznych przedstawiono w pracy [1,2].

W niniejszym artykule przedstawiono metody wyznaczania strumienia optymalnego w silniku indukcyjnym przy różnych kryteriach optymalizacji.

### 2. Poszukiwanie strumienia optymalnego bezpośrednio na obiekcie sterowania

Minimum zadanej funkcji celu można znajdować bezpośrednio na obiekcie sterowania w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Przy poszukiwaniu optimum zadanej funkcji celu bezpośrednio na silniku zmienia się strumień w maszynie i na podstawie jej reakcji można znaleźć minimum zadanej funkcji celu. Funkcję celu mierzy się lub oblicza na podstawie parametrów punktu pracy. Poszukiwanie bezpośrednio na obiekcie nie zakłóca procesu regulacji prędkości pod warunkiem ograniczenia kroku zmiany strumienia. [3]. Jeżeli funkcją celu jest prąd zasilający silnik, to jego pomiar jest łatwy, a więc realizacja układu poszukiwania minimum  $I_S$  na obiekcie jest stosunkowo prosta. Jeżeli funkcją celu są straty całkowite w silniku, to pomiar tych strat naraża już na znaczne trudności, aczkolwiek jest możliwy do zrealizowania technicznie.

Takie postępowanie nie jest możliwe w przypadku optymalizacji temperatury ze względu na długie ciepłone stałe czasowe, które powodują, że na stan ustalony należy czekać co najmniej kilkadziesiąt minut. Alternatywnym rozwiązaniem jest w takim przypadku poszukiwanie strumienia optymalnego na modelu silnika.

### 2. Poszukiwanie strumienia optymalnego na modelu matematycznym

Przy poszukiwaniu funkcji celu na modelu, strumień optymalny można znajdować za pomocą wzorów analitycznych, lub skomplikowanego algorytmu iteracyjnego.

---

\*Wyższa Szkoła Morska w Gdyni, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 81-83, 81-225 Gdynia

### Model matematyczny uproszczony

Posługując się klasycznymi modelami elektrycznymi silnika indukcyjnego można wyprowadzić analityczne wzory na strumień optymalny. Dokonano tego w pracy [3]. Dla optymalizacji strat całkowitych strumień optymalny jest równy [3]:

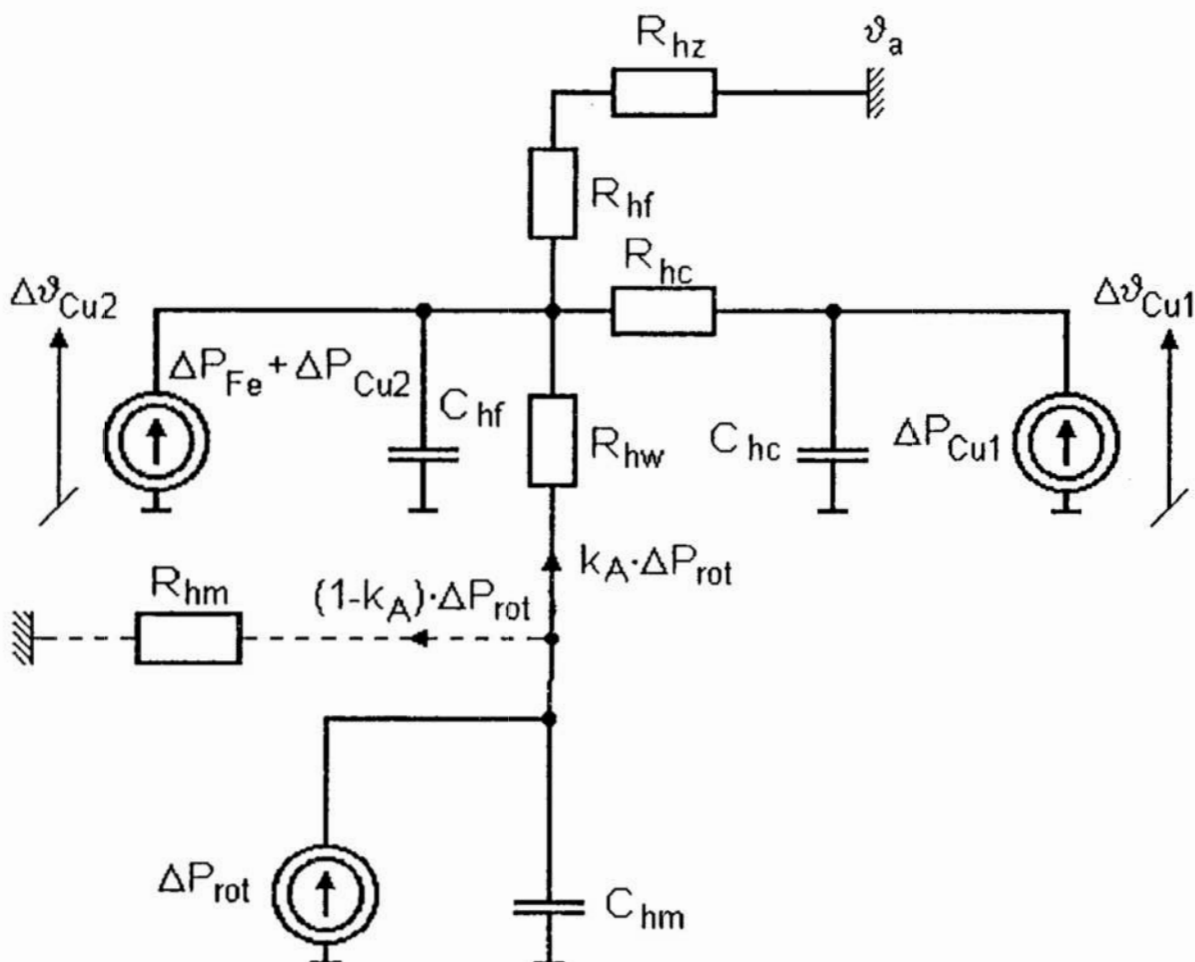
$$\Psi_{\mu} = \sqrt[4]{\frac{3 L_{\mu}^4 \left( R_s + \frac{L_{\mu}^2}{L_R^2} R_R^2 \right) T_e^2}{k_m^2 L_R^2 \left( k_{Fe} f_s^{1.3} + \frac{3 R_s}{L_{\mu}^4} R_R^2 \right)}} \quad (1)$$

gdzie:

$f_s$  - częstotliwość zasilania,  $k_h$  - współczynnik strat histerezowych,

$k_{Fe}$  - współczynnik zależny od strat w żelazie,  $L_{\mu}$  - indukcyjność magnesująca,

$L_R$  - sprowadzona indukcyjność rozproszenia wirnika,  $R_R$  - sprowadzona rezystancja wirnika,  $R_s$  - rezystancja stojana,  $\Psi_{\mu}$  - strumień główny



Rys. 1. Przykład uproszczonego zastępczego schematu cieplnego silnika klatkowego [3]

Fig. 1 Example of simplified thermal scheme of an induction motor [3]

Posługując się uproszczonym cieplnym schematem zastępczym silnika jak na rys. 1 można wyprowadzić wzór na strumień optymalny przy optymalizacji minimalno - temperaturowej [3]:

$$\Psi_{\mu} = \sqrt[4]{\frac{\left[ R_{hc} \frac{R_s}{2} + (R_{hf} + R_{hz}) \left( R_s + k_A R_R \frac{L_{\mu}^2}{L_R^2} \right) \right] T_e^2}{R_{hc} \frac{R_s}{2} + (R_{hf} + R_{hz}) \left( \frac{L_{\mu}^4}{3L_R^2} k_{Fe} f_s^{1.3} + R_R \right)}} \quad (2)$$

gdzie:

$k_A$  - współczynnik odprowadzania ciepła z wirnika przez szczelinę powietrzną

$R_{hc}$  - rezystancja termiczna połączenia czołowe - żelazo stojana

$R_{hw}$  - rezystancja termiczna wirnik - żelazo stojana

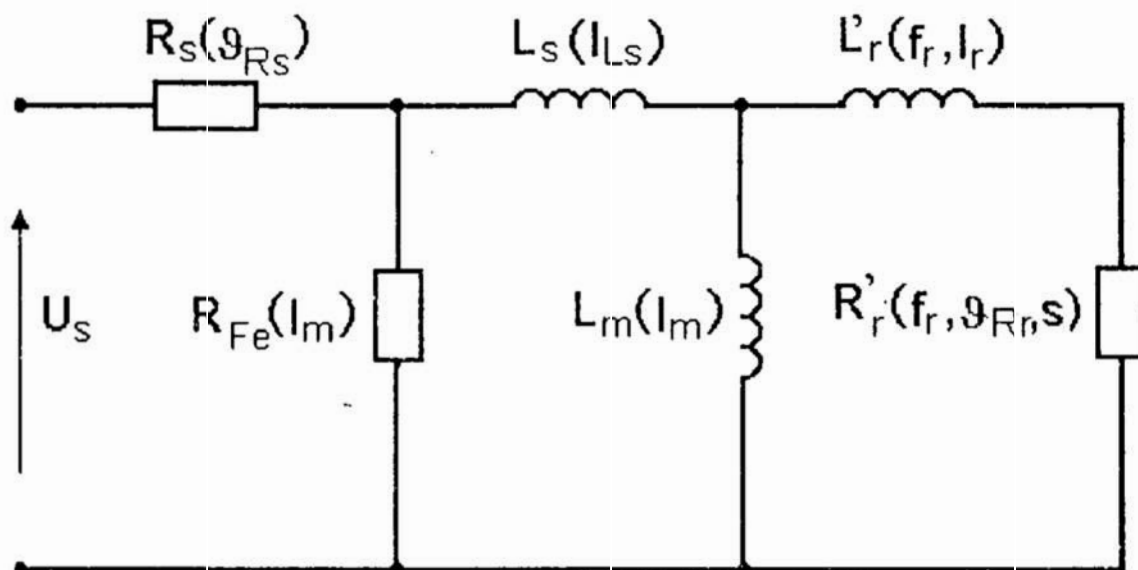
$R_{hf} + R_{hz}$  - rezystancja termiczna żelazo stojana - otoczenie

Modele elektromagnetyczne silników, opracowane do opisu zachowania się maszyn przy zasilaniu znamionowym napięciem i częstotliwością znamionową nie gwarantują zadowalającej dokładności przy dowolnych warunkach zasilania. W takim przypadku należy posłużyć się modelem bardziej dokładnym, nieliniowym. Również uproszczony cieplny schemat zastępczy nie zawsze umożliwia dokładne obliczanie rozkładu temperatur.

Zastosowanie nieliniowych, złożonych modeli maszyny uniemożliwia wyznaczenie rozwiązań optymalnych w postaci analitycznej.

### Model matematyczny rozbudowany

Autor bada możliwość obniżenia temperatury uzwojeń silnika indukcyjnego posługując się symulacją komputerową.

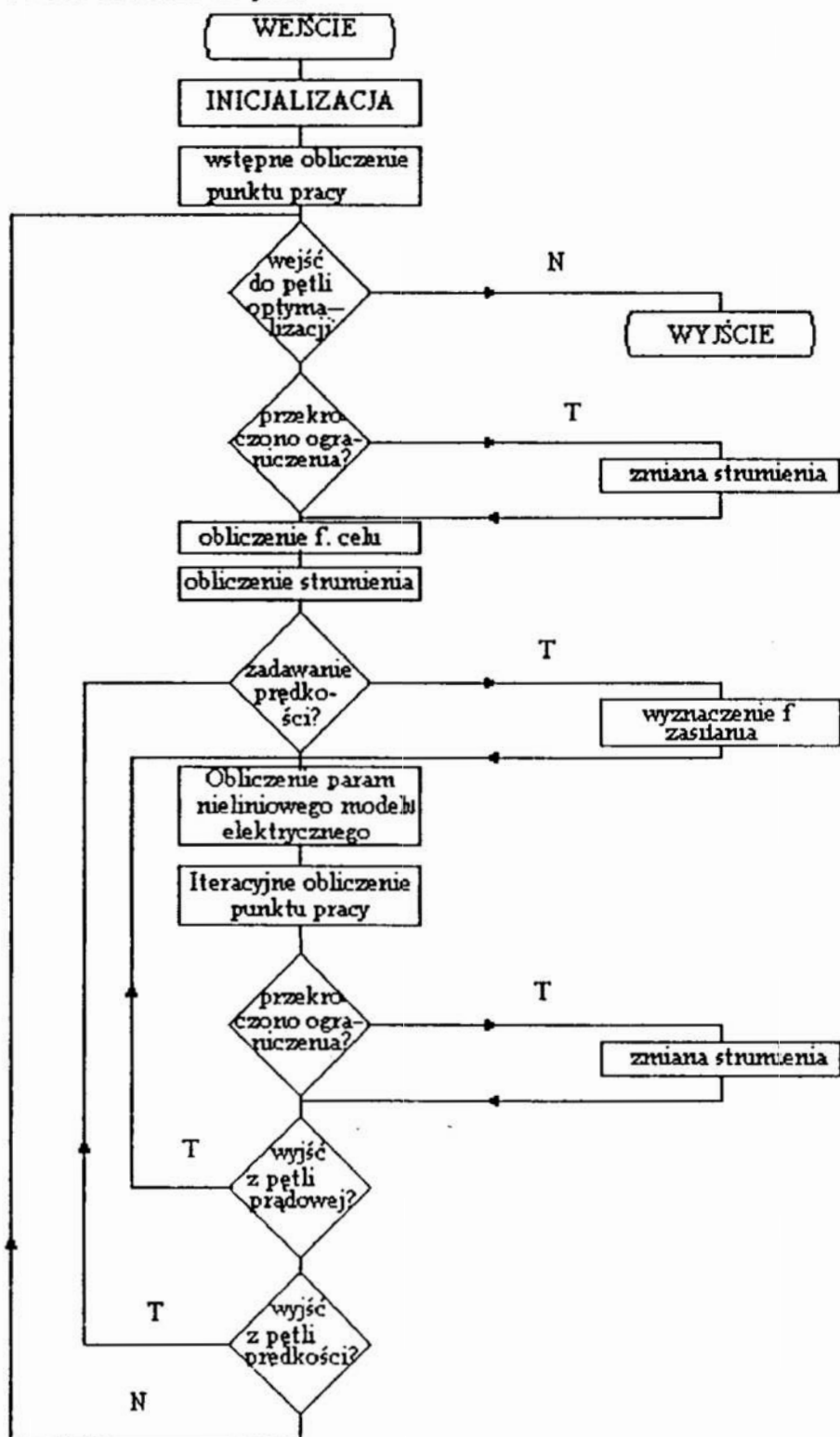


Rys. 2 Nieliniowy model elektryczny silnika indukcyjnego [3].

Fig. 2 Unlinear model of an induction motor [3]



Strumienia optymalnego Autor poszukuje za pomocą iteracyjnego algorytmu optymalizacji strumienia opartym na nieliniowym modelu elektrycznym silnika (rys. 2). W modelu uwzględniono nasycenie się magnetowodu, zjawisko wypierania prądu, wpływ temperatury uzwojeń na własności silnika. W modelu strat uwzględniono poszczególne składowe strat dodatkowych.



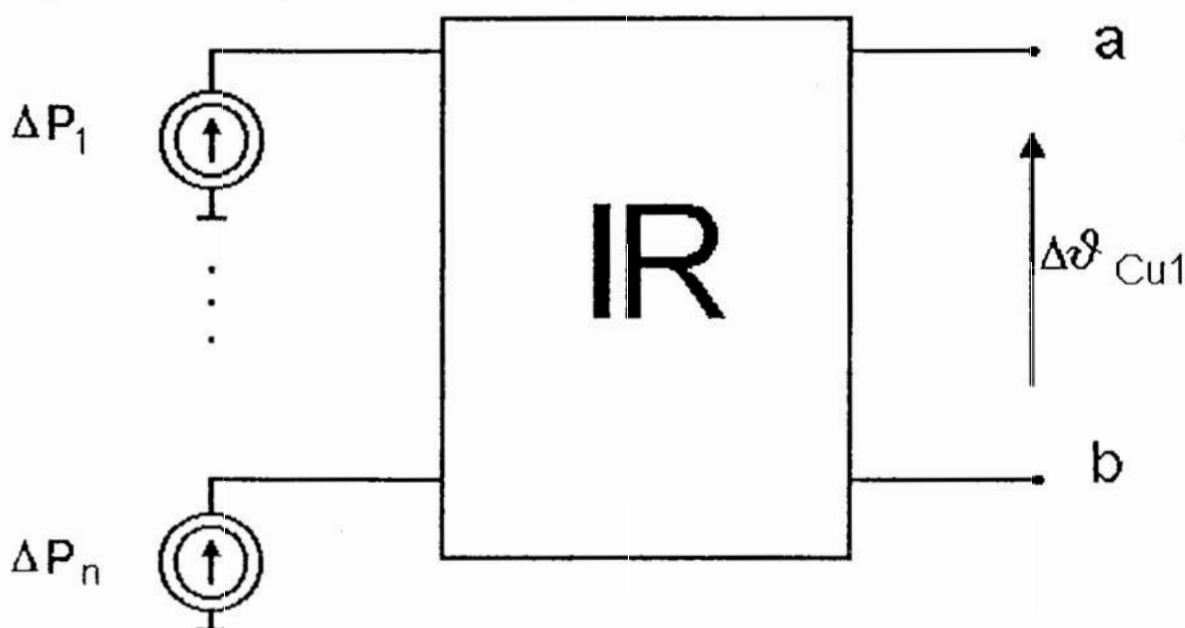
Rys. 3 Schemat blokowy opracowanego przez Autora algorytmu znajdowania strumienia optymalnego

Fig. 3 Block diagram of the flux optimization algorithm

W pracy [3] udowodniono, że optymalizacja strumienia dla stanów ustalonych elektromechanicznych może być dokonywana w oparciu o modele silnika (elektromagnetycznego i strat) ważne tylko dla stanów ustalonych. Natomiast w pracy [1] wykazano metodą symulacji numerycznej, że dla obciążeń przedziałami stałych wolno posłużyć się modelem cieplnym statycznym przy wyznaczaniu temperatur ustalonych w silniku. To stwierdzenie jest podstawą do wprowadzenia obliczeń w przypadku optymalizacji wg kryteriów temperaturowych: oparte one są o model cieplny szczegółowy, ale wyłącznie statyczny, tzn. tylko z rezystorami cieplnymi. Poniżej podano wyprowadzenie algorytmu sterowania minimalno-temperaturowego opartego na optymalizacji wagowej strat.

Rozpatrujemy zastępczy schemat cieplny typu R, modelujący rozkład temperatur w stanie cieplnie ustalonym. Przyrost temperatury czół uzwojeń  $\vartheta_{Cu1}$  modeluje napięcie między zaciskami a i b (rys. 4).

Z punktu widzenia zacisków a i b dla modelu cieplnego liniowego schemat cieplny na rys. 4 jest równoważny schematowi cieplnemu z rys. 5. Przyrost temperatury



Rys. 4 Rozpatrywany schemat cieplny silnika

Fig. 4 Examined thermal scheme of motor

czół uzwojeń  $\Delta\vartheta_{Cu1}$

$$\Delta\vartheta_{Cu1} = \sum w_i P_i \quad (4)$$

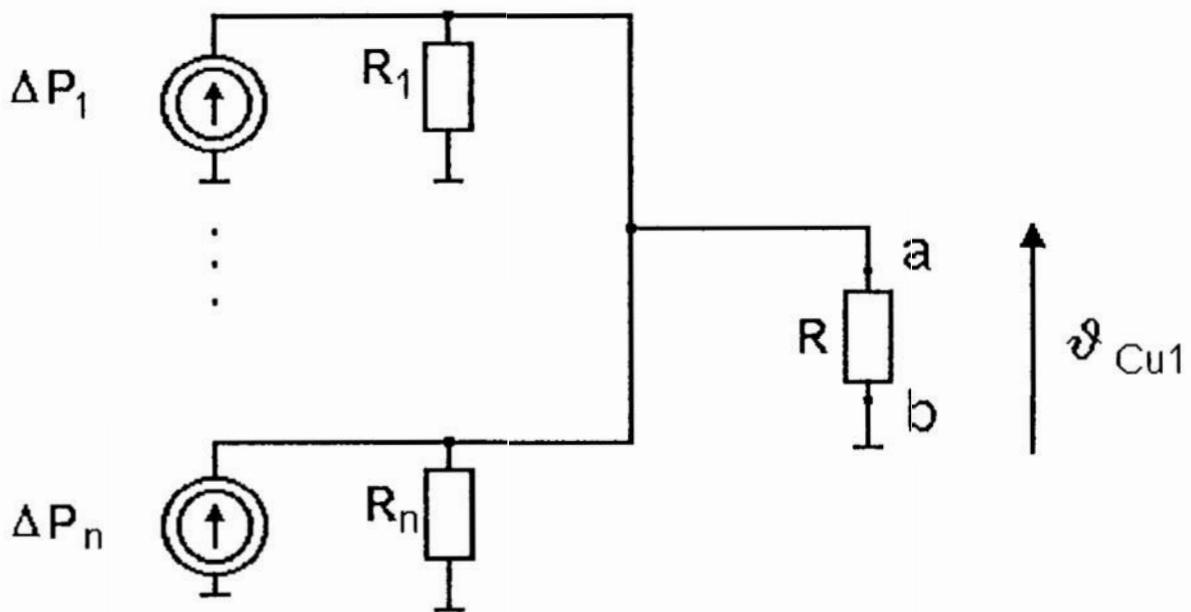
gdzie  $\vec{P}$  - wektor strat,  $w_i$  - współczynniki wagi

Ostatnie wyrażenie jest funkcją celu, której minimum jest poszukiwane w iteracyjnym algorytmie optymalizacji. Wagi  $w_i$  można wyznaczyć przekształcając macierz rezystancji termicznych lub w czasie próbnej symulacji z równania:

$$w_i = \Delta\vartheta_{Cu1}(\vec{P}_i) \quad (5)$$

gdzie:  $\vec{P}_i = (0 \dots 0, 1, 0 \dots 0)$

(6)



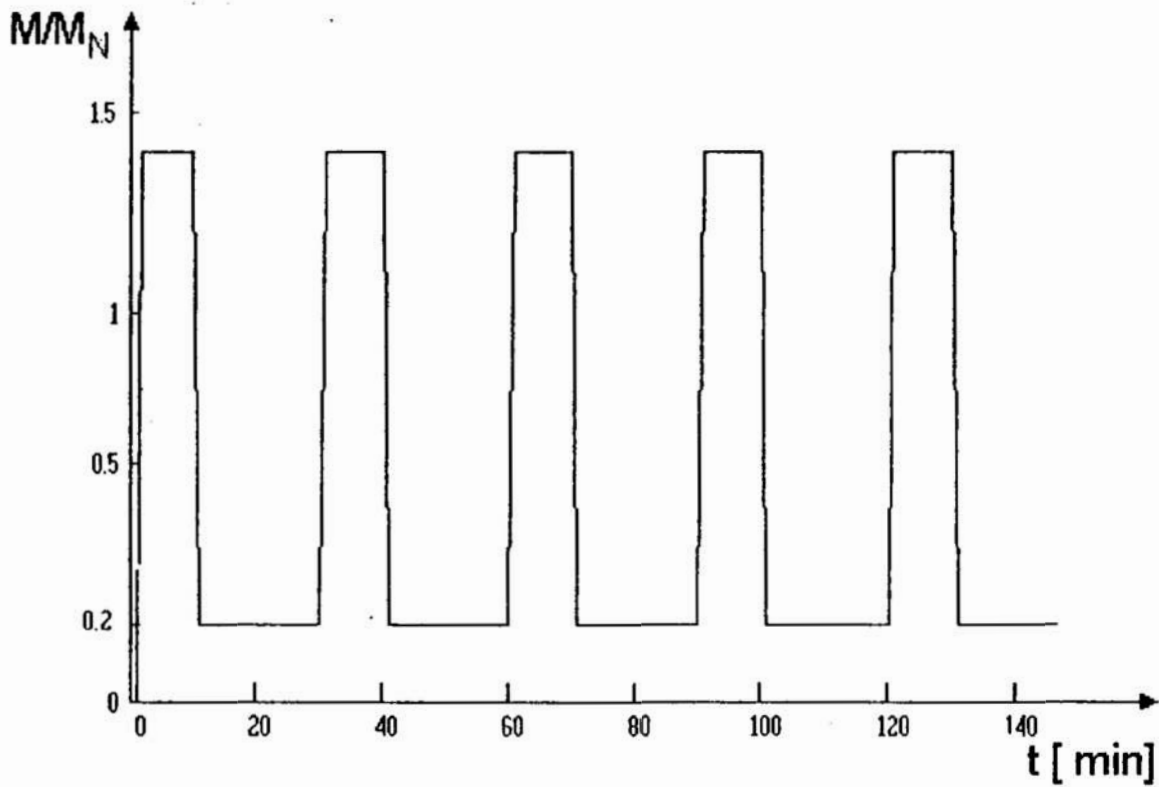
Rys. 5 Równoważny schemat cieplny  
Fig. 5 Equivalent thermal scheme

Dany algorytm jest wykorzystywany przez Autora w symulacyjnych badaniach wpływu optymalizacji strumienia na temperaturę uzwojeń w silniku indukcyjnym. Wagi wykorzystywane przez Autora w optymalizacji minimalno-temperaturowej dla silnika LS 132M1 zamieszczono w tabeli 1. Przykładowe przebiegi przyrostu temperatury połączeń czołowych w silniku LS 132M1 przy obciążeniu jak na rys. 6 przedstawiono na rys. 7. W danym przykładzie optymalizacja strumienia umożliwiła obniżenie temperatury połączeń czołowych o około 8°C. Więcej informacji na temat optymalizacji strumienia w silniku indukcyjnym przedstawiono w pracy [2].

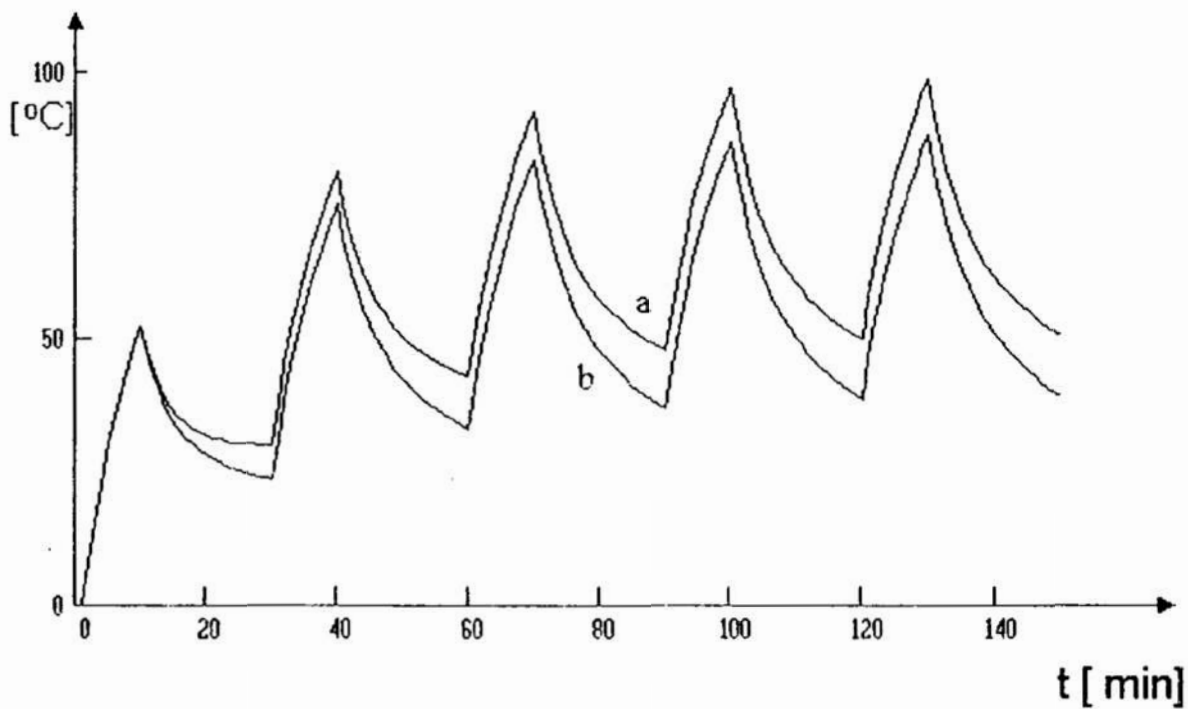
rodzaj strat	waga
w połączeniach czołowych	0.139
w uzwojeniach stojana w części zębkowej uzwojeń	0.0698
w żelazie stojana	0.0426
w wirniku	0.046

Tab. 1 Wagi poszczególnych składowych strat przy optymalizacji minimalno-temperaturowej dla silnika LS 132M1.

Tab. 1 Weights of power loss component for machine LS 132M1.



Rys. 6 Symulowany moment obciążenia  
 Fig. 6 Simulated load torque



Rys. 7 Symulowany przyrost temperatury czół uzwojeń w silniku LS 132M1 7.7 kW.  
 a - strumień znamionowy, b - strumień optymalny  
 Fig. 7 Simulated temperature-rise of end winding in 7.7 kW cage machine (LS 132M1)  
 a - nominal flux, b - optimal flux

## **Wnioski**

Poszukiwania strumienia optymalnego są możliwe za pomocą bardzo różnorodnych algorytmów: bezpośrednio na silniku w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, za pomocą wzorów analitycznych wyprowadzonych na podstawie uproszczonego, jak również za pomocą skomplikowanego algorytmu iteracyjnego. Użycie zredukowanego modelu matematycznego upraszcza algorytm sterowania, jednak odbywa się to kosztem dokładności. Zastosowana przez Autora numeryczne algorytmy znajdowania strumienia optymalnego umożliwiają dokładne obliczanie trajektorii sterowania optymalnego. Wyprowadzony przez Autora algorytm optymalizacji wagowej poszczególnych składowych strat umożliwia iteracyjne znajdowanie strumienia optymalnego przy optymalizacji minimalno-temperaturowej.

## **Literatura**

1. Gnaciński P.: *Symulacja stanów cieplnych silnika indukcyjnego. Praca dyplomowa magisterska*. Gdańsk, 1993.
2. Gruszczyński P. B., Gnaciński P.: *Optymalizacja strumienia w silniku indukcyjnym*. Przegląd Elektrotechniczny (zatwierdzone do druku).
3. Gruszczyński P. B.: *Wybrane zagadnienia optymalizacji statycznej napędów przekształtnikowych*. ELEktryka LXXIII. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1993.
4. Krygier J.: *Zasady pracy optymalnej silnika asynchronicznego*. Przegląd Elektrotechniczny 8/92.



## **Streszczenie**

W artykule przedstawiono metody znajdowania strumienia optymalnego w silniku indukcyjnym dla trzech kryteriów energetycznych: minimalnego prądu, najmniejszych strat całkowitych i najmniejszej temperatury uzwojeń. W silniku indukcyjnym strumień optymalny można znajdować bezpośrednio na obiekcie, na uproszczonym lub rozbudowanym modelu maszyny. W artykule przedstawiono algorytm znajdowania strumienia optymalnego na podstawie nieliniowego modelu silnika, wykorzystany przez Autora w badaniach symulacyjnych. Przedstawiono wyprowadzenie algorytmu sterowania minimalno temperaturowego za pomocą optymalizacji wagowej strat.

## **Algorithms of flux optimization in an induction machine**

### **Summary**

The paper describes algorithms of flux optimization in an induction machine for three energetical criteria: minimum total power loss, minimum current and minimum winding temperature. Optimal flux can be found using feedback in controlled system or using mathematical simplified or expanded pattern. The algorithm applied by Author is presented.



## **SYMULACJA ROZKŁADU TEMPERATUR W SILNIKU ELEKTRYCZNYM.**

### **1. Wstęp**

Jednym z podstawowych zagrożeń dla silnika elektrycznego są narazenia termiczne. Znajomość rozkładu temperatury w silniku jest niezbędna podczas wielu prac badawczych, jak również często w czasie eksploatacji.

Temperaturę w silniku mierzy się za pomocą wbudowanych czujników, jednak postęp w elektronicznej technice obliczeniowej umożliwił rozwój metod symulacyjnych. Można wyróżnić dwie zasadnicze metody: 3 - wymiarowych skończonych elementów i schematów zastępczych.

### **2. Metoda 3 - wymiarowych elementów skończonych**

W czasie prac konstrukcyjnych i badawczych często potrzebna jest dokładna znajomość rozkładu temperatury w poszczególnych częściach maszyn: rdzeniu, wirniku, uzwojeniach, zębach itd [ 9]. Można go obliczyć numerycznie za pomocą metody trójwymiarowych elementów skończonych .

Metoda ta polega na na podzieleniu obliczanego ciała na niewielkie segmenciki i sformułowaniu dla poszczególnych elementów równań transportu ciepła. Ogólnie przepływ ciepła wyraża się równaniami [ 9]:

$$q = -\vartheta \nabla T \quad (1)$$

$$\nabla q = Q \quad (2)$$

gdzie:

T - funkcja potencjału (temperatury),  $\vartheta$  - konduktancja, q - strumień ciepła,

Q - funkcja wymuszenia (źródło ciepła)

Na podstawie równań dla poszczególnych segmencików można ułożyć układ równań dla całego, trójwymiarowego ciała. W wyniku obliczeń numerycznych otrzymuje się rozkład temperatury w poszczególnych węzłach. Jest on bardzo szczegółowy, ponieważ liczba elementów, na które dzieli się dane ciało, jest często rzędu kilkuset [ 9,10].

Ze względu na złożoność obliczeń metoda ta jest stosunkowo rzadko stosowana [9]. Z tego też powodu nie zaleca się jej użycia do zagadnień globalnych (np. symulacja temperatur w całym silniku), natomiast jest niezastąpiona przy obliczaniu rozkładu temperatury w poszczególnych częściach maszyn. W swoim pierwotnym kształcie dana metoda była stosowana do obliczania rozkładu temperatur rdzenia stojana turbogeneratorsa [9] lub dużych maszyn przemysłowych [ 10], a od niedawna - również w silniku indukcyjnym.

Przykładem jej użycia jest obliczenie rozkładu temperatury w stojanie silnika indukcyjnego. W czasie badań symulacyjnych zmodyfikowano metodę, posługując się

---

\*Wyższa Szkoła Morska w Gdyni, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 81-83 , 81-225 Gdynia

współrzędnymi cylindrycznymi. Wykorzystany model stojana składał się z 96 elementów, jednak ze względu na symetrię zagadnienia obliczenia wykonano dla jednej, 24 - elementowej ćwiartki [ 9].

Innym przykładem jest symulacja nagrzewania się klatki wirnika silnika o mocy 1600 kW w warunkach utyku. Kompletny model połowy pręta klatki (symetria) wraz z przypadającym na niego wycinkiem pierścienia zwierającego składał się 530 elementów i 831 węzłów. Wyniki obliczeń były zgodne z danymi eksperymentalnymi [ 10].

Metoda wymiarowych skończonych elementów umożliwia lepsze poznanie zjawisk związanych z nagrzewaniem się maszyn, przyczyniając się do optymalizacji ich konstrukcji. Jej poważną wadą jest skomplikowany model symulacyjny i konieczność dysponowania znacznymi mocami obliczeniowymi.

## **2. Metoda schematów zastępczych**

Jest to popularna metoda symulowania stanów cieplnych, szczególnie gdy interesuje nas rozkład temperatur w całej maszynie. Aby się nią posłużyć, należy mieć zastępczy schemat cieplny silnika, w którym elementy R odpowiadają rezystancjom termicznym, a elementy C - pojemnościom cieplnym. W elektrycznym analogu silnika temperaturom odpowiadają napięcia, a przepływowi ciepła - przepływ prądu. Straty mocy w maszynie modeluje się za pomocą źródeł prądowych.

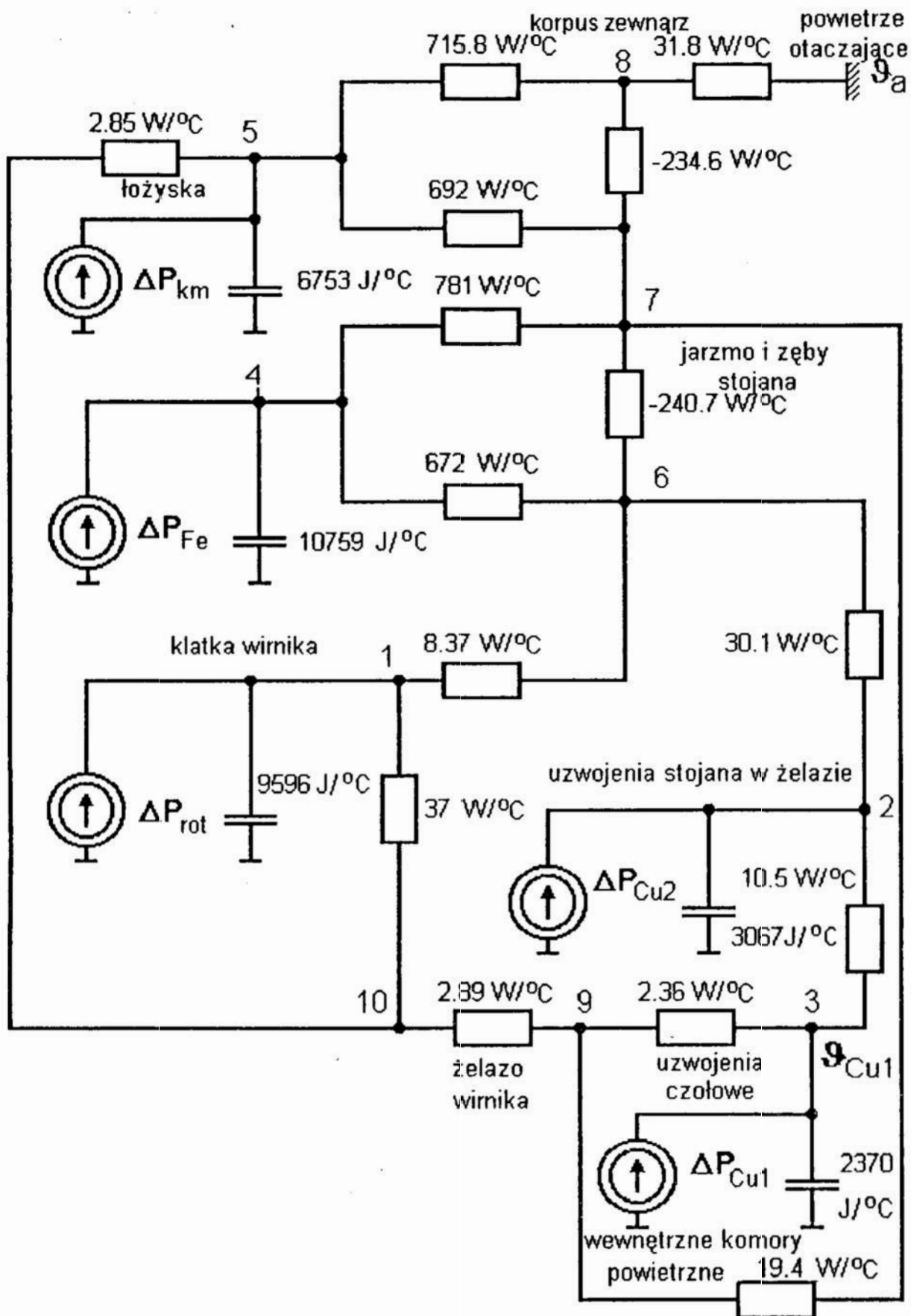
Początkowo schematy zastępcze składały się wyłącznie z sieci rezystancyjnej i modelowały stany ustalone maszyn. Nowe możliwości dał rozwój elektronicznej techniki obliczeniowej - opracowano schematy modelujące dynamiczne stany cieplne maszyn. W schemacie zastępczym znajduje się najczęściej kilkanaście rezystancji i 3 - 4 pojemności. Dzięki małej liczbie pojemności rząd równania różniczkowego jest niski i możliwa jest symulacja w czasie nawet przy użyciu 8 - bitowych mikroprocesorów [7]. W obliczeniach można posłużyć się standardowym programem symulującym obwody elektryczne ( np. PSPICE), chociaż istnieją również programy specjalizowane.

Dokładność obliczeń numerycznych jest stosunkowo duża - błąd w czasie symulacji wielogodzinnej pracy silnika nie przekracza kilku stopni.

Parametry schematów zastępczych są tak optymalizowane, aby jak najdokładniej określały temperaturę miejsca, w którym izolacja jest szczególnie narażona na przegrzanie. Pozostałe temperatury są często traktowane jako pomocnicze np. przy obliczaniu strat. Przykładem jest schemat silnika klatkowego budowy zamkniętej na rys. 2. W danym modelu, temperaturze blach stojana (zarówno rdzenia, jak i zębom) oraz uzwojenia w żłobkach odpowiada jeden wspólny węzeł cieplny o potencjale  $\vartheta_{Cu2}$ .

W maszynie niektóre rezystancje termiczne są zmienne, zależne od prędkości obrotowej i temperatury, co nie zawsze uwzględnia się w schemacie zastępczym. Liniowe modele cieplne mają ograniczone zastosowanie - do wielu celów, np. przy symulacji pracy silnika ze zmienną prędkością obrotową (zmiennie warunki chłodzenia), należy użyć schematu z elementami nieliniowymi. Dla silników klatkowych schematy zastępcze różnią się w zależności od budowy silnika (otwarta, zamknięta) i przyjętych uproszczeń. Częstym powodem uproszczeń jest dążenie do skrócenia czasu obliczeń - ma to szczególne znaczenie przy symulacji w czasie rzeczywistym.

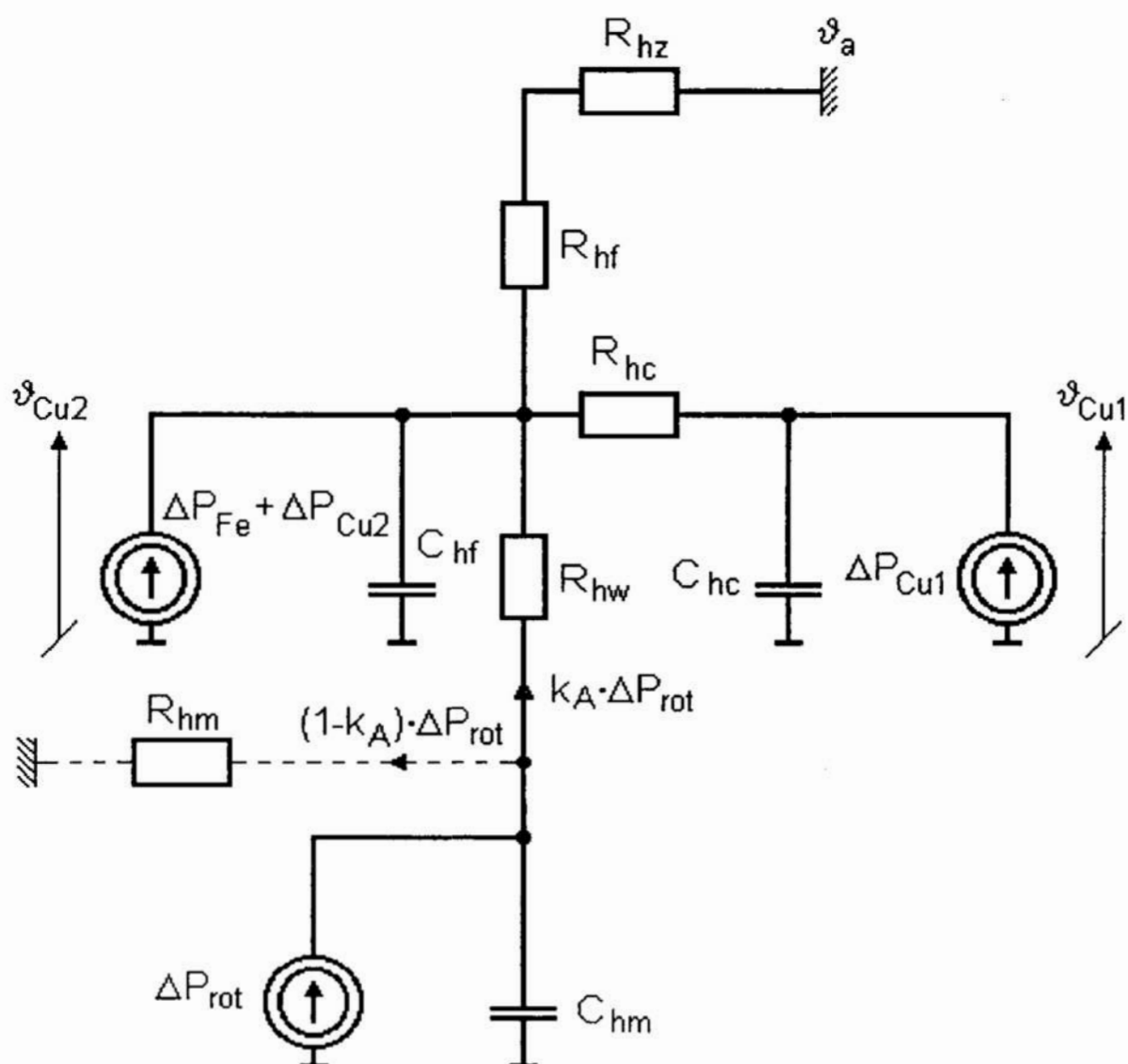
Symulując rozkład temperatur należy również znać wartości i lokalizację poszczególnych składowych strat w silniku, w tym również strat dodatkowych, mogących



Rys. 1 Wykorzystany przez Autorów zastępczy schemat cieplny silnika klatkowego LS132M1 LEROY - SOMER 7.7 kW [5].

Fig. 1 Used by Authors thermal scheme of cage machine (LS132M1 7.7 kW) [5].





Rys. 2 Przykład uproszczonego cieplnego schematu zastępczego silnika klatkowego [ 5]  
 Fig. 2 Example of simplified thermal scheme [5]

przybierać znaczne wartości [5]. Wyznaczenie ich na drodze obliczeniowej lub doświadczalnej jest stosunkowo trudne i mało dokładne.

W praktyce często należy się posługiwać nie tylko cieplnym schematem zastępczym, ale również modelami: 1) elektrycznym, obliczającym rozpyły prądów w zależności od zadanego napięcia i wymuszeń mechanicznych 2) strat, obliczającym ich poszczególne składowe w funkcji wielkości elektrycznych i prędkości obrotowej. Do wielu celów np. symulacji silnika indukcyjnego przy obniżonym napięciu lub prędkości, należy się posługiwać modelami nieliniowymi.

### Budowa modelu sieciowego

Stworzenie modelu cieplnego wymaga znajomości i opisanie zarówno fizycznych zjawisk zachodzących w maszynie jak i geometrycznych oraz fizycznych cech materiału. W pierwszym etapie budowy modelu maszyny dzieli się ją na części o określonych, prostych formach geometrycznych (np. zęby stojana) i określonym

transportu ciepła (przewodzenie, konwekcja). Następnie wyprowadza się równania różniczkowe rządzące transportem ciepła. Przy budowie modelu wprowadza się szereg założeń upraszczających:

- węzeł - element charakteryzuje się średnią temperaturą danej części. W praktyce oznacza to przyjęcie założenia, że temperatura w całej objętości poszczególnych części maszyn jest stała
- węzły - połączenia charakteryzują się średnią temperaturą powierzchni
- wprowadza się rezystancję termiczną między węzłami - elementami i węzłami - połączeniami
- wprowadza się specyficzne pojemności cieplne, uwzględniające magazynowanie ciepła w danym elemencie [ 6].

Na podstawie modeli elementarnych i równań opisujących daną maszynę wyprowadza się schemat zastępczy, w którym należy jeszcze dokonać identyfikacji poszczególnych elementów z danymi silnika. Można tego dokonać na drodze obliczeniowej, bądź doświadczalnej - bada się rozkład temperatur w maszynie, a następnie otrzymane wyniki przetwarza się numerycznie.

Przy obliczaniu poszczególnych rezystancji i pojemności termicznych w schemacie zastępczym popełnia się szereg błędów, gdyż:

- maszyna i poszczególne jej elementy nie są idealnie symetryczne
- niektóre własności maszyny zmieniają się wraz z temperaturą, co nie zawsze jest uwzględniane
- przy rozpatrywaniu transportu ciepła wewnątrz silnika i z maszyny do otoczenia jest zazwyczaj zaniedbywana radiacja, a nie zawsze jej wartość jest całkowicie pomijalna [6].

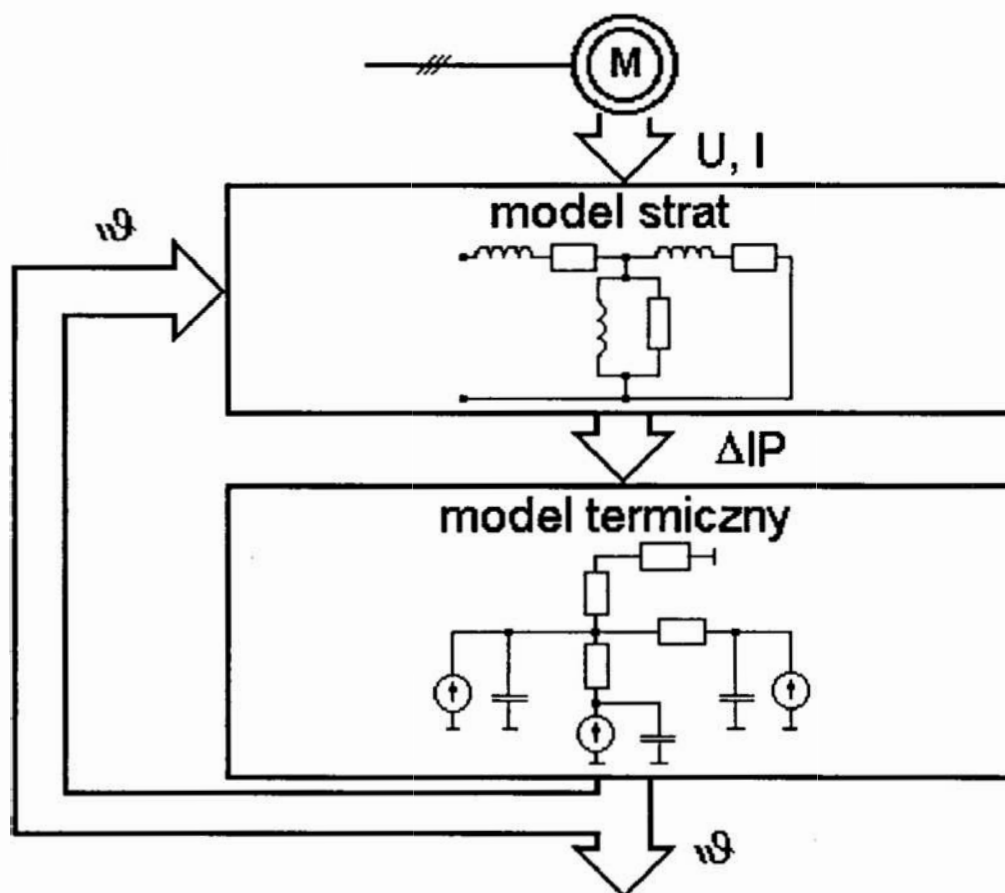
Wyprowadzenie zastępczego schematu cieplnego jest zadaniem bardzo trudnym i skomplikowanym.

### **3. Zastosowanie modelowania zjawisk cieplnych**

#### **Predykcja temperatury w czasie rzeczywistym**

Układy mikroprocesorowe umożliwiają symulację temperatur w czasie rzeczywistym. Podstawowymi elementami systemu są: prosty 16 lub nawet 8 bitowy mikroprocesor, czujniki prądów i napięć stojana, czujnik temperatury otoczenia i czasem czujnik strumienia głównego (pomiar strumienia można zastąpić obliczeniami). W pamięci ROM znajdują się modele silnika: elektryczny, strat i termiczny. Pierwszy z nich wyznacza niezmierzone wielkości elektryczne, potrzebne do wyznaczania strat (np. prąd wirnika). Model strat przelicza wielkości elektryczne i prędkość obrotową na poszczególne składowe mocy strat. Model termiczny, symulujący rozkład temperatur w silniku, jest najczęściej zredukowany do kilkuwęzłowej sieci RC (ze względu na minimalizację czasu obliczeń).

Systemy mikroprocesorowe umożliwiają monitorowanie temperatury silnika i zabezpieczanie go przed przegrzaniem. Tradycyjnie silnik zabezpieczają przekaźniki termobimetalowe "obserwujące" prąd stojana, lub czujniki temperatury wbudowane do wnętrza maszyny. Pierwsze nie zawsze są wystarczająco dokładne, drugie wymagają maszyny w specjalnym wykonaniu. W przypadku zabezpieczeń bimetalowych nie jest



Rys. 3 Układ predykcji temperatury w czasie rzeczywistym [ 2]  
 Fig. 3 System of real time temperature prediction [2]

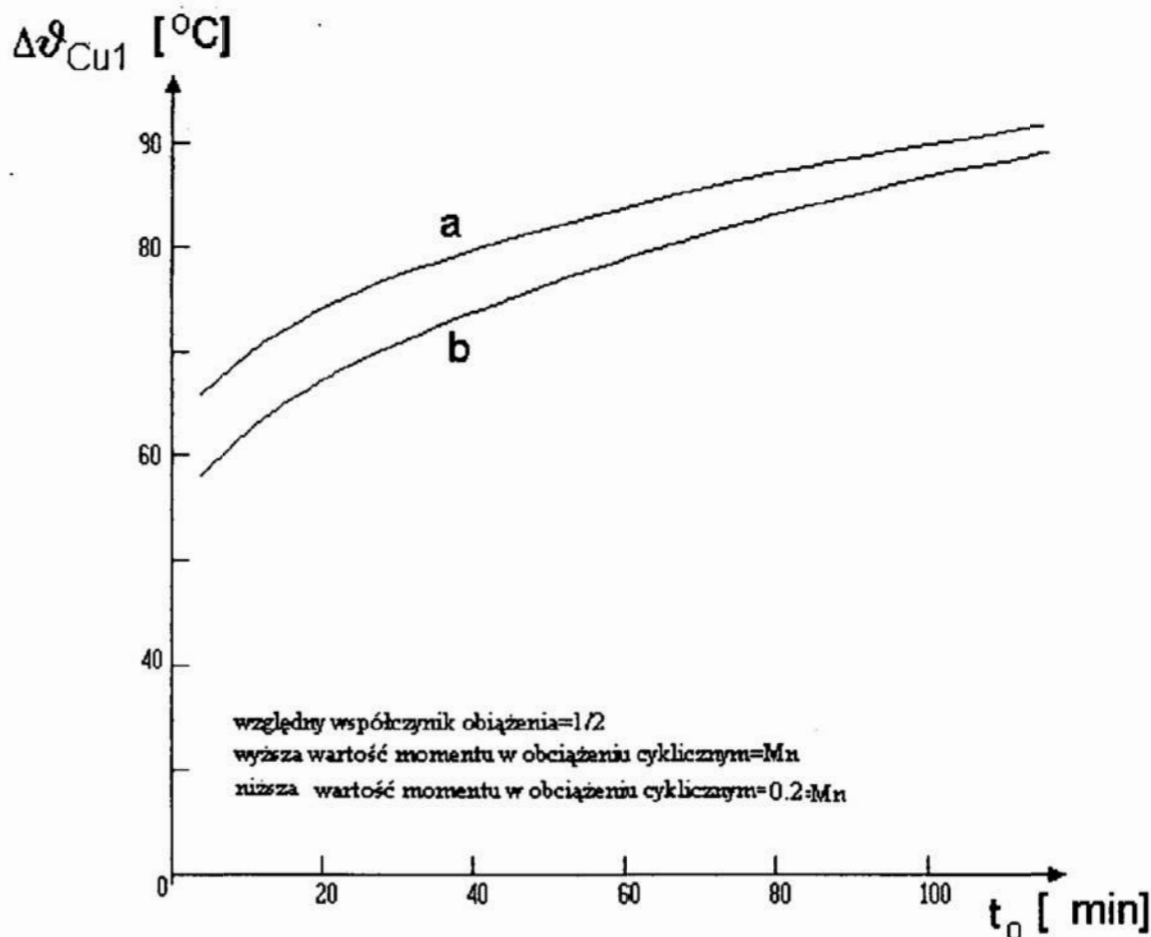
również możliwe ostrzeżenie obsługi o grożącym wyłączeniu silnika. Tych wad nie posiada mikroprocesorowy system predykcji temperatury, który może nie tylko odłączyć przeciążony napęd, ale również na bieżąco rejestrować temperaturę. Ze względu na cenę jego zastosowanie ograniczy się prawdopodobnie do napędów sterowanych komputerowo.

### Symulacyjny dobór silnika

Symulacja komputerowa umożliwia dogodny, znacznie dokładniejszy od tradycyjnego, dobór cieplny silnika do obciążenia zmiennego. Metody klasyczne są całkowicie bezużyteczne przy doborze silnika pracującego ze zmienną prędkością obrotową (zmiennie warunki chłodzenia), oraz maszyny indukcyjnej sterowanej optymalnie. Ograniczeń tych nie ma metoda symulacyjna, pod warunkiem zastosowania odpowiedniego modelu, tj. uwzględniającego wpływ prędkości obrotowej na chłodzenie silnika (schemat cieplny nieliniowy), lub zawierającego procedury optymalizacyjne.

### Badania symulacyjne rozkładu temperatur

Symulacja temperatur jest bardzo wygodnym narzędziem badawczym. Umożliwia zrezygnowanie przynajmniej z części czasochłonnych i kłopotliwych pomiarów, a nawet prowadzenie badań bez dostępu do rzeczywistego obiektu. Autorzy prowadzą symulacyjne badania wpływu optymalizacji strumienia (napięcia) w silniku



Rys. 4 Symulowana charakterystyka przyrostu temperatury czół uzwojeń w funkcji czasu trwania cyklu obciążenia przy niskiej wartości momentu. a - strumień znamionowy, b - optymalizacja minimalno-temperaturowa strumienia

Fig. 4 Simulated temperature - rise of end winding in 7.7 kW cage machine (LS 132M1) a - nominal flux, b - optimal flux

indukcyjnym na obniżenie temperatury uzwojeń. W badaniach korzystano z opracowanego Politechnice w Grenoble zastępczego schematu cieplnego silnika LS132M1 LEROY - SOMER, który zamieszczono na rys. 1. Przykładową symulowaną charakterystykę przyrostu temperatury połączeń czołowych w funkcji czasu trwania pełnego cyklu obciążenia przedstawiono na rys. 4.

Komputerowa analiza rozkładu temperatury, w szczególności za pomocą metody 3 - wymiarowych elementów skończonych, przyczynia się do optymalizacji konstrukcji silników.

Główną przeszkodą w korzystaniu z tego doskonałego narzędzia badawczego są trudności w opracowaniu modelu cieplnego silnika.

#### 4. Wnioski

Symulacja temperatur jest bardzo dogodnym narzędziem badawczym, które znajduje coraz szersze zastosowanie. Wprawdzie opracowanie i weryfikacja modelu cieplnego silnika jest niezwykle trudna, jednak korzyści odnoszone z jego posiadania są bardzo duże. Może w przyszłości producenci będą podawać nie tylko parametry

elektryczne maszyn, ale również cieplne.

## Literatura

1. de Doncker R., Vandepunt A., Geysen W.: *Thermal models of inverter fed asynchronous machines suited for adaptive temperature compensation of field oriented controllers*. IEEE Trans. on 1986
2. Gutt H. J., Zeller T.: *Self - learning temperatur - simulation - system for thermal protection of squirrel - cage - motors*. ICEM 1988 Pisa, pp. 423 - 425.
3. Gruszczyński P. B., Gnaciński P.: *Dobór cieplny silnika elektrycznego do obciążenia zmiennego*. Przegląd Elektrotechniczny 12/94
4. Gruszczyński P. B., Gnaciński P.: *Optymalizacja strumienia w silniku indukcyjnym*. Przegląd Elektrotechniczny (zatwierdzone do druku).
5. Gruszczyński P. B.: *Wybrane zagadnienia optymalizacji statycznej napędów przekształtnikowych*. Elektryka LXXIII. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1993.
6. Hadi A. W., Isnard R., Roye D., Perret R.: *An experimental and analytical study of temperature - rises in rotating electrical machines*. Application for an induction machine. International conference: Evolution and Modern Aspects of Induction Machines. 1986, Turin.
7. Mellor P. H., Tuner R. D. R.: *Real time prediction of temperatur in an induction motor using a microprocessor*. Electric machines and power systems. Hemisphere Publishing Corporation 1988.
8. Mukosiej D.: *Equivalent thermal network of totally - enclosed induction motors*. ICEM, 18 - 21 Sept 1984 Proc. Part 2
9. Sarkar D., Mukherijee P. K., Sen S. K.: *Base of 3 - dimensional finite elements for computation of temperature distribution in the stator of an inducton motor*. IEEE Proc. - B, Vol. 138, No. 2 Martch 1981
- 10 Siyambalapitiya D. J. T., McLaren P. G.: *Transiert thermal characteristics of inductions machine rotor cage*. IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4, Dec 1988

**mgr inż. Piotr GNACIŃSKI**  
**dr inż. Roman KOSTYSZYN**

### **Streszczenie**

Artykuł jest poświęcony komputerowej analizie rozkładu temperatur w silniku elektrycznym. Przedstawiono dwie podstawowe metody symulacji: 3 - wymiarowych skończonych elementów i cieplnych schematów zastępczych. Zaprezentowano metody wyprowadzania cieplnych schematów zastępczych silnika elektrycznego. Przedstawiono przykłady zastosowania symulacji rozkładu temperatur: badania symulacyjne, symulacyjny dobór silnika do obciążenia okresowo - zmiennego i predykcja temperatury w czasie rzeczywistym.

### **SIMULATION METHODS OF TEMPERATURES IN ELECTRICAL MACHINES**

#### **Summary**

The paper presents methods of computation of temperature distribution in electrical machines: 3-dimensional finite elements and method of thermal equivalent circuit. The thermal circuits can be derived using machine data, measurement and numerical calculation. These methods are used in: computer investigation of temperature distribution, real time prediction of temperatures in electrical machines, thermal selection of motors.

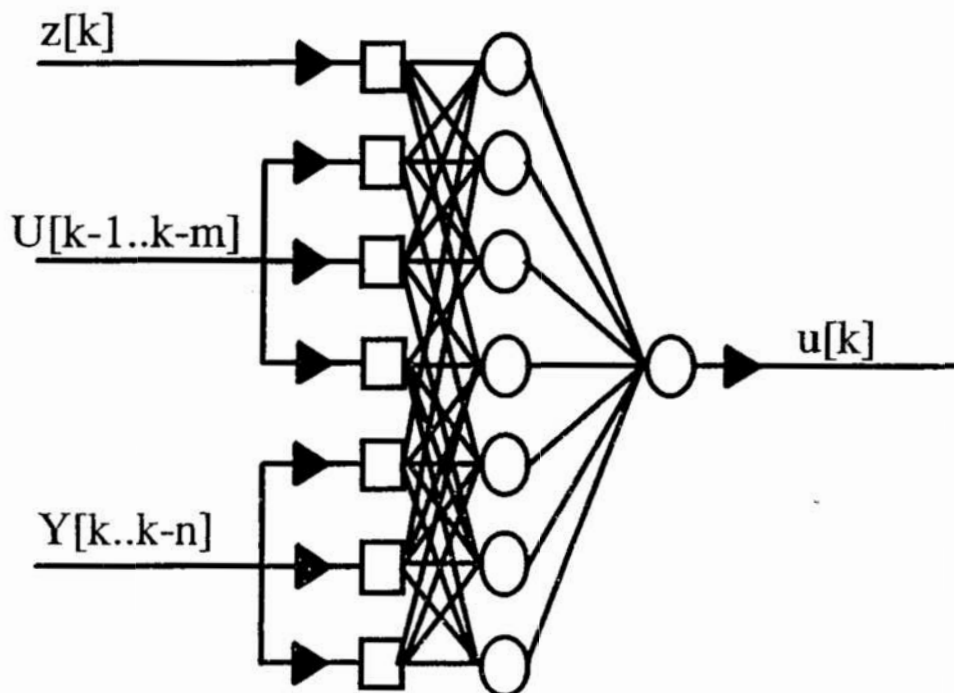




## STEROWANIE OBIEKTAMI NIELINIOWYMI PODEJŚCIE NEURONOWE

### 1. Wprowadzenie

Analiza i synteza liniowych układów sterowania jest dobrze poznana [4]. Kiedy w połowie lat siedemdziesiątych wprowadzono do techniki regulacji technikę mikroprocesorową, wydawało się, że podobne rezultaty w krótkim czasie zostaną uzyskane w sterowaniu obiektami nieliniowymi. Tak się jednak nie stało. Modele matematyczne obiektów nieliniowych, mimo znacznego stopnia skomplikowania, nie obejmowały w dostatecznym stopniu własności dynamicznych tych obiektów. Otrzymane na ich podstawie algorytmy sterowania okazały się bardzo skomplikowane matematycznie, bardzo wrażliwe parametrycznie i trudne do realizacji technicznej. Te przyczyny spowodowały poszukiwanie nowych metod sterowania obiektami nieliniowymi. W ostatnich latach szczególnie zainteresowanie wzbudziły regulatory oparte na logice rozmytej (ang. fuzzy logic) oraz sztuczne sieci neuronowe (ang. artificial neural network).



Rys 1. Struktura regulatora neuronowego  
Fig 1. Structure of a neural controller

<sup>1</sup>Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej  
Narutowicza 11/12 80-952 Gdańsk  
E-Mail [sgrymek@sunrise.pg.gda.pl](mailto:sgrymek@sunrise.pg.gda.pl)

## 2. Sieć neuronowa jako regulator

Z teorii sztucznych sieci neuronowych wiadomo ([1]), że sieć o jednej warstwie ukrytej (przy odpowiedniej liczbie neuronów w tej warstwie) jest w stanie odwzorować dowolną funkcję ciągłą, a zatem wydaje się możliwe zastosowanie ich jako regulatorów nieliniowych.

