

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA  
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH  
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 202

# MECHANIKA 41



***45-LECIE WYDZIAŁU MECHANICZNEGO ATR  
MATERIAŁY KONFERENCJI NAUKOWEJ***

BYDGOSZCZ - 1996

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA  
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH  
W BYDGOSZCZY

ZESZYTY NAUKOWE NR 202

# MECHANIKA 41

Ci.  
400b

BYDGOSZCZ - 1996

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
prof. dr hab. Ojcumiła Stefaniak

REDAKTOR NAUKOWY  
dr hab. inż. Bronisław Siołkowski, prof. nadzw. ATR

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE  
mgr Joanna Ekstowicz-Mąka, Zbigniew Gackowski

Wydano za zgodą Rektora  
Akademii Techniczno-Rolniczej  
w Bydgoszczy

ISSN 0208-6395

WYDAWNICTWO UCZELNIANE  
AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ W BYDGOSZCZY

---

Wyd. I. Nakład 150 egz. Ark. aut. 8,8. Ark. druk. 8,75. Papier druk. kl. III.  
Oddano do druku we wrześniu 1996 r. Druk ukończono we wrześniu 1996 r.  
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii ATR Bydgoszcz ul. Ks. A. Kordeckiego 20  
Zamówienie nr 16/96

## SPIS TREŚCI

1. Antoni F. Budzyński: Ciekawsze rozwiązania naukowo-badawcze i projektowo-konstrukcyjne zrealizowane w Katedrze Obrabiarek i Robotów.....	5
2. Józef Flizikowski, Mieczysław Godlewski: Metodyka energetycznego rozwoju maszyn rolniczych i spożywczych.....	11
3. Lech M. Kamiński: Pneumatyczne strumieniowe przetworniki cyfrowo-analogowe .....	19
4. Hubert Latoś: Kierunki prac Katedry Technologii Maszyn ATR .....	31
5. Eugeniusz Ranatowski: Transmisja cech strukturalnych i mechanicznych w procesie spajania metali .....	41
6. Jerzy Sawicki: Uogólnione równania ruchu cieczy niemagnetycznej i magnetycznej w szczelinach między wirującymi powierzchniami obrotowymi.....	55
7. Bronisław Siołkowski: Minimalizacja drgań mechanicznych i hałasu .....	65
8. Michał Styp-Rekowski, Ryszard Wocianiec: Osiągnięcia w działalności naukowo-badawczej Katedry Obrabiarek i Robotów i ich praktyczne wykorzystanie .....	75
9. Józef Szala: Problematyka zmęczenia w procesie projektowo-konstrukcyjnym.....	87
10. Marian Szymański: Doskonalenie obiegów ciepła w procesach technologicznych celulozowni .....	101
11. Maciej Woropay: Metoda racjonalnego sterowania systemem eksploatacji (na przykładzie systemu transportu miejskiego) .....	111
12. Bogdan Żółtowski: Kształtowanie i ocena jakości maszyn w Katedrze Maszyn Roboczych i Pojazdów .....	123



Antoni F. Budzyński

## **CIEKAWSZE ROZWIĄZANIA NAUKOWO-BADAWCZE I PROJEKTOWO-KONSTRUKCYJNE ZREALIZOWANE W KATEDRZE OBRABIAREK I ROBOTÓW**

### **I. WSTĘP**

Ambicją pracowników Katedry Obrabiarek i Robotów<sup>\*)</sup> było zawsze uczestniczyć w tworzeniu światowego postępu w doskonaleniu szeroko rozumianych wszelkiego rodzaju narzędzi, do których współcześnie można zaliczyć obrabiarki i roboty. Ambicją jest także udzielanie pomocy miejscowemu i krajowemu przemysłowi w opracowywaniu projektów i konstrukcji oraz weryfikacji doświadczalnej artefaktów bądź wyposażenia do ich materialnej realizacji.

### **I. PRACE Z ZAKRESU KSZTAŁTOWANIA ELEKTROCHEMICZNEGO (ECM)**

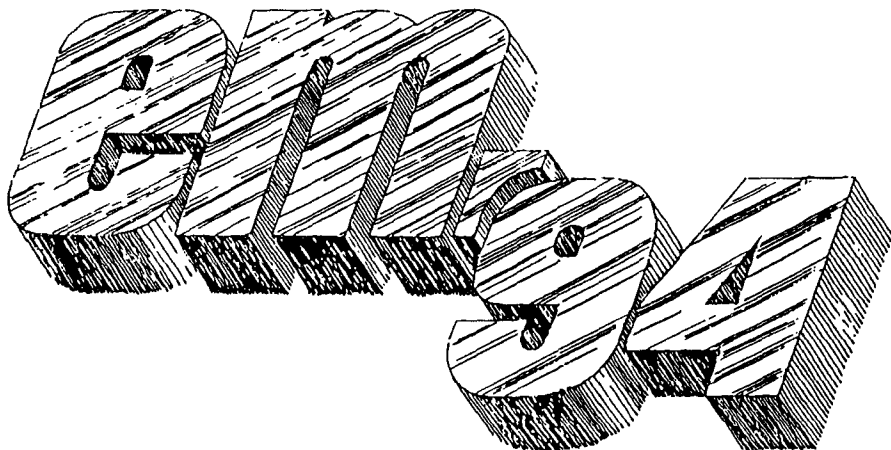
Obróbka elektrochemiczna (ECM) jak na razie jest jedyną ze znanych, która nie wnosi naprężeń w warstwie wierzchniej kształtowanych elementów, stąd też można uznać, że współcześnie jest obróbką najbardziej rozwijaną w świecie. Można już za jej pomocą wykonać np. wieniec turbiny gazowej wraz z łopatkami w jednej całości, a każdą łopatką jeszcze dodatkowo wydrążyć od środka dla poprawienia jej chłodzenia. Wydaje się, że w badaniach procesu ECM, a także w budowie narzędzi i obrabiarek do tego procesu w Katedrze uczyniono najwięcej:

- opanowano proces drażenia małych otworów w zahartowanych stalach narzędziowych o średnicy ok. 0,5 mm i stosunku l/d 200. Jak na razie jest to jedyny sposób wykonywania takich otworów. Badania te realizowano na zaprojektowanej i zbudowanej w Katedrze drażarce;
- zbadano dokładnie proces wspomaganie obróbki ścierniej za pomocą ECM, szczególnie w zakresie obróbki kształtująco-wykańczającej otworów w wysokich klasach dokładności wykonania (IT5) i znacznym stosunku l/d. Zbudowano w tym celu prototypy obrabiarek umożliwiających ten proces. Praca nad tą problematyką dała w efekcie wiele rozpraw dysercyjnych [7, 8, 10, 11, 13, 14] i kilkadziesiąt patentów oraz uznanie wielu środowisk naukowych i technicznych w kraju oraz zagranicą, co przejawia się w organizowaniu przez Katedrę cyklicznych konferencji EM (Electromachining) począwszy od 1982 r. (rys. 1), a także

---

<sup>\*)</sup> Katedra Obrabiarek i Robotów utworzona została w 1989 roku po przekształceniu Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Technologicznych. Ta zaś powstała po podzieleniu Katedry PKM na dwie oddzielne. KOiR od początku jej powstania kierował prof.dr hab.inż. Antoni F. Budzyński. Począwszy od 1992 roku Katedrą kieruje dr inż. Michał Styp-Rekowski.

zapraszanie pracowników Katedry do udziału w konferencjach światowych (rys. 2) [1, 2, 3, 4, 5, 6]. W chwili obecnej trwają prace nad elektrodami o numerycznie nastawianych cechach geometrycznych.



Rys. 1. Symbol cyklicznych konferencji organizowanych przez KOiR.  
Symbol jednocześnie przedstawia możliwości erodowania struną

## 2. PRACE ZREALIZOWANE NA ZAMÓWIENIA PRZEMYSŁU KRAJOWEGO

Z prac na rzecz regionalnego i krajowego przemysłu do najważniejszych można zaliczyć:

- prace nad poprawą stateczności [9] oraz zmniejszeniem strat energetycznych w rowerze [12] realizowane na zlecenie Zakładów Rowerowych w Bydgoszczy;
- prace nad ułożyskowaniami aero-hydro-statycznymi [15];
- prace na zlecenie Ośrodka Sterowania i Napędów w zakresie robotyzacji.

W oparciu o te zlecenia zaprojektowano rodzinę robotów z przeznaczeniem głównie dla celów dydaktycznych. Roboty te mogą nie tylko być sterowane zdalnie (bezprowadowo), ale potrafią także samodzielnie rozgrywać partie szachowe. Roboty te na niektórych Politechnikach stanowią podstawowe wyposażenie na powołanych specjalnościach robotycznych.

**INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR ELECTROMACHINING**

April 17-21, 1995, Lausanne, Switzerland

**CHAIRMAN**

Prof. W. KÖNIG (D)

**CO-CHAIRMAN**

Prof. B.N. ZOLOTYKH, Russia

**ORGANIZING COMMITTEE**

Dr. J.-P. S. van Griethuysen (EPFL, CH), Dr. D. F. Dauw (I&amp;I, CH), Prof. T. Masuzawa (Univ. of Tokyo, J), Dr. B. Schumacher (ISG, CH), Dr. D. Kiritis (EPFL, CH), Mrs Ch. Benoit (EPFL, CH).

**SCIENTIFIC COMMITTEE**

Prof. A. F. BUDZYNSKI, Poland  
 Prof. J. R. CROOKALL, U.K.  
 Dr. D. F. DAUW, Switzerland  
 Dr. J.-P. S. van GRIETHUYSEN, Switzerland  
 Prof. C.J. HEUVELMAN, The Netherlands  
 Dr. K. KOBAYASHI, Japan  
 Prof. W. KÖNIG, Germany  
 Prof. R. KRAMPITZ, Germany  
 Prof. D. KREMER, France  
 Prof. Dr. Ir. J.-P. KRUTH, Belgium  
 Dr. X. MAIDAGAN, Spain

Prof. T. MASUZAWA, Japan  
 Prof. J.A. McGEOUGH, UK  
 Prof. A.Y.C. NEE, Singapore  
 Dr. V. S. POLUYANOV, Russia  
 Prof. K.P. RAJURKAR, USA  
 Prof. N. F. de ROOIJ, Switzerland  
 Prof. M. SANTOCHI, Italy  
 Dr. B. SCHUMACHER, Switzerland  
 Prof. H.K. TÖNSHOFF, Germany  
 Prof. H.VAN BRUSSEL, Belgium

**ADVISORY COMMITTEE**

Prof. L. ALTING, Denmark  
 Prof. O. BJÖRKE, Norge  
 Dr. W. BRAUNER, Autriche  
 Prof. F. CAO, PR China  
 Prof. V.S. KOVALENKO, Ukraine  
 Prof. M.K. MITSKEVICH, Rep. Bjeiorussia  
 Dr. U.Kh. POSTAGONOV, Russia

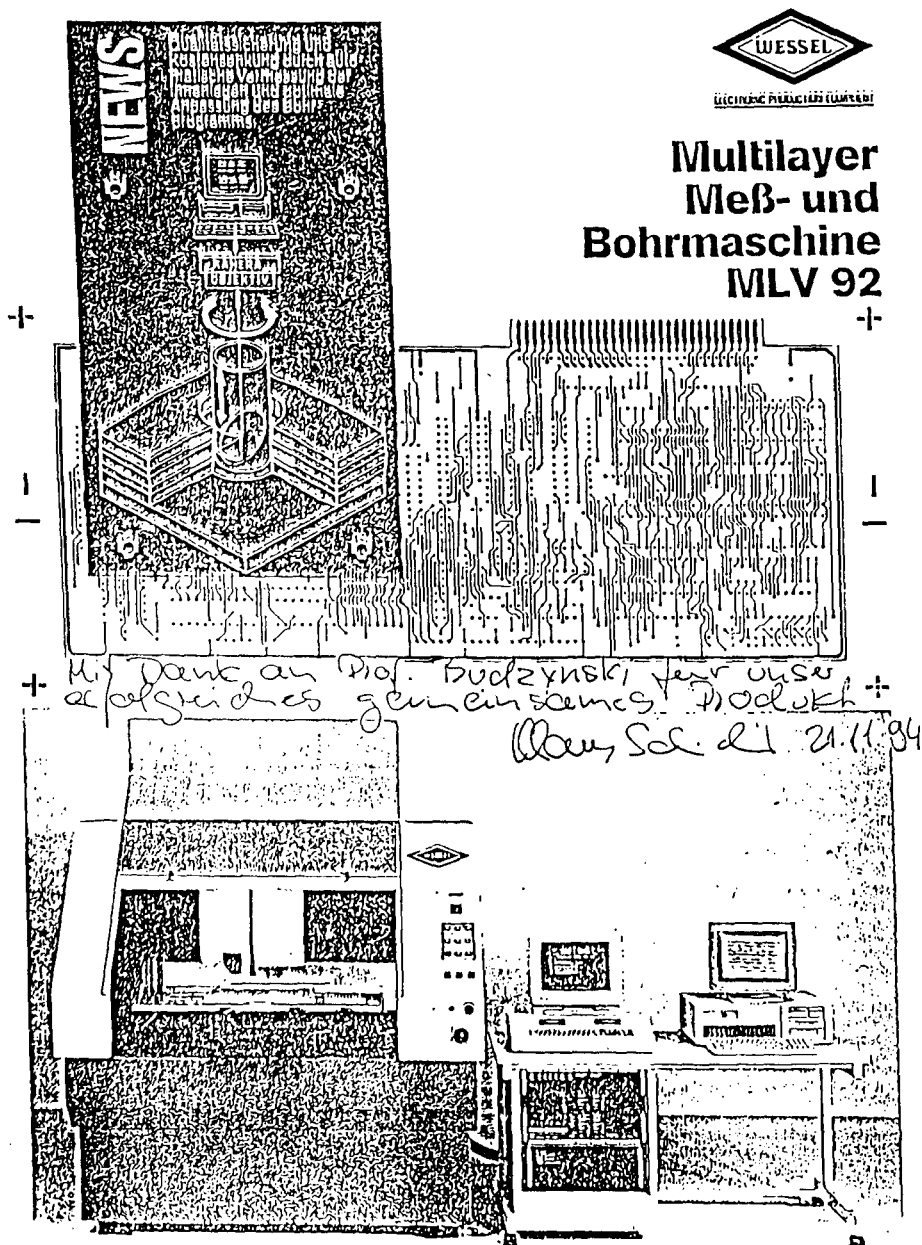
Prof. F.C. PRUVOT, Switzerland  
 Prof. E. M. SACHS, USA  
 Dr. J. SENECKY, Slovakia  
 Prof. R. WERTHEIM, Israel  
 Prof. B. YAN, Taiwan  
 Prof. C. YU, P. R. of China  
 Prof. B. N. ZOLOTYKH, Russia

**SPONSORING INSTITUTIONS**

INTERNATIONAL INSTITUTION FOR PRODUCTION ENGINEERING RESEARCH (CIRP)  
 ECOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (EPFL)  
 JAPAN SOCIETY OF ELECTRICAL-MACHINING ENGINEERS (JSEME)  
 EDM TECHNOLOGY TRANSFER

AGIE AO  
 CHARMILLES TECHNOLOGIES SA  
 GALIKA AO  
 MAKINO MILLING MACHINE CO. LTD.  
 MITSUBISHI ELECTRIC CORP.  
 SODICK CO. LTD.





Rys. 3. Istota działania układu wideokomputerowego opracowanego w Katedrze

### 3. ZREALIZOWANE PRACE NA ZAMÓWIENIA ZAGRANICZNE\*\*)

Sporo satysfakcji pracownikom Katedry sprawiły realizowane na zlecenia zagraniczne prace naukowo-badawcze, projektowo-konstrukcyjne i weryfikacja doświadczalna zbudowanych o powyższe prototypy obrabiarek dla elektroniki. W oparciu o te zlecenia najpoważniejsze zrealizowane prace to:

- prace podstawowe dotyczące granitowych korpusów obrabiarek oraz wielofazowych silników liniowych;
- układy wideokomputerowe z widzeniem "światowidowym" (rys. 3) wykorzystywane do korekty położenia osi wierconych otworów w wielowarstwowych obwodach drukowanych;
- układy wideokomputerowe z widzeniem "kameleonowym" wykorzystywane do orientowania względem siebie i obrabiarek elementów obrabianych.

Wiele z tych układów pracuje obecnie w zakładach produkcyjnych Ameryki, Europy i Azji. W oparciu o te doświadczenia trwają obecnie prace nad układami wideokomputerowymi w zastosowaniu dla nanotechnologii.

### 4. ZAKOŃCZENIE

Ten krótki przegląd dorobku Katedry Obrabiarek i Robotów za lata 1989 - 1995 upoważnia do stwierdzenia, że dla pracowników Katedry był to okres pełen pracy i znoju. Przyjmując, że sukces jest miarą ilości włożonej pracy - wnioski nasuwają się same.

### LITERATURA

- [1] Budzyński A.F.: Theoretical Principles and Technical Factors of Electrochemical Honing. ISEM6. Cracow 1980.
- [2] Budzyński A.F.: Research on Optimization of the Process of Electrochemical Honing (ECH). ISEM7. Birmingham 1983.
- [3] Budzyński A.F.: Electrochemical Honing - Studies on the Shape Precision of Holes Being Process. ISEM8. Moscow 1986.
- [4] Theoretical and Experimental Research on Process of Electrochemical Honing (ECH). ISEM9. Nagoya 1989.
- [5] Budzyński A.F.: The Influence of Cathode Movement Time of its Operation and the Mean of Electrolyte Delivery on the Diameter Increase of Electrochemical Honed Holes (ECH). ISEM10. Magdeburg 1992.
- [6] Budzyński A.F.: Theoretical Analysis and Experimental Investigations of the Possibility of Shaping Rotational Cylinder Surface By Using Electrochemical Honing (ECH). ISEM11. Lausanne 1995.

---

\*\*\*) Zdecydowana większość tych prac zrealizowana została przez istniejącą przy Katedrze w latach 1988 - 1992 Jednostkę Innowacyjną.

- [7] Budzyński A.F.: Theoretical and Experimental Research on the Process of Electrochemical Honing (ECH). Assistant professor's dissertation. Warsaw Univ. of Technology. Warsaw 1982.
- [8] Karwowski K.: Method and the Control System Diminishing the Rolling Errors of Holes Undergoing Honing. Doctor's dissertation. Warsaw Univ. of Technology. Warsaw 1982.
- [9] Łoś W.: Badania wpływu wybranych geometrycznych cech konstrukcyjnych układu kierowniczego na stateczność pojazdu jednośladowego. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Energetyczny. Gliwice 1977.
- [10] Orobiej J.: Examination of Finishing Processing Parameters of the Holes 0.1 - 0.5 mm in Diameter. Doctor's dissertation. Warsaw Univ. of Technology. Warsaw 1982.
- [11] Seroka St.: Honing of Holes Making Possible the Obtaining of Rolling Area Parallel to the Axis of Geometrical Structure. Doctor's dissertation. Warsaw Univ. of Technology. Warsaw 1982.
- [12] Styp-Rekowski M.: Wpływ wybranych cech konstrukcyjnych specjalnych łożysk tocznych na wewnętrzne opory ruchu w pojazdach jednośladowych. Politechnika Śląska. Wydział Mechaniczny Energetyczny. Gliwice 1985. Praca doktorska.
- [13] Wocianiec R.: Influence of Certain Parameters, Especially of the Tool Shape, on the Precision of Shape and Size of the Holes Undergoing Honing. Doctor's dissertation. IOS. Cracow 1985.
- [14] Zakościelny St.: Influence of Coarseness Directivity and Methods of Production on Wear and Grindability of the Structure Undergoing Honing, Based on Hydraulic Servo-motors. Doctor's dissertation. Silesian Technical University. Gliwice 1981.
- [15] Zastempowski B.: Model łożyska hydrostatycznego z automatyczną regulacją dławienia. XXII Sympozjon "Modelowanie w mechanice". Gliwice-Wiśla 1983.

Józef FLIZIKOWSKI  
Mieczysław GODLEWSKI

## **METODYKA ENERGETYCZNEGO ROZWOJU MASZYN ROLNICZYCH I SPOŻYWCZYCH**

W pracy przedstawiono uniwersalną metodę wykorzystania modelu działania systemu do aktywnego (rozwojowego) monitorowania energetycznego środowiska uprawowego i przetwórczego. Model opiera się o elementy, relacje i czas realizacji funkcji działania rolno-spożywczego.