Przed projektantem układów sterowania, pragnącym zastosować sieć neuronową jako regulator, stoją trzy zasadnicze pytania:

1. jakie sygnały należy wprowadzić na wejścia sieci neuronowej, aby (po procesie uczenia sieci) możliwe było uzyskanie odpowiedzi w postaci skutecznego sygnału sterującego?
2. w jaki sposób uczyć sieć neuronową aby otrzymywany na wyjściu sieci sygnał sterujący dążył do wartości optymalnej ze względu na przyjęte kryterium jakości regulacji?
3. jakie funkcje przejścia (aktywacji) mają mieć neurony warstwy ukrytej ?

Odpowiedź na pierwsze pytanie jest w miarę prosta. Dla dyskretnej skali czasu w chwili  $k$  sygnał sterujący  $u[k]$  można wyrazić w postaci nieznanej funkcji  $F$  zależnej od wartości zadanej  $z[k]$ ,  $m+1$  poprzednich wartości sygnałów sterujących  $U$  oraz  $n$  poprzednich wartości sygnałów regulowanych  $Y$ .

$$u[k] = F(z[k], Y[k..k - m], U[k - 1..k - n]) \quad (1)$$

Liczby  $m$ ,  $n$  odpowiadają najwyższemu pochodnym sygnału regulowanego i sygnału sterującego w równaniu "wejścia-wyjścia" obiektu regulacji.

Odpowiedź na drugie pytanie jest trochę trudniejsza. Niech kryterium jakości sterowania  $V$  wyraża się wzorem:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N e(i)^2 \quad (2)$$

gdzie  $e(i) = y(i) - z(i)$ , a  $N$  jest horyzontem czasowym estymacji błędu (długością epoki). Algorytm uczenia powinien tak działać aby minimalizować kryterium jakości.

Oznaczając współczynnik uczenia jako  $\eta$ , a wagę połączenia w sieci pomiędzy  $m$ -tym i  $n$ -tym neuronem jako  $w_{m,n}$  zmianę wartości wag można wyrazić zależnością:

$$\Delta w_{m,n} = -\eta \frac{\partial V}{\partial w_{m,n}} \quad (3)$$

Wzór w postaci (3) jest nieprzydatny, gdyż nie można go wprost zastosować. Znając funkcję  $V$  możemy go przekształcić:

$$\begin{aligned} \Delta w_{m,n} &= -\frac{1}{2} \eta \sum_{i=0}^N \frac{\partial e(i)^2}{\partial w_{m,n}} \\ \Delta w_{m,n} &= -\eta \sum_{i=0}^N \left( e \cdot \frac{\partial e(i)}{\partial w_{m,n}} \right) \\ \Delta w_{m,n} &= -\eta \sum_{i=0}^N \left( e \cdot \frac{\partial e(i)}{\partial u(i)} \cdot \frac{\partial u(i)}{\partial w_{m,n}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Ze wzoru (4) wynika, że do uczenia sieci neuronowej można użyć klasycznego algorytmu wstecznej propagacji błędów. Błąd wyjściowy sieci (błąd sygnału sterującego) w tym przypadku należy zdefiniować jako iloczyn uchybu regulacji i jacobianu obiektu sterowania. Z powyższych zależności wynika również, że definicja błędów sterowania zależy od przyjętego kryterium jakości regulacji.

Odpowiedź na trzecie pytanie wynika z nieliniowego charakteru koniecznego do odwzorowania funkcji opisującej algorytm sterowania. Dla odwzorowania takiej funkcji neurony warstwy ukrytej muszą posiadać nieliniowe funkcje przejścia, np.: tangens hiperboliczny lub sigmoid.

Oprócz odpowiedzi na zasadnicze pytania, w procesie syntezy regulatora neuronowego, należy określić cztery dodatkowe parametry:

- liczbę neuronów w warstwie ukrytej,
- wartość współczynnika uczenia (learning rate),
- wartość współczynnika bezwładności (momentum term),
- zakres losowej inicjacji wag.

Wartości tych parametrów można dobrać doświadczalnie. Dla różnych kombinacji wartości parametrów przeprowadza się krótkie testowe przebiegi uczenia. Wybiera się te wartości parametrów, dla których zbieżność procesu uczenia jest najlepsza.

### 3. Przykład: neuronowy regulator poziomu cieczy w zbiorniku

Postawione zadanie polega na syntezy regulatora neuronowego do sterowania poziomem cieczy w zbiorniku ze swobodnym odpływem. Sygnałem sterującym tego obiektu jest stopień otwarcia zaworu sterującego strumieniem zasilającym. Jest to obiekt nieliniowy, astatyczny, pierwszego rzędu. Można go opisać (dla stałego pola powierzchni przekroju) następującym równaniem różniczkowym:

$$\frac{dy}{dt} = A \cdot u - B \cdot \sqrt{y} \quad (7)$$

gdzie  $y$  to wartość poziomu w zbiorniku,  $u$  to wartość sygnału sterującego (stopień otwarcia zaworu),  $A$ ,  $B$  to stałe zależne od parametrów zbiornika. Parametry badanego zbiornika przedstawiono w tabeli 2.

Parametr	Wartość	Jednostka
wysokość	1.00	m
pole przekroju	0.25	m <sup>2</sup>
pole otworu wypływowego	0.0075	m <sup>2</sup>
maksymalne natężenie przepływu na dopływie	0.025	m <sup>3</sup> /s
plyn	woda	---

Tab. 2 Parametry zbiornika

Tab. 2 Parameters of the tank

Zaprojektowano regulator neuronowy z jedną warstwą ukrytą. Warstwa ta składała się z neuronów o nieliniowej funkcji przejścia (tangens hiperboliczny). Proces uczenia sieci minimalizował kryterium jakości regulacji o postaci:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{25} e(i)^2 \quad (8)$$

Regulator oddziaływał na obiekt sterowania w sposób dyskretny co 0.1 sekundy. Po przeprowadzeniu testowych przebiegów uczących dobrano parametry sieci neuronowej (przedstawione w tabeli 3) dające najlepszą zbieżność procesu uczenia.

Parametr	Wartość
liczba neuronów w warstwie ukrytej	3
współczynnik uczenia	0.5
współczynnik bezwładności	0.5
zakres inicjacji losowej wag	1.0

Tab. 3 Parametry sieci neuronowej  
Tab. 3 Parameters of the neural net

Proces uczenia sieci neuronowej prowadzono zmieniając wartość wielkości zadanej w sposób losowy co epokę. Długość epoki wynikała z definicji kryterium i wynosiła 25 kroków. Uczenie zakończono po 50000 epok.

W tym momencie syntezę

regulatora neuronowego uznano za zakończoną.

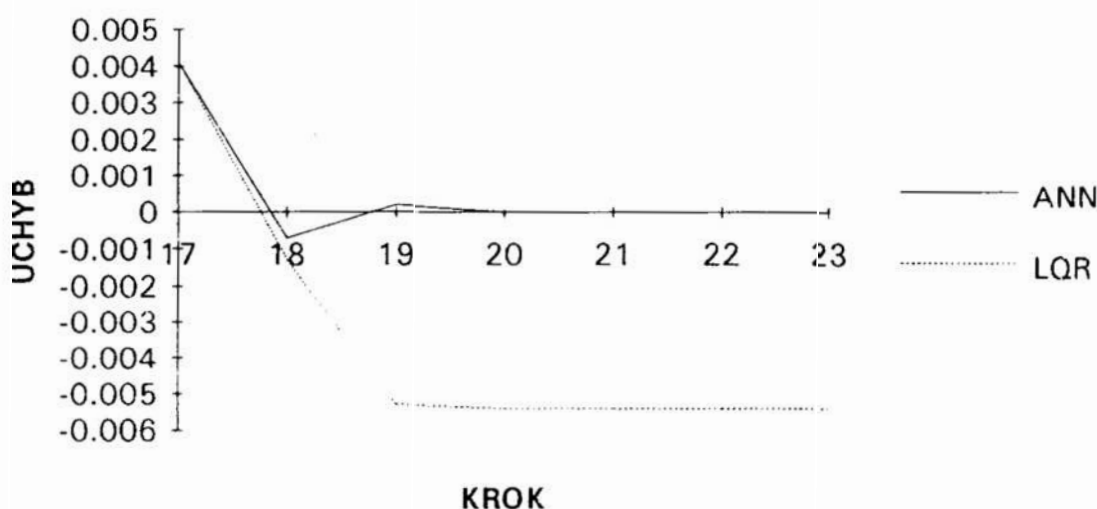
W celu określenia jakości otrzymanego regulatora zdecydowano się porównać go z optymalnym liniowym regulatorem stanu LQR.

Korzystając z pakietu SIMULINK-MATLAB dokonano syntezy dyskretnego regulatora LQR dla kroku czasowego wynoszącego 0.1 sekundy i zlinearyzowanego obiektu regulacji (wokół punktu  $y=0.5$ ). Otrzymano dyskretny regulator LQR opisany układem równań:

$$\begin{cases} x(k) = -3.4417 \cdot 10^{-14} \cdot x(k-1) + 0.0098 \cdot e(k-1) \\ u(k) = -3.4662 \cdot 10^{-10} \cdot x(k) + 98.7351 \cdot e(k) \end{cases} \quad (9)$$

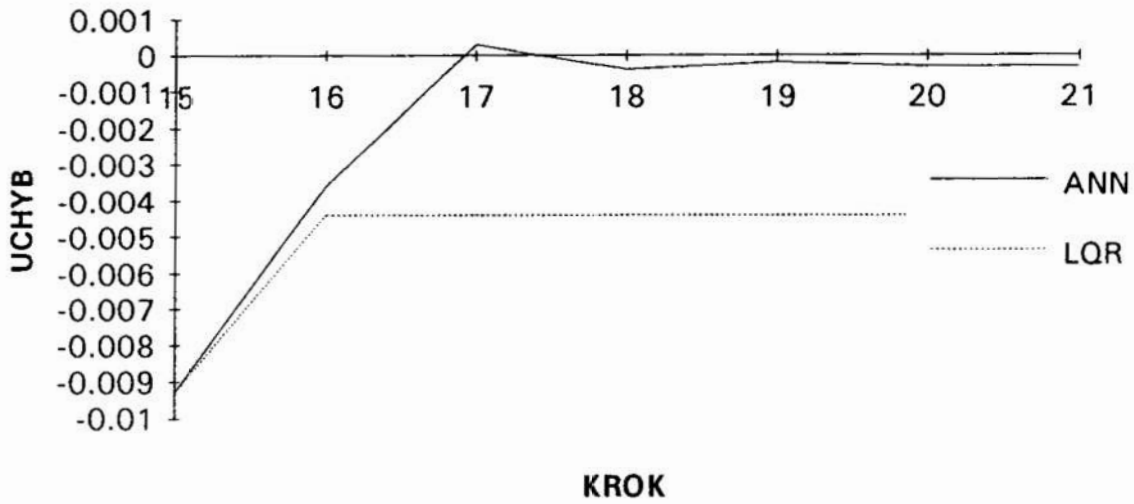
Dla obu regulatorów przeprowadzono testy polegające na skokowej zmianie wartości zadanej. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach 4, 5 i 6. Na wykresach umieszczono jedynie obszary w których przebiegi wielkości regulowanej nie są jednakowe.

#### Skok z 0.55 do 0.45



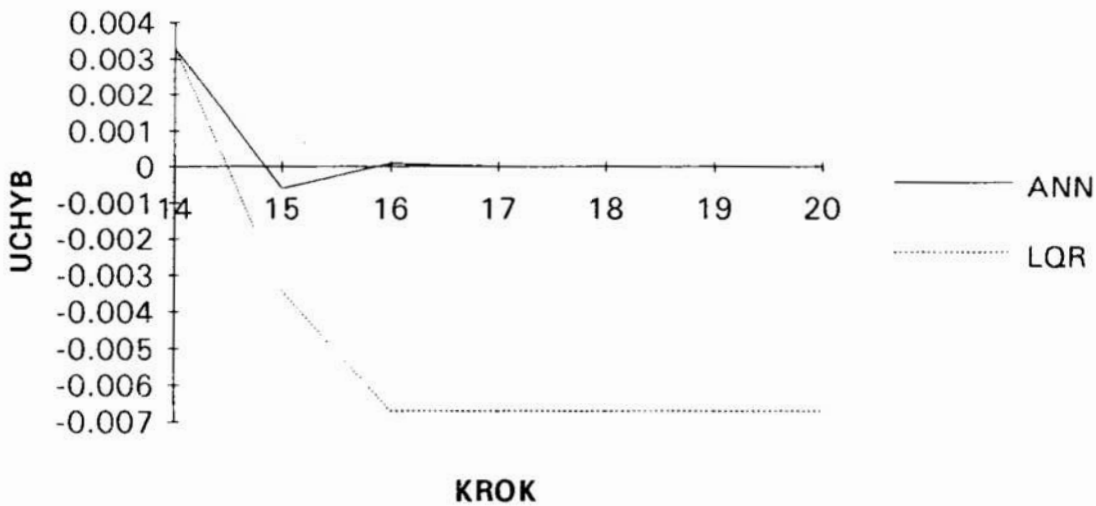
Rys. 4 Test numer 1  
Fig. 4 Test number 1

### Skok z 0.20 do 0.30



Rys. 5 Test numer 2  
Fig. 5 Test number 2

### Skok z 0.80 do 0.70



Rys. 5 Test numer 3  
Fig. 5 Test number 3

## 4. Podsumowanie

Sztuczne sieci neuronowe, jak to zaprezentowano, można z powodzeniem zastosować jako inteligentne regulatory dla sterowania obiektami nieliniowymi.



W zakresie dotychczas prowadzonych badań stwierdzono, że jakość sterowania regulatorów neuronowych jest o wiele wyższa od jakości sterowania regulatorów klasycznych (PID, LQR). Syntezę regulatorów neuronowych można przeprowadzić nawet wtedy, gdy nie jest znany model matematyczny obiektu, co nie jest możliwe w większości innych znanych metod syntezy regulatorów. Uzyskane do tej pory rezultaty zastosowania sieci neuronowych w automatyce przyczyniły się silnie do wzrostu zainteresowania zastosowaniem ich w tej dziedzinie w poważnych ośrodkach badawczych za granicą ([2],[5]) jak i w naszym kraju ([3]).

W przyszłości autor planuje określić zasady racjonalnego doboru parametrów strukturalnych i parametrów procesu uczenia dla sieci neuronowych pełniących rolę regulatorów.

### **Literatura**

1. Hertz J., Krogh A., Palmer R.G.: *Wstęp do teorii obliczeń neuronowych*. WNT Warszawa 1993.
2. Klimasauskas C.C.: *An Introduction to Neural Networks with Applications to an Adaptive PID Controller*. NeuralWare Incorporated USA (nie publikowane).
3. Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.: *Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i zastosowania*. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ Warszawa 1994.
4. Niederliński A.: *Systemy i sterowanie. Wstęp do automatyki i cybermetyki technicznej*. PWN Warszawa 1983.
5. Renders J., Saerens M., Bersini H.: *Adaptive neurocontrol of MIMO systems based on stability theory*. In *Advances in neural networks for control and systems* Systems Technology Research Centre Daimler-Benz AG Berlin Germany 1994.
6. Thibault J., Grandjean E.P.A.: *Process Control Using Feedforward Neural Networks*. Journal of Systems Engineering vol.2 London 1992.
7. Yabuta T., Yamada T.: *Learning Control Using Neural Networks*. Journal of Systems Engineering vol.2 London 1992;

### **Streszczenie**

W referacie przedstawiono sposób syntezy i zastosowania sztucznej sieci neuronowej jako regulatora dla obiektu nieliniowego. Teorię zilustrowano przykładem sterowania poziomem cieczy w zbiorniku ze swobodnym odpływem. Regulator neuronowy porównano z optymalnym liniowym regulatorem stanu LQR.

## **CONTROL OF NONLINEAR PLANT NEURAL APPROACH**

### **Summary**

A methodology of synthesis and application of artificial neural network as a controller of nonlinear plant is presented. The theory is illustrated by an example of control of a fluid level in a tank. A neural controller is compared with an optimum linear state feedback controller (LQR), and results are very encouraging.

## OKREŚLENIE PODOBIEŃSTWA POSTACI KONSTRUKCYJNEJ Z WYKORZYSTANIEM SIECI KOHONENA

### 1. Wprowadzenie

Klasyfikacja znajduje szerokie zastosowanie w obszarze projektowania i wytwarzania. Opracowane zostały różne metody klasyfikacji i grupowania. Jednak wszystkie te metody, jak dotychczas, korzystają z opisu elementów za pomocą specjalnych kodów. Przykładem takiego kodu może być ciąg cyfr reprezentujących kolejne wymiary czy też inne cechy klasyfikowanego obiektu [1, 3]. Taki kod może być jednak zastosowany tylko w przypadku gdy ustalona jest postać konstrukcyjna. Stąd kody opisujące różne postacie konstrukcyjne nie mogą być ze sobą porównywane. Rozszerza się co prawda kody klasyfikacyjne poprzez wprowadzenie cech nie występujących w pewnych obiektach z danej rodziny. Czesze takiej przyporządkowuje się wówczas wartość 0. Jednak generalnie nie zwiększa to istotnie możliwości klasycznych metod klasyfikacji. Wobec takich ograniczeń metod klasycznych opracowano założenia nowej metody grupowania obiektów. Podstawą tej metody jest zastosowanie sieci Kohonena. W związku z tym pojawiła się też konieczność opracowania nowej metody opisu elementów. Zaproponowano metodę bazującą na sposobie zapisu obrazu w perceptronowych systemach biologicznych (siatkówce oka).

### 2. Algorytm Kohonena

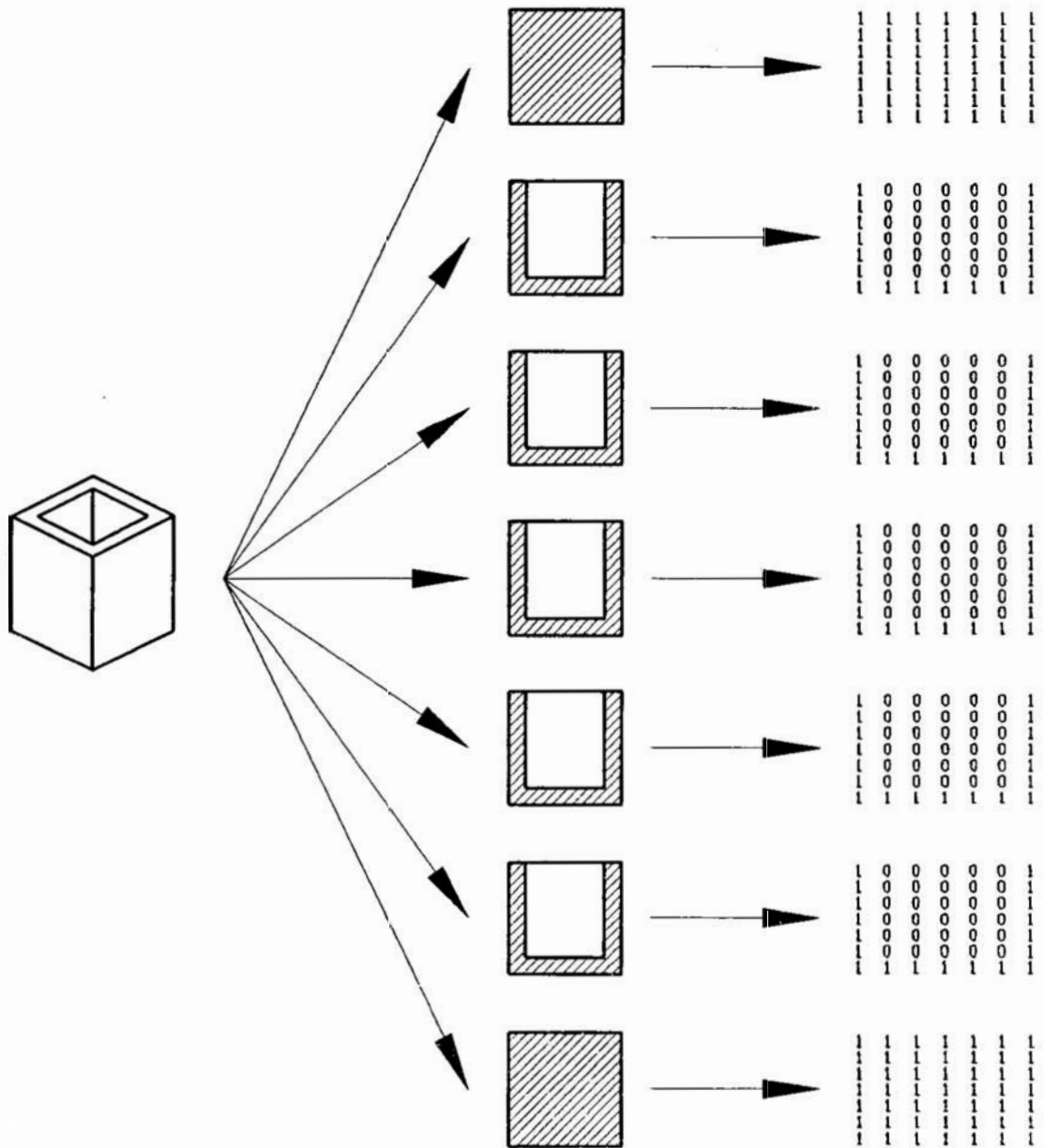
Sieć Kohonena w najprostszy sposób można opisać jako wektor węzłów wejściowych połączonych z macierzą  $[n \times n]$  węzłów wyjściowych. Dane, w postaci wektora, są prezentowane poprzez węzły wejściowe w sposób sekwencyjny (każdy kolejny obiekt po poprzednim). Następnie liczona jest wartość pobudzenia wszystkich węzłów i wybierany jest z macierzy węzłów wyjściowych ten, dla którego pobudzenie na dany sygnał jest największe. W drugim kroku dokonywana jest aktualizacja wag. Algorytm Kohonena wykorzystuje różne typy funkcji do realizowania oddziaływań obocznych. Należą do nich między innymi: funkcja prostokątna, Gaussa lub funkcja typu "mexican hat". Połączenia boczne nie istnieją, lecz reguła aktualizacji wag została tak opracowana, by uwzględniać relacje sąsiedztwa. Stąd węzły leżące w sąsiedztwie będą reagowały na podobne sygnały wejściowe (obiekty klasyfikacji). Dzięki temu można określać podobieństwo obiektów w sposób topologiczny (im bliżej siebie będą leżały odpowiadające obiektom węzły, tym stopień podobieństwa będzie większy). Szczegółowe algorytmy działania sieci przedstawione są w pracach [2, 4].

---

\* Katedra Technologii Maszyn i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice

### 3. Przygotowanie wzorców wejściowych

Jednym z trudniejszych problemów związanych z zastosowaniem sieci neuronowych do klasyfikacji konstrukcji jest sposób opisu obiektów. Na rys.1 przedstawiono numeryczny sposób opisu brył.



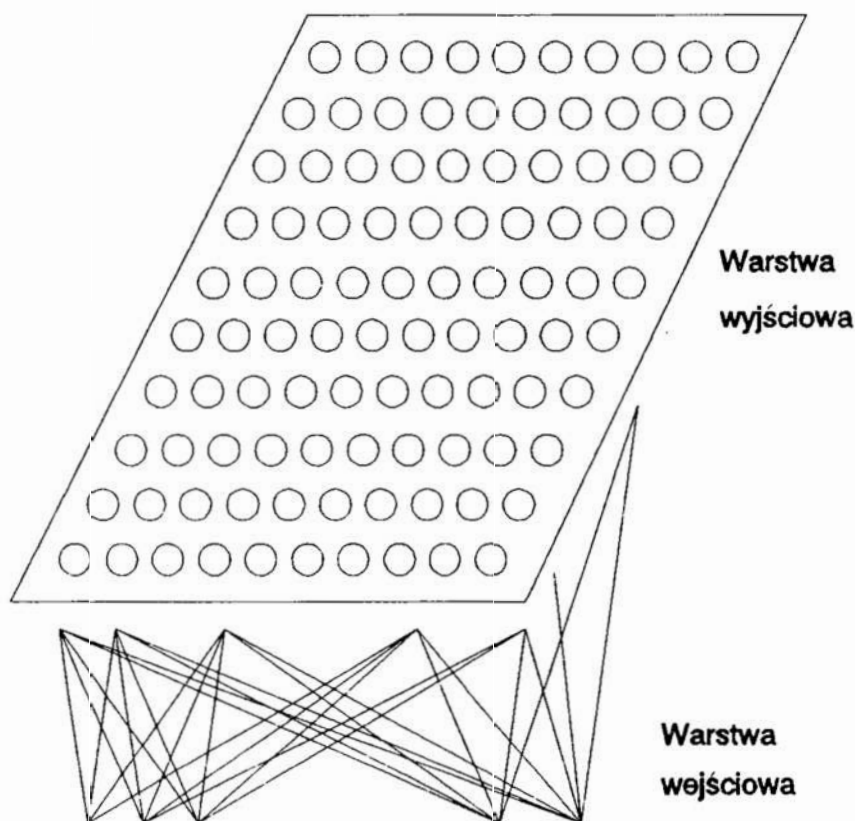
Rys.1. Przykład kodowania bryły  
Fig.1. An example of solid coding

Przedstawiona metoda polega na podziale bryły na pewną, stałą liczbę oktantów, a następnie na przyporządkowaniu im odpowiednich kodów. Kod 1 symbolizuje bryłę a kod 0 pustą przestrzeń znajdującą się w obrębie prostokąta, w którym zamknięto daną bryłę. Na rys.1 bryła została podzielona na 343 oktanty (7x7x7). Podział na 343 oktanty

był spowodowany dążeniem do zmniejszenia ilości danych jakie musi przetworzyć komputer. Już w przypadku podziału na dziesięć części (10x10x10) otrzymuje się 1000, a przy podziale na 15 części 3375 oktantów. Stąd też dla uproszczenia analizy wybrano podział na 7 części dający w miarę dokładny obraz brył. Rozpatrując poszczególne przekroje utworzono zakodowany obraz bryły w postaci macierzy trójwymiarowej 7x7x7. Każdy przekrój tworzy macierz dwuwymiarową 7x7.

#### 4. Przebieg badań

Do przeprowadzenia badań wybrano sieć Kohonena pokazaną w sposób schematyczny na rys.2. Sieć ta składa się z wektora wejściowego złożonego z  $m$  węzłów (343 dla rozpatrywanego wzorca) oraz macierzy węzłów wyjściowych [10x10] składającej się ze 100 węzłów. Sieć klasyfikowała wzorce w 3000 kroków iteracji. Pracowała ona w oparciu o algorytm uczenia konkurencyjnego. Ten typ uczenia pozwala na wykorzystanie zasady samoorganizacji.

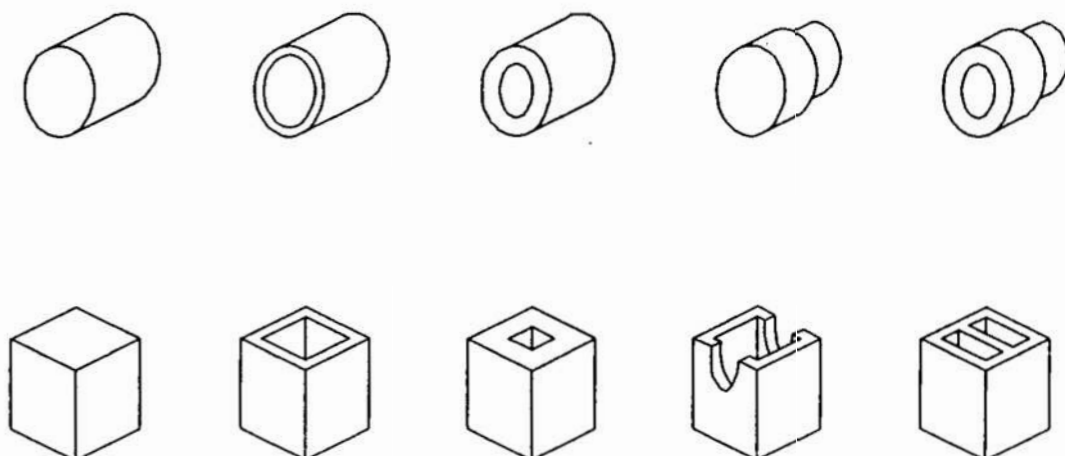


Rys.2. Schemat sieci Kohonena

Fig.2. Scheme of the Kohonen net

Przeprowadzono badania dla dwu prezentowanych grup wzorców (rys.3). Obiekty klasyfikacji są podzielone na dwie rodziny brył. Pierwszą stanowią bryły pryzmatyczne, a drugą bryły obrotowe. Najpierw zaprezentowano sieci wzorce elementów należące do pierwszej rodziny, a następnie wzorce elementów rodziny drugiej. Klasyfikacji poddano

też zbiór obiektów złożonych z elementów należących do pierwszej i drugiej rodziny. Obiekty prezentowano w tej samej kolejności w każdym kroku iteracji.



Rys.3. Obiekty należące do analizowanych rodzin  
Fig.3. Objects belonging to analyzed families

Algorytm działania sieci Kohonena realizuje koncepcję uczenia konkurencyjnego. Poszczególne wzorce wejściowe pobierane są w sposób sekwencyjny. Następnie są one przetwarzane w oparciu o ustaloną metodę grupowania. W oparciu o wyniki tych obliczeń następuje modyfikacja wag połączeń. Modyfikacji ulegają węzły położone w obszarze sąsiedztwa węzła wygrywającego. Rozpatrywano różne postacie funkcji sąsiedztwa, jak: prostokątną, Gaussa i typu "Mexican hat". Dwie pierwsze powodują zwiększanie wag połączeń do węzłów leżących w obszarze sąsiedztwa. Natomiast funkcja typu "Mexican hat" powoduje dodatkowo zmniejszenie wag połączeń węzłów leżących poza tym obszarem. W ten sposób realizuje ona zasadę hamowania obocznego. Powyższy schemat działania jest realizowany w oparciu o następujący algorytm. W algorytmie tym przez  $\xi_{m,i}$  oznaczono  $i$ -tą cechę  $m$ -tego wzorca, gdzie:  $i \in [1;N]$ ,  $m \in [1;M]$  ( $N$  - wymiarowość przestrzeni wejściowej,  $M$  - liczba rozpatrywanych wzorców). Węzły wejściowe i wyjściowe są połączone w sieci Kohonena "każdy z każdym". Dla każdego wzorca jest wybierany węzeł zwycięski według reguły mówiącej, iż odległość pomiędzy wagami połączeń węzła wygrywającego a wektorem cech musi być mniejsza od odległości wag połączeń do wektora cech dla innych węzłów:

$$\bigwedge_i |w_{i,j} - \xi| \leq |w_{i,j^*} - \xi| \quad (1)$$

gdzie:  $w_{i,j}$  - waga połączenia  $i$ -tego wejścia z  $j$ -tym węzłem wyjściowym,  
 $w_{i,j^*}$  - waga połączenia z węzłem wygrywającym.

Reguła uczenia sieci Kohonena nie odbiega od standardowej reguły uczenia

konkurencyjnego. Ujmuje ona swoją postacią sposób modyfikacji wag w procesie uczenia. Można ją przedstawić w następującej postaci:

$$\bigwedge_{i,j} \Delta_{i,j} = \eta(t) \Lambda(i, i^*) (\xi_j - w_{i,j}) \quad (2)$$

gdzie:  $\eta(t)$  - współczynnik uczenia,  
 $\Lambda(i, i^*)$  - funkcja sąsiedztwa

W przypadku, gdy  $i = i^*$  funkcja sąsiedztwa  $\Lambda(i, i^*) = 1$ . Wraz ze wzrostem odległości danego węzła wyjściowego  $i$  od węzła wygrywającego  $i^*$  wartość funkcji sąsiedztwa zmniejsza się. Oddalają się też od siebie wektory: wag  $w_i$  oraz wejściowy  $\xi$ . Równanie opisujące funkcję sąsiedztwa musi spełniać powyższe wymagania. Funkcja ta musi też zmieniać się w czasie to znaczy zmniejszać obszar, w którym wagi ulegają modyfikacji. W niniejszej pracy rozpatrzono kilka typów tej funkcji. Dla przykładu przedstawimy funkcję typu "Mexican Hat". Można ją opisać równaniem:

$$\Lambda(i, i^*) = \frac{1 - s(t)x^2}{(1 + x^2)^2} \quad (3)$$

gdzie:  $x$  - odległość pomiędzy  $i$ -tym oraz węzłem wygrywającym  $i^*$ ,  
 $s(t)$  - funkcja postaci:

$$s(t) = \operatorname{tgh}(\beta t), \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (4)$$

Po każdej epoce treningowej konieczna jest normalizacja wag połączeń.

Drugim składnikiem wzoru [2] jest współczynnik uczenia sieci  $\eta(t)$ . Wpływa on na szybkość i dokładność procesu uczenia. W niniejszym przykładzie przyjęto go w postaci:

$$\eta(t) = \eta_0 \alpha t^{-\alpha}, \quad \alpha \in (0, 1] \quad (5)$$

W celu lepszego nadzorowania procesu uczenia się sieci przyjęto następującą funkcję błędu aktualizacji wag:

$$f^\mu(\mathbf{W}^{(t)}, \mathbf{W}^{(t-1)}) = \max(w_{i,j}^{(t)}, w_{i,j}^{(t-1)}) \quad (6)$$

gdzie:  $\mathbf{W}$  - macierz wag połączeń warstwy wejściowej z wyjściową.



Po zsumowaniu wzoru [6] po wszystkich wzorcach otrzymuje się całkowity błąd aktualizacji wag:

$$e(q) = \sqrt{\frac{\sum_{\mu=0}^{M-1} (f^{\mu}(W^{(t)}, W^{(t-1)}))^2}{M}} \quad (7)$$

gdzie:  $M$  - liczba wzorców,  
 $q$  - liczba epok treningowych.

Tak obliczona funkcja błędu jest niezależna od liczby węzłów w warstwie wyjściowej. Przy pomocy tak zdefiniowanej funkcji błędu można określić moment, w którym należy przerwać obliczenia, gdyż poprawa wyników jest już mała. Określony jest on warunkiem:

$$e(t) \geq e^* \quad (8)$$

gdzie:  $e^*$  - założony błąd iteracji.

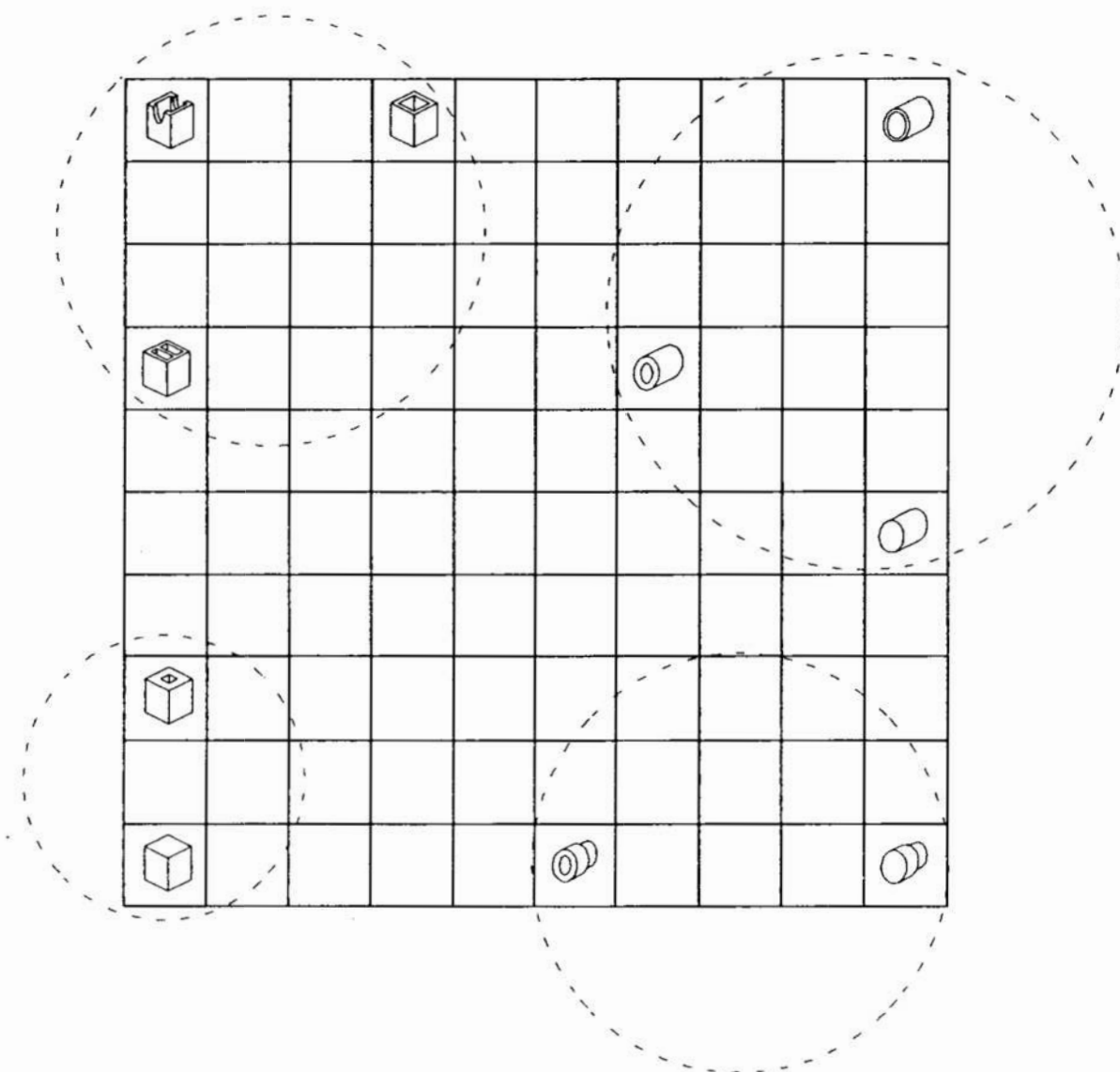
Oczywiście obliczenia kończą się również w momencie gdy  $\eta(t) = 0$ .

Wzorce wejściowe do badań były przygotowywane "ręcznie" przy pomocy programu AutoCAD. Następnie pliki z danymi dla poszczególnych obiektów Łączono w całość tworząc plik danych do programu. Korzystano z opracowanego programu KOH.EXE. W wyniku pracy programu otrzymywano trzy pliki z wynikami. Pierwszy zawierał wagi połączeń, drugi końcowe parametry sieci natomiast ostatni wyniki grupowania w oparciu o dane z sieci Kohonena. Grupowanie było prowadzone w oparciu o dodatkowy moduł programu oparty o algorytm analizy skupień.

## 5. Wyniki

Diagram na rys.4 prezentuje wyniki badań przy zastosowaniu funkcji rozkładu Gaussa jako funkcji sąsiedztwa. Na przedstawionym diagramie każdemu polu odpowiada węzeł wyjściowy w sieci Kohonena. Symbole brył, rozmieszczone na tych polach, pokazują jakiej bryle dany węzeł wyjściowy został przyporządkowany. Na podstawie odległości pomiędzy bryłami można wnioskować o ich wzajemnym podobieństwie. Stosując algorytm analizy skupień można wyróżnić następujące cztery grupy jakie uformowały się w wyniku pracy sieci. Pierwszą tworzą elementy oznaczone numerami 2, 2 i 5. Są to elementy korpusowe. Drugą grupę tworzą elementy 1 i 4. Elementy te reprezentują obiekty typu kostka, pełne lub o grubych ściankach. Trzecią grupę tworzą elementy 6, 7 i 8. Reprezentują one obiekty walcowe typu rura i pręt. Wreszcie ostatnia grupa, utworzona przez elementy 9 i 10, reprezentuje elementy walcowe stopniowane.

Na uwagę zasługuje też fakt rozdzielenia obiektów pryzmatycznych i walcowych na dwie generalne grupy. Obiekty pryzmatyczne zajmują lewą, a obiekty walcowe prawą stronę sieci.



Rys.4. Przykład pracy sieci Kohonena  
Fig.4. An example of Kohonen net work

## 6. Wnioski

Zaprezentowane wyniki udowadniają, że zastosowanie sieci Kohonena do klasyfikacji postaci konstrukcyjnej jest jak najbardziej uzasadnione. Również metoda opisu brył spełnia swoją rolę. Również wykorzystanie algorytmu analizy skupień do interpretowania wyników spełniło pokładane w nim nadzieje.

## Literatura

- [1] P. Gendarz: *Podstawy optymalizacji różnorodności środków technicznych w procesie tworzenia typoszeregów*, praca doktorska, Gliwice 1983
- [2] J. Hertz, A. Krogh, R. Palmer: *Wstęp do teorii obliczeń neuronowych*, WNT Warszawa 1993
- [3] R. Knosala: *Methoden zur Bewertung von Bauelementen als Voraussetzung für die Entwicklung von Bauelementen*. Diss.B, TU Dresden 1989,
- [4] W. Pedrycz, H.C. Card, R. Knosala: *Application of the Kohonen Net to Part Classification*. Ist International Conference "Achievements in the Mechanical and Material Engineering, Gliwice, 1992

## Streszczenie

Praca przedstawia zastosowanie sieci Kohonena do klasyfikacji postaci konstrukcyjnej. Do badań posłużyły obiekty trójwymiarowe. Zastosowano nowy sposób opisu obiektów klasyfikacji. Bazuje on na podziale przestrzeni zajmowanej przez bryłę na małe oktanty i przyporządkowanie im odpowiedniego kodu. Podział bryły na oktanty jest dla wszystkich obiektów taki sam. Zbadano metodę klasyfikacji przy pomocy dziesięciu brył, będącymi obiektami klasyfikacji. Rezultaty klasyfikacji pokazują, iż opisywana metoda spełnia postawione przed nią zadania.

## INVESTIGATION OF CONSTRUCTIONAL FORMS SIMILARITY USING THE KOHONEN NET

### Summary

This paper presents an application of the Kohonen net to constructional forms classification. 3D objects were used as classification objects. The new method of description of constructional forms were analyzed. This method bases on partition of solids on small octants and assignation them special codes. The solid partition on octants is the same for all solids. The classification method were analyzed using ten solids which were classification objects. Results prove that the Kohonen net can correctly classify elements taking into account their constructional forms.

## PRAKTYCZNE SPOSOBY OPTIMALIZACJI PROGRAMU W "JĘZYKU MATHCAD" DYNAMICZNEGO MODELU QUASI-STACJONARNEGO

### 1. Wstęp

Ekspansja zintegrowanych pakietów wspomagających prace inżynierskie (i nie tylko) jest dzisiaj równie dynamiczna jak w momencie pojawiania się pierwszych tego typu programów. Dotyczy to zarówno uznanych już programów na naszym rynku jak PSpice, NAP, ATP, Matlab, Mathcad, itd. dla których średnio co roku powstaje nowa wersja, jak również programów mniej znanych: (Maple, Mathstation). Podstawową ich zaletą jest możliwość szybkiego uzyskania rozwiązania pewnego problemu w zakresie procedur charakterystycznych dla dziedziny dla której przeznaczony jest dany pakiet. Programy typu Matlab i Mathcad, nie są skierowane do konkretnego użytkownika, lecz dają się łatwo zaadoptować np. w elektrotechnice [1],[2],[3].

Biorąc pod uwagę specyfikę zadań w danej dziedzinie inżynierskiej, w pozycji [2] próbowano odpowiedzieć na pytanie, czy w niedalekiej przyszłości do rozwiązywania inżynierskich problemów, popularne języki programowania nie zostaną wyparte przez zintegrowane pakiety takie jak choćby Mathcad?

Dzięki coraz doskonalszym wersjom Mathcada można już chyba dzisiaj użyć sformułowania "język Mathcad" oczywiście w dziedzinie klasycznych problemów inżynierskich. Podstawowa różnica w programowaniu w języku wysokiego poziomu i w Mathcadzie polega na programowaniu w Mathcadzie właściwie tylko w sensie proceduralnym. Jeżeli zechcemy skorzystamy z pewnego działania np. całki oznaczonej:

$$k := 0.6 \quad \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(x)^2} dx = 1.418$$

to otrzymujemy wynik, który powstał poprzez uruchomienie gotowej procedury w tym przypadku procedury Romberga (zmodyfikowany algorytm trapezów) i w zakresie użycia tego symbolu graficznego nie mamy wpływu na jej zmianę.

Bardzo często przy bardziej skomplikowanych obliczeniach standartowe procedury Mathcada mogą być niewystarczająco szybkie i czas oczekiwania na wyniki może być bardzo długi. Wówczas trzeba budować własne procedury, lub stosować inne zabiegi optymalizujące program. Można również oczywiście dokupić szeroki zestaw oferowanych nakładek współpracujących z Mathcadem. W pracy przedstawiono doświadczenia podczas konstruowania programu symulującego indukcyjny napęd dynamiczny, do którego wykorzystano program Mathcad 5.0.

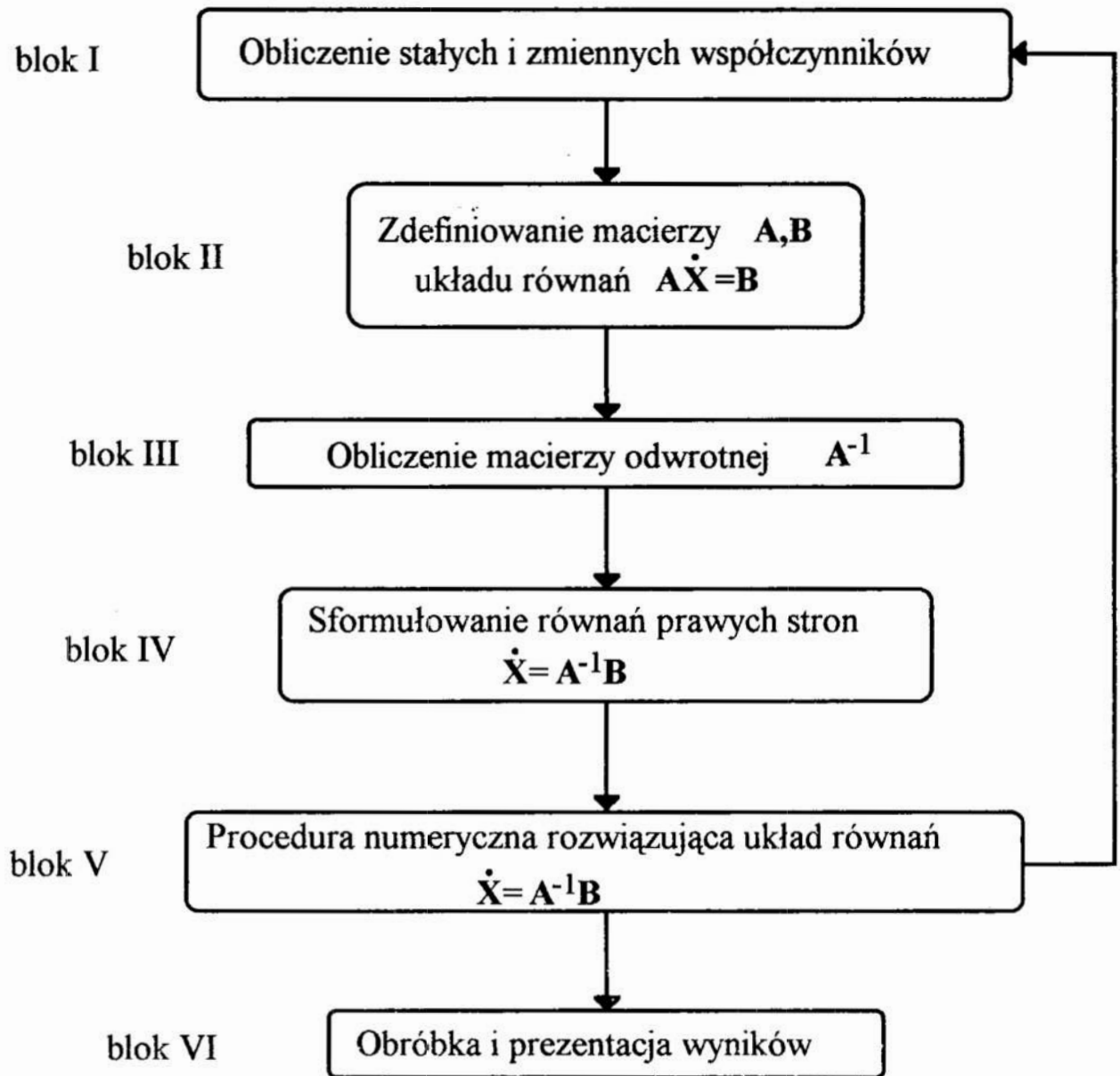
---

\* Politechnika Gdańska Katedra Podstaw Elektrotechniki Teoretycznej

\*\* Wyższa Szkoła Morska w Gdyni Katedra Elektroenergetyki Okrętowej

## 2. Quasi-stacjonarny dynamiczny model obwodowy napędu indukcyjnego

Drogę do rozwiązania sformułowanego problemu można przedstawić w postaci następującego schematu blokowego:



Rys. 1 Algorytm modelu

Fig.1 Algorithm of the model

W przypadku badanego obiektu współczynnikami macierzy  $A$  są między innymi indukcyjności wzajemne pomiędzy częścią pierwotną i wtórną napędu indukcyjnego, a więc wielkości zależne od zmieniającej się w czasie odległości, czyli od jednej ze zmiennych stanu. Stąd widoczna pętla w algorytmie z rys.1. Zmusza to program z każdym krokiem procedury rozwiązującej układ równań (blok V rys.1) do powrotu do jego początku. Powoduje to oczywiście zasadnicze wydłużenie obliczeń i stwarza konieczność stosowania optymalnych metod.

### 3. Bazowy zestaw procedur mathcada dla poszczególnych bloków algorytmu pokazanych na rys.1

#### Definicja zmiennych współczynników

Gros współczynników macierzy  $A$  stanowią jak wspomniano w punkcie 2 indukcyjności wzajemne, które są traktowane jako suma indukcyjności pomiędzy dwoma zwojami w kształcie okręgu. Stąd konieczność obliczania dwóch całek eliptycznych I i II rodzaju (1), występujących we wzorze na indukcyjność wzajemną (2).

$$K_e(x5, i, j) := \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k_e(x5, i, j)^2 \cdot \sin(\alpha)^2}} d\alpha \quad (1)$$

$$E_e(x5, i, j) := \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k_e(x5, i, j)^2 \cdot \sin(\alpha)^2} d\alpha$$

$$M(x5, i, j) := \mu_0 \cdot \sqrt{r_p(i) \cdot r_c(j)} \cdot \left[ \left( \frac{2}{k_e(x5, i, j)} - k_e(x5, i, j) \right) \cdot K_e(x5, i, j) - \frac{2}{k_e(x5, i, j)} \cdot E_e(x5, i, j) \right] \quad (2)$$

#### Definiowanie macierzy A i B układu równań

W celu symulacji przewiduje się formułowanie zmiennego rzędu macierzy  $A$ . Dla zbadania poprawności działania programu przyjęto na wstępie macierz  $A$  rzędu 6 (3). W przypadku badanego obiektu macierze mają następującą postać: (3), (4).

$$A(x5) := \begin{bmatrix} L_{p1} & M_{p12} & -M_{1Z}(x5) & 0 & 0 & 0 \\ M_{p12} & L_{p2} & -M_{2Z}(x5) & 0 & 0 & 0 \\ -M_{1Z}(x5) & -M_{2Z}(x5) & L_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6) := \begin{bmatrix} -R_1 \cdot x1 + x3 \cdot x6 \cdot M'_{1Z}(x5) \\ -R_2 \cdot x2 + x3 \cdot x6 \cdot M'_{2Z}(x5) \\ x4 - x3 \cdot R_c + x1 \cdot x6 \cdot M'_{1Z}(x5) + x2 \cdot x6 \cdot M'_{2Z}(x5) \\ -\frac{1}{C} \cdot x3 \\ x6 \\ -\frac{1}{m_p} \cdot x3 \cdot (x1 \cdot M'_{1Z}(x5) + x2 \cdot M'_{2Z}(x5)) \end{bmatrix} \quad (4)$$



Największą macierz jaką Mathcad tworzy w postaci jak (3),(4) ma wymiar 10x10. W przypadku większych rozmiarów należy definiować każdy element z osobna. Wywołanie takiej macierzy pojawi się w postaci tablicy (5). Kliknięcie kursorem na tablicy wyświetli belki przewijania, dzięki którym można obejrzeć dowolny fragment macierzy.

$$i := 0..40 \quad j := 0..40$$

$$A_{i,j} := i + j$$

$$A =$$

42	43	44	45	46	47
43	44	45	46	47	48
44	45	46	47	48	49
45	46	47	48	49	50
46	47	48	49	50	51
47	48	49	50	51	52
48	49	50	51	52	53

(5)

### Obliczanie odwrotności macierzy A i formułowanie równań stanu

Wywołanie procedury odwracania macierzy sprowadza się do podniesienia jej symbolu do potęgi -1. W standardzie Mathcad dokonuje dekompozycji macierzy metodą Crouta. Wzory (6) przedstawiają sposób w jaki sformułowane są funkcje stanowiące prawe strony równań.

$$G(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6) := A(x5)^{(-1)} \cdot B(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6)$$

$$f1(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6) := G(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6)_0$$

$$f3(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6) := G(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6)_2$$

$$f5(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6) := G(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6)_4$$

(6)

$$f2(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6) := G(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6)_1$$

$$f4(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6) := G(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6)_3$$

$$f6(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6) := G(t, x1, x2, x3, x4, x5, x6)_5$$

gdzie: G(t,x)-wektor, G(t,x)<sub>0</sub> - pierwszy element wektora.

## 4. Modyfikacja bazowego zestawu procedur

### Zmiana procedury całek eliptycznych sumą szeregów

Dla zestawu bazowego przeprowadzono wstępne obliczenia na jednostce 486DX z zegarem 40MHz i 16MB RAM, dla 25 kroków. Jako procedurę numeryczną zastosowano procedurę Runge-Kutty IV-rzędu. Czas obliczeń trwał aż 15 godzin co oczywiście nie było optymistyczne w perspektywie badań z wyższym rzędem macierzy. Tak długi czas wynika z wielokrotnego obliczania całek eliptycznych numeryczną metodą Romberga. W celu zmniejszenia czasu obliczeń zastąpiono procedurę Mathcada, a całki eliptyczne

obliczono z aproksymacji Czebyszewa, przy pomocy szeregów (7) [4].

$$\begin{aligned}
 a_0 &:= 1.38629436112 & b_0 &:= 0.50000000000 & c_1 &:= 0.44325141463 & d_1 &:= 0.24998368310 \\
 a_1 &:= 0.09666344259 & b_1 &:= 0.12498593597 & c_2 &:= 0.06260601220 & d_2 &:= 0.09200180037 \\
 a_2 &:= 0.03590092383 & b_2 &:= 0.06880248576 & c_3 &:= 0.04757383546 & d_3 &:= 0.04069697526 \\
 a_3 &:= 0.03742563713 & b_3 &:= 0.03328355346 & c_4 &:= 0.01736506451 & d_4 &:= 0.00526449639 \\
 a_4 &:= 0.01451196212 & b_4 &:= 0.00441787012 & & & & 
 \end{aligned}$$

$a_i, b_i, c_i, d_i$  - stałe współczynniki w szeregowych wzorach całek eliptycznych

$$\eta(x5, i, j) := 1 - k_e(x5, i, j)^2$$

$$K_e(x5, i, j) := \sum_{l=0}^4 a_l \cdot \eta(x5, i, j)^l - \ln(\eta(x5, i, j)) \cdot \sum_{m=0}^4 b_m \cdot \eta(x5, i, j)^m \quad (7)$$

$$E_e(x5, i, j) := 1 + \sum_{l=1}^4 c_l \cdot \eta(x5, i, j)^l - \ln(\eta(x5, i, j)) \cdot \sum_{m=1}^4 d_m \cdot \eta(x5, i, j)^m$$

$$\begin{aligned}
 K_e(0.1, 1, 1) &= 1.987621 & \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k_e(0.1, 1, 1)^2 \cdot \sin(\alpha)^2}} d\alpha &= 1.987621 \\
 E_e(0.1, 1, 1) &= 1.279937 & \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k_e(0.1, 1, 1)^2 \cdot \sin(\alpha)^2} d\alpha &= 1.279937
 \end{aligned}$$

Jak widać wyniki powyższych procedur są wystarczająco dokładne. Wykonanie obliczeń dla identycznego zestawu danych trwało tym razem 4 godziny. Metoda powyższa może być zatem z powodzeniem wykorzystana z szybszymi procedurami rozwiązującymi równania różniczkowe niż zastosowana procedura Runge-Kutty IV- rzędu. Na przykład powyższe obliczenia z najprostszą procedurą Eulera trwały zaledwie 2 minuty.

**Wielomiany aproksymujące charakterystyki indukcyjności M(x5) i jej pochodnej M'(x5)**

W przypadku badań modelu z dużymi rzędami macierzy A, oraz gdy zachodzi konieczność stosowania dokładniejszych procedur rozwiązujących układ równań różniczkowych, metoda "szeregów" nie daje jeszcze zadowalających czasów obliczeń. W celu zdecydowanego przyspieszenia działania programu, postanowiono zastąpić blok I w algorytmie modelu (rys.1) funkcjami wielomianowymi będącymi aproksymacjami indukcyjności wzajemnych i ich pochodnych występujących w macierzach A, B.

Zależności indukcyjności wzajemnych od odległości, są stosunkowo gładkie i wystarczy

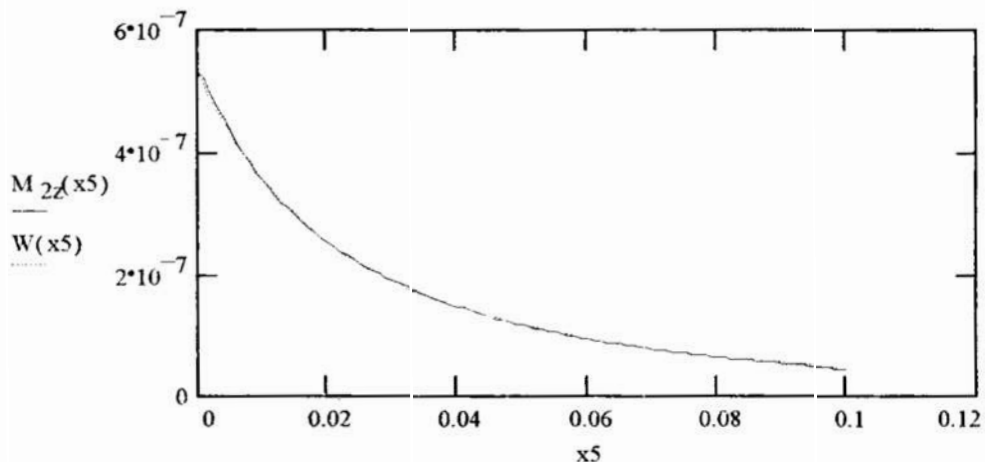
aprosymować je jednym wielomianem. Poniżej przedstawiono aproksymacje w Mathcadzie jednej z indukcyjności występujących w **A** wielomianem piątego stopnia. Jak widać na rys.2 wartości indukcyjności obliczonej bezpośrednio i z wielomianowej aproksymacji są właściwie nierozróżnialne.

$$\begin{array}{l}
 x_5 := 0, 0.001.. 0.1 \\
 \text{wybrany wektor węzłów} \\
 n := 0.. 5
 \end{array}
 \quad
 x := \begin{bmatrix} 0 \\ 0.02 \\ 0.04 \\ 0.06 \\ 0.08 \\ 0.1 \end{bmatrix}
 \quad
 X := \begin{bmatrix} 1 & x_0 & (x_0)^2 & (x_0)^3 & (x_0)^4 & (x_0)^5 \\ 1 & x_1 & (x_1)^2 & (x_1)^3 & (x_1)^4 & (x_1)^5 \\ 1 & x_2 & (x_2)^2 & (x_2)^3 & (x_2)^4 & (x_2)^5 \\ 1 & x_3 & (x_3)^2 & (x_3)^3 & (x_3)^4 & (x_3)^5 \\ 1 & x_4 & (x_4)^2 & (x_4)^3 & (x_4)^4 & (x_4)^5 \\ 1 & x_5 & (x_5)^2 & (x_5)^3 & (x_5)^4 & (x_5)^5 \end{bmatrix}$$

$B_n := M_{2z}(x_n)$  wartości indukcyjności na mocy całek eliptycznych i wzoru (2) w wybranych węzłach.

$a := X^{-1} \cdot B$  - obliczenie współczynników wielomianu aproksymującego  $W(x_5)$ .

$$W(x_5) := a_0 + a_1 \cdot x_5 + a_2 \cdot x_5^2 + a_3 \cdot x_5^3 + a_4 \cdot x_5^4 + a_5 \cdot x_5^5$$



Rys.2 Funkcja indukcyjności i jej aproksymacja  
Fig.2 Function of induction and its approximation

Pochodne indukcyjności wzajemnych występujące w wektorze **B** nie są już tak gładkie jak na rysunku 2. Zróżniczkowane (nawet analitycznie) wielomiany aproksymujące indukcyjności zbyt odbiegają od pochodnej funkcji  $M(x_5)$ . Dlatego funkcje  $M'(x_5)$  również trzeba aproksymować.

W zestawie bazowym (punkt 3) funkcja  $M'(x_5)$  została wyprowadzona analitycznie na podstawie  $M(x_5)$  (2). Jej wykres przedstawiono na rys.3. W punkcie ekstremum przy aproksymacji "sklejano" dwa wielomiany aproksymujące  $M'(x_5)$ . Poniżej przedstawiono sposób aproksymowania pochodnej indukcyjności w Mathcadzie za pomocą instrukcji **If** sklejającej obydwa wielomiany:

$$x := 0.001 \quad n := 0..5 \quad k := 0..3$$

$$f(x) := \frac{d}{dx} M'_{2z}(x) \quad x_{\min} := \text{root}(f(x), x)$$

$$x_{\min} := x_m \quad x_m := 0.0027$$

$$y := \begin{bmatrix} 0 \\ 0.001 \\ 0.002 \\ x_m \end{bmatrix}$$

$$x := \begin{bmatrix} x_m \\ 0.02 \\ 0.04 \\ 0.06 \\ 0.08 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

y,x- wektory węzłów obu wielomianów aproksymujących

$$X := \begin{bmatrix} 1 & x_0 & (x_0)^2 & (x_0)^3 & (x_0)^4 & (x_0)^5 \\ 1 & x_1 & (x_1)^2 & (x_1)^3 & (x_1)^4 & (x_1)^5 \\ 1 & x_2 & (x_2)^2 & (x_2)^3 & (x_2)^4 & (x_2)^5 \\ 1 & x_3 & (x_3)^2 & (x_3)^3 & (x_3)^4 & (x_3)^5 \\ 1 & x_4 & (x_4)^2 & (x_4)^3 & (x_4)^4 & (x_4)^5 \\ 1 & x_5 & (x_5)^2 & (x_5)^3 & (x_5)^4 & (x_5)^5 \end{bmatrix}$$

$$Y := \begin{bmatrix} 1 & y_0 & (y_0)^2 & (y_0)^3 \\ 1 & y_1 & (y_1)^2 & (y_1)^3 \\ 1 & y_2 & (y_2)^2 & (y_2)^3 \\ 1 & y_3 & (y_3)^2 & (y_3)^3 \end{bmatrix}$$

$$B_n := M'_{2z}(x_n)$$

$$C_k := M'_{2z}(y_k)$$

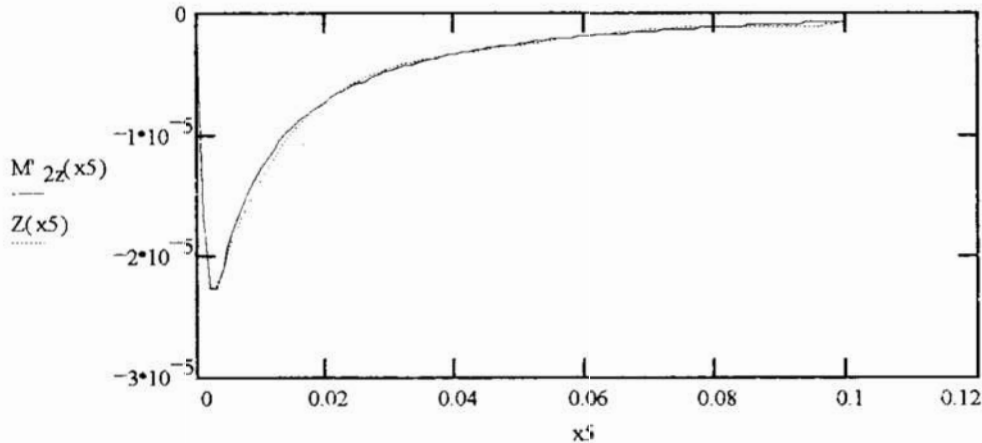
$$a := X^{-1} \cdot B$$

$$c := Y^{-1} \cdot C$$

$$G(x5) := a_0 + a_1 \cdot x5 + a_2 \cdot x5^2 + a_3 \cdot x5^3 + a_4 \cdot x5^4 + a_5 \cdot x5^5$$

$$W(x5) := c_0 + c_1 \cdot x5 + c_2 \cdot x5^2 + c_3 \cdot x5^3$$

$$Z(x5) := \text{if}(x5 < x_m, W(x5), G(x5))$$



Rys. 3 Funkcja  $M'(x5)$  i jej aproksymacja

Fig. 3. Function  $M'(x5)$  and its approximation

Dla lepszej organizacji pamięci współczynniki wielomianów w powyższych przykładach zostały obliczone w osobnym podprogramie i wyeksportowane do pliku na dysku. Podczas każdego uruchamiania programu głównego współczynniki są automatycznie czytane z pliku za pomocą instrukcji (READPRN) [3] do programu definiując jednocześnie wielomiany. Dzięki temu zabiegowi przy każdej petli wartości  $M(x5)$  i  $M'(x5)$  będą obliczane przez podstawienie zmiennej  $x5$  do wielomianów. Tym razem czas obliczeń dla stałego zestawu danych z użyciem procedury Runge-Kutty IV trwał 15 minut.

Cały opisany powyżej program powstał w standartowym Mathcadzie 5.0 bez użycia istniejących specjalizowanych nakładek jak np. *Numerical procedures* zawierający szeroką gamę optymalnych procedur zarówno rozwiązujących układy równań różniczkowych jak i odwracających macierze. Ze względu na symetrię i dodatni wyznacznik macierzy A wydaje się możliwe dodatkowe przyspieszenie programu poprzez zastosowanie optymalnej metody odwracania tego typu macierzy - metody Cholesky'ego, która przede wszystkim daje oszczędności w pamięci operacyjnej. W środowisku Windows dostęp do pamięci operacyjnej dla Mathcada jest ograniczony tylko hardwarem.

## 5. Wnioski

Celem pracy jest pokazanie pewnych technik pozwalających na programowanie trudnych problemów inżynierskich w programie Mathcad. Ze wzrostem złożoności analizowanych problemów na ogół znacznie wzrasta również czas obliczeń. W pracy dla zmniejszenia czasu obliczeń napędu indukcyjno-dynamicznego wykorzystano metodę aproksymacji całek eliptycznych wielomianami Czebyszewa oraz metodę aproksymacji wielomianowej zależności indukcyjności własnej i wzajemnej w funkcji odległości. Sposoby aproksymacji funkcji z uwzględnieniem możliwości obliczania błędów są bardzo szerokie. Bardzo cenną wydaje się być tu wskazówka o możliwości znalezienia aproksymacji za pomocą wielomianów z funkcją wagi, której pochodna analityczna mogłaby być dostatecznie zgodna z  $M'(x)$ . Trzeba jednak mieć na uwadze, że nawet niewielkie zwiększenie czasu obliczeń w bloku I lub II (rys.1) może poważnie wydłużyć globalny czas obliczeń, ze względu na pętle w programie (blok V-1). Jest to tym istotniejsze, że program musi uwzględniać obliczenia z macierzami większymi od rzędu  $6 \times 6$ . Porównanie wyników symulacji przy zastosowaniu powyższej aproksymacji wielomianowej z wynikami programu bazowego (z całkami eliptycznymi) dało bardzo dużą zgodność wyników, których błąd nie przekraczał 0.2%.

Przeprowadzona powyżej symulacja w programie Mathcad jest kolejnym przykładem dużych możliwości tego programu i pozwala traktować go w klasie zadań konstrukcyjno-inżynierskich jako specyficzny język programowania. Niewątpliwie Mathcad ma "groźnych konkurentów" w programach takich choćby jak Maple czy Matlab o nie mniejszych możliwościach. Jednak zaletą Mathcada, wydaje się być jego naturalność syntaktyczna.

## Literatura

1. Jankowski P.: *Zastosowanie programu Mathcad 2.52 do analizy obwodów elektrycznych*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej nr 2 Gdańsk 1992.
2. Jankowski P.: *Zastosowanie Mathcada 3.0 w metodach numerycznych*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej nr 3 Gdańsk 1993.
3. Jankowski P.: *Wykorzystanie programu Mathcad 3.0 w rozwiązywaniu problemów elektrotechniki teoretycznej*. Prace IV Sympozjum  $\mu$ CE-4 nt. *Mikrokomputery w Edukacji* Oddz. Warszawski PTETiS i Wydz. Elektryczny Politechniki Warszawskiej, Polana Chochołowska 1993.
4. Łozinskij N.N. i inni: *Sprawocznik Programista*. Izd. Sudostrojenije Leningrad 1964.

## **Streszczenie**

Obwodowy model quasi-stacjonarny został zasymulowany w Mathcadzie 5.0. Wiele współczynników występujących w równaniach stanu jest funkcją zmiennej stanu. Powoduje to powstanie dodatkowej pętli w programie co znacznie wydłuża czas obliczeń. W artykule zaprezentowano doświadczenia powstałe podczas tworzenia powyższego programu w "języku Mathcad" oraz pokazano skuteczne sposoby skrócenia czasu obliczeń.

## **OPTIMALIZATION OF THE PROGRAM FOR THE CIRCULAR QUASI- STATIONARY MODEL IN "MATHCAD LANGUAGE"**

### **Summary**

Circular quasi-stationary model was simulated in Mathcad 5.0. In this paper authors present their experiences they got, creating this program in "Mathcad language" and efficient ways to make the computes faster.





**Stefan JENDO**, *Institute of Fundamental Technological Research,  
Polish Academy of Sciences, Świątokrzyska 21, 00-049 Warsaw, Poland, E-Mail: sjendo@jppt.gov.pl*

**Witold M. PACZKOWSKI**, *Civil Engineering Department,  
Technical University of Szczecin, Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, Poland*

## **MULTICRITERION OPTIMUM SPACE TRUSS DESIGN BY CATALOGUE**

### **1. Introduction**

The double-layer space trusses are used for covering the exhibition, sport, shopping center and industrial halls [6]. Design in elastic range of such metallic structures is based on choosing the appropriate cross-sectional areas of bars to satisfy stress and local stability constraints. Next, the displacements of nodes under combined characteristic loads are calculated and compared with the allowable displacements occurring in codes [8]. If they are violated it is necessary to modify the structure by increasing the stiffness of structure. The optimal structure should satisfy the limit state capacity and serviceability conditions [8]. Many papers in this area of research are only concerned with limit state capacity of structure. If the serviceability conditions are violated the structure is eliminated from considerations.

In this paper, a new method is presented that allows to tread concurrently the limit state capacity and serviceability conditions. It means that in the first stage of design, the minimal cross-sectional areas of truss bars satisfying the limit state capacity conditions are found. In the second stage the serviceability conditions are checked. If they are not satisfied the structure is modified. This modification can be done in a few ways. Below, the decreasing of displacements or increasing of stiffness of double-layer space truss is done by decreasing a number of elements ( $t$ ) in the catalogue  $T$  of circular hollow sections for truss bars, [7].

### **2. Multicriterion Optimal Choise of Truss Bar Catalogue**

This paper deals with optimization of steel space truss used for covering of exhibition halls (Fig. 1). The orthogonal double-layer space truss is pinned supported at the corners of upper layer. Circular hollow sections of truss bars are made from hot-rolled steel with a strength of material  $f_d = 210$  MPa. The five single-layer parabolic lattice-work domes are used as abatjours and they are placed on the roof (Fig. 1).

The maximal loading condition which causes the maximal displacements  $\Delta_1 = \sqrt{2}L/250$  and  $\Delta_2 = L/250$  (see Fig. 1) consists of the following loadings: the weight of roof covering  $0.5$  kN/m<sup>2</sup>, the snow loading  $0.72$  kN/m<sup>2</sup>, the technological loading  $0.2$  kN/m<sup>2</sup> and the concentrated loadings transmitted from abatjours to truss nodes. One quarter of space truss is only considered because of the symmetry of structure and loads. The multicriterion optimization problem of space truss can be formulated as follows [1,2,3,4,5]. Find such catalogue  $[t, T]$  of circular hollow sections for truss bars which

minimizes the mass of truss for 1 m<sup>2</sup> of horizontal projection

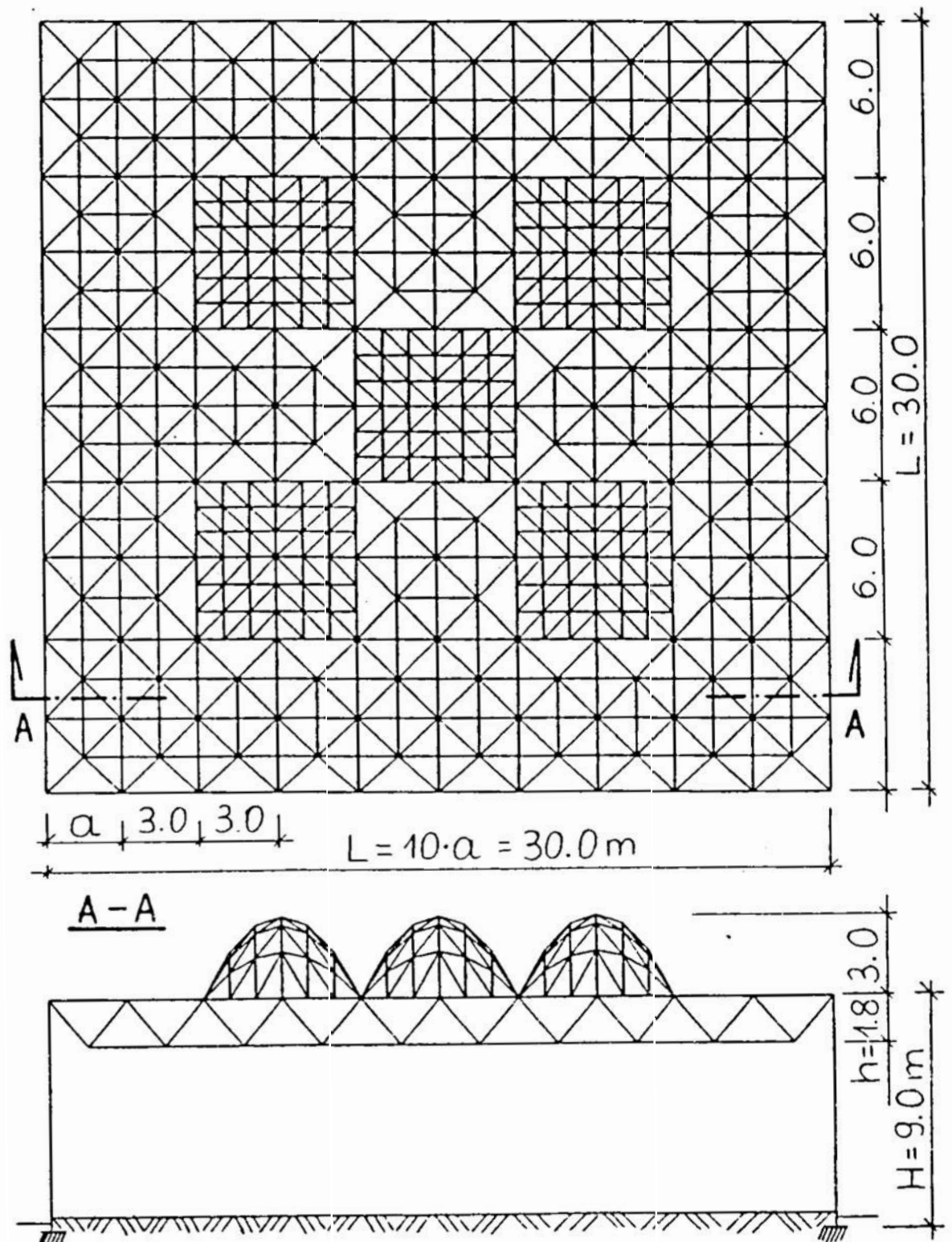


Fig. 1. Layout of covering of exhibition hall  
Rys. 1. Schemat przekrycia hali wystawowej

$$f_1(\mathbf{x}) = \frac{M_t^{t/(t+0.1)}}{\max[M_t^{t/(t+0.1)}]}, \quad (1)$$

where:  $M_t$  is the total mass of bars and joints in one quarter of truss, i.e.,

$$M_t = \frac{1.1\gamma}{(0.5L)^2} \sum_{k=1}^{k_b} A_k l_k, \quad \text{and} \quad \sum_{i=1}^t b_i = k_b,$$

and also minimizes a labor consumption corresponding with a number of the elements  $t$  in the catalogue  $T$ , i.e.,

$$f_2(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^t b_i^{C(t)}}{\max[\sum_{i=1}^t b_i^{C(t)}]}, \quad (2)$$

where  $C(t) = (1 - 0.4e^{-0.35t})$  is labor consumption for truss realization; it describes the influence of labor cost concerning with a numbers of elements  $t$  in the catalogue of

circular hollow sections  $T$ ;  $\max[M_t^{t/(t+0.1)}] = 75.14 \text{ kg/m}^2$  and  $\max[\sum_{i=1}^t b_i^{C(t)}] = 111.04$

are the maximal values of functions which can be reached in the domain of feasible solutions,  $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$  is the bulk density of steel,  $A_k$  is cross-sectional area of  $k$ -th truss bar,  $l_k$  is the length of  $k$ -th truss bar,  $k_b = 168$  denotes the number of truss bars in one quarter of space truss,  $L = 30 \text{ m}$  is the truss span and  $b_i$  is a number of bars with the same cross-sectional area. The mass of truss joints for  $1 \text{ m}^2$  of horizontal projection is taken into account by the empirical coefficient  $1.1^{t/(t+0.1)}$  which is equal approximately 10% of mass of truss bars, i.e., the total mass of truss  $M_t = 1.1 M$  and  $t/(t+0.1)$  is the rectifying exponent for truss mass corresponding with a number of elements in the catalogue.

Vector of objective function has the following form

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})]^T. \quad (3)$$

Vector of decision variables has the form

$$\mathbf{x} = [t, T]^T \in X, \quad (4)$$

where  $T$  is a catalogue of circular hollow sections for truss bars with a numbers of elements  $t$  (see Fig. 2 and 5). The domain of feasible solutions  $X$  is determined by the set of design, computational and technological constraints (Table 1).

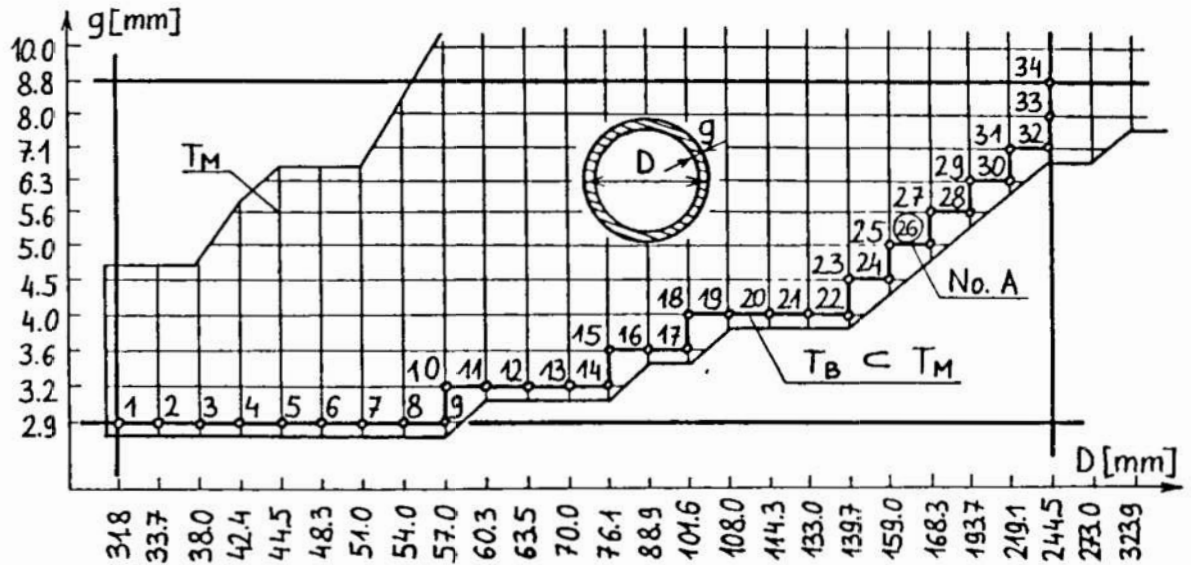


Fig. 2. The segment of metallurgical catalogue  $T_M$  and the basic catalogue  $T_B$   
Rys. 2. Segment katalogu metalurgicznego  $T_M$  oraz katalog podstawowy  $T_B$

Table 1. Optimization constraints for space truss design

Tablica 1. Ograniczenia optymalnego projektowania kratownic przestrzennych

Design constraints	(5)	Technological constraints (6)
$\sigma_k^c = N_k m_{bk} / A_k \leq f_d = 210\text{MPa}$	(5.1)	$A_k \in T \subset T_B \subset T_M$ (6.1)
$\sigma_k^t = N_k / A_k \leq f_d = 210\text{MPa}$	(5.2)	$2.9 \leq g \leq 8.8\text{mm}$ (6.2)
$\lambda_k = l_k / i_k \leq 250$	(5.3)	$31.8 \leq D \leq 244.5\text{mm}$ (6.3)
$[K]_n \{\delta\}_n = \{P\}_n$	(5.4)	$1 \leq t \leq 34$ (6.4)
$\Delta_1 \leq \sqrt{2}L/250 = L_1/250 = 16.97\text{cm}$	(5.5)	Computational constraints (7)
$\Delta_2 \leq L/250 = 12.00\text{cm}$	(5.6)	$n \in \{1, 2, \dots, N\}$ (7.1)
		$1 \leq N \leq 10$ (7.2)
		$1 \leq T \leq 14$ (7.3)

The following notation in Table 1 is used:  $(\sigma_k^t)$  and  $(\sigma_k^c)$  are the tensile and compressive stresses in  $k$ -th truss bar, respectively,  $m_{bk}$  is the buckling coefficient for  $k$ -th compressed truss bar,  $f_d = 210\text{MPa}$  is the strength of material,  $\lambda_k$  is a slenderness ratio for  $k$ -th compressed truss bar,  $i_k$  is a radius of inertia of cross-sectional area of  $k$ -

th truss bar,  $\{P\}_n$  is a loading vector,  $n$  is a number of iteration,  $T$  is the catalogue of circular hollow sections for truss bars,  $T_B$  is the basic catalogue of cross-sectional areas of truss bars and  $T_M$  is the metallurgical catalogue of hot-rolled steel circular hollow sections,  $g$  and  $D$  are wall thickness and diameter of circular hollow section, respectively (Fig. 2).

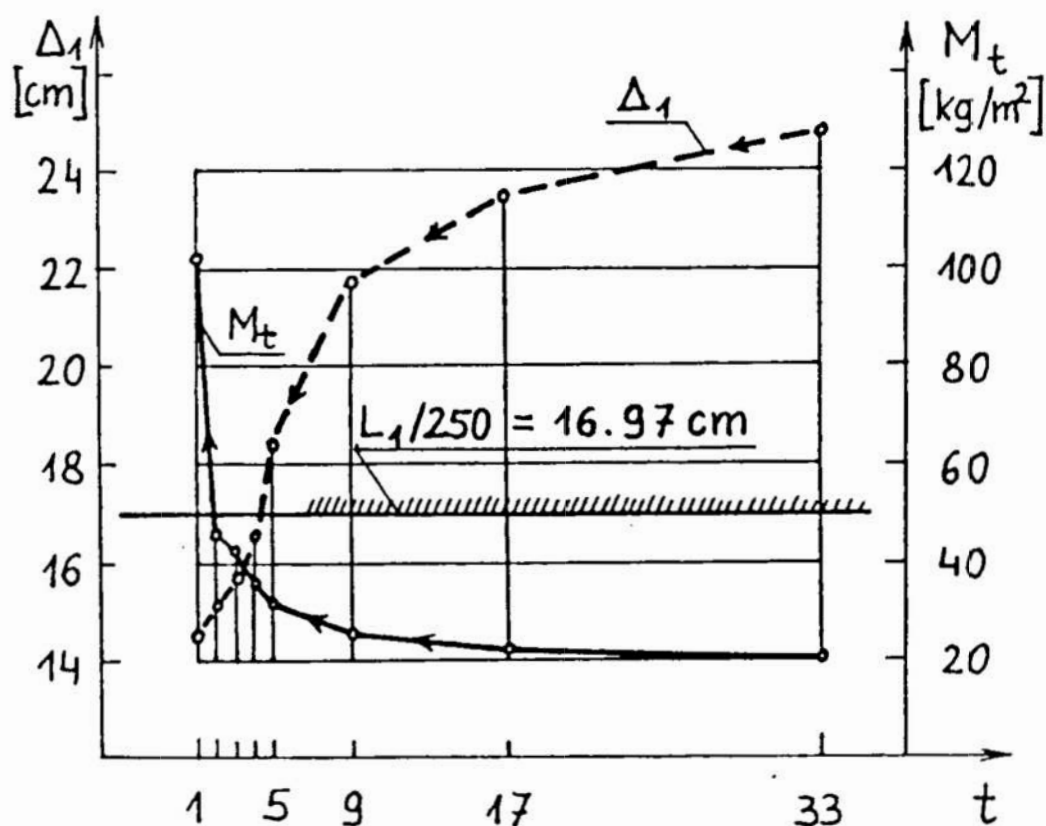


Fig. 3. Diagrams of the displacement  $\Delta_1$  and truss mass  $M_t$  versus a number of elements  $t$  in the catalogue  $T$

Rys. 3. Wykresy przemieszczeń  $\Delta_1$  oraz masy kratownicy  $M_t$  w zależności od liczby elementów  $t$  w katalogu  $T$

The static analysis computer program is based on displacement method. The cross-sectional areas of truss bars are chosen automatically from a given catalogue of circular hollow sections. The local stability constraint (5.3) is taken into account. The internal forces in truss bars are determined. The appropriate cross-sectional areas of truss bars satisfying the constraints (5.1-5.4) and (6.1) are chosen in  $n$ -th iteration for the known stiffness matrix  $[K]_n$  which was determined in the previous iteration. The optimization process is terminated when the results of two sequential iterations are identical or maximal number of iterations  $N$  is reached. Next, the calculated loadings are replaced by characteristic loadings to find the actual displacements of truss nodes. If the displacement constraints (5.5) and (5.6) are not satisfied than a next catalogue is chosen and iteration process is repeated. It is assumed that the displacement constraints can be satisfied by choosing the appropriate catalogue of cross-sectional areas of truss bars.



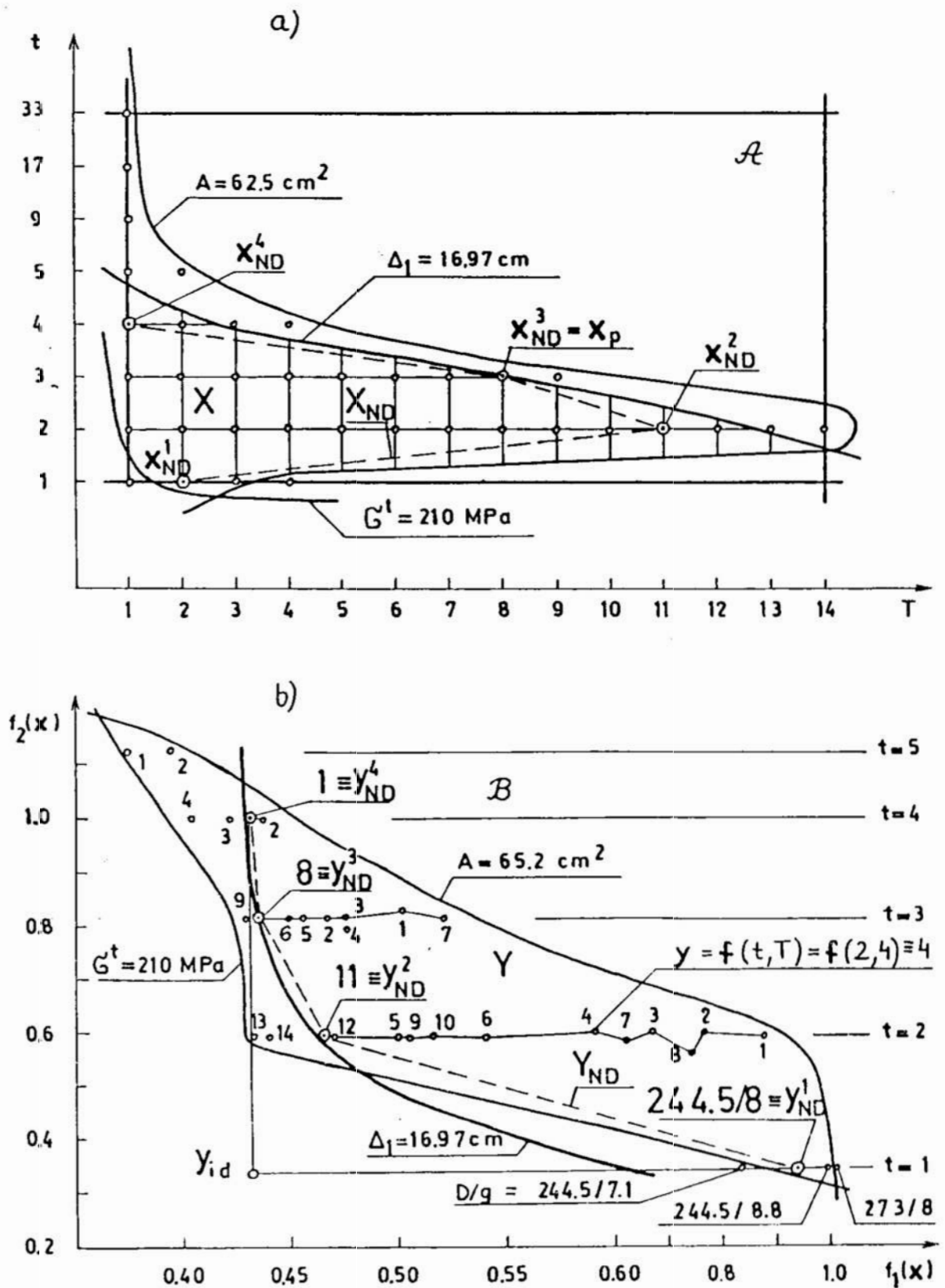


Fig. 4. The spaces of decision variables  $A$  and objectives  $B$   
 Rys. 4. Przestrzeń zmiennych decyzyjnych  $A$  oraz przestrzeń celów  $B$

Based on paper [7] the basic catalogue of cross-sectional areas of truss bars  $T_B$  is determined. The basic catalogue  $T_B$  has the following feature: the ratio of cross-sectional areas  $A_{n+1}/A_n$  is constant and the corresponding critical  $N^c$  and limit  $N^l$  forces increase simultaneously. The maximal cross-sectional area is determined on the base of maximal force which occurs in the truss with the same cross-sectional areas for each bar, i.e.,  $t=1$ . The dimensions of cross-sections in the basic catalogue  $T_B$  and segment of metallurgical catalogue are shown in Figure 2.

Optimization process starts from a basic catalogue  $T_B$ . The displacement constraints for the assumed depth of double-layer space truss  $h=1.8$  m are violated (Fig. 3). The sequential catalogues are created from the previous one by erasing every second cross-section. The displacement constraints are only satisfied by the catalogues with a numbers  $t \leq 4$  (Fig. 3). Among these catalogues the four non-dominated catalogues are chosen. The space of decision variables  $A$  and the objective space  $B$  are shown in Figure 4.

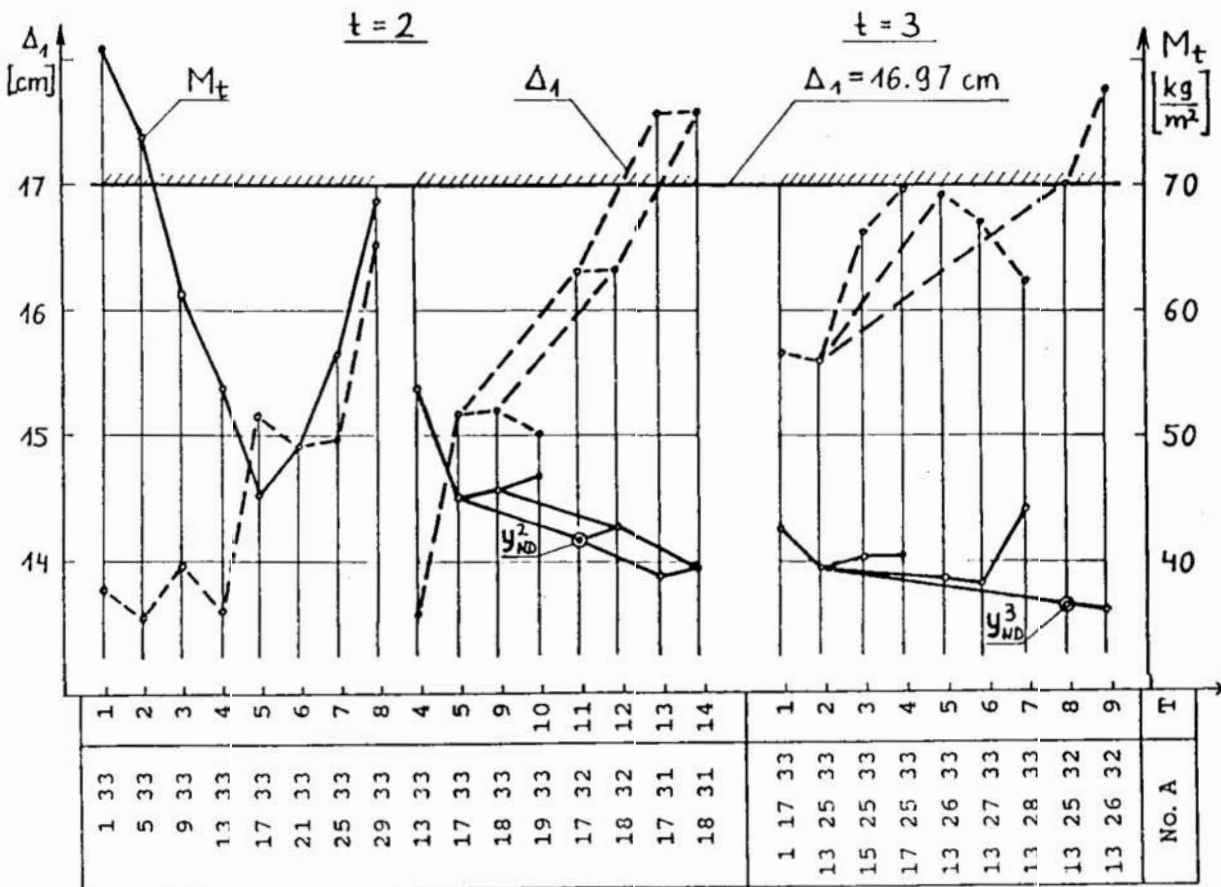


Fig. 5. The broken lines of displacement  $\Delta_1(x)$  and truss mass  $f_1(x)$  for the catalogues  $T$  with a numbers of elements  $t=2$  and  $t=3$

Rys. 5. Linie łamane przemieszczeń  $\Delta_1(x)$  i masy kratownicy  $f_1(x)$  dla katalogów  $T$  o liczności  $t=2$  i  $t=3$

The active constraints (5.2), (5.5), (6.1), (6.4) and (7.3) determine the domain of feasible solutions  $X \subset A$ . The image of the set of constraints listed above in objective

space creates the attainable domain  $Y \subset B$ . The discrete solutions  $x \in X$  and the corresponding points  $y \in Y$  are marked by circles. The non-dominated (efficient) points  $y_{ND}^i$ ,  $i=1, \dots, 4$  and the corresponding Pareto optimal (compromise) solutions  $x_{ND}^i = [f(x)]^{-1}$  are linked by dash lines.

The broken lines  $\Delta_1(x)$  and  $f_1(x)$  for catalogues T with a numbers  $t=2$  and  $t=3$  are shown in Figure 5. The numbers corresponding to circular hollow sections occurring in basic catalogue  $T_B$  are given for each catalogue of cross-sectional areas of truss bars.

One can choose the preferable solution  $x_p$  from the set of compromise solutions  $X_{ND}$  using e.g. metric function method or utility function methods [1,2]. In this paper the latter method is chosen to find the preferable solution, i.e.,  $\min U$  subject to the imposed constraints listed in Table 1. The utility function takes into account the labor cost as follows,

$$U(x_p) = \min_{x \in X_{ND}} \frac{C(t)M_t}{\max[C(t)M_t]} \quad (8)$$

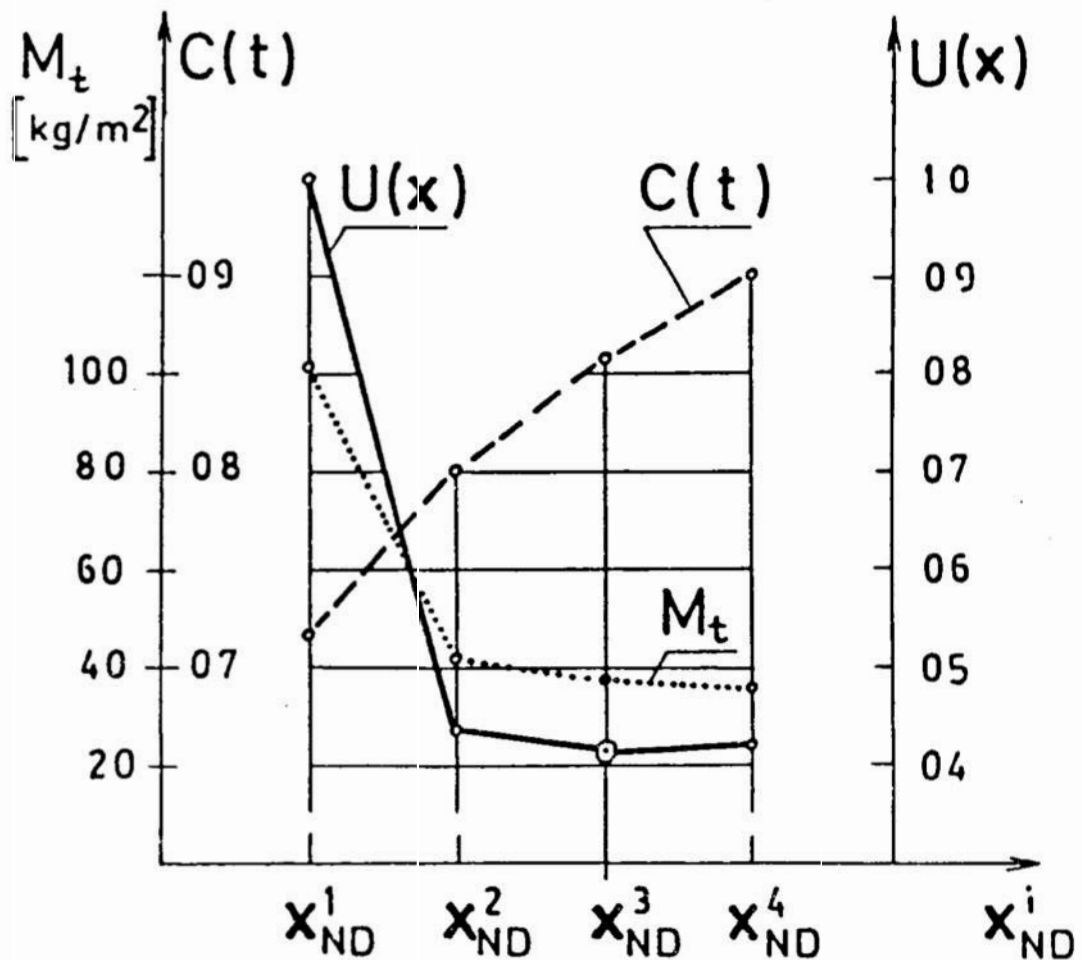


Fig. 6. The diagram of utility function and the preferable solution  $x_p = x_{ND}^i$   
 Rys. 6. Wykres funkcji użyteczności oraz rozwiązanie preferowane  $x_p = x_{ND}^i$

The function  $C(t)=(1 - 0.4e^{-0.35t})$  occurring in the utility function (8) and shown in Figure 6 describes the influence of labor cost concerning with a numbers of elements  $t$  in the catalogue of circular hollow sections T. The diagrams of  $U$ ,  $M_t$  and  $C_t$  are shown in Fig. 6.

The controlled enumeration method based on structural design knowledge is used to find the set of compromise solutions. The performance of this method is schematically shown in Figure 7. The searching for minimum of  $f(x)$  starts from the fixed  $x_1 = x_1^0$ . Next, after finding the optimal value for  $x_2 = x_2^1$ , the searching is continued along  $x_1$  for the fixed  $x_2 = x_2^1$  and so on. A more accurate solution can be found by reducing a mesh density of net.

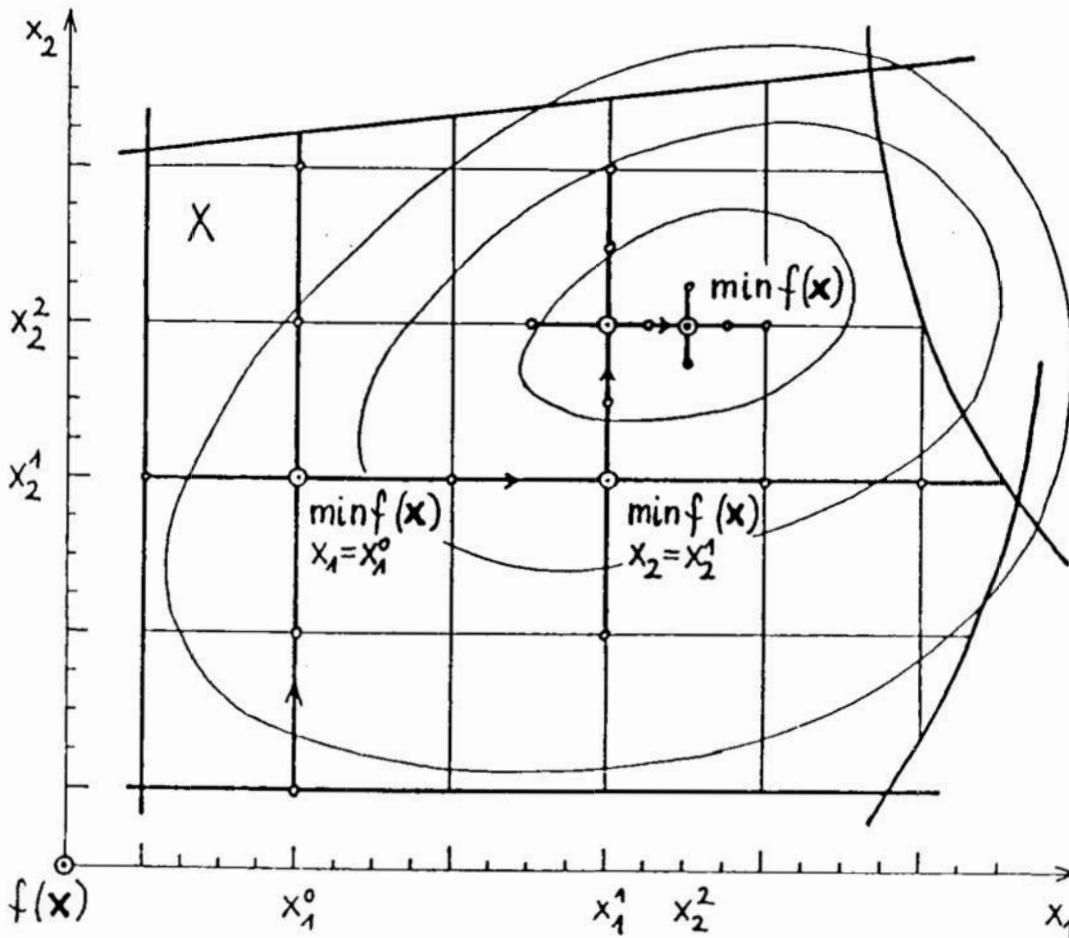


Fig. 7. The performance of the controlled enumeration method  
Rys. 7. Schemat działania metody sterowanego przeglądu

The preferable truss is build from the catalogue of cross-sectional areas of truss bars  $T=8$  with a number of elements  $t=3$  (see Figures 6, 8 and Table 2). The mass of preferable truss is  $f_1(x)=36.64 \text{ kg/m}^2$  and the displacement of central truss node  $\Delta_1=17.02 \text{ cm}$ . The displacement of central node is 0.3% larger than the allowable one but it is still less than the permissible violation which is equal 2 %.

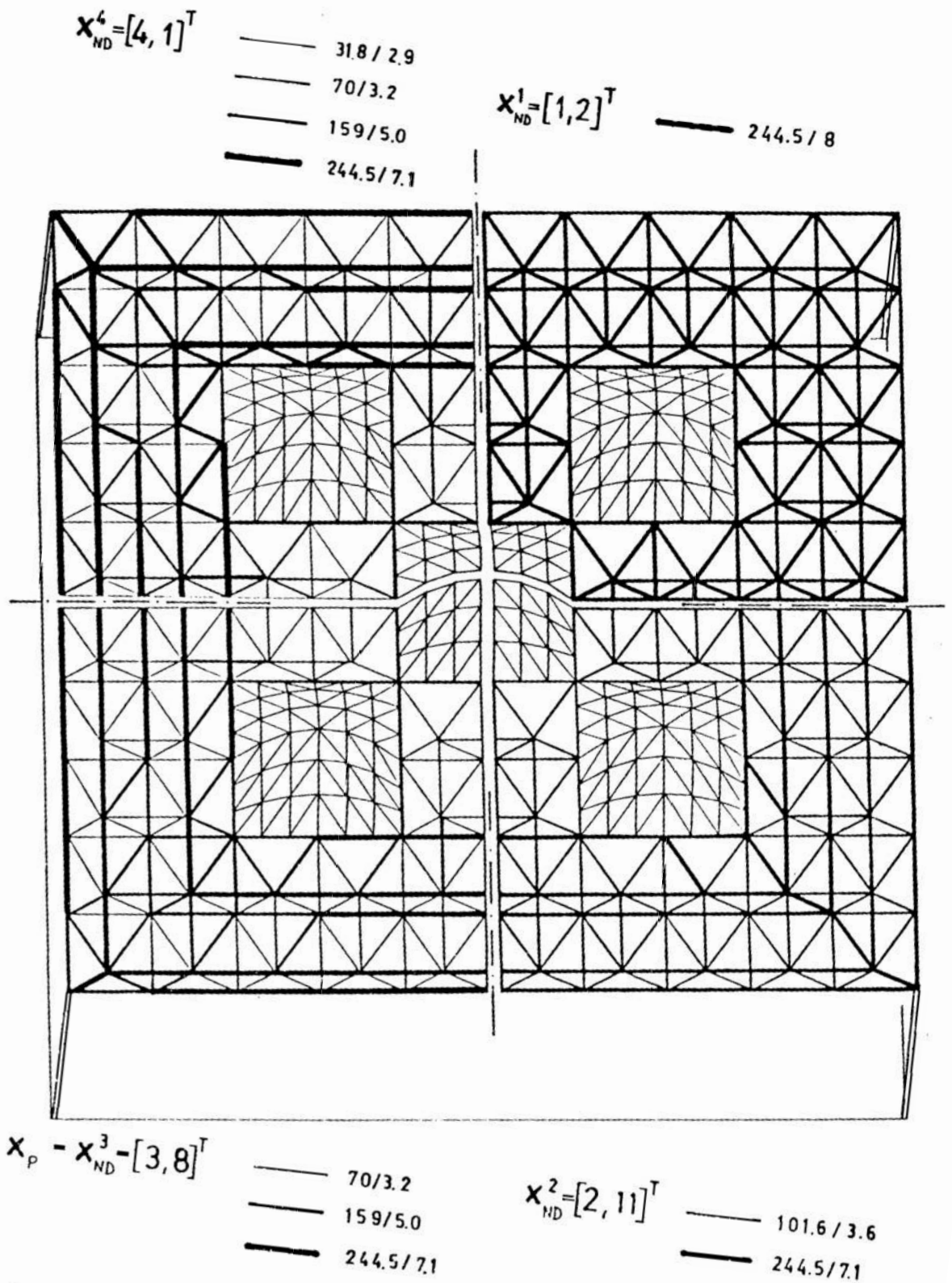


Fig. 8. The layout of space truss for Pareto optimal (compromise) and preferable solutions.

Rys. 8. Kształty kratownic przestrzennych odpowiadające rozwiązaniom Pareto optymalnym (kompromisowym) oraz rozwiązaniu preferowanemu

The Pareto optimal and preferable solutions are shown in Fig. 8. The structure is shown as four independent quarters corresponding with the different non-dominated (compromise) solutions. One of them minimizes the utility function (8) and it is chosen as the preferable solution. The different thickness of lines corresponds with different cross-sectional areas of truss bars.

Table 2. The sets of Pareto optimal and preferable solutions  
 Tablica 2. Zbiory rozwiązań Pareto optymalnych i preferowanych

$\mathbf{x}=[t,T]^T$		No.A	A	D	g	M <sub>i</sub>	Δ <sub>i</sub>	f <sub>1</sub> (x)	f <sub>2</sub> (x)	U(x)
t	T		cm <sup>2</sup>	mm	mm	kg/m <sup>2</sup>	cm			
1	2	33	59.4	244.5	8.0	106	14.03	0.9357	<b>0.3446</b>	1.0
2	11	17	11.1	101.6	3.6	41.66	16.30	0.4642	0.5945	0.4386
		32	53.0	244.5	7.1					
3	8	<b>13</b>	6.72	<b>70.0</b>	<b>3.2</b>					
		<b>25</b>	24.2	<b>159.0</b>	<b>5.0</b>	<b>36.64</b>	<b>17.02</b>	0.4341	0.8146	<b>0.4140</b>
		<b>32</b>	53.0	<b>244.5</b>	<b>7.1</b>					
4	1	1	2.63	31.8	2.9					
		13	6.72	70.0	3.2	35.36	16.92	<b>0.4313</b>	1.0	0.4187
		25	24.2	159.0	5.0					
		32	53.0	244.5	7.1					

### 3. Conclusions

Rounding the continuous solution to the nearest discrete solution can lead to the solution which is far from optimal discrete solution. In such cases which often occur in space truss optimization discrete approach is recommended.

The domain of feasible solutions should be determined not only by stress constraints but also by displacement (serviceability) constraints. Optimum design of truss structure with respect to serviceability constraints requires the another algorithm than one concerns with stress constraints only. The displacement constraints can be satisfied by increasing the stiffness of the structure. Optimum design of trusses with respect to serviceability constraints leads to increasing of truss mass but decreasing of labor cost and exploitation cost of object.

The sets of non-dominated (efficient) solutions and compromise (Pareto optimal) solutions are found by solving multicriterion optimization problem, i.e.,  $\min[f_1, f_2]$  subject to the imposed constraints (see Table 2 and Figures 4 and 5).

One can choose the preferable solution from the set of non-dominated (efficient) solutions using e.g. metric function method or utility function methods. In this paper the latter method is chosen to find the preferable solution, i.e.,  $\min U$  subject to the imposed constraints. The utility function takes also into account the labor cost.

### References

1. Eschenauer, H., Koski, J. and Osyczka, A. (Eds.), *Multicriteria Design Optimization: Procedures and Applications*, SpringerVerlag, Berlin, Heidelberg, 1990.



2. Jendo, S., Multiobjective optimization, in: *Structural Optimization, Vol.2: Mathematical Programming, Save, M. and Prager, W. (Eds)*, Plenum Press, New York 1990, pp. 311-342.
3. Jendo, S. and Paczkowski, W.M., *Multicriteria Discrete Optimization of Large Scale Truss Systems*, *Structural Optimization*, Vol.6, 238-249, 1993.
4. Koski, J., *Bicriterion optimum design method for elastic trusses*, *Acta Polytechnica Scandinavica, Mech. Engng. Series*, 86, Helsinki 1984.
5. Koski, J., *Multicriteria Truss Optimization*, in: *Multicriteria Optimization in Engineering and in the Sciences*, (ed. by Stadler, W.), Plenum Press, New York, 1988.
6. Mengerlinghausen, M., *Raumfachwerke aus Staben und Knoten*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1975.
7. Paczkowski, W.M., *The bars type range discrete polioptimization of space trusses* (in Polish) *Annales Scientiarum Stetinenses*, Vol.6, 1, No.2, Ossolineum 1991, pp. 83-105.
8. PN-90/B-03200 *Polish Code for Steel Structures, Design and Rules* (in Polish), Code Publishers, ALFA, 1990.

### Summary

The paper deals with discussion of discrete optimization problem in structural space truss design. The optimal structure should satisfy the limit state capacity and serviceability conditions. If the serviceability conditions are violated the structure is not eliminated from considerations, but it is modified by increasing of structural stiffness. The cross-sectional areas of truss bars  $A_k$  picked from a catalogue of circular hollow sections (T) and a number of elements in catalogue (integer  $t$ ) are taken as discrete design variables. The stress, local stability and displacement (design) constraints as well as technological and computational constraints are taken into account. The mass of truss bars including mass of joints is chosen as optimization criterion. A labor consumption corresponding with a number of elements in the catalogue (integer  $t$ ) is minimized, i. e., it is also taken as criterion of optimization. The sets of non-dominated (efficient) and compromise (Pareto optimal) solutions and the preferable solution for space truss are found. The results are presented in the form of diagrams and table.

### OPTIMALIZACJA WIELOKRYTERIALNA KRATOWNIC PRZESTRZENNYH ZA POMOCĄ KATALOGU

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono zagadnienie optymalizacji dyskretnej kratownic przestrzennych za pomocą dobierania przekrojów poprzecznych prętów z katalogu elementów stalowych rurowych. Konstrukcja spełnia nie tylko warunki wytrzymałościowe, statecznościowe ale także warunki przemieszczeniowe (funkcjonalności). Uwzględniono również ograniczenia technologiczne i obliczeniowe. Kryteriami optymalizacji są zarówno koszty materiałów prętów i węzłów kratownicy jak i koszty robocizny włączając pracochłonność związaną z liczbą prętów o różnych przekrojach. Wynikami optymalizacji są zbiory rozwiązań kompromisowych i preferowanych przedstawione w postaci tabel i wykresów.

## **OPTIMALIZACJA CECH KONSTRUKCYJNYCH ROWEROWYCH ŁOŻYSK TOCZNYCH**

### **1. Wprowadzenie**

Dobór właściwych cech konstrukcyjnych elementów maszyn jest zasadniczym elementem procesu konstruowania i ma bardzo istotne znaczenie dla przebiegu kolejnych etapów procesu zaspokajania potrzeb czyli wytwarzania i eksploatacji [2].

Jak zwykle gdy istnieje konieczność wyboru możliwe jest postępowanie w trojaki sposób:

- wybór losowy - w przypadku stanu zupełnej niewiedzy,
- wybór decyzyjny - gdy dysponuje się niepełnym układem kryteriów,
- wybór kryterialny.

Podstawą tego ostatniego rodzaju wyboru, do którego zawsze należy dążyć, jest dedukcja, której przesłankami są:

- elementy zbioru danych informacyjnych, z którego można wybrać operacyjny element zbioru oraz
- zupełny układ kryteriów.

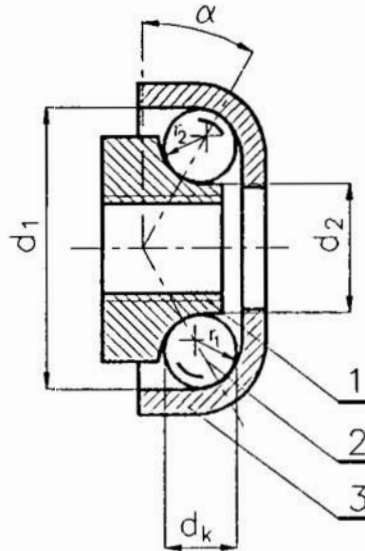
Ten trzeci sposób jest oczywiście najwłaściwszy i o ile jest taka możliwość powinien być zawsze stosowany nie tylko na etapie konstruowania lecz na wszystkich etapach procesu zaspokajania potrzeb.

Dla prawidłowego przeprowadzenia optymalizacji niezbędne jest przyjęcie jednego lub kilku kryteriów spełniających rolę funkcji celu i przy ich pomocy wybór jednego z rozwiązań spośród zbioru stanowiącego utworzone wcześniej pole możliwych rozwiązań.

### **2. Optymalizowany obiekt**

Obiektem poddanym w niniejszej pracy próbie optymalizacji są łożyska stosowane w popularnych pojazdach jednośladowych. Stosowane tworzywa oraz wymagania jakie im stawia się powodują, że należy je uznać za łożyska specjalne [5].

Nieco uproszczony, lecz oddający w pełni najistotniejsze cechy, obraz takiego łożyska przedstawiono na rys.1. We wszystkich węzłach łożyskowych roweru stosowane są łożyska tego samego typu, różniące się jedynie wartością geometrycznych cech konstrukcyjnych poszczególnych ich elementów - tablica 1. Są to kulkowe skośne łożyska toczne wymagające, dla prawidłowego ich działania, wprowadzenia w montażu napięcia wstępnego.



Rys.1. Postać konstrukcyjna łożyska rowerowego: 1 - bieżnia wewnętrzna (stożek), 2 - koszyk z kulkami, 3 - bieżnia zewnętrzna (mieciska)  
 Fig.1. Constructional shape of bicycle's bearing: 1 - inner raceway, 2 - cage with balls, 3 - outer raceway

Porównując ze sobą cechy konstrukcyjne elementów łożysk z różnych węzłów łożyskowych roweru - tablica 1, można zauważyć duże ich zróżnicowanie chociaż trudno znaleźć uzasadnienie takiego stanu. Również porównanie z odpowiadającymi cechami konstrukcyjnymi typowych łożysk tocznych wykazuje znaczące różnice. Te dwa spostrzeżenia pozwalają przypuszczać, że przeprowadzona optymalizacja w znaczący sposób przyczyni się do poprawy jakości badanych łożysk a więc pośrednio - całego pojazdu.

### 3. Warunki procesu optymalizacji

Prawidłowy dobór cech konstrukcyjnych łożysk rowerowych ma szczególnie istotne znaczenie gdyż energia służąca do poruszania tego pojazdu pochodzi z organizmu ludzkiego a więc ze źródła co prawda odnawialnego lecz o ograniczonej możliwości magazynowania. Fakt ten narzuca pierwsze kryterium - wartość oporów ruchu ( $M_f$ ). Drugim bardzo istotnym kryterium, i to w odniesieniu nie tylko do rozpatrywanych łożysk, jest trwałość ( $L_f$ ), która ma istotny wpływ na koszty eksploatacji.

Tablica 1. Nominalne wartości geometrycznych cech konstrukcyjnych ułożyskowań roweru WIGRY

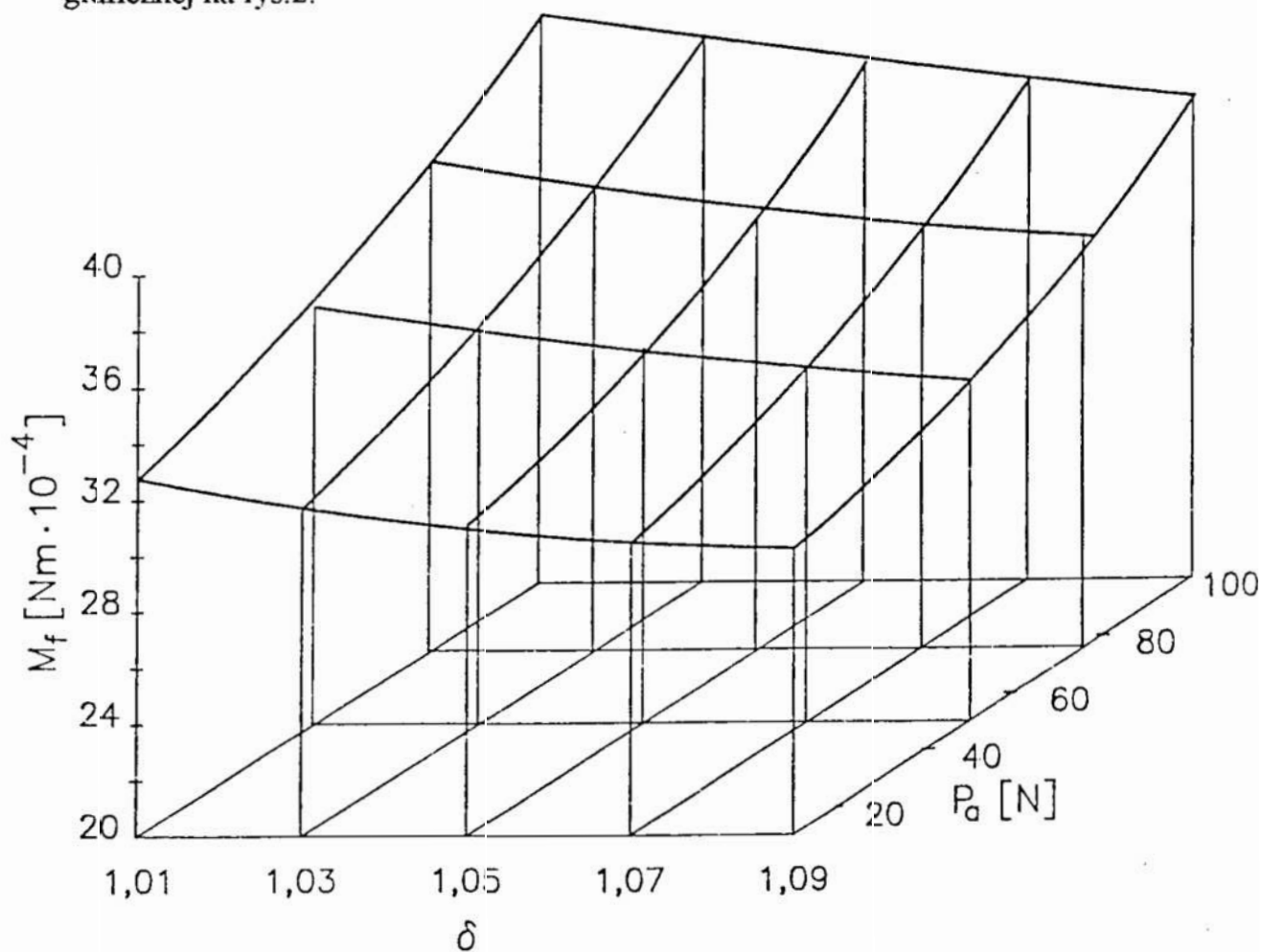
L.p.	Nazwa pary kinematycznej	Wielkość	d <sub>1</sub> mm	d <sub>2</sub> mm	d <sub>k</sub> mm	r <sub>1</sub> mm	r <sub>2</sub> mm	α	$\delta_1 = \frac{2r_1}{d_k}$	$\delta_2 = \frac{2r_2}{d_k}$
1	Piasta pedału	łoż. 1 łoż. 2	19,0 19,3	10,4 8,5	3,969 3,969	3,0 3,0	6,0 6,0	20°54' 44°19'	1,512 1,512	3,024 3,024
2	Mechan. korbowy	łoż. 1 i 2	36,5	22,4	6,350	4,0	11,0	23°13'	1,260	3,464
3	Piasta tylna	łoż. 1,3 łoż. 2	40,9 27,3	27,9 14,4	6,350 6,350	4,0 3,5	4,0 4,0	24°37' 24°04'	1,260 1,102	1,260 1,260
4	Piasta przednia	łoż. 1 i 2	22,0	10,4	4,763	3,5	8,0	32°13'	1,470	3,360
5	Układ kierowniczy	łoż. 1 łoż. 2	38,1 38,1	28,4 28,35	3,969 3,969	3,5 3,5	4,0 3,5	41°22' 45°33'	1,764 1,764	2,016 1,764

Jako zmienne decyzyjne w przeprowadzonym procesie optymalizacji przyjęto geometryczne i dynamiczne cechy konstrukcyjne elementów łożysk.

Granice wartości tych cech przyjęto podobne do stosowanych w typowych łożyskach tocznych:  $P_a \in \langle 10; 100 \rangle$  oraz  $\delta \in \langle 1,01; 1,09 \rangle$ . Ponieważ o trwałości łożyska decyduje trwałość bieżni wewnętrznej [1, 6], jako zmienną niezależną przyjęto promień krzywizny tej bieżni a ściślej stosunek tego promienia do promienia kulki ( $\delta$ ).

#### 4. Działania optymalizacyjne i wybrane ich wyniki

Aby móc opisać modelem matematycznym zmiany wartości oporów ruchu będące skutkiem zmian cech konstrukcyjnych: dynamicznych (D), geometrycznych (G) i tworzywowych (T) przeprowadzono serię badań. Warunki oraz wyniki tych badań opisano szerzej w innych pracach np.[3, 4]. Jako miarę oporów ruchu przyjęto wartość umownego momentu tarcia  $M_f$  będącego sumą wszystkich czynników przeciwdziałających ruchowi. Przykładowe wyniki badań przedstawiono w postaci graficznej na rys.2.



Rys. 2. Zależność momentu tarcia  $M_f$  od współczynnika  $\delta$  i napięcia wstępnego  $P_a$  dla próbek z węgloazotowanej stali A11

Fig. 2. Relation between friction moment  $M_f$  and coefficient  $\delta$  and preload  $P_a$  for samples made of steel A11

Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie zależności oporów ruchu łożysk od ich cech konstrukcyjnych. Dla próbek ze stali A11 ma ona postać:

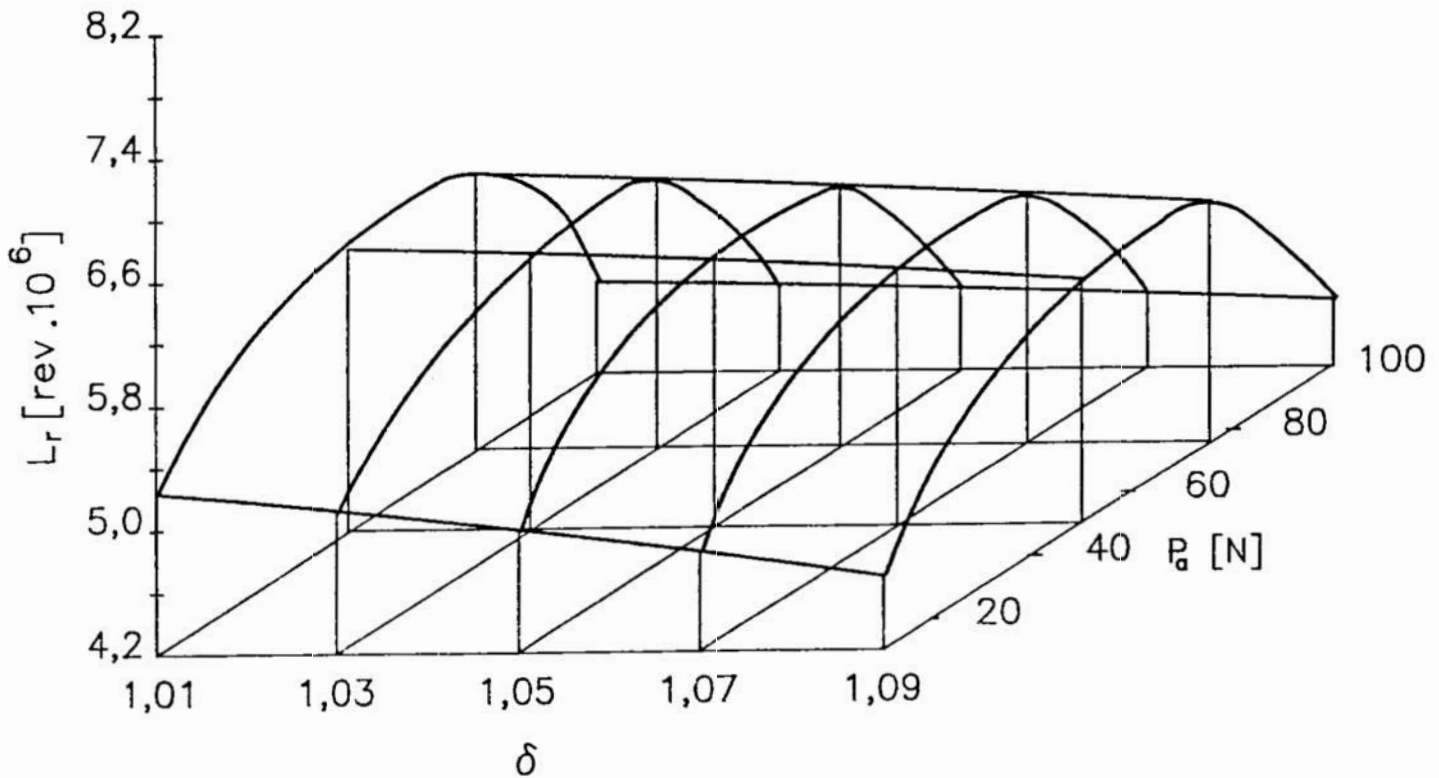
$$M_f = (157,075 P_a^2 + 0,40 P_a \delta + 166,19 \delta^2 - 0,058 P_a \delta + 0,0013 \delta + 239,40) \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

Dla pozostałych cech tworzywowych znaleziono również równania regresji umownego momentu tarcia  $M_f$  od cech dynamicznych i geometrycznych. Równania te opisują badane zależności z bardzo wysokimi współczynnikami korelacji wielorakiej, przekraczającymi we wszystkich przypadkach wartość 0,99.

Jak już wcześniej wspomniano należy dążyć do tego aby wartość oporów ruchu była możliwie mała. Można więc napisać:

$$M_f = f(D, G, T) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Podobny cykl badań przeprowadzono dla opisu wpływu cech konstrukcyjnych na trwałość ( $L_r$ ) łożysk rowerowych. Na rys. 3 przedstawiono w postaci graficznej przykładowe wyniki badań.



Rys. 3. Zależność trwałości  $L_r$  od współczynnika  $\delta$  i napięcia wstępnego  $P_a$  dla próbek z węgloazotowanej stali A11

Fig. 3. Relation between fatigue life  $L_r$  and coefficient  $\delta$  and preload  $P_a$  for samples made of steel A11



Szukana zależność dla próbek ze stali A11 ma postać:

$$L_r = (-57,968 \delta + 0,093 P_a + 26,05 \delta^2 - 0,04 P_a \delta - 0,00045 P_a + 36,252) \cdot 10^6 \quad (3)$$

Dla trwałości  $L_r$  przeprowadzono analogiczny cykl obliczeń, w rezultacie których otrzymano równania regresji wieloczynnikowej w zależności od tych samych cech. Współczynniki korelacji wielorakiej w tym przypadku są nie mniejsze niż 0,85. Analiza równań regresji wskazuje na wysoką istotność tych równań.

Jest rzeczą oczywistą, że naturalną tendencją jest aby trwałość łożysk była możliwie duża, można więc napisać:

$$L_r = f(D, G, T) \rightarrow \max. \quad (4)$$

W rezultacie przeszukiwania zbioru wyników stwierdzono, że poszukiwane ekstrema w obu przypadkach znajdują się na brzegach obszarów. Stwierdzono również, że przyjęte kryteria są rozbieżne, to znaczy, że wokół ekstremów nie ma obszarów wspólnych, spełniających jednocześnie oba kryteria. Aby jednak optymalizację doprowadzić do takiego etapu żeby możliwe było praktyczne wykorzystanie jej wyników, przyjęto kryterium kompromisu w postaci ilorazu funkcji (1) i (3). Po podzieleniu (2) i (4) uzyskuje się zapis:

$$M_f / L_r \rightarrow \min \quad (5)$$

lub

$$L_r / M_r' \rightarrow \max \quad (6)$$

Do dalszej optymalizacji przyjęto zapis (6). Analiza funkcji celu w postaci  $L_r / M_f$  wykazuje, że poszukiwana wartość, dla wszystkich rozpatrywanych cech tworzywowych, leży wewnątrz obszaru a nie na jego granicach.