### **1. WPROWADZENIE**

W budowie i eksploatacji maszyn rolniczych i spożywczych, podobnie jak i w przetwórstwie rolno-spożywczym, środowisko energetyczne (informacyjne) obejmuje wiele różnorodnych nośników, transmisji, transformacji i użyteczności energii [1, 2, 3, 4, 5]:

- elektrycznej (pobranej i oddanej - czynnej i biernej);
- cieplnej (dostarczanie, wydzielanie, odbieranie, straty, przepływ);
- mechanicznej (moment obrotowy, siła, praca, przełożenie kinematyczne);
- płynu (strumień, cyrkulacja, ciśnienia, przepływ, turbulencja) itd.

Podczas upraw, zbioru i przetwórstwa występują złożone przekształcenia strumieni energetycznych i informacyjnych, czyli tworzą się pewne systemy energetyczno-informacyjne. Funkcjonalność takiego systemu określa niedokładność realizacji zadanej funkcji. Raz będzie to niejednorodność geometryczna, innym razem - materiałowa, a jeszcze innym dynamiczno - ruchowa środowiska rolno - spożywczego (sprawność). Uogólniając pewne zdarzenia, można zaproponować metodykę aktywnego (rozwojowego) kreowania środowiska przetwórczego. Przy czym za kreowanie aktywne uważa się trzy racjonalne (ekologicznie, ekonomicznie, technicznie, społecznie) sposoby postępowania, prowadzące do rozwoju maszyn rolniczych i spożywczych:

- zwykłego, reagującego na wpływy otoczenia w sposób normalny (losowy);
- adaptacyjnego, dostosowującego działania do treści wybranego strumienia obowiązków lub napływających informacji;
- rozgrywającego, reagującego na wpływ otoczenia drogą porównania (rozegnienia) możliwych modeli wykresów, warunków i rozwiązań, np. zatrzymanie procesu i uruchomienie procesu w porze strefy nocnej.

Środowisko energetyczne charakteryzowane jest przez: zbiory możliwości, informacji merytorycznych, ekonomicznych i decyzyjnych; czas, sterowanie i koordynowanie; korzyści, nakłady i efektywność; zbiory funkcji celów, estymujących oraz wszelkich ocen rozwoju.

## 2. ZAŁOŻENIA

Powszechnie zakłada się, że układ maszyn rolniczych i spożywczych w systemie funkcjonalnym o zmiennej strukturze wymaga ciągłej reakcji, adaptacji i rozgrywania w zakresie obsługiwanie. Obsługa procesu rozwijającego się (również zmiennego) wymaga na ogół wspomagającego monitorowania. Proces rozróżniany jest w zakresie roboczym i organizującym działaniem. Charakter roboczy wspomagany w zakresie: projektowania, wdrażania, produkcji, eksploatacji, dystrybucji, szkolenia, recyrkulacji. Monitorowanie jest podsystemem wspomagającym organizację działania w kierunku optymalnego wykorzystania systemów roboczych.

Aktywne monitorowanie może być skierowane na rozwój procesów organizujących działanie (sterujących) lub tylko procesów roboczo-realizujących uprawę, zbiór, przetwórstwo oraz zarówno jednych, jak i drugich - a więc na rozwój całego systemu. Z praktyki wiadomo, że procesy robocze mogą zmieniać się szybciej lub wolniej od organizujących lub koordynujących działanie. W tych przypadkach bez aktywnego monitoringu, nie mogą być wykorzystane rozwojowe możliwości systemu.

## 3. MODEL

Systemem maszyn rolno-spożywczych rozwijającym się będzie nazywany zbiór elementów  $E_1, E_2, \dots, E_m$ , powiązanych ze sobą według określonej koncepcji wraz z relacjami między elementami  $E_1, E_2, \dots, E_m$ , przy czym kanałami tych powiązań płyną strumienie energetyczne i informacyjne zgodnie z planem działania. Charakterystyki elementów oraz powiązania są funkcjami wielkości środowiska rolno-spożywczego  $W$  oraz czasu  $t$ , jako zmiennej niezależnej rozwoju systemu i czasu procesu dynamicznego  $t$ .

Oprócz tego relacje  $R_i$  zależą również od sygnałów sterowania  $S(\Theta, t)$ :

$$E_1 = E_1(\bar{W}, \Theta, t),$$

$$E_2 = E_2(\bar{W}, \Theta, t),$$

.....

$$E_m = E_m(\bar{W}, \Theta, t),$$

$$R_1 = R_1(W, s, \Theta, t),$$

$$R_2 = R_2(W, s, \Theta, t),$$

.....

$$R_n = R_n(W, s, \Theta, t).$$

Równanie działania systemu aktywnie monitorowanego w kierunku jego rozwoju ma postać:

$$(\bar{H}, \bar{E}, \bar{R}, \bar{\Theta}, t) = P(\bar{s}, \bar{z}, \bar{\Theta}, t - t_0), \quad (1)$$

gdzie:

- $\bar{H}$  - charakterystyki działania jako wielkości wyjściowych (efektywność);
- $\bar{E}$  - charakterystyki elementów wewnętrznych (konstrukcja);
- $\bar{R}$  - charakterystyki powiązań elementów wewnętrznych (relacje elementów);
- $\Theta, (t_1 - t_0)$  - czas;
- $s$  - sterowanie;
- $z$  - zakłócenia;
- $P$  - funkcja ingerencji.

Lewa strona równania (1) (modelu) opisuje właściwości procesu działania, jego cechy natury fizycznej, właściwej dla danej klasy działań. Te właściwości zależą od charakterystyk elementów  $E_1, E_2, \dots, E_m$  powiązań pomiędzy tymi elementami  $R_1, R_2, \dots, R_n$  oraz są funkcjami  $i$  i  $t$  (czasu działania i procesu dynamicznego). Niewiadomymi są elementy zbioru charakterystyk  $H$  jako wielkości wyjściowych, od których zależy ocena ogólnej efektywności systemu - wspomniane wcześniej niejednorodności, skuteczność, wydajność, pobór i charakter mocy, jednostkowe zużycie energii itd.

Prawa strona równania (1) jest opisem ingerencji wewnętrznej i zewnętrznej. Może ona zależeć od postaci świadomego oddziaływania - sterowania za pomocą sygnałów ze zbioru  $s$  (wspomagane aktywnie), oddziaływania interakcyjnego  $z$  - wzajemnego oddziaływania elementów gleba - maszyna - roślina - zwierzę - budowla - , oddziaływania tensyjnego - napięcia (związanego z różnicą potencjałów), będącego przyczyną procesów wyrównawczych; względnie może również wystąpić jako zakłócenie działania systemu wyrażone przez  $z$ .

Najczęściej w praktyce występują wymienione oddziaływania jednocześnie. Przy czym sterowanie ma zazwyczaj charakter zdeterminowany, natomiast zakłócenia przebiegają według praw stochastycznych. Stąd zadanie monitorowania aktywnego polega głównie na transformacji stochastycznej postaci zakłóceń do zdeterminowanego charakteru sygnału sterującego maszyną, materiałem lub procesem rolno-spożywczym.

Analiza równania (1) prowadzi do ważnych wniosków o prawidłowości rozwoju systemów działania w rolnictwie:

- jeśli system nie spełnia zadania, co wyrażają niskie oceny efektywności lub niewystarczająca jakość produktu, to przyczynami mogą być:
  - \* nieprawidłowe zachowanie elementów  $E_j$ , lub błędna ich struktura  $R_j$ ;
  - \* nieprawidłowe (statyczne) oddziaływanie sterownicze  $s$ ;
  - \* błędna istota realizacji procesu roboczego i błędne charakterystyki sterujące.

Wyselekcjonowanie właściwej przyczyny pozwala na ustaleniu nowych warunków w środowisku działania  $W_w$  i wydzieleniu wielkości, według których charakterystyki powinny być zmieniane;

- czas działania (dynamika) systemu  $t_0$  zależy od szybkości działania poszczególnych elementów, sposobu obserwacji i konceptualizacji (tworzenia przestrzeni istotnych cech), idealizacji - czyli określenia związków pomiędzy głównymi z istotnych cech systemu, konkretyzacji - wyróżnienie cech ubocznych i wreszcie od weryfikacji logicznej i empirycznej wypracowania praw aktywności - czyli szybkości obiegu informacji między elementami. Czas działania, dynamika systemu zależą więc od: wiedzy na temat rolnictwa, paszoznawstwa, żywienia, doboru wskaźników do zmiennych opisujących proces, czujników i przetworników obiektowych, procedur

przetwarzająco - sterujących, a nawet języka matematycznego użytego do rozwoju systemu rolno-spożywczego.

Należy pamiętać, że wprowadzenie dodatkowych środków przyspiesza obieg informacji, ale jednocześnie zwiększa liczbę elementów w systemie. Istnieje pewne nasycenie systemu w środki techniczne, po przekroczeniu którego czas działania i dynamika systemu maleją.

#### 4. MIARY OCENY BUDOWY I EKSPLOATACJI MASZYN ROLNICZYCH I SPOŻYWCZYCH

Wyznaczenie ocen i charakterystyk działania oraz jakości produktu rolno-spożywczego jest zagadnieniem złożonym. Ocena zawiera: informacje o środowisku i warunkach, kryterium lub zespół kryteriów działania i jakości, algorytm do obliczania wartości funkcji lub modelu matematycznego obiektu rozwoju.

Ze względu na treść informacji wyróżnia się model:

- \* model, w którym występują informacje dotyczące struktury i charakterystyk systemu (IS);
- \* model, w którym występują informacje o jakości produktu (IW);
- \* model, w którym występują informacje dotyczące systemu działania  $\lambda$  produktu (ISW).

W ogólnym przypadku efektywność działania oraz jakości produktu:

$$\lambda = \lambda [IS, IW, ISW]. \quad (2)$$

Stosując metodę charakterystyk uogólniających, można zapisać:

$$\lambda(\bar{W}, \Theta) = \frac{F(\bar{W}, \Theta)}{K(\bar{W}, \Theta)}, \quad (3)$$

lub

$$\bar{\lambda}_w(\bar{W}, \Theta) = \frac{\bar{F}(\bar{W}, \Theta)}{\bar{K}(\bar{W}, \Theta)}, \quad (4)$$

przy czym

$$F(\bar{W}, \Theta) = \frac{F(\bar{W}, \Theta)}{F_o(\bar{W}_o, \Theta)}, \quad (5)$$

gdzie:

$\lambda(\bar{W}, \Theta)$  - wskaźnik efektywności działania systemu rolno-spożywczego;

$F(\bar{W}, \Theta)$  - efekt techniczny działania;

$K(\bar{W}, \Theta)$  - nakład techniczny na uzyskanie produktu;

$\bar{\lambda}_w(\bar{W}, \Theta)$  - wskaźnik względnej efektywności działania;

$\bar{F}(\bar{W}, \Theta)$  - względna wartość efektu działania;

$\bar{K}(\bar{W}, \Theta)$  - względna wartość nakładu na działanie;

$F_o(\bar{W}, \Theta)$  - założony efekt działania.

Wzór roboczy do wyznaczania  $\lambda(\bar{W}, \Theta)$  ma postać:

$$\lambda(\bar{W}, \Theta) = \frac{1}{K(\bar{W}, \Theta)} [\Delta F_1(\bar{W}, \Theta) + \Delta F_2(\bar{W}, \Theta) + \Delta F_3(\bar{W}, \Theta)], \quad (6)$$

przy czym:

$$\Delta F_1(\bar{W}, \Theta) = \sum_{i=1}^{i=\mu 1} \int_0^{T_i} \rho_i(\bar{W}) \Delta f_i^{(1)} dt,$$

$$\Delta F_2(\bar{W}, \Theta) = \sum_{i=1}^{i=\mu 2} \int_0^{T_i} \rho_i(\bar{W}) \Delta f_i^{(2)} dt,$$

$$\Delta F_3(\bar{W}, \Theta) = \sum_{i=1}^{i=\mu 3} \int_0^{T_i} \rho_i(\bar{W}) \Delta f_i^{(3)} dt,$$

$$\Delta f_i = [f_{oi}(\bar{W}, \Theta) - f_i(W, \Theta)]^{K_i},$$

gdzie:

$\Delta f_i(\bar{W}, \Theta)$  - przyrost efektu technicznego w  $i$ -tych warunkach;

$\rho_i$  - funkcja wagi;

$f_i$  - funkcja oceny;

$K_i$  - wykładnik formy - aspektu analizy;

$\mu$  - liczba wskaźników i aspektów oceny.

## 5. PRZYKŁAD

Zaproponowaną metodykę aktywnego monitorowania weryfikowano w idealizowanym przypadku analizy efektywności mieszania  $\lambda$  produktu po rozdrobnieniu ziarna pszenżyta o trzech wymiarach rozdrabniania  $K_{1/1} > 1,50$  mm;  $0,50 < K_{1/2} < 1,50$ ;  $K_{1/3} < 0,50$  mm; strawności [1] odpowiednio  $f_{2/1} = 0,65$ ,  $f_{2/2} = 0,78$ ,  $f_{2/3} = 0,94$ ; oraz udziałach masowych:  $\rho_{3/1} = 0,03$ ,  $\rho_{3/2} = 0,85$ ,  $\rho_{3/3} = 0,12$ , energii brutto produktu mieszania  $E_b = 16,2$  MJ/kg; jednostkowego zużycia energii na jednorodne zmieszanie  $R_1 = K_1(\bar{W}_{1-3}, \Theta) = 12$  kJ/kg; uzyskano:

$$\lambda(\bar{W}, \Theta) = 44,5,$$



w stosunku do produktu o jednorodnym wymiarze  $K_{1/1} \geq 1,50$  mm;

$$\lambda(\bar{W}, \Theta) = 18,4.$$

W porównaniu z jednorodnym produktem  $0,50 < K_{1/2} < 1,50$  mm; oraz

$$\lambda(\bar{W}, \Theta) = 12,3 - \text{w porównaniu z jednorodnym produktem } K_{1/3} \leq 0,50 \text{ mm.}$$

Przykład ten ilustruje, w sensie dynamiki rozwoju - postępowy rozwój typu ewolucyjnego, gdy system stopniowo przyjmuje cechy (stany) korzystniejsze - w określonym sensie energetycznym - strawności "in vitro" jako funkcji celu rozdrabniania.

## 6. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonej analizy, założeń, modelu i miar efektywności działania systemu maszyn rolno-spożywczych można sformułować pewne spostrzeżenia w zakresie opisu funkcjonalnego aktywnego monitorowania energetycznego środowiska przetwórczego i wnioski ze stosowania metodyki:

- opis funkcjonalny w kategoriach czasu, stanu, zdarzenia, funkcji, procesu działania powinien umożliwiać odpowiedź na pytanie systemu monitorującego: jakie funkcje i procesy realizowane są w systemie? - jaka jest organizacja, koordynacja funkcji w środowisku maszyn (systemie)? - jakie powinny być najbardziej pożądane przebiegi tych procesów? - czy struktury systemu (środowiska) odpowiadają realizowanym procesom w sensie przyjętych kryteriów? - w jaki sposób cechy, charakterystyki elementów (obiektów) i relacji między nimi wpływają na efektywność procesu i jakości produktu działania?
- zastosowanie metodyki aktywnego monitorowania energetycznego środowiska przetwórczego - umożliwiała wyznaczenie wskaźników efektywności i ich wartości; charakteru rozwoju realizowanego procesu mieszania - według obiektywnych charakterystyk i wreszcie podejmowanie decyzji o kierunkach doskonalenia sterowania i procesu roboczego.

## LITERATURA

- [1] Flizikowski J.: Badania i podstawy konstrukcji wielotarczowych rozdrabniaczy nasion. Rozprawy ATR nr 42/1990, Bydgoszcz.
- [2] Sienkiewicz P.: Teoria efektywności systemów. Ossolineum, Wrocław PAN 1987
- [3] Bochat A.: Ermitteln des Schnittwiderstandes beim Entleeren von Silos. Maschinenmarkt 17, Würzburg, 1995, s.26-31.
- [4] Bogusz M.: Młyn obrotowo - wibracyjny z hydraulicznym wymuszaniem ruchów roboczych. Materiały z Konferencji Naukowej nt.: "Mechanika '95", Politechnika Gdańska, Gdańsk 1995.
- [5] Dulcet E.: Wpływ wydajności zbioru zielonki na równomierność wymieszania jej z konserwantem. Zeszyty Naukowe ATR nr 194, Mechanika 39, Bydgoszcz 1996.
- [6] Flizikowski J., Górecki A.: Badania funkcjonalności zespołu rozdrabniającego z nieliniowym zarysem rzutu krawędzi rozdrabniających. Zeszyty Naukowe ATR nr 192, Mechanika 37, Bydgoszcz 1995.

- [7] Flizikowski J.: Mahlgutbewegung im Arbeitsraum von Mehrscheibenzerkleinerern. Maschinenmarkt nr 26, Würzburg 1995.
- [8] Jankowska M.: Stacja uzdatniania wody powierzchniowej z akcelatorem. Materiały z V Międzynarodowej Konferencji Naukowej nt.: "Recyrkulacja w budowie maszyn", Bydgoszcz 1995.
- [9] Jarmocik E.: Równomierność oprysku w praktyce rolniczej. Zeszyty Naukowe ATR, Mechanika.
- [10] Kikiewicz Z., Kalwaj J.: Modernization of hammermill in mixed feed processing. Międzynarodowe Sympozjum ZRNKO'95 Zagrzeb 1995.

## **ENERGETICS DEVELOPMENT METHODOLOGY OF AGRICULTURE AND FOOD MACHINERY**

### **SUMMARY**

A modeling methodology applicable to energetics development of machinery is proposed. This methodology represents a unified approach, in which the essential features of previously developed analytic and numerical models are integrated. A systematic approach underlying the methodology facilitates separation of various features and phenomena characteristic of agriculture and food machinery in the process of model building.



Lech M. Kamiński

## PNEUMATYCZNE STRUMIENIOWE PRZETWORNIKI CYFROWO-ANALOGOWE

W pracy przedstawiono pneumatyczne elementy automatyki stosowane w komputerowych układach automatyki. Omówiono niektóre problemy przetwarzania sygnału cyfrowego na sygnał analogowy w układach pneumatycznych. Przedstawiono rozwiązania strumieniowych przetworników cyfrowo-analogowych. Poza tym podano przykład zastosowania elementów strumieniowych w układzie zasilania silnika spalinowego. Uzyskane wnioski mogą być wykorzystane w dalszych pracach badawczych.

### 1. WPROWADZENIE

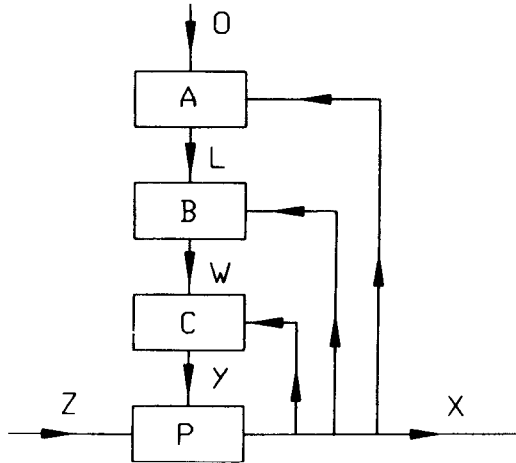
Rozwój elektronicznej techniki komputerowej i miniaturyzacja sprzętu cyfrowego stwarza szerokie możliwości realizacji złożonych układów sterowania maszyn, w tym również obiektów ruchomych jak pojazdy, kombajny i maszyny manipulacyjne. Wymagane są jednak odpowiednie przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe przekazujące informację w komputerowym układzie automatyki.

W Zakładzie Pomiarów Ciepłych i Automatyki (obecnie Katedra Sterowania i Konstrukcji) Wydziału Mechanicznego ATR w Bydgoszczy przy współpracy z Wydziałem Mechanicznym Politechniki Białostockiej wykonano szereg opracowań na temat pneumatycznych przetworników cyfrowo-analogowych oraz zastosowania elementów strumieniowych w układach cyfrowych i analogowych, np. w układzie zasilania silnika spalinowego z zapłonem iskrowym.

Układ automatycznej regulacji wymaga ingerencji obsługi ustalającej wartości zadane poszczególnych wielkości regulowanych oraz tzw. nastawy regulatorów. Dane te obsługa otrzymuje z jednostek analizujących przebieg procesu lub biura projektowego opracowującego daną instalację. Dążenie do eliminowania bezpośredniej pracy ludzkiej i przerzucenia jej na odpowiednie urządzenia techniczne prowadzi do stosowania komputerów optymalizujących proces i przystosowujących go do warunków zewnętrznych.