## 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono przykład postępowania w przypadku gdy przyjęte w optymalizacji kryteria są rozbieżne. Zastosowana procedura pozwoliła na określenie wartości, które mogą być wykorzystane praktycznie w procesie projektowania łożysk rowerowych.

Celem niniejszej pracy było opracowanie algorytmu umożliwiającego dobór geometrycznych i dynamicznych cech konstrukcyjnych łożyskowań pozwalającego również na ujednoczenie cech konstrukcyjnych (oczywiście w miarę możliwości). Ten drugi cel jest szczególnie istotny w produkcji masowej a z taką mamy do czynienia w przypadku łożysk rowerowych. Zdaniem autorów oba założone cele za pomocą zaprezentowanych w artykule działań mogą zostać osiągnięte.

## Literatura

1. Budzyński A.F., Styp-Rekowski M.: Wewnętrzne opory ruchu oraz trwałość specjalnych łożysk tocznych. Trybologia nr 4-5/86.
2. Dietrych J.: System i konstrukcja. WNT Warszawa 1985.
3. Styp-Rekowski M.: Geometrical constructional features of special rolling bearings against their exploaitational properties Proceedings of IVth Symposium INTERTRIBO'90. Strbske Pleso 1990.
4. Styp-Rekowski M.: Tribological aspects of material choice for elements of special rolling bearings. Proceedings of Vth International Congress on Tribology EUROTRIB'89. Helsinki 1989.
5. Styp-Rekowski M.: Wybrane zagadnienia łożyskowania pojazdów jednośladowych. Materiały II Konferencji N-T "Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych". Łódź 1995.
6. Szala J., Zawisłak K.: Wpływ konstrukcyjnych cech materiałowych na trwałość łożysk specjalnych stosowanych w pojazdach jednośladowych. Materiały sympozjum "Naukowe problemy konstrukcji, technologii i eksploatacji maszyn". ATR Bydgoszcz 1977.

## Streszczenie

W pracy przedstawiono przykład optymalizacji cech konstrukcyjnych łożysk stosowanych w pojazdach jednośladowych. Jako kryteria optymalizacji przyjęto opory ruchu w łożyskach oraz ich trwałość. Zastosowana procedura pozwala na wyszukiwanie wartości geometrycznych cech konstrukcyjnych spełniających jednocześnie oba kryteria co umożliwia praktyczne wykorzystanie wyników przeprowadzonych badań.

# **OPTIMIZATION OF BICYCLE'S ROLLING BEARINGS CONSTRUCTIONAL FEATURES**

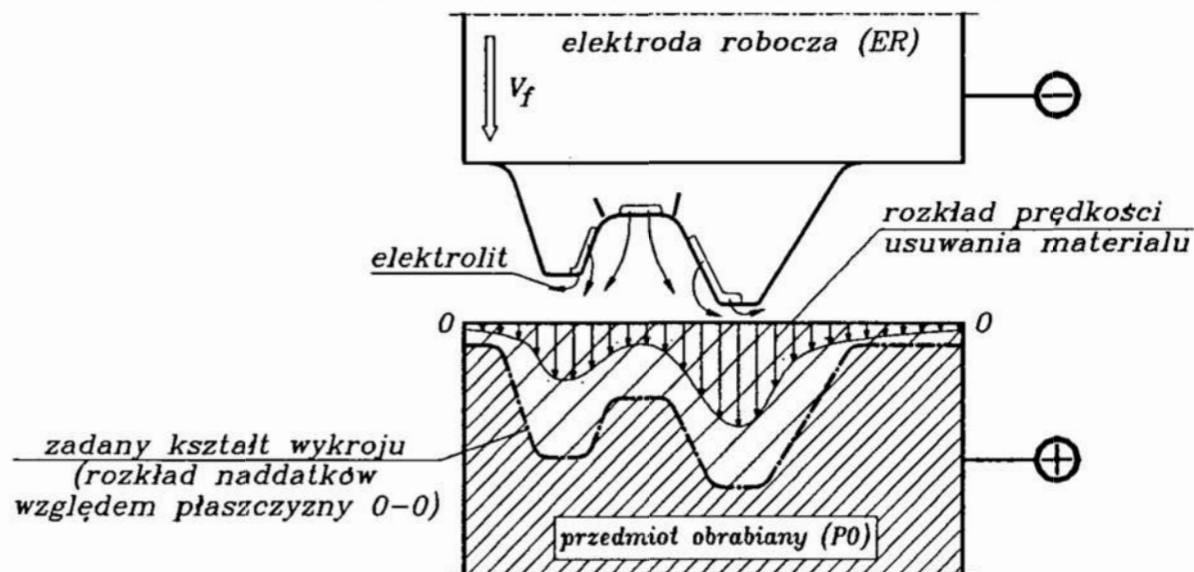
## **Summary**

In this paper optimization of some geometrical constructional features of bicycle's rolling bearings is presented. Resistance to motion and fatigue life of these bearings are taken as the criterion of optimization. Applied additional procedure made possible to search values of the geometrical features which simultaneously satisfy both criterion. It is important in a practical application of results of realized investigations.

## Zagadnienie optymalizacji obróbki elektrochemicznej (ECM)

### 1. Charakterystyka procesu obróbki elektrochemicznej jako obiektu optymalizacji

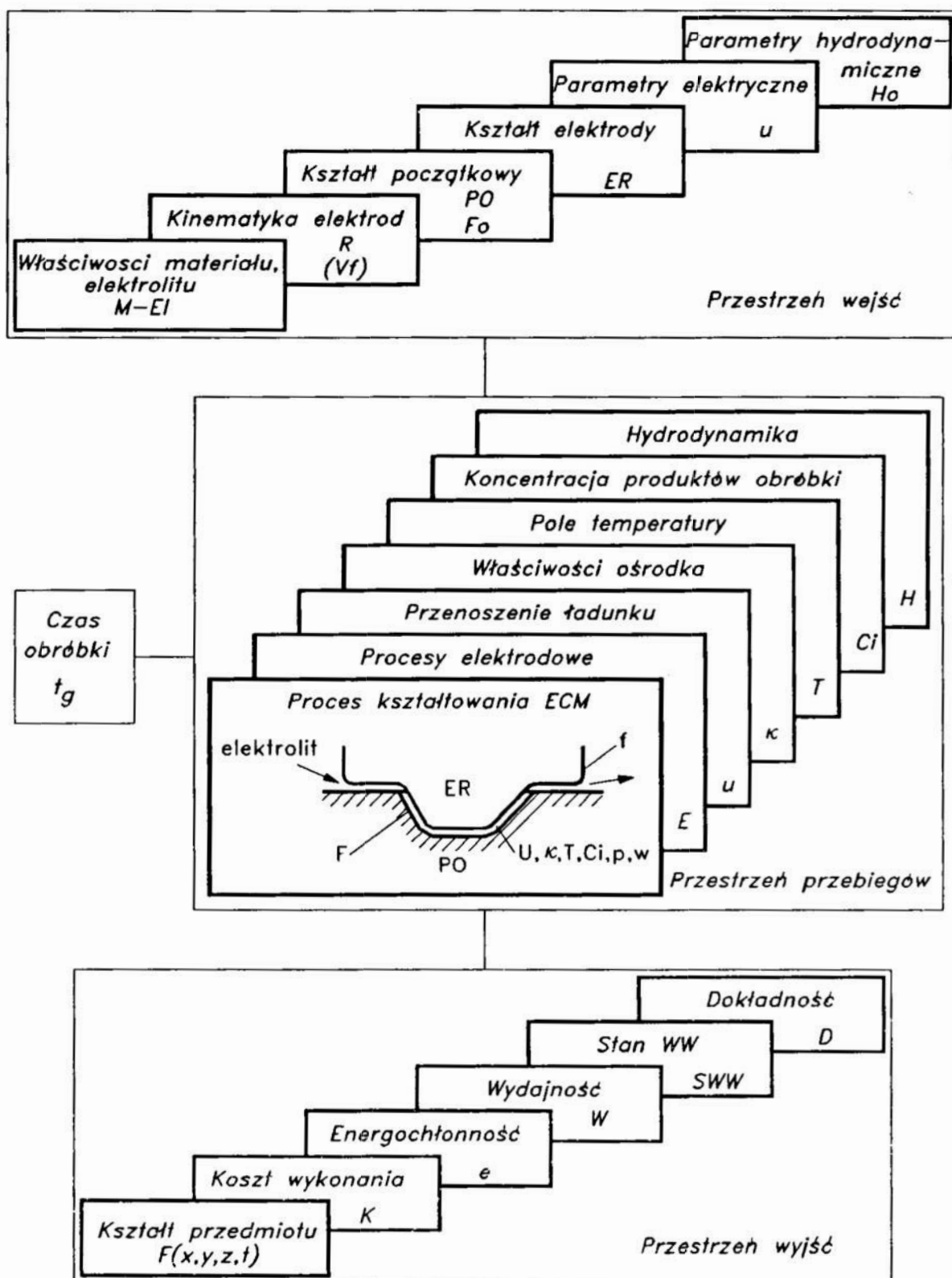
W obróbce elektrochemicznej (ECM) zmiana kształtu przedmiotu obrabianego (PO) następuje przez aktywne, sterowane oddziaływanie elektrochemiczne, w wyniku, którego następuje roztwarzanie anodowe nadmiaru. W tym celu PO podłączony jest do dodatniego bieguna źródła prądu stałego, natomiast narzędzie - elektroda robocza (ER) do ujemnego, a do szczeliny między nimi doprowadzany jest elektrolit (rys. 1).



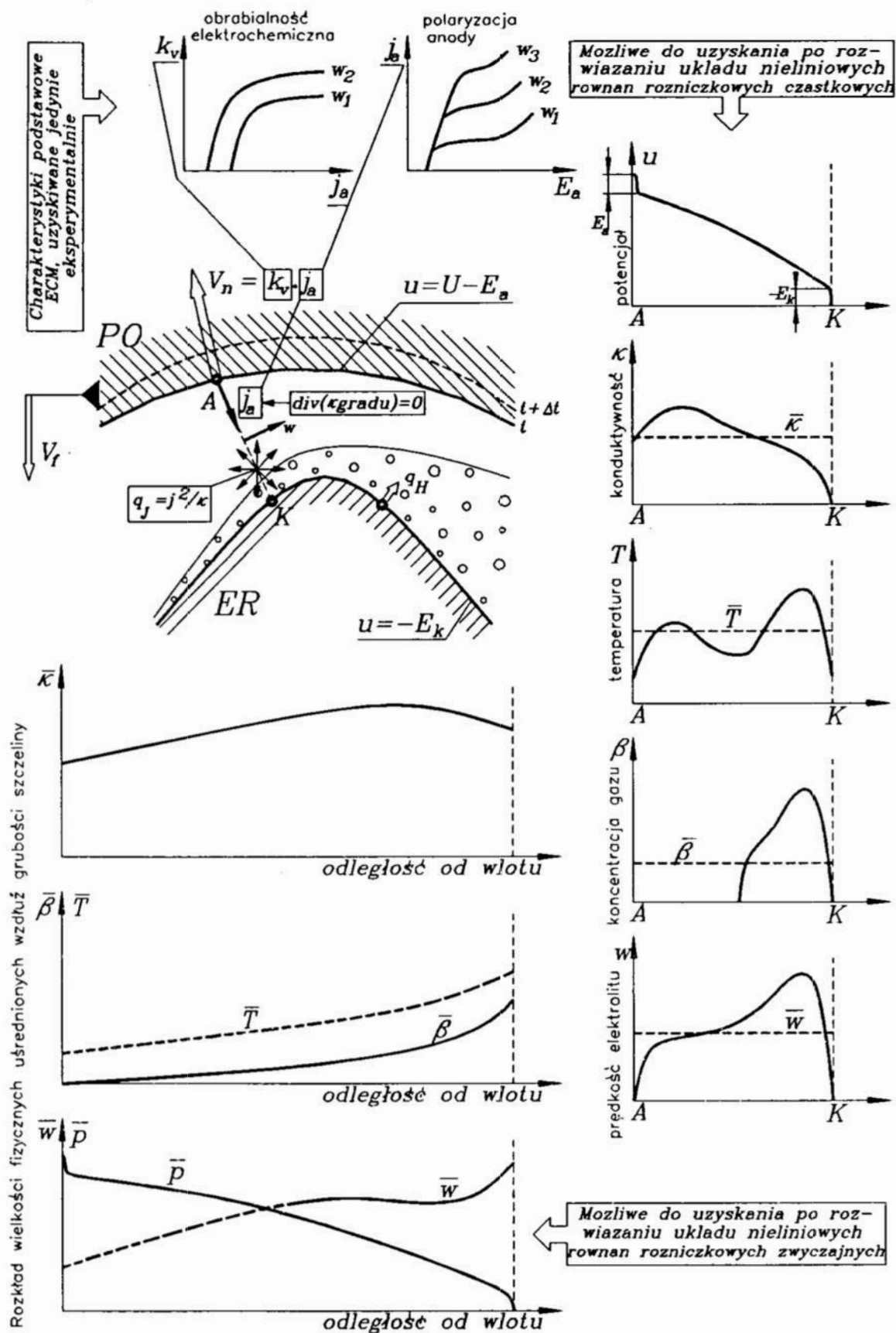
Rys.1. Schemat obróbki elektrochemicznej (ECM), drążenie wykoju matrycy  
Fig. 1. Schematic diagram of electrochemical machining (ECM)

Obróbka prowadzona jest przy dużych gęstościach prądu - rzędu  $10 \div 100 \text{ A/cm}^2$ , co pozwala na uzyskiwanie prędkości drążenia (roztwarzania) rzędu  $0.1 \div 10 \text{ mm/min}$ . Stosowane napięcia wynoszą od  $5 \div 30 \text{ V}$ , a więc dla wymienionych gęstości prądu i elektrolitach (zwykle roztworach wodnych  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{K}_2\text{NO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) powoduje, że grubości szczelin międzyelektrodowych są rzędu dziesiątych części mm. Prowadzenie w takich warunkach stabilnego procesu elektrochemicznego możliwe jest po eliminacji ograniczeń polaryzacyjnych, procesów pasywacji anody i przy intensywnym usuwaniu z obszaru obróbki produktów obróbki (gaz, zawiesiny produktów roztwarzania) i wydzielającego się ciepła. Przykładowo: -przy gęstości prądu  $j = 100 \text{ A/cm}^2$  w 10% roztworze  $\text{NaCl}$ , intensywność wewnętrznych źródeł ciepła (Joule'a) wynosi ok.  $84 \text{ kW/cm}^3$ , a natężenie strumienia wydzielającego się na ER - katodzie wodoru, równy jest  $12.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$  dla  $T = 291 \text{ K}$  i ciśnienia statycznego  $p = 10^5 \text{ N/m}^2$ . W przypadku ECM prądem ciągłym konieczne jest zastosowanie intensywnego przepływu elektrolitu z prędkościami powyżej  $10 \text{ m/s}$ .

<sup>1</sup> Instytut Technologii Mechanicznej PW, E-Mail: ld@meil.pw.edu.pl



Rys. 2. Schemat powiązania głównych elementów procesu ECM  
 Fig. 2. Diagram of relation between the main factors in electrochemical machining



Rys. 3. Schemat rozkładów pól fizycznych w szczelinie międzyelektrodowej  
 Fig. 3. Schematic diagram of distribution of physical fields



Ponieważ między ER i PO nie ma bezpośredniego styku, stąd o kształcie obrabianym decyduje zarówno kształt narzędzia, jak i również rozkład grubości szczelin międzyelektrodowych. Ten ostatni uwarunkowany jest własnościami materiału obrabianego i elektrolitu oraz parametrami elektrycznymi, hydrodynamicznymi i kinematycznymi obróbki. Schemat powiązań głównych elementów procesu ECM przedstawiony jest na rys. 2.

Cechy fizykochemiczne procesów i zjawisk zachodzących w czasie ECM sprawiają, że proces obróbki należy do układów sterowania o parametrach rozłożonych.

W ECM występują bowiem sprzężone pola wielkości tensorowych w ośrodku wielofazowym ze zmiennymi w czasie i przestrzeni własnościami, ograniczonymi zmiennymi w czasie brzegami. W modelu matematycznym proces kształtowania opisany jest układem nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych II rzędu, z nieliniowymi warunkami brzegowymi trójwymiarowego obszaru, przy czym zmiana geometrii brzegów w czasie opisana jest warunkami typu Stefana [1, 2]. Typowe rozkłady pól fizycznych w obszarze obróbki pokazane są na rys. 3.

Z tych względów opracowanie procesu technologicznego ECM należy do bardzo trudnych, co w początkowym oraz w dalszych etapach rozwoju powodowało konieczność stosowania metody prób i korekcji (z zastosowaniem eksperymentu). Natomiast uzyskiwane wyniki dotyczyły doraźnie rozwiązane zadania technologicznego. Każda przy tym zmiana warunków realizacji procesu związana była z powtórzeniem cyklu prób i korekcji. Stan powyższy nie tylko wywołuje wzrost kosztów przygotowania produkcji z zastosowaniem technologii elektrochemicznej, ale również ogranicza zastosowanie ECM, głównie do przypadków niewątpliwie konieczności jej wprowadzania (np. przy wykonywaniu łopatek turbin gazowych oraz innych elementów z materiałów trudno skrawalnych).

Dla dalszego rozwoju ECM i zastosowania tej efektywnej ekonomicznie technologii stało się niezbędne doskonalenie metod projektowania oraz zwiększenie jej dokładności, a w szczególności wyeliminowania, w poważniejszym stopniu, prac związanych z korekcją elektrody roboczej po próbnej obróbce ECM. To z kolei wiąże się z koniecznością szerokiego zastosowania wspomaganie komputerowego, a więc stworzenia SYSTEMU oprogramowania komputerowego do projektowania technologii ECM, opartego na znacznie dokładniejszych od dotychczas stosowanych modelach matematycznych procesu.

Stosowane modele matematyczne przy budowie systemu podane zostały m.in. w pracach [2, 3, 4, 5]. Opracowany pakiet oprogramowania komputerowego PPTECM (Projektowanie procesu Technologicznego ECM) opisany został w pracach [5, 6].

Poniżej przedstawione są zagadnienia doboru warunków obróbki ECM z uwzględnieniem optymalizacji procesu w oparciu o symulację komputerową zawartą w oprogramowaniu PPTECM.

## **2. Dobór warunków procesu ECM**

Jak zaznaczono we wprowadzeniu, w ECM występują powiązania zarówno geometrii PO i ER jak i warunków panujących między elektrodami (anodą - PO i katodą - ER). Stąd projektowanie ER i dobór warunków obróbki powinno być traktowane łącznie jako jedno zadanie, które można ująć określeniem: Projektowanie Procesu Technologicznego ECM. To główne zadanie zawiera elementy składowe, w postaci

subzadań, które powinny być rozwiązywane w określonej kolejności. Na przykład trudno sobie wyobrazić projektowanie ER, omówione m.in. w pracach [5, 6, 7], bez uprzedniego, wstępnego doboru podstawowych warunków obróbki.

Punktem wyjścia są warunki techniczne wyrobu:

- materiał oraz rodzaj półwyrobu: jego kształt, tj. wymiary warunkujące rozkład naddatków. Jeżeli kształt nie jest z góry znany, można zaprojektować optymalny rozkład naddatków ze względu na późniejszą ECM, oparty na zasadzie stałego naddatku mierzzonego w kierunku  $V_f$ ,
- wymagania dotyczące dokładności (D - na rys. 2),
- wymagania dotyczące jakości warstwy wierzchniej (ogólnie, a chropowatości w szczególności, S<sub>WW</sub> - na rys. 2),
- wymagania techniczno-ekonomiczne (pracochłonność, koszt, energochłonność, W, K, e - na rys. 2).

Jednocześnie niezbędne są dane techniczne obrabiarki (obrabiarek - jeżeli zakład ma różne typy obrabiarek ECM):

- rodzaj (drażarka DC, drażarka impulsowa, ECM-NC (nieprofilową elektrodą)),
- zakres regulacji napięcia -U i prądu roboczego -I,
- zakres regulacji ciśnienia na wlocie i wylocie z obszaru obróbki -  $p_{in}$ ,  $p_{out}$ ,
- zakres regulacji wydatku elektrolitu -  $Q_v$ ,
- zakres regulacji posuwu roboczego -  $V_f$ ,
- wymiary gabarytowe stołu, komory roboczej,
- rodzaj sterowania (sekwencyjne nastawianie  $V_f$ ,  $I = const$ ,  $S = const$ ,  $j = const$ , i inne),
- regulacja temperatury  $T_o \pm \Delta T$ ,
- określenie, w ilu etapach będzie realizowany proces,
- sztywność obrabiarki,
- inne dane dotyczące obrabiarki.

Dobór warunków ECM obejmuje:

- a) wybór elektrolitu,
- b) wybór obrabiarki (jeżeli wybór jest możliwy),
- c) dobór parametrów obróbki:  $V_f$ , U,  $p_{in}$ ,  $p_{out}$  (lub  $Q_v$ , jeżeli jest możliwy do regulacji), amplitudy i częstotliwości drgań ER (w obrabiarkach z możliwością drgań), prędkości obrotowej (w obrabiarkach ECM-RE lub ECM-NC z wirującą elektrodą).

Jeżeli w obrabiarce można zaprogramować parametry, to należy dokonać ich wyboru w ciągu całej drogi narzędzia. W zależności od układów sterowania i regulacji dysponowanej obrabiarki zmiana ich może być ciągła (liniowa) lub dyskretna (sekwencyjna).

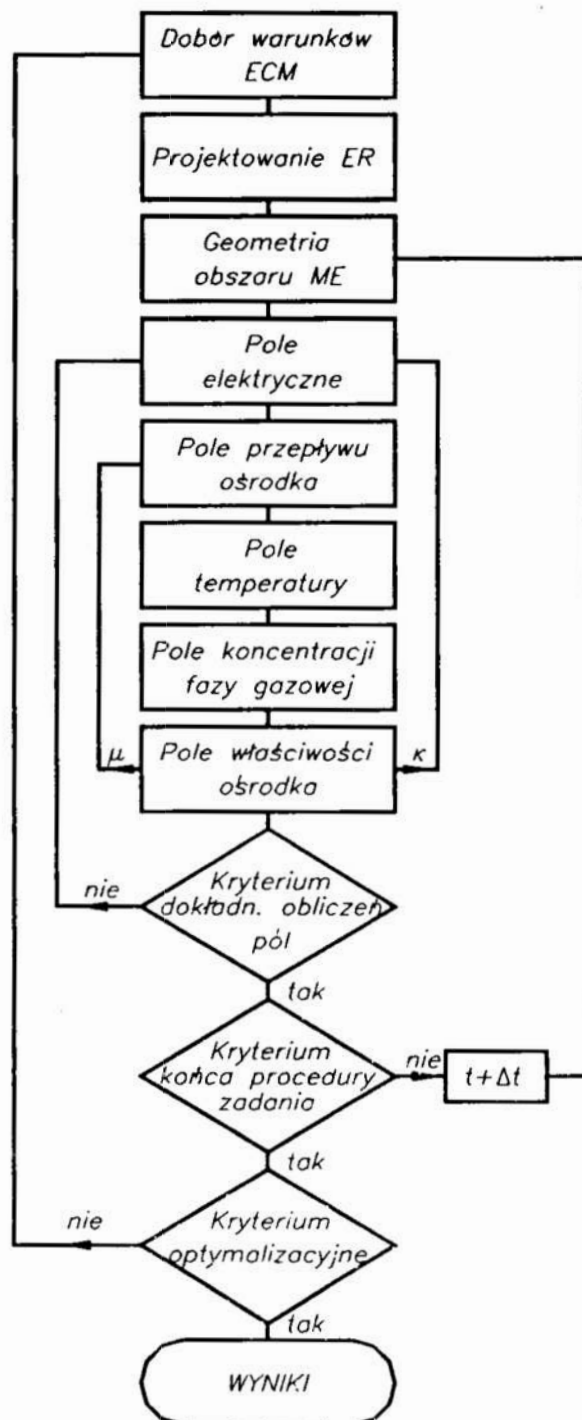
Przy wstępnym doborze warunków obróbki prowadzi się symulację komputerową procesu ECM, przy założeniu, że profil jest linią równoodległą (ekwidystantą) od żądanego zarysu PO o grubość szczeliny charakterystycznej:

$$S_f = \kappa k_v \frac{U - \Delta U}{V_f} \quad (1)$$

gdzie:  $\kappa$  - uśredniona konduktywność elektrolitu,  
 $k_v$  - obrabialność elektrochemiczna, równa objętości materiału roztworzonego przy przepływie jednostkowego ładunku elektrycznego,

- U - napięcie robocze,
- $\Delta U$  - uśredniona wartość polaryzacji sumarycznej anody i katody,
- $V_f$  - prędkość dosuwu roboczego ER.

W wyniku symulacji, przeprowadzonej wg algorytmu, którego schemat pokazany jest na rys. 4, uzyskiwane są rozkłady ciśnienia statycznego  $p$ , temperatury  $T$  oraz koncentracji objętościowej fazy gazowej  $\beta$ . Typowe rozkłady pokazane są na rys.3.



Rys. 4. Algorytm symulacji obróbki elektrochemicznej  
 Fig. 4. Algorithm for electrochemical machining simulation

Przy wyborze parametrów obróbki stosowane jest kryterium największej wydajności obróbki, a więc maksymalnej prędkości drążenia, przy spełnieniu następujących ograniczeń:

- |   |                    |   |
|---|--------------------|---|
| 1. $\sup w \leq K_a a,$                         | gdzie: $K_a$       | -współczynnik bezpieczeństwa ze względu na stabilność procesu ECM w obszarze prędkości krytycznych, $K_a = 0.7 \div 0.8,$ |
| 2. $\text{Inf } w \geq w_{\min},$               | $a$                | -prędkość dźwięku w elektrolicie,   |
| 3. $\text{Inf } p \geq K_p p_{\text{nasyc}},$   | $w_{\min}$         | -minimalna prędkość elektrolitu ze względu na możliwości wystąpienia pasywacji (na ogół $8 \div 10$ m/s),                 |
| 4. $p_{in} \leq p_{in \text{max obrab.}},$      | $K_p$              | - współczynnik bezpieczeństwa ze względu na kawitację,  |
| 5. $Q \leq Q_{\text{obrab.}},$                  | $p_{\text{nasyc}}$ | -ciśnienie pary nasyconej.  |
| 6. $U_{\text{max}} \leq U_{\text{max obrab.}},$ |                    |   |
| 7. $U_{\text{min}} \geq U_{\text{min obrab.}},$ |                    |   |
| 8. $\Delta T \leq \Delta T_{\text{dop}},$       |                    |   |
| 9. $\sup \beta \leq \beta_{\text{dop}},$        |                    |   |

Pierwsze pięć ograniczeń wiąże się z warunkami hydrodynamicznymi, od których w znacznej mierze zależy stabilność procesu roztwarzania. Niedopuszczalne jest wystąpienie przydźwiękowych zjawisk falowych (ograniczenie 1) oraz kawitacyjnych (3), które mają miejsce przy wyższych wartościach prędkości ośrodka. Zaznaczyć należy, że prędkość dźwięku w ośrodku dwufazowym (elektrolit - gaz) jest stosunkowo niska ( $15 \div 20$  m/s). Jednocześnie zbyt mała prędkość elektrolitu może spowodować, że wskutek ograniczeń dyfuzyjnych nie będzie możliwe uzyskanie niezbędnej gęstości prądu, a więc maksymalnej wydajności (2). Dwa ostatnie ograniczenia (8 i 9) wiążą się z koniecznością niedopuszczenia do wrzenia elektrolitu oraz do łączenia się pęcherzyków w "korki" gazowe.

Niespełnienie jednego z ograniczeń prowadzi do wystąpienia stanu krytycznego procesu ECM, którego wynikiem może być wyładowanie elektryczne uszkadzające ER i PO oraz przerwanie procesu obróbki.

Ostateczny wybór parametrów obróbki następuje po dokonaniu korekcji profilu ER.

Po wprowadzeniu dodatkowych kryteriów takich jak:

- minimum energochłonności obróbki,
  - minimum czułości wskaźników użytkowych obróbki na zmianę parametrów,
- powstaje zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej obróbki ECM.

Pracę wykonano częściowo w ramach projektu badawczego Nr 0256/P4/93/05.

## Literatura

- [1] Kozak J.: Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną - bezstykową (ECM). Prace Naukowe PW, Mechanika nr 41, WPW, Warszawa 1976.
- [2] Davydov A., Kozak J.: Vysokoskorostnoe elektrochimičeskoe formoobrazovanie. Nauka, Moskva 1990.
- [3] Kozak J., Budzyński A., Engelgardt R., Davydov A.: Mathematical Modelling of Electrochemical Machining. Proceed. of Intern. Symp. for Electro-Machining (ISEM-IX), Nagoya Japan 1989, str. 135 ÷ 138.

- [4] Kozak J., Dąbrowski L., Rozenek M.,: Computer - Aided Design of Tool Electrodes for ECM and Simulation of Anode Shape Evolution by Means of a Microcomputer. Proceed. of Intern. Symp. for Electro-Machining (ISEM-IX), Nagoya Japan 1989, str. 139 ÷ 142.
- [5] Dąbrowski L.: Podstawy komputerowej symulacji kształtowania elektrochemicznego. Prace Naukowe PW, Mechanika nr 154, WPW, Warszawa 1992.
- [6] Kozak J. Dąbrowski L., Łubkowski K., Rozenek M.,: Computer Aided Electrochemical Machining. Proceed. of Intern. Symp. for Electro-Machining (ISEM-X), Magdeburg Germany 1992, str. 466 ÷ 475.
- [7] Dąbrowski L., Kozak J.: Projektowanie komputerowe elektrod w obróbce elektrochemicznej (ECM). Materiały V Ogólnopolskiego Seminarium Naukowego "Zastosowania Matematyki w Budowie Maszyn", Koszalin 1994, str. 189 ÷ 200.

### **Streszczenie**

W referacie omówiono cechy procesu obróbki elektrochemicznej (ECM) w aspekcie jej optymalizacji. Przedstawiono uwarunkowania występujące przy doborze parametrów obróbki oraz sformułowano zadanie optymalizacji w ECM.

### **PROBLEM OF ELECTROCHEMICAL MACHINING (ECM) OPTIMISATION**

#### **Summary**

Electrochemical machining (ECM) features have been discussed in this paper with a view to its optimisation. The implications occurring in selecting machining process parameters have been presented and the problem of ECM optimisation has been formulated.



## Optymalizacja impulsowej obróbki elektrochemicznej (PECM)

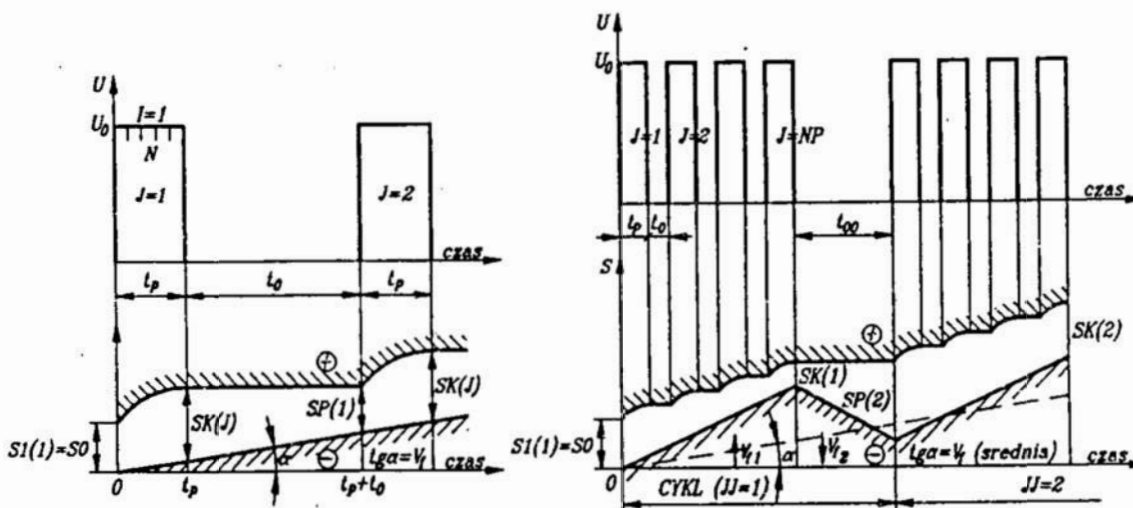
### 1. Wstęp

Stosowanie we współczesnym przemyśle coraz bardziej wytrzymałych, twardych, odpornych na korozję, na działania wysokich temperatur materiałów konstrukcyjnych, z których większość jest trudno obrabialna konwencjonalnymi metodami oraz ogólne tendencje upraszczania i automatyzacji procesów wytwarzania powodują ciągły rozwój oraz wzrost zastosowań obróbek erozyjnych w tym i obróbki elektrochemicznej. Główne zastosowania obróbki elektrochemicznej prądem stałym ECM, to drażenie kształtowe oraz usuwanie zadziórów i wygładzanie powierzchni zwłaszcza wewnętrznych w miejscach trudno dostępnych.

Drażenie elektrochemiczne stosowane jest szeroko przy obróbce: części profilowych łopatek sprężarek i turbin lotniczych silników turbinowych, obróbce integralnych wirników turbin, drażeniu kształtowemu otworów w chłodzonych łopatkach turbinowych jak również w produkcji elementów elektronicznych (mikroobróbka) i medycznych. Podstawowym problemem drażenia elektrochemicznego jest uzyskanie zadawalającej dokładności wymiarowo-kształtowej, której efektywny wzrost uzyskano przez wprowadzenie impulsowego zasilania szczeliny międzyelektrodowej prądem roboczym w połączeniu z pasywnującym elektrolitem i zastosowaniem okresowego ruchu elektrody roboczej [4, 5, 6, 7, 8, 10].

### 2. Ogólna charakterystyka obróbki impulsowej

Impulsowe zasilanie (Rys. 1), w którym napięcie podawane jest w postaci impulsów o



Rys. 1. Schemat obróbki PECM. a) ze stała predkoscia posuwu,  
 b) z cofaniem elektrody w czasie przerwy między grupa impulsow.

Fig. 1. Scheme of PECM. a) constant feed rate, b) feed rate with recede in break time.

\* Instytut Technologii Mechanicznej PW, E-Mail: klubkowski@meil.pw.edu.pl



zadaniem kształcie, amplitudzie, czasie impulsu, czasie przerwy przeznaczonym na ewakuację produktów roztwarzania oraz odpowiedniej kinematyce elektrod, pozwala na zmniejszenie szczeliny międzyelektrodowej poniżej 0.1 mm co ma wpływ zarówno na zwiększenie dokładności jak i na uproszczenie projektowania elektrody roboczej. Równocześnie jednak PECM jest obróbką mniej wydajną niż ECM z uwagi na przerwy między impulsami. Obróbka elektrochemiczna jest wieloparametrowym obiektem sterowania. W celu określenia optymalnych parametrów obróbki z konieczności należy ograniczyć ilość zmiennych niezależnych a w badaniach należy stosować planowany eksperyment. W niniejszej pracy przedstawiono optymalizację obróbki PECM z uwagi na wydajność i dokładność obróbki oraz stan warstwy wierzchniej. Problem rozwiązano następująco; wykonano badania doświadczalne, wyznaczono zależności regresyjne określające wpływ wybranych parametrów obróbki na wymienione wyżej własności, wprowadzono kompleksowy wskaźnik oceny obróbki *OPT* a następnie obliczono optymalne parametry obróbki PECM.

### 3. Opis badań

Badania przeprowadzono na stanowisku IDEL-1 [5, 10] specjalną elektrodą nieruchomą z nakładkami izolacyjnymi teflonowymi, które zapewniały ustalenie wymaganej szczeliny i osłaniały przed obróbką fragmenty próbki, które były później bazą pomiarową do pomiaru ubytku liniowego i błędów kształtu. W celu zbadania wpływu wybranych parametrów obróbki na przebieg i efekty procesu PECM, posłużono się metodą planowanego eksperymentu (Boxa-Wilsona) [2, 11, 12, 13]. Istota tej metody polega na: minimalizacji ogólnej ilości doświadczeń, prowadzeniu doświadczeń wg specjalnego planu gdzie w kolejnych eksperymentach zmienia się jednocześnie wszystkie zmienne niezależne i sformalizowaniu wszelkich działań za pomocą aparatu matematycznego. Na podstawie analizy procesu obróbki, jako czynniki niezależne przyjęto główne nastawialne parametry obróbki impulsowej:

- $x_1$  - grubość szczeliny międzyelektrodowej  $s_o$ ,
- $x_2$  - ciśnienie elektrolitu na wlocie do szczeliny  $p_m$ ,
- $x_3$  - czas impulsu roboczego  $t_p$ ,
- $x_4$  - współczynnik wypełnienia  $k_w = t_p / (t_p + t_o)$ ,

gdzie  $t_o$  - czas przerwy między impulsami.

Z dotychczasowych badań wynika, że PECM powinna być prowadzona w następujących przedziałach zmienności przyjętych czynników niezależnych:

$$0.05 < s_o < 0.2 \text{ [mm]}, \quad 0.2 < p_m < 0.6 \text{ [MPa]}, \quad 2 < t_p < 10 \text{ [ms]}, \quad 0.1 < k_w < 0.5$$

Wielkościami mierzonymi ( $Y_i$ ) charakteryzującymi efekty obróbki były:

$\Delta s$  - średni ubytek liniowy anody (średni wzrost grubości szczeliny międzyelektrodowej podczas obróbki,

$Ra$  - średnia chropowatość powierzchni obrobionej,

$\phi$  - kąt nachylenia obrobionej powierzchni względem powierzchni bazowej próbki,

$pr$  - błąd prostoliniowości powierzchni obrobionej.

Badania prowadzono przy następujących czynnikach ustalonych;

- elektrolit: 10% wodny roztwór *NaCl* o temperaturze około 20 C,

- elektroda robocza; materiał 1H18N9T, szlifowana  $Ra = 0.85 \mu\text{m}$ ,

- próbka obrabiana: materiał WNL, hartowana 35HRC, szlifowana  $Ra = 1.2 \mu\text{m}$

- napięcie w impulsie  $U=12$  [V],
- ciśnienie na wylocie ze szczeliny  $p_{out} = 0.1$  MPa.
- czas roboczy - w każdej próbie ilość impulsów była tak dobrana aby roboczy czas obróbki  $\cdot tr = N_r \cdot t_o = 6s$ , ( $N_r$  - ilość impulsów prądowych),

oraz występujących czynnikach zakłócających, niemożliwych do zupełnego wyeliminowania takich jak; niedokładność ustawienia szczeliny, niejednorodność materiału obrabianego i zmienność chropowatości początkowej próbek, zmienność własności elektrolitu w czasie próby, fluktuacje losowe oraz dryf czasowy parametrów procesu. W celu przedstawienia wyników eksperymentu w postaci matematycznych zależności zastosowano krokową regresję wielokrotną [1,2], uważaną za najbardziej efektywną, opartą na analizie regresji liniowej. W prostym przypadku regresji liniowej zakłada się następujący model zależności wielkości mierzonych od zmiennych nastawialnych  $X_i$ ,

$$y_i = b_0 + b_i x_i + e_i \quad \text{gdzie } i = 1, 2, 3, n \quad (1)$$

gdzie:  $b_0, b_i$  - współczynniki regresji,

$e_i$  - błąd pomiarowy i-tego pomiaru.,

Aby można było stosować analizę regresji, muszą być spełnione następujące warunki:

- wszystkie wielkości mierzone  $y$  są niezależne,
- błędy  $e_i$  podlegają rozkładowi normalnemu.

W takim przypadku współczynniki regresji  $b_0, b_i$  mogą być estymowane przy użyciu metody najmniejszych kwadratów.

Z analizy procesu PECM wynika, że zależności wyrażające związki pomiędzy wynikami pomiarów a zmiennymi nastawialnymi mogą być nieliniowe, dlatego też założoną następującą postać zależności:

$$f(s_0, p_{in}, t_p, k_w) = C s_0^{b_1} p_{in}^{b_2} t_p^{b_3} k_w^{b_4} \quad (2)$$

Ponieważ wartości  $C, b_1, b_2, b_3, b_4$  określane są z regresji liniowej wielokrotnej, powyższą zależność przekształcono logarytmicznie w funkcję o postaci;

$$\ln f(s_0, p_{in}, t_p, k_w) = \ln C + b_1 \ln(s_0) + b_2 \ln(p_{in}) + b_3 \ln(t_p) + b_4 \ln(k_w) \quad (3)$$

Przyjmując oznaczenia :

$$\ln f(s_0, p_{in}, t_p, k_w) = y \quad (4)$$

$$\ln C = b_0, \quad \ln(s_0) = X1, \quad \ln(p_{in}) = X2, \quad \ln(t_p) = X3, \quad \ln(k_w) = X4$$

możemy zapisać równanie regresji drugiego stopnia (przyjęte zgodnie z pracą [5,9]) w sposób następujący;

$$y = b_0 + b_1 X1 + b_2 X2 + b_3 X3 + b_4 X4 + b_5 X1^2 + b_6 X2^2 + b_7 X3^2 + b_8 X4^2 + b_9 X1X2 + b_{10} X1X3 + b_{11} X1X4 + b_{12} X2X3 + b_{13} X2X4 + b_{14} X3X4 \quad (5)$$

Na podstawie analizy procesu PECM oraz poszczególnych metod planowania, uwzględniając praktyczne możliwości wykonania doświadczeń wybrano pięciopoziomowy plan rotabilny drugiego rzędu Boxa-Wilsona. Z planu wynika, że każda ze zmiennych niezależnych przyjmuje 5 wartości. Aby współczynniki regresji były dokładnymi miarami ilościowymi, zmienne niezależne poddane zostały następującemu kodowaniu (przykładowo dla  $s_0$ ):

*Tabela 1. Wartości zmiennych niezależnych dla poszczególnych poziomów - kodów*  
*Table 1. Values of independent variables for respective codes*

Kod	$s_o$ [mm]	$p_{in}$ [MPa]	$t_p$ [ms]	$k_w$
-2	0.05	0.2	2.0	0.10
-1	0.07	0.26	3.0	0.15
0	0.10	0.35	4.5	0.22
1	0.14	0.46	6.7	0.33
2	0.20	0.60	10.	0.5

*Tabela 2. Macierz planowania i wyniki pomiarów*  
*Table 2. Matrix of experiments and results of PECM*

Nr testu	X1	X2	X3	X4	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Phi \cdot 10^{-3}$ [rad]	pr [ $\mu\text{m}$ ]
1	-1	-1	-1	-1	0.272	0.1321	1.4318	5.94
2	0	0	0	0	0.64	0.1369	1.645	5.38
3	-1	1	1	-1	1.09	0.1534	1.8613	9.38
4	1	-1	-1	1	0.448	0.0976	0.5387	5.56
5	1	1	-1	-1	0.171	0.1185	0.8873	4.13
6	-1	-1	1	1	0.699	0.1243	2.2642	9.38
7	1	1	1	1	1.08	0.1252	0.921	6.56
8	0	0	0	0	0.425	0.1332	1.161	5.88
9	1	-1	1	-1	0.321	0.1192	2.3224	4.88
10	-1	1	-1	1	0.289	0.1413	0.9844	7.06
11	1	1	-1	1	0.235	0.1344	0.3628	7.0
12	-1	-1	1	-1	0.37	0.1379	2.6456	5.88
13	0	0	0	0	0.405	0.1363	1.1615	6.0
14	-1	1	1	1	0.879	0.1453	1.7864	8.44
15	1	1	1	-1	0.737	0.1291	1.7702	6.81
16	0	0	0	0	0.403	0.1361	1.548	5.38
17	-1	1	-1	-1	0.211	0.1443	1.2106	6.06
18	1	-1	1	1	0.716	0.1113	0.9923	9.88
19	-1	-1	-1	1	0.502	0.1158	0.1393	6.88
20	1	-1	-1	-1	0.228	0.1231	0.7661	4.88
21	0	0	0	0	0.455	0.1343	1.61	7.75
22	-2	0	0	0	0.393	0.1318	1.4122	5.69
23	0	0	-2	0	0.2	0.1149	0.6648	4.06
24	0	0	0	0	0.513	0.1354	0.968	5.63
25	0	0	0	0	1.1	0.153	1.9385	13.75
26	0	0	0	-2	0.384	0.1483	1.9613	4.06
27	0	-2	0	0	0.348	0.1115	1.0648	5.13
28	0	2	0	0	0.598	0.1501	0.656	6.25
29	2	0	0	0	0.292	0.1196	0.7403	7.58
30	0	0	2	0	0.790	0.1249	1.138	4.88

$$X1(kod) = \exp\left(\left(\frac{\ln(s_o \text{ max}) + \ln(s_o \text{ min})}{2}\right) + \left(\frac{\ln(s_o \text{ max}) - \ln(s_o \text{ min})}{2\rho}\right)r\right)$$

gdzie:  $\rho = 2$  - promień ramienia gwiazdowego planu,  $r = -2, -1, 0, 1, 2$  wartość kodu. Macierz planowania doświadczenia wraz ze wszystkimi wielkościami mierzonymi zawarta jest w Tabelach 1 i 2. Przed przystąpieniem do obliczeń zależności regresyjnych sprawdzono czy spełniony jest warunek rozkładu normalnego zakłóceń (błędów  $e_i$ ) przy pomocy kryterium  $W$  [3], które jest mocniejsze od szeroko stosowanego kryterium  $\chi^2$  i może być stosowane w przypadku 3 do 50 pomiarów w jednym punkcie pomiarowym. Warunek sprawdzono dla punktu planu 0, 0, 0, 0. Wyniki pomiarów wprowadzono do programu krokowej regresji wielokrotnej (odmiana standartowego programu IBM) w celu wyznaczenia współczynników regresji. Obliczenia prowadzono na mikro-komputerze PC. Do badań istotności otrzymanych zależności zastosowano test  $F$  - Fischera-Snedekora [1] oparty na analizie wariancji. Jeżeli wartość obliczona z wzoru  $F$  jest większa od wartości  $F_{kr}$  (wartość stabilizowana) przy założonym poziomie ufności  $1-\alpha$ , należy wnioskować o istotności funkcji regresji, istotność zaś poszczególnych współczynników regresji sprawdzano testem  $t$  - Studenta [1], przy podobnym wykorzystaniu stabilizowanych wartości rozkładu Studenta. Poniżej, zestawiono otrzymane równania regresji (dla  $1-\alpha=0.95$ ), które w sposób najbardziej adekwatny opisały badany proces, podano również dla każdej zależności współczynnik korelacji wielokrotnej  $R[1]$ .

$$Ra = \exp(-0.774 + 0.414X3 + 0.235X4 + 0.268X2X3 + 0.079X4X4 - 0.12X2X4 - 0.84X1X1 + 0.079X2 - 0.067X1) [\mu\text{m}]$$

$$F / F_{kr} = 13.9, \quad R = 0.976 \quad (7)$$

$$\Delta s = \exp(-2. + 0.068X2 - 0.052X1 - 0.035X3X3 + 0.022X4X4 + 0.035X2X4 - 0.023X1X1 + 0.02X3) [\text{mm}]$$

$$F / F_{kr} = 5.14, \quad R = 0.934 \quad (8)$$

$$\phi = \exp(0.01 + 0.369X3 - 0.23X4) [10^{-3} \text{ rad}]$$

$$F / F_{kr} = 1.13, \quad R = 0.715 \quad (9)$$

$$pr = \exp(1.79 + 0.184X4 + 0.096X3 + 0.074X4X4) [\mu\text{m}]$$

$$F / F_{kr} = 1.68, \quad R = 0.792 \quad (10)$$

Analizując otrzymane zależności regresyjne stwierdzono następujący wpływ parametrów obróbki PECM na jej własności użytkowe:



- Ubytek anody (wydajność obróbki). Wzrost ciśnienia wlotowego i współczynnika wypełnienia powoduje wyraźny wzrost wydajności obróbki (wzrasta ubytek anody), istnieje natomiast optymalna grubość szczeliny i optymalny czas impulsu przy których ubytek jest maksymalny.
- Chropowatość powierzchni obrobionej. Wzrost współczynnika wypełnienia powoduje wyraźny wzrost chropowatości. Wpływ pozostałych parametrów jest złożony.
- Błędy kształtu ( $\phi$  i  $pr$ ). Błędy kształtu obrobionej powierzchni zależą tylko, od czasu impulsu i współczynnika wypełnienia. Wzrost czasu impulsu powoduje wzrost tych błędów, natomiast wzrost współczynnika wypełnienia powoduje: wzrost nieprostoliniowości  $pr$  (powstaje typowa po ECM powierzchnia wklęsła) ale równocześnie zmniejszenie pochylenia powierzchni  $\phi$ .

#### 4. Określenie optymalnych parametrów obróbki PECM

Dla otrzymania ekstremów warunkowych uzyskanych zależności regresyjnych w danym obszarze przestrzeni czynnikowej ograniczonej współrzędnymi  $X_i = 2$ , zastosowano metodę przeglądu wszystkich kombinacji skwantowanych zmiennych niezależnych (w pracy zakres każdej zmiennej podzielono na 20 części). Obliczenia wykonano przy pomocy programu OPTY (opracowanego przez jednego z autorów). W Tabeli 3 zestawiono optymalne parametry obróbki PECM z uwagi na poszczególne kryteria: max. wydajność, minimalna chropowatość i minimalne błędy kształtu ( $\phi$  i  $pr$ ). Z tabeli wynika, że optima jednokryterialne osiągane są w różnych punktach zbioru rozwiązań dopuszczalnych, nie ma takiego "super" optymalnego zestawu parametrów, przy którym spełnione są wymienione powyżej kryteria. W celu określenia tego optymalnego zestawu parametrów wprowadzono pojęcie bezwymiarowej oceny obróbki impulsowej OPT, określoną zależnością:

Tabela 3. Optymalne parametry obróbki

Table 3. Optimal machining conditions

Parametry pow. po PECM	X1	X2	X3	X4
	$s_o$	$p_{in}$	$t_p$	$k_w$
Ra min =0.05 $\mu$	X1=2 $s_o=0.2$ mm	X2=2 $p_m=0.6$ Ma	X3=-2 $t_p=2$ ms	X4=0 $k_w=0.22$
$\Delta s$ max 201 $\mu$ m	X1=-1.17 $s_o=0.067$ mm	X2=2 $p_m=0.6$ Ma	X3=0.33 $t_p=5.1$ ms	X4=2 $k_w=0.5$
$\phi$ min ( $10^{-3}$ ) . 0.305 rad	nie ma wpływu	nie ma wpływu	X3=-2 $t_p=2$ ms	X4=-1.2 $k_w=0.14$
pr min 4.4 $\mu$ m	nie ma wpływu	nie ma wpływu	X3=-2 $t_p=2$ ms	X4=-1.2 $k_w=0.14$

$$OPT = W1 \frac{\Delta s_{max} - \Delta s}{\Delta s_{max} - \Delta s_{min}} + W2 \frac{Ra - Ra_{min}}{Ra_{max} - Ra_{min}} + W3 \frac{\phi - \phi_{min}}{\phi_{max} - \phi_{min}} + W4 \frac{pr - pr_{min}}{pr_{max} - pr_{min}}, \quad (11)$$

gdzie:  $W_i$  - waga każdego z kryteriów optymalizacyjnych,

Powyższa ocena  $OPT$  może zmieniać się w granicach:

$0 < OPT < W_n$  gdzie:  $W = W1+W2+W3+W4$ . Im niższa wartość  $OPT$  tym lepsze efekty obróbki PECM. Ponieważ obróbkę PECM stosuje się głównie dla uzyskania wysokiej dokładności wymiarowo kształtowej i niskiej chropowatości przyjęto współczynnik wagi dla wydajności  $W1 = 0.25$  przy pozostałych  $Wi = 1$ .

W sposób opisany poprzednio obliczono optymalne wartości  $X1, X2, X3, X4$ , a następnie rzeczywiste wartości  $s_o, t_o, p_{in}, k_w$ , przy których  $OPT$  osiąga wartość minimalną.

$$\begin{array}{lll} OPT (MIN) = 0.247 \text{ dla} & X1 = -1.4 & s_o = 0.0616 \text{ mm} \\ & X2 = 2 & p_{in} = 0.6 \text{ MPa} \\ & X3 = -2 & t_p = 2 \text{ ms} \\ & X4 = 0.4 & k_w = 0.263 \end{array}$$

Dla powyższego zbioru parametrów obliczono z zależności regresyjnych:

$$Ra = 0.0763 \mu\text{m}, \Delta s = 0.13 \text{ mm}, \phi = .53 \cdot 10^{-3} \text{ rad}, pr = 4.65 \mu\text{m}.$$

Dla porównania "najgorsze" warunki obróbki wystąpią kiedy  $OPT$  osiągnie wartość maksymalną:

$$\begin{array}{lll} OPT (MAX) = 2.371 \text{ dla} & X1 = -0.4 & s_o = 0.087 \\ & X2 = 2 & p_{in} = 0.6 \text{ MPa} \\ & X3 = 2 & t_p = 10 \text{ ms} \\ & X4 = -2 & k_w = 0.5 \end{array}$$

Jeśli usuniemy kryterium wydajności uzyskamy zdecydowanie lepszy wskaźnik  $OPT$  a więc, osiągniemy niższe błędy kształtu i niższą chropowatość:

$$\begin{array}{lll} OPT (MIN) = 0.0963 \text{ dla} & X1 = 2 & s_o = 0.2 \text{ mm} \\ & X2 = 2 & p_{in} = 0.6 \text{ MPa} \\ & X3 = -2 & t_p = 2 \text{ ms} \\ & X4 = -0.6 & k_w = 0.176 \end{array}$$

Dla tego zbioru parametrów obliczone wskaźniki obróbki są następujące:

$$Ra = 0.052 \mu\text{m}, \Delta s = 0.1 \text{ mm}, \phi = .55 \cdot 10^{-3} \text{ rad}, pr = 4.5 \mu\text{m}.$$

Usuwanie kryterium wydajności uzyskano znaczne zmniejszenie chropowatości (32%) kosztem spadku wydajności, przy prawie niezmiennych błędach kształtu (zmniejszenie  $pr$  o 2% i wzrost  $\phi$  o 4%).

## 5. Uwagi końcowe

W technicznych zastosowaniach PECM do drażenia matryc drobnych elementów o skomplikowanym kształcie (rzeźbie) np matryc do monet, należy dobierać parametry obróbki bez uwzględnienia kryterium wydajności.

Dyskusja wyników oraz porównanie z wynikami uzyskanymi inną metodą będzie podana w pracy [9].

## Literatura

- [1] Brandt S. Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych. PWN Warszawa 1974r.
- [2] Draper N.R. Analiza regresji stosowana. PWN Warszawa 1973r.
- [3] Ginberg A.M. i inni: Optimalizacja technologicznych procesów w galvanotechnice. Wyd. Masinostrojenije Moskwa 1972r.



- [4] Kozak J., Dąbrowski L., Łubkowski K.: Impulsowa obróbka elektrochemiczna. Mat. Konferencji EM-82, Bydgoszcz 1982r, s.74:83
- [5] Kozak J., Łubkowski K., Perończyk J.: Accuracy problems of the pulse electrochemical machining. Mat. 22 International MTDR Conference, Manchester 1981r, s.353:360.
- [6] Kozak J., Łubkowski K., Abdel Mahboud A.M.: Characteristic of the pulse electrochemical machining (PECM). Mat. Winter Ann. Meeting "Research and Technological Developments in Nontraditional Machining", Chicago 1988r, s.189:197.
- [7] Łubkowski K. Zjawiska fizyczne w szczelinie międzyelektrodowej podczas impulsowej obróbki elektrochemicznej. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń. Zeszyt 3/1984r s.39:50.
- [8] Łubkowski K. i inni: Some problems of Optimization of electrochemical machining. Mat. IV MDP Conference Kair 1989r, s.535:542.
- [9] Łubkowski K., Pogorzelski W.: Ranking wariantów impulsowej obróbki elektrochemicznej. Materiały niniejszej Konferencji.
- [10] Łubkowski K., Zawora J.: Dobór parametrów optymalnych impulsowej obróbki elektrochemicznej. Mat. Konferencji EM-92, Bydgoszcz 1982r, s.107:114.
- [11] Mańczak K. Technika planowania eksperymentu. WNT Warszawa 1976r.
- [12] Nalimow W., Czernowa N.: Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych. WNT Warszawa 1967.
- [13] Polański Z. Planowanie doświadczeń w technice. PWN Warszawa 1984r.

### **Streszczenie**

W referacie przedstawiono przykład optymalizacji impulsowej obróbki elektrochemicznej. Opisano wykonany eksperyment planowany w celu określenia wpływu głównych nastawialnych parametrów obróbki PECM: szczeliny międzyelektrodowej  $s_e$ , ciśnienia na wlocie  $p_{im}$ , czasu impulsu  $t_p$  oraz współczynnika wypełnienia  $k_w$ , na wydajność, chropowatość i błędy kształtu obrobionej powierzchni. Wprowadzono kompleksowy wskaźnik oceny obróbki  $OPT$  oraz określono optymalny zestaw parametrów, przy których osiągane są najlepsze efekty obróbki.

### **THE OPTIMIZATION OF THE PULSE ELECTROCHEMICAL MACHINING (PECM)**

#### **Summary**

An attempt of optimization of PECM has been made in the presented paper. The planned experiment has been described for the purpose of designing the statistical model which evaluates the influence of machining parameters upon the productivity, shape errors and the surface roughness of machined workpieces. The OPT function has been suggested and the best machining parameters giving the minimal shape errors and surface roughness with maximum productivity have been determined.

## Ranking wariantów impulsowej obróbki elektrochemicznej

### 1. Wstęp

Współczesne metody wytwarzania w znaczącym stopniu korzystają z obróbki erozyjnej, w tym impulsowej obróbki elektrochemicznej. Drażenie elektrochemiczne stosowane jest szeroko przy obróbce materiałów twardych, odpornych na korozję i działanie wysokich temperatur, takich jak łopatki sprężarek i turbin oraz w obróbce elementów elektronicznych. Na podstawie analizy procesu obróbki można wskazać cztery podstawowe jej parametry:  $x_1$  - grubość szczeliny międzyelektrodowej,  $x_2$  - ciśnienie elektrolitu na wlocie do szczeliny,  $x_3$  - czas impulsu roboczego,  $x_4$  - współczynnik wypełnienia. Więcej szczegółów na temat impulsowej obróbki elektrochemicznej zawiera referat [1]. Niniejszy referat jest jego kontynuacją.

### 2. Kryteria doboru wartości parametrów obróbki

W rozważanym reżimie technologicznym można wstępnie przyjąć po pięć poziomów wartości każdego z parametrów. Są one niezależne między sobą tak, że daje to  $5^4 = 625$  wariantów obróbki. Każdy z nich charakteryzuje się innymi efektami końcowymi, co stwarza problem wyboru najlepszego wariantu. Za najważniejsze kryteria należy uznać:

- $\Delta s$  - średni wzrost grubości szczeliny międzyelektrodowej podczas obróbki,
- $Ra$  - średnia chropowatość powierzchni obrobionej,
- $\phi$  - kąt nachylenia obrobionej powierzchni,
- $pr$  - błąd prostoliniowości obrobionej powierzchni.

Są to cztery kryteria, z których pierwsze należy maksymalizować, zaś trzy pozostałe minimalizować. A zatem mamy zadanie optymalizacji wielokryterialnej.

W kroku wstępnym wybrano wg metod planowania eksperymentu 30 wariantów obróbki spośród 625 rozważanych i dla nich na stanowisku badawczym przeprowadzono obróbkę i zmierzono wartości kryteriów. Zestawienie badanych 30 wariantów zawiera Tabela 2 w referacie [1]. Podano w niej również osiągnięte wartości funkcji kryterialnych dla każdego z wariantów (testów):

- $\Delta s$  osiąga maksimum równe 0,1534 mm dla wariantu 3,
- $Ra$  osiąga minimum równe 0,171  $\mu\text{m}$  dla wariantu 5,
- $\phi$  osiąga minimum równe  $0,1343 \cdot 10^{-3}$  rad dla wariantu 19,
- $pr$  osiąga minimum równe  $4,06 \cdot 10^{-3}$  mm dla wariantów 23 i 26.

Ponieważ poszczególne kryteria osiągają pożądane ekstrema dla różnych wariantów, a zanotowane wahania wartości kryteriów są znaczne, więc nabiera znaczenia znalezienie kompromisowego wariantu obróbki lub - jeszcze lepiej - ułożenie wielokryterialnego rankingu rozważanych wariantów.

### 3. Metoda rankingu

Mając zestaw  $N$  obiektów  $\{a_1, \dots, a_N\}$ , z których każdy jest scharakteryzowany  $M$

<sup>1</sup> Instytut Technologii Mechanicznej PW, E-Mail: klubkowski@meil.pw.edu.pl

<sup>2</sup> Ośrodek Naukowo-Dydaktyczny PW w Płocku, ul. Łukasiewicza 17

wartościami maksymalizowanych kryteriów  $q_1, \dots, q_M$ , możemy przeprowadzić ranking obiektów metodą wagowo-korelacyjną [2], rozwijaną przez jednego z autorów od 1986 roku. W wersji, którą chcemy zastosować w niniejszym zadaniu, każdemu obiektowi przypisujemy pewną wiarygodność  $p_l, l=1, \dots, N$ , zaś każdemu kryterium pewną wagę  $\alpha_i, i=1, \dots, M$ . Wówczas ocenę kompromisową obiektu  $a_l$  określa formuła;

$$\sum_{i=1}^M \alpha_i |\rho_i| \frac{q_i(a_l)}{\sigma_i} \quad (1)$$

gdzie  $|\rho_i|$  jest modulem współczynnika korelacji liniowej ocen kompromisowych z ocenami według kryterium  $i$ -tego, zaś  $\sigma_i$  jest odchyleniem standardowym ocen według kryterium  $i$ -tego. Formuła ta ma szereg zalet: uwzględniono wagę kryterium, dyspersję wartości ocen według poszczególnych kryteriów (w efekcie dzielenia przez  $\sigma_i$ ), stopień miarodajności ocen według danego kryterium w stosunku do ocen kompromisowych uwzględniających wszystkie kryteria (w efekcie mnożenia przez  $|\rho_i|$ ). Najważniejszą jednakże zaletą formuły (1) jest to, że wynika ona z pewnego modelu wartościowania obiektów scharakteryzowanych wielokryterialnie i z różnym stopniem wiarygodności tych ocen.

Punktem wyjścia metody wagowo-korelacyjnej w zastosowanej tutaj wersji jest założenie, że człowiek stojący wobec konieczności kompromisu pomiędzy wieloma kryteriami o różnym stopniu ważności maksymalizuje sumę ważoną informacji o poszczególnych kryteriach zawartej w ocenach kompromisowych. Przypomnijmy, że ilość informacji o zdarzeniu A zawartej w zdarzeniu B określa wzór:

$$I(A, B) = H(A) - H(A|B), \quad (2)$$

gdzie  $H(\cdot)$  oznacza entropię zdarzenia  $(\cdot)$ . W pracy [3] wyprowadzono stąd, że miarą nierozróżnialności dwóch zmiennych losowych  $X_j$ , o gęstościach  $f_j(x)$  każda, jest całka

$$\int \left[ f_1(x) - f_2(x) \right] \ln \frac{f_1(x)}{f_2(x)} dx, \quad (3)$$

znana w literaturze jako kryterium Jeffreysa-Kullbacka-Leiblera. Całka (3) dla zmiennych losowych normalnych o korelacji liniowej  $\rho$  wynosi  $\rho^2/(1-\rho^2)$ , zaś uwzględniając, że nie dysponujemy rzeczywistą wartością  $\rho$  a jedynie jej próbkowym oszacowaniem  $r$  otrzymujemy, że wartość całki (3) jest proporcjonalna do  $r^2$ .

A zatem w metodzie wagowo-korelacyjnej należy maksymalizować sumę wyrażen

$$E_i = \alpha_i |\rho_i| |\rho_i|, \quad (4)$$

gdzie:  $\rho_i$  jest empirycznym współczynnikiem korelacji liniowej między ocenami według kryterium  $i$ -tego i nieznanymi ocenami kompromisowymi. Wartości  $E_i$  nazywamy motywacją dla rankingu ze strony kryterium  $i$ -tego. Im ta motywacja jest większa, tym bardziej układ ocen według kryterium  $i$ -tego jest zbliżony do układu ocen kompromisowych. Maksymalizacja sumy motywacji  $E_i$  daje formułę (1).

#### 4. Najlepszy wariant obróbki

Formułę (1) zastosowano do wyboru wielokryterialnie najlepszego wariantu obróbki spośród 30 rozważanych ich odmian. Nie wszystkie są równie wiarygodne. Uwzględniając okoliczności badań w wyniku których wyznaczono wartości  $\Delta s, Ra, \phi$

oraz  $pr$  dla poszczególnych wariantów obróbki uznano, że jeśli dla normalnych warunków wiarygodności  $p_1$  przyjąć równe 1, to dla wariantu 2 i 15 należy przyjąć  $p_1 = 0,75$ , dla wariantu 12 przyjąć  $p_1 = 0,85$ , zaś dla 22, 26 i 27 jedynie 0,4. Wariant 25 w ogóle wyeliminowano, gdyż otrzymane dla niego wyniki były wyraźnie odstające.

Uwzględniając hipotetyczne zastosowanie naszej obróbki przyjęto, że najmniej ważne jest kryterium  $\Delta s = \text{Max!}$ . Pozostałe trzy kryteria uznano za jednakowo ważne. Tak więc dla nich wagi  $\alpha_i$  przyjęto za równe 1, zaś dla  $\Delta s$  waga wynosiła 0,25. Okazało się, że wtedy najkorzystniejszy jest wariant 23, dla którego  $\Delta s = 0,1149$  mm,  $Ra = 0,2$   $\mu\text{m}$ ,  $\phi = 0,6648 \cdot 10^{-3}$  rad,  $pr = 4,06 \cdot 10^{-3}$  mm, zaś na drugim miejscu w rankingu jest wariant 5, dla którego  $\Delta s = 0,1185$  mm,  $Ra = 0,171$   $\mu\text{m}$ ,  $\phi = 0,8873 \cdot 10^{-3}$  rad,  $pr = 4,13 \cdot 10^{-3}$  mm. Są to zupełnie różne warianty obróbki: dla 23 mamy  $(x_1, x_2, x_3, x_4) = (0, 0, -2, 0)$ , zaś dla 5 jest  $(1, 1, -1, -1)$ . Sugeruje to, że wartości ocen kompromisowych w obszarze wartości parametrów nie są jednomodalne. Uzyskano motywację łączną 1,654, z czego dla  $\Delta s$  wartość -0,018, dla  $Ra$  0,728, dla  $\phi$  0,262 i dla  $pr$  0,683.