Na rys. 1 przedstawiono hierarchiczny układ automatycznej regulacji zawierający poza regulacją dalsze poziomy, tzn. optymalizację i adaptację. Poziom regulacji składa się z obiektów P i regulatorów analogowych lub cyfrowych C, które przeciwdziałają zakłóceniom Z i prowadzą proces zgodnie z nastawami i wartościami zadanymi W wielkości regulowanych otrzymanymi z poziomu optymalizacji B. Poziom optymalizacji B na podstawie danych uzyskanych z procesu technologicznego X oraz algorytmu L ustalonego przez poziom adaptacji A opracowuje nastawy regulatorów i wartości zadane W wielkości regulowanych. Poziom adaptacji A przy ustalaniu algorytmu optymalizacji L uwzględnia przebieg procesu oraz dane zewnętrzne dotyczące otoczenia O

czyli cen surowców i produktów na rynku, warunki ekonomiczne i stan aparatury procesu.



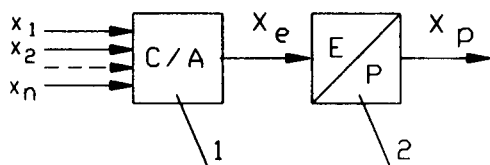
Rys. 1. Hierarchiczny układ automatycznej regulacji: A - poziom adaptacji, B - poziom optymalizacji, C - regulatory, L - algorytm optymalizacji, O - otoczenie, P - objekty, W - wartości zadane, nastawy regulatorów, X - wielkości regulowane, Y - wielkości nastawiane, Z - zakłócenia

Poziomy optymalizacji B i adaptacji A stanowią komputery odpowiednio oprogramowane i współpracujące ewentualnie z innymi układami. Z przedstawionej struktury hierarchicznego układu automatycznej regulacji wynika, że pneumatyczne przetworniki cyfrowo-analogowe potrzebne są w miejscu sygnału W, o ile stosowane są pneumatyczne regulatory analogowe C lub w miejscu sygnału Y, o ile stosowane są regulatory cyfrowe C, a objekty w procesie technologicznym P posiadają pneumatyczne urządzenia wykonawcze.

Niektóre objekty regulacji wymagają sterowania strumieniem gazu zgodnie z sygnałami z urządzenia sterującego jak np. zasilanie silników spalinowych, turbin i niektórych instalacji przemysłowych. W tego typu obiektach można wykorzystywać zasady techniki strumieniowej pozwalającej eliminować mechaniczne części ruchome i związane z nimi niedogodności eksploatacyjne. Szersze wykorzystanie techniki strumieniowej w budowie układów sterowania może doprowadzić do wyeliminowania elementów elektronicznych, które są wrażliwe na działanie wysokich temperatur oraz pól elektromagnetycznych i radioaktywnych.

## 2. PRZETWARZANIE CYFROWO-ANALOGOWE

W przemysłowych układach automatyki w celu przetworzenia cyfrowego sygnału elektrycznego z układu komputerowego na analogowy sygnał pneumatyczny łączy się dwa przyrządy (rys. 2): elektryczny przetwornik cyfrowo-analogowy 1 i analogowy przetwornik elektropneumatyczny 2.



Rys. 2. Układ przetwarzający cyfrowy sygnał elektryczny na analogowy sygnał pneumatyczny: 1 - elektryczny przetwornik cyfrowo-analogowy, 2 - analogowy przetwornik elektropneumatyczny

Elektryczne przetworniki cyfrowo-analogowe mogą być budowane z odpowiednio dobranych rezystorów łączonych jako tzw. drabinki i pracujące w sposób dławieniowy [8]. Przykład tego rodzaju drabinkowego przetwornika cyfrowo - analogowego dla 3-bitowego napięciowego sygnału wejściowego  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  doprowadzonego na rezystory  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$  przedstawiono na rys. 3. Sygnałem wyjściowym analogowym jest napięcie  $x$  odbierane pomiędzy rezystorami  $R_4$  a  $R_5$ . Zakładając liniową zależność natężenia przepływu prądu od różnicy napięć na rezystorach ( prawo Ohma ) oraz, że:

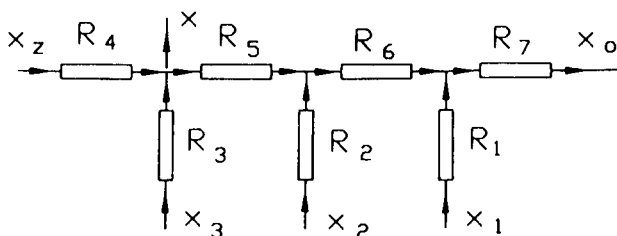
$$R_5 = R_6 = R,$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_7 = 2R, \quad (1)$$

otrzymuje się:

$$x = \frac{1}{3}x_2 + \frac{1}{12}x_0 + \frac{1}{3}x_3 + \frac{1}{6}x_2 + \frac{1}{12}x_1. \quad (2)$$

Dobór napięć  $x_2$  i  $x_0$  pozwala uzyskać żądany zakres napięcia wyjściowego  $x$ . Przy jednakowych wartościach napięć wejściowych  $x_1 = x_2 = x_3$  mają one wpływ na sygnał wyjściowy  $x$  odpowiadający naturalnemu kodowi dwójkowemu, czyli w tym przypadku o 1/7, 2/7 i 4/7 zakresu.

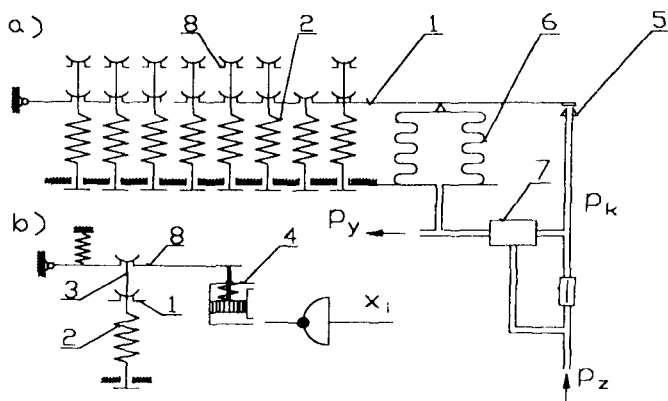


Rys. 3. Drabinkowy przetwornik cyfrowo-analogowy:  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  - cyfrowy sygnał wejściowy,  $x$  - analogowy sygnał wyjściowy,  $x_z$ ,  $x_o$  - stałe napięcia,  $R_1 \dots R_7$  - rezystory

W pracy [1] przedstawiono wyniki badań pneumatycznego przetwornika cyfrowo - analogowego zbudowanego wg schematu na rys. 3, przy zastąpieniu rezystorów elektrycznych i napięć rezystorami pneumatycznymi i ciśnieniami powietrza. Starano się w tym przypadku uzyskać pneumatyczny sygnał analogowy w zakresie 20 - 100 kPa.

Niestety charakterystyki przepływowe oporów pneumatycznych w podanym zakresie ciśnień są nieliniowe [10, 11, 14, 16, 17]. W celu uzyskania żądanych wartości ciśnienia wyjściowego  $x$  zróżnicowano oporności w stosunku do warunków podanych zależnościami (1).

Niektóre firmy podjęły produkcję pneumatycznych przetworników cyfrowo-analogowych przystosowanych do współpracy z konwencjonalną pneumatyczną aparaturą regulacyjną. Przykładem jest pneumatyczny mieszkowy przetwornik cyfrowo-analogowy produkowany przez VEB Regelwerk Dresden przedstawiony na rys. 4 [18]. W przyrządzie wykorzystano elementy pneumatycznego przetwornika pomiarowego przy zastąpieniu czujnika układem sprężyn obciążających dźwignię równoważni 1 momentem siły zależnym od wejściowego sygnału cyfrowego. Dźwignia równoważni 1 oddziałuje na dyszę 5 kaskady sterującej i wzmacniacz wyjściowy 7. Ciśnienie wyjściowe  $p_y$  wzmacniacza 7 stanowi analogowy sygnał wyjściowy przetwornika i doprowadzone jest do mieszka sprężenia zwrotnego 6. Moment obrotowy od siły w mieszku 6 równoważy momenty obrotowe od sił sprężyn 2. Ciśnienia wejściowe  $x_i$ , przez elementy negacji i siłowniki 4 dołączają sprężyny 2 do dźwigni 1. Jeśli brak jest ciśnienia w kanale  $x_i$ , to następuje podniesienie tłoka w siłowniku 4, dźwigni 8, łącznika 3 i odłączenie sprężyny 2 od dźwigni 1. Jedną ze sprężyn 2 służy do zerowania przyrządu. Siły sprężyn 2 oraz ramiona ich działania na dźwigni 1 są tak dobrane, aby zapewnić momenty obrotowe o wartościach zgodnych z naturalnym kodem dwójkowym wejścia cyfrowego oraz wartości ciśnienia wyjściowego  $p_y$  przetwornika w zakresie 20 - 100 kPa. Przetwornik pracuje poprawnie przy stosunkowo szerokich tolerancjach sygnału wejściowego ("0" - 0 - 20 kPa, "1" - 80 - 100 kPa).

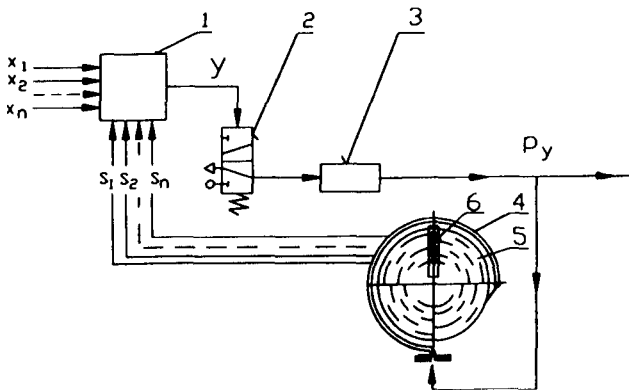


Rys. 4. Pneumatyczny mieszkowy przetwornik cyfrowo-analogowy:  
a) schemat równoważni, b) układ włączania sprężyn

## 3. STRUMIENIOWE PRZETWORNIKI CYFROWO-ANALOGOWE

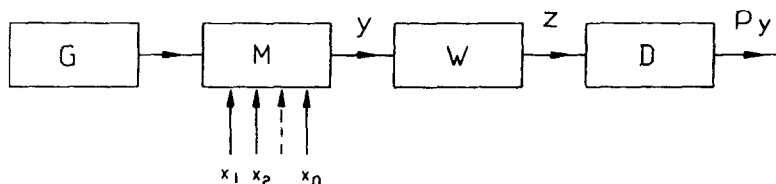
Technika strumieniowa stwarza szerokie możliwości budowy przyrządów cyfrowych, w tym również przetworników cyfrowo-analogowych. Szczególnie korzystne jest stosowanie techniki strumieniowej w zakresie niskich nadciśnień rzędu do 1,5 kPa, natomiast trudne jest zbudowanie przyrządu pracującego w zakresie ciśnień normalnie stosowanych w przemysłowych układach automatyki.

W Zakładzie Pomiarów Ciepłych i Automatyki podjęto w latach 1973-1975 prace nad wykorzystaniem techniki strumieniowej w przetwarzaniu sygnału cyfrowego na sygnał pneumatyczny w zakresie 20-100 kPa [2]. Na zlecenie Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów w Warszawie po przeanalizowaniu szeregu możliwych rozwiązań opracowano i wykonano prototyp pneumatycznego 5-cio bitowego przetwornika cyfrowo-analogowego z komparatorem strumieniowym (rys. 5). W przetworniku zastosowano pneumatyczny wzmacniacz 2 przełączny dwustanowo sygnałem  $y$  z komparatora 1. Wzmacniacz 2 ładuje lub rozładuje komorę 3 dożądanego ciśnienia wyjściowego  $p_y$  w zakresie 20 - 100 kPa, które mierzone jest manometrem 4 z tarczą kodową 5 w kodzie Graya przysłaniającą dysze 6 nadające niskociśnieniowy sygnał cyfrowy  $s_1, s_2, \dots, s_5$  sprzężenia zwrotnego podawany do komparatora 1. W komparatorze 1 zbudowanym z elementów strumieniowych systemu INTEFLUID-SPAS, porównywany jest niskociśnieniowy pneumatyczny cyfrowy sygnał wejściowy  $x_1, x_2, \dots, x_5$  w naturalnym kodzie dwójkowym z sygnałem sprzężenia zwrotnego z manometru 4 [4]. Przetwornik pracował poprawnie i spełniał stawiane wymagania.



Rys. 5. Pneumatyczny przetwornik cyfrowo-analogowy z komparatorem strumieniowym: 1 - komparator, 2 - wzmacniacz, 3 - komora, 4 - manometr, 5 - tarcza kodowa, 6 - dysze





Rys. 6. Schemat przetwornika cyfrowo-analogowego z modulacją szerokości impulsów prostokątnych: G - generator, M - modulator, W - przerzutnik monostabilny, D - demodulator

Przetwarzanie sygnału cyfrowego na sygnał analogowy można uzyskać przez modulowanie szerokości (czasu trwania) impulsów prostokątnych [3, 5, 6]. Schemat przetwornika z modulacją szerokości impulsów prostokątnych przedstawiono na rys. 6. Pneumatyczne impulsy prostokątne z generatora G są modulowane cyfrowym sygnałem wejściowym  $x_1, x_2, \dots, x_n$  w modulatorze strumieniowym M, a następnie wzmacniane w przerzutniku monostabilnym W. Impulsy o modulowanej szerokości wprowadzane są na demodulator D (filtr), który może stanowić kaskada pneumatyczna. Ciśnienie wyjściowe  $p_y$  zależne jest od szerokości impulsów wprowadzanych na filtr. Przedstawiony przetwornik cyfrowo-analogowy z modulacją szerokości impulsów nie posiada żadnych mechanicznych części ruchomych, co stanowi szczególnie cenną zaletę.

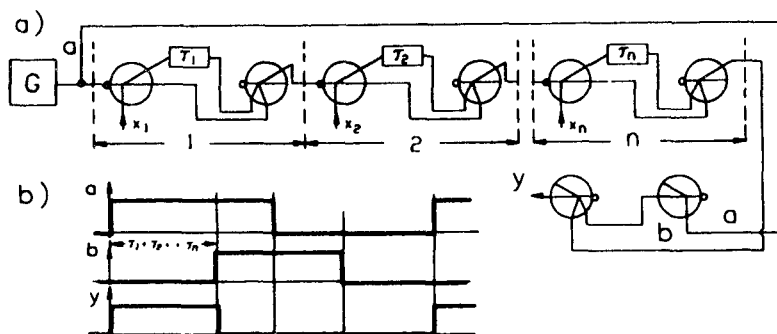
Strumieniowy cyfrowy modulator szerokości impulsów prostokątnych może być rozwiązany w sposób przedstawiony na rys. 7a, jeśli zostaną użyte przerzutniki monostabilne i komory opóźniające o czasach opóźnienia  $t_1, t_2, \dots, t_n$  dobrane zgodnie z naturalnym kodem dwójkowym. Na wyjściu modulatora należy umieścić układ logiczny realizujący funkcję "zakaz przez b" dla sygnałów a (impulsy z generatora drgań prostokątnych) i b (impulsy opóźnione w modulatorze). Przebiegi ciśnień w wybranych miejscach modulatora przedstawiono na rys. 7 b.

Przedstawiony strumieniowy modulator z przerzutnikami monostabilnymi z powodzeniem może pracować w zakresie nadciśnień rzędu 30 kPa, a to pozwala zrealizować przetwornik cyfrowo-analogowy z sygnałem wyjściowym 20-100 kPa przy wykorzystaniu odpowiedniego sumatora ciśnień [7, 9]. Można użyć dwu strumieniowych przetworników cyfrowo-analogowych z modulatorami  $M_1$  i  $M_2$ , jak przedstawia to rys. 8, jeśli sumator S pracuje wg zależności:

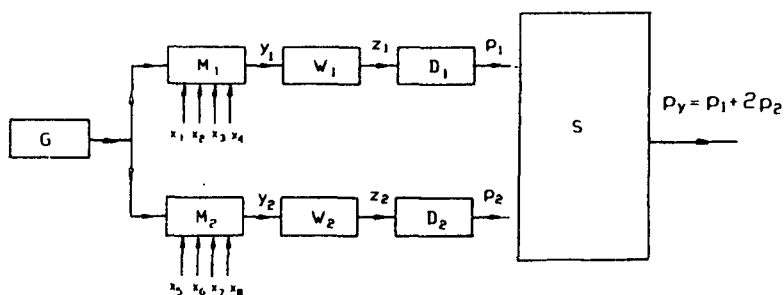
$$p_y = p_1 + 2p_2, \quad (3)$$

gdzie:

- $p_y$  - ciśnienie wyjściowe przetwornika cyfrowo-analogowego;
- $p_1, p_2$  - ciśnienia wyjściowe przetworników strumieniowych wprowadzane do sumatora S.



Rys. 7. Strumieniowy cyfrowy modulator szerokości impulsów prostokątnych:  
a) schemat, b) przebiegi ciśnień



Rys. 8. Przetwornik cyfrowo-analogowy z pneumatycznym mieszkowym sumatorem ciśnień

#### 4. STRUMIENIOWY UKŁAD ZASILANIA SILNIKA SPALINOWEGO

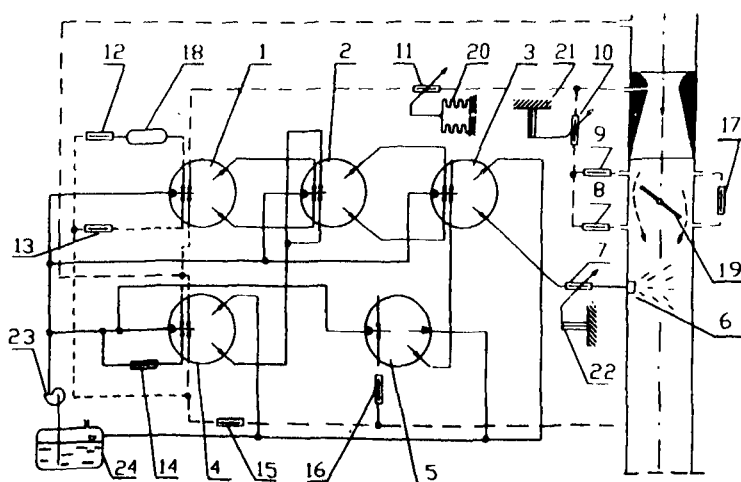
Na rys. 9 przedstawiono schemat strumieniowego układu zasilania silnika spalinowego z zapłonem iskrowym opracowany na podstawie patentu USA Nr 3.574.346 Fuel System The Bendix Corporation [12, 13]. Układ składa się z pięciu wzmacniaczy 1, 2, 3, 4 i 5, pneumatycznych kaskad korekcyjnych (dławiki i komory 7... 18) pracujących na podciśnieniu z kolektora dolotowego, z czujników ciśnienia otoczenia 20, temperatury otoczenia 22 i temperatury silnika 21, wtryskiwacza 6 i przewodów łączących. Wzmacniacze strumieniowe zasilane są paliwem z pompy 23, a wymagana dawka paliwa korygowana w zależności od temperatury otoczenia przez dławik 7 dostarczana jest do wtryskiwacza 6 w kolektorze ssącym. Podciśnienie w zwężce Venturiego zależne od otwarcia przepustnicy 19 i ilości dostarczanego powietrza do silnika steruje strumieniowym wzmacniaczem 1, a ten wzmacniaczami 2 i 3. Wzmacniacze 1, 2

i 3 realizują pożądaną charakterystykę dozowania paliwa w zakresie średnich obciążeń silnika.

Wzbogacanie mieszanki przy dużej prędkości obrotowej wału silnika (uzyskanie mocy maksymalnej) realizowane jest za pomocą wzmacniacza 4. Dławik 14, połączony z ciśnieniem zasilającym, pozwala uzyskać odpowiednie ciśnienie podporowe odchylające strumień główny wzmacniacza 4 i przepływ paliwa do zbiornika. Drugie wyjście tego wzmacniacza połączone jest z dwoma kanałami sterującymi wzmacniacza 2 i dławik strumień paliwa dostarczanego do silnika. Pełne otwarcie przepustnicy powoduje zmniejszenie efektu dławienia strumienia wzmacniacza 4, co prowadzi do zmniejszenia efektu dławienia strumienia wzmacniacza 2 i wzbogacenie mieszanki.

Tzw. "pompkę przyspieszającą" zrealizowano za pomocą układu kaskadowego złożonego z dławików 12 i 13 oraz komory 18. Gwałtowne otwarcie przepustnicy powoduje powstanie różnicy podciśnięć sterujących wzmacniacza 1, co prowadzi do okresowego wzbogacenia mieszanki. Po zatrzymaniu przepustnicy 19 w dowolnym położeniu podciśnienia w pierwszej parze wejść sterujących wzmacniacza 1 się wyrównują.

Dozowanie paliwa na biegu jałowym zapewnia korekcyjny układ kaskadowy z dławikami 8, 9, 10 i 11, gdyż podciśnienie w zwężce Venturiego jest za małe doysterowania wzmacniacza 1. Przy całkowicie zamkniętej przepustnicy powstaje znaczne podciśnienie przed dławikiem 8, które przez układ dławików 8, 9, 10 i 11 oddziałuje na wejście sterujące wzmacniacza 1 zapewniając wymagany skład mieszanki. Intensywność tego oddziaływania zapewnia dławik 9. Dławik 10 koryguje ilość paliwa w zależności od temperatury silnika, a dławik 11 - w zależności od ciśnienia otoczenia. Niezbędna ilość powietrza przy biegu jałowym (niezbędna prędkość obrotowa wału korbowego) ustalana jest za pomocą dławika 17. Zwiększenie otwarcia przepustnicy 18 powoduje wyłączenie się z pracy dławików 8 oraz 9 i zaprzestanie działania korekcyjnego układu kaskadowego biegu jałowego.



Rys. 9. Strumieniowy układ zasilania silnika spalinowego

Korekcję dawki paliwa przy gwałtownym zmniejszeniu mocy silnika zapewnia monostabilny wzmacniacz 5, współpracujący ze wzmacniaczem 3.

Przedstawiony układ zasilania silnika może być przystosowany zarówno do paliwa ciekłego, jak i gazowego. Istnieją szerokie możliwości kształtowania charakterystyk układu zasilania i przystosowania go do wszelkich wymagań. Istotną zaletą omawianego układu jest bezpośrednie sterowanie czynnikami procesu tzn. paliwem i powietrzem, co gwarantuje krótsze czasy reakcji na zmiany niż w przypadku pośrednictwa zaworu elektromagnetycznego i innych elementów sterujących.

## 5. WNIOSKI

Przedstawione rozwiązania przyrządów pneumatycznych świadczą o szerokich możliwościach rozwoju i zastosowania pneumatyki w komputerowym sterowaniu maszyn. Szczególnie interesująco zapowiada się realizacja przyrządów przetwarzających sygnały cyfrowe przy wykorzystaniu modulacji szerokości impulsów. Przyrządy tego typu zapewniają wysoką dokładność niezależnie od czasu eksploatacji. Żądany czas opóźnienia uzyskiwany jest przez odpowiednią objętość komory, a nie oporność dławika, która może zmieniać się wskutek zanieczyszczeń. Z tego względu wszelkie rozwiązania typu drabinkowego wydają się mniej przydatne. Interesująco zapowiadają się również rozwiązania bezpośredniego sterowania obiektami, bez energii pomocniczej jak np. strumieniowy układ zasilania silnika spalinowego. W przedstawionym rozwiązaniu posiada on jednak układy korekcyjne z dławikami o odpowiednich opornościach i w związku z tym należy spodziewać się utraty dokładności w czasie eksploatacji. Należy więc opracować układ, w którym własności korekcyjne będą zależne od objętości komór, a nie oporności dławików. Wówczas układ będzie posiadał stałą dokładność w czasie eksploatacji, co przy wyeliminowaniu mechanicznych części ruchomych i braku opóźnień w działaniu oraz odporności na ciężkie warunki ruchowe zapewni mu zastosowanie.

## LITERATURA

- [1] Kamiński L.M., Golik A., Smoleński J.: Pneumatyczny kaskadowy przetwornik cyfrowo-analogowy. Prace VI Krajowej Konferencji Automatyki, Poznań 9-11 września 1974 r. tom II s. 98-102.
- [2] Kamiński L.M., Golik A., Peszyński K., Smoleński J., Gawda M., Olszewski W.: Pneumatyczny strumieniowy przetwornik cyfrowo-analogowy. Praca badawcza dla Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów w Warszawie Al. Jerozolimskie 202, nr ew. BZ-12/74, 1973-1974, nr problemu 03.01.06.
- [3] Kamiński L.M., Siemieniako F.: Mechaniczny generator pneumatycznych impulsów prostokątnych o modulowanej szerokości. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej nr 30, Konferencje Nr 4/1975 s. 259-266. VI Ogólnopolska Konferencja Teorii Maszyn i Mechanizmów, Świeradów 15-18 września 1975.
- [4] Kamiński L.M.: Pneumatyczny przetwornik cyfrowo-analogowy z komparatorem. Pomiary Automatyka Kontrola Nr 11/1976 s. 407-408.

- [5] Kamiński L.M.: Analityczne wyznaczanie odpowiedzi pneumatycznych układów kaskadowych na wymuszenie ciągiem impulsów prostokątnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej nr 16/1977 Nauki Techniczne Mechanika s. 273-284.
- [6] Kamiński L.M.: Pneumatyczny cyfrowy modulator szerokości impulsów. Patent Tymczasowy 91046 opublikowany 30.11.1977.
- [7] Kamiński L.M., Golik A.: Sposób sumowania sygnałów mechanicznych szczególnie cyfrowych. Patent Tymczasowy 95751 opublikowany 31.05.1978.
- [8] Kamiński L.M.: Pneumatyczne przetworniki cyfrowo-analogowe. Bydgoskie Towarzystwo Naukowe. Prace Wydziału Nauk Technicznych Seria B 1978 Nr 10 s. 57-65.
- [9] Kamiński L.M.: Mieszkowy sumator pneumatyczny jako zespół wyjściowy strumieniowego przetwornika c/a. I Konferencja - Pneumatyczne Elementy Automatyki, Warszawa 19-21 wrzesień 1979 Instytut Automatyki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej, s. 120-123.
- [10] Kamiński L.M.: Teoria kaskad płynowych jako elementów maszyn i mechanizmów. IX Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Dydaktyczna Teorii Maszyn i Mechanizmów, Kraków 2-3 XII 1982, materiały konferencyjne s. 83-87.
- [11] Kamiński L.M.: Rozkład ciśnień w pneumatycznej kaskadzie wielokomorowej. IX Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Dydaktyczna Teorii Maszyn i Mechanizmów. Kraków 2-3 XII 1982, materiały konferencyjne s. 114-118.
- [12] Kamiński L.M., Żdanuk W.: Opracowanie i badania modelu strumieniowego wzmacniacza analogowego jako wtryskowego układu zasilania silników zj. Konferencja naukowo-techniczna - Pojazdy Samochodowe, Problemy postępu i rozwoju AUTOPROGRES' 83/84, sekcja II Problemy konstrukcji silników, podwozi i nadwozi samochodów, Jadwisin styczeń 1984, s. 41 - 43.
- [13] Kamiński L.M., Żdanuk W.: Strumieniowy układ zasilania wtryskowego silnika zj. Auto-Technika Motoryzacyjna nr 3/1985 s. 14-16.
- [14] Kamiński L.M.: Obliczanie ciśnień w kaskadzie pneumatycznej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1987 seria Mechanika, zeszyt 85 Nr kol. 1010 s. 99-106. XI Ogólnopolska Konferencja Teorii Maszyn i Mechanizmów, 27-30. 04.1987 Zakopane.
- [15] Kamiński L.M.: Siłownik pneumatyczny o ruchu aperiodycznym Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Nr 1027/1989, z 92, s. 75-80.
- [16] Kamiński L.M.: Charakterystyka przepływowa oporu pneumatycznego. VIII Konferencja PNEUMATYKA' 94 - Sterowanie i pomiary w przemyśle, Wrocław 1994 - Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów 47, seria: Konferencje 8, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994, s. 85-89.
- [17] Kamiński L.M.: Współczynniki wzmocnienia pneumatycznej kaskady proporcjonalnej. VIII Konferencja Krajowa "Mechanika Płynów" Białystok-Białowieża 05-09.09.1988, t. I, s. 341-346.
- [18] Schrepel D., Schwarz A.: Pneumatic analog / digital - und digital / analog - umsetzer, Messen Steuern Regeln, H 12/1968, s. 446-469.
- [19] Siemieniako F.: Demodulacja impulsów prostokątnych w pneumatycznych kaskadach dwukomorowych. Praca doktorska. Politechnika Warszawska 1975.
- [20] Werszko M.: Demodulacja pneumatycznych sygnałów częstotliwościowych za pomocą wzmacniaczy turbulizujących. Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, Nr 11, Wrocław 1974.

**PNEUMATIC FLUIDICS DIGITAL - TO - ANALOG CONVERTERS****SUMMARY**

The paper describes pneumatic elements for computer control systems. Some digital to analog transformation conceptions used in pneumatic systems are considered. There are shown solutions of the digital to analog fluidic converters. Apart from this the paper presents a example application fluidic elements to carburettor system of internal combustions engine. The results obtained may be used for new research works.



Hubert Latoś

## KIERUNKI PRAC KATEDRY TECHNOLOGII MASZYN ATR

### 1. WPROWADZENIE

Technologia maszyn jest częścią technologii budowy maszyn i na ogół nie obejmuje występujących tam zagadnień związanych z projektowaniem i konstruowaniem maszyn. Należy ona do nauk, których osiągnięcia są bezpośrednio stosowane w wytwarzaniu i usługach. Dlatego to, co uznaje się niekiedy w danej chwili za jej kanony, zmienia się w tempie proporcjonalnym do tempa postępu w technice wytwarzania maszyn i usług związanych z maszynami oraz tempa zmian samych maszyn. Ciągłe powstają nowe sposoby wytwarzania zwiększające możliwości technologiczne wytwarzania, bez likwidacji dotychczasowych sposobów.

Katedra Technologii Maszyn (KTM) obejmuje dydaktycznie i badawczo, ogólną technologię materialnego wytwarzania wszelakich maszyn wraz z projektowaniem procesów i związków występujących podczas tego wytwarzania. W wyniku rozwoju historycznego w wielu uczelniach, katedry technologii maszyn obejmują także niektóre techniki szczegółowe lub inne przedmioty, bezpośrednio związane z technologią maszyn i ją wspomagające. W ATR Bydgoszcz przedmiotami takimi są, zgodnie z kolejnością występowania w planach studiów:

- metrologia techniczna, głównie pomiary długości i kąta;
- obróbka za pomocą skrawania i narzędzia skrawające;
- przetwórstwo i obróbka tworzyw sztucznych;
- zarządzanie i marketing;
- systemy zapewnienia jakości.

W rozwoju historycznym, w ATR były okresy, gdy niektóre z wymienionych grup przedmiotów realizowały istniejące wtedy inne samodzielne zakłady. Był także okres, gdy KTM obejmowała przedmioty związane z obrabiarkami. W dalszej części omawiane będą tylko prace związane z aktualnym zakresem przedmiotów dydaktycznych realizowanych przez nauczycieli akademickich KTM.

### 2. DOTYCHCZASOWE PRACE

W początkowym okresie istnienia zespołu z zakresu technologii maszyn, nauczyciele akademicy oprócz dydaktyki zajmowali się pracami projektowymi z zakresu obróbki skrawaniem, a także projektowaniem i wykonawstwem urządzeń na użytek innych pracowni Wyższej Szkoły Inżynierskiej i zakładów regionu. W tym czasie wykonywano między innymi:



- urządzenia laboratoryjne dla laboratorium celulozy Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Bydgoszczy;
- obrabiarkę zespołową wraz z oprzyrządowaniem dla Zakładów Wytwórczych Sprzętu Instalacyjnego A-4 w Nakle, obecnie POLAM-Nakło S.A.;
- oryginalne gwintowniki do gwintów trapezowych dla Fabryki Maszyn Rolniczych „Unia” w Grudziądzu.

Pod koniec lat 60, w Polsce, zrównano warunki awansu naukowego w naukach praktycznych z naukami teoretycznymi. Zmiany te dotyczyły głównie nauk nie będących typowymi dla uniwersytetów, w tym dotyczyły nauk technicznych. Z jednej strony zahamowało to przyjmowanie na stanowiska nauczycieli akademickich w naukach technicznych ludzi o dużym, dobrym doświadczeniu przemysłowym, lecz bez stopni naukowych, z drugiej strony wytworzyło konieczność realizowania prac doktorskich w naukach praktycznych przez osoby już zatrudnione na stanowiskach nauczycieli akademickich. Realizacja tego drugiego postulatu zbiegła się z wprowadzeniem w ATR Bydgoszcz jednolitych dziennych studiów magisterskich.

Praktycznie, do tej pory w Polsce nie zmieniono, nie przystającego do nauk praktycznych, nie stosowanego w krajach o przodującej technice, systemu kreowania akademickich kadr nauczycielskich. Zmiany systemu kreowania i rozwoju nauczycieli akademickich szczególnie silnie dotknęły przedmioty praktyczne, w tym technologię maszyn i przedmioty z nią bezpośrednio związane. Spowodowało to także znaczący wzrost kosztów utrzymania kadry, który musiał teraz uwzględniać inny, wyższy koszt jej rozwoju naukowego.

W tym czasie, dla ograniczenia rosnących kosztów badań w obróbce za pomocą skrawania, opracowano w Polsce system zakładający podział tematyki badań z punktu widzenia materiału obrabianego. Dzięki staraniom ówczesnego kierownika zespołu technologii maszyn prof.dr inż. Mieczysława Felda, udało się wtedy pozyskać dla KTM do wieloletnich, wielowątkowych badań - stopy aluminium. W ramach tej tematyki opracowano normatywy różnych sposobów skrawania stopów Al oraz zrealizowano cztery prace doktorskie i umocniono Katedrę Technologii Maszyn na naukowej mapie obróbki skrawaniem w Polsce.

W okresie tym badania prowadzono jako badania własne lub zlecone. Główny efekt badań własnych to zakończonych dwadzieścia przewodów doktorskich i jeden habilitacyjny. Załączone w dalszej części tego opracowania zestawienie prac dysercyjnych pozwala zorientować się w tematyce szczegółowej prezentowanej przez poszczególnych nauczycieli. W większości badania prowadzono na zlecenie jednostek zewnętrznych i to głównie w dwóch grupach tematycznych związanych z:

- technologią obróbki skrawaniem;
- przetwórstwem i obróbką tworzyw sztucznych.

Uzupełnieniem tych badań były badania w zakresie: nagniatania, marketingu i zarządzania oraz analizy wymiarów tolerowanych.

Poniżej zestawiono tematykę ważniejszych prac na zlecenie jednostek zewnętrznych.

## a. Prace koordynowane w ramach RWPG

Badanie ostrzy z określeniem poboru mocy modułowych urządzeń do rozdrabniania kabli. Zadanie w ramach międzynarodowego programu badań RWPG: INTERELEKTRO, temat nr 4.35: Sozдание kompleksa special'nogo technologiceskogo oborudowanija na baze gibkogo proizvodstelnogo modulja dlja razdekenija otchodov kabelnogo proizvodstva na sostavljajuscie komponenty. Praca dla Biura Studiów i Projektów Przemysłu Kablowego „BIPROKABEL” w Bydgoszczy. Zakończono w 1988 roku.

## b. Prace koordynowane centralnie

- Opracowanie normatywów warunków obróbki stopów aluminium. Badania i opracowanie wyników badań. W ramach problemu resortowego 1.105, temat FIS-584/I na zlecenie Instytutu Obróbki Skrawaniem w Krakowie. Zakończono w 1975 r.
- Określenie charakterystyk skrawalności i normatywów przy toczeniu i frezowaniu zeliwa sferoidalnego. W ramach problemu węzłowego 05.1.5. poz. 13.01d, na zlecenie Instytutu Odlewnictwa w Krakowie. Zakończono w 1975 r.
- Opracowanie normatywów warunków obróbki dla automatów, półautomatów wielorzecionowych. W ramach problemu węzłowego 05.1.4-6, na zlecenie Instytutu Obróbki Skrawaniem w Krakowie. Zakończono w 1981 roku.
- Zastosowanie i ocena przydatności tworzyw sztucznych do aplikatorów dozujących preparaty płynne do konserwacji pasz. W ramach programu rządowego PR-1, podproblem kierunkowy 5 poz. U.5.4.4 na zamówienie Instytutu Zootechniki ATR w Bydgoszczy. Zrealizowana w latach 1981-1985.
- Opracowanie technologii elementów z tworzyw sztucznych do przetworników ultradźwiękowych systemu „FLAMING A”. W ramach Centralnego Programu Badań Rowojowych 12.07 na zamówienie Politechniki Gdańskiej w latach 1986-1990.
- Wartwy dopasowujące z tworzyw sztucznych dla przetworników szerokopasmowych. W ramach Centralnego Programu Badań Rozwojowych 02.16.4 na zamówienie Instytutu Telekomunikacji Politechniki Gdańskiej w latach 1987-1990.
- Rozwój podstaw teoretycznych i doświadczalnych obróbki skrawaniem powierzchni kształtowych. Zadanie 02.02.03 w Centralnym Programie Badań Podstawowych 02.04, koordynowane przez Politechnikę Wrocławską. Realizowana w latach 1986-1990.

## c. Prace bezpośrednio dla podmiotów gospodarczych

- Optymalizacja warunków skrawania odlewów ze stali wysokomanganowej. Praca dla Pomorskich Zakładów Budowy Maszyn „Zremb-Makrum” w Bydgoszczy. Zrealizowano w latach 1968-1972.
- Łamanie wiórów o dużych przekrojach przy toczeniu materiałów trudnoskrawalnych. Praca dla Pomorskich Zakładów Budowy Maszyn „Zremb-Makrum” w Bydgoszczy. Zrealizowano w latach 1973-1974.
- Obróbka wysokomanganowego staliwa austenitycznego z podgrzewaniem za pomocą łuku elektrycznego. Praca dla Pomorskich Zakładów Budowy Maszyn „Zremb-Makrum” w Bydgoszczy. Zrealizowano w latach 1974-1978.

- Opracowanie technologii mechanicznego gładzenia ostrzy noży krajarki włókna WK-7. Praca dla Zakładów Włókien Sztucznych „Chemitex-ELANA” - Toruń. Zakończona w 1974 roku.
- Analiza wymiarowa oryginalną autorską probabilistyczną metodą kombinacyjną:
  - wolnobiegu czterorzędowego;
  - połączenia klinowego osi mechanizmu korbowego z korbą rowerową; zwisu łańcucha rowerowego.
 Prace dla Zakładów Rowerowych PREDOM-ROMET w Bydgoszczy. Zakończone w 1974 roku.
- Optymalizacja narzędzi i parametrów wykonania otworu gwintowego M4, nieprzelotowego, w stopach PA4 i ZNAL. Praca dla Fabryki Akcesoriów Meblowych w Chełmnie. Zakończona w 1975 roku.
- Studium w zakresie procesu produkcji kapitalnych remontów obrabiarek. Praca dla Kombinatu Gospodarki Parkiem Obrabiarek, Zakład Remontowy Obrabiarek w Koronowie. Zakończona w 1976 roku.
- Optymalizacja i unifikacja konstrukcji i wykonania: matryc i patryc wyłaczarek oraz tulejek prowadzących skręcarek. Praca dla Bydgoskiej Fabryki Kabli. Zakończona w 1976 roku.
- Optymalizacja wykonania gwintów M4 i M5 w otworach korpusu przrzutki z materiału AK11. Praca dla Zakładów Rowerowych PREDOM-ROMET w Bydgoszczy. Zakończona w 1976 roku.
- Nowe układy grzewcze wyłaczarek. Praca dla OBR „METALCHEM” w Toruniu. Zrealizowana w latach 1975-1978.
- Toczenie wzdłużne na automacie tokarskim, nożami o skośnej prostoliniowej krawędzi skrawającej bez naroża. Praca dla Zakładów Radiowych ELTRA, Zakład w Gniewie. Zakończona w 1978 roku.
- Analiza wymiarowa oryginalną autorską probabilistyczną metodą kombinacyjną ram rowerowych wszystkich typów produkowanych w Zakładach. Praca dla Zakładów Rowerowych PREDOM-ROMET w Bydgoszczy. Zakończona w 1979 roku.
- Obliczenie bicia osiowego koła łańcuchowego z piastą motorowerową. Praca dla Zakładów Rowerowych PREDOM-ROMET w Bydgoszczy. Zakończona w 1981 roku.
- Optymalizacja procesu wiercenia głowicami wielowrzecionowymi w cyklu automatycznym. Praca dla Nakielskich Zakładów Maszyn i Urządzeń Gastronomicznych „SPOMASZ”. Zakończono w 1984 roku.
- Dobór warunków obróbki kół zębatach o dużych modułach. Praca dla Pomorskich Zakładów Budowy Maszyn w Bydgoszczy. Zrealizowano w latach 1983-1985.
- Urządzenia i narzędzia do wirowego frezowania gwintów:
  - urządzenie WIG-1, dla Pomorskich Zakładów Budowy Maszyn w Bydgoszczy. Zakończono w 1983 roku;
  - urządzenie WIG-2, dla Pomorskich Zakładów Budowy Maszyn w Bydgoszczy. Zakończono w 1984 roku;
  - urządzenie i technologia WIG-3, dla PONAR-REMO w Koronowie. Zakończono w 1985.
- Analiza organizacji i techniki montażu sygnałów samochodowych. Praca dla Bydgoskich Zakładów Elektrochemicznych „BELMA” w Bydgoszczy. Zakończono w 1985 roku.
- Opracowanie wybranych elementów procesu wytwarzania rdzeni z tworzywa sztucz-

nego do węży ciśnieniowych. Praca dla Bydgoskich Zakładów Przemysłu Gumowego „STOMIL”. Zrealizowana w latach 1984-1986.