Tabela 1. Wyniki rankingu

Table 1. Ranking list

Numer wariantu	Pozycja w rankingu		Numer wariantu	Pozycja w rankingu	
	4 kryteria	3 kryteria		4 kryteria	3 kryteria
1	9	9	16	11	14
2	21	21	17	5	7
3	29	29	18	26	26
4	8	6	19	14	10
5	2	2	20	3	3
6	28	28	21	23	23
7	25	25	22	16	16
8	15	13	23	1	1
9	18	18	24	13	11
10	10	15	25	-	-
11	4	4	26	7	8
12	22	22	27	6	5
13	12	12	28	19	19
14	27	27	29	17	17
15	24	24	30	20	20

Ponieważ motywacja dla rankingu ze strony kryterium  $\Delta s$  okazała się niemal zerowa, więc dla porównania obliczenia powtórzono przy trzech kryteriach pozostałych, biorąc dla każdego z nich wagę 1. Lista rankingowa niemal się nie zmieniła (patrz Tabela 1). Uzyskano motywacje: dla  $Ra$  0,722, dla  $\phi$  0,279 i dla  $pr$  0,674 (łącznie 1,675).

## 5. Uwagi końcowe

Przeprowadzona optymalizacja nasuwa pewne wnioski techniczne (związane z inżynierską interpretacją badań i jego wyników) oraz metodologiczne.

Przedstawiona metoda umożliwia uwzględnienie jakości eksperymentu. Wykonując badania, występują w praktyce takie zbiory parametrów, przy których pomimo powtórzeń nie udaje się uzyskać w pełni zadawalającej próby, np. źle pracuje zasilacz dla danego nastawu, lub pojawiają się wyładowania iskrowe w szczelinie.



W prezentowanym programie WAKOR uwzględnia się to poprzez wprowadzone współczynniki wiarygodności. W metodzie tej oceniamy efekty konkretnych prób i po wyborze najlepszego wariantu mamy pewność, że przy tych parametrach osiągniemy dane wyniki. W metodzie „klasycznej” opisanej w [1], dla otrzymanego zbioru najlepszych parametrów należy przeprowadzić ponownie próby gdyż wytypowany zestaw parametrów nie był realizowany w badaniach.

Do wniosków metodologicznych należy spostrzeżenie, że ranking planów może stanowić cenne uzupełnienie planowania eksperymentu. W naszym przypadku okazało się, że najbardziej interesujące plany są odległe od siebie i od miejsca ich zagęszczenia, a ponadto wskazuje zupełnie inny rejon wartości parametrów, niż optima uzyskane klasycznie, czyli poprzez aproksymację powierzchni odpowiedzi i wyznaczenie jej ekstremum. Po przeprowadzeniu rankingu wiadomo, gdzie w drugim etapie warto zagęścić eksperymenty, by uzyskać jeszcze bardziej wartościowe plany.

Drugi wniosek metodologiczny to spostrzeżenie, że przy optymalizacji wielokryterialnej niekiedy można zrezygnować z części kryteriów nie zmieniając wyniku optymalizacji. Może być to ważne przy optymalizacji multikryterialnej, gdy zmniejszenie liczby kryteriów może być niezbędne dla umożliwienia efektywnego rozwiązania problemu.

### **Literatura**

- [1] Łubkowski K., Zawora J.: Optymalizacja impulsowej obróbki elektrochemicznej. Materiały niniejszej konferencji.
- [2] Pogorzelski W.: Wagowo-korelacyjna skalaryzacja wielowymiarowej jakości typu rozmiar o normalnych rozkładach brzegowych. Wiadomości Statystyczne, nr 8, 1991, s.16-21.
- [3] Pogorzelski W. Brzozowski T.: Optymalizacja wielofunkcyjnych systemów technicznych metodą wagowo-korelacyjną. Materiały XI Ogólnopolskiej Konferencji "Poliptymalizacja i komputerowe wspomaganie projektowania Mielno 1993". Zeszyt Naukowy WM WSI Koszalin, Nr 17, 1994, s. 45-52.

### **Streszczenie**

W celu znalezienia optimum wielokryterialnego zastosowano ocenę kompromisową wynikającą z metody wagowo-korelacyjnej. Ranking przeprowadzono przy wszystkich czterech kryteriach, a następnie przy trzech (z pominięciem kryterium, które miało niemal zerowe motywacje dla rankingu cztero-aspektowego). W obu przypadkach wyniki były bardzo zbliżone.

### **RANKING OF VARIANTS OF THE PULSE ELECTROCHEMICAL MACHINING**

#### **Summary**

In order to determine multicriterial optimum for a given set of samples, a compromise estimation based on weight-correlation method has been used. Ranking was carried out for 4 criteria and then for 3 (one criterion with near zero motivation was rejected). In both cases results were very similar.

## WSPOMAGANY KOMPUTEROWO DOBÓR WARUNKÓW PRACY KRIOMAGNESU W STANACH PRZEJŚCIOWYCH

### 1. Wstęp

Analiza pracy uzwojeń w stanach przejściowych, związanych z awaryjnym lub celowym rozładowaniem energii, jest koniecznym etapem w projektowaniu elektromagnesów nadprzewodnikowych. Niekontrolowane wydzielenie się w postaci ciepła znacznej energii pola magnetycznego, jaką posiada uzwojenie w stanie ustalonym, może spowodować lokalne przegrzanie zwojów, stopienie izolacji, a nawet zniszczenie całego uzwojenia - także wskutek przepięć i nadmiernych sił elektrodynamicznych działających na zwoje [8].

Bezpieczny przebieg procesu przejściowego w uzwojeniu nadprzewodnikowym wymaga znalezienia zbioru optymalnych wartości warunków początkowych i brzegowych uzwojenia, przy których spełnione są narzucone przez projektanta różnorodne ograniczenia. Zazwyczaj kryteria oceny osiągniętych efektów są przeciwstawne i wyrażone w różnych jednostkach, co znacznie utrudnia znalezienie właściwego rozwiązania.

W wyniku obliczeń komputerowych uzyskanych z modelu matematycznego stanów przejściowych uzwojenia nadprzewodnikowego [3,7] otrzymuje się zbiór rozwiązań dopuszczalnych o dużej liczebności.

W pracy, do analizy procesów przejściowych, zostanie wykorzystana wielokryterialna metoda poszukiwania rozwiązań reprezentatywnych w oparciu o metrykę minimaxową z wagami [5].

### 2. Model stanów przejściowych uzwojenia nadprzewodnikowego

W celu uzyskania przebiegów podstawowych wielkości fizycznych w stanach przejściowych uzwojenia nadprzewodnikowego opracowano model matematyczny tych stanów (rys. 1) [7]. Model ten wiąże proces przejściowy zanikania nadprzewodnictwa z propagacją strefy rezystywnej w uzwojeniu.

Strefa rezystywna w nadprzewodzącym uzwojeniu zostaje lokalnie zainicjowana impulsem cieplnym, mechanicznym, elektrycznym lub magnetycznym. Przekroczenie wartości krytycznej temperatury  $T_c(B, J)$  ( $B$  - indukcja,  $J$  - gęstość prądu) w danym punkcie uzwojenia powoduje, że punkt ten przechodzi gwałtownie od stanu nadprzewodzącego (o zerowej rezystywności) do stanu rezystywnego (o bardzo dużej rezystywności). Prąd uzwojenia, płynący w stanie nadprzewodzenia włóknami nadprzewodnika w przewodzie kompozytowym, zaczyna lokalnie być bocznikowany

---

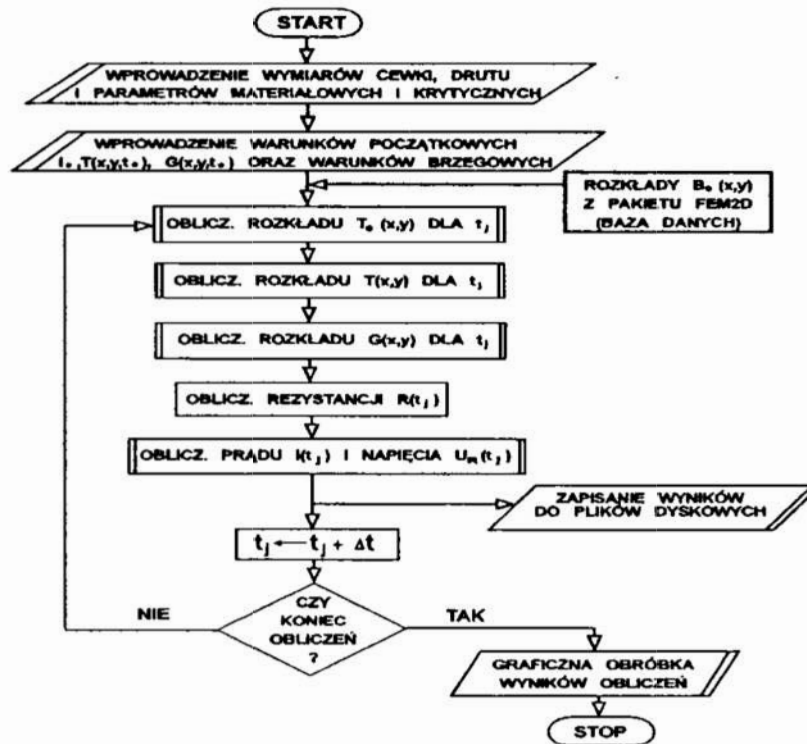
\*Katedra Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska, E-mail: MAGWD@AKROPOLIS.POL.LUBLIN.PL  
Wydz. Zarządzania i Podstaw Techniki, ul. Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin

\* Katedra Podstaw Elektrotechniki, Politechnika Lubelska, E-mail: PAWELS@ELTECOL.POL.LUBLIN.PL



przez miedzianą matrycę, w której umieszczone są te włókna.

Warunki dalszej propagacji strefy rezystywnej w uzwojeniu uzależnione są od chwilowego rozkładu temperatury roboczej  $T(x,y,t)$ , temperatury krytycznej  $T_c(x,y,t)$  i gęstości mocy cieplnej  $G(x,y,t)$ .



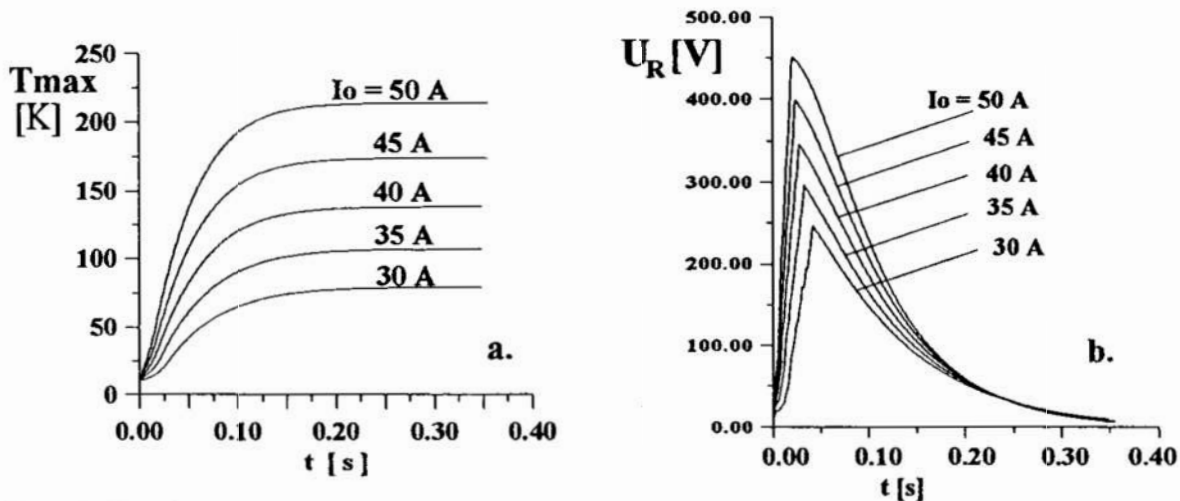
Rys. 1. Schemat blokowy programu PROPAGACJA do obliczeń stanów przejściowych uzwojenia nadprzewodnikowego.

Fig.1. Flow chart of PROPAGACJA code for transient computations of superconducting winding.

Na rys.1 przedstawiono ideowy algorytm obliczeń komputerowych stanów przejściowych. Po wprowadzeniu wymiarów cewki, drutu nadprzewodnikowego oraz parametrów materiałowych i krytycznych poszczególnych elementów uzwojenia, następuje wprowadzenie warunków początkowych i warunków brzegowych. Do warunków początkowych należy wartość  $I_0$  prądu uzwojenia, rozkład temperatury roboczej  $T(x,y,t_0)$  oraz gęstości mocy cieplnej  $G(x,y,t_0)$  w chwili zapoczątkowania stanu przejściowego. Warunki brzegowe typu Dirichleta lub mieszane określone są dla bocznych powierzchni uzwojenia, które chłodzone są cieczą kriogeniczną (helem) o temperaturze ok. 4 K. Wszystkie te parametry i warunki w różny sposób wpływają na charakterystyki procesu przejściowego w uzwojeniu. Dlatego też mogą one być zmiennymi decyzyjnymi albo parametrami w zadaniu optymalizacji wielokryterialnej stanów przejściowych.

W dalszej części algorytmu dostarczane są z zewnętrznej bazy danych dwuwymiarowe rozkłady  $B_0(x,y)$  indukcji magnetycznej w nadprzewodnikowym

uzwojeniu cylindrycznym, które wykorzystywane są do obliczania chwilowych rozkładów temperatury krytycznej  $T_c(x,y,t)$  nadprzewodnika w uzwojeniu. Chwilowe rozkłady temperatur roboczych obliczane są metodą ADI [3] z dwuwymiarowego równania dyfuzji cieplnej. Otrzymane rozkłady źródła ciepła  $G(x,y,t)$  umożliwiają wyznaczenie rezystancji  $R(t)$  uzwojenia, będącej parametrem równania różniczkowego obwodu elektrycznego uzwojenia. Z równania tego oblicza się chwilową wartość prądu i napięcia strefy rezystywnej.



Rys. 2. Przebiegi czasowe: a) temperatury maksymalnej uzwojenia i b) napięcia strefy rezystywnej dla różnych wartości prądu początkowego  $I_0$ .

Fig. 2. Time functions of: a) maximal temperature of winding and b) resistive zone voltage for various values of initial current  $I_0$ .

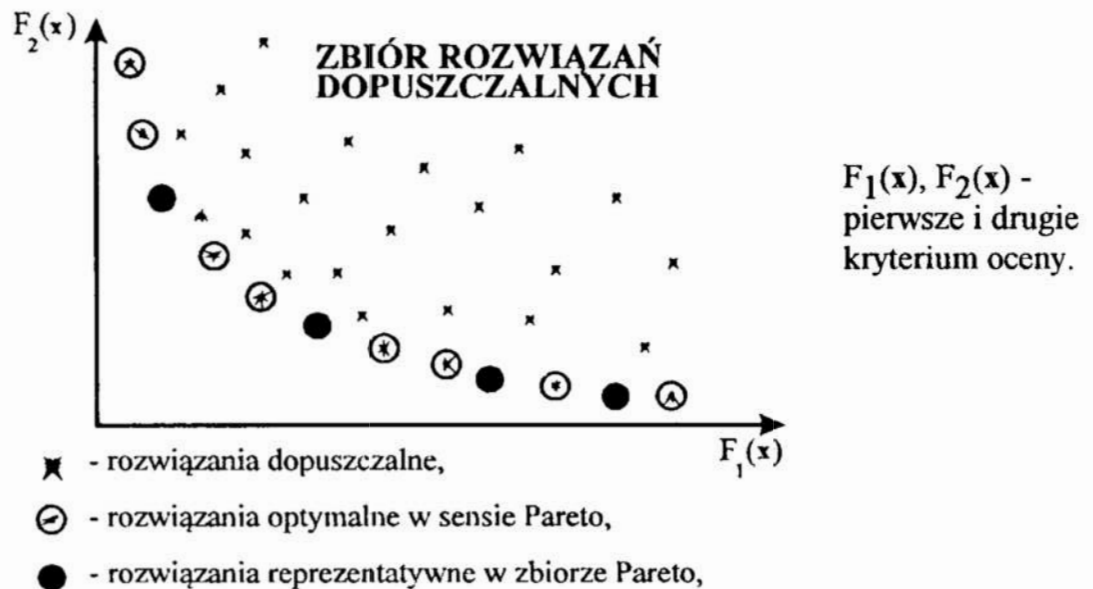
Zapewnienie bezpiecznego przebiegu procesu przejściowego wymaga m.in. doboru takiej wartości prądu początkowego  $I_0$  (rys. 2a), dla której minimalizowane są: czas  $t_a$ , w którym całe uzwojenie zostanie objęte strefą rezystywną, napięcie strefy rezystywnej  $U_R$  oraz temperatura maksymalna uzwojenia w różnych chwilach procesu (rys. 2b). Postawione zadanie optymalizacji wielokryterialnej zostanie zrealizowane w pracy metodą poszukiwania rozwiązań reprezentatywnych.

### 3. Metoda poszukiwania rozwiązań reprezentatywnych

Metoda opiera się na analizie relacji dominowania w zbiorze wektorowych wartości funkcji kryterium a następnie definiowania rozwiązań kompromisowych. Pierwszym etapem zastosowanej metody analizy polioptymalnej [5], jest wyznaczenie rozwiązań niezdominowanych (optymalnych w sensie Pareto) tzn. takich, że żadne rozwiązanie nie wyklucza innego. Rozwiązanie nazywamy optymalnym w sensie Pareto, jeżeli nie ma możliwości poprawienia wartości żadnego z kryteriów oceny  $F_1, F_2, \dots, F_m$  bez konieczności pogorszenia wartości któregośkolwiek z pozostałych [1]. Element  $\bar{x}^* \in X$  nazywamy rozwiązaniem optymalnym w sensie Pareto wtedy i tylko wtedy, gdy w  $X$  nie istnieje taki element  $\bar{x}$ , że dla każdego  $m \in N$ ,  $F_m(\bar{x}) \geq F_m(\bar{x}^*)$  oraz

istnieje  $l \in N$ , takie że  $F_l(\bar{x}) > F_l(x^*)$ , gdzie:  $X$  - niepusty zbiór decyzji dopuszczalnych, wg [1].

Ze względu na fakt, że liczebność zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto może być dość znaczna, powstaje potrzeba zastosowania nowego narzędzia przydatnego do dalszej wielokryterialnej analizy. Wydaje się, że podejście zastosowane w pracy [4] jest przydatne również do problemu opisanego w rozdziale 2. Ideę metody poszukiwania rozwiązań reprezentatywnych przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Idea reprezentacji rozwiązań dla dwukryterialnej minimalizacji.

Fig. 3. Idea of representative solutions for bicriterion minimization.

Metoda poszukiwania podzbioru rozwiązań reprezentatywnych składa się z dwóch faz. W fazie 1 wyznaczamy tylko jedno rozwiązanie w sensie minimaxowym  $F^*(x) = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)]^T$ . W fazie 2 możemy uzyskać kilka rozwiązań reprezentatywnych  $F^{*1}(x), F^{*2}(x), \dots, F^{*n}(x)$  w zależności od wyboru sposobu zakończenia procedury poszukiwawczej. W metodzie min-max z wagami [6], podczas interakcyjnej pracy z komputerem przedstawiamy własne preferencje dotyczące istotności poszczególnych kryteriów oceny  $F_i(x)$ , którymi (w tej metodzie) są wagi przypisywane względnym odchyleniom od rozwiązań minimalnych. Wartościom wag, podanym przez prowadzącego analizę, komputer przypisuje rozwiązanie optymalne.

Dla metody min-max z wagami jest to rozwiązanie  $x^* \in X$ , dla którego:

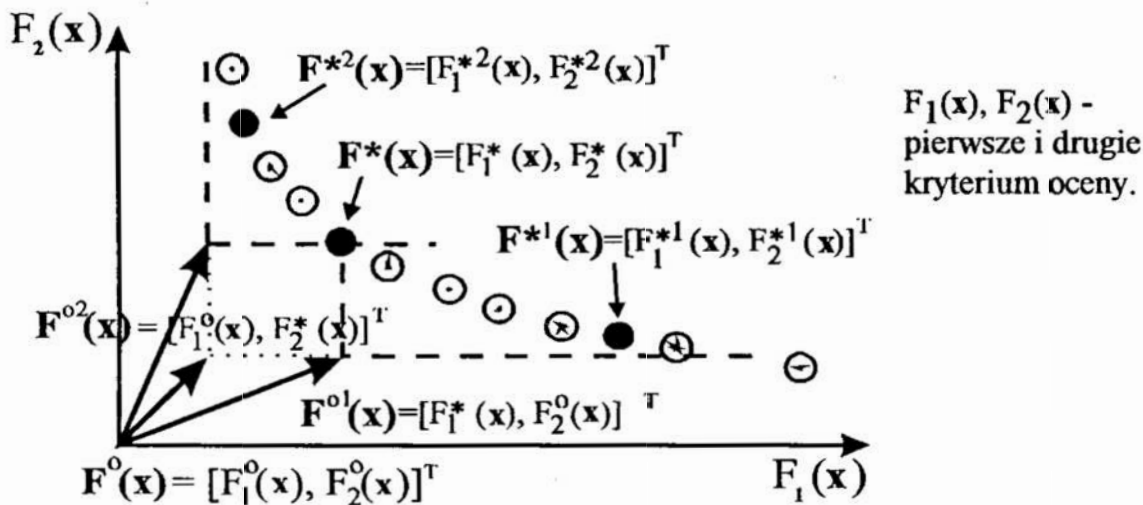
$$\xi(x^*) = \min_{x \in X} \max_{i \in I} \{w_i \lambda_i(x)\} \quad (1)$$

gdzie:  $\lambda_i(x)$  - wartość względnego przyrostu  $i$ -tego kryterium oceny

$$\lambda_i(\mathbf{x}) = \frac{|F_i^o(\mathbf{x}) - F_i(\mathbf{x})|}{|F_i^o(\mathbf{x})|} \quad (2)$$

$w_i$  - współczynnik wagowy  $i$ -tego kryterium oceny,  $\sum w_i = 1$ ,  
 $I = \{1, 2, \dots, k\}$  - zbiór indeksów rozpatrywanych kryteriów oceny,  
 $F_i^o(\mathbf{x})$  -  $i$ -ta składowa wektora idealnego.

W przypadku, gdy wszystkie składowe wektora kryteriów są minimalizowane, wektor idealny  $F^o(\mathbf{x})$  tworzymy poprzez poszukiwanie niezależnego minimum dla każdego kryterium oceny:  $F^o(\mathbf{x}) = [F_1^o(\mathbf{x}), \dots, F_i^o(\mathbf{x}), \dots, F_k^o(\mathbf{x})]^T$ . Jego elementy są określone przez:  $F_i^o(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{x} \in X} F_i(\mathbf{x})$ . Dla dwukryterialnej oceny, przy dążeniu do osiągnięcia minimalnych wartości, działanie metody przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Rozwiązania reprezentatywne ze zbioru rozwiązań Pareto dla dwukryterialnej minimalizacji.

Fig. 4. The representative solutions in the Pareto set for bicriterion minimization.

#### 4. Przykłady analiz polioptymalnych

W oparciu o model matematyczny przedstawiony w rozdz. 2 wykonano przykładowe obliczenia (tab. 1) wielkości fizycznych (kryteriów optymalizacji), opisujących stany przejściowe dla różnych wartości prądu początkowego (zmienną decyzyjną). Analizę wykonano wielokrotnie przy różnych preferencjach dla poszczególnych kryteriów oceny. Przyjęto następujące kryteria:

- $F_1 = t_a$  [s] - czas objęcia całego uzwojenia przez strefę rezystywną,
- $F_2 = U_R$  [V] - napięcie strefy rezystywnej,
- $F_3 = T_a$  [K] - maks. temperatura uzwojenia po czasie  $t_a$ ,
- $F_4 = T_1$  [K] - maks. temperatura uzwojenia po czasie  $t_1 = 0.1$  [s].

Wszystkie kryteria są minimalizowane. Wprowadzono następujące wartości progowe dla poszczególnych kryteriów:  $F_{1\max} = 0.7$  [s],  $F_{2\max} = 450$  [V],  $F_{3\max} = 65$  [K],  $F_{4\max} = 200$  [K]. Jeśli analizowane rozwiązanie dopuszczalne przekroczy podaną wartość progową to zostaje odrzucone.

Wyznaczony zbiór rozwiązań o wartościach kryteriów oceny optymalnych w sensie Pareto liczył 13 elementów. Wektor idealny dla tych rozwiązań jest następujący:  $[0.022, 217.1, 41.4, 48.2]^T$ . Wyznaczone w pierwszym etapie rozwiązanie w sensie min-max to rozwiązanie nr 5 -  $[0.038, 265.5, 39.4, 75.2]^T$  (tab. 1). Wyznaczone w drugim etapie rozwiązanie min-max to rozwiązania: nr 6 -  $[0.034, 286.0, 41.4, 85.2]^T$ , nr 7 -  $[0.032, 305.5, 45.1, 96.0]^T$ , nr 8 -  $[0.030, 325.5, 48.4, 107.6]^T$ .

Tab. 1. Wartości kryteriów i zmiennej decyzyjnej.

Table 1. Values of criteria and decision variable.

Nr rozw.	Zmienna decyzyjna	Kryteria oceny			
		F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
	I <sub>0</sub> [A]	t <sub>a</sub> [s]	U <sub>R</sub> [V]	T <sub>a</sub> [K]	T <sub>1</sub> [K]
1	27.0	0.062	217.1	31.4	48.2
2	28.0	0.052	226.5	32.9	54.6
3	29.0	0.046	236.0	34.9	60.2
4	30.0	0.042	246.2	36.1	65.2
5	32.0	0.038	265.5	39.4	75.0
6	34.0	0.034	286.0	41.4	85.2
7	36.0	0.032	305.5	45.1	96.0
8	38.0	0.030	325.5	48.4	107.6
9	40.0	0.028	346.0	51.2	119.9
10	42.0	0.026	367.2	53.6	132.9
11	44.0	0.025	387.0	57.4	146.7
12	46.0	0.023	409.1	58.9	161.1
13	48.0	0.022	429.7	62.0	176.1
14	50.0	0.021	451.0	65.0	192.0
15	51.0	0.020	461.3	65.4	200.6
16	52.0	0.019	472.2	65.0	209.2
17	53.0	0.018	482.5	63.8	217.8

Dla tych samych kryteriów ocen, które wykorzystano powyżej i przy tych samych wartościach progowych przeprowadzono analizę min-max z wagami dla następujących wartości wag poszczególnych kryteriów. Przyjęto, zgodnie ze wzorem (2), że suma wag równa się jeden - ich wartości wynosiły dla poszczególnych kryteriów odpowiednio:  $w_1 = 0.30$ ,  $w_2 = 0.40$ ,  $w_3 = 0.20$ ,  $w_4 = 0.10$ . Przyjęte wartości wag wynikają z ważności rozpatrywanych kryteriów. Liczebność zbioru Pareto i wektor idealny pozostały oczywiście te same. Wyznaczone w pierwszym



etapie rozwiązanie w sensie min-max z wagami to rozwiązanie nr 7 - [0.032, 305.5, 45.1, 96.0]<sup>T</sup>. Wyznaczone w drugim etapie rozwiązania w sensie min-max z wagami to rozwiązania: nr 5 - [0.038, 265.5, 39.4, 75.2]<sup>T</sup>, nr 8 - [0.030, 325.5, 48.4, 107.6]<sup>T</sup>, nr 9 - [0.28, 345.5, 51.2, 119.9]<sup>T</sup>. Z uwagi na wagi przypisane poszczególnym kryteriom oceny uzyskano w tej analizie inne numery rozwiązań.

Przeprowadzono powtórnie analizę min-max z wagami dla nowych wartości wag:  $w_1 = 0.30$ ,  $w_2 = 0.45$ ,  $w_3 = 0.15$ ,  $w_4 = 0.10$ . Wyznaczone w pierwszym etapie rozwiązanie w sensie min-max z wagami to rozwiązanie nr 6 - [0.034, 286.0, 41.4, 85.2]<sup>T</sup>. Wyznaczone w drugim etapie rozwiązanie w sensie min-max z wagami to rozwiązania: nr 4 - [0.042, 246.2, 36.1, 5.2]<sup>T</sup>, nr 8 - [0.030, 325.5, 48.4, 107.6]<sup>T</sup>, nr 7 - [0.032, 305.5, 45.1, 96.0]<sup>T</sup>, nr 9 - [0.028, 345.5, 51.2, 119.9]<sup>T</sup>.

Dzięki zastosowanej metodzie w wyniku analizy polioptymalnej uzyskujemy nie jedno rozwiązanie kompromisowe, lecz pewien podzbiór rozwiązań. Przeprowadzona analiza pokazuje, że zmiana preferencji przypisywanych kryteriom oceny doprowadza do zmiany rozwiązania kompromisowego: odpowiednio rozwiązanie nr 5, nr 7, nr 6. Może to prowadzić do istotnych sporów w wyborze preferencji, a co za tym idzie rozwiązania kompromisowego.

Ponieważ po zmianie preferencji niektóre rozwiązania powtarzają się, można więc poszukiwać takich rozwiązań, które będą najmniej wrażliwe na przypisywane poszczególnym kryteriom preferencje. Z przeprowadzonej analizy wynika, że rozwiązania nr 7 i nr 8 występowały po 3 razy, zaś rozwiązania nr 5, nr 6, nr 9 po 2 razy. Można więc zaryzykować stwierdzenie, że rozwiązania nr 7 (dla  $I_0 = 36$  A) i nr 8 ( $I_0 = 38$  A) są rozwiązaniami najlepszymi dla całego zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto.

## 5. Wnioski

Zastosowana metoda analizy polioptymalnej w znacznym stopniu eliminuje ograniczenia wynikające ze specyfiki innych metod oceny (np. konieczność stosowania wartości unormowanych) oraz zwiększa możliwości interpretacji uzyskiwanych wyników. Proces poszukiwania podzbioru rozwiązań reprezentatywnych jest realizowany interakcyjnie: można powtarzać go wielokrotnie, zmieniając liczbę analizowanych kryteriów, podawać preferencje  $w_i$ , które odzwierciedlają wagę analizowanych kryteriów w opinii projektanta.

Zaproponowana metoda umożliwi projektantowi uwzględnienie wielu kryteriów oceny stanów przejściowych przy wyborze właściwych warunków pracy uzwojenia nadprzewodnikowego. W zaprezentowanych przykładach ograniczono się do obliczeń tylko z jedną zmienną decyzyjną. W rzeczywistości jednak na osiągnięcie wymaganego przebiegu procesu przejściowego mogą mieć wpływ również takie czynniki, jak: parametry materiałowe uzwojenia, parametry krytyczne drutu nadprzewodnikowego, warunki wymiany ciepła pomiędzy uzwojeniem a układem chłodzenia oraz początkowy rozkład i temperatura strefy rezystywnej w uzwojeniu.

Rozszerzenie analizy polioptymalnej o dodatkowe zmienne decyzyjne umożliwi w przyszłości precyzyjniejsze i bardziej wszechstronne projektowanie warunków pracy uzwojeń nadprzewodnikowych.



## Literatura

1. Ameljanczyk A.: *Optymalizacja wielokryterialna w problemach sterowania i zarządzania*. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1984.
2. Janowski T., Surdacki P.: *Behaviour of Superconducting Magnets During Quenching Processes*. Proceeding of International Symposium on Electromagnetic Fields, Southampton (UK) Sept. 18-20, pp. 355-358, 1991.
3. Janowski T., Surdacki P.: *Computations of Superconducting Magnet's Quench Processes*. Proc. of the Second International Conference on Computation in Electromagnetics CEM'94, Nottingham (UK), 12-14 April, pp. 219-222, 1994.
4. Montusiewicz J., Osyczka A., Zamorski J.: *A Decomposition Method for Multicriteria Optimization and its Application to Machine Tool Spindle Design*. in: *Multicriteria Design Optimization - Procedures and Applic.*, H. Eschenauer, J. Koski, A. Osyczka (editors), Springer-Verlag 1990.
5. Montusiewicz J.: *Pewna metoda poszukiwania rozwiązań reprezentatywnych*. Zeszyty Naukowe WSIInż. w Koszalinie, WM 16, pp. 46-69, Koszalin 1994.
6. Osyczka A.: *Multicriterion Optimization in Engineering with FORTRAN Programs*. John Wiley and Sons, Chichester 1984.
7. Surdacki P.: *Model matematyczny zanikania nadprzewodnictwa w kriomagnesie*. Prace XVII SPETO, pp. 277-282, Gliwice - Ustroń 1994 .
8. Wilson M.N.: *Superconducting Magnets*. Clarendon Press, Oxford 1983.

## Streszczenie

W pracy opisano komputerowo wspomaganie obliczanie wartości wielkości fizycznych w stanach przejściowych uzwojenia nadprzewodnikowego kriomagnesu. Zaprezentowano ideę metody poszukiwania rozwiązań kompromisowych ze zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto w oparciu o metrykę min-max z wagami. Przeprowadzono analizę wielokryterialną wartości prądu roboczego uzwojenia przy różnych preferencjach dla poszczególnych kryteriów.

## COMPUTER AIDED PERFORMANCE DESIGN OF CRYOMAGNET IN TRANSIENTS

### Summary

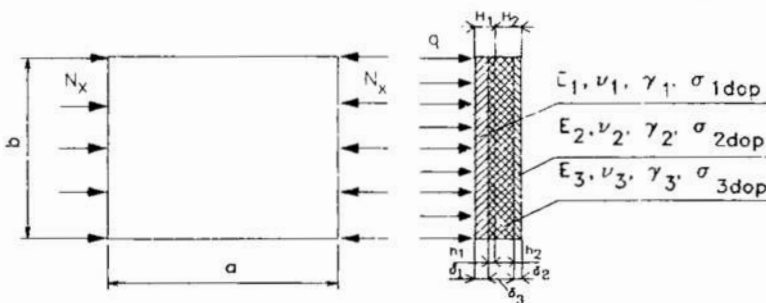
In this paper, computer aided computation of cryomagnet physical values in transients is described. The idea of a method for selecting compromising solutions from a Pareto optimal set, based on the weight min-max metric, is presented. Multicriterion analysis is applied to solve the problem of cryomagnet's superconducting winding working current choice at various preferences for each criterion.

## OPTYMALIZACJA WEKTOROWA PŁYT TRÓJWARSTWOWYCH

### 1. Wstęp

Rozwój teoretycznych podstaw cienkościennych konstrukcji trójwarstwowych oraz technologii ich wytwarzania jest ściśle związany z rozwojem przemysłu lotniczego po II Wojnie Światowej. W chwili obecnej konstrukcje te znajdują również szerokie zastosowanie w budownictwie oraz różnych gałęziach przemysłu. Główną zaletą konstrukcji trójwarstwowych (przekładkowych) jest ich stosunkowo duża wytrzymałość, mała masa, odpowiednio dobrane własności izotermiczne, izoakustyczne oraz tłumienie drgań. Podstawową wadą tych konstrukcji jest ich podatność na utratę stateczności oraz stosunkowo trudna technologia wykonania. Jedną z dziedzin coraz szerszego zastosowania konstrukcji trójwarstwowych jest transport samochodowy (pojazdy izotermiczne), gdzie konstrukcje trójwarstwowe będąc elementem nadwozia przenoszą obciążenia zginające i skręcające, spełniając jednocześnie rolę izolatora termicznego [7].

Typowa konstrukcja trójwarstwowa składa się z dwóch cienkich warstw nośnych wykonanych z tworzywa konstrukcyjnego o wysokich własnościach wytrzymałościowych (stal, dural, tworzywa sztuczne, kompozyty), przedzielonych warstwą wypełniającą o odpowiedniej konstrukcji (np. plaster miodu) lub wykonanej z odpowiednich materiałów (np. spienione pianki poliuretanowe). W pracach [2], [3] i [4] przedstawiono wielokryterialną optymalizację trójwarstwowych powłok walcowych poddanych osiowemu ściskaniu i ciśnieniu bocznemu. W niniejszej pracy przedstawiono zadanie optymalizacji wielokryterialnej trójwarstwowych płyt osiowo ściskanych i obciążonych ciśnieniem poprzecznym. Zadanie to jest prostsze obliczeniowo w porównaniu z powłokami ale o dużym znaczeniu praktycznym. Płyty trójwarstwowe są bowiem coraz szerzej stosowane w budownictwie oraz w przemyśle produkującym środki transportu samochodowego, lotniczego i morskiego. Celem pracy jest zwrócenie uwagi konstruktorów na zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej w projektowaniu płyt trójwarstwowych.



Rys. 1 Model prostokątnej płyty trójwarstwowej  
 Fig.1 Model of rectangular sandwich plate

W pracy przedstawiono dwa zadania optymalizacji wielokryterialnej płyt trójwarstwowych. W pierwszym zadaniu kryteriami optymalizacyjnymi są masa płyty oraz ugięcie środka płyty, w drugim zadaniu masa oraz strumień ciepła. Wyniki obliczeń numerycznych były częściowo prezentowane w pracach [3] i [5].

## 2. Model matematyczny płyty trójwarstwowej

Model trójwarstwowej płyty obciążonej siłą ściskającą  $N_x$  oraz ciśnieniem  $q$  przedstawia rysunek 1. Ugięcie środka płyty obliczyć można z zależności [1] [6]:

$$w = \frac{5}{384} \frac{qb^4}{D} m_1, \quad (1)$$

gdzie:  $m_1 = c_1 + k c_2$ ,

$c_1, c_2$  - współczynniki zależne od wymiarów płyty, stosunku  $b/a$  i sposobu podparcia płyty,

$k$  - współczynnik ścinania płyty,

$D$  - sztywność płyty na zginanie.

Dla płyty kwadratowej ( $b/a = 1$ ), podpartej przegubowo na czterech krawędziach, w oparciu o [6] przyjęto  $c_1 = 0.3$ ,  $c_2 = 0.575$ .

Dla obliczenia współczynnika ścinania płyty  $k$  oraz sztywności  $D$  wprowadzono następujące zależności:

$B = B_1 + B_2 + B_3$  - sztywność płyty na rozciąganie,

$$B_i = \frac{E_i \delta_i}{1 - \nu_i^2}, \quad i = 1, 2, 3; \quad B_0 = B_1 + B_2 + \frac{1}{3} B_3 - \frac{1}{B} (B_1 - B_2)^2,$$

$$k = \frac{\pi^2 B_0 \delta_3}{4 G_3 b^2} \quad - \text{współczynnik ścinania płyty}, \quad (2)$$

$$h_0 = \frac{B_1}{2B} (\delta_1 + \delta_2) - \frac{B_2}{2B} (\delta_2 + \delta_3),$$

$$h_1 = \frac{1}{2} \delta_3 - h_0, \quad h_2 = \frac{1}{2} \delta_3 + h_0,$$

$$H_1 = h_1 + \frac{1}{2} \delta_1, \quad H_2 = h_2 + \frac{1}{2} \delta_2,$$

$$D_{1,2} = \frac{E_{1,2} \delta_{1,2}^3}{12(1 - \nu_{1,2}^2)}, \quad D_3 = \frac{E_3 (h_1^3 + h_2^3)}{3(1 - \nu_3^2)},$$

$D = D_1 + D_2 + D_3 + B_1 H_1^2 + B_2 H_2^2$  - sztywność płyty na zginanie,

$$D' = B_1 h_1 H_1 + B_2 h_2 H_2 + D_3.$$

Obciążenie krytyczne obliczane było z zależności [1]:

$$N_{kr} = \frac{\pi^2 D}{b^2} m_1. \quad (3)$$

Współczynnik  $m_1$  określony jest następująco:

$$m_1 = \frac{A_1^2 \left( 1 + \frac{1-\nu}{2} A_2 \right)}{1 + \frac{1-\nu}{2} A_2 + k(1+n^2) + \frac{1-\nu}{2} k^2 A_1^2 n^2},$$

gdzie:  $A_1 = \left( \frac{\lambda}{n} + \frac{n}{\lambda} \right)$ ,  $A_2 = \left( \frac{n^2}{\lambda^2} k + \lambda^2 k \right)$ ,  $\lambda = \frac{a}{b}$ ,  $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ .

Parametr  $n$  jest liczbą naturalną, określającą liczbę półfal powstających w płycie w chwili utraty stateczności. W trakcie obliczeń numerycznych obciążenie krytyczne było minimalizowane ze względu na parametr  $n$ .

Dopuszczalne obciążenie krytyczne obliczano z zależności:

$$N_{\text{kr dop}} = \frac{N_{\text{kr}}}{\alpha}, \quad (4)$$

$\alpha = 1.25$  - współczynnik bezpieczeństwa.

Naprężenia w poszczególnych warstwach określono za pomocą wzorów [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_{x1} &= \frac{E_1}{1-\nu_1^2} \left[ \frac{qb^2 m_3}{8D} [-(h_1 - \delta_1)] - \frac{N_x}{B} \right], \\ \sigma_{y1} &= \frac{E_1}{1-\nu_1^2} \left[ \frac{qb^2 m_2}{8D} [-(h_1 - \delta_1)] \right], \\ \sigma_{x2} &= \frac{E_2}{1-\nu_2^2} \left[ \frac{qb^2 m_3}{8D} (h_2 + \delta_2) - \frac{N_x}{B} \right], \\ \sigma_{y2} &= \frac{E_2}{1-\nu_2^2} \left[ \frac{qb^2 m_2}{8D} (h_2 + \delta_2) \right], \\ \sigma_{x3} &= \frac{E_3}{1-\nu_3^2} \left[ \frac{qb^2 m_3}{8D} \frac{\delta_3}{2} - \frac{N_x}{B} \right], \\ \sigma_{y3} &= \frac{E_3}{1-\nu_3^2} \left[ \frac{qb^2 m_2}{8D} \frac{\delta_3}{2} \right], \\ \tau_3 &= \frac{D'}{2\delta_3 D} qb m_4. \end{aligned} \quad (5)$$

Dla płyty kwadratowej ( $b/a = 1$ ) przyjęto:  $m_2 = m_3 = 0.38$ ,  $m_4 = 0.68$  [1][6]. Naprężenia zredukowane dla każdej warstwy obliczono w oparciu o hipotezę Hubera-Misesa-Hencky'ego:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2 - \sigma_{xi}\sigma_{yi}}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (6)$$

Przedstawicne powyżej wzory mają ograniczony zakres stosowania [6]. Ważność wzoru (1) na obliczanie ugięć ograniczona jest do  $k < 10.0$ , a wzorów (5) do obliczania naprężeń do  $k \leq 1.0$ . Dodatkowo wzór (3) do wyznaczania obciążenia krytycznego ważny jest wtedy, gdy spełniony jest warunek:

$$\frac{\delta_3}{\delta_1 + \delta_2} > 3.0. \quad (7)$$

Strumień ciepła, będący jednym z kryteriów optymalizacyjnych, dla trójwarstwowej płyty określony jest zależnością [8]:

$$Q = \frac{ab \Delta T}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \quad [\text{W}] , \quad (8)$$

gdzie:  $\Delta T$  - różnica temperatur na zewnętrznych ściankach płyty,  
 $\lambda_i$  - współczynniki przewodzenia ciepła [W/mK].

### 3. Zadanie optymalizacji wektorowej

Zadanie optymalizacji wektorowej w oparciu o koncepcję Pareto sformułowane zostało następująco:

$$\bar{Q}(\bar{x}) = [Q_1(\bar{x}), Q_2(\bar{x})] = (1 - \text{WAGA}) \cdot Q_1(\bar{x}) + \text{WAGA} \cdot Q_2(\bar{x}) \rightarrow \text{minimum} \quad (9)$$

gdzie:  $\bar{x}$  - wektor zmiennych decyzyjnych,  $\bar{x} = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3\}$ ,

$Q_1(\bar{x}), Q_2(\bar{x})$  - kryteria optymalizacyjne,

WAGA - współczynnik wagi kryteriów,  $0 \leq \text{WAGA} \leq 1.0$ .

Wektorowa funkcja celu (9) została za pomocą współczynników wagi przekształcona w funkcję skalarną. Dla różnych wartości współczynnika WAGA, wykorzystując program PARETO, (część programu MOST [2]), otrzymano zbiór rozwiązań kompromisowych. Zbiór ten, po przyjęciu dodatkowych kryteriów w postaci funkcji preferencji, pozwala na wybór rozwiązania najlepszego, optymalnego (program PREFER).

### 4. Optymalizacja wektorowa według minimum masy i minimum ugięcia

W zadaniu tym masa płyty (pierwsze kryterium) wyrażona jest zależnością:

$$Q_1 = ab(\delta_1 \gamma_1 + \delta_2 \gamma_2 + \delta_3 \gamma_3) \quad [\text{kg}] . \quad (10)$$

Ugięcie środka płyty (drugie kryterium) wyrażone jest wzorem (1):

$$Q_2 = \frac{5}{384} \frac{qb^4}{D} m_1 \quad [\text{mm}] , \quad D = D(\delta_i) , \quad i = 1, 2, 3.$$

Zbiór warunków ograniczających sformułowano następująco:

1. Dopuszczalne obciążenie krytyczne (4) dla danych wartości zmiennych decyzyjnych musi być wyższe od obciążenia zewnętrznego:

$$N_{\text{krdop}} \geq N_x .$$

2. Naprężenia zredukowane (5) w warstwach nośnych nie mogą przekroczyć wartości dopuszczalnych:

$$\sigma_{i \text{ red}} \leq \sigma_{i \text{ dop}} , \quad i = 1, 2.$$

3. Naprężenia styczne (5.1) w warstwie wypełniającej nie mogą przekroczyć wartości dopuszczalnych:

$$\tau_3 \leq \tau_{\text{dop}} .$$

4. Dla zachowania ważności wzorów na obciążenia krytyczne musi być spełniony warunek (7):

$$\frac{\delta_3}{\delta_1 + \delta_2} > 3.0 .$$

5. Dla zachowania ważności wzorów na naprężenia spełniony musi być warunek:  
 $k \leq 1.0$ .
6. Ze względów technologicznych i konstrukcyjnych spełnione muszą być warunki:  
 $\delta_{1,2} > 0$ ,  $5 \leq \delta_3 \leq 50$  mm.

Zbiór warunków ograniczających zawiera 11 ograniczeń.

Do obliczeń numerycznych przyjęto następujące dane liczbowe:

- wymiary płyty:  $a = b = 1$  m,
- warstwy nośne wykonane z duralu PA6, dla którego  $E = 7.06 \cdot 10^4$  MPa,  $\nu = 0.33$ ,  
 $\gamma = 2780$  kg/m<sup>3</sup>,  $\sigma_{dop} = 195$  MPa,
- warstwa wypełniająca wykonana z piankowego tworzywa sztucznego, dla którego  
 $E = 53$  MPa,  $G_3 = 26.5$  MPa,  $\gamma = 210$  kg/m<sup>3</sup>,  $\sigma_{dop} = 1.8$  MPa,  $\tau_{dop} = 1.2$  MPa,
- płyta obciążona jest siłą ściskającą  $N_x = 100$  kN/m oraz ciśnieniem zewnętrznym  
 $q = 0.05$  MPa.

Wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono w Tabelicy 1. W górnych wierszach podano rozwiązania oparte o dyskretny zbiór zmiennych decyzyjnych (rozwiązania "praktyczne", do zastosowania, podprogram MESP), w dolnych wierszach rozwiązania oparte na ciągłym zbiorze zmiennych decyzyjnych (rozwiązania "teoretyczne", do analizy problemu, podprogram HJ [3]).

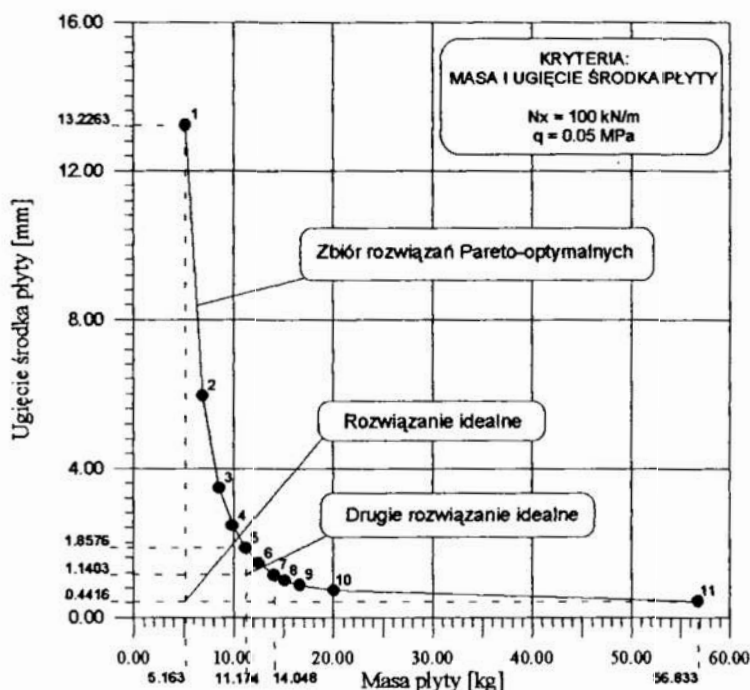
TABLICA 1

OPTYMALNE PARAMETRY PŁYTY TRÓJWARSTWOWEJ

Lp.	WA- GA	Optymalne grubości warstw			Q <sub>1</sub> [kg]	Q <sub>2</sub> [mm]	Aktywne ograniczenia
		$\delta_1$ [mm]	$\delta_2$ [mm]	$\delta_3$ [mm]			
1.	0	0.5	0.3	15.0	5.374	12.7917	Stateczność, $\sigma_1, \sigma_2$
		0.3683	0.3455	15.1364	5.163	13.2263	
2.	0.1	0.6	0.6	15.0	6.486	8.4518	
		0.3969	0.3770	22.4341	6.918	5.9366	
3.	0.2	0.5	0.5	28.0	8.660	3.3746	
		0.4740	0.4740	28.2380	8.565	3.4624	
4.	0.3	0.5	0.5	34.0	9.920	2.4413	
		0.5299	0.5300	33.1137	9.900	2.4486	
5.	0.4	0.6	0.6	37.0	11.106	1.8846	
		0.5780	0.5780	37.1736	11.174	1.8576	
6.	0.5	0.6	0.6	44.0	12.576	1.4365	
		0.6239	0.6239	43.0632	12.512	1.4512	
7.	0.6	0.7	0.7	49.0	14.182	1.1192	
		0.6700	0.6700	49.1568	14.048	1.1403	
8.	0.7	0.8	0.8	50.0	14.948	1.0147	$\delta_3$
		0.8279	0.8270	49.9998	15.101	0.9980	
9.	0.8	1.1	1.1	50.0	16.616	0.8756	$\delta_3$
		1.0991	1.0990	49.9999	16.611	0.8759	
10.	0.9	1.7	1.7	50.0	19.952	0.7378	$\delta_3$
		1.7179	1.7180	49.9999	20.052	0.7350	
11.	1.0	8.3	8.3	50.0	56.648	0.4422	$\frac{\delta_3}{\delta_1 + \delta_2}, \delta_3$
		8.3640	8.3025	49.9999	56.833	0.4416	



Parametr WAGA = 0 odpowiada optymalizacji skalarnej z masą jako kryterium, parametr WAGA = 1.0 optymalizacji skalarnej z ugięciem jako kryterium. Na rysunku 2 przedstawiono odpowiedni zbiór rozwiązań Pareto-optymalnych



Rys.2 Zbiór rozwiązań Pareto-optymalnych  
Fig. 2 Pareto-optimal solutions set

Korzystając z programu PREFER [2] ze zbioru rozwiązań Pareto-optymalnych wybrano rozwiązania preferowane. Przyjęcie funkcji preferencji min-max wskazało na rozwiązanie nr 7 (WAGA=0.6), przyjęcie funkcji preferencji jako kryterium globalnego z wykładnikiem  $p = 1$  na rozwiązanie nr 6 (WAGA=0.5), a kryterium globalnego z  $p = 2$  na rozwiązanie nr 5 (WAGA=0.4). W tej sytuacji na bazie rozwiązań nr 5 i 7 określono nowe (drugie, patrz rysunek 2) rozwiązanie idealne. Za pomocą programu PARETO dla WAGA=[0.4 ... 0.6] wyznaczono podzbiór rozwiązań Pareto-optymalnych, przedstawiony na rysunku 3. Po ponownym zastosowaniu programu PREFER za rozwiązanie optymalne przyjęto rozwiązanie z WAGA=0.49, dla którego:

$$\delta_1^* = 0.6 \text{ mm}, \delta_2^* = 0.6 \text{ mm}, \delta_3^* = 43.0 \text{ mm},$$

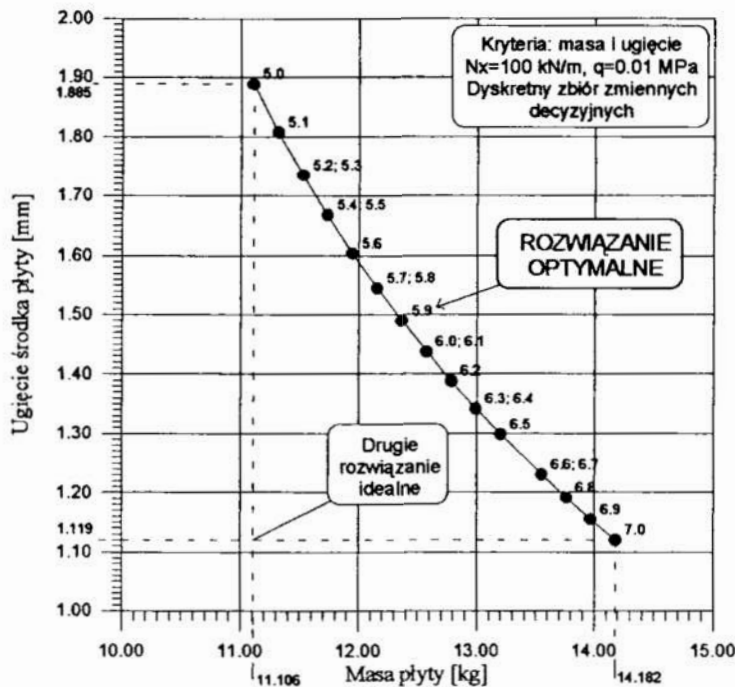
$$Q_1^* = 12.366 \text{ kg}, Q_2^* = 1.4887 \text{ mm}.$$

## 5. Optymalizacja wektorowa płyty według kryterium minimum masy i minimum strumienia ciepła

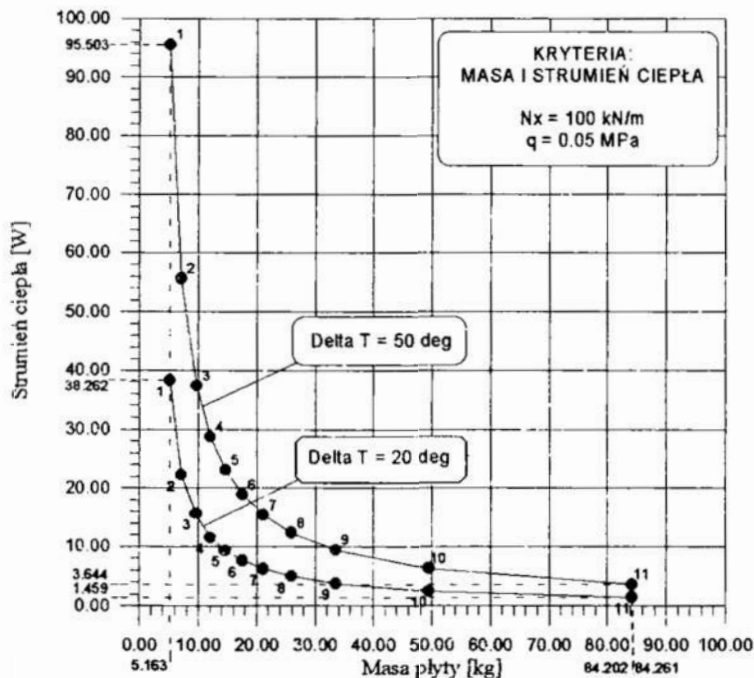
W zadaniu tym pierwsze kryterium - masa płyty, wyrażone jest za pomocą zależności (10), drugie kryterium - strumień ciepła, za pomocą zależności (8). Oprócz ograniczeń opisanych w rozdziale 4, przyjęto dodatkowe ograniczenie, a mianowicie ugięcie środka płyty obliczane za pomocą wzoru (1) nie może przekraczać 20 mm. Zmieniono też warunki technologiczno-konstrukcyjne, przyjmując:

$$0.1 \text{ mm} \leq \delta_{1,2} \leq 1.0 \text{ mm}, \quad 5.0 \text{ mm} \leq \delta_3 \leq 500 \text{ mm}.$$

Do obliczeń numerycznych przyjęto takie same dane jak w rozdziale 3, przyjmując dodatkowo  $\Delta T = 20, 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , dla duralu w  $0^\circ\text{C}$   $\lambda = 159 \text{ W/mK}$ , a w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  i  $50^\circ\text{C}$  odpowiednio  $\lambda=165$  i  $171 \text{ W/mK}$ , a dla pianki poliuretanowej  $\lambda=0.029 \text{ W/mK}$ . Wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3 Podzbiór zbioru rozwiązań Pareto- optymalnych dla WAGA=[0.4-0.6]  
 Fig. 3 Subset of the Pareto- optimal solutions set for WAGA=[0.4-0.6]



Rys. 4 Zbiór rozwiązań Pareto- optymalnych  
 Fig. 4 Pareto- optimal solutions set

Optymalne parametry powłoki dla  $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$  wynoszą (WAGA=0.5):

$$\delta_1 = 0.4 \text{ (0.2709) mm, } \delta_2 = 0.1 \text{ (0.2243) mm, } \delta_3 = 77.0 \text{ (76.9156) mm,}$$
$$Q_1 = 17,560 \text{ (17.529) kg, } Q_2 = 7.5325 \text{ (7.5407) W.}$$

Aktywnym warunkiem ograniczającym był w tym przypadku warunek wytrzymałościowy na naprężenia w warstwie nośnej  $\sigma_1$ . Dla WAGA=0 aktywny był warunek stateczności oraz warunek wytrzymałościowy na  $\sigma_1$ , dla WAGA=1.0 warunek na  $k$  (współczynnik ścinania płyty) oraz również warunek wytrzymałościowy na  $\sigma_1$ .

### Literatura:

- [1] Aleksandrow A. Ja., Briukker M. P., Kurszin A. M., Prusakow A.P.: *Pasczet triechstojnykh panelej*, Oborongiz, Moskwa 1960.
- [2] Ostwald M.: *Optymalne projektowanie trójwarstwowych konstrukcji powłokowych*, Politechnika Poznańska, Rozprawy nr 290, 1993.
- [3] Ostwald M.: *Optymalizacja wektorowa cienkościennych konstrukcji trójwarstwowych*, Zeszyty Nauk. W. Mech. nr 16, WSI Koszalin, 1994, str. 120-135.
- [4] Ostwald M.: *Optymalizacja wektorowa trójwarstwowych powłok walcowych*, Zeszyty Nauk. W. Mechanicznego, WSI Koszalin (przyjęte do druku).
- [5] Ostwald M.: *An Approach to Multicriterion Optimization of Thin-Walled Structures*, Computers & Structures (przyjęte do druku).
- [6] *Proczność, ustojczliwość, kolebania. Sprawocznik w 3 tomach*. Maszynostrojnie, Moskwa 1968.
- [7] Romanów F.: *Wytrzymałość ram i nadwozi pojazdów*, WKiŁ Warszawa, 1988.

### Streszczenie

W pracy przedstawiono dwa zadania optymalizacji dwukryterialnej trójwarstwowych kwadratowych płyt trójwarstwowych poddanych osiowemu ściskaniu i poprzecznemu ciśnieniu. W pierwszym zadaniu kryteriami są masa i ugięcie środka płyty, w drugim masa i strumień ciepła. Dla obu zadań określono oddzielne zbiory warunków ograniczających. Zadania rozwiązano za pomocą programu MOST, generującego zbiór rozwiązań optymalnych w sensie Pareto (program PARETO) oraz zbiór rozwiązań preferowanych (program PREFER). Wyniki obliczeń numerycznych dla obu zadań optymalizacyjnych przedstawiono w postaci tabel i wykresów.

### VECTOR OPTIMIZATION OF SANDWICH PLATES

In the paper two problems of two-criterial optimization of square sandwich plates under axial compression and lateral pressure are presented. In the first problem the weight of the shell and the deflection of the shell are assumed as optimization criteria, in the second one the weight of the shell and the heat flux are assumed. For both problems the separate set of the constraints were defined. The problems were solved with the help of MOST program, which generates Pareto-optimal solutions set (Program PARETO) and generates preference solutions set (program PREFER). The results of numerical calculations are presented in the form of a table and figures.

## IDENTYFIKACJA MODELU OBLICZENIOWEGO PRZĘŚLA MOSTU ZWODZONEGO W DZIDNOWIE

### 1. Wprowadzenie

Rzeczywiste zachowanie się konstrukcji często znacznie odbiega od zachowania się jej modelu obliczeniowego. Zwłaszcza w odniesieniu do obiektów wzniesionych kilkadziesiąt lat temu może to wynikać z nowych funkcji jakie te obiekty mają pełnić oraz zastosowania uproszczonych modeli obliczeniowych. Znalazło to bezpośrednie potwierdzenie w wykonanych badaniach tensometrycznych przęsła mostu zwodzonego, stanowiących jedną z podstawowych form weryfikacji modelu obliczeniowego konstrukcji mostowych.

Przedmiotem badań jest przęsło zwodzone mostu drogowego na rzece Dziwna, będącej jedną z odnóg w delcie Odry. W latach 1950-tych zbudowano tu tymczasowy most stalowo-drewniany z przęsłem zwodzonym. Po trzydziestu latach eksploatacji mostu wprowadzono ograniczenia masy i prędkości poruszania się pojazdów. Było to wynikiem zużycia drewnianych elementów przęseł stałych oraz drewnianych pali, na których posadowiono podpory mostu. W roku 1978 przeprowadzono badania tensometryczne i identyfikację modelu obliczeniowego zwodzonego przęsła mostu [1]. W latach 1990-94 przebudowano most, umieszczając go w linii starego mostu. Część stałą ustroju nośnego stanowią obecnie żelbetowe belki ciągle. Przęsło ruchome w czasie budowy zostało zmodernizowane. Przy zachowaniu istniejącej stalowej konstrukcji dźwiagarów głównych z dwuteowników walcowanych, poszerzona została jezdnia drogowa i przejście dla pieszych. Uzyskano to przez wykonanie nowego pomostu ortotropowego. Przekrój przęsła zwodzonego przed i po modernizacji pokazano na rys. 1 d, e. Zwiększony ciężar przęsła ruchomego spowodował konieczność wzmocnienia mechanizmów wyciągowych, między innymi krat wyciągowych i wieszaków. Ponadto wieszaki wyposażono w śruby rzymskie ułatwiające montaż oraz rektyfikację geometrii układu wyciągowego przęsła (rys. 1a). Pomiar geodezyjne przeprowadzone po wykonaniu wstępnego montażu wykazały w obu wieszakach brak jedności płaszczyzn obrotu normalnych do osi sworzni przegubu dolnego i górnego [2]. Duże naprężenia powstające w wieszakach spowodowały konieczność wprowadzenia dodatkowych przegubów w połączeniu wieszaków z przęsłem (rys. 1a). Po wykonaniu nowych połączeń ponownie przeprowadzono badania tensometryczne konstrukcji [3].

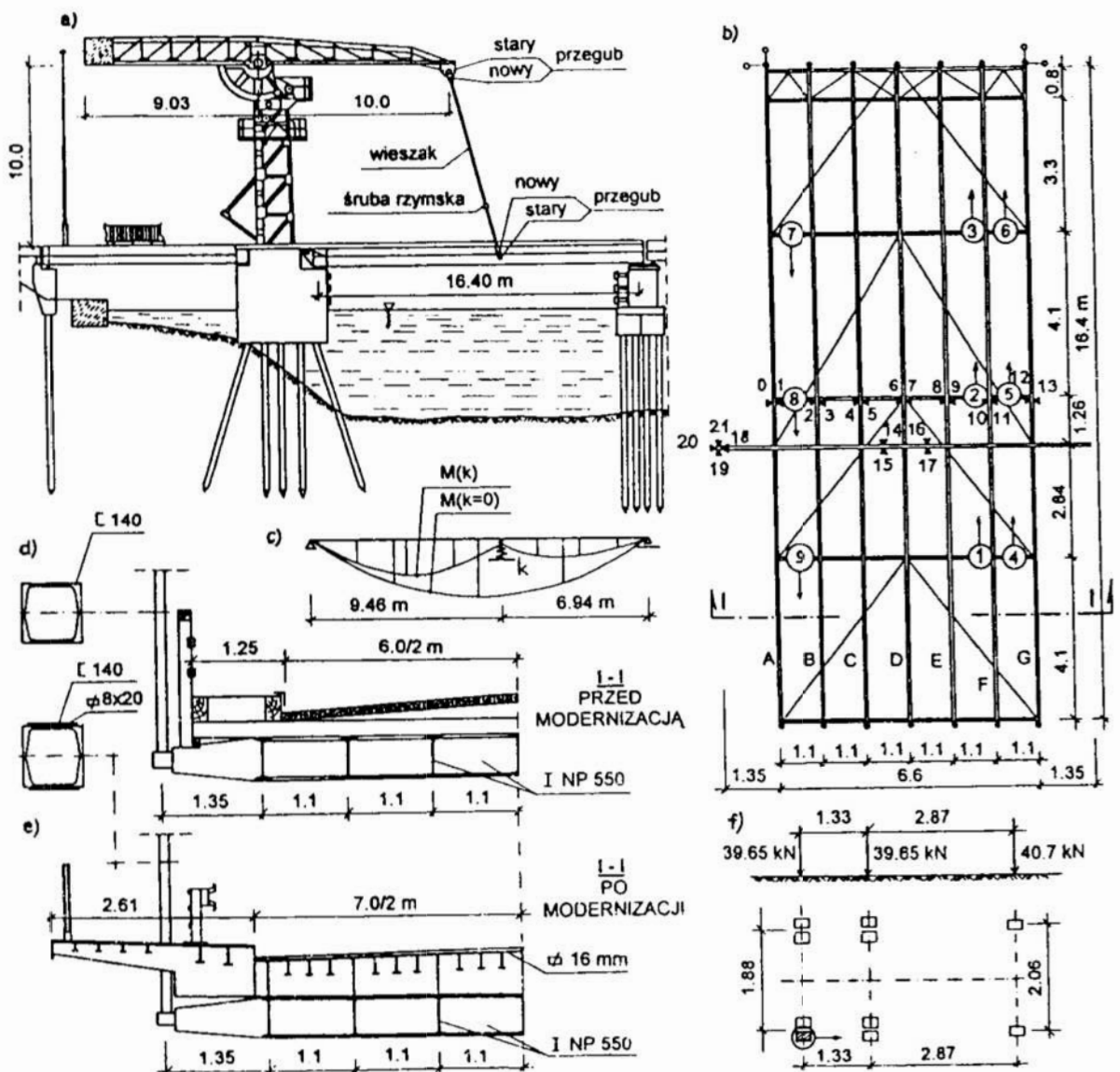
### 2. Badania tensometryczne mostu przed modernizacją

Rzut poziomy ruchomego przęsła mostu przed modernizacją pokazano na rys. 1b. Konstrukcję nośną stanowi siedem dźwiagarów stalowych stężonych poprzecznie. Przęsło podnoszone jest dwoma wieszakami o przekroju z 2 [NP 140. W linii wieszaków umieszczona jest blachownicowa belka poprzeczna. Nawierzchnia i pomost jezdni oraz poprzecznicę są z drewna.