- Półautomatyczna obrabiarka do obcinania uszczeltek gumowych do tłoczków hamulcowych samochodu osobowego Moskwicz (nowy model). Wyeksportowano do ZSRR na zlecenie METAEXPORTU. Zakończono w 1986 roku.
- Opracowanie konstrukcji, technologii i wykonanie jednolitych frezów ślimakowych  $m=20$  mm i  $m=24$  mm z materiałów krajowych. Praca dla Pomorskich Zakładów Budowy Maszyn w Bydgoszczy. Zakończona w 1987 roku.
- Badania elementów przetwornika hydroakustycznego do systemu „FLAMING B”. Praca dla Gdańskich Zakładów Elektronicznych „TELKOM-TELMOR” w latach 1987-1989.
- Skrawanie wyływki „in statu nascendi” przy zgrzewaniu tarciovym czół prętów p.t.: Opracowanie i wykonanie urządzeń do usuwania wyływki przy zgrzewaniu tarciovym wiertel krętych dla Huty Baildon, dla wszystkich wiertel średnich rozmiarów produkowanych w Hucie Baildon. Wdrożono od 1988 roku.
- Racjonalizacja metod obróbki kół zębatych o dużych modułach w Pomorskich Zakładach Budowy Maszyn w Bydgoszczy:
  - obróbka kół zębatych frezami o wymiennych ostrzach. Zakończona w 1987 roku,
  - obróbka kół zębatych frezami o wymiennych wkładkach i ostrzach. Zakończona w 1989 roku,
  - obróbka kół zębatych frezami trzpieniowymi o ostrzach prostokreślnych. Zakończono w 1990 roku.
- Modernizacja obróbki powierzchni kształtowych w Pomorskich Zakładach Budowy Maszyn w Bydgoszczy. Wdrożono w 1991 roku.
- Ostrzenie narzędzi skrawających ściernicami z materiałów supertwardych. Praca dla Pomorskich Zakładów Budowy Maszyn w Bydgoszczy w 1993.
- Badania kształtu mniej iskrzących żeliwnych wstawek klocków hamulcowych do pojazdów szynowych. Praca dla Zakładów Naprawczych Taboru Kolejowego w Bydgoszczy. Zakończono w 1994 roku.

### 3. PRACE AKTUALNIE PROWADZONE

Biorąc pod uwagę:

- różnorodność tematyczną dydaktyki wynikającą z planu studiów i obserwowanego rozwoju techniki;
- zaawansowanie naukowe różnych zespołów badawczych KTM i możliwość formułowania przez nich własnych sądów;
- możliwość realizacji badań na współczesnym poziomie techniki;
- możliwość uzyskania satysfakcji przez realizatorów badań;

zagadnieniem trudnym było wyłonienie ogólnej tematyki wiodącej w badaniach KTM.

W wyniku szeregu dyskusji wykreowano niżej podane problemy badawcze zawierające szereg zagadnień i zadań, co uwzględniono w badaniach statutowych i własnych KTM. Badania te uzupełniane są grantami autorskimi finansowanymi przez Komitet Badań Naukowych.

**a. Badania własne KTM** obejmuje ogólny tytuł: Badania i analizy warunków kształtowania przedmiotów. Dzieli się on na zagadnienia związane zarówno ze specyfiką prowadzonej dydaktyki, jak i zainteresowaniami naukowymi nauczycieli na:

- kształtowanie właściwości materiałów i pomiar cech charakteryzujących te właściwości,
  - badanie przetwarzalności tworzyw kompozytowych o specjalnych właściwościach,
  - badanie zależności pomiędzy wielkością ziarna nadawy a efektami rozdrobnienia materiału kruchego w młynie spiralno-strumieniowym,
- procesy kształtowania powierzchni i pomiary parametrów oraz cech towarzyszących kształtowaniu,
  - badanie procesu skrawania z jednocześnie zmiennymi, dużymi kątami natarcia i pochylenia głównej krawędzi skrawającej,
  - analiza emisji akustycznej podczas toczenia ostrzem ze zmienną geometrią,
- zarządzanie procesem kształtowania przedmiotów,
  - opracowanie metody sterowania jakością, opartej na idei stosowanych już kart kontrolnych, wolnych od założenia o normalności rozkładu,
  - implementacja systemów eksperckich i sieci neuronowych do problemów diagnozowania i zarządzania procesem kształtowania przedmiotów,
  - implementacja aplikacji z wykorzystaniem metodyki CASE.

**b. Badania statutowe KTM** prowadzone są pod ogólnym tytułem: Badanie granicznych warunków powstawania ubytków materiału podczas skrawania. Dzieli się one na następujące zagadnienia i zadania:

- badanie zagadnień ogólnych i granicznych warunków powstawania ubytku materiału;
- badanie zakresów zastosowań poszczególnych sposobów kształtowania powierzchni,
  - narzędzia o dużej elastyczności geometryczno-kinematycznej,
  - kształtowanie warstwy wierzchniej nagniataniem naporowym,
  - obróbka powierzchni walcowych frezowaniem,
- badanie właściwości przetwórczych tworzyw sztucznych o zróżnicowanych gęstościach.

### **c. Granty Komitetu Badań Naukowych:**

1. Dr inż. Ryszard Konieczka:

*Badanie procesu rozdrabniania odpadów gumy cięciem hiperboloidalnym.*

Nr umowy: PB-57/7/91/1, na 527 mln zł

od X 1991 r. do 1994 r.

2. Dr hab.inż. Hubert Latoś:

*Rozwój podstaw teoretycznych i doświadczalnych narzędzi skrawających, o dużej elastyczności geometryczno-kinematycznej.*

Nr umowy: PB 0872/S1/92/03, na 600 mln zł,

od 1992 do 1994 r

3. Dr inż. Ryszard Konieczka:

*Aglomerowanie cykliczne butelek z PET, PVC i PE.*

Nr umowy: PB-0588/S2/93/05, na 920 mln zł,  
od 1993 r. do 1996 r.

Przedstawione badania oraz kontynuacja zagadnień związanych z podanymi gran-  
tami Komitetu Badań Naukowych określają aktualnie realizowane kierunki dalszych  
prac.

## SPIS PRAC DYSERTACYJNYCH W KTM

### Prace habilitacyjne

**Hubert Latoś:**

*Zastosowanie ostrzy o prostoliniowych krawędziach do obróbki powierzchni  
kształtowych.*

Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej, 1978

### Doktoraty

**Zbigniew Dąbek:**

*Metoda obliczania efektu ekonomicznego rozszerzania tolerancji w przemyśle ma-  
szynowym.*

Wydział Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej, 1971.

Promotor: Zygmunt Zbichorski

**Hubert Latoś:**

*Badanie wpływu przywierania materiału obrabianego do ostrza narzędzia skra-  
wającego na jakość technologiczną powierzchni przedmiotów ze stopu aluminium.*  
Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej, 1972.

Promotor: Jan Harasymowicz

**Tadeusz Grzesik:**

*Optymalizacja niektórych warunków skrawania przy toczeniu wstępnym i kształ-  
tującym odlewów z wysokomanganowego staliwa austenitycznego.*

Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, 1972.

Promotor: Bronisław Kiepuszewski

**Maciej M. Kozłowski:**

*Wpływ parametrów obróbki i geometrii rolki na wielkość siły poosiowej i mo-  
mentu obrotowego przy dogniataniu wygładzającym otworów w stali konstrukcyjnej  
węglowej wyższej jakości 45, głowicą naporową sześciorolkową.*

Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, 1973.

Promotor: Mieczysław Feld

**Teresa Tomaszewska:**

*Wpływ stopnia i kierunku namagnesowania na trwałość ostrza noża tokarskiego ze stali SW18.*

Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, 1973.

Promotor: Mieczysław Feld

**Mieczysław Żebrowski:**

*Wpływ struktury oraz wielkości ziarna ściernic wielkoporowych przy obróbce wykańczającej szlifowaniem aluminium na chropowatość powierzchni.*

Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, 1976.

Promotor: Mieczysław Feld

**Wojciech Kałużny:**

*Badanie wpływu wybranych czynników na mikrogeometrię i na dokładność wymiarowo-kształtową rowków wcinanych w stopach aluminium.*

Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, 1976.

Promotor: Mieczysław Feld

**Joachim Zimniak:**

*Badania niektórych czynników technologiczno-konstrukcyjnych na wytrzymałość na oddzieranie połączeń klejowych.*

Wydział Maszyn Roboczych i Pojazdów Politechniki Poznańskiej, 1977.

Promotor: Robert Sikora

**Witold Rozwadowski:**

*Badanie wybranych zjawisk występujących przy rozwiercaniu wykańczającym stopów aluminium.*

Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, 1980.

Promotor: Mieczysław Feld

**Ireneusz Bielski:**

*Badanie procesu skrawania materiału z umocnioną nagniataniem warstwą skrawaną.*

Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, 1982.

Promotor: Hubert Latoś

**Ryszard Konieczka:**

*Wpływ hiperboloidalnego ustawienia krawędzi tnących noża na niektóre parametry pracy młyna do tworzyw sztucznych.*

Wydział Mechaniczny-Technologiczny Politechniki Gdańskiej, 1982.

Promotor: Tadeusz Burkiewicz

**Tadeusz Leppert:**

*Próba zastosowania węglików spiekanych do odcinania na automacie rewolwerym ATA 40.*

Wydział Mechaniczny-Technologiczny Politechniki Gdańskiej, 1982.

Promotor: Mieczysław Feld

**Anna Ławrynowicz:**

*Efekty postępu technicznego i organizacyjnego w przedsiębiorstwach przemysłowych.*

Akademia Ekonomiczna w Poznaniu. Wydział Zarządzania, 1983.

Promotor: Kazimierz Zimniewicz

**Tadeusz Mikołajczyk:**

*Badanie procesu skośnego skrawania ostrzami z jednościenną powierzchnią natarcia*

Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, 1984.

Promotor: Hubert Latoś

**Bogusław Madera:**

*Wpływ wybranych czynników na powstawanie nalepu przy toczeniu stopu Al-Si.*

Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej, 1985.

Promotor: Hubert Latoś

**Wojciech Śliwa:**

*Badania wpływu niektórych czynników na właściwości połączeń klejowych elektroprowadzących.*

Wydział Mechaniczny-Technologiczny Politechniki Gdańskiej, 1985.

Promotor: Robert Sikora

**Jerzy Tomaszewski:**

*Badania wpływu elementów konstrukcyjnych układu uplastyczniającego wylaczaerek na efektywność wytłaczania tworzyw sztucznych.*

Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, 1989.

Promotor: Robert Sikora

**Zdzisław Jaskulski:**

*Metodyka oceny i doboru systemów magazynowych.*

Wydział Technologiczny Akademii Rolniczej w Poznaniu, 1989.

Promotor: Zdzisław Jakubowski

**Franciszek Bromberek:**

*Badanie właściwości skrawanych narzędzi kształtowych z wykorzystaniem metod wibroakustycznych.*

Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, 1993.

Promotor: Hubert Latoś

**Mirosław Dalak:**

*Badania procesu formowania wióra ostrzem o zmiennej geometrii wzdłuż krawędzi skrawającej.*

Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, 1993.

Promotor: Hubert Latoś



**Bożena Wilczyńska:**

*Badania procesu rozdrabniania materiału kruchego w młynie spiralno-strumieniowym.*

Wydział Mechaniczny Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, 1995.

Promotor: Józef Flizikowski

Eugeniusz Ranatowski

## TRANSMISJA CECH STRUKTURALNYCH I MECHANICZNYCH W PROCESIE SPAJANIA METALI

W części wstępnej pracy omówiono ogólne zasady modelowania procesów termicznych w obrębie powstającego złącza spawanego. Uwzględniając fundamentalne zasady fizyki i metalurgii procesu spawania, scharakteryzowano główne elementy procesu, bazując na modelu konwekcyjnym transportu masy i ciepła w spoinie. Ilościowa ocena przemian strukturalnych w spoinie i strefie wpływu ciepła związana jest bezpośrednio ze zrozumieniem morfologii przemian strukturalnych, począwszy od procesu krystalizacji aż do temperatury otoczenia. W pracy określono również relacje pomiędzy stanem mikrostruktury a własnościami mechanicznymi.

### 1. WSTĘP

Bardzo istotnym elementem współczesnych działań inżynierskich jest szybkie i efektywne działanie na etapie projektowania, konstruowania oraz przygotowania technologicznego i wdrożenia wyrobów. Wysoka jakość działań inżynierskich ma decydujący wpływ na koszty wytwarzania, nowoczesność i jakość wyrobów, i w pełnym zakresie dotyczy również konstrukcji spajanych. Problemowi temu nadaje się w krajach wysoko-uzupełnionych priorytetowe znaczenie, którego efektem jest szereg niekonwencjonalnych działań w zakresie organizacji przygotowania produkcji i jakości działań inżynierskich, określonych w ramach tzw. inżynierii jednoczesnej [5]. Jednym ze środków umożliwiających realizację tak postawionych zadań jest konieczność odejścia od bardzo powierzchownych opracowań technologicznych i oparcie ich o możliwie szerokie ustalenia, wynikające ze znajomości fizyki procesów technologicznych. W zakresie stosowanych metod spajania szczególnie trudne do ustalenia są relacje pomiędzy lokalnymi zmianami strukturalnymi a własnościami mechanicznymi połączeń powstające w czasie procesu spawania i zgrzewania. Wynika to z synergicznego oddziaływania równoczesnego szeregu czynników o charakterze metalurgicznym w spoinie, przepływu ciepła w strefie wpływu ciepła (SWC), deformacji w warunkach istniejących więzów mechanicznych itp. Wobec powyższego rozpatrzenie powyższych zjawisk wymaga przyjęcia pewnych uproszczeń i określenia modeli rozpatrywanych układów o znaczeniu praktycznym.

### 2. CHARAKTERYSTYKA PODSTAWOWYCH USTALEŃ W ZAKRESIE MODELOWANIA POŁĄCZEŃ SPAJANYCH

Zasadniczo gęstość energii  $q(r)$  w procesach spajania opartych na energii dostarczonej na sposób ciepła powinna wynosić [2]:

$$10^3 \leq q(r) \leq 10^6 \quad [\text{W/cm}^2] \quad (1)$$

Powyższa ilość energii jest wystarczająca do lokalnego stopienia materiałów łączonych oraz ewentualnych materiałów dodatkowych. Poniżej dolnej granicy  $10^3 \text{ W/cm}^2$  może zaistnieć sytuacja szybszego odprowadzenia energii poprzez przewodzenie od wielkości doprowadzonej energii, co uniemożliwi lokalne stopienie materiału i powstanie połączenia. Powyżej wartości  $10^6 \text{ W/cm}^2$  ilość dostarczonej energii przewyższa zdolność materiału do lokalnego skonsumowania poprzez lokalne stopienie i odprowadzenia ciepła poprzez przewodzenie, a lokalny wzrost temperatury prowadzi nie do stopienia, lecz parowania materiału i tworzenia zamiast spoiny lokalnego kanału. Górna granica gęstości energii dotyczy aplikacji wiązki elektronów i lasera jako spawalniczych źródeł ciepła, a sam proces tworzenia spoiny podlega innemu mechanizmowi: parowaniu, kondensacji par metali i powstaniu cieczy wypełniającej kanał oraz krystalizacji przy dynamicznym charakterze tego procesu, wynikającym z relatywnego ruchu źródła ciepła i materiału spawanego.

Proces tworzenia się spoiny związany jest więc ze zmianą energii wewnętrznej. Przenoszonymi wielkościami ekstensywnymi w procesie modelowania tworzenia się spoiny są energia wewnętrzna  $pU$  i energia kinetyczna  $\rho v^2$  ruchu makroskopowego cieczy. Bilans energii dla obszaru jeziorka spoiny - ograniczonego powierzchnią  $A$  i posiadającego objętość  $V$  - ma postać [6]:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \left( \frac{v^2}{2} + U \right) dV = \int_V \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{f}) dV + \int_V \rho \phi dV + \int_A \mathbf{v} (\mathbf{T} \cdot \mathbf{n}) dA + \int_A p_s dA \quad (2)$$

gdzie:

- $U$  - gęstość masowej energii wewnętrznej będącej sumą energii ruchu cieplnego i sumą energii wiązań;
- $\mathbf{f}$  - gęstość masowa sił zewnętrznych  $\mathbf{f}_e$  i wzajemnego oddziaływania cząstek  $\mathbf{f}_m$  ( $\mathbf{f} = \mathbf{f}_e + \mathbf{f}_m$ );
- $\phi$  - pole skalarne określające gęstość masową strumienia energii;
- $\mathbf{T}$  - tensor naprężeń;
- $\mathbf{n}$  - jednostkowy wektor normalny do powierzchni  $A$ ;
- $p_s$  - gęstość strumienia energii przepływającej przez powierzchnię ograniczającą;
- $t$  - czas.

Pierwszy człon prawej strony równania (2) oznacza pracę sił objętościowych podczas makroskopowego ruchu ośrodka. W praktyce oznacza to wytwarzanie energii kinetycznej kosztem energii grawitacji i energii elektromagnetycznej.

Drugi człon  $\int_V \rho \phi dV$  wyraża nieodwracalne wytwarzanie energii wewnętrznej kosztem energii zamienionej na ciepło Joule'a oraz odwracalną przemianę kosztem energii związanej ze zjawiskami elektromagnetycznymi i termoelektrycznymi.

Wyrażenie  $\int_A v(T \cdot n) dA$  oznacza pracę sił powierzchniowych, czyli niekonwekcyjną wymianę energii kinetycznej przy makroskopowym ruchu ośrodka, wywołaną istnieniem pola naprężeń mechanicznych.

Ostatni człon  $\int_A p_s \cdot dA$  oznacza niekonwekcyjną wymianę energii wewnętrznej poprzez przewodzenie i promieniowanie ciepła oraz dyfuzję.

Równanie transportu energii (2) stanowi więc, iż szybkość zmiany energii wewnętrznej i kinetycznej w stosunku do nieruchomego układu odniesienia są równe sumie pracy wykonanej w jednostce czasu przez działające siły powierzchniowe i masowe oraz jednostkowy strumień energii doptywający do ciała.

Znajomość własności dynamicznych procesu tworzenia spoiny i wiążących parametry ekstensywne ze zmianami parametrów intensywnych, takich jak temperatura  $T$ , gęstość  $\rho$ , ciepło właściwe  $c$ , współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$ , entalpia właściwa  $H$  itp., wskazują na możliwości aktywnego modelowania i sterowania procesu spawania. I tak równanie charakteryzujące stan energetyczny spoiny przy działającym źródle ciepła  $S_H(r)$  dla dwuwymiarowego ośrodka ma postać [10]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial r} + v \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \left( \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) + S_H(r) \quad (3)$$

gdzie:

- $H$  - entalpia;
- $u, v$  - promieniowa i osiowa prędkość;
- $c_p$  - ciepło właściwe przy  $p = \text{const}$ ;
- $\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła;
- $\rho$  - gęstość.

Ponadto energia absorbowana od spawalniczego źródła ciepła wynosi:

$$S_H(r) = \frac{\eta \cdot q(r)}{\rho \cdot Y_d}, \quad (4)$$

gdzie:

- $Y_d$  - głębokość absorpcji,
- $q(r)$  - gęstość strumienia energii źródła ciepła,
- $\eta$  - sprawność.

Wobec powyższego, uwzględniając związek pomiędzy entalpią i temperaturą:

$$H(T) = \int_{T_0}^{T_p} c_p(T) dT + \psi H_1 \quad (5)$$

$$0 \leq \psi \leq 1$$

gdzie:

- $\psi$  - udział cieczy w dwufazowej strefie;
- $H_1$  - entalpia topnienia stopiwa;

równania (3), (4), (5) mogą stanowić podstawę do oceny rozkładu temperatury  $T$  oraz innych parametrów w obrębie powstającej spoiny i obejmującym fazę ciekłą i stałą.

Powyższe stwierdzenia są bardzo zgodne ze spostrzeżeniem Fouriera, który stwierdził, że wszystkie zjawiska mające związek z ciepłem zależą od bardzo niewielu ogólnych prostych faktów w taki sposób, że każde zagadnienie tego rodzaju można sformułować w języku analizy matematycznej. Równanie (3) jest prostym potwierdzeniem powyższego faktu, określając model matematyczny analizowanego procesu. Uogólnione rozwiązanie problemu przepływu ciepła określone równaniem (3) można przedstawić w postaci prostej wielkości - liczby Fourier'a (LF) [2]:

$$LF = \frac{x}{\sqrt{\alpha \cdot t}} \quad ; \quad \alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (6)$$

gdzie:

- $x$  - odległość transportu ciepła;
- $\alpha$  - dyfuzyjność cieplna.

Wartość  $LF \sim 1$  oznacza złożony przepływ ciepła i konieczność przeprowadzenia szczegółowej analizy rozwiązania równania (3). Ocena termicznych skutków procesu spajania pozwala w dalszej kolejności ocenić stan struktury w spoinie i strefie wpływu ciepła (SWC).

### 3. OCENA TERMICZNYCH SKUTKÓW PROCESU SPAJANIA - STAN STRUKTURY W SPOINIE I SWC

Proces spawania związany jest z tworzeniem się jeziorka spawalniczego bezpośrednio poniżej źródła ciepła. Kształt jeziorka uwarunkowany jest przez intensywność przepływu ciepła i metalu w jeziorku z jednoczesnym topieniem metalu przed i krystalizacją za źródłem ciepła. Przy przyjęciu modelu punktowego źródła ciepła geometrię jeziorka spawalniczego ocenić możemy w oparciu o bezwymiarowy parametr  $n_3$  [4]:

$$n_3 = \frac{q_0 \cdot v}{4\pi\alpha^2(H_m - H_0)} \quad (7)$$

gdzie:

- $q_0$  - moc źródła ciepła (łuku), J/s;
- $\alpha$  - dyfuzyjność cieplna;
- $H_m - H_0$  - zawartość ciepła na jednostkę objętości w momencie topnienia;
- $v$  - prędkość źródła ciepła.

Duża wartość  $n_3$  wskazuje na wydłużony charakter izotermy ograniczającej jeziorko oraz izoterm charakteryzujących rozkład temperatury w strefie wpływu ciepła (SWC) i w praktyce odpowiada działaniu szybkoobrotowych źródeł ciepła dużej mocy. Mała wartość  $n_3$  związana jest z eliptycznym kształtem izoterm o małej różnicy osi, co jest wynikiem małej mocy źródła ciepła oraz jego prędkości i prowadzi do zmiany formy przepływu ciepła.

Ponadto, jak wynika z zależności (7), wartość  $n_3$  w istotny sposób zależy od własności cieplnych spajanych metali, wyrażonych przez  $\alpha$  i  $H_m - H_0$ . Izotermi są

zwykle wydłużone dla małej wartości  $\alpha$  (stale austenityczne) lub o eliptycznym bądź sferycznym kształcie przy większej wartości  $\alpha$  (Al i jego stopy).

Niezależnie od parametrów występujących we wzorze (3), geometria jeziorka spawalniczego zależy również od konwekcyjnego transportu ciepła, opartego na ruchu płynnego metalu, w wyniku działania:

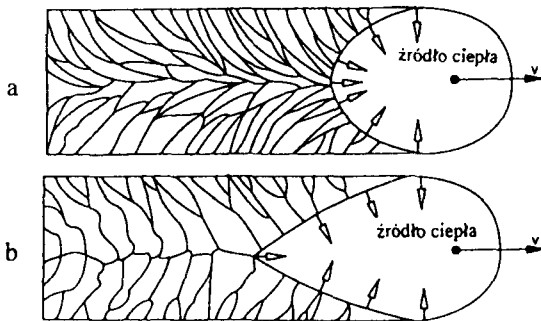
- sił wyporu hydrostatycznego, spowodowanego lokalną zmianą gęstości oraz częściowo przez krzywiznę jeziorka, a przy wyższych parametrach prądowych zaznacza się również wpływ ciśnienia łuku,
- asymetrycznego pola magnetycznego,
- gradientu napięcia powierzchniowego.

Określone powyżej czynniki wpływają również na termiczne warunki procesu krystalizacji i rodzaj struktury spoiny oraz strefy wpływu ciepła.

Dla większości stali konstrukcyjnych początek procesu krystalizacji ma charakter wzrostu epitaksjalnego  $\delta$  - ferrytu od powierzchni granicznej ciec / faza stała [1]. Dla stali niskostopowych produktami pierwotnej krystalizacji może być również  $\delta$  - ferryt ( $\delta_{Fe}$ ), austenit  $\gamma_{Fe}$  bądź mieszanina  $\delta_{Fe}$  i  $\gamma_{Fe}$  [5].

Wysoki gradient temperatury na granicy ciec / faza stała powoduje, że proces krystalizacji  $\delta$  - ziaren posiada kolumnową postać. Większość osi  $\delta$  - ziarna jest zgodna z kierunkiem przepływu ciepła.

Dalszy proces chłodzenia spoiny prowadzi do zarodkowania i wzrostu austenitu alotriomorficznego, głównie w obszarze granic ziaren w kierunku granic  $\delta_{Fe} / \delta_{Fe}$  oraz przypuszczalnie także w kierunku gradientu temperatury, co ostatecznie prowadzi do powstania ziaren austenitu kolumnowego, podobnego w kształcie do oryginalnej struktury  $\delta_{Fe}$ . Należy jednakże stwierdzić, iż w przypadku ruchomych źródeł ciepła zmienia się kształt izoterm  $T_{iz}$  wraz z upływem czasu  $t$ , co niewątpliwie prowadzi również do pewnej zmiany kierunku przepływu ciepła, a w konsekwencji i kierunku wzrostu ziaren austenitu alotriomorficznego, do pewnego stopnia różnego od kierunku wzrostu ziaren  $\delta_{Fe}$ . Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie kolumnową strukturę spoiny otrzymaną dla różnych warunków spawania - małej i dużej wartości  $n_3$ .



Rys.1. Kształt kolumnowej struktury spoiny dla: a - małej wartości  $n_3$ , b - dużej wartości  $n_3$

Kształt i wielkość ziaren austenitu ma decydujący wpływ na końcową mikrostrukturę spoiny. Obecny stan wiedzy nie pozwala przewidywać w sposób jednoznaczny wielkości ziaren austenitu. Empiryczna charakterystyka procesu wzrostu ziaren austenitu może być dokonana w oparciu o równanie [1]:

$$G_s^2 = G_{SO}^2 + K \cdot t \exp\left(-\frac{Q_i}{RT}\right), \quad (8)$$

gdzie:

- R - stała gazowa, 8,31 J/K;
- $G_s$  - wymiar ziarna austenitu,  $\mu\text{m}$ ;
- $G_{SO}$  - początkowy wymiar ziarna austenitu,  $\mu\text{m}$ ;
- K - empirycznie wyznaczona stała;
- t - czas, s;
- $Q_i$  - energia aktywacji, J;
- T - temperatura, K.

Mikrostruktura końcowa spoiny otrzymana w wyniku chłodzenia w sposób ciągły od fazy ciekłej do temperatury otoczenia tworzy strukturę pierwotną. Ponowne podgrzanie struktury pierwotnej powyżej  $T_{A3}$  - na przykład w przypadku spawania wielowarstwowego - prowadzi do powstania struktury wtórnej. Na rysunku 2 określono sprzężenie zwrotne pomiędzy głównymi czynnikami procesu spajania, wyrażonymi poprzez cieplne i mechaniczne oddziaływanie na rodzaj powstałej struktury.

Z praktycznego punktu widzenia istotnym problemem jest więc umiejętność prognozowania odnośnie rodzaju powstałej struktury. Proces ten może zostać rozpatrzony w oparciu o dekompozycję austenitu zgodnie z zależnością [4]:

$$\frac{dX_i}{dt} = F_T F_X F_G F_C, \quad (9)$$

gdzie:

- $X_i$  - część fazy
  - $i = \alpha$  (ferryt),
  - $i = P$  (perlit),
  - $i = B$  (bainit),
  - $i = M$  (martenzyt),

- $F_T$  - parametr uwzględniający wpływ temperatury T;
- $F_X$  - parametr określający wpływ części formowanej fazy, i;
- $F_G$  - parametr określający wpływ wielkości ziaren austenitu;
- $F_C$  - parametr określający wpływ koncentracji węgla.

Dyfuzyjny rozkład austenitu można również określić w formie związku [1]:

$$\frac{dX_i}{dt} = \alpha(G) \cdot D \cdot \Delta T^n \cdot X_i^n \cdot (1 - X_i)^p, \quad (10)$$

gdzie:

$$n = \frac{2}{3}(1 - X_i); \quad p = \frac{2}{3} X_i;$$

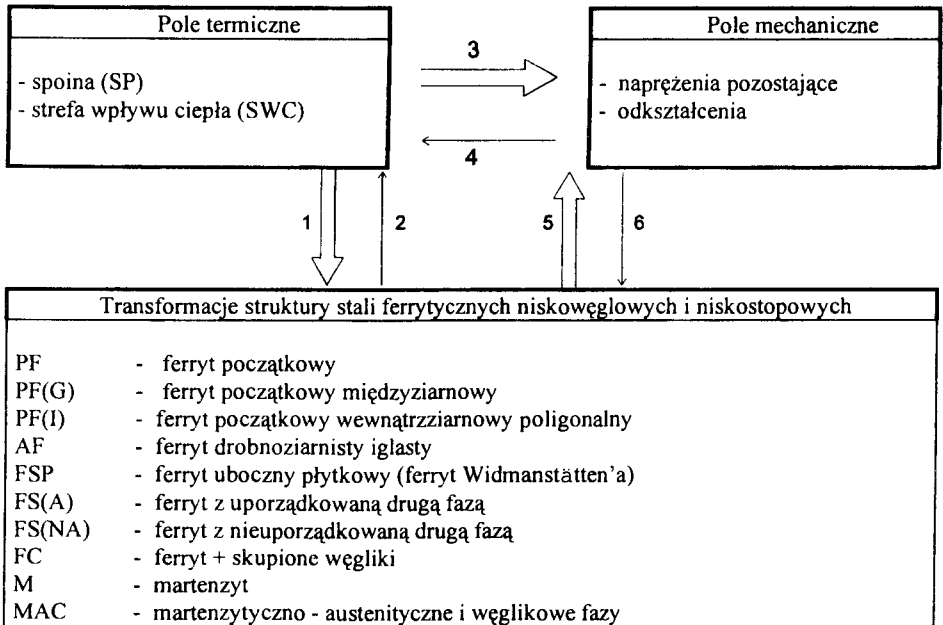
$$\alpha(G) = 2^{(G-1)/2};$$

G - wielkość ziarna;

D - współczynnik dyfuzji;

T - temperatura;

X<sub>i</sub> - udział objętościowy dla i = α, P, B, M.



Rys. 2. Schemat synergicznego oddziaływania pomiędzy polem cieplnym i mechanicznym a mikrostrukturą spoiny i strefy wpływu ciepła;

1 - termiczne oddziaływanie na rodzaj mikrostruktury;

2 - oddziaływanie utajonego ciepła krystalizacji oraz innych cieplnych właściwości układu na pole termiczne;

3 - wpływ rozszerzalności cieplnej na stan naprężeń i odkształceń;

4 - ciepło generowane jako skutek pracy mechanicznej;

5 - wpływ transformacji mikrostruktury na właściwości mechaniczne poprzez zmiany objętościowe i odkształcenia plastyczne;

6 - kinetyka transformacji uzależniona od stanu naprężeń.

Pomimo znacznego postępu w zrozumieniu morfologii przemian strukturalnych, do tej pory brak jest jednoznacznej i zwartej teorii ujmującej na przykład morfologię przemian ferrytu, bainitu itp. Stanowi to niewątpliwie również pewną barierę w rozwoju technologii spajania. Sytuacja ta w zasadniczy sposób rzutuje na możliwość oceny właściwości mechanicznych i odporności na pękanie połączeń spajanych.



## 4. FORMA STRUKTURY A WŁASNOŚCI MECHANICZNE

Z danych zawartych w poprzednim punkcie wynika, że o własnościach spoiny decydują zarówno warunki krystalizacji, jak i przemiany, i rozpadu austenitu. Stosowana zwykle procedura wiążąca bezpośrednio wytrzymałość ze składem chemicznym spoiny jest więc niewłaściwa. W związku z powyższym możemy uznać, iż wartość granicy plastyczności dla połączeń spajanych spełnia następujący związek:

$$R_e = R_c(\sigma_o, M_e, d^{-n}, l^{-m}), \quad (11)$$

gdzie:

- $\sigma_o$  - naprężenie tarcia dyslokacji, zależne od temperatury, szybkości odkształcenia oraz wad budowy krystalicznej;
- $M_e$  - wpływ dodatków stopowych w roztworze  $\alpha$ ;
- $d$  - wpływ wielkości ziarna;
- $l$  - odległość dyspersji wydzieleni;
- $m, n$  - stałe, zależne od rodzaju materiału.

Zgodnie z równaniem Hall'a-Petch'a, dla metali polikrystalicznych, wartość granicy plastyczności wynosi:

$$R_e = \sigma_o + k \cdot d^{-\frac{1}{2}} + \Delta\sigma_o \log \frac{1}{N_o d^3}, \quad (12)$$

gdzie:

- $N_o$  - wyjściowa liczba aktywnych ziaren w jednostce objętości;
- $k$  - stała, określająca siłę zablokowania dyslokacji.

Zależność powyższa ustalona pierwotnie dla stali niskowęglowych, znalazła również swoje potwierdzenie dla metali i stopów o sieci A2, a także A1 i A3. W równaniu tym  $\Delta\sigma_o$  oznacza przyrost naprężenia tarcia spowodowany wzrostem szybkości odkształcenia.

Problem oceny granicy plastyczności w przypadku spawania wielowarstwowego jest bardziej złożony. Dla wyżej wymienionej sytuacji wartość  $R_e$  proponuje się ocenić jako [1]:

$$R_e = V_p \cdot R_e^p + V_s \cdot R_e^s, \quad (13)$$

gdzie:

- $R_e^p$  - granica plastyczności struktury pierwotnej;
- $R_e^s$  - granice plastyczności obszaru, w którym nastąpiła zmiana budowy struktury pierwotnej w wyniku reaustenitizacji bądź odpuszczania;
- $V_p$  - objętość struktury pierwotnej;
- $V_s = 1 - V_p$  - objętość struktury reaustenitizowanej bądź odpuszczonej.

Zależności (11), (12), (13) wyrażają relacje ilościowe pomiędzy granicą plastyczności  $R_e$  złącza spawanego a cechami mikrostruktury.

Ten sam problem rozpatrywany w skali makroskopowej i uwzględniający zróżnicowaną budowę połączenia spajanego, w którym makroskopowe własności mikrostruktury wyrażone są poprzez rozkład twardości bądź odpowiadające cechy mechaniczne, np.  $R_e$  - rys.3, prowadzi do następujących ustaleń [7]:

$$R_e^{zl} = R_e^{un} \cdot K_W^{un}, \quad (14)$$

$$R_e^{zl} = R_e^{ov} \cdot K_W^{ov}, \quad (15)$$

gdzie:

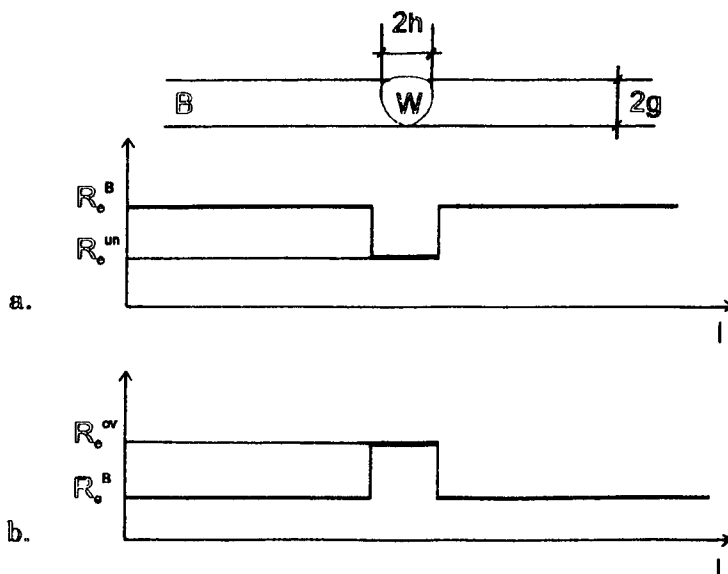
$R_e^{zl}$  - granice plastyczności złącza;

$R_e^{un}$  - granice plastyczności strefy złącza o obniżonej wartości w stosunku do materiału rodzimego  $R_e^B$  ( $R_e^B > R_e^{un}$ );

$R_e^{ov}$  - granice plastyczności strefy złącza o podwyższonej wartości w stosunku do materiału rodzimego  $R_e^B$  ( $R_e^B < R_e^{ov}$ );

$K_W^{un}$  - współczynnik umocnienia kontaktowego dla  $K_s = R_e^B / R_e^{un} > 1$ ;

$K_W^{ov}$  - współczynnik umocnienia kontaktowego dla  $K_s = R_e^B / R_e^{ov} < 1$ .



Rys.3. Charakterystyka niejednorodnego złącza spawanego: a.  $K_s = R_e^B / R_e^{un} > 1$ ,

b.  $K_s = R_e^B / R_e^{ov} < 1$

Wartość współczynnika umocnienia kontaktowego  $K_W^{un}$  lub  $K_W^{ov}$  - będąca z fizycznego punktu widzenia rezultatem oddziaływania więzów mechanicznych, które tworzą powierzchnie kontaktowe stref B i W - rys. 3 - zależy od parametrów charakteryzujących geometrię układu wyrażoną poprzez  $\kappa$  i parametrów określających wartości fizyczne układu  $q$  i  $K_s$ ,

$$K_W^{un} = f(\kappa, q, K_s^{un}). \quad (16)$$

$$K_W^{ov} = f(\kappa, q, K_s^{ov}), \quad (17)$$

gdzie:

$$\kappa = 2h / 2g;$$

$$0 \leq q < 1;$$

$$K_s^{un} = R_e^B / R_e^W > 1;$$

$$K_s^{ov} = R_e^B / R_e^W < 1;$$

Bardziej szczegółowe informacje dotyczące  $K_W^{un}$  i  $K_W^{ov}$  przedstawiono w opracowaniach [7, 8].