\* \*\* Politechnika Szczecińska, Wydział Budownictwa i Architektury, 70-311 Szczecin, Al. Piastów 50

Statycznego obciążenia próbnego dokonano wywrotką o ciężarze całkowitym 120 kN. Rozstaw osi oraz poszczególne naciski opisano rys. 1f. Analizowano 9 schematów obciążeń, dla których ustawienie wyróżnionego na rys. 1f koła oraz kierunek jazdy samochodu zaznaczono na rys. 1b. Ustawienie pojazdu próbnego zaprogramowano tak, aby otrzymać maksymalne naprężenia w skrajnej i środkowej belce głównej.

Do pomiaru naprężeń zastosowano tensometrię elektrooporową [4]. Czujniki typu RL 120/20 o stałej  $k = 2.15$  przyklejono do badanych elementów klejem chemoutwardzalnym. Tensometry pomiarowe i kompensacyjne połączono z mostkiem Hottinger UPM 60 kablami ekranowanymi o długości około 20 m. Wykonano pomiar naprężeń w 7-miu belkach głównych, dwóch przekrojach poprzecznicy oraz w wieszaku. Usytuowanie i numerację tensometrów podano na rys. 1b. Badania przeprowadzono przy korzystnej pogodzie w dwóch cyklach rozdzielonych podniesieniem przęsła do góry.



Rys. 1 Schemat konstrukcji mostu przed modernizacją i po modernizacji  
 Fig. 1 Bridge construction scheme prior to modernization and after modernization



### 3. Identyfikacja podpory sprężystej przęsła zwodzonego

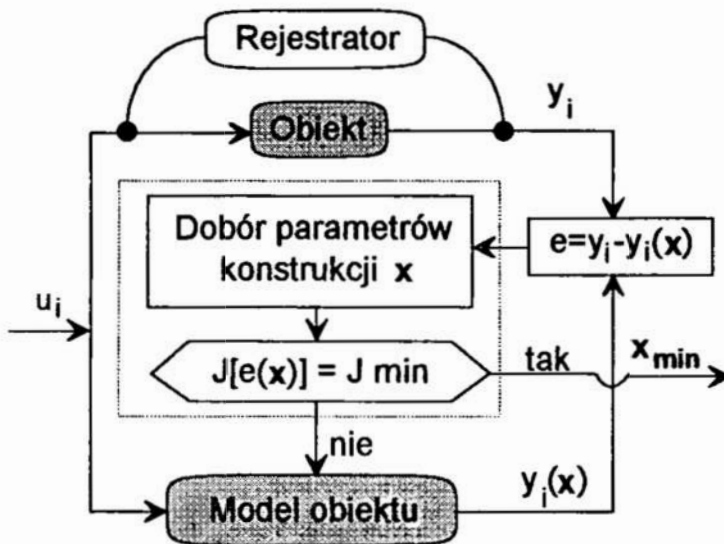
Identyfikacja jest procesem mającym na celu tworzenie modelu matematycznego konstrukcji na podstawie danych doświadczalnych dotyczących reakcji (odpowiedzi) układu na dane wymuszenie, np. obciążenie próbne [1, 5]. W pracy rozpatruje się parametryczną metodę identyfikacji charakterystyk statycznych badanej konstrukcji. Wyznaczenie najlepszego, w określonym sensie wartości parametrów, modelu matematycznego o znanej strukturze prowadzi do minimalizacji funkcjonalów typu

$$J = J[e(\mathbf{x})] = J[y - y(\mathbf{x})] = \sum_{i=1}^n [y_i - y_i(\mathbf{x})]^2 \quad (1)$$

gdzie:

$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]^T$  - wektor rozpatrywanych parametrów konstrukcji,  $e(\mathbf{x})$  - błąd (uchyb) przyjęcia równań modelu lub różnica między pomierzonymi wielkościami wyjściowymi  $y_i$  i odpowiadającymi im reakcjami modelu matematycznego  $y_i(\mathbf{x})$ .

Istotnym elementem rozwiązania problemów identyfikacji jest wybór kryteriów zgodności modelu matematycznego z obiektem rzeczywistym, czyli postać funkcjonału (1). W pracy zastosowano klasyczne kryterium metody najmniejszych kwadratów.



Rys. 2 Schemat procesu identyfikacji

Fig. 2 The identification procedure algorithm

Przeprowadzony proces identyfikacji polega na (rys. 2):

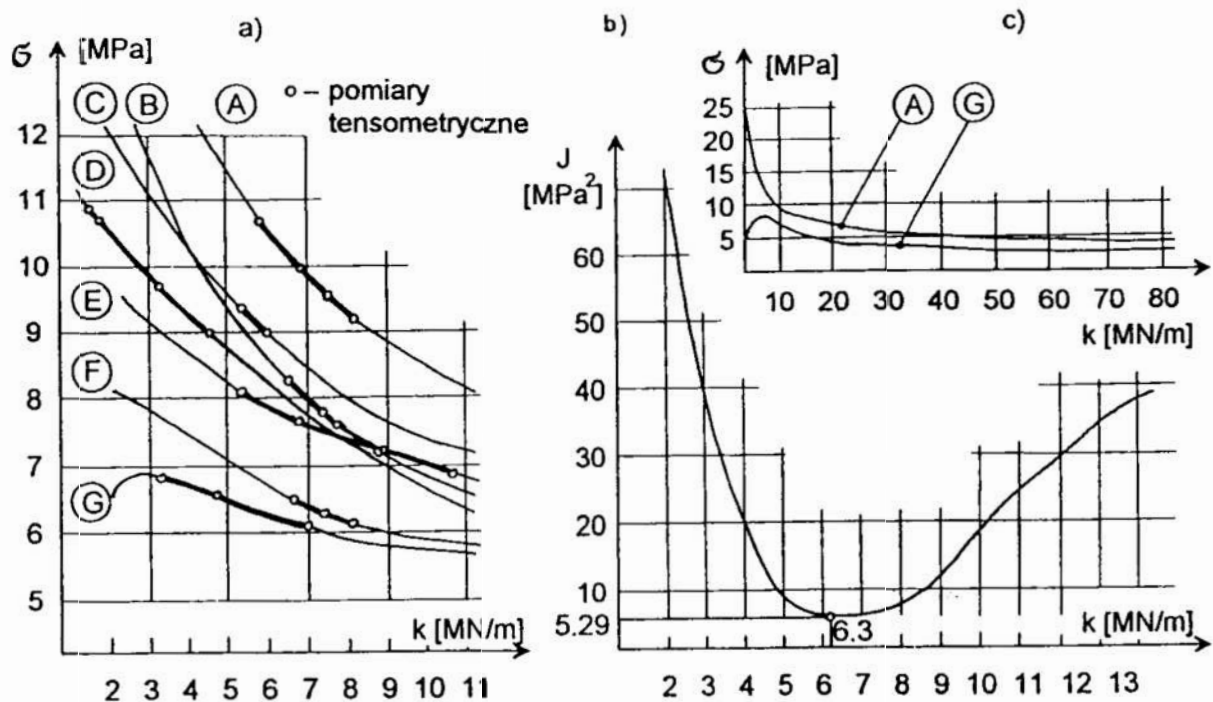
- rejestrowaniu sygnałów wejściowych  $u_i$  (obciążenia pojazdem samochodowym) i wyjściowych  $y_i$  (odkształcenia lub naprężenia w wybranych elementach konstrukcyjnych przęsła),
- tworzeniu modelu konstrukcji, w którym można w dowolny sposób zmieniać parametry  $\mathbf{x}$ ,
- porównywaniu zarejestrowanych sygnałów  $y_i$  z odpowiadającymi im wielkościami wyjściowymi modelu  $y_i(\mathbf{x})$  obliczonymi teoretycznie,

- dobieraniu parametrów modelu  $\mathbf{x}$  (zmiennych decyzyjnych zadania identyfikacji) tak, aby błąd uchybu  $e$  był równy zero, albo minimalny w sensie przyjętego kryterium.

W czasie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wyłączenie urządzenia podnoszącego, przy opuszczaniu przęsła około 1 m nad podporą stałą, powodowało wprowadzenie sprężystej podpory w linii wieszaków. Sprężystość podpory  $k$  przyjęto jako rozpatrywany parametr  $\mathbf{x}$  i określono przeprowadzając analizę identyfikacyjną. W obliczeniach statycznych zastosowano system STRAINS [6], przyjmując rusztowy model przęsła.

Na rys. 3a przedstawiono wartości naprężeń w przekrojach belek głównych w których naklejono tensometry. Naprężenia określono w całym przedziale zmienności





Rys. 3 Napężenia w belkach głównych - (a, c) i funkcja uchybu  $J(k)$  - (b)  
 Fig. 3 Stresses in the main beams - (a, c) and the deviation function  $J(k)$  - (b)

współczynnika sprężystości  $k \in < 0, \infty$ ) - rys. 3c. Na poszczególne krzywe naprężeń naniesiono wartości uzyskane z badań tensometrycznych przy założeniu, że uchyb  $e=0$ . Daje to możliwość określenia wąskiego przedziału zmienności identyfikowanego współczynnika  $k \in < 2, 11 \text{ MN/m} >$ . W analizie identyfikacyjnej poszukuje się takiego współczynnika sprężystości  $\hat{k}$ , który minimalizuje na zbiorze dopuszczalnym  $X$  funkcję uchybu  $J(k)$

$$J(\hat{k}) = \max_{k \in X} \sum_{i=0}^{21} [e_i(k)]^2 = \max_{k \in X} \sum_{i=0}^{21} [\sigma_i - \sigma_i(k)]^2, \quad X = \{k : 2 \leq k \leq 11 \text{ MN/m}\}, \quad (2)$$

gdzie:

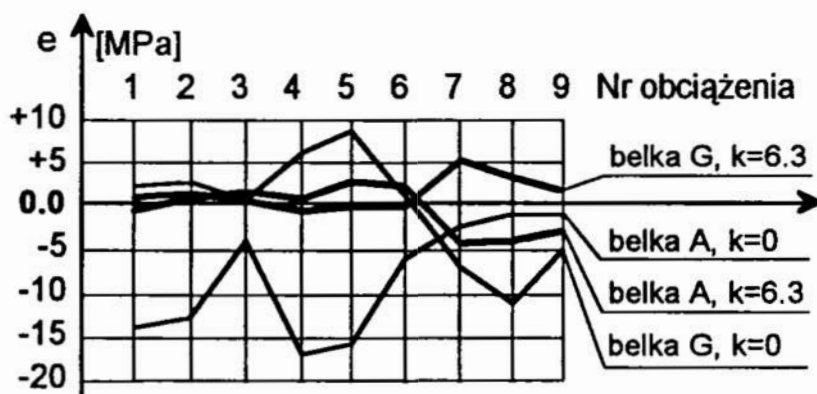
$\sigma_i$  - naprężenia w  $i$ -tym punkcie pomiarowym uzyskane z badań tensometrycznych (mostek tensometryczny wyskalowany na pomiar naprężeń),

$\sigma_i(k)$  - naprężenia w  $i$ -tym punkcie pomiarowym uzyskane w modelu teoretycznym.

Do wyznaczania współczynnika sprężystości  $k$  minimalizującego funkcję (2) zastosowano metodę sterowanego przeglądu wariantów. Przebieg funkcji  $J(k)$  pokazano na rys. 3b. Dla optymalnej wartości  $k = 6.3 \text{ MN/m}$  oraz  $k = 0$  (brak podparcia sprężystego) określono różnicę naprężeń między wartościami doświadczalnymi i teoretycznymi dla dwóch belek skrajnych A i G przy 9 analizowanych schematach obciążeń (rys. 4).

#### 4. Badania wieszaków w trakcie modernizacji mostu

Program badań obejmował określenie przyrostów naprężeń normalnych w wieszakach wywołanych procesami opuszczania przęsła bez nawierzchni uniesionego do góry lewarami hydraulicznymi ustawionymi na oczepie podłożyskowym. Punkty pomiarowe



Rys. 4 Różnice pomiędzy naprężeniami teoretycznymi i rzeczywistymi

Fig. 4 The differences between theoretical and existing stresses

usytuowano w płaszczyznach osi głównych przekrojów (rys. 5). Zastosowany układ czujników pozwala na wyznaczenie w badanym przekroju siły normalnej i momentów zginających. Pomierzono naprężenia dla kilkunastu cykli podnoszenia i opuszczania przęsła wyznaczając z otrzymanych wyników siły osiowe  $P$  oraz momenty zginające  $M_x$  i  $M_y$ . Wyniki zestawiono w tabelicy 1.

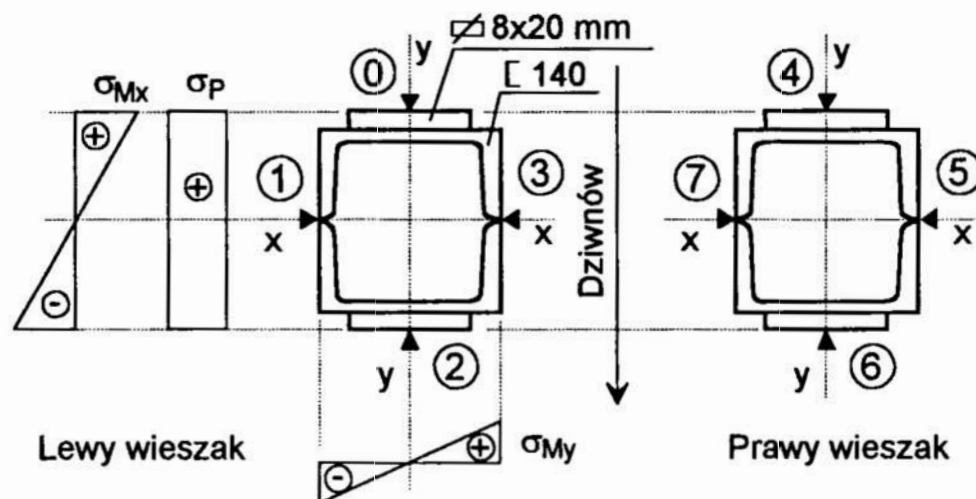
Tablica 1 Naprężenia i siły w wieszakach

Table 1 Stresses and forces in hangers

B - stan bez nawierzchni P - przed wyrównaniem sił śrubą rzymską W- po wyrównaniu sił	Wieszak lewy							Wieszak prawy						
	$\sigma_P$	$\sigma_{Mx}$	$\sigma_{My}$	$\sigma_{max}$	P	$M_x$	$M_y$	$\sigma_P$	$\sigma_{Mx}$	$\sigma_{My}$	$\sigma_{max}$	P	$M_x$	$M_y$
	MPa				kN	kNcm		MPa				kN	kNcm	
	MPa				kN	kNcm		MPa				kN	kNcm	
B, P	21.5	15.5	9.5	46.5	129	376	195	33.5	20.5	15.5	69.5	201	497	319
B, W	23.7	23	13.5	60.2	142	558	278	23.7	16.5	6	46.2	142	400	123
Faza I	63.9	11	1	79	383	267	21	56.4	12.8	10	78.5	338	309	206
Faza II	1.8	1	1.5	3.5	10	24	31	2.5	1.5	4.5	8.5	15	36	92

Przedstawione wyniki pomiarów wskazują na występowanie większych wpływów zginania w wieszaku lewym o przemieszczeniu płaszczyzn obrotu przegubów 60 mm, niż w wieszaku prawym o przemieszczeniu 20 mm. Badania wykazały występowanie zginania w płaszczyźnie obrotu wieszaków, co oznacza brak swobody kąta obrotu w połączeniu przegubowym. Z pomierzonych stanów przyrostów naprężeń przedstawionych w tabelicy 1 wynika, że wpływy zginania, wywołane brakiem całkowitej swobody kąta obrotu w przegubowym zamocowaniu wieszaków, zwiększają naprężenia do 100 % w stosunku do wielkości od siły normalnej. Natomiast sumaryczny stan naprężeń, występujący w narożu przekroju od siły osiowej i dwukierunkowego zginania wieszaka, jest zwiększony o 150 %. Dodatkowo wpływ naprężeń wstępnych od przegięcia wieszaka wynosi  $\sigma_M = 6EJ_y \Delta / w_y L^2 = 52 \text{ MPa}$ . Wykonane badania oraz przeprowadzona

analiza wykazały, że wielkość naprężeń w wieszakach określona w projekcie na 70 MPa, na skutek zginania i imperfekcji montażowych ulegnie podwyższeniu do  $2.5 \cdot 70 + 52 = 227$  MPa. W oparciu o powyższe ustalenia została podjęta decyzja przekonstruowania połączenia wieszaków z przęsłem, polegającego na wykonaniu dodatkowych przegubów gwarantujących swobodę kąta obrotu względem osi y-y przekroju (rys. 1a). Powyższe rozwiązanie zlikwidowało wpływy zginania wywołanego zwiększonym tarcie sworzni w panewce przegubu i przegięciem elementu w czasie jego montażu.



Rys. 5 Układ tensometrów i naprężenia w wieszakach  
 Fig. 5 The set of tensometers and stresses in hangers

## 5. Badania wieszaków po modernizacji mostu

Po zakończeniu modernizacji mostu wykonano trzy fazy badań tensometrycznych elementów konstrukcji. Badania wieszaków obejmowały

- w fazie I pomiar naprężeń wywołanych zwiększonym ciężarem przęsła łącznie z nawierzchnią,
- w fazie II pomiary od obciążeń statycznych wywołanych podnoszeniem i opuszczaniem przęsła oraz od obciążeń próbnych ustawionych na przęsle,
- w fazie III rejestrację naprężeń w stanach dynamicznych wywołanych podnoszeniem i opuszczaniem przęsła oraz przy przejazdach obciążenia próbnego.

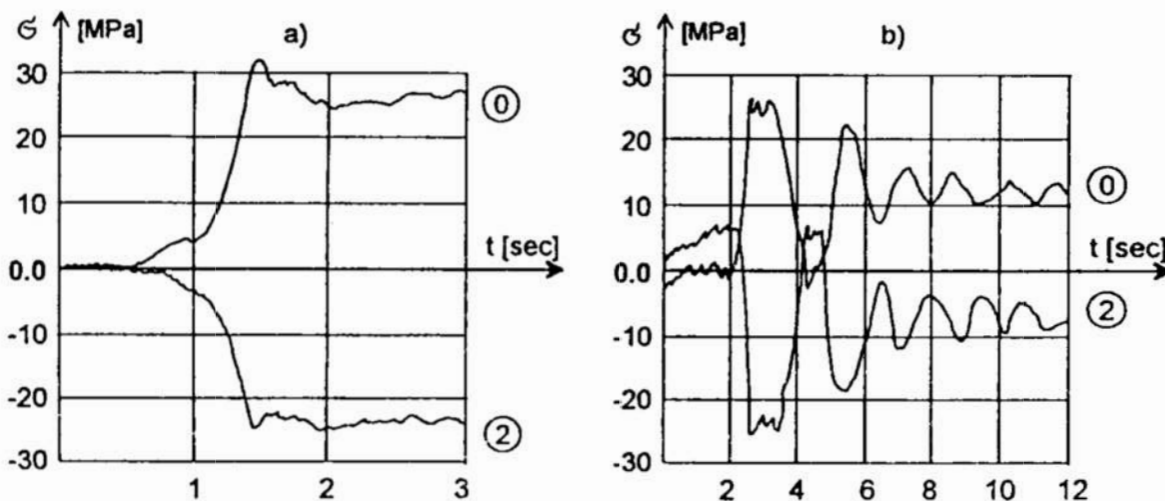
Do pomiarów statycznych użyto mostka UPM 60, a do pomiarów dynamicznych mostka DMC 9012 A Hottinger [4]. Przekroje pomiarowe na wieszakach usytuowano za elementami dodatkowych przegubów, około 30 cm ponad płaszczyznę jezdni (rys.5). W fazie I pomierzono naprężenia po regulacji długości wieszaków i ich wpięciu, przy przeciwwadze opartej na rusztowaniach. Przęsło podniesione było lewarami na wysokość około 60 cm. Przeciwwaga uniosła się z rusztowań po opuszczeniu przęsła o 20 cm. Największe naprężenia zanotowane przed całkowitym opuszczeniem przęsła zestawiono w tabelicy 1. Średnie naprężenie pomierzone w wieszaku lewym wynoszą 64 MPa, a w wieszaku prawym 57 MPa. Odpowiada to siłom 383 kN i 338 kN. W wieszakach występują niewielkie zginania rzędu 10 MPa.

W fazie II próbne obciążenia użytkowe stanowiły dwie wywrotki o ciężarach

całkowitych  $A = 288 \text{ kN}$  i  $B = 271 \text{ kN}$ . Maksymalne siły w wieszakach występują przy takim ustawieniu pojazdu, dla którego wypadkowa nacisku osi tylnych pokrywa się z położeniem przegubowego połączenia wieszaka i przęsła. Pomiarów statycznych dokonano przy ustawieniu pojazdów w osi jezdni, przy krawężniku lewym i prawym oraz dla dwóch pojazdów ustawionych równolegle. Pomiarów wykonano przy wybranym i niewybranym luzie przekładni mechanizmów. Pomiarów dynamicznych w fazie III dokonano od przejazdu wywrotki A z szybkością 20, 40 i 60 km/h oraz od podnoszenia i opuszczania przęsła z gwałtownym hamowaniem.

Obciążenia użytkowe ustawione na przęsle niezależnie od ich wielkości i miejsca działania nie mają praktycznego wpływu na stan naprężeń w wieszakach. Przyrosty naprężeń nimi wywołane nie przekraczają 3 MPa (tablica 1). Efekt taki uzyskano dzięki zastosowaniu dodatkowych przegubów w połączeniu wieszaków z przęsłem oraz dzięki dobremu wyważeniu przeciwwagi. Nie bez znaczenia jest również duża sztywność przęsła zwodzonego po modernizacji.

Manewry podnoszenia i opuszczania przęsła w niewielkim stopniu zwiększają stan sił normalnych w wieszakach - o około 15 kN przy działaniu statycznym (tablica 1) i o 24 kN przy działaniu dynamicznym. Odpowiada to przyrostowi naprężeń o 2.5 MPa i 4 MPa. Natomiast początkowa faza podrywania lub hamowania wywołuje w wieszakach znaczące zginanie w płaszczyźnie obrotu przęsła. Przyrost naprężeń wywołany zginaniem wynosi 31 MPa. Na rys. 6 pokazano wykresy naprężeń w funkcji czasu w trakcie podnoszenia i opuszczania przęsła dla czujników nr 0 i 2.



Rys. 6 Wyniki badań dynamicznych

a) podnoszenie przęsła, b) opuszczanie przęsła z hamowaniem

Fig. 6 The results of the dynamic analysis

a) when rising of a span, b) when lowering and breaking of a span

## 6. Uwagi końcowe

Badania tensometryczne rzeczywistej konstrukcji stanowią dobrą podstawę weryfikacji pracy jej elementów. Obiekt rzeczywisty jest zawsze bardziej złożony niż jego model obliczeniowy. Identyfikacja jest jedną z technik umożliwiających prawidłowy dobór

szeregu parametrów dotyczących zachowania się konstrukcji oraz określenie czynników pomijanych w projektowaniu ze względu na brak wiarygodnych informacji.

Przeprowadzone badania umożliwiły ograniczoną eksploatację mostu w latach 1980-tych. Udokumentowały też konieczność wprowadzenia niezbędnych zmian konstrukcyjnych po przebudowie w latach 1990-94 oraz stały się podstawą do właściwej rektyfikacji wieszaków i określenia obciążenia przeciwwagi przęsła zwodzonego.

## Literatura

1. Dorobczyński J., Niczyj J., Paczkowski W. M.: *Application of identification to the determination of design model parameters of bridge structures*. Enging. Transactions. Polish Academy of Sciences, Vol. 39, No. 3-4, 1991, pp. 419-435.
2. Dorobczyński J.: *Wpływ imperfekcji montażowych na wielkość uogólnionych sił w wieszakach przęsła zwodzonego mostu w Dziwnowie*. Konf. Nauk.-Techn. "Awaryje Budowlane", Szczecin-Międzyzdroje 1994, s. 179-182.
3. Dorobczyński J.: *Wyniki tensometrycznych pomiarów naprężeń w elementach urządzeń wyciągowych przęsła ruchomego mostu drogowego w Dziwnowie*. Praca badawcza na zlecenie D.O.D.P. Szczecin, Politechnika Szczecińska 1994.
4. Hoffmann K.: *An introduction to measurements using strain gauges*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Germany, 1991.
5. Eykhoff P.: *Identyfikacja układów dynamicznych*. PWN, Warszawa 1980.
6. Gryszkiewicz M.: *Mikro-STRAINS. Podręcznik użytkownika. Wersja PC*. Percomp, Warszawa, 1983.

## STRESZCZENIE

Przedstawiono wyniki badań tensometrycznych przęsła zwodzonego mostu drogowego. Badania wykonane były przed i po modernizacji mostu. Uzyskane wyniki posłużyły do stworzenia modelu obliczeniowego przęsła metodą identyfikacji z obiektem rzeczywistym. Stały się również podstawą do wprowadzenia zmian konstrukcyjnych i rektyfikacji montowanego przęsła.

## THE MATHEMATICAL MODEL IDENTIFICATION PROCEDURE FOR A DRAWBRIDGE SPAN IN DZIWNÓW

### Summary

The paper presents the tensometric measurement results for a drawbridge span. Those measurements were done prior to and after modernization of the bridge. They were a basic data for the mathematical model of a span using the identification method compared with the real object. They were also useful in a process of reconstruction and rectification during the assembly of the span.

---

Współautor (\*) wyraża podziękowanie za dofinansowanie pracy przez Komitet Badań Naukowych - BW/RKH



## WNISKOWANIE PRZYBLIŻONE W SYSTEMIE DORADCZYM WSPOMAGAJĄCYM PROJEKTOWANIE PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH

### 1. Wprowadzenie

Etapy projektowania procesów technologicznych elementów maszyn powinny mieć przygotowany odpowiedni, zwykle bardzo duży zasób informacji, ujęty w postaci umożliwiającej sformalizowany wybór właściwego rozwiązania. Jednocześnie dziedzina projektowania tych procesów charakteryzuje się dużym rozproszeniem wiedzy, przeważnie trudno ujmowalnej w ogólne stwierdzenia. Zadania z tej dziedziny można podzielić na dwa rodzaje [1]. Pierwsze to takie, które mają znany algorytm realizacji, np. określenie wymiarów surówki wg zależności podanych w PN, obliczenie wartości naddatków obróbkowych lub dobór warunków obróbki na podstawie normatywów technologicznych. Do drugiego rodzaju należą zadania, których algorytm nie jest znany. Wymienić tu można wybór rodzaju materiału wejściowego, opracowanie planu procesu technologicznego, dobór stanowisk technologicznych i oprzyrządowania (uchwytów, narzędzi skrawających i pomiarowych). Te zadania rozwiązuje się na podstawie wiedzy, doświadczenia i intuicji technologa, co zawiera w sobie pojęcie "inteligencji". Przy tym wiele z tych zadań wymaga dużego nakładu pracy ze strony wysoko wykwalifikowanych specjalistów. Do rozwiązywania tego rodzaju zadań korzystne staje się zastosowanie metod sztucznej inteligencji (ang.: Artificial Intelligence - AI). Niniejsza praca przedstawia próbę zastosowania jednej z metod AI jaką są systemy doradcze z wnioskowaniem przybliżonym do projektowania procesów technologicznych elementów siłownika hydraulicznego.

### 2. Wnioskowanie przybliżone w systemie doradczym

Systemy doradcze, ze swej istoty działania, przeznaczone są głównie do wspomagania prac prowadzonych w dziedzinach, dla których nie opracowano ścisłych teorii. Pozwalają one gromadzić wiedzę w postaci oddzielnych faktów i reguł wnioskowania, bez konieczności ujmowania jej w ogólne twierdzenia lub hipotezy. Budowa reguł wnioskowania umożliwia wprowadzanie elementów niepewności do procesów decyzyjnych, co czyni je bardziej realistycznymi, tj. bardziej zbliżonymi do sposobu myślenia projektanta. Proces rozumowania realizowany przez człowieka ma charakter przybliżony i zazwyczaj nie odpowiada dokładnie modelom klasycznej logiki formalnej. Sposoby uwzględniania niepewności oraz niedokładności wiedzy zapisanej w systemie doradczym należą do zagadnień dotyczących tzw. wnioskowania przybliżonego (rozpatrywanego również jako proces rozumowania przybliżonego). Wnioskowanie przybliżone w systemach doradczych jest postępowaniem polegającym na stosowaniu [2]:

---

\*)Katedra Technologii Maszyn i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Politechnika Śląska,  
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice



- dokładnych reguł i przybliżonych przesłanek,
- przybliżonych reguł i dokładnych przesłanek,
- przybliżonych reguł i przybliżonych przesłanek,

w odróżnieniu od wnioskowania dokładnego, charakteryzującego się stosowaniem:

- dokładnych reguł i dokładnych przesłanek.

Wnioskowanie przybliżone bazuje na przybliżonej reprezentacji wiedzy, gdzie przybliżenie, zwane również niepewnością, definiuje się jako brak odpowiednich informacji dla podjęcia rozpatrywanej decyzji. Podejmując decyzję o zastosowaniu wnioskowania przybliżonego należy ściśle ustalić sposoby określania:

- niepewności stwierdzeń przybliżonych,
- niepewności przybliżonych reguł wnioskowania,
- niepewności przesłanek złożonych z kilku stwierdzeń przybliżonych,

Jednym ze sposobów rozwiązania tego zagadnienia jest stosowanie teorii zbiorów rozmytych [3]. Inne metody określania niepewności w warunkach wnioskowania przybliżonego zawierają prace [2,4,5,6].

Należy stwierdzić, że wybór szczegółowej metody wnioskowania przybliżonego nie ma decydującego wpływu na końcowy wynik postępowania pod warunkiem, że odpowiednio do przyjętej metody przeprowadzony zostanie proces pozyskiwania wiedzy reprezentowanej za pomocą bazy wiedzy.

### 3. Stopień konieczności i stopień możliwości przybliżonej reprezentacji wiedzy

W przedstawianym systemie doradczym zastosowano przybliżoną reprezentację wiedzy opisaną przy pomocy stopni możliwości i konieczności. W pracy Zadeha [7] znajduje się definicja pojęcia "stopień możliwości". Pojęcie to zostało zinterpretowane następująco. Mamy dwa zbiory zawarte w skończonej przestrzeni  $U$ :  $F^-$  i  $A$ .  $F^-$  jest zbiorem rozmytym określonym za pomocą następującej funkcji przynależności

$$F^-: U \rightarrow [0,1]$$

natomiast  $A$  jest zbiorem ostrym (nierozmytym). Stopień możliwości  $P(A, F^-)$  tego, że zbiór  $A$  zawiera element posiadający wartość  $F^-$ , określony jest następująco:

$$P(A, F^-) = \max_{u \in A} [\Pi_F(u)],$$

gdzie:  $\Pi_F(u)$  - funkcja rozkładu możliwości wartości zmiennej  $u$  jako rozmytego elementu zbioru  $F^-$ .

Praca [8] zawiera definicję pojęcia "stopień konieczności". Definicja ta, przedstawiona w postaci następującej formuły

$$N(A, F^-) = 1 - P(\bar{A}, F^-),$$

opisuje stopień konieczności  $N(A, F^-)$  stwierdzenia  $A$  za pomocą stopnia braku możliwości stwierdzenia  $\bar{A}$ . W wymienionych pracach, a także w [2] znajdują się interpretacje stopni możliwości i konieczności w przypadku gdy zbiór  $A$  jest zbiorem rozmytym. W dalszej części rozważań zostanie przedstawiony przykład zapisu stwierdzeń i reguł przybliżonych za pomocą stopni możliwości i konieczności.

### 4. Opis bazy wiedzy systemu doradczego

Opisywany system doradczy wspomaga podejmowanie decyzji przy projektowaniu procesów technologicznych elementów tłoczyisk i dławnic siłowników hydraulicznych. Zakres zastosowania systemu doradczego obejmuje:

- dobór postaci półfabrykatu,
- określenie listy operacji technologicznych niezbędnych do wykonania danego

elementu,

- przyporządkowanie obrabiarek bądź innych stanowisk pracy do poszczególnych operacji technologicznych.

Punktem wyjściowym do budowy bazy wiedzy było sformułowanie zasad kształtowania procesów technologicznych wybranych elementów siłowników hydraulicznych. Zasady powyższe przedstawiają wiedzę o rozwiązywanym problemie i są utworzone na podstawie:

- charakterystyki geometryczno-technologicznej elementu siłownika hydraulicznego,
- wiedzy technologicznej zawierającej ogólne i szczegółowe zasady kształtowania procesów technologicznych.

Następnym etapem było kodowanie wiedzy, czyli takie jej uporządkowanie i zorganizowanie, aby można ją było przechowywać w pamięci komputera i efektywnie z niej, za pomocą komputera korzystać. Kodowanie wiedzy polegało na budowaniu zbioru przybliżonych (z elementami niepewności) reguł wnioskowania "rządzących" procesem rozwiązywania problemu decyzyjnego. Reguły te opisują zależności pomiędzy danymi wejściowymi, wprowadzonymi przez użytkownika i elementami struktury wygenerowanego procesu technologicznego. Ogólna budowa zapisanych reguł przedstawia się następująco:

*jeżeli <PRZESŁANKA> to <KONKLUZJA>*

Przesłanki mają charakter wyrażen dokładnych i niepewnych, złożonych z prostych zdań logicznych (stwierdzeń) połączonych operatorami "and" (i). Określają one warunki, których spełnienie pozwala na przyjęcie konkluzji. W przypadku przesłanki niepewnej zastosowano stwierdzenia przybliżone, opisane za pomocą stopni konieczności i możliwości. Cechą charakterystyczną zbudowanych reguł jest to, że każda reguła zawiera w sobie opis sytuacji, w której może być użyta. Stało się to podstawą do przyjęcia założenia, że mechanizm wnioskowania sterujący przebiegiem rozwiązywania problemu nie musi zawierać żadnej wiedzy o tym problemie. Zatem praca systemu doradczego może ograniczać się do wybierania kolejnych reguł, sprawdzania czy spełnione są warunki ich stosowalności i rozszerzania stanu wiedzy o te wnioski, które w danej sytuacji zostały już udowodnione. Z tego też powodu, do zapisu bazy wiedzy wykorzystano szkieletowy system doradczy MAS [9]. System ten zawiera kompletny moduł wnioskowania, zajmujący się przeszukiwaniem bazy wiedzy i ustalaniem kolejności analizowania jej elementów. Do reprezentacji wiedzy zawartej w bazie wiedzy systemu doradczego użyto tabel decyzyjnych, w których umieszczono opracowane reguły wnioskowania. Tabele decyzyjne są programowane za pomocą funkcji bezpośredniej obsługi ram systemu MAS. Definiowane są one w wybranym słocie ramy, która podczas analizowania tabeli jest ramą roboczą. Wartością tego slotu jest lista zawierająca łańcuch tekstowy opisujący tę tablicę. Łańcuch taki jest odczytywany z odpowiednio przygotowanej bazy danych za pomocą programu MS ACCESS.

Tabele decyzyjne składają się z wierszy i kolumn. Wiersze zawierają opis i wartości przesłanek (warunków) oraz konkluzje (działania) reguł wnioskowania. Ponadto ostatni wiersz zawiera wartości zwracane po zakończeniu badania danej tabeli decyzyjnej. Kolumny zawierają definicję reguł wnioskowania. Reguły badane są w kolejności ich zapisu w tabeli, aż do napotkania reguły, dla której spełnione są wszystkie wskazane w niej warunki. Następnie wykonywane są przyporządkowane tej regule działania (również według kolejności zapisu). Wszystkim elementom tabeli decyzyjnej zostały

przyporządkowane unikalne identyfikatory. Pozwala to na uporządkowanie wierszy w kolejności alfabetycznej. Dla umożliwienia zapisu przybliżonych reguł wnioskowania przyjęto następujące założenia dotyczące wartości elementów tabel decyzyjnych [9]:

- wartościami zwracanymi stanowiącymi wyniki badania warunków (odpowiedzi użytkownika) są pary liczb  $\langle N, P \rangle$  interpretowanych odpowiednio jako stopnie konieczności i stopnie możliwości uznania warunku za prawdziwy (spełniony),
- pola kolumn prawej części tabeli zawierają również pary liczb  $\langle n, p \rangle$  ograniczających oczekiwany zakres wartości stopni konieczności i możliwości warunku, wtedy gdy rozpatrywany element przesłanki jest prawdziwy. Oznacza to, że rozpatrywany element przesłanki będzie uznany jako prawdziwy wtedy gdy:

$$n \leq N \leq P \leq p$$

gdzie przesłanka uznana zostanie jako przesłanka spełniona, gdy dla wszystkich jej niepustych elementów zostanie spełniona powyższa nierówność.

W celu ujednoczenia zapisu reguł oraz dla uproszczenia procesów dialogu z użytkownikami tabel decyzyjnych w systemie MAS wprowadzono stałe lingwistyczne spełnienia przesłanki, którym przypisuje się określone stałe wartości par  $\langle N, P \rangle$ . Przykładem zbioru takich stałych jest [5]:

- tak	≡	$\langle 1 \ 1 \rangle$
- prawie tak	≡	$\langle 0.7 \ 1 \rangle$
- raczej tak	≡	$\langle 0.4 \ 1 \rangle$
- ?	≡	$\langle 0 \ 1 \rangle$
- raczej nie	≡	$\langle 0 \ 0.6 \rangle$
- prawie nie	≡	$\langle 0 \ 0.3 \rangle$
- nie	≡	$\langle 0 \ 0 \rangle$

W systemie doradczym zastosowano zintegrowane tabele decyzyjne. Elementem integrującym jest wiersz opisujący wartości zwracane po zbadaniu danej tabeli. Wartość, uzyskana z jednej tabeli została zapisana jako jedna z możliwych wartości warunku w innej tabeli. Pozwoliło to na definiowanie i stosowanie sieci tabel decyzyjnych, charakteryzujących się małymi wymiarami. Dzięki temu uproszczone zostało zapisywanie tabel, a także ich modyfikacja. Proces rozwiązywania problemu decyzyjnego projektowania procesu technologicznego podzielono na etapy, a każdy z tych etapów zapisano w oddzielnej tabeli decyzyjnej. Takimi etapami są np.: wybór elementu siłownika hydraulicznego, określenie warunków produkcji (wielkość produkcji, wyposażenie zakładu), dobór półfabrykatu i operacji technologicznych wstępnych, dobór obróbki baz technologicznych do operacji kształtujących. Tym samym proces etapowego budowania tabel decyzyjnych odpowiada rzeczywistemu, etapowemu projektowaniu procesów technologicznych.

## 5. Przykład tabeli decyzyjnej

Opisywany przykład dotyczy wspomagania podejmowania decyzji przy doborze półfabrykatu oraz operacji wstępnych tulei dławnicy siłownika hydraulicznego. Zastosowaną tabelę decyzyjną przedstawia rys. 1. Tabela została zapisana w bazie danych MS ACCESS. Działania na tej tabeli realizowane są przez system MAS. Wiersze opisujące warunki posiadają identyfikatory rozpoczynające się od litery 'C', a wiersze opisujące działania - od litery 'D'. Ponadto w tabeli występują wiersze posiadające identyfikatory: 'EXIT' - dla wiersza, opisującego wartości zwracane oraz 'HEAD' - dla wiersza, określającego tytuł tabeli. Kolumny opisują reguły

wnioskowania. Kolejnymi elementami każdego rekordu (wiersza) tabeli są pola o następujących nazwach i treści:

- 'ID' - zawiera identyfikator wiersza,
- 'PARAM' - łańcuch tekstowy opisujący treść warunku i działania,
- 'FRA' - nazwa ramy "obsługującej" daną tabelę decyzyjną,
- 'SLO' - nazwa slotu w ramie FRA
- 'R1',..., 'R9' - łańcuch tekstowy opisujący daną regułę wnioskowania.

Microsoft Access - [Table: Dřawnica]												
File Edit View Records Layout Window Help												
ID	PARAM	FRA	SLO	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
C01	Dobierasz półfabrykat o dużym koszcie wykonania, ale kształcie zbliżonym do gotowego elementu.	Dř1	AskF	0.6	0.3	0	0	0	0	0	0	01
C02	Czy wymagane jest prostowanie materiału ?	Dř1	Ask	1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7		
C03	Zamierzasz zastosować wydane cięcie materiału, uwzględniając duże koszty narzędzia tnącego.	Dř1	AskF			0.8	0.3	0				
D01	WNIOSKI:	Dř1	Concl	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
D02	Dobierz półfabrykat w postaci odkuwki matrycowej.	Dř1	Concl	Y								
D03	Dobierz półfabrykat w postaci rury grubościennej.	Dř1	Concl		Y					Y		
D04	Dobierz półfabrykat w postaci pręta walcowanego.	Dř1	Concl			Y	Y	Y	Y			
D05	Porównaj koszty wykonania półfabrykatu oraz obróbki mechanicznej odkuwki, rury i pręta.	Dř1	Concl									Y
D06	Przeprowadź prostowanie pręta na prasie uniwersalnej lub prostownicy rolkowej.	Dř1	Concl			Y	Y	Y				
D07	Przeprowadź cięcie materiału na przecinarce taśmowej.	Dř1	Concl			Y						
D08	Przeprowadź cięcie materiału na przecinarce ściernicowej.	Dř1	Concl				Y					
D09	Przeprowadź cięcie materiału na przecinarce tarczowej lub na tokarce za pomocą noża	Dř1	Concl					Y				
D10	Wprowadzone dane wejściowe nie pozwalają na sformułowanie wniosku.	Dř1	Concl									Y
EXIT				N	N	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y
HEAD	Proces technologiczny dřawnicy	Dř1	Topic									

Rys. 1. Przykład tabeli decyzyjnej

Fig. 1. The example of the decision table

Wartości elementów tabeli zawarte w jej prawej części oznaczają:

- dla warunków:

- "a b" - oznacza, że dla uznania iż warunek jest spełniony niezbędnym jest aby  $a \leq N \leq P \leq b$  gdzie N i P są odpowiednio stopniem konieczności i stopniem możliwości, zwracanymi jako wynik badania warunku,
- "Y" - oznacza, że oczekiwana jest wartość YES, tzn., że warunek jest spełniony (jest równoważne zapisowi "1 1"),
- "N" - oznacza, że oczekiwana jest wartość NO, tzn., że warunek nie jest spełniony (jest równoważne zapisowi "0 0"),
- "" - brak wartości, pole puste oznacza, że warunek jest pomijany, tzn., że wartość warunku nie jest badana.

- dla działań:

- "Y" - działanie ma być wykonane, jeżeli spełnione są wszystkie warunki reguły,
- "" - pole puste, działanie jest pomijane.

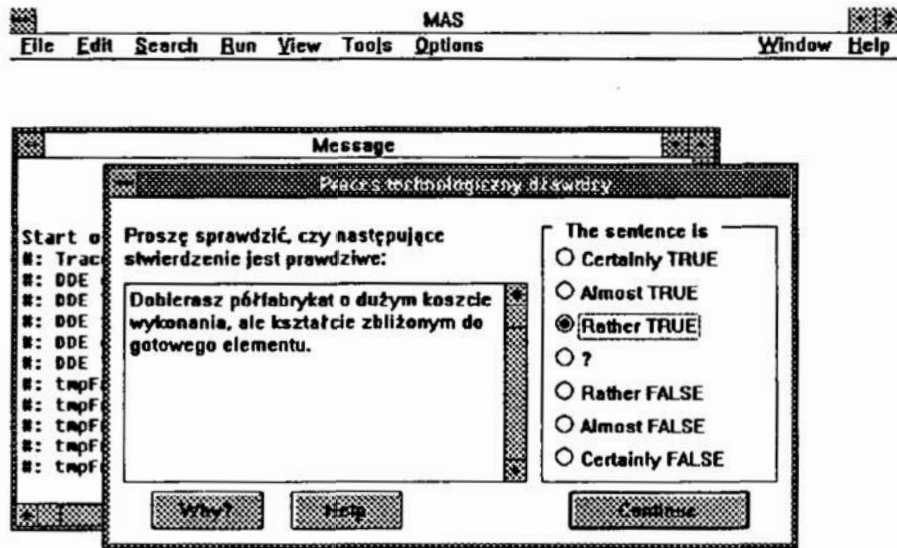


- dla wiersza 'EXIT'

- "Y" - oznacza, że zwracana jest wartość logiczna YES,
- "N" - oznacza, że zwracana jest wartość NO.

## 6. Przykład dialogu z użytkownikiem

Przedstawiony przykład dialogu dotyczy działań na tabeli decyzyjnej opisanej powyżej. Punktem wyjściowym badania tabeli decyzyjnej jest badanie reguły wnioskowania R1. W myśl wcześniejszych rozważań, aby reguła mogła być zastosowana muszą być spełnione wszystkie przesłanki (warunki) tej reguły. Wartości warunków zostają wyznaczone w wyniku dialogu użytkownika systemu z komputerem. Przykład dialogu zamieszczono na rys. 2.



Rys. 2. Przykład dialogu z systemem doradczym  
Fig. 2. The example of dialogue with expert system

W tym przykładzie przedstawiono sposób ustalenia wartości przybliżonej warunku C01, występującego w pierwszej regule wnioskowania. W okienku zostało wyświetlone stwierdzenie opisujące sposób doboru półfabrykatu, natomiast zadaniem użytkownika jest udzielenie odpowiedzi na pytanie, w jakim stopniu ta propozycja jest aprobowana. Dokonywane to jest na podstawie ustalenia stopnia prawdziwości stwierdzenia. Przy ustalaniu tej wartości system dopuszcza użycie następujących odpowiedzi:

- Certainly TRUE (Na pewno PRAWDA),
- Almost TRUE (Prawie PRAWDA),
- Rather TRUE (Raczej PRAWDA),
- ? (nie wiem),
- Rather FALSE (Raczej NIEPRAWDA),
- Almost FALSE (Prawie NIEPRAWDA),
- Certainly FALSE (Na pewno NIEPRAWDA).

Ponadto dialog z systemem obejmuje:

- zadawanie pytania Why? (Dlaczego?), gdzie odpowiedź na to pytanie zawiera opis przyczyny sformułowania stwierdzenia,
- korzystanie z pomocy (help), zawierającej opis używanych pojęć z zakresu rozwiązywanego problemu.

Gdy uzyskaną odpowiedzią użytkownika o warunek C01 jest wartość *Certainly TRUE* (lub *Almost TRUE*), wtedy część warunkowa reguły R1 jest spełniona. Spowoduje to przejście do części działaniowej reguły, czyli wykonanie w tym przypadku działań D01 i D02 zapisanych w tabeli decyzyjnej. Efektem pracy systemu jest wyświetlenie na ekranie komputera konkluzji dotyczących doboru półfabrykatu. Wartością zwracaną przez tabelę decyzyjną jest wartość logiczna NO, która jest wartością warunku następnej tabeli, dotyczącej doboru operacji technologicznych wstępnych odkuwki matrycowej. W przypadku innych odpowiedzi od zapisanych wyżej reguła pierwsza zostaje odrzucona i system przechodzi do badania części warunkowej następnej reguły. Sytuacja się powtarza do momentu kiedy nastąpi pełna zgodność wartości warunków uzyskanych od użytkownika z wartościami zapisanymi w tabeli. Opisane działanie nosi nazwę *wnioskowania przybliżonego* gdyż działania prowadzone są na przybliżonych przesłankach reguł wnioskowania. W przypadku gdy wprowadzone dane wejściowe (odpowiedzi użytkownika) przekraczają zakres wartości warunków zamieszczonych w tabeli zostaje wykonana ostatnia reguła tabeli i na ekranie komputera pojawia się odpowiedni komunikat.

Przyjęto, że dialog powinien być zrozumiały dla użytkownika systemu, którym może być technolog projektujący procesy technologiczne obróbki mechanicznej elementów maszyn. Z uwagi na specyfikę dziedziny rozwiązywanych problemów konieczne stało się umieszczenie w systemie terminologii tej dziedziny, jednak postarano się, aby była to terminologia najczęściej stosowana, uwzględniająca również Polskie Normy. Zastosowana technika okien pozwoliła na spełnienie celu prostoty obsługi systemu doradczego.

## 7. Podsumowanie

Przedstawiony system doradczy umożliwia realizację wnioskowania przybliżonego, w którym spełniane są dokładne konkluzje na podstawie niepewnych przesłanek. Stało się to możliwe poprzez odpowiednią budowę reguł wnioskowania. Przesłanki tych reguł zawierają elementy niepewności, co czyni je bardziej realistycznymi, tj. bardziej zbliżonymi do sposobu myślenia projektanta. Pewna trudność wynikła w stadium ustalania stopni możliwości i konieczności stwierdzeń, które mają subiektywny charakter. Polegała ona na odpowiednim przyporządkowaniu rozwiązań procesów technologicznych do zbioru stałych lingwistycznych, znajdujących się w systemie MAS. Zastosowana sieć tabel decyzyjnych pozwoliła na podział problemów decyzyjnych na etapy, rozwiązywane przez pojedyncze tabele decyzyjne. Uzyskano w ten sposób modułową budowę bazy wiedzy, łatwą do modyfikacji. Zastosowanie szkieletowego systemu doradczego usprawniło budowę bazy wiedzy. System doradczy pozwala gromadzić i przetwarzać wiedzę technologiczną. Użytkownik systemu uzyskuje szybki i łatwy dostęp do sprawdzonych i zoptymalizowanych rozwiązań, co pozwala na skrócenie i uproszczenie cyklu projektowania procesu technologicznego. Dalsze prace prowadzone będą nad uszczegółowieniem bazy wiedzy technologicznej poprzez wprowadzenie opcji podziału operacji technologicznej na zabiegi technologiczne, wyboru narzędzi skrawających, pomiarowych i uchwytów na danym stanowisku pracy oraz



doboru warunków obróbki dla poszczególnych zabiegów technologicznych. Rozwiązanie będzie polegało na budowaniu nowych tabel decyzyjnych.

## Literatura

1. Paszek A., Knosala R.: *System doradczy wspomagający projektowanie procesów technologicznych elementów cylindra hydraulicznego*. "Maszyny Górnicze" nr 4/49 wkładka, Centrum Mechanizacji Górnictwa, Gliwice 1994.
2. Cholewa W., Pedrycz W.: *Systemy doradcze*. Skrypt nr 1447 Politechniki Śląskiej, Gliwice 1987.
3. Kacprzyk J.: *Zbiory rozmyte w analizie systemowej*. PWN, Warszawa 1986.
4. Bolc L., Borodziejewicz W., Wójcik M.: *Podstawy przetwarzania informacji niepewnej i niepełnej*. PWN, Warszawa 1991.
5. Cholewa W.: *Stwierdzenia przybliżone w systemach doradczych*. Materiały III Międzynarodowej Konferencji nt. "Achievements in the mechanical and material engineering", Gliwice 1994, ss.49-62.
6. Yager R., Filev D.: *Essential of fuzzy modelling and control*. John Wiley & Sons, Inc., New York 1994.
7. Zadeh L.A.: *Fuzzy sets as a basis for the theory of possibility*. "Fuzzy Sets and Systems" nr 1/1978.
8. Dubois D., Prade H.: *Fuzzy Sets and Systems*. Academic Press, New York 1980.
9. Cholewa W.: *Szkieletowy system doradczy MAS - dokumentacja użytkownika*. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechnika Śląska, Gliwice, 1993.

## Streszczenie

W pracy przedstawiono system doradczy do wspomagania projektowania procesów technologicznych elementów siłowników hydraulicznych. Wiedza zawarta w bazie wiedzy została zapisana w przybliżonej reprezentacji. Do tego celu użyto szkieletowego systemu doradczego MAS. Baza wiedzy zawiera uporządkowaną sieć tabel decyzyjnych. Część warunkowa reguł wnioskowania umieszczonych w tabeli decyzyjnej zawiera niepewne stwierdzenia, do zapisu których wykorzystano przyjęte stopnie możliwości i konieczności. Zaprezentowano przykład tabeli decyzyjnej oraz dialogu z systemem z możliwością udzielania odpowiedzi rozmytych.

## APPROXIMATE REASONING IN THE EXPERT SYSTEM FOR THE ENGINEERING PROCESSES DESIGN

### Summary

In this paper, the building process of the engineering process knowledge base of the expert system was presented. For this purpose the decision tables was created using shell expert system MAS. The grades of necessity and possibility express the rules conditions. The paper presents an example of dialogue with a possibility of giving the fuzzy answers.

## STROJENIE REGULATORA LINGWISTYCZNEGO Z WYKORZYSTANIEM GENETYCZNEGO ALGORYTMU OPTYMALIZACJI

### 1. Wprowadzenie

Lingwistyczne algorytmy regulacji charakteryzują się opracowywanymi dopiero zasadami ich projektowania oraz znaczną liczbą (kilkudziesięciu) parametrów dostrajalnych. Wynika stąd, że nawet starannie wykonany pierwszy projekt algorytmu lingwistycznego powinien być dalej doskonalony w kolejnej fazie projektowania lub w czasie eksploatacji.

W niniejszej pracy starano się wykazać, że dla dostrojenia regulatorów lingwistycznych pomocne są genetyczne algorytmy optymalizacji. Wybór algorytmów genetycznych nie jest przypadkowy, bowiem charakteryzują się one dużą odpornością na występowanie optimum lokalnych, pozwalających dobrze radzić sobie z wieloma, równocześnie dostrajanymi parametrami, trudnymi modelami matematycznymi, różnego rodzaju nieliniowościami, ograniczeniami i wektorowymi funkcjami celu. Algorytmy genetyczne nadają się także do obliczeń równoległych, co stanowi ich cenną, dodatkową zaletę ze względu na perspektywę rozwoju i zastosowań obliczeń równoległych.

W pracy opisano zasadę działania regulatora lingwistycznego i genetycznego algorytmu optymalizacji, wyjaśniono założenia przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych i obliczeń oraz przedstawiono najciekawsze rezultaty. Oprócz tego zamieszczono podsumowanie wyników badań i podano literaturę dotyczącą poruszanej tematyki.

### 2. Regulator lingwistyczny [1]

W przypadku liniowego algorytmu dyskretny w czasie regulacji proporcjonalno-całkowej, przyrost sterowania

$$\Delta m_k = K_p \Delta e_k + K_p \frac{T_p}{T_i} e_k$$

przy czym  $e_k$  — uchyb regulacji,  
 $\Delta m_k = m_k - m_{k-1}$   
 $\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$   
 $T_p$  — czas próbkowania,  
 $K_p$  i  $T_i$  — nastawy regulatora PI.

Dzieląc zbiory  $\Delta m_k$ ,  $\Delta e_k$  i  $e_k$  na podzbiory, zależność  $\Delta m_k = F(e_k; \Delta e_k)$  można wyrazić w postaci tzw. tablicy decyzyjnej, której przykładową postać zamieszczono na rysunku 1. Oznaczono: N — ujemny (negative), P — dodatni (positive), ZE — zero, S — mały (small), M — średni (medium), B — duży (big). Wynika stąd, że PB oznacza duży dodatni (positive big), NS — mały ujemny (negative small), itd.

\* Instytut Automatyki, Politechnika Warszawska, 00-664 Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19

		$\Delta e_k$				
		NB	NM	ZE	PM	PB
					0.7	0.3
PB		NM	ZE	PM	PB	PB
PM		NM	NS	PS	PM	PB
$e_k$ ZE	0.2	NB	NM	ZE	PM	PB
NM	0.8	NB	NM	NS	PS	PM
NB		NB	NB	NM	ZE	PM

PB = 0.40  
 PM = 0.12  
 PS = 0.07  
 ZE = 0  
 NS = -0.07  
 NM = -0.12  
 NB = -0.40

Rys. 1. Tablica decyzyjna regulatora lingwistycznego o właściwościach zbliżonych do właściwości zbliżonych do właściwości regulatora PI

Fig. 1. The linguistic matrix of fuzzy logic controller, which properties are adequate to the PI controller

Z przytoczonej tablicy wynika, że jeśli uchyb  $e_k$  jest PM i przyrost uchybu  $\Delta e_k$  jest NM, to przyrost sterowania  $\Delta m_k$  jest NS. Zamiast tablicą decyzyjną można posługiwać się dwudziestoma pięcioma regułami decyzyjnymi typu jeśli – to. Z tego powodu wymiennie używa się pojęć: tablica decyzyjna i zbiór reguł decyzyjnych.

Zbiorem sygnałów  $e_k$  i  $\Delta e_k$  przyporządkowuje się tzw. funkcje przynależności. Przykładowe przyporządkowanie pokazano na rys. 2. Interpretacja rysunku jest następująca. Jeśli uchyb jest na przykład równy  $e_k'$  (rys.2), to należy on jednocześnie do dwóch podzbiorów: NM ze współczynnikiem przynależności  $\mu_{NM}(e_k')$  oraz ZE ze współczynnikiem przynależności  $\mu_{ZE}(e_k')$ . Przyjmuje się, że sygnał  $e_k'$  został zakodowany w taki sposób, że przypisano mu wektor, którego składowymi są wartości współczynników przynależności. Jest zatem  $e_k' \rightarrow [0 \ \mu_{NM} \ \mu_{ZE} \ 0 \ 0]$ . Składowe zerowe wektora odpowiadają zerowym wartościom współczynników przynależności  $\mu_{NB}$ ,  $\mu_{PM}$  i  $\mu_{PB}$ . Opiszana powyżej operacja nazywa się kodowaniem lingwistycznym lub fuzyfikacją.

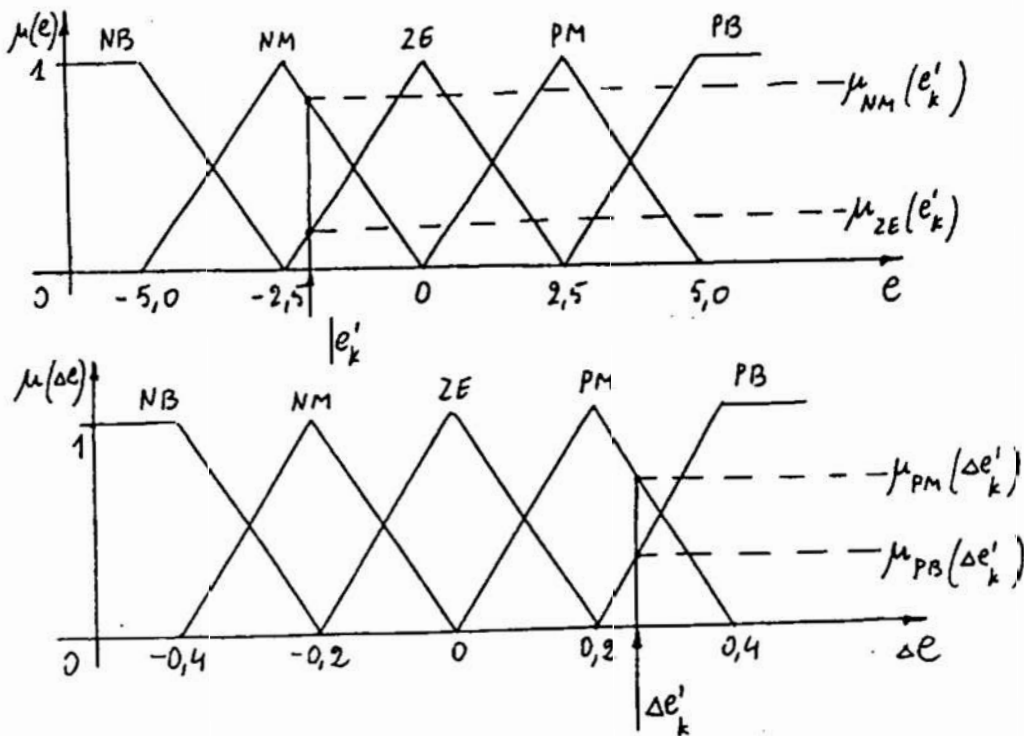
Dla uproszczenia opisu zakłada się, że pewien pomiar sygnałów  $e_k$  i  $\Delta e_k$  po fuzyfikacji (rys.2) pozwala uzyskać następujące wektory:

$$e_k \rightarrow [0 \ 0.8 \ 0.2 \ 0 \ 0]$$

$$\Delta e_k \rightarrow [0 \ 0 \ 0 \ 0.7 \ 0.3]$$

Zbiór reguł wskazuje, że sterowanie dotyczy trzech podzbiorów sygnału  $\Delta m_k$ . Są nimi podzbiory PM, PB i PS (pogrubiony kwadrat na rys.1). W celu wyznaczenia wartości

sterowania  $\Delta m_k$  najpierw należy tym trzem podzbiорom sterowań przypisać odpowiednie wagi.



Rys. 2. Funkcje przynależności dla uchybu i przyrostów uchybu

Fig. 2. Membership functions of  $e$  and  $\Delta e$

Spośród różnych metod doboru wag zazwyczaj stosuje się tzw. zasadę min-max Zadeha. Zgodnie z tą zasadą poszczególnym podzbiорom przypisuje się mniejsze współczynniki przynależności (rys.1). Waga dla podzbioru PM sygnału  $\Delta m_k$  wynosi więc  $w_{PM} = \min(0.2; 0.7) = 0.2$ . Podobnie  $w_{PB} = \min(0.2; 0.3) = 0.2$ ,  $w_{PS} = \min(0.8; 0.7) = 0.7$  oraz po raz drugi  $w_{PM} = \min(0.8; 0.3) = 0.3$ .

Zbiór PM występuje dwukrotnie, więc wybiera się wagę tego podzbioru jako  $w_{PM} = \max(0.2; 0.3) = 0.3$ .

W celu obliczenia sygnału sterowania, także stosuje się kilka metod. Do częściej stosowanych należy metoda średniej ważonej. W omawianym przykładzie, zgodnie z tą metodą, uzyskuje się

$$\Delta m_k = \frac{0.12w_{PM} + 0.4w_{PB} + 0.07w_{PS}}{w_{PM} + w_{PB} + w_{PS}} = 0.1375$$

Opisana powyżej procedura wyznaczania na podstawie tablicy decyzyjnej (lub wnioskowania ze zbioru reguł) konkretnej wartości sygnału sterującego nazywa się dekodowaniem lingwistycznym lub defuzyfikacją. W każdym lingwistycznym algorytmie regulacji dokonuje się więc trzech operacji: fuzyfikacji, wnioskowania na podstawie zbioru reguł i defuzyfikacji. Sygnały po fuzyfikacji nazywa się rozmytymi (fuzzy). Podobnie, sygnały rozmyte po defuzyfikacji nazywa się nierozmytymi (crisp).

### 3. Genetyczny algorytm optymalizacji [2]

Algorytm naśladuje mechanizm zmian ewolucyjnych występujących w przyrodzie. Zakłada się zatem pewną populację początkową, np. zbiór regulatorów, z których każdy charakteryzuje się swymi nastawami. Regulatory poddaje się testowi, polegającemu na wyznaczeniu odpowiedzi w układzie z tym samym obiektem regulacji. Biorąc pod uwagę wartość wskaźnika jakości uzyskanego przez każdy z regulatorów, selekcjonuje się je odrzucając najgorsze egzemplarze. Celem selekcjonowania jest uzyskanie nowego zbioru regulatorów (nowego pokolenia) o zmodyfikowanych (ulepszonych) nastawach.

Przedstawiony powyżej sposób naśladuje postępowanie hodowcy, który dopuszcza do dalszej hodowli osobniki najbardziej wartościowe ze względu na pożądane cechy. Aby podkreślić analogie z hodowlą, stosuje się zwyczajowo szczególne nazwy, takie jak: pokolenie, krzyżowanie, mutacja itp.

Aby zapewnić większy udział najkorzystniejszych egzemplarzy w utworzeniu nowego pokolenia regulatorów, można stosować różne sposoby. Na przykład, można odrzucić najmniej korzystne egzemplarze i w ich miejsce podstawić najkorzystniejsze. Zwykle dąży się do tego, aby liczebność populacji pozostawała stała. Utworzoną w taki sposób populację, wzbogaconą w korzystniejsze egzemplarze, łączy się w pary, także w sposób losowy. Celem łączenia w pary jest tzw. wymiana genów przez krzyżowanie. Niech więc każdy z regulatorów ma jedną tylko nastawę, na przykład współczynnik wzmocnienia  $K_p$ . Wartości tych współczynników zwykle wyraża się w postaci dwójkowej, a następnie porównując od przypadkowo wybranej pozycji wymienia się w ciągu zer i jedynek. Na przykład:

Regulator 1:  $K_p = 0\ 1\ 1\ | 0\ 1$       Po wymianie genów  $K_p = 0\ 1\ 1\ | 0\ 0$   
Regulator 2:  $K_p = 1\ 1\ 0\ | 0\ 0$       Po wymianie genów  $K_p = 1\ 1\ 0\ | 0\ 1$

Pionową kreską oznaczono przypadkową pozycję wymiany.