Określenie zmiany stanu naprężenia, jako rezultatu oddziaływania więzów mechanicznych i wyniku lokalnych zmian strukturalnych, posiada fundamentalne znaczenie do właściwej interpretacji i oceny własności mechanicznych analizowanego układu. W sposób syntetyczny, wpływ zmiany własności mechanicznych analizowanego układu, wynikający ze zmiany stanu naprężenia, możemy wyrazić poprzez  $S_p$  [9]:

$$S_p = \frac{\sigma_{ev}}{\sigma_H} \quad (18)$$

gdzie:

$$\sigma_{ev} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2};$$

$$\sigma_H = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{2(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2\sigma_x \cdot \sigma_y + 6\tau_{xy}^2};$$

$\sigma_{ev}$  - naprężenie średnie;

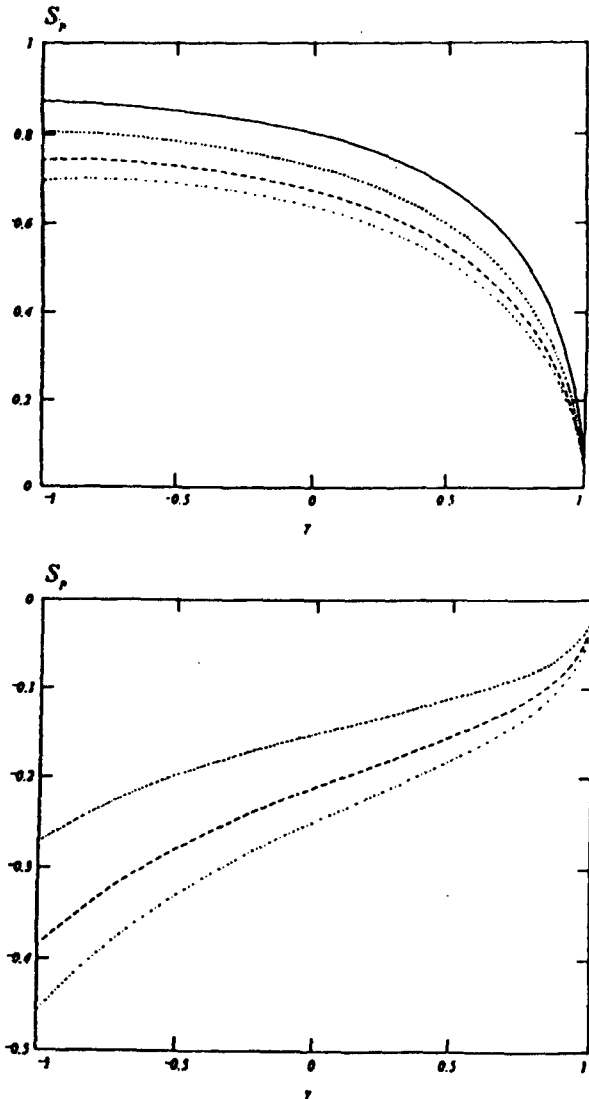
$\sigma_H$  - ekwiwalent naprężeń wg Hubera - Mises'a;

$\sigma_x$ ;  $\sigma_y$ ;  $\tau_{xy}$  - składowe naprężenia na powierzchniach kontaktowych stref B i W.

Na rysunku 4a, b przedstawiono charakterystykę parametru  $S_p$  jako funkcję parametru  $|\gamma| < 1$ , charakteryzującego wpływ kąta pochylenia strefy (W) w stosunku do działającego obciążenia zewnętrznego. Uwzględniając fakt, iż wartość  $\sigma_{ev}$  nie wpływa na wartość  $R_e^B$  i  $R_e^W$ , natomiast  $\sigma_H$  jest istotnym wskaźnikiem odkształceń plastycznych wpływającym na rzeczywistą wartość  $R_e^B$  i  $R_e^W$ , parametr  $S_p$  jest więc z fizycznego punktu widzenia miarą wpływu naprężenia na odkształcenia w obrębie

powierzchni kontaktowej stref B i W oraz wyężenia niejednorodnego pod względem cech mikrostruktury i własności mechanicznych układu - rys.3.

Rys. 4 a, b wskazuje zupełnie różne tendencje - wzrastającą dla parametru  $S_p$  dla  $K_s > 1$  i malejącą dla  $K_s < 1$  - przy tych samych cechach geometrycznych. Spowoduje to praktycznie zróżnicowanie własności mechanicznych niejednorodnego połączenia spajanego  $R_e^{zl}$ ,  $R_m^{zl}$  oraz jego odporności na pękanie - technologiczne i eksploatacyjne.



Rys. 4. Charakterystyka parametru  $S_p$  dla:

- $K_s^{un} = R_e^B / R_e^W > 1$ ,  $\kappa = 0,6; 0,7; 0,85; 0,9$ ,
- $K_s^{ov} = R_e^B / R_e^W < 1$ ,  $\kappa = 0,8; 0,9; 0,99$

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Istotny postęp, jaki dokonał się w ostatnich latach w zakresie modelowania procesów termicznych zachodzących w procesie spajania, stworzył merytoryczne podstawy do modelowania procesu krystalizacji spoin oraz przemian strukturalnych w spoinie i strefie wpływu ciepła. Główne osiągnięcia w powyższym zakresie są wynikiem ustaleń teoretyczno-doświadczalnych. Istotną przeszkodą w procesie teoretycznego modelowania struktury jest jednakże brak jednoznacznie określonej morfologii przemian podstawowych składników strukturalnych: ferrytu, bainitu oraz martenzytu. Ponadto z uwagi na synergiczne oddziaływanie czynników termicznych, strukturalnych, podobne trudności występują w jednoznacznej interpretacji własności mechanicznych połączeń spajanych. Dalszy postęp jest związany z pogłębieniem wiedzy w zakresie fizyki i metalurgii procesu spajania oraz mechaniki teoretycznej i stosowanej, co jest niewątpliwie dodatkowym utrudnieniem realizacji i osiągnięcia tak postawionych celów.

## LITERATURA

- [1] Bhadeshia H.K.D.H.: Modelling of steel welds. *Materials Science and Technology*. No 1, 1992.
- [2] Eagar T.W.: Welding and joining: Moving from art to science. *Welding Journal* No 6, 1995.
- [3] Grong  $\phi$ .: Metallurgical modelling of welding. The Institute of Materials. London. 1994.
- [4] Karlsson L. i inni: Modelling of residual stresses and distortion development. 3<sup>rd</sup> International Seminar „Numerical analysis of weld ability”. Graz - Seggau. 1995.
- [5] Myśliwiec M.: Inżynieria jednoczesna w spawalnictwie. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* nr 5/1995.
- [6] Ranatowski E.: Ocena efektywności technologicznej metody GTA w aspekcie fizyki procesu. *Zeszyty Naukowe ATR* nr 193, *Mechanika* 38, Bydgoszcz 1995.
- [7] Ranatowski E.: Influence of the constraint effect on fracture resistance of mismatched weld joints. ECF 11. France. 1996 (w druku).
- [8] Ranatowski E.: Analysis of the mechanical properties of undermatched weld joints. ESIS 17. Mechanical Engineering Publications. London 1994.
- [9] Ranatowski E.: Some remarks on stress state at interface of the heterogeneous weld joint. 2<sup>nd</sup> International Symposium „Mis - Matching of Welds. Germany. 1996.
- [10] Zacharia T. i inni: Weld pool development during GTA and laser beam welding of type 304 stainless. Part I: Theoretical Analysis. *Welding Journal* No 12. 1989.

### THE TRANSMISSION OF MICROSTRUCTURE FEATURE AND MECHANICAL PROPERTIES IN THE WELDING PROCESS OF METALS

#### SUMMARY

In the introduction of paper there form some basis of the modelling thermal welding process in formation weld joint. After taking into consideration physics and

metallurgy of welding process there are determining the main elements of welding process basis on the convectional heat and mass transfer in weld pool. The ability to estimate quantitatively the weld metal and HAZ microstructure relies on a thorough understanding of the phase transformation theory governing the changes that occur as the weld solidifies and cools to ambient temperature. Conclusions from the theoretical analysis also from some analytical dependence between microstructure and mechanical properties in weld joints.



Jerzy Sawicki

## UOGÓLNIONE RÓWNANIA RUCHU CIECZY NIEMAGNETYCZNEJ I MAGNETYCZNEJ W SZCZELINACH MIĘDZY WIRUJĄCYMI POWIERZCHNIAMI OBROTOWYMI

W pracy sformułowano uogólnione równania ruchu cieczy niemagnetycznej i magnetycznej w szczelinach między wirującymi powierzchniami obrotowymi w krzywoliniowym układzie współrzędnych  $x, \theta, y$ . Przedstawiono warunki brzegowe oraz omówiono metody rozwiązywania tych równań.

### WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

$\vec{B}$	- wektor indukcji magnetycznej
$B_x, B_\theta, B_y$	- składowe wektora indukcji magnetycznej
$\vec{E}$	- wektor natężenia pola magnetycznego
$E_x, E_\theta, E_y$	- składowe wektora pola elektrycznego
$\vec{H}$	- wektor natężenia pola magnetycznego
$H_x, H_\theta, H_y$	- składowe wektora natężenia pola magnetycznego
$2h(x)$	- grubość szczeliny
$\vec{j}$	- wektor gęstości prądu
$j_x, j_\theta, j_y$	- składowe wektora gęstości prądu
$\vec{M}$	- wektor namagnesowania
$M_x, M_\theta, M_y$	- składowe wektora namagnesowania
$p$	- ciśnienie
$p_w, p_z$	- ciśnienie, odpowiednio na wlocie i wylocie ze szczeliny
$Rem$	- magnetyczna liczba Reynoldsa
$\vec{V}$	- wektor prędkości
$v_x, v_\theta, v_y$	- składowe wektora prędkości
$\mu$	- dynamiczny współczynnik lepkości
$\mu_0$	- współczynnik przenikalności magnetycznej próżni
$\rho$	- gęstość cieczy
$\sigma$	- konduktywność cieczy
$\omega_1, \omega_2$	- prędkości kątowe powierzchni obrotowej górnej i dolnej
$R' = \frac{dR}{dx}$	



## 1. WSTĘP

Laminarne przepływy cieczy lepkiej niemagnetycznej i magnetycznej w szczelinach o zarysach krzywoliniowych w obecności pól magnetycznych i elektrycznych odgrywają coraz bardziej istotną rolę w technice [1, 2, 3].

Dlatego też, badania w tej dziedzinie mają bardzo duże znaczenie zarówno dla badań podstawowych, jak również dla licznych ważnych zastosowań praktycznych.

Badania ruchu cieczy lepkich w obecności pól magnetycznych i elektrycznych, a także badania wpływu tych pól na różne procesy fizyczne i chemiczne prowadzone są od wielu lat.

Dotyczą one w istocie problemów astro- i geofizyki takich jak: dynamika ciekłych mas we wnętrzu Ziemi, przenikanie promieniowania kosmicznego, jak również zagadnienia związane z bezpośrednią przemianą energii cieplnej w elektryczną w tzw. generatorach MHD.

Ostatnie 20 lat to gwałtowny rozwój zainteresowania dynamiką cieczy magnetycznych. Prowadzone w tej dziedzinie badania doprowadziły do pojawienia się nowej gałęzi nauki zwanej "Ferrohydrodynamiką".

Nowe możliwości, jakie stwarzają niekonwencjonalne ciecze, w tym ciecze niemagnetyczne i magnetyczne w rozwiązywaniu licznych zagadnień w zakresie tarcia, zużycia i smarowania decydują o konieczności badania zjawisk w magneto- i ferrohydrodynamicznych przepływach w wąskich szczelinach.

Niniejsza praca przedstawia uogólnione równania ruchu cieczy niemagnetycznych i magnetycznych, warunki brzegowe oraz krótką charakterystykę metod ich rozwiązywania w odniesieniu do przepływów w tzw. "cienkich warstwach" (wąskich szczelinach).

## 2. RÓWNANIA RUCHU

Dowolny ustalony i izotermiczny przepływ cieczy lepkiej niemagnetycznej i magnetycznej opisują następujące równania:

równanie ciągłości

$$\operatorname{div}(\rho \bar{V}) = 0, \quad (1)$$

równanie pędu

$$\rho (\bar{V}\bar{V})\bar{V} = -\nabla p + \mu \Delta \bar{V} + \bar{j} \times \bar{B} + \mu_o (\bar{M}\bar{V})\bar{H}. \quad (2)$$

Równania (1) i (2) wymagają do ich „zamknięcia” dodatkowych równań opisujących pole magnetyczne i elektryczne tj. równań elektrodynamiki.

Są to:  
równania Maxwella:

$$\begin{aligned}\nabla \times \bar{E} &= 0, \\ \nabla \bar{E} &= 0, \\ \nabla \times \bar{B} &= \mu_e \bar{j}, \\ \nabla \bar{B} &= 0,\end{aligned}\tag{3}$$

prawo zachowania ładunku:

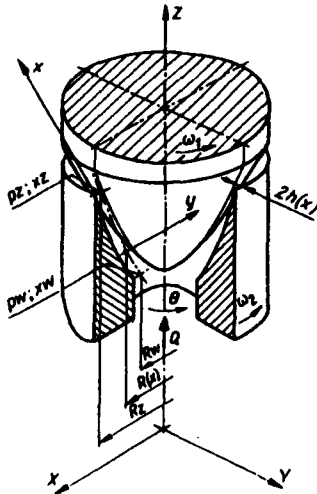
$$\nabla \bar{j} = 0,\tag{4}$$

prawo Ohma

$$\bar{j} = \sigma (\bar{E} + \bar{V} \times \bar{B})\tag{5}$$

równania magnetostatyki

$$\begin{aligned}\nabla \times \bar{H} &= 0, \\ \nabla \bar{B} &= 0, \\ \bar{B} &= \mu_o (\bar{H} + \bar{M}).\end{aligned}\tag{6}$$



Rys. 1. Obszar przepływu cieczy lepkiej

Korzystając z ogólnych formuł dla poszczególnych operacji wektorowych składających się na zależności (1)-(6) można równaniom tym nadać następującą postać w krzywoliniowym układzie współrzędnych przedstawionym na rys. 1, a mianowicie:

równanie ciągłości:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial (Rv_x)}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

równanie pędu:

$$\begin{aligned} \rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{v_\theta}{R} \frac{\partial v_x}{\partial \theta} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_\theta^2 \frac{R'}{R} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \right. \\ \left. + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v_x}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{R'}{R} \frac{\partial v_x}{\partial x} - 2 \frac{R'}{R^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{(R'R)'}{R^2} v_x \right] + \\ + j_\theta B_y - j_y B_\theta + \mu_o \left( M_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{M_\theta}{R} \frac{\partial H_x}{\partial \theta} + M_y \frac{\partial H_x}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \rho \left( v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + \frac{v_\theta}{R} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_y \frac{\partial v_\theta}{\partial y} - v_x v_\theta \frac{R'}{R} \right) = -\frac{1}{R} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial x^2} + \right. \\ \left. + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial y^2} + \frac{R'}{R} \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + 2 \frac{R'}{R} \frac{\partial v_x}{\partial \theta} - \frac{(R'R)'}{R^2} v_\theta \right] + \\ + j_y B_x - j_x B_y + \mu_o \left( M_x \frac{\partial H_\theta}{\partial x} + \frac{M_\theta}{R} \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta} + M_y \frac{\partial H_\theta}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho \left( v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{v_\theta}{R} \frac{\partial v_y}{\partial \theta} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \right. \\ \left. + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v_y}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{R'}{R} \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + j_x B_\theta - j_\theta B_x + \\ + \mu_o \left( M_x \frac{\partial H_y}{\partial x} + \frac{M_\theta}{R} \frac{\partial H_y}{\partial \theta} + M_y \frac{\partial H_y}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

równania Maxwella:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_y}{\partial \theta} - \frac{\partial (RE_\theta)}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial (RE_\theta)}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial \theta} = 0, \\ \frac{1}{R} \frac{\partial (RE_x)}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial E_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = 0, \\ \frac{1}{R} \left[ \frac{\partial B_y}{\partial \theta} - \frac{\partial (RB_\theta)}{\partial y} \right] = \mu_o j_x, \quad \frac{\partial B_x}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial x} = \mu_o j_\theta, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} \frac{\partial (RB_\theta)}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial \theta} &= \mu_o j_y, \\ \frac{1}{R} \frac{\partial (RB_x)}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial B_y}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

prawo zachowania ładunku:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial (Rj_x)}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial j_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial j_y}{\partial y} = 0, \quad (12)$$

prawo Ohma:

$$\begin{aligned} j_x &= \sigma (E_x + v_\theta B_y - v_y B_\theta), & B_x &= \mu_o H_x, \\ j_\theta &= \sigma (E_\theta + v_y B_x - v_x B_y), & B_\theta &= \mu_o H_\theta, \\ j_y &= \sigma (E_y + v_x B_\theta - v_\theta B_x), & B_y &= \mu_o H_y, \end{aligned} \quad (13)$$

równania magnetostatyki:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_y}{\partial \theta} - \frac{\partial (RB_\theta)}{\partial y} &= 0, & \frac{\partial B_x}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial (RB_\theta)}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial \theta} &= 0, \\ \frac{1}{R} \frac{\partial (RB_x)}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial B_y}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} B_x &= \mu_o (H_x + M_x), \\ B_\theta &= \mu_o (H_\theta + M_\theta), \\ B_y &= \mu_o (H_y + M_y), \end{aligned}$$

Rozwiązania równań ruchu danych w postaci związków (7)-(14) nie są możliwe do uzyskania na obecnym etapie wiedzy przy użyciu metod analitycznych.

Dokonując w równaniach (7)-(14) odpowiednich przejść asymptotycznych charakterystycznych dla przepływów w cienkich warstwach cieczy ( $h \ll R(x)$ ) [4, 5], zakładając przepływ osiowosymetryczny ( $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$ ), można sprowadzić je do układu:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial (Rv_x)}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_\theta^2 \frac{R'}{R} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} +$$

$$+ j_\theta B_y - j_y B_\theta + \mu_o \left( M_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_x}{\partial y} \right), \quad (16)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_\theta}{\partial y} - v_x v_\theta \frac{R'}{R} \right) = \mu \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial y^2} +$$

$$+ j_y B_x - j_x B_y + \mu_o \left( M_x \frac{\partial H_\theta}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_\theta}{\partial y} \right), \quad (17)$$

$$0 = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + j_x B_\theta - j_\theta B_x + \mu_o \left( M_x \frac{\partial H_y}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_y}{\partial y} \right), \quad (18)$$

Równania (15)-(18) w celu ich zamknięcia uzupełnione są równaniami (11)-(14) wiążącymi parametry pola magnetycznego i elektrycznego (przy założeniu w nich, że  $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$ ).

Dalsze uproszczenia równań (15)-(18) wynikają z założeń odnoszących się do konfiguracji pola magnetycznego i elektrycznego, wartości magnetycznej liczby Reynoldsa oraz nasycenia magnetycznego.

### 3. UPROSZCZONE FORMY RÓWNAŃ RUCHU

*Ruch cieczy lepkiej niemagnetycznej w ortogonalnym jednorodnym polu magnetycznym  $(B_y, 0, 0)$ ,  $(Rem \ll 1)$*

równanie ciągłości:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial (R v_x)}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad (19)$$

równania pędu:

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_\theta^2 \frac{R'}{R} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} - \sigma B_y^2 v_x, \quad (20)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_\theta}{\partial y} - v_x v_\theta \frac{R'}{R} \right) = \mu \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial y^2} - \sigma B_y^2 v_\theta - \sigma E_x B_o, \quad (21)$$

$$0 = \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (22)$$

prawo Ohma:

$$j_x = \sigma (E_x + v_\theta B_y), \quad B_x = \mu_o H_x, \quad (23)$$

tutaj:  $B_y = B_o = \text{const.}$

*Ruch cieczy lepkiej niemagnetycznej w niejednorodnym azymutalnym polu magnetycznym  $(0, B_\theta, 0)$ ,  $(\text{Rem} \ll 1)$*

równanie ciągłości:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial (Rv_x)}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (24)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_\theta^2 \frac{R'}{R} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} - j_y B_\theta, \quad (25)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_\theta}{\partial y} - v_x v_\theta \frac{R'}{R} \right) = \mu \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial y^2}, \quad (26)$$

$$0 = \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (27)$$

prawo Ohma:

$$j_y = \sigma (E_y + v_x B_\theta), \quad (28)$$

tutaj:  $B_\theta = \frac{R_w}{R} B_o$ .

*Ruch cieczy lepkiej magnetycznej (ferromagnetycznej) w wzdłużnym polu magnetycznym  $(H_x, 0, 0)$*

równanie ciągłości:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial (Rv_x)}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad (29)$$

równania pędu:

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_\theta^2 \frac{R'}{R} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \mu_o M_x \frac{\partial H_x}{\partial x}, \quad (30)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_\theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_\theta}{\partial y} - v_x v_\theta \frac{R'}{R} \right) = \mu \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial y^2}, \quad (31)$$

$$0 = \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (32)$$

równania magnetostatyki:

$$\begin{aligned} B_x &= \mu_0 (H_x + M_x), \\ M_x &= M_0, \quad H_x = \frac{R_z}{R} H_0. \end{aligned} \quad (33)$$

Przedstawione powyżej szczególne postacie układów równań ruchu cieczy niemagnetycznej (cieczy przewodzącej elektrycznie) i cieczy magnetycznej (tzw. cieczy ferromagnetycznej) nie wyczerpują wszystkich możliwych form tych równań.

#### 4. WARUNKI BRZEGOWE

Rozwiązania równań (15)-(18) powinny spełniać warunki brzegowe odnośnie:

- składowych prędkości:

$$\begin{aligned} v_x &= v_y = 0 \quad \text{dla} \quad y = \pm h, \\ v_\theta &= \omega_1 R(x) \quad \text{dla} \quad y = -h, \\ v_\theta &= \omega_2 R(x) \quad \text{dla} \quad y = +h, \end{aligned} \quad (34)$$

- ciśnienia:

$$\begin{aligned} p &= p_w \quad \text{dla} \quad x = x_w \\ p &= p_z \quad \text{dla} \quad x = x_z \end{aligned} \quad (35)$$

#### 5. ROZWIĄZANIA RÓWNAŃ RUCHU

Analiza równań (15)-(18) opiera się na typowych metodach uzyskiwania rozwiązań, a mianowicie na:

- metodzie opartej o tzw. "samopodobieństwo przepływów", czasem bardzo efektywnej, lecz w rozważanych przepływach (w szczelinach o krzywoliniowych zarysach) mającej nader ograniczone zastosowanie. Idea tej metody polega na wyznaczeniu transformacji zmiennych, umożliwiającej wspomniane samopodobieństwo. Transformacja ta nakłada jednak ograniczenia prowadzące do ścisłego określenia kształtów powierzchni ograniczających przepływ;
- metodzie opartej o rozwinięcia w szereg względem tzw. „małego parametru”. Metoda ta wymaga znalezienia tegoż parametru. Istnienie takiego parametru (w rozważanych równaniach tzw. zmodyfikowanej liczby Reynoldsa) pozwala na przewidywanie rozwiązań układu równań w postaci nieskończonych szeregów potęgowych względem znalezionej wartości parametru. Metoda małego parametru nie narzuca ograniczeń jak wspomniana wyżej metoda oparta na tzw. samopodobieństwie przepływów,

- metodzie uśredniania członów bezwładnościowych,
- metodzie przybliżeń całkowych.

Powyższe dwie metody pozwalają jedynie na efektywne i dość dokładne wyznaczenie rozkładów ciśnienia w badanym przepływie.

Z przytoczonych tutaj metod rozwiązywania równań analogicznych do równań warstwy przyściennej, chcąc uogólnić rozwiązania, najbardziej przydatną metodą jest metoda małego parametru.

Wykorzystując metodę "małego parametru" autor w pracach [6, 7, 8] przeprowadził w oparciu o równania (15)-(18) analizę przepływu cieczy lepkich niemagnetycznych i magnetycznych przedstawiając wyniki wpływu sił bezwładności, parametrów pola magnetycznego i elektrycznego, kształtu powierzchni ograniczających przepływ na składowe pola prędkości i ciśnienia.

## LITERATURA

- [1] Ezekiel F.D.: Ferrolubricants. New Application, Mechanical Engineering, 4, 1975.
- [2] Moscovitz R.: Designing with ferrofluids, Mechanical Engineering, 2, 1979.
- [3] Sutton C.W., Sherman A.: Engineering magnetohydrodynamics, Mc.Graw-Hill, New York 1969.
- [4] Walicki E., Sawicki J., Ziejewski M.: Inertia effect in magnetic throughflow of viscous fluid in a slot between fixed surfaces of revolution, Mec. Appl., 23,6,1978.
- [5] Wierzcholski K.: Analysis of the solutions of equations describing a non newtonian ferrofluid flow in the deformable gap of journal bearing in magnetic field, ZEM, 2, (42), 1980.
- [6] Sawicki J.: Laminarny magnetohydrodynamiczny przepływ cieczy lepkiej w szczelini między krzywoliniowymi wirującymi powierzchniami obrotowymi, Rozprawy Inżynierskie 3-4, 38, 1990.
- [7] Sawicki J.: Influence of inertial forces on the magnetic fluid flow in a clearance between curvilinear surfaces of revolution, Mechanika Teoretyczna i Stosowana, 4, 32, 1994.
- [8] Sawicki J.: Magnetohydrodynamic flow of viscous fluid in a slot between curvilinear surfaces of revolution, Rozprawy Inżynierskie, 1, 1996.

## GENERALIZED EQUATIONS OF NON-MAGNETIC AND MAGNETIC FLUID IN THE SLOT BETWEEN CURVILINEAR SURFACES OF REVOLUTION

### SUMMARY

In the work there have been formed generalized equations of non-magnetic and magnetic fluid in the slots between surfaces of revolution in the curvilinear coordinate system  $x, \theta, y$ , boundary layer and there have been discussed methods of solving the above equations.





Bronisław Siołkowski

## MINIMALIZACJA DRGAŃ MECHANICZNYCH I HAŁASU

W pracy przedstawiono przegląd najważniejszych prac promocyjnych i wdrożeniowych prowadzonych przez pracowników Katedry Mechaniki Stosowanej w ostatnich latach.

### 1. WSTĘP

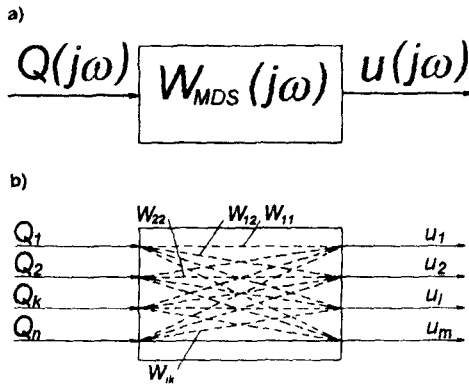
Głównym nurtem prac naukowych realizowanych przez pracowników Katedry Mechaniki Stosowanej to zagadnienia związane z minimalizacją szkodliwych drgań mechanicznych i hałasu. Zarówno drgania mechaniczne jak i drgania akustyczne działają destrukcyjnie na człowieka i jego otoczenie. Minimalizacja drgań w układach mechanicznych, będących równocześnie źródłem drgań akustycznych, jest jednym ze sposobów walki z hałasem, o której mówi się, że jest minimalizacją poziomu hałasu źródła. Wspólność obszaru zagadnień łączy te dwa problemy wibrodynamiki i wibroakustyki. Dalsze obszary zagadnień wibroakustycznych to pochłanianie szkodliwej energii akustycznej na drodze propagacji i izolacji hałasu.

Rozważając możliwie prosty, bo liniowy układ mechaniczny, jako układ MDS (masowo-dysspacyjno-sprężysty), przedstawiony na rysunku 1a i 1b, to modelem matematycznym dynamicznego procesu ustalonego są równania :

$$u(j\omega) = \mathbf{W}_{MDS}(j\omega) \mathbf{Q}(j\omega), \quad (1)$$

lub

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1k} & \dots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2k} & \dots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ W_{i1} & W_{i2} & \dots & W_{ik} & \dots & W_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ W_{m1} & W_{m2} & \dots & W_{mk} & \dots & W_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_k \\ \vdots \\ Q_n \end{pmatrix} \quad (1')$$



Rys. 1. a - model wektorowy; b - model algebraiczny

Z modelu matematycznego (1') wynika, że przemieszczenie w i-tym punkcie układu:

$$u_i(j\omega) = \sum_{k=1}^n W_{ik}(j\omega) Q_k(j\omega) = \sum_{k=1}^n u_{ik}(j\omega), \quad (2)$$

gdzie:

$$u_{ik}(j\omega) = u_{ik}^0(\omega) e^{j\varphi_{ik}(\omega)}, \quad (3)$$

przy czym

$$u_{ik}^0(\omega) = \sqrt{[R_e u_{ik}(j\omega)]^2 + [I_m u_{ik}(j\omega)]^2} = W_{ik}(\omega) Q_k^0(\omega). \quad (4)$$

Jak wiadomo z teorii procesów ustalonych związek (3) jest charakterystyką amplitudowo-fazowo-częstotliwościową, a związek (4) charakterystyką amplitudowo-częstotliwościową.

Związek (4) przedstawiający amplitudę przemieszczenia i-tego punktu układu mechanicznego drgań wywołanych siłą wymuszającą przyłożoną w k-tym punkcie tego układu, wskazuje na możliwości minimalizacji drgań mechanicznych:

- 1) przez minimalizację amplitudy siły wymuszającej  $Q_k^0(\omega)$ ;
- 2) przez minimalizację częstotliwościowej funkcji przejścia (podatności dynamicznej)  $W_{ik}(\omega)$  układu mechanicznego.

Minimalizacja drgań na drodze zmniejszania amplitudy wymuszeń lub unikania wymuszeń parametrycznych wymaga analizy struktury układu, badania procesów technologicznych zachodzących w układzie i zjawiska tarcia w parach kinematycznych oraz analizy niewyrównoważenia sił masowych. Natomiast minimalizacja drgań przez zmianę podatności dynamicznej układu wymaga znajomości częstości własnych układu i takiego ustalenia parametrów ruchu i parametrów procesów technologicznych, aby podatność ta była możliwie mała.

Jak już wspomniano minimalizacja drgań mechanicznych układu mechanicznego powoduje ograniczenie poziomu akustycznego źródła. Dalsze obniżenie hałasu jest mo-

zliwe przez pochłanianie i izolację na drodze propagacji fali energii akustycznej. Propagację fali akustycznej opisuje równanie różniczkowe nieliniowe o pochodnych cząstkowych:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{c_0^2}{\left(1 + \frac{\partial \xi}{\partial a}\right) \kappa + 1} \frac{\partial^2 \xi}{\partial a^2}, \quad (5)$$

gdzie:

- $\xi$  - przemieszczenie cząstki (współrzędna uogólniona);
- $a$  - odległość cząstki od początku układu współrzędnych;
- $\kappa$  - wykładnik adiabaty dla powietrza;
- $c_0$  - prędkość początkowa dźwięku.

Rozwiązanie tego równania metodą małego parametru [R2] pozwoliło autorowi na udowodnienie tezy, że dla poziomu hałasu przekraczającego 100 dB (ok. 95 dB (A)) natężenie dźwięku ma charakter nieliniowy i ustroje pochłaniająco-izolacyjne muszą mieć odpowiednie cechy geometryczno-właściwościowe, aby posiadały dostateczną skuteczność.

## 2. BADANIA DYNAMICZNE WIRNIKÓW

Dynamika wirników jest elementem dynamiki maszyn. Cechą charakterystyczną jest duże znaczenie masowych sił niewyważenia w ruchu obrotowym, kwalifikowane jako wymuszenia zewnętrzne. Drgania wywołane tymi siłami wywołują drugi ruch obrotowy (drżania obrotowe), który wraz z ruchem obrotowym własnym tworzy precesję, istotnie wpływającą na trwałość wirnika, emisję akustyczną itp. Podstawowym zagadnieniem minimalizacyjnym drgań tego typu jest wyrównoważenie mas wirujących. Zabieg wyrównoważania mas wirujących wpływa istotnie na charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową w całym zakresie [A5], nie tak jak dodatkowe tłumienie tylko w obszarze rezonansowym.

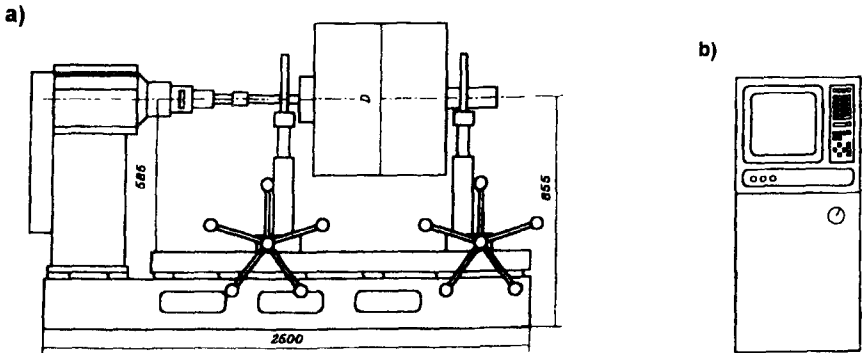
Według prostej zależności (4) proces wyrównoważania obniża amplitudę przemieszczenia  $u_{jk}^0(\omega)$  przez zmniejszone amplitudy siły wymuszającej  $Q_k^0(\omega)$ .

Potrzeba zabiegu wyrównoważania wirujących mas w procesie wytwarzania i po zabiegach remontowych jest niekwestionowana. Problem w tym jak realizować to skutecznie i wydajnie, zwłaszcza dla wirników o dużej podatności, pracujących w obszarach ponadrezonansowych.

W Katedrze M.S. wykonane zostały prace badawczo-wdrożeniowe [P1], które zainicjowały produkcję wyważarek stacjonarnych i przenośnych współpracujących z układami elektronicznymi i komputerowymi. Dalszy rozwój tych prac jest realizowany przez współpracującą Katedrę z firmą CIMAT. Na rysunku 2 przedstawiony jest przykładowy wytwór tej firmy [P2].

W dynamice wirników, podobnie jak i w innych obszarach dynamiki maszyn np. w obrabiarkach, występuje problem drgań samowzbudnych wywołanych procesami

tarcia, recyrkulacji płynów czy procesami technologicznymi np. skrawaniem. W pracach promocyjnych Katedry przeprowadzone zostały badania stabilności ruchu szybkoobrotowych mieszadeł [R1]. W wyniku tych prac ujawnione zostały drgania samowzбудne wywołane procesem mieszania [A4] i określone zostały obszary statecznej pracy zespołów mieszających z najbardziej popularnymi mieszadłami: śmigłowymi i turbinoowymi [A5].



Rys. 2. a - wyważarka stacjonarna; b - moduł pomiarowo-obliczeniowy Rotortest 05

### 3. ANALIZA UKŁADÓW DYSKRETNO-CIĄGLYCH ZA POMOCĄ STRUKTURALNEJ SYNTEZY PODATNOŚCI DYNAMICZNEJ

Minimalizacja drgań przez minimalizację częstotliwościowej funkcji przejścia wymaga analizy strukturalnej układu i jej optymalizacji. Jedną z metod analizy strukturalnej układów dynamicznych jest synteza podatności dynamicznych poszczególnych podukładów [A1, A2]. Zauważono, że metoda ta jest szczególnie przydatna przy badaniach układów dyskretno-ciągłych, w których układy ciągłe, ze względu na ich złożoność, trudno opisać analitycznie. W takim przypadku podatność tych podukładów uzyskuje się z eksperymentu. Metodę tę zademonstruje przykład. Dany jest układ dyskretno-ciągły jak na rysunku 3. Jest to masa  $m$  podparta na podatnym, dynamicznie czynnym podłożu. Dla tego przykładu równanie (1') przyjmuje postać :

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

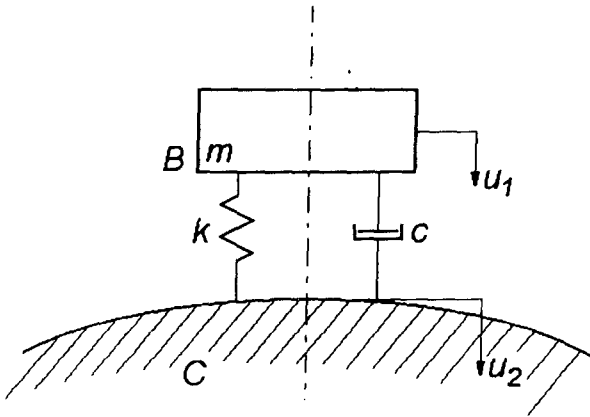
Poszczególne funkcje przejścia można uzyskać z układu strukturalnego (blokowego) przedstawionego na rysunku 4, który otrzymano bazując na twierdzeniu o ciągłości przemieszczeń i zgodności sił, gdzie:

$$\beta_{11} = \beta_{12} = \beta_{21} = \frac{1}{-m\omega^2}$$

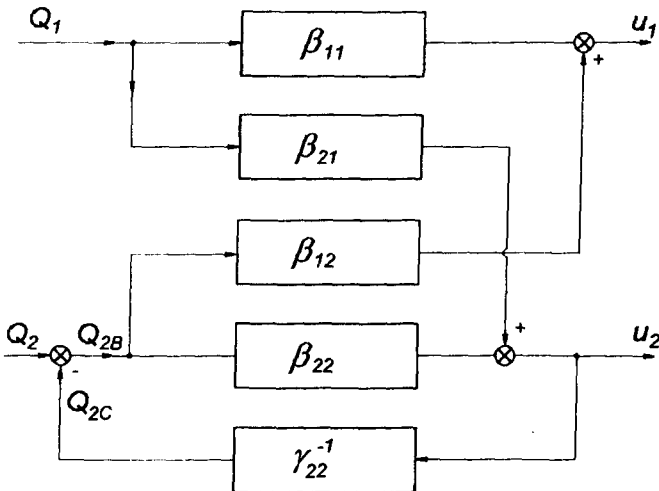
$$\beta_{22} = \frac{-m\omega^2 + j\omega + k}{-m\omega^2(j\omega + k)}$$

(6)

są podatnościami poszczególnych bloków podukładu B, jako układu o dwóch stopniach swobody z jedną masą  $m$ , wyznaczone analitycznie z równań ruchu oraz  $\gamma_{22}$  jest podatnością podłoża (podukładu C), wyznaczoną doświadczalnie.



Rys. 3. Model układu dyskretno-ciągłego;  
B - podukład dyskretny;  
C - podukład ciągły.



Rys. 4. Schemat blokowy układu z rysunku 3

Wykorzystując zasady redukcji schematów blokowych otrzymuje się poszczególne funkcje przejścia :

$$W_{11} = \beta_{11} - \frac{\beta_{12}^2}{\beta_{22} + \gamma_{22}}$$

$$W_{12} = W_{21} = \frac{\beta_{12} \gamma_{22}}{\beta_{22} + \gamma_{22}} \quad (7)$$

$$W_{22} = \frac{\beta_{22} \gamma_{22}}{\beta_{22} + \gamma_{22}}$$

Minimalizacja macierzy podatności układu z równania (5) prowadzi do minimalizacji przemieszczeń, a więc w konsekwencji do minimalizacji drgań. Należy zauważyć, że mając opisany układ w postaci strukturalnej można rozważać jego zmiany strukturalne i doprowadzić do aktywnej kontroli drgań poprzez wprowadzenie do struktury członów aktywnych. Można również co jest zaletą tej metody z równań (5) przejść do równań przestrzeni stanu [A3], które w pewnych przypadkach ułatwią rozważania minimalizacyjne. Obecnie omówioną metodą badany jest złożony układ mechaniczny - agregat ciągnikowy.

#### 4. MIMIMALIZACJA HAŁASU NA DRODZE PROPAGACJI FALI AKUSTYCZNEJ

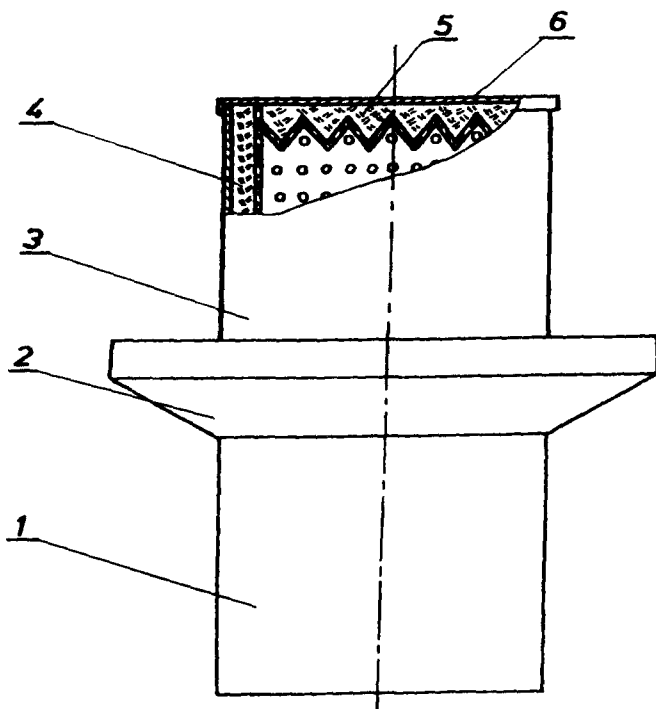
Jeżeli ograniczenie emisji źródła dźwięku jest niedostateczne, a takie sytuacje często występują przy pracy istniejących urządzeń mechanicznych, to walkę z hałasem prowadzi się na drodze propagacji fali akustycznej. Istnieje szereg metod tej walki, które można podzielić na metody pasywne i aktywne. Metody pasywne polegają na zastosowaniu różnych