Oprócz krzyżowania stosuje się tzw. mutacje. Polegają one na zamianie w kodzie dwójkowym danej liczby pojedynczej 1 na 0, lub odwrotnie. Zarówno liczba, jak i pozycja na której występuje zmiana są przypadkowe. Mutacja może wzbogacić „pulę genów”, lecz także może pogorszyć właściwą tendencję zmian.

Po zastosowaniu do początkowego pokolenia regulatorów operatorów selekcji, krzyżowania i mutacji, powstaje nowe pokolenie (w języku matematycznym – nowa iteracja obliczeń), które ponownie poddaje się działaniu tych trzech operatorów. W ten sposób, wraz z przemijaniem odpowiedniej liczby pokoleń, optymalizowana cecha stopniowo zbliża się do swej wartości optymalnej.

### 4. Porównanie regulatorów: lingwistycznego i proporcjonalno-całkowego

Założono, że badany regulator lingwistyczny ma naśladować dyskretny liniowy regulator PI, działający w układzie z obiektem o transmitancji:

$$G(s) = \frac{2\exp(-4s)}{(5s+1)(2.5s+1)} \quad (1)$$

Po dyskretyzacji z ekstrapolatorem zerowego rzędu i po przyjęciu okresu próbkowania  $T_p = 0.5$  uzyskuje się



$$G(z) = \frac{(0.0181z + 0.0164)z^{-8}}{z^2 - 1.7236z + 0.7408} \quad (2)$$

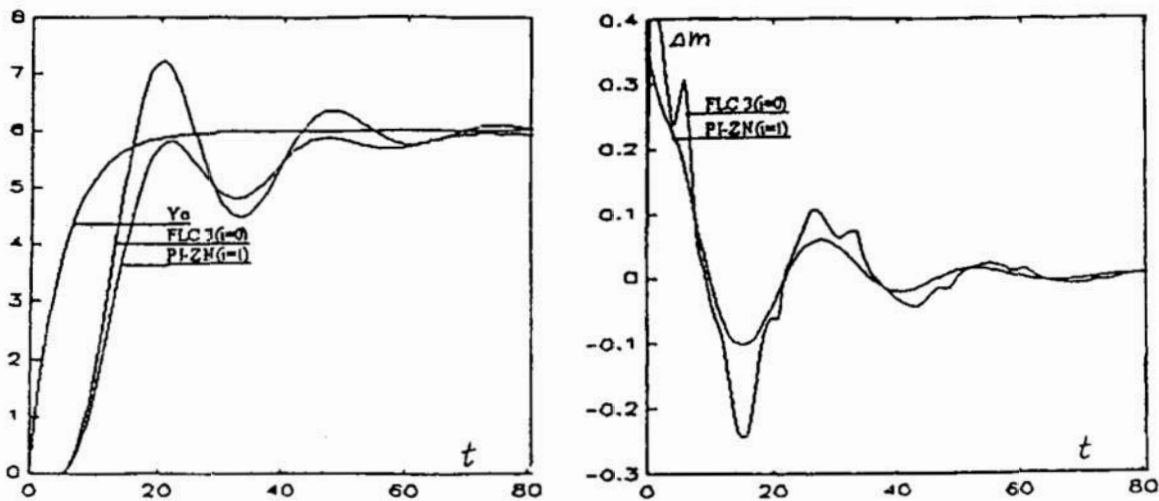
Dla okresu próbkowania  $T_p = 0.5$  i całkowania metodą prostokątów, regulator PI z nastawami Zieglera i Nicholosa ma transmitancję

$$R(z) = \frac{0.5939z - 0.5742}{z - 1} \quad (3)$$

Badano odpowiedź układu z obiektem (2) i regulatorem (3) wprowadzając inercyjny skok wartości zadanej

$$Y_o(s) = \frac{6}{s(5s + 1)} \quad (4)$$

Posługując się danymi uzyskanymi z opisanego powyżej eksperymentu, zaprojektowano regulator lingwistyczny, którego zbiór reguł (tablicę decyzyjną) zamieszczono na rysunku 1. Wybór zakresu zmian uchybu i przyrostów uchybu, a także kształt funkcji przynależności zamieszczono na rysunku 2.



Rys. 3. Odpowiedzi na zmianę wartości zadanej regulatora lingwistycznego (FLC) i regulatora PI z nastawami Zieglera i Nicholosa

Fig. 3 System response for the reference change of the fuzzy logic controller (FLC) and the PI controller with Ziegler - Nichols' sets

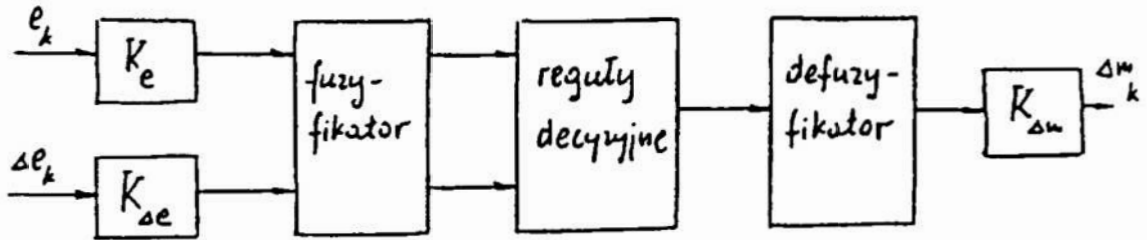
Na rysunku 3 zamieszczono odpowiedzi skokowe regulatora lingwistycznego (symbol FLC oznacza 3 wersję projektu regulatora) oraz dyskretnego regulatora PI z nastawami Zieglera i Nicholosa, opisanego transmitancją (3). Z rysunku wynika, że oba regulatory działają podobnie, przy czym algorytm lingwistyczny (bez końcowego dostrajania) charakteryzuje się mniej płynnymi zmianami sygnału sterowania.



## 5. Optymalizacja parametrów regulatora lingwistycznego [3]

Przyjmuje się następujące główne założenia:

- a) Współczynnikami dostrajanymi w regulatorze lingwistycznym są współczynniki wzmocnienia  $K_e$ ,  $K_{\Delta e}$ ,  $K_{\Delta m}$  uwidocznione na rysunku 4 i nazwane nastawami regulatora.



Rys. 4. Schemat blokowy regulatora lingwistycznego. Symbolami  $K_e$ ,  $K_{\Delta e}$ ,  $K_{\Delta m}$  oznaczono współczynniki wzmocnienia

Fig. 4. The block scheme of the fuzzy logic controller; symbols  $K_e$ ,  $K_{\Delta e}$ ,  $K_{\Delta m}$  stand for amplification coefficients

- b) Liczebności populacji początkowych wynoszą 4 oraz 40 regulatorów.  
c) Maksymalizowana funkcja celu ma postać:

$$J_1 = \frac{1}{\left[ \sum_{n=0}^N e^2(nT_p) \right]^4 \left[ \sum_{n=0}^N \Delta m^2(nT_p) \right]} \quad (5)$$

Funkcja ta preferuje minimalizację sumy kwadratów uchybów przy sterowaniu bez gwałtownych, niekorzystnych przyrostów  $\Delta m$ . Funkcję celu wyznacza się dla inercyjnego skoku (4) wartości zadanej, zgodnie z rysunkiem 3.

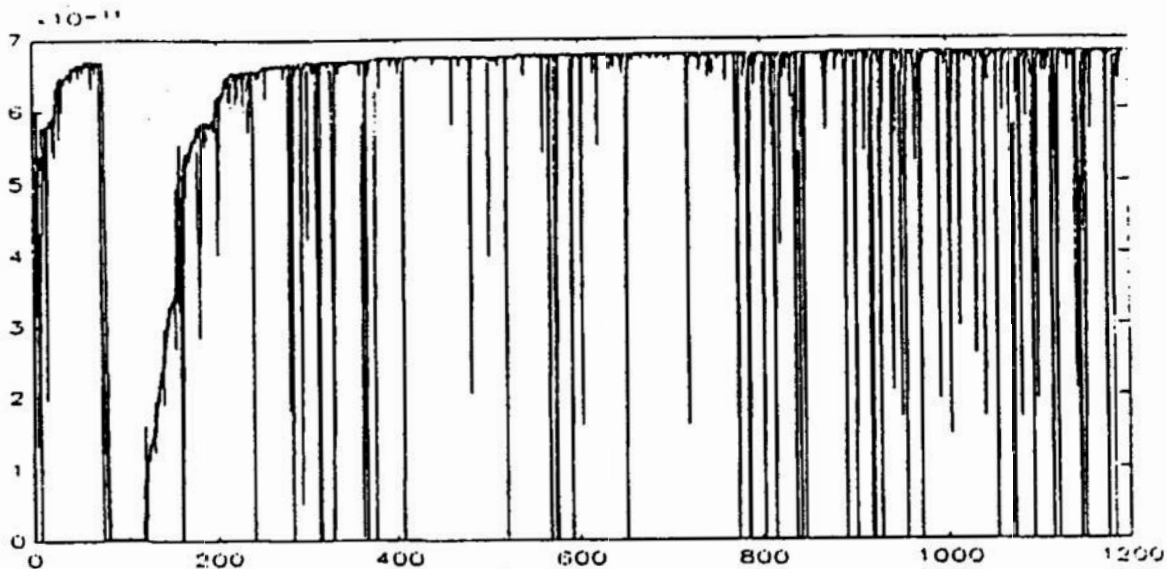
- d) Kolejne pokolenia regulatorów mają tę samą liczebność.

### Obliczenia dla mało licznej populacji początkowej

W przypadku tym (4 regulatory) selekcji dokonuje się w taki sposób, że w każdym pokoleniu odrzuca się najgorszy regulator i na jego miejsce podstawia się najlepszy z losowo i nieznacznie zmodyfikowanymi współczynnikami wzmocnienia.

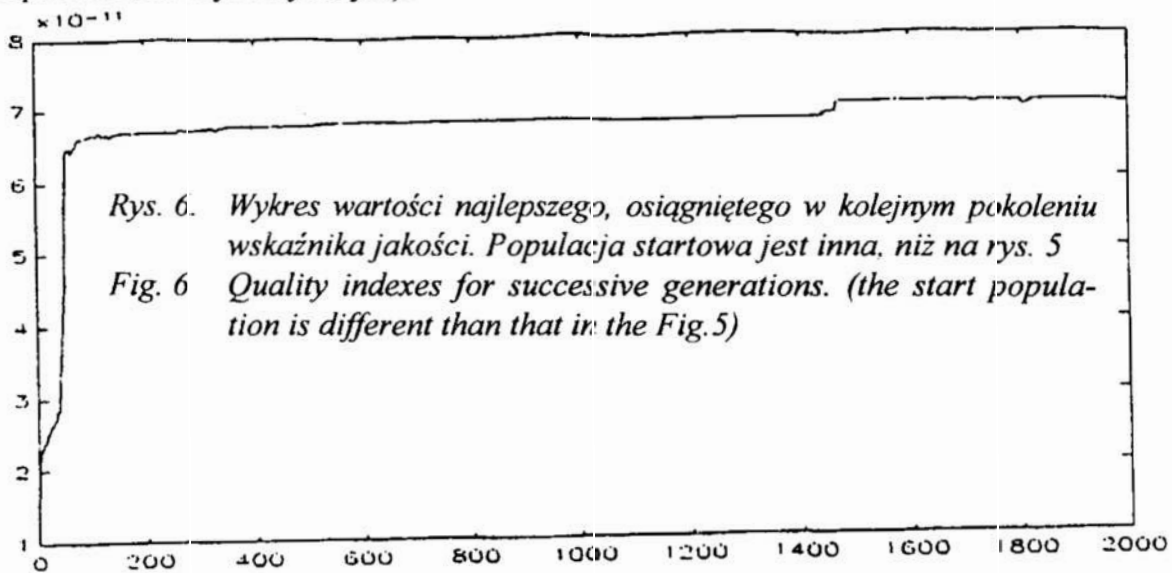
Pary poddane krzyżowaniu nie ulegają zmianie. Są to regulatory 1 i 2 z listy rankingowej oraz 3 i 4. Każda z nastaw jest kodowana jako 8 bitowa cyfra. Krzyżowanie jest dokonywane niezależnie dla każdej nastawy.

Oprócz nieznacznych mutacji występujących w każdym pokoleniu i dotyczących niewielkiej modyfikacji najlepszego regulatora podstawionego w miejsce najgorszego, stosuje się także rzadko występującą mutację głęboką. Tak więc, co 20 pokoleń jeden z egzemplarzy populacji poddany jest mutacji polegającej na dodaniu lub odjęciu od wartości każdej z nastaw liczby będącej potęgą dwójki. Dodawanie lub odejmowanie i wybór potęgi dokonuje się losowo.



Rys. 5. Wykres w funkcji numeru pokolenia nałożonych na siebie wartości wskaźników jakości uzyskanych przez wszystkie cztery optymalizowane regulatory  
 Fig. 5. Quality indexes for all four optimized controllers versus generation index

Na rysunku 5 zamieszczono nałożone na siebie losowo wartości wskaźników jakości uzyskanych przez wszystkie cztery regulatory. Warto zauważyć duże rozrzuty jakości regulatorów oraz to, że po około 100 pokoleniach rozwiązanie zbliżone do optymalnego zostało zgubione, prawdopodobnie na skutek niefortunnej mutacji. Po upływie pewnej liczby pokoleń, proces pozytywnej ewolucji wartości nastaw ponownie zaskarował. Wykres przedstawia rezultaty kilkunastu godzin pracy komputera (PC-386 DX, 40 MHz z koprocesorem arytmetycznym).



Rys. 6. Wykres wartości najlepszego, osiągniętego w kolejnym pokoleniu wskaźnika jakości. Populacja startowa jest inna, niż na rys. 5  
 Fig. 6 Quality indexes for successive generations. (the start population is different than that in the Fig. 5)

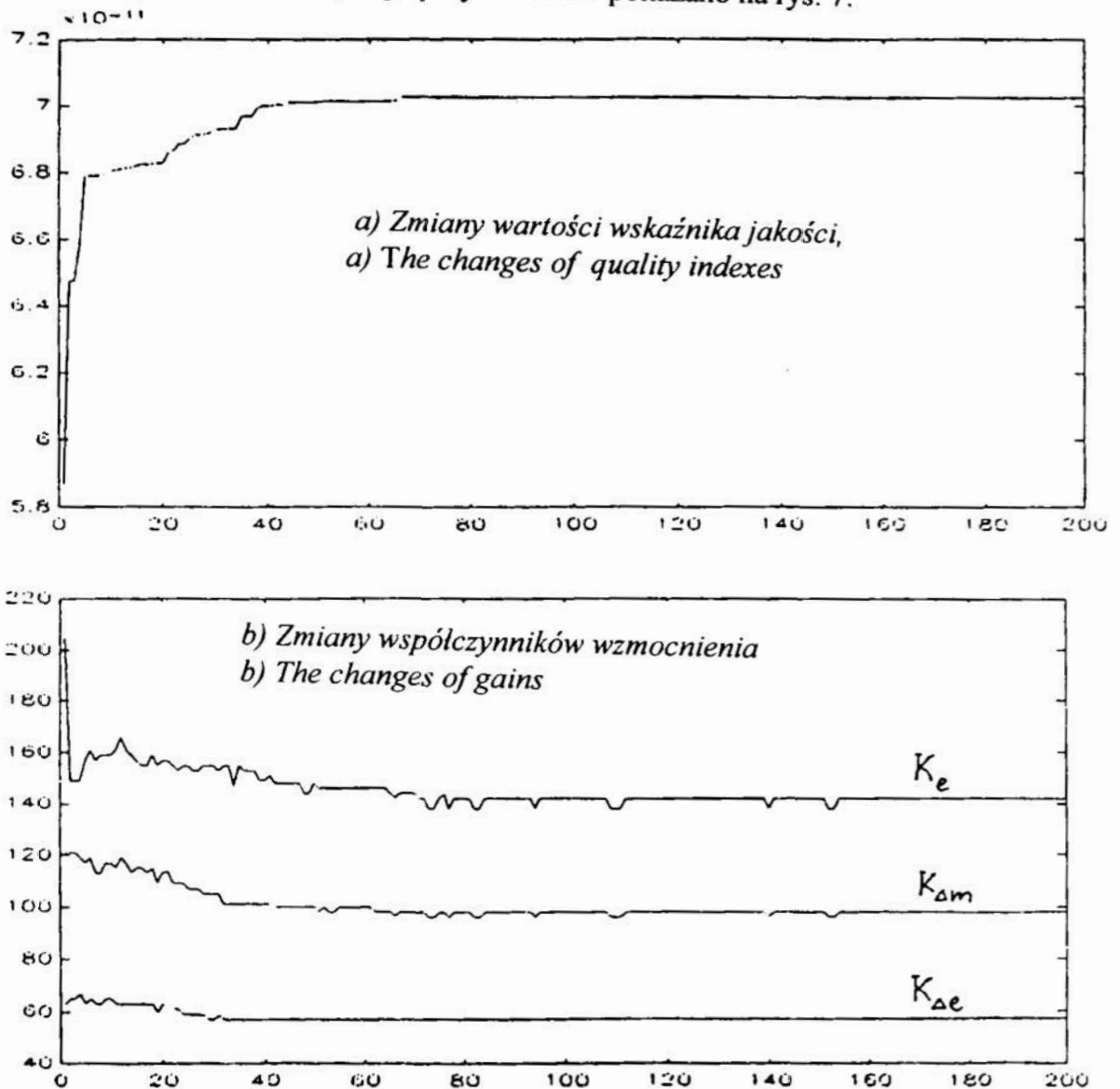
Dla zwiększenia rzetelności, na rysunku 6 zamieszczono wartości najlepszego, osiągniętego w pokoleniu wskaźnika jakości w przypadku innej populacji początkowej. Z rysunku wynika, że algorytm przez wiele pokoleń, mimo kolejnych mutacji i ciągłego

krzyżowania, może zatrzymać się w lokalnym minimum. Znalezione wreszcie optimum globalne wynosi  $J_1 = 7.027 \cdot 10^{-11}$

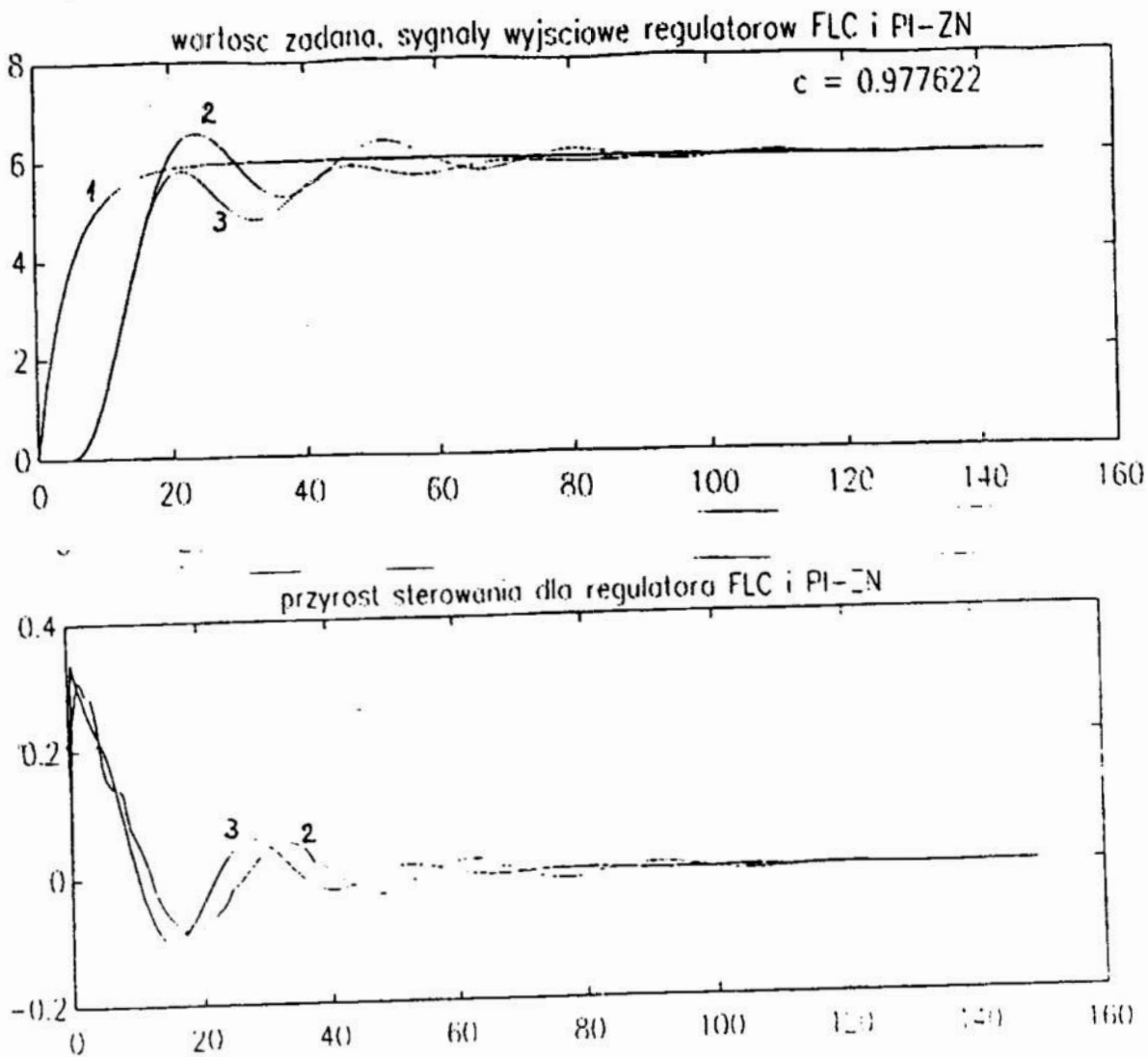
### Obliczenia dla licznej populacji początkowej

Oprócz zwiększenia liczebności populacji początkowej do 40 regulatorów, zmieniono mechanizm selekcji odrzucając 10 najgorszych egzemplarzy. W miejsce odrzuconych regulatorów wstawiono 4 pierwsze, 4 drugie i 2 trzecie egzemplarze z listy rankingowej. Nastawy regulatorów wprowadzanych w miejsce odrzuconych modyfikowano analogicznie, jak uprzednio. Krzyżowanie także dokonywano w stałych parach, pierwszy z drugim regulatorem, trzeci z czwartym, itp.

Po wprowadzeniu powyższych zmian obliczenia stały się wolniejsze, lecz proces ewolucji przebiegał szybciej – w mniejszej liczbie pokoleń. Przykładową ewolucję wskaźnika jakości i zmiany najlepszych nastaw pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Zmiany ewolucyjne dla populacji 40 regulatorów:  
 Fig. 7. The evolution changes for population of 40 controllers



Rys. 8. Zoptymalizowane odpowiedzi na zmianę wartości zadanej (1) regulatora lingwistycznego (2) i regulatora PI z nastawami Zieglera i Nicholasa (3)

Fig. 8. The optimized responses for the reference change of (1) the fuzzy logic controller and (2) the PI controller with Ziegler - Nichols' sets (3)

Na rysunku 8 pokazano przebiegi czasowe zoptymalizowanego regulatora lingwistycznego i regulatora PI z nastawami Zieglera i Nicholasa. W porównaniu z rysunkiem 3 spostrzega się wyraźną poprawę przebiegów. W szczególności poprawa ta dotyczy wykresu przyrostów sterowania dla regulatora lingwistycznego.

#### Zmiana wskaźnika jakości i tablicy decyzyjnej regulatora

Na podstawie rysunku 8 można zauważyć, że na skutek występowania opóźnienia transportowego w obiekcie regulacji, początkowe, duże uchyby nie mogą być skompensowane przez dobór jakiegokolwiek sterowania. Oprócz tego, wskaźnik  $J_1$  przede wszystkim zależy od szybkości narastania sygnału wielkości regulowanej, podczas gdy oscylacje wokół wielkości zadanej w niewielkim stopniu wpływają na wartość wskaźnika jakości. Uwzględniając powyższe spostrzeżenia postanowiono tak zmienić wskaźnik  $J_1$ , aby w odpowiedzi układu silniej uwypuklić występowanie oscylacji. Najprościej jest ten cel osiągnąć

pomijając we wskaźniku uchyb dotyczący początkowej części wykresu odpowiedzi układu. Przyjęto zatem następujący, zmodyfikowany wskaźnik

$$J_2 = \frac{1}{\left[ \sum_{n=30}^N e^{2(nT_p)} \right]^5} \quad (6)$$

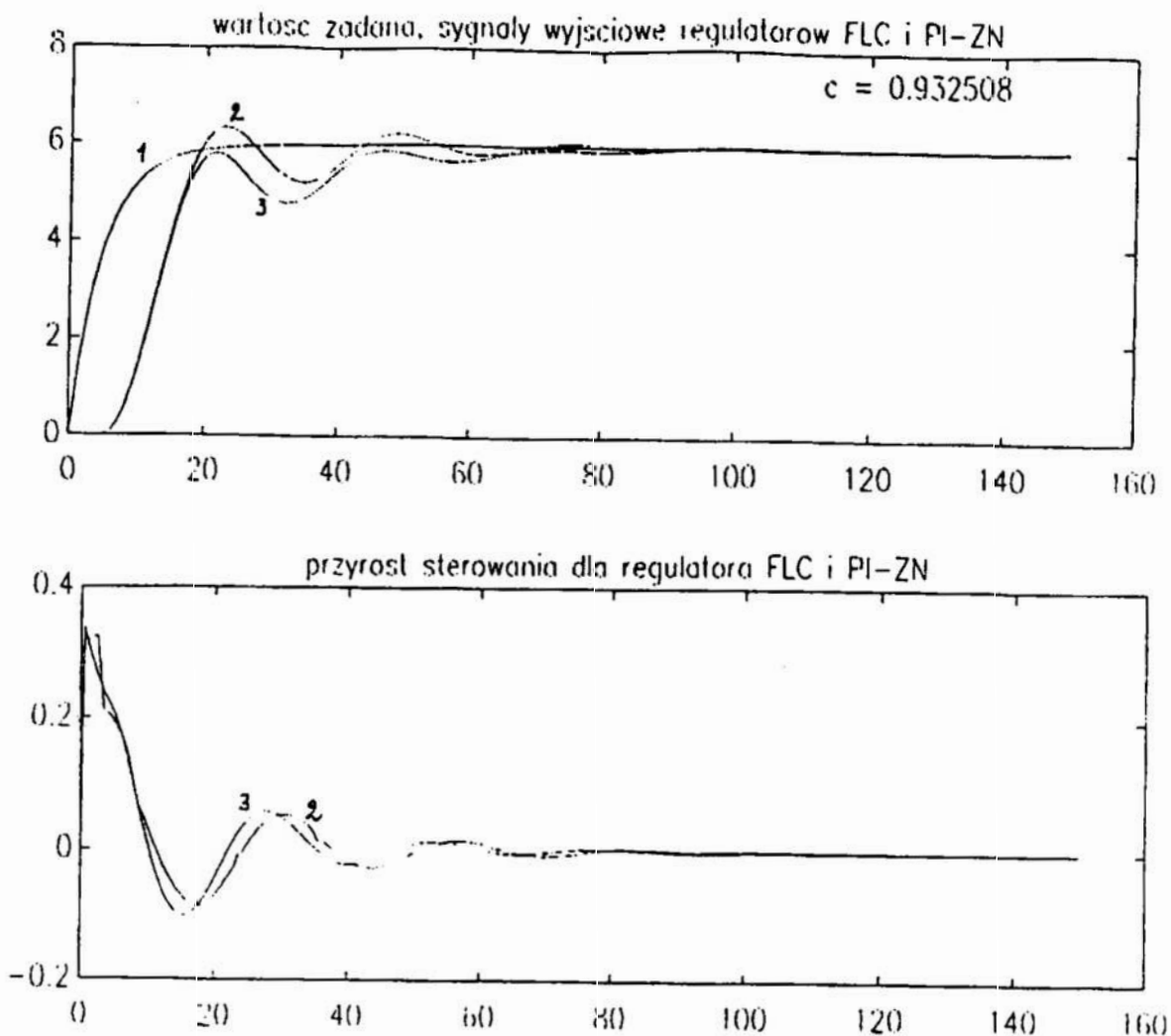
Oprócz powyższej zmiany wprowadzono nową, bardziej uproszczoną tablicę decyzyjną, zamieszczoną na rysunku 9. Uzyskana odpowiedź układu pokazana na rysunku 10, która zgodnie z oczekiwaniami charakteryzuje się małym przeregulowaniem i szybkim ustalaniem się oscylacji.

		$\Delta e_k$					
		NB	NM	ZE	PM	PB	
$e_k$	PB	ZE	PS	PB	PB	PB	PB = 1.0
	PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PM = 2/3
	ZE	NB	NS	ZE	PS	PB	PS = 1/3
	NM	NB	NM	NS	ZE	PS	ZE = 0
	NB	NB	NB	NB	NS	ZE	NS = -1/3
							NM = -2/3
							NB = -1.0

Rys. 9. Zmodyfikowana (uproszczona) tablica decyzyjna ostatecznej wersji regulatora lingwistycznego. Zakresy sygnałów unormowano do przedziału (-1 ÷ +1)

Fig. 9. The modified linguistic matrix of the final version of the fuzzy logic controller. The ranges of signals are (-1 ÷ +1)

Wskaźnik jakości  $J_2$  dla regulatora lingwistycznego okazał się o około 12% lepszy od wskaźnika dla regulatora PI z nastawami Zieglera i Nicholasa. Najkorzystniejsze przebiegi uzyskane w przypadku uproszczonej i bardziej symetrycznej tablicy decyzyjnej prawdopodobnie wynikają z tego, że sterowany obiekt był liniowy. W przypadku nieliniowego obiektu, tablica decyzyjna powinna być odpowiednio dobrana do rodzaju nieliniowości, a więc - w ogólnym przypadku - niesymetryczna.



Rys. 10. Odpowiedzi ostatecznej wersji regulatora lingwistycznego: 1– wymuszenie, 2–regulator lingwistyczny, 3 – regulator PI

Fig. 10 The responses of final version of the fuzzy logic controller: 1 - excitation, 2-the fuzzy logic controller, 3 - the PI controller

## 6. Podsumowanie

Genetyczny algorytm optymalizacji ocenia się jako bardzo przydatny do strojenia regulatorów lingwistycznych. Wykazano, że optymalizacja początkowej wersji projektu regulatora (FLC: 3) była uzasadniona i pomimo starannego opracowania tej wersji, optymalizacja znacznie poprawiła odpowiedź skokową układu. Należy jednak dodać, że uzyskanie optymalnego wskaźnika jakości nie powinno być rozpatrywane bez sprawdzenia odporności układu regulacji na zmiany parametrów obiektu. Odporność badana metodą symulacji komputerowej okazała się podobna, jak dla układu z konwencjonalnym regulatorem PI z nastawami Zieglera i Nicholasa.

Osobnym zagadnieniem okazał się dobór parametrów samego genetycznego algorytmu optymalizacji oraz zastosowanie takiego wskaźnika jakości regulacji, który by jak najlepiej uwypuklał wymagane cechy układu regulacji.



Warto zwrócić uwagę na trudności metodologiczne towarzyszące opisanym badaniom. Tak więc, algorytmy lingwistyczne są przeznaczone dla regulacji trudnych obiektów nieliniowych. Rozpatrywanie układów regulacji składających się z nieliniowego z istoty swego działania regulatora lingwistycznego i liniowego obiektu, dobrze sterowanego za pomocą konwencjonalnych regulatorów PI, uniemożliwia uwypuklenie najbardziej atrakcyjnych cech algorytmów lingwistycznych – możliwość stosunkowo łatwego opracowania efektywnego algorytmu dla obiektów nieliniowych.

Przeprowadzone badania pokazały, że odpowiednio dostrójony regulator lingwistyczny może skutecznie konkurować z liniowym regulatorem PI sterującym liniowym obiektem z opóźnieniem transportowym.

Następny problem metodologiczny dotyczy sytuacji, dla której optymalizowane są parametry regulatora lingwistycznego. Ponieważ badano układ nieliniowy, zatem wyniki optymalizacji zależą od postaci wymuszenia. Szczególnie interesująca byłaby optymalizacja dla wymuszeń przypadkowych, dla których model zakłóceń miałby postać określonego filtru, pobudzanego białym szumem. Tak więc, przedstawiona praca otwiera listę problemów i jej nie kończy.

### **Literatura**

- 1 Lee C.C.: *Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller*, Part I, Part II. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 20, No 2, 1990
- 2 Fleming P.J., Fonseca C.M.: *Genetic Algorithms in Control Systems Engineering*, 12 IFAC Congress, Vol. 2, Sydney 1993
- 3 Karr C.L., Gentry E.J.: *Fuzzy Control of pH Using Genetic Algorithms*, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 1, No. 1, 1993

### **Streszczenia**

W pracy omówiono zasadę działania regulatora lingwistycznego oraz genetycznego algorytmu optymalizacji, wyjaśniono założenia przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych i obliczeń, a także przedstawiono najciekawsze rezultaty badań.

### **APPLICATION OF GENETIC ALGORITHM FOR TUNING OF FUZZY LOGIC CONTROLLER**

#### **Summary**

It is presented a work principle of fuzzy logic controller and genetic algorithms applied to optimization. Assumptions for simulation experiments are given. There are presented the most interesting results of research, as well.

## **WYBÓR METODY POLIPTYMALIZACJI STRUKTURY PROCESU TECHNOLOGICZNEGO**

### **1. Zagadnienia wyboru optymalnej struktury procesu technologicznego.**

Rozważając zagadnienie wyboru najbardziej racjonalnego wariantu procesu technologicznego, należy mieć na uwadze zarówno optymalizację parametryczną, jak i strukturalną procesów technologicznych [10,12,13]. Optymalizacja strukturalna jest rozumiana jako zagadnienie optymalnego podziału procesu na operacje o sprecyzowanej treści zabiegów i ich uszeregowania w odpowiedniej kolejności [11,14]. W modelu matematycznym optymalizacji wielokryterialnej struktury procesów technologicznych musimy uwzględnić trzy czynniki: tworzenie zbioru wariantów dopuszczalnych, kryteria optymalności i algorytm (procedurę) poszukiwania wariantu optymalnego [9,11]. Znaczna złożoność dostępnych procedur postępowania optymalizującego struktury procesów technologicznych [6,7,8,13] oraz możliwość wystąpienia trudności z wyborem odpowiedniej procedury optymalizującej w konkretnych przypadkach praktycznych, skłoniły autorów do opracowania systemu ekspertowego wspomagającego podejmowanie decyzji w tym zakresie. Wybór metody optymalizującej w tej dziedzinie zależy od następujących uwarunkowań: rodzaju obrabianej części (ogólnego przeznaczenia, specjalna), charakteru produkcji (jednostkowy, małoseryjny itd.), rodzaju kryteriów przeznaczonych do oceny wariantów (deterministyczne, probabilistyczne lub rozmyte), liczby ekspertów opisujących względne preferencje poszczególnych wariantów oraz ważność kryteriów, kwalifikacji ekspertów (ich umiejętności posługiwania się złożonymi procedurami analitycznymi), sposobu oceny poszczególnych wariantów (bazowy, punktowy), znajomość kosztów producenta i użytkownika wyrobu. Zmiennymi decyzyjnymi w omawianym zagadnieniu są metody optymalizujące: Yagera (punktowa i bazowa)[15,16], Baasa i Kwakernaaka[1,5], Knosali[3,4], Pareto (2 odmiany), funkcja użyteczności lub stosunek kosztu jednostkowego do trwałości.

Zbiór wariantów procesu technologicznego przedstawiono za pomocą grafu-drzewa. Wierzchołkom grafu odpowiadają operacje, zaś krawędzie grafu określają wzajemne powiązania operacji w ramach procesu technologicznego. W każdym grafie-drzewie przedstawiającym zbiór wariantów procesu technologicznego wyróżniono podgrupy wariantów. Rozważono dwa przypadki: w pierwszym każda podgrupa wariantów procesu technologicznego wykonywana jest z odmiennego rodzaju

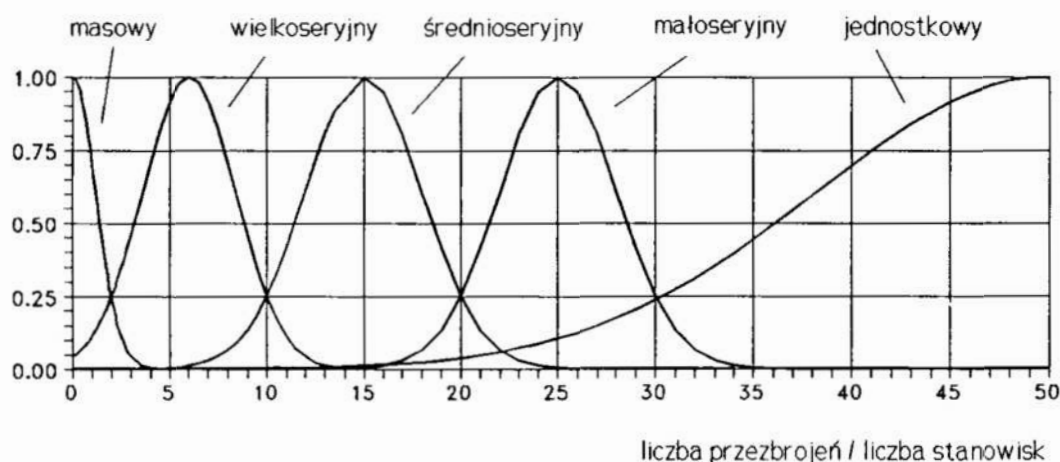
półfabrykatu, zaś w drugim z tego samego półfabrykatu, przy czym różnice w poszczególnych podgrupach wynikają z rodzaju operacji oraz ich kolejności. Na ogół w pierwszym etapie postępowania optymalizacyjnego dokonuje się wyboru preferowanej postaci półfabrykatu lub preferowanej podgrupy wariantów procesu technologicznego. Natomiast w drugim etapie dokonuje się z reguły wyboru wariantów optymalnych w sensie Pareto lub wariantu optymalnego (najlepszego). Proces wyboru wariantu ma więc charakter etapowy, gdzie kolejne etapy wnioskowania odpowiadają poszczególnym modułom bazy-wiedzy systemu ekspertowego. Moduły bazy-wiedzy wczytywane są do pamięci operacyjnej tylko w razie potrzeby, co przyspieszyło oczywiście sam proces wnioskowania. Technolog podejmując decyzję o wyborze procedury optymalizacyjnej musi brać pod uwagę szereg czynników, których precyzyjne określenie jest w praktyce najczęściej niemożliwe. Dlatego głównym kryterium, jakie miał spełnić system szkieletowy, była możliwość uwzględnienia w trakcie wnioskowania niepewności, wynikającej głównie z lingwistycznego charakteru użytych zmiennych.

## **2. SEMPT - system ekspertowy wyboru metody polioptymalizacji struktury procesu technologicznego.**

Dla opracowania systemu ekspertowego SEMPT, realizującego wspomaganie powyższego problemu decyzyjnego, wykorzystano system szkieletowy *MANTRA*. System ten powstał w Katedrze Technologii Maszyn i Automatyzacji Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej. U jego podstaw leży założenie, aby umożliwić zapisywanie wiedzy w postaci reguł, sformułowanych możliwie w języku zbliżonym jak najbardziej do języka naturalnego. Jest to system całkowicie polsko-języczny, co zwiększa komfort pracy. Reguły są zapisywane w postaci sekwencji przesłanek połączonych spójnikami "i" oraz "lub" i koniunkcją konkluzji. Priorytety spójników zależą wyłącznie od ich kolejności, co czasami zwiększa liczbę reguł, ale ułatwia ich zapis i ogranicza niejasności i pomyłki podczas ich redagowania. Użycie faktów specjalnych jak czytaj, zapytaj itp., powoduje, że charakter konwersacji użytkownik - komputer jest bardzo naturalny. Zarówno fakty jak i reguły mają przypisany tzw. współczynnik pewności, przyjmujący wartości ze zbioru  $[0, 1]$ . Współczynnik ten jest na bieżąco weryfikowany podczas wnioskowania. Dla obliczenia wartości nowych współczynników pewności użyto funkcji algebraicznej sumy i iloczynu zbiorów rozmytych, co wg autorów daje lepszą adekwatność, aniżeli odpowiadające im funkcje logiczne. W przypadku gdy wygenerowana konkluzja reprezentuje fakt już istniejący w bazie wiedzy (potwierdza istniejący fakt), jego współczynnik pewności jest sumowany algebraicznie ze współczynnikiem pewności jaki uzyskała dana reguła, co oczywiście zwiększa jego wartość (chyba, że osiągnął już wartość 1). Wprowadzono tzw. minimalny, dopuszczalny współczynnik pewności (różny od zera), poniżej którego wszystkie fakty są uważane za fałszywe i wraz z odpowiednimi regułami eliminowane z bieżącej bazy wiedzy. Efektywne modelowanie w systemach ekspertowych pojęć opisywanych dotychczas kategoriami lingwistycznymi i/lub w postaci danych tabelarycznych jest

możliwe dzięki zastosowaniu teorii zbiorów rozmytych [2] w formułowaniu reguł produkcji oraz uwzględnieniu stopni przynależności w zarządzaniu niepewnością w trakcie wnioskowania. System *MANTRA* umożliwia modelowanie pojęć w postaci funkcji przynależności do zbioru rozmytego, co zostało w systemie SEMPT szeroko wykorzystane, zwłaszcza dla zamodelowania charakteru produkcji (rys.1).

## CHARAKTER PRODUKCJI



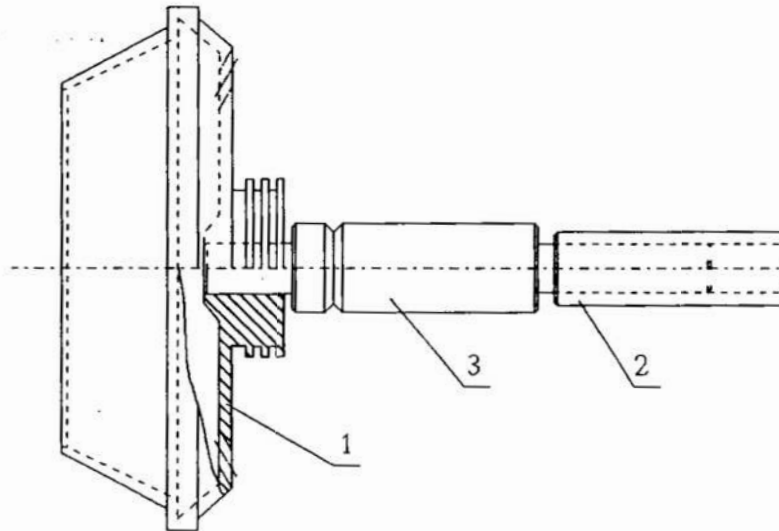
Rys.1. Modelowanie charakteru produkcji przy pomocy zbioru rozmytego.

Fig.1. Fuzzy sets application in kind of processing modelling.

Jak wspomniano powyżej system ten jest systemem regułowym z możliwością wnioskowania wstecz oraz wprzód ze śledzeniem wstecz i pod tym względem przypomina wzorcowy system EMYCIN. Został on opracowany w języku PDC Prolog, w pełni potwierdzając przydatność tego języka do tego typu aplikacji. System SEMPT został wykonany w ramach prac związanych z grantem numer 771379102 o tematyce "Optymalizacja strukturalna i parametryczna procesów technologicznych".

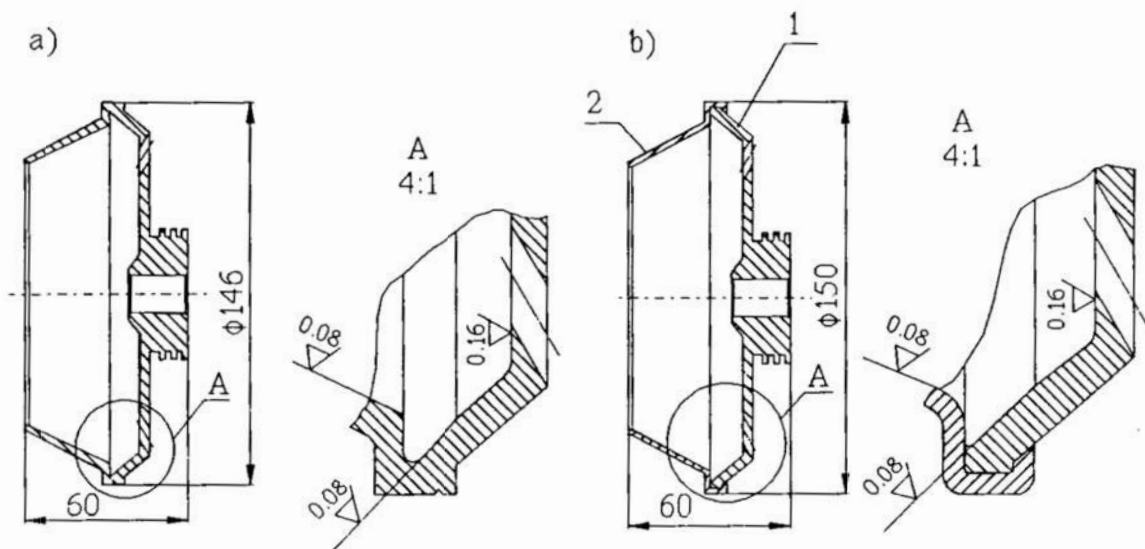
### 3. Przykład wyboru metody polioptymalizacji struktury procesu technologicznego wirówki przedzarki bezwrzecionowej.

Podstawowym podzespołem każdej przedzarki bezwrzecionowej opartej na systemie przedzenia pneumomechanicznego jest głowica przedzająca, której najważniejszym elementem jest rotor zwany w przedzarkach bezwrzecionowych PW-11 i PW-12 wirówką. Kompletna wirówka przedzarki bezwrzecionowej PW-12(rys.2), składa się z trzech części: wirówki (1), bieżnika (2), oraz łożyska (3). Wirówki dotychczas wykonywano z duralu PA7ta i wymaga się od nich bardzo małej wartości bicia osiowego i promieniowego wszystkich czół i średnic powyżej 40mm oraz niskiej chropowatości powierzchni wewnętrznych (rys. 3.).



Rys. 2. Wirówka przedzarki bezwrzecionowej PW-12.

Fig. 2. Spinning frame rotor PW-12.



Rys. 3. Wirówka: a - jednolita, b - składana z dwóch części: tarczy (1) i wyoblanego stożka (2), łączonych przez zawalcowanie.

Fig. 3. Rotor: a - all of a piece, b - folding.

Poniżej przedstawiono przykład wnioskowania w przód w systemie ekspertowym "SEMPT". Nazwy kolejnych reguł podkreślono, odpowiedzi użytkownika napisano pogrubionym drukiem, po prawej stronie zamieszczono bieżące wartości współczynnika pewności.



<u>start</u>	WP = 1.00
Jeśli start - tak	1.00
to	1.00

Zbiór wariantów procesu technologicznego przedstawiono w postaci grafu drzewa. Pierwszemu etapowi postępowania optymalizującego na ogół odpowiada wybór preferowanej postaci półfabrykatu lub wybór preferowanej podgrupy wariantów, drugiemu etapowi określenie zbioru wariantów w sensie Pareto, natomiast trzeciemu etapowi - wybór wariantu najlepszego ze zbioru rozwiązań optymalnych w sensie Pareto. W szczególnym przypadku postępowanie optymalizujące zostaje zakończone na drugim etapie gdy zbiór rozwiązań optymalnych w sensie Pareto posiada tylko jedno rozwiązanie.

Wybierz poziom grafu drzewa: <b>pierwszy</b>	1.00
<u>poziom pierwszy</u>	
Jeśli poziom grafu drzewa - pierwszy	1.00
to	1.00
czytaj_poziom_1	1.00
<u>start etap pierwszego</u>	1.00
Jeśli start - tak	1.00
to	1.00
Zbiór wszystkich części można podzielić na dwie klasy:	
- typowe (ogólnego przeznaczenia);	
- funkcyjne (o specjalnych właściwościach, decydujących o jakości wyrobu, np. tuleja cylindrowa, wirówka przedzarki, itp.)	
Podaj rodzaj części: <b>funkcyjna</b>	1.00
Produkcja rozpatrywanej części ma charakter: ?	1.00
<u>charakter produkcji</u>	
Jeśli charakter produkcji - ?	1.00
to	1.00
czytaj char_pro	1.00
<u>wybór sposobu określenia charakteru produkcji</u>	1.00
Jeśli charakter produkcji - ?	1.00
to	1.00
Charakter produkcji można określić przy pomocy następujących parametrów:	
- wskaźnika liczby przebrojeń na stanowisko;	
- liczby produkowanych części w ciągu roku i masy wyrobu;	
- wielkości partii i masy wyrobu.	
Która z wielkości jest ci znana: <b>liczba części</b>	1.00
<u>określenie charakteru produkcji na podstawie liczby części</u>	1.00
Jeśli wskaźnik charakteru produkcji - liczba części	1.00
to	1.00



Jaka jest masa wyrobu (słownie): <b>mała</b>	1.00
Podaj liczbę części jednego rodzaju w produkcji rocznej: <b>700</b>	1.00
<u>liczba części a produkcja średnioseryjna lekka</u>	1.00
Jeśli masa wyrobu - mała	
i produkcja średnioseryjna lekka = f1 liczba części	1.00
to	0.32
charakter produkcji - średnioseryjny	0.32
<u>rodzaj kryterium II</u>	1.00
Jeśli charakter produkcji - małoseryjny	0.00
lub charakter produkcji - średnioseryjny	0.32
i rodzaj części - funkcyjna	1.00
to	0.32
<p>Każdy z wariantów można ocenić przy pomocy następujących grup kryteriów:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- kryterium użytkowe (funkcjonalne, estetyczne) np. odporność na zużycie, odblaskowość, itp.;</li> <li>- kryterium techniczne np. czas wykonania, chropowatość powierzchni;</li> <li>- kryterium ekonomiczne (koszty produkcji, koszty eksploatacji, zysk).</li> </ul> <p>W zależności od stopnia niepewności każde z ww kryteriów może mieć charakter:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- deterministyczny (ocena ustalona jest precyzyjnie);</li> <li>- probabilistyczny (ocena wyrażona jest przy pomocy parametrów rozkładu zmiennej losowej).</li> <li>- rozmyte (ocena jest wyrażona przy pomocy stopnia przynależności do zbioru rozmytego lub w postaci lingwistycznej).</li> </ul>	
Jakiego typu kryterium użyjesz do oceny: <b>rozmyte</b>	0.32
<u>liczba ekspertów</u>	1.00
Jeśli rodzaj kryterium - rozmyte	0.32
to	0.32
Podaj liczbę ekspertów : <b>3</b>	1.00
<u>kwalifikacje ekspertów</u>	1.00
Jeśli liczba ekspertów > 1	1.00
to	1.00
Jakie są kwalifikacje ekspertów : <b>dobre</b>	1.00
<u>metoda Baasa Kwakernaaka</u>	1.00
Jeśli kwalifikacje ekspertów - dobre	1.00
to	1.00

zastosuj metodę Baasa i Kwakernaaka.

#### 4. Wnioski

System ekspertowy "MANTRA" zaproponował użycie w postępowaniu optymalizującym strukturę procesu technologicznego wirówki przedzarki bezwrzecionowej metodę Baasa i Kwakernaaka. Metodę tę można stosować zarówno w przypadku procesów technologicznych części maszyn ogólnego przeznaczenia jak i części o specjalnych własnościach, w produkcji średnioseryjnej i masowej oraz gdy conajmniej trzech odpowiednio przygotowanych ekspertów ma do dyspozycji tylko informacje o charakterze nieostrym i subiektywnym. Wybór systemu jest więc w pełni uzasadniony. Obniżenie współczynnika pewności na pewnym etapie wnioskowania do wartości 0.32 wynika z zamodelowania charakteru produkcji w postaci funkcji przynależności do zbioru rozmytego.

#### LITERATURA

- [1] Baas S.M., Kwakernaak H. Rating and Ranking of Multiple - Aspect Alternatives Using Fuzzy Sets. *Automatica*, 1977, vol.13, s.47÷58.
- [2] Kacprzyk J.: Zbiory rozmyte w analizie systemowej. PWN, Warszawa 1986.
- [3] Knosala R.: Objektivierung des Bewertungsprozesses beim Konstruieren. *Konstruktion*, 43(1991), s.344÷352.
- [4] Knosala R., Pedrycz W.: Komputerowy system wspomagający proces oceny rozwiązań konstrukcyjnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Nr 1012, Mechanika z.86*. Gliwice 1987.
- [5] Kwakernaak H.: An Algorithm for Rating Multiple Aspect Alternatives Using Fuzzy Sets. *Automatica*, 1979, vol.15, s.616÷616.
- [6] Płonka S.: Optymalizacja wielokryterialna procesów technologicznych prowadnika przedzdy. Materiały na Konferencję Naukową n.t. "Podstawy Projektowania Procesów i Systemów Produkcyjnych". Monografia 150. Politechnika Krakowska 1993.
- [7] Płonka S.: Metodologiczne Problemy optymalizacji wielokryterialnej w projektowaniu struktury procesów technologicznych. Materiały IX i X Konferencji n.t. "Poliptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania". *Zeszyt Naukowy WM, WSInż. Koszalin* 1994.
- [8] Płonka S.: Model optymalizacji wielokryterialnej struktury procesów technologicznych. *Postępy technologii Maszyn i Urządzeń* (w druku).
- [9] Saaty T.L.: *The Analytic Hierarchy Process*. New York, Mc Graw-Hill 1980.
- [10] Szadkowski J.: Optymalizacja strukturalna i parametryczna w projektowaniu procesów technologicznych obróbki skrawaniem. *Symposium Inauguracyjne Szkoły Podstaw Optymalizacji Procesów Technologicznych i Systemów Produkcyjnych*. PAN, Sekcja Podstaw Technologii KBN. TNOiK, Bielsko-Biała 1986.
- [11] Szadkowski J.: Optymalizacja strukturalna procesów obróbki skrawaniem. VII

Krajowa Konferencja n.t. "Postępy w teorii i technice obróbki materiałów". IOS, Kraków 1990.

[12] Szadkowski J., Płonka S.: Machining Process Optimization Considering Wear Resistance of Manufactured Elements. III Międzynarodowe Sympozjum INSYCONT, IPBM AG-H, Kraków 1990.

[13] Szadkowski J., Płonka S.: Optymalizacja wielokryterialna procesów. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej, cz.II. ITS, Bielsko-Biała 1991.

[14] Szulc S.: Struktura technologicznych procesów budowy maszyn. Archiwum Budowy Maszyn, T. IX, a.1, 1962.

[15] Yager R.R.: Fuzzy Decision Machining Including Unequal Objectives. Fuzzy Sets and Systems, 1978, vol.1, s.375÷382.

[16] Yager R.R.: Multiple objective Decision - Machining Using Fuzzy Sets. Inf. J. on Man - machining Studies, 1979, vol.9, s.375-382.

### **Streszczenie**

W pracy zaprezentowano system ekspertowy wspomagający wybór metody optymalizacji struktury procesów technologicznych w zależności od następujących czynników: rodzaju części, charakteru produkcji, rodzaju kryteriów, liczby i kwalifikacji ekspertów, sposobu oceny wariantów oraz znajomości kosztów producenta i użytkownika. Dla budowy systemu ekspertowego wykorzystano regułowy system szkieletowy MANTRA, umożliwiający wnioskowanie z uwzględnieniem niepewności faktów i reguł znajdujących się w bazie systemu. Ponadto podano przykład wnioskowania w opracowanym systemie dla wirówki przędzarki bezwrzecionowej.

## **AN EXPERT SYSTEM AIDING THE CHOICE OF AN OPTIMIZING METHODE FOR PROCESSING STRUKTURE**

### **Summary**

The paper presents a structure of an expert system aiding the choice of methode to optimize processing which depends on the following factors: kind of part, kind of processing, criteria, number and quality of experts, evaluation. technique of variants, knowledge of the manufacturer's and buyer's costs. To construct the expert system, the ruling shell system MANTRA, which enables drawing conclusion in respect of uncertain facts and rules found in the knowledge base, was used. More, an example of drawing conclusions with the help of the system for the yarn guide of a open end spinning frame rotor has been given.

## WSPOMAGANIE KONSTRUOWANIA W ŚRODOWISKU EDYTORÓW GRAFICZNYCH

Z powodu nazw handlowych takich pakietów jak AutoCAD, LogoCAD, OrCAD i inne, w świadomości przeciętnego użytkownika CAD czyli komputerowe wspomaganie projektowania kojarzy się z opracowaniem dokumentacji graficznej projektu. Jest to z punktu widzenia projektanta-mechanika niezbędny, końcowy etap procesu projektowania. Poprzedza go jednak szereg innych czynności projektowych poddających się wspomaganie komputerowemu.

W początkowym etapie rozwoju technik komputerowych pojawiła się koncepcja projektowania automatycznego. Opierała się ona na przekonaniu o możliwości budowy uniwersalnego modelu konstrukcji ujmującego wszystkie aspekty procesu konstruowania w nieskończonym zbiorze postaci konstrukcyjnych. Wkrótce okazało się, że w systemie człowiek-komputer twórcze aspekty projektowania nie poddają się automatyzacji i komputer sprowadzony został do właściwej mu roli narzędzia. Powyższą sytuację dokładnie ilustrują zdania Wilsona i Habibullaha, twórców systemu SAP, umieszczone w opisie tego systemu :

*"Efektywne zastosowanie programu komputerowego do analizy praktycznych sytuacji angażuje pokaźny zasób doświadczenia. Najtrudniejszą fazą analizy jest stworzenie odpowiedniego modelu zawierającego w sobie główne charakterystyki zachowania się konstrukcji. Żaden program komputerowy nie może zastąpić inżynierskiej wiedzy i wyczucia. Jest prawdą, że słaby inżynier nie zrobi za pomocą najpotężniejszego systemu tego, co może dobry inżynier policzyć na odwrócie koperty. Właściwa interpretacja wyników jest równie istotna, jak przygotowanie właściwego modelu struktury... Slangowe znaczenie słowa SAP zostało wybrane na nazwę systemu, aby przypominać użytkownikowi, że ten system, jak i inne, cierpi na brak inteligencji. Obowiązkiem inżyniera jest właściwa idealizacja konstrukcji i przyjęcie odpowiedzialności za wyniki obliczeń..."*

Nie jest intencją Autora cytującego powyższą opinię zniechęcanie użytkowników-projektantów do wspomaganie prac projektowych za pomocą komputera. Wprost przeciwnie, intencją jest, nie wymagające dowodu, dowartościowanie roli twórcy w procesie projektowania ze wskazaniem na konieczność uzyskania pewnych nawyków niezbędnych przy operowaniu każdym narzędziem.

Warunkiem efektywnego wykorzystania komputera-narzędzia jest osiągnięcie odpowiedniej kultury informatycznej, a więc znajomość metod informatyki i

---

\* Politechnika Gdańska

Wydział Mechaniczny Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn  
80-352 Gdańsk ul.Narutowicza 11/12

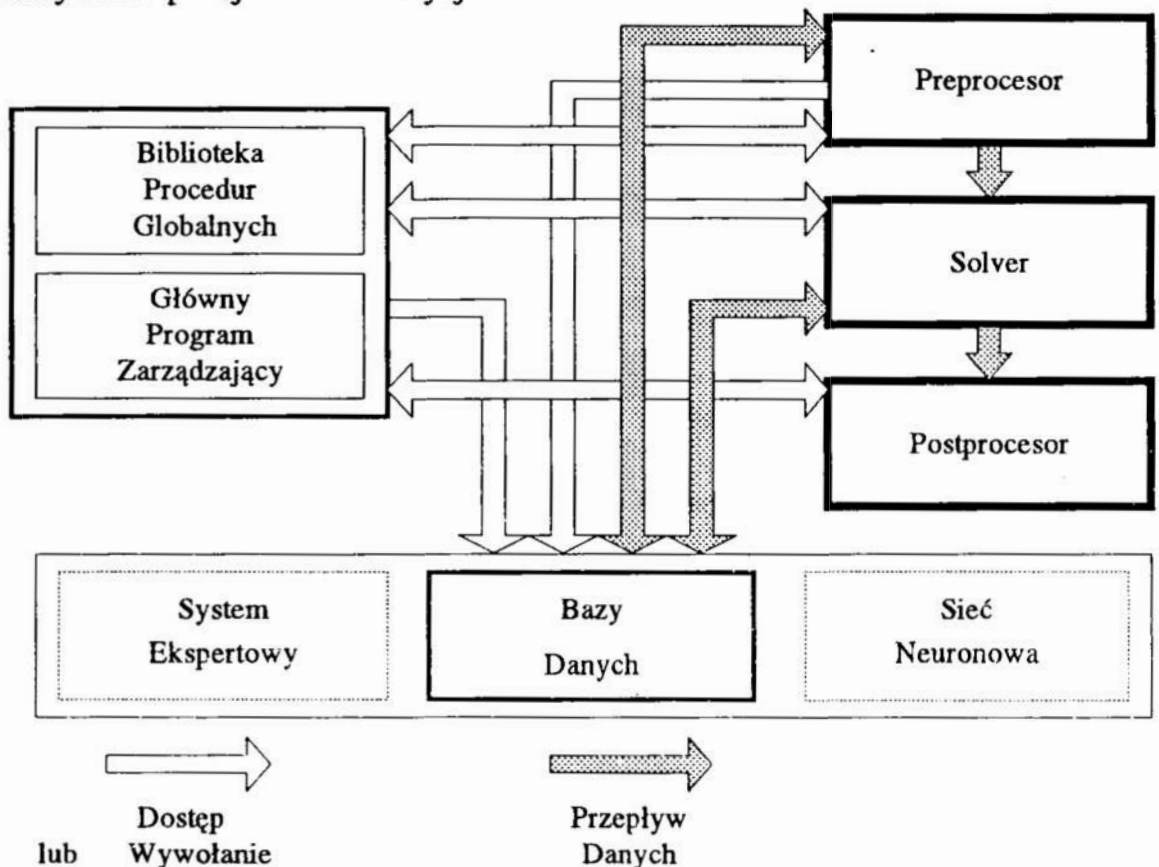
umiejętność posługiwania się jej środkami. Zakres tych umiejętności zależy od specyfiki problemu, którego rozwiązanie ma być wspomagane komputerem.

Celem projektowania w budowie maszyn jest określenie postaci konstrukcyjnej urządzenia, zespołu lub elementu. Postać konstrukcyjna jest to zespół cech geometrycznych, dynamicznych i materiałowych.

W referacie wykazano celowość zastosowania edytora graficznego (lokowanego w dowolnym miejscu systemu CAD, np. jako pre- i/lub postprocesor) w odniesieniu do wyżej zdefiniowanego projektowania w budowie maszyn, w którym postać geometryczna jest niezbywalnym elementem postaci konstrukcyjnej.

## 1. System CAD

Przekonywujące wydaje się stwierdzenie, że komputerowe wspomaganie projektowania jest to użytkowanie zbioru metod i środków informatycznych (komputerowych) wzmacniających możliwości twórcze konstruktora lub projektanta [3]. Rozwinąć należy pojęcie "możliwości twórczych". Jeżeli projektowanie jest procesem podejmowania decyzji, to możliwości twórcze projektanta opisuje efektywność podejmowania decyzji. "Zwijając" obydwa stwierdzenia można powiedzieć, że CAD to zbiór metod i środków informatycznych podwyższających efektywność podejmowania decyzji.



Rys. 1. Schemat systemu CAD

Fig. 1. Description of CAD system

System CAD składa się zazwyczaj z kilku modułów. Jeżeli nie są to oddzielne programy, to modułem staje się wyraźnie wydzielona funkcjonalnie część programu

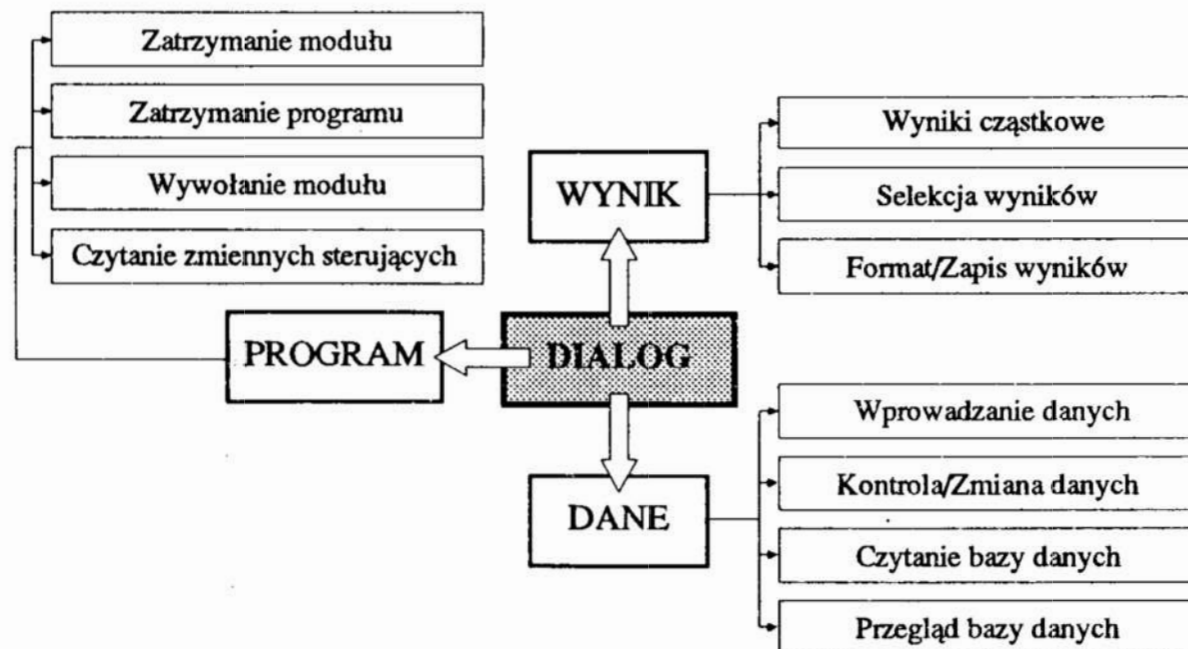


głównego. Z tego, funkcjonalnego punktu widzenia można wyróżnić kilka opcjonalnie występujących modułów [3]:

1. Preprocesor : moduł wprowadzania danych,
2. Program obliczeniowy : moduł realizujący obliczenia na podstawie wprowadzonych danych wg. określonego algorytmu,
3. Postprocesor : moduł czytania wyników obliczeń,
4. Baza lub bazy danych : baza danych zamknięta, zwykle wbudowana w system przez jego twórcę lub/i baza otwarta modyfikowana lub uzupełniana, ewentualnie utworzona dla potrzeb określonego zadania,
5. Biblioteka procedur : moduł zawierający procedury globalne dla systemu,
6. Główny program zarządzający.

Powyższy opis wymienia podstawowe elementy systemu bazując na obecnym stanie oprogramowania - jest opisem stanu faktycznego.

Opis należy uzupełnić o powiązania pomiędzy modułami przedstawione na rys. 1. Elementy systemu wraz z powiązaniem tworzą model dynamiczny systemu CAD. Powiązania te dotyczą przepływu danych pomiędzy modułami oraz dostępu i wywołań jednego modułu przez inny. Ze względu na prawdopodobnie identyczną postać formalną głównego programu zarządzającego oraz biblioteki procedur globalnych zostały one zgrupowane w jednym module. Poziom technologiczny oprogramowania nie upoważnia w obecnej chwili do bezwzględnego uzupełnienia schematu systemu o systemy ekspertowe i sieć neuronową. Wydaje się jednak, że znajdą one w najbliższym czasie swoje miejsce w CAD. Funkcjonalna rola obu elementów oraz ich powiązania w systemie jest podobna do roli baz danych, stąd zostały zgrupowane w jednym module. Przyjęcie takiego uzupełnienia implikuje rozszerzenia pojęcia danych o reguły i formuły właściwe modułom klasy AI (Artificial Intelligence).



Rys. 2. Dialog w systemie CAD  
Fig. 2. Dialog within CAD system



Przy omawianiu systemów CAD autorzy [1][2][3] zwracają uwagę na interaktywny (dialogowy) charakter powiązań wewnątrz systemu jak również przy rozważeniu makrosystemu człowiek-komputer. Podkreślany jest kluczowy charakter takiego sposobu komunikowania się. Wynika to z konieczności kontroli projektanta nad poczynaniami "bezdusznej maszyny", konieczności zmian danych, dostępu do wyników cząstkowych itp.

Wprowadzanie danych do modułu obliczającego odbywa się w trybie wsadowym lub konwersacyjnym. Rolę tę pełni preprocesor. Tryb wsadowy polega na wypełnieniu danymi pewnej struktury o określonym formacie. Strukturą tą może być plik.

Dialogowa konwencja porozumiewania się z komputerem dotyczy nie tylko wprowadzania danych. W systemie CAD istotną rolę odgrywa interaktywny dostęp do modułów systemu, danych i wyników przedstawiony na rys. 2.

## 2. Otwarty system komputerowego wspomaganie projektowania

W klasyczne ujęcie projektowania w budowie maszyn wyróżnić można następujące jego fazy [2] :

1. projektowanie koncepcyjne, które zaczyna się od analizy założeń i opracowania wstępnej koncepcji obiektu,
2. analiza projektu,
3. projektowanie szczegółowe (konstruowanie), polegające na szczegółowym projektowaniu elementów i zespołów,
4. wykonanie dokumentacji konstrukcyjnej.

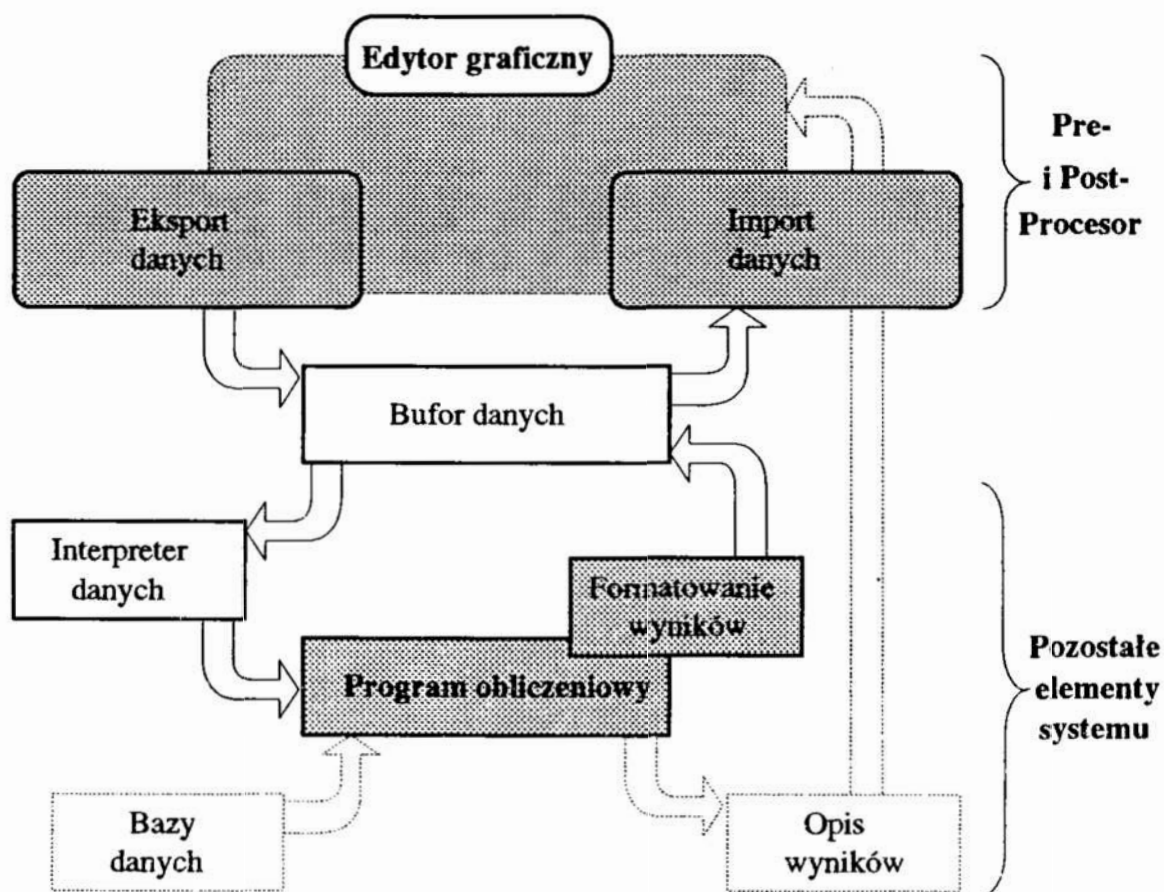
Takie ujęcie wyczerpujące w zasadzie proces projektowania nie uwzględnia komputera. Połączenia fazy 3 i 4 tzn. projektowania szczegółowego i wykonania dokumentacji konstrukcyjnej z wykorzystaniem wspomaganie komputerowego pozwala zbudować pewien system CAD, który nazwałbym systemem otwartym.

Elementy tego systemu są następujące :

- **Edytor graficzny** : Edytor graficzny to program lub pakiet programów przystosowany do prowadzenia prac projektowo-konstrukcyjnych. Ważną cechą edytora funkcjonującego w opisywanym systemie jest jego otwartość tzn. możliwość modyfikacji i dostęp do obiektów poddawanych edycji. Otwartość edytora graficznego jest warunkiem niezbędnym eksportu danych do bufora danych oraz importu wyników. Eksport danych i import wyników związany jest z właściwościami edytora. W przypadku współczesnych edytorów problem ten rozwiązują dołączane do pakietów lub wbudowane w edytor problemowo zorientowane języki programowania. Przykładem otwartego edytora graficznego jest AutoCAD firmy AutoDesk INC wraz z wbudowanym problemowo zorientowanym dialektem języka LISP - AutoLISP.
- **Bufor danych** : W schemacie systemu wyróżniono jedynie bufor danych , chociaż kierowany jest do niego również strumień wyników. Niewyróżnienie oddzielnego bufora wyników związane jest z identyczną rolą bufora przy przejmowaniu danych i wyników. Z drugiej strony rozróżnienie danych i wyników jest umowne. Przy rozwiązywaniu złożonych problemów, podczas ich dekompozycji, wyniki jednego kroku obliczeń mogą stanowić dane dla kroku

kolejnego. Najprostszą postacią bufora wyników jest pamięć masowa, a dane i wyniki mają postać plików dyskowych.

- ❑ **Interpreter danych** : Interpreter danych stanowi program komputerowy (procedury lub moduły), którego postać musi być ściśle związana z formatem danych eksportowanych z edytora graficznego oraz z właściwościami języka programowania użytego do stworzenia programu obliczeniowego.
- ❑ **Program obliczeniowy** : Stanowi szczegółowe rozwiązanie systemu i stanowi domenę projektanta i programisty.
- ❑ **Bazy danych** : Stanowią element opcjonalny dla programu obliczeniowego oraz modułów eksportu danych i opisu wyników.
- ❑ **Opis wyników** : Stanowi moduł wprowadzający wyniki obliczeń do edytora graficznego jako postprocesora w postaci, np. rysunków parametrycznych.



Rys. 3. Otwarty system CAD  
Fig. 3. Open CAD system

### 3. Podsumowanie

Przedstawiona powyżej koncepcja otwartego systemu CAD bazującego na profesjonalnym edytorze graficznym (o charakterystyce omówionej w poprzednim rozdziale) jako, jednocześnie pre- postprocesorze, umożliwia zintegrowanie przynajmniej dwóch etapów procesu projektowania, a mianowicie projektowania szczegółowego i opracowania graficznego projektu. Na podkreślenie zasługuje doskonały sposób interaktywnego budowania danych dla obliczeniowych programów wspomagających oraz wprowadzenie wyników w skończonej postaci tzn. reprezentacji graficznej. Zbudowanie efektywnego systemu otwartego CAD wymaga określenia właściwej dziedziny algorytmicznej [5] i racjonalnej struktury danych [6] dla określonej klasy problemu. Autor opracował główne założenia wyżej wymienionych elementów otwartego systemu CAD bazując na pakiecie AutoCAD. Potwierdzeniem słuszności koncepcji proponowanego systemu są aplikacje, również z dziedziny projektowania w budowie maszyn, zawarte w nakładkach na AutoCAD takich jak Genius12 i MechSlide.

### Literatura

- 1 Osiński Z., Wróbel J., *Teoria Konstrukcji Maszyn*, PWN, Warszawa, 1982
- 2 Osiński Z., Wróbel J., *Wybrane metody Komputerowego Wspomagania Konstruowania Maszyn*, PWN, Warszawa, 1988
- 3 Tarnowski W., Kiczowski T., *Komputerowe Wspomaganie Projektowania*, WSI Koszalin,
- 4 Siwek B.J., *Projektowanie elementów napędów w środowisku AutoCADa*, XVI Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Warszawska, 1993
- 5 Siwek B.J., *Pojęcie modelu komputerowego*, XII Krajowa Konferencja "Poliptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania", Mielno 1994
- 6 Siwek B.J., *Komputerowe Wspomaganie Projektowania - Struktura Danych*, XII Krajowa Konferencja "Poliptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania", Mielno 1994

### STRESZCZENIE

W referacie przedstawiono koncepcje otwartego systemu CAD bazującego na edytorze graficznym jako pre- i postprocesorze. Wskazano na zalety pakietu AutoCAD jako głównego modułu proponowanego systemu.

### COMPUTER ASSISTED DESIGN IN GRAPHIC EDITOR ENVIRONMENT

#### Summary

The concept of an open CAD system based on graphic editor is presented. AutoCAD package is the most suitable solution for the main module of suggested system.

## Symulacja układów o stałych rozłożonych za pomocą SIMULINK'a

### Wprowadzenie

Układami o stałych rozłożonych są te, które mają co najmniej dwie zmienne niezależne, np. czas i jeden z wymiarów liniowych. Opisane są one za pomocą równań różniczkowych cząstkowych, liniowych lub nieliniowych. W tym drugim przypadku rozwiązanie układu równań – praktycznie biorąc – możliwe jest tylko z pomocą komputera.

Warto spostrzec, że cel symulacji jest zwykle szerszy niż tylko analiza danego układu, umożliwiającą lepsze poznanie właściwości tego układu: zwykle ta wiedza potrzebna jest do lepszego zaprojektowania układu, a więc do syntezy. Jeśli istotne są właściwości dynamiczne układu (jak np. w przypadku urządzeń wibracyjnych, tłumików, układów regulacji, układów transportowych itd.), a w układzie zachodzą procesy które powinny być opisane równaniami nieliniowymi (co jest częstym przypadkiem), symulacja komputerowa jest – powtórzmy to – praktycznie jedynym sposobem analizy.

Ostatnio SIMULINK <sup>2</sup> staje się jednym z kilku najbardziej rozpowszechnionych komputerowych systemów (języków) symulacji. Przyczyn jest kilka; oto one.

⊗ SIMULINK jest pakietem osadzonym w środowisku MATLAB <sup>2</sup>, w którym istnieją inne <sup>3</sup>, bardzo wygodne pakiety (zwane tu *toolbox*'ami), służące do syntezy, np. pakiet Control System, przeznaczony do projektowania układów regulacji lub pakiet Optimalization do optymalizacji nieliniowej z ograniczeniami; współbieżne ich wykorzystanie przez użytkownika nie nastręcza żadnych trudności;

⊗ SIMULINK jest wyposażony we wiele narzędzi i bogatą bibliotekę modułów;

⊗ SIMULINK korzysta w sposób naturalny ze wszystkich narzędzi MATLAB'a (np. bogatych możliwości graficznych) i ze wszystkich jego *toolbox*'ów;

---

<sup>1</sup> Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie

<sup>2</sup> MATLAB i SIMULINK są handlowymi nazwami zastrzeżonymi dla MathWorks, Inc., USA

<sup>3</sup> obecnie już kilkanaście

⊗ MATLAB (a tym samym SIMULINK) może pracować w środowisku WINDOWS, może więc korzystać ze wszystkich innych pakietów w technice OLE (*Object Linking and Embedding*), umożliwiającej bardzo efektywne przenoszenie obiektów (zbiorów) między aplikacjami i umieszczanie ich **wewnątrz** innych obiektów;

⊗ MATLAB (a tym samym SIMULINK) jest systemem otwartym, tzn. użytkownik może dowolnie wzbogacać jego bibliotekę o własne procedury.

Celem artykułu jest wskazanie jak szerokie możliwości daje SIMULINK, ze szczególnym uwzględnieniem układów o stałych rozłożonych (niekiedy też zwanych układami ciągłymi).

## **Modelowanie w SIMULINK'u [1]**

W SIMULINK'u tworzenie modelu komputerowego możliwe jest na dwa sposoby:

◆ **graficzny**: układ równań (i warunków) algebraicznych i różniczkowo-wych, tworzących model matematyczny badanego układu przedstawia się graficznie w postaci schematu blokowego;

◆ **tekstowy**: model przedstawia się w postaci zbioru instrukcji w języku MATLAB'a.

W obu przypadkach wykorzystuje się gotowe człony dynamiczne i statyczne. Mogą to być człony wzięte ze standardowej (stale poszerzanej) biblioteki SIMULINK'a lub wcześniej utworzone własne człony użytkownika, pełnoprawne z tymi pierwszymi.

W SIMULINK'u, podobnie jak w przypadku innych języków symulacji komputerowej, jeśli w modelu matematycznym występuje więcej niż jedna zmienna niezależna, to ta druga musi być zdyskretyzowana, gdyż do systemu można wpisać tylko równania różniczkowe zwyczajne.

## **Edycja graficzna**

Na rysunek wprowadza się ikony bloków i łączy się liniami 'sygnalowymi', następnie określa się wejścia (tzn. sygnały sterujące i zakłócenia) i wyjścia (miejsca i sposoby wyprowadzenia sygnałów). Przez zapisanie powstaje dyskowy plik tekstowy<sup>4</sup>. Taki układ (lub wybrany fragment) można zwinąć do grupy i ewentualnie zamaskować (nazywany jest wtedy *blokiem*); można mu także przydać indywidualnie zaprojektowaną ikonę oraz okienko dialogowe służące do 'ręcznego' wprowadzania parametrów.

---

<sup>4</sup> który przy pewnej wprawie może być tekstowo edytowany przez użytkownika



Można także użyć go jako modułu do tworzenia modeli innych, większych układów (jako S-funkcję).

Zatem użytkownik ma do dyspozycji:

- 1) standardowe bloki SIMULINK'a,
- 2) własne grupy (zamaskowane lub nie),
- 3) wszystkie wewnętrzne funkcje MATLAB'a oraz wszystkie zewnętrzne funkcje MATLAB'a (w postaci tzw. M-plików)<sup>5</sup>, z dowolnego *toolbox*'a (np. **gear**, **size** itp.), które można wprowadzać na schemat za pomocą ikony **MATLAB Fcn** i po otwarciu okienka dialogowego tej ikony wpisać nazwę danej funkcji;
- 4) wszystkie funkcje języka MATLAB (np. **sin**, **log** itd.), które wprowadza się na schemat w postaci ikony **Fcn** i po otwarciu okienka dialogowego tej ikony wpisuje się nazwę funkcji;
- 5) dowolny inny model symulacyjny SIMULINK'a, wcześniej utworzony przez użytkownika i zapisany na dysku jako tzw. S-funkcja (jest to także M-plik tekstowy, lecz o swoistej budowie), dostępny jako ikona **S-Fun**.

### Edycja tekstowa

Dostępne są:

- 1) wszystkie funkcje MATLAB'a (M-pliki), z dowolnego *toolbox*'a (np. **gear**, **size** itp.),
- 2) wszystkie wewnętrzne funkcje języka MATLAB (np. **sin**, **log** itd.);
- 3) dowolny inny model symulacyjny SIMULINK'a, wcześniej utworzony i zapisany na dysku jako tzw. S-funkcja; jest on dostępny nie w postaci ikony a poprzez nazwę z odpowiednimi argumentami.

Ponadto zauważmy, że edycja tekstowa może dotyczyć:

- (1) S-funkcji;
- (2) *scriptu* – jest to ciąg poleceń MATLAB'a, uruchamiany nazwą, bez argumentów.

### Przykład modelu pneumatycznej linii długiej

Obydwa sposoby przedstawimy na przykładzie modelu pneumatycznej linii długiej, której model matematyczny przedstawiono w pracy [2].

Linia została podzielona na  $n$  segmentów, każdy z nich potraktujemy jako obiekt o stałych skupionych. Rozpatrzmy  $i$ -ty segment (Rys. 1).

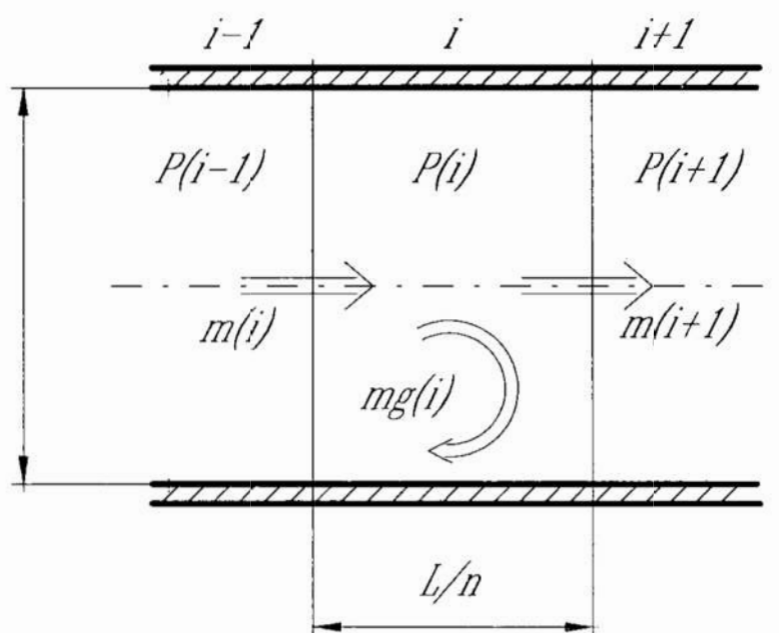
---

<sup>5</sup> standardowe lub utworzone przez użytkownika



Przyjmujemy następujące oznaczenia:

- $m_i$  – masowe natężenie przepływu gazu wpływające do  $i$ -tego segmentu rury;
- $mg_i$  – strumień (masowy) akumulowany w  $i$ -tym segmencie;
- $p_i$  – ciśnienie gazu w segmencie;
- $D$  – średnica wewnętrzna rury;
- $S$  – pole przekroju poprzecznego rury;
- $\Delta l$  – długość segmentu rury;
- $k$  – względna objętościowa odkształcalność rury,
- $\rho, \nu, R$  – gęstość, lepkość i stała gazowa;
- $m, \theta$  – wykładnik politropy i temperatura gazu.



Rys. 1.  $i$ -ty segment pneumatycznej linii długiej

Fig. 1. The  $i$ -th segment of the pneumatic signal line

Przy pewnych założeniach (m.in.: przemiana izotermiczna, przepływ laminarny) dla każdego  $i$ -tego segmentu rury można napisać następujące trzy równania: dwa zwyczajne równania różniczkowe:

$$\frac{dm_i}{dt} = A(p_{i-1} - p_i - B \cdot m_i) \quad \dots (1)$$

$$\frac{dp_i}{dt} = E \cdot mg_i \quad \dots (2)$$

oraz jedno równanie algebraiczne:

$$mg_i = m_i - m_{i+1} \quad \dots (3)$$

gdzie:

$A = \frac{S}{\Delta l}$  jest odwrotnością inertancji,

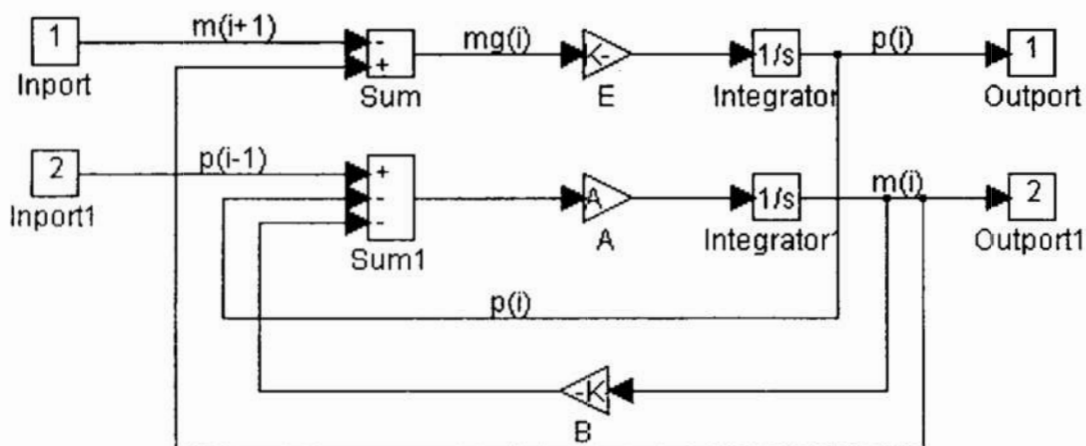
$B = \frac{128\nu\Delta l}{\pi D^4}$  jest opornością hydrauliczną rury (dla ruchu laminarnego),

$E = \frac{1}{k\rho S\Delta l + \frac{S\Delta l}{mR\Theta}}$  jest odwrotnością pojemności

pneumatycznej) wynikającej z odkształcalności rury i ze ściśliwości gazu.

### Graficzne tworzenie modelu komputerowego

Powyższe trzy równania mogą być w SIMULINK'u reprezentowane w postaci schematu blokowego (Rys. 2):

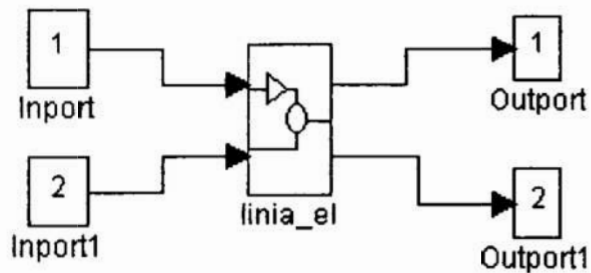


Rys. 2. Schemat blokowy trzech równań dynamiki  $i$ -tego segmentu linii pneumatycznej

Fig. 2. Block diagram of the three dynamic equations of the  $i$ -th segment of the pneumatic signal line

Zdefiniowano dwa wejścia:  $m_{i+1}$  i  $p_{i-1}$  oraz dwa wyjścia:  $p_i$  i  $m_i$ .

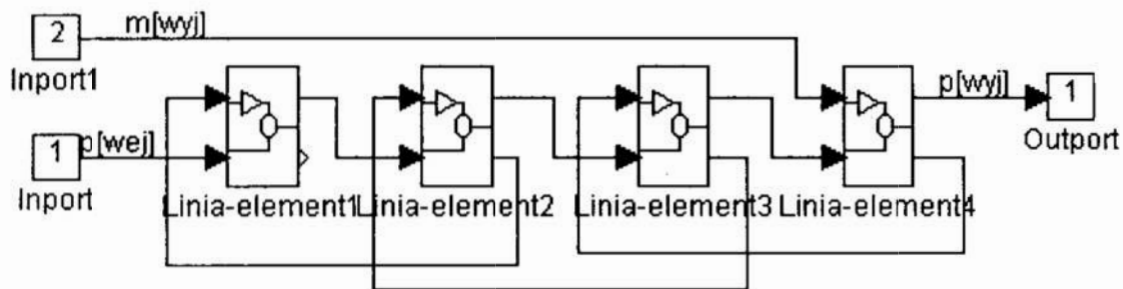
Model ten 'zwijamy' do grupy i uzyskujemy symbol graficzny dla  $i$ -tego segmentu linii (Rys. 3):



Rys. 3. Zwinięty do grupy schemat blokowy trzech równań dynamiki wycinka linii pneumatycznej

Fig. 3. Grouped block diagram of the three dynamic equations of the  $i$ -th segment

Nadajemy mu nazwę, odcinamy bramki wejściowe i wyjściowe i wykorzystujemy go do utworzenia modelu linii zbudowanej z  $n$  takich elementów, na przykład z czterech jak na Rys. 4:



Rys. 4. Zdyskretyzowany do czterech segmentów schemat blokowy pneumatycznej linii długiej

Fig. 4. Block diagram of the pneumatic signal line composed of four discrete elements

Tworzy się odpowiednie połączenia między elementami, oraz wprowadza się wejścia i wyjścia linii. Tak uzyskuje się komputerowy model linii w SIMULINK'u w postaci tzw. S-pliku <sup>6</sup>, któremu można nadać nazwę własną, np. *linia.m*. Warunki początkowe określone są w integratorach (Rys. 2): np. ciśnienia  $p(i) = 1$  i strumienie  $m(i) = 0$ , lub dowolne inne.

Teraz można przeprowadzić eksperymenty symulacyjne.

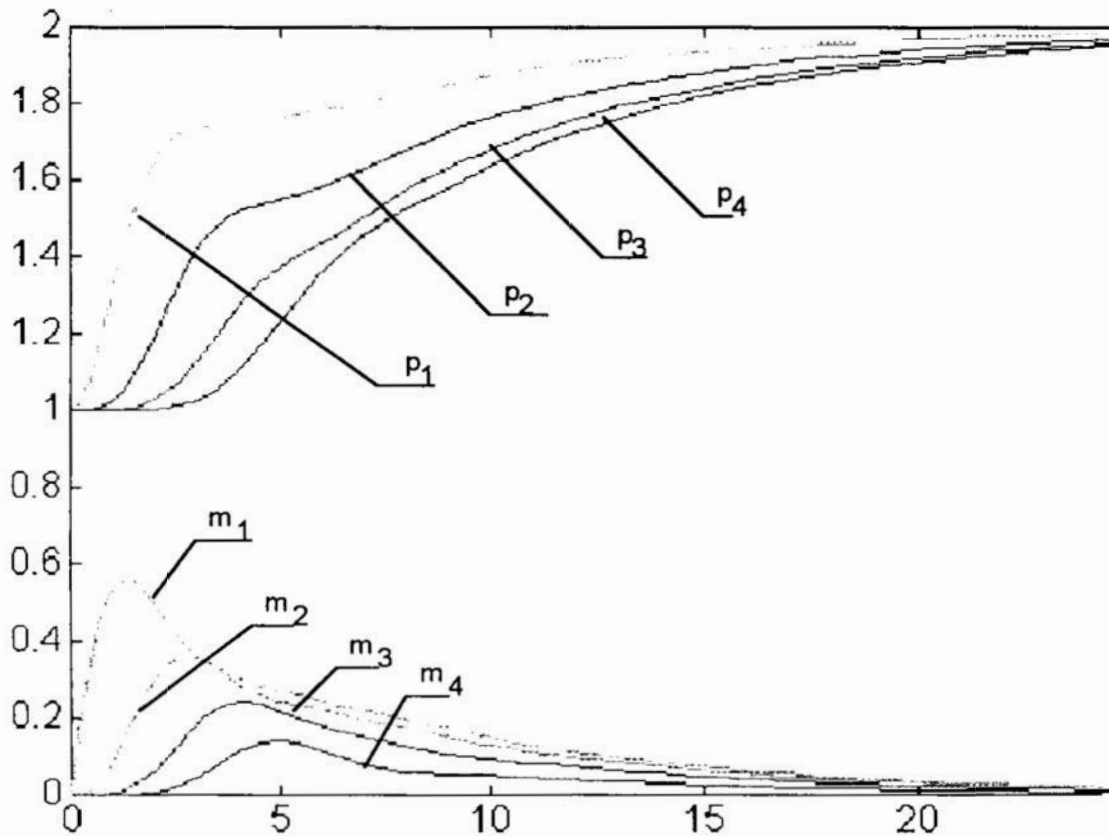
Polecenie:

```
[t,x,y]=rk23('linia',25,[],[],[0 0 2]);
```

spowoduje rozwiązanie układu równań modelu oraz wprowadzenie do przestrzeni roboczej MATLAB'a wektora czasu  $t$ , macierzy zmiennych

<sup>6</sup> Jest to także M-plik, lecz o swoistej budowie

stanu  $x$  oraz macierzy wielkości wyjściowych  $y$ , w przedziale czasu  $[0, 25]$ , dla wektora wielkości wejściowych  $[0,0,2]$ <sup>7</sup>



Rys. 5. Przykładowe wyniki symulacji linii długiej: ciśnienia  $p(1)$  do  $p(4)$  i strumienie  $m(1)$  do  $m(4)$

Fig. 5. Exemplar results of computer simulation of pneumatic signal line: the pressures  $p(1)$  to  $p(4)$  and the streams  $m(1)$  to  $m(4)$

Polecenie **whos** wyprowadzi informację o wymiarach uzyskanych macierzy, w szczególności przydatna będzie informacja o liczbie kroków (wymiar wektora  $t$ ).

Polecenie:

**[wym,x0,zmst]=linia**

wyprowadzi informację o wymiarach modelu **wym**<sup>8</sup>, o wartościach początkowych zmiennych stanu **x0** oraz o przyporządkowaniu i kolejności numeracji zmiennych stanu **zmst**, co będzie potrzebne do interpretacji wykresów.

<sup>7</sup> tzn. dla strumienia wypływu  $m[\text{wyj}] = 0$  i dla ciśnienia  $p[\text{wej}] = 2$ ; pierwszy element tego wektora oznacza czas

<sup>8</sup> w kolejności: liczba ciągłych zmiennych stanu; liczba dyskretnych zmiennych stanu; liczba wyjść; liczba wejść; liczba nieciągłości; szóstą liczbą jest jedynką gdy układ jest wejściowo-wyjściowy

Z kolei polecenie:

```
plot(t,x)
```

spowoduje narysowanie przebiegów czasowych wszystkich zmiennych stanu (Rys. 5).

Przykładowe polecenie:

```
plot(t,x(1:59,8))9
```

spowoduje narysowanie przebiegu czasowego tylko 8–ej zmiennej stanu.

## **Tekstowe tworzenie modelu komputerowego**

Model utworzymy w postaci funkcji MATLAB'a i zapiszemy w formie M–pliku pod nazwą własną, np. **linfun.m**. Oto jego przykładowa treść.

```
function xdot=linfun(t,x,u,flag)
A=1; B=1; E=1; pp=2; mk=0;
mk=0.5; pp=2;n=14;
% xxx dla segmentow srodkowych xxxxx
for i=2:n-1
mg(i)= x(n+i) - x(n+i+1);
xdot(n+i)= A*(x(i-1) - x(i) - B*x(n+i));
xdot(i)= E*mg(i);
end
% xxx dla segmentu 1-go xxxxx
mg(1)= x(n+1) - x(n+2);
xdot(n+1)= A*(pp - x(1) - B*x(n+1));
xdot(1) = E*mg(1);
% xxx dla segmentu n-tego xxxxx
mg(n)= x(n+n) -mk;
xdot(n+n)= A*(x(n-1) - x(n) - B*x(n+n));
xdot(n)= E*mg(n);
```

Powyższy plik jest uproszczoną S–funkcją w tym sensie, że nie wykorzystuje zmiennej *flag*. Linie zaczynające się od znaku '%' są komentarzami pomijanymi podczas wykonywania.

Przed symulacją należy zadeklarować odpowiednie wartości stałe (mk, pp, n itd.). Symulację zrealizujemy wprowadzając kolejne polecenia, w szczególności operacje całkowania za pomocą jednej z kilku dostępnych w MATLAB'ie funkcji całkowania, np. *ode23*. Ciąg poleceń można zapisać w pliku dyskowym w formie następującego *script*'u:

```
% script uruchomieniowy symulacji linii dlug. pneumat.
t0=0; tk=30;
n=input('Jaka liczba segmentow linii ?');
for i=1:n
  x0(i)= 1;
  x0(i+n)= 0;
```

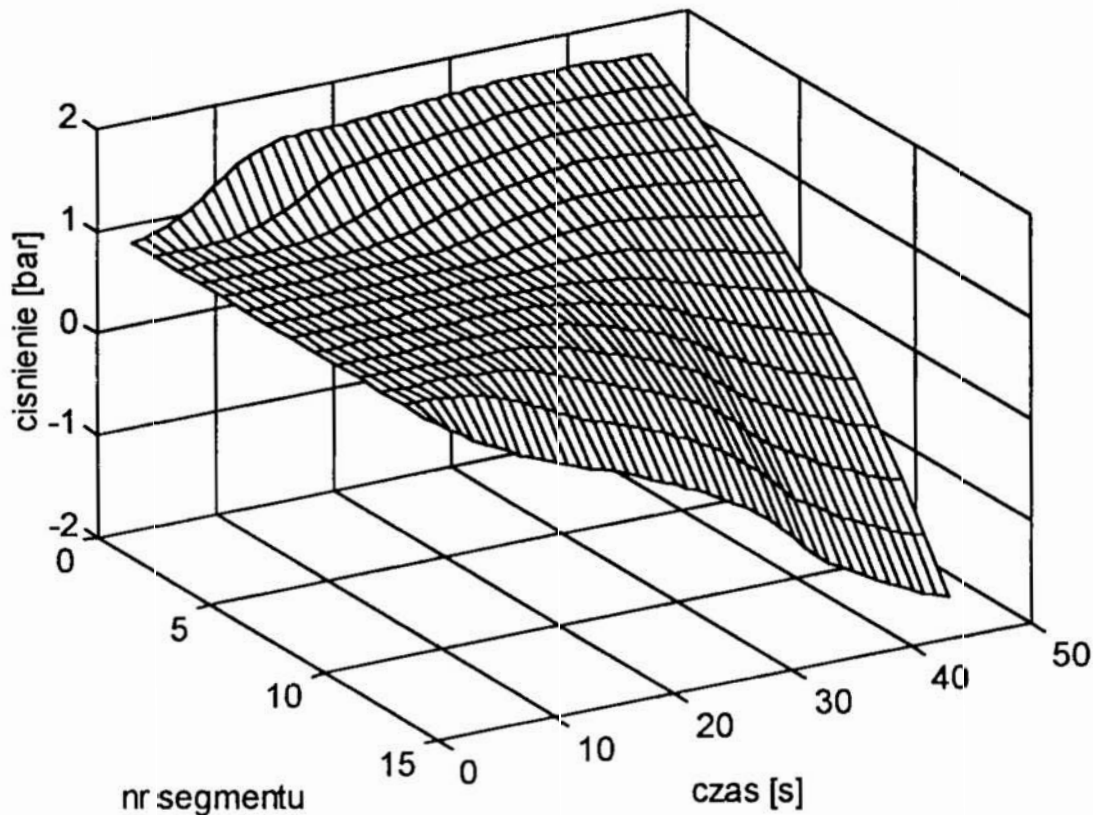
---

<sup>9</sup> liczba 59 jest liczbą kroków przeprowadzonej w tej konkretnej symulacji: można ją zidentyfikować wykonując polecenie **whos**, określa ją wymiar wektora **t**

```

end
[t,x]=ode23('linfun',t0,tk,x0);
z=x(:,1:n);
m=[60,30], mesh(z,m), grid
ylabel('czas [s]'), xlabel('nr segmentu'), zlabel('cisnienie [bar]')

```



Rys. 6. Przykładowe wyniki symulacji linii długiej dla przedziału czasu 0 do 30 s., dla podziału na  $n = 14$  segmentów:  $pp=2$  bar,  $mk=0.5$  kg/s

Fig. 6. Exemplar results of computer simulation of pneumatic signal line segmented into 14 segments: time span is 0 to 30 s,  $pp=2$  bar,  $mk=0.5$  kg/s

Powyższemu plikowi nadajemy nazwę własną, np. **linscr.m** ('scenariusz dla linii'). Staje się M-plikiem MATLAB'a i jest zapisem scenariusza eksperymentu symulacyjnego. Można go uruchomić poleceniem:

```
>> linscr
```

## Podsumowanie

SIMULINK oferuje bogaty repertuar narzędzi modelowania komputerowego, graficznych i tekstowych, a także umożliwia różne sposoby symulacji i wiele możliwości wykorzystania wyników symulacji.



Modelowanie układów ciągłych ('o stałych rozłożonych'), czasem trudne w innych językach (np. w SIMNON'ie [3]), w SIMULINK'u nie następuje większych trudności. Przy dyskretyzacji układu na dużą liczbę elementów wygodne jest modelowanie tekstowe, które umożliwia wykorzystanie pętli programowych, wówczas liczbę elementów można deklarować przed symulacją bez potrzeby zmiany modelu.

### **Literatura**

- [1] Tarnowski W.: *Komputerowy system symulacji SIMULINK z wprowadzeniem do MATLAB'a* (skrypt WSI, w druku);
- [2] Tarnowski W.: *Komputerowa symulacja procesów ciągłych*. (skrypt WSI, w przygotowaniu);
- [3] Tarnowski W., Kiczowski T.: *Komputerowe Wspomaganie Projektowania*. Skrypt WSInż. Koszalin, 1994 (wyd. 2).

### **Streszczenie**

Podano główne zalety systemu symulacji SIMULINK oraz syntetycznie przedstawiono bogaty zestaw możliwości tworzenia modelu w tym systemie. Tytułem przykładu pokazano graficzny i tekstowy sposób budowy zdyskretyzowanego modelu pneumatycznej linii długiej.

## **Computer Simulation of Continuous Systems by Means of SIMULINK Package**

### **Summary**

Main advantages of SIMULINK Package are discussed, as well as a variety of ways of creating the computer simulation models in this language. Then the model of the pneumatic signal line as an example of a continuous dynamic system is presented: both a graphical and a text model are given and tested.



## **METODYKA TWORZENIA BAZ WIEDZY TECHNOLOGICZNEJ**

### **1. Wstęp**

Projektowanie procesu obróbki jest tworzeniem pewnego uporządkowanego zbioru zdarzeń o określonych charakterystykach. W ramach integracji procesów wytwarzania napotyka się na rozproszone bazy danych i bazy wiedzy, które zawierają informacje, dotyczące danych administracyjnych, konstrukcyjnych, kontrolno-diagnostycznych, technologicznych, o narzędziach i uchwytach, o materiałach i półfabrykatakach, informacje o wzajemnych związkach i relacjach, reguły wyboru, optymalizacji, itp.

Bazy danych są zbiorem powiązanych ze sobą danych, które są abstrakcyjnym, informatycznym odzwierciedleniem fragmentu rzeczywistości. W projektowaniu baz danych bardzo dużą rolę odgrywa czynnik twórczy-wiedza, która istnieje i którą należy we właściwy sposób wykorzystać dla potrzeb systemu [4]. Jednym z najważniejszych zagadnień na etapie projektowania systemu jest ustalenie struktury baz danych tzn. określenie zawartości baz, powiązań pomiędzy nimi i zakresu ich działania. Nie zawsze da się określić w sposób jednoznaczny wszystkie występujące powiązania. Należy sięgnąć po bardziej zaawansowane narzędzia np. bazy wiedzy i systemy ekspertowe. Bazy wiedzy i systemy ekspertowe nie mogą jednak istnieć bez dużej ilości danych, które należy zgromadzić w bazach danych.

Architekturę systemu baz danych można przedstawić na trzech stopniach abstrakcji, uogólnienia, które przedstawiają informację o systemie baz danych z punktu widzenia użytkowników, logicznej struktury i fizycznej budowy bazy danych. Trzy poziomowa architektura systemu baz danych obejmuje następujące poziomy:

1. Poziom zewnętrzny - schemat zewnętrzny: opisuje bazę danych z punktu widzenia użytkowników obsługujących bazę danych.
2. Poziom koncepcyjny - opisuje strukturę bazy danych z punktu widzenia użytkownika. Opisuje obiekty, związki pomiędzy nimi, atrybuty i ograniczenia. Najczęściej stosowanym schematem na tym etapie jest schemat obiektowo-związkowy.
3. Poziom wewnętrzny - schemat wewnętrzny: opisuje fizyczną organizację bazy danych. Schemat wewnętrzny stosuje fizyczny model danych i opisuje ścieżki dostępu do danych oraz ich fizyczną organizację.

### **2. Metody tworzenia baz danych**

Tworzenie baz danych może być realizowane na różny sposób. Pierwsze i zarazem najtrudniejsze to pisanie aplikacji od początku z wykorzystaniem tradycyjnego języka programowania np. C, Pascal. Rozwiązanie to zmusza programistę w pierwszej kolejności

do stworzenia całego otoczenia systemu, a w następnej kolejności jest możliwe stworzenie właściwie działającej aplikacji. Sposób ten może być wykorzystany jedynie wtedy, gdy powstaje bardzo duży system, z możliwością -100% kontroli nad jego tworzeniem. Rozwiązanie posiada także pewne wady, do których zaliczane są: bardzo duży koszt opracowania systemu oraz długi czas wdrożenia systemu.

Znacznie efektywniejsze jest rozwiązanie polegające na wykorzystaniu gotowego systemu baz danych. System taki zawiera w sobie następujące elementy:

- interfejs użytkownika (np. Graphics User Interface w MS Windows),
- system zarządzania bazą danych,
- oprogramowanie do obsługi grupy użytkowników (blokady, semafony itd.),
- interfejs do automatycznego łączenia się z innymi (większymi) bazami danych (np. Open Data Base Connectivite, ODBC w MS Windows),
- generator aplikacji (np. generatory formularzy, raportów, zapytań),
- język programowania, którego użycie nie powinno być konieczne przy budowie prostych baz danych,
- język zapytań (np. SQL),
- interfejs ułatwiający integrację systemu baz danych z innymi systemami, językami programowania (np. Dynamic Data Library DDL w MS Windows).

### **3. Bazy wiedzy i ich tworzenie**

Bazę wiedzy określa się jako zbiór definicji, faktów, pojęć i relacji pomiędzy nimi oraz reguł wnioskowania [2]. Bardzo ważnym problemem przy konstruowaniu baz wiedzy jest sposób pozyskiwania wiedzy. Komputerowe wspomaganie gromadzenia wiedzy znacznie redukuje czas budowy bazy wiedzy oraz eliminuje przekłamania, które mogą zaistnieć na skutek pośrednictwa inżyniera wiedzy. Efektywne schematy pozyskiwania wiedzy są niezbędne przy konstruowaniu dużych baz wiedzy. Najogólniej, przez pojęcie pozyskiwania wiedzy rozumiane jest uczenie połączone z nabyciem umiejętności efektywnego wykorzystania wiedzy. Kierunki badań doprowadziły do uzyskania licznych metod pozyskiwania wiedzy, przeznaczonych w szczególności dla reprezentacji wiedzy w postaci reguł czy też sieci semantycznych. Wśród metod pozyskiwania wiedzy można wyróżnić: bezpośrednie zapisanie wiedzy (tzw. uczenie na pamięć), pozyskiwanie wiedzy na podstawie instrukcji (tzw. uczenie przez przekazanie informacji), pozyskiwanie wiedzy na podstawie analogii, pozyskiwanie wiedzy na podstawie przykładów, pozyskiwanie wiedzy na podstawie obserwacji.

Wiedzą pozyskiwaną są również decyzje ekspertów. Eksperti nie są zbyt dokładni w werbalizacji tego co wiedzą, są jednak znakomici w podejmowaniu właściwych decyzji i w krytykowaniu decyzji podejmowanych przez innych ekspertów (w tym również komputera). Stąd też powstał pomysł algorytmu tzw. indukcji, czyli automatycznego formułowania zasad ekspertyzy - reguł wnioskowania na podstawie wybranego zbioru przykładowych decyzji. Decyzje są przedstawiane jako zbiór atrybutów i warunków, które prowadzą do konkretnej konkluzji a następnie kodowane w postaci macierzowej. Macierzowa reprezentacja danych jest zadawana algorytmowi indukcyjnemu, który na jej podstawie generuje reguły wnioskowania. Proces generowania reguł wnioskowania na podstawie przyczyn i skutków jest znacznie prostszy niż definiowanie reguł wnioskowania na podstawie luźnych fragmentów wiedzy uzyskanych od specjalistów. Wiedza, przekazana przez specjalistów musi być poselekcjonowana i zorganizowana w

taki sposób, aby można ją było przechowywać w pamięci komputera i efektywnie z niej przy pomocy komputera korzystać. Również rozpatrując możliwości pozyskiwania wiedzy nie można pomijać zagadnień reorganizacji bazy wiedzy, polegających np. na uogólnieniu zapisanych w niej reguł. Następnym zagadnieniem jest problem tzw. wyjątków. Proces organizowania wiedzy wymaga wyboru odpowiedniej metody reprezentacji wiedzy, zakodowania wiedzy zgodnie z przyjętym formatem oraz weryfikacji bazy wiedzy i mechanizmu wnioskowania.

Wyróżniamy trzy typy reprezentacji wiedzy [3]:

1. reprezentacja proceduralna, polegająca na określeniu zbioru procedur, których działanie reprezentuje wiedzę o dziedzinie; zakłada się, że wiedza o działaniu może zastąpić proces wnioskowania,
2. reprezentacja deklaratywna, polegająca na określaniu zbioru, specyficznych dla rozpatrywanej dziedziny, faktów i reguł. Wiedza o rozważanym obiekcie przedstawiona jest w postaci zdań pewnego ustalonego języka, pozwalającego na wyrażanie faktów na temat możliwości podejmowania i ewentualnych skutkach realizacji różnych działań (operacji). Oznacza to możliwość wnioskowania (na podstawie przedstawionej sytuacji) o skutkach podejmowanych działań.
3. reprezentacja mieszana. Podstawowym elementem reprezentującym wiedzę jest struktura danych nazywana ramą, która może przedstawiać zarówno działanie systemu, jak też model sytuacji problemowej czy scenariusz postępowania. Forma ram łączy ogólność reprezentacji deklaratywnych i ścisłość formalnych metod wnioskowania z efektywnością obliczeniową reprezentacji proceduralnych.

Zapis wiedzy w programach sztucznej inteligencji ma często charakter deklaratywny. Zaletą reprezentacji proceduralnej jest wysoka efektywność reprezentowania procesów. Natomiast w reprezentacji deklaratywnej każdy fakt lub reguła zapisywane są tylko raz i łatwiejsza jest jej formalizacja. Rozwiązaniem optymalnym jest połączenie cech reprezentacji proceduralnej i deklaratywnej. Przykładem takiej reprezentacji jest technika ram. Ponadto wyróżniamy następujące sposoby reprezentacji wiedzy: stwierdzenia, reguły, sieci semantyczne, scenariusze, techniki bazujące na bezpośrednim zastosowaniu logiki (np. rachunek predykatów).

Wybór techniki zapisywania wiedzy uzależniony jest od wielu czynników, z których do najważniejszych należy zaliczyć:

- rodzaj wiedzy wymaganej dla poprawnego działania systemu doradczego,
- rodzaj dyscypliny, której wiedza ma być objęta zapisem,
- wymagana wielkość organizowanej bazy wiedzy, ze szczególnym uwzględnieniem unikania zbędnego zwiększania tej bazy,
- rodzaj sprzętu (wielkość pamięci operacyjnej, rodzaj pamięci zewnętrznej).

W większości zastosowań stosowane są techniki mieszane.

Reguły są najczęściej spotykanym sposobem reprezentacji wiedzy w systemach doradczych [3]. Reguły zapisywane w postaci " *if przesłanka then konkluzja* " umożliwiają deklaratywną reprezentację wiedzy. Stwierdzono, że reprezentacja taka nie pozwala na proste reprezentowanie wiedzy o procesach i ciągach wykonywanych działań. Jest to widoczne np. w układach doradczych przeznaczonych dla potrzeb diagnostyki, gdzie jednym z elementów bazy wiedzy powinny być informacje o kolejności wykonywania różnych badań pomocniczych niezbędnych dla identyfikacji stanu technicznego maszyny. W celu umożliwienia zapisywania takich informacji w



postaci reguł dokonano uogólnienia opisanego wcześniej pojęcia reguły. Uogólnienie polega na przyjęciu, że konkluzja reguły jest opisem pewnego działania a nie stwierdzeniem. Tak określoną regułę nazywa się regułą działania. Opisane uogólnienie pojęcia reguły powoduje, że rozpatrywana reprezentacja wiedzy przyjmuje charakter reprezentacji deklaracyjno-proceduralnej.

Podsumowując, można powiedzieć, że wybór techniki reprezentacji wiedzy w bazach wiedzy dokonywany jest po odpowiedzi na pytanie *do rozwiązania jakiej klasy zadań będą wykorzystywane bazy wiedzy, w jaki sposób będzie się korzystało z wiedzy oraz w jak dużych systemach będą wykorzystywane bazy wiedzy.*

Bazy danych i wiedzy spełniają kluczową rolę w komputerowym wspomaganie technologii, zapewniając możliwość sprzężeń między różnymi strumieniami informacji oraz wybór optymalnego rozwiązania .

#### **4. Podejścia w planowaniu procesów technologicznych**

Wyróżnia się dwa podejścia do planowania procesów technologicznych [4].

Zgodnie z pierwszym z nich dla obiektów należących do klas części konstrukcyjno-technologicznie podobnych, wyszukiwane są z bazy danych i bazy wiedzy ustalające standardowe marszruty technologiczne obróbki. W sposób zindywidualizowany, w trybie interakcyjnym, rozwiązywane są natomiast zadania normowania czasów obróbki, wyznaczania parametrów obróbki (ilości przejść, głębokości skrawania itp.) oraz określenia pomocy warsztatowych.

W drugim podejściu, marszruta procesu jest kształtowana indywidualnie dla każdego typu części, w oparciu o przechowywane w bazie danych i bazie wiedzy reguły wyboru określające możliwości zestawienia marszruty. Wykorzystywane mechanizmy, reprezentujące informacje o możliwościach i ograniczeniach realizacji procesu, pozwalają projektantowi uwzględniać wymagania związane z realizacją różnych wariantów procesu. Wymagania te określają m.in. możliwości kształtowania obrabianych powierzchni, wymagania w zakresie pomocy warsztatowych, dopuszczalne wymiary i tolerancje wykonania, klasy chropowatości, a także występujące siły skrawania, wymagane moce i zużycie energii. W mającym interakcyjny charakter procesie projektowania wariantowane są różne wersje marszrut procesu i struktur występujących w nich operacji. Planowanie struktury operacji obejmuje czynności związane z oceną różnych wariantów: sposobów ustawienia i mocowania części, rodzaju zabiegów, kolejności zabiegów i wielokrotności ich występowania oraz typów pomocy warsztatowych determinujących określony sposób ustawienia i mocowania części. Ważny element planowania struktury operacji stanowią obliczenia związane z wyznaczaniem wymiarów międzyoperacyjnych ( określeniem wielkości naddatków przy realizacji kolejnych faz obróbki), parametrów skrawania (wyznaczeniem możliwie najmniejszej ilości przejść, tzn. określeniem możliwie największej, dla danych warunków głębokości skrawania oraz możliwie największego posuwu dla założonej głębokości skrawania ) oraz norm czasu pracy (związanych z prędkością skrawania, która jest ustalana dla zadanych wartości głębokości skrawania i posuwu).

Systemy baz danych i baz wiedzy mają na celu opracowanie wspólnych struktur i systemów kodowania umożliwiających integrację, gromadzenie i modyfikację danych niezbędnych w procesie technologicznym, np. danych o geometrii wyrobu ( takich jak kształt, wymiary), danych technologicznych (takich jak dokładność, tolerancja, jakość

powierzchni, materiał obrabiany), danych o wykazach i numeracji wyrobów, istniejących zasobach (wyrobów, materiałów, urządzeń technologicznych, narzędzi, uchwytów, itp), procedurach projektowania, planowania i harmonogramowania, itd.

Baza danych technologicznych traktowana jest jako składnica informacji i jako łącznik między zastosowaniami obsługującymi różne funkcje przedsiębiorstwa. Ważną zaletą bazy danych jest to, że daje ona możliwość sprawowania pełnej kontroli jakości danych oraz sterowanie jej wykorzystaniem. Unikać należy budowy baz danych technologicznych ze ścisłym odwzorowaniem struktury organizacyjnej przedsiębiorstwa przemysłowego ponieważ wszystkie zmiany organizacyjne wpływają na nieaktualność struktury bazy danych. Z pomocą przychodzi tutaj dogłębna wiedza informatyczna. Komunikacja systemu bazy danych z użytkownikiem powinna być jak najprostsza i jak najbardziej wygodna dla użytkownika.

Bazy wiedzy technologicznej tworzone są przy wykorzystaniu całego szeregu danych takich jak: literatura, katalogi, normy, normatywy, informacje, protokoły, doświadczenia i inne. Reguły zawarte w bazach wiedzy umożliwiają dobór każdego elementu procesu technologicznego, który z kolei uzależniony jest od szeregu kryteriów oraz ograniczeń.

Istotnym elementem w doborze w/w warunków i parametrów jest rachunek kosztów. Rachunek kosztów pozwala na optymalizację procesu projektowania ze względu na minimalne koszty przy uwzględnieniu maksymalnej, dopuszczalnej ze względu na różne ograniczenia (np. jakość przedmiotu, stosowanie obrabiarki, narzędzia itp.) wydajności obróbki. Na podstawie rachunków kosztów dokonuje się korekty wcześniej przyjętych warunków i parametrów obróbki. W tym momencie konieczne są decyzje dotyczące podjęcia kompromisów lub odpowiednich działań dotyczących zakupu innych narzędzi, obrabiarek, ewentualnie kooperacji. Skompletowanie wszystkich elementów niezbędnych do wykonania operacji umożliwia utworzenie dokumentacji technologicznej operacji.

Bazy wiedzy technologicznej zawierają dane dotyczące procesów technologicznych, obrabiarek, oprzyrządowania technologicznego, narzędzi i parametrów obróbki. W bazach wiedzy zawarte są również określone kryteria, zasady i reguły umożliwiające automatyczny wybór elementów procesu technologicznego, gdy zaakceptowane zostaną przez użytkownika określone opcje. Po wyborze wszystkich elementów procesu należy przeprowadzić proces optymalizacyjny parametrów obróbki ze względu na minimalne koszty wytwarzania lub maksymalną wydajność obróbki.

## **5. Sformułowanie zadań oraz zakresu bazy wiedzy dla procesu technologicznego**

System baz danych i baz wiedzy powinien dać odpowiedź na pytanie:

" Jakie operacje, w oparciu o jakie technologie, w jakiej kolejności i na jakich maszynach powinny być wykonane dla uzyskania wyrobu o założonej jakości i o najniższej cenie " [1].

Odpowiedź na to pytanie jest bardzo skomplikowana i wymaga od systemu dużego stopnia inteligencji i nagromadzenia w systemie bardzo dużej ilości danych. Dane te muszą dotyczyć zarówno bardzo prostych informacji dających się w bardzo łatwy sposób opisać jak np. informacje o narzędziach, obrabiarkach, uchwytach itd. jak również systemy takie muszą zawierać informację, które bardzo trudno opisać dotyczące wiedzy/intuicji technologów, nowych technologii, postępu technicznego itd.



Pierwszym etapem było gromadzenie wiedzy.

Wybrano metodę bezpośredniego zapisu wiedzy ( tzw. uczenie się na pamięć ).

W trakcie pozyskiwania wiedzy korzystano z wiedzy specjalistów, katalogów, norm, normatywów technologicznych i danych książkowych.

## **6. Budowa struktury bazy wiedzy dla procesu technologicznego**

Jest to etap utworzenia struktury baz wiedzy dla procesu technologicznego, zgromadzenia informacji o metodach, zasadach, sposobach i warunkach funkcjonowania bazy wiedzy oraz o sposobach oceny jej funkcji i wartości użytkowej. Struktura baz wiedzy obejmuje postulaty i wymagania nałożone na projektowaną bazę wiedzy. Na tym etapie określono warunki dalszego rozwoju baz wiedzy, metody aktualizacji danych w bazie wiedzy oraz plan budowy bazy wiedzy dla procesu technologicznego, wyznaczono wszystkie potrzeby użytkowników, jakie będą zaspokajane po wdrożeniu bazy wiedzy dla procesu technologicznego.

Informacje zawarte w bazie wiedzy dla procesu technologicznego mogą być wykorzystywane przy: projektowaniu technologii i konstrukcji wyrobu, zarządzaniu i sterowaniu produkcją, wyborze określonej informacji naukowej, technicznej i organizacyjnej. Baza wiedzy umożliwia wybieranie, przetwarzanie i dostarczanie informacji do bieżąco zmieniających się zadań technologa.

Struktura baz danych i baz wiedzy zawiera następujące bazy: procesów technologicznych, obrabiarek, oprzyrządowania, narzędzi i pomocy warsztatowych, materiałów, surowców i półfabrykatów, rysunków technologicznych, postępu technicznego, licencji, rozwiązań technicznych i patentów.

Baza procesów technologicznych jest najbardziej znacząca w systemie baz danych technologicznych. Wszystkie pozostałe bazy powstały w celu ułatwienia tworzenia procesu technologicznego, którego to cechy i parametry są przechowywane właśnie w bazie procesów technologicznych.

## **7. Opracowanie projektu bazy wiedzy dla procesu technologicznego**

Projektowanie bazy wiedzy dla procesu technologicznego jest etapem prac odznaczającym się dużym udziałem czynnika twórczego [5]. W tym etapie prac przedstawiono koncepcję rozwiązania na tyle szczegółową, aby z niej jednocześnie wynikało wszystko to, co jest niezbędne użytkownikowi do podjęcia decyzji, a projektantowi do opracowania projektu technicznego. Graficzna prezentacja koncepcji rozwiązania jest komunikatywna, prosta, czytelna. Jednym z ważniejszych zagadnień tej części było określenie baz wiedzy, ich zawartości, związków pomiędzy nimi, zakresu ich działania, sposobów aktualizacji wiedzy, zasad administrowania bazami wiedzy oraz sposobów ochrony zawartych w niej informacji zarówno przed niepowołanym dostępem jak i przed zniszczeniem. Inne zagadnienia, które wymagały rozwiązania to: funkcje baz wiedzy dla procesu technologicznego, podstawowe wymagania wobec baz wiedzy dla procesu technologicznego, przesłanki wyboru sposobu reprezentacji wiedzy, wyposażenie techniczne baz wiedzy dla procesu technologicznego, dokumentacja baz wiedzy dla procesu technologicznego, plan realizacji i budowy baz wiedzy dla procesu technologicznego.

Proces projektowania baz wiedzy polega na przetworzeniu informacji i obejmuje czynności i zdarzenia występujące w cyklu między formułowaniem zadania projektowego a próbną eksploatacją bazy wiedzy dla procesu technologicznego. Przedmiotem opracowania szczegółowego była budowa i działanie bazy wiedzy dla procesu technologicznego we wszystkich jej szczegółach technicznych, technologicznych i organizacyjnych.

Pierwszą fazę prac w tym etapie stanowiła weryfikacja opracowań dokonanych w poprzednim etapie i obejmowała ona: analizę schematów baz wiedzy, ustalenie sposobu wyboru informacji z baz wiedzy, ustalenie sposobu reprezentacji wiedzy.

Dalsza budowa baz wiedzy postępowała wg określonej reprezentacji wiedzy. Wiedza w bazach wiedzy składa się z faktów oraz stwierdzeń i regul. Fakty w bazie procesów technologicznych reprezentują m.in. klasę wyrobu, podklasę, cechy geometryczne wyrobu oraz cechy technologiczne. Baza obrabiarek zawiera fakty w postaci informacji o obrabiarkach i ich parametrach. Baza oprzyrządowania zawiera dane o tym oprzyrządowaniu. Baza narzędzi i pomocy warsztatowych zawiera informacje o narzędziach i pomocach warsztatowych. Kolejne bazy zawierają dalsze fakty niezbędne do tworzenia procesów technologicznych.

Kryteria, wg których następuje podział na procesy technologiczne to: geometria części, która z kolei narzuca określony sposób obróbki. Procesy technologiczne podzielono na grupy klas. Każdą z grup klas na klasy i podklasy. W ten sposób jednoznacznie opisano charakter danego wyrobu a co za tym idzie charakter jego procesu technologicznego. Dalsze kryteria uwzględniają cechy geometryczne wyrobu oraz cechy technologiczne. Stworzenie klasyfikatora pozwoliło w znaczny sposób zautomatyzować tworzenie procesów technologicznych ponieważ na podstawie zakwalifikowania danej części do określonej podgrupy otrzymuje się plan technologiczny. Następnym krokiem w celu otrzymania pełnego przebiegu procesu technologicznego jest:

- dobór obrabiarki do określonych operacji na podstawie planu obróbki

Dobór obrabiarki jest jednym z najważniejszych etapów podczas projektowania procesu technologicznego. Obrabiarka decyduje o dokładności obróbki, czasie obróbki i innych parametrach wpływających na jakość i koszt wykonania wyrobu. Doboru obrabiarki dokonuje się dwustopniowo. W pierwszym kroku doboru obrabiarki dokonuje się w zależności od rodzaju operacji, wymiarów geometrycznych wyrobu, danych technologicznych i liczby gniazd narzędziowych. W drugim kroku doboru obrabiarki dokonuje się w zależności od mocy obrabiarki, parametrów obróbki, parametrów dokładności. Dobór odbywa się w formie podzapytań w języku SQL, reprezentujących wiedzę o doborze obrabiarki.

- dobór oprzyrządowania dokonuje się na podstawie wybranej obrabiarki

- dobór narzędzi podzielono na etapy:

- dobór geometrii narzędzia
- dobór wymiarów narzędzia
- dobór materiału ostrza narzędzia

- dobór parametrów obróbki zależy od rodzaju obróbki. Użytkownik definiuje parametry obróbki takie jak naddatek i głębokość skrawania. Następnie program oblicza ilość przejść dla zabiegu, prędkość skrawania. Jeśli przeprowadzany jest dobór dla obróbki zgrubnej to sprawdzany jest warunek przenoszenia mocy.

- wykonanie kart instrukcyjnych.

Na końcu system generuje proces technologiczny dla określonego wyrobu.

## **8. Oprogramowanie i wdrażanie bazy wiedzy dla procesu technologicznego**

Z oprogramowaniem związane było podejmowanie różnorodnych decyzji np.: wybór języka reprezentacji wiedzy, optymalizacja programu z uwagi na istniejące kryteria i ograniczenia, niezawodność działania programu, koszty jego opracowania, czas wykonania i pojemność pamięci.

Opracowany program spełnia następujące warunki - wymagania:

- organizacja programu jest prosta, wszystkie późniejsze modyfikacje i ulepszenia będą możliwe do wprowadzenia
- program jest przyjazny dla użytkownika.

## **Literatura**

1. Gontarczyk T.: *Wprowadzenie do metodologii projektowania banków danych technologicznych*. PWN Warszawa - Łódź 1981
2. Chwiałkowska E.: *Sztuczna inteligencja w systemach eksperckich*. MIKOM Warszawa 1991.
3. Cholewa W.: *Systemy doradcze*. Skrypt Politechniki Śląskiej Gliwice 1987
4. Banaszak Z., Jampolski L.: *Komputerowo wspomagane modelowanie elastycznych systemów produkcyjnych*. WNT Warszawa 1991
5. Weiss Z. i inni: *Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego Komputerowa optymalizacja obróbki na etapie jego projektowania (off-line) oraz w fazie obróbki (on-line)*. Poznań 1994.

## **Streszczenie**

W referacie przedstawiono metodykę tworzenia baz wiedzy technologicznej. Scharakteryzowano bazy danych oraz bazy wiedzy, uwzględniając specyfikę wiedzy technologicznej. Przedstawiono etapy tworzenia baz wiedzy dla procesu technologicznego: zaczynając od sformułowania zadania oraz zakresu baz wiedzy, kończąc na oprogramowaniu i wdrożeniu baz wiedzy dla procesu technologicznego.

## **METHODOLOGY OF CREATION OF MANUFACTURING KNOWLEDGE BASES**

### **Summary**

Methodology of creation of manufacturing knowledge bases was presented in this paper. Databases and knowledge bases were characterized taking into account specific character of manufacturing knowledge. Stages of creation of knowledge bases for manufacturing processes were presented beginning with formulation of a task and knowledge bases range, finishing with programming and implementation of knowledge bases for manufacturing process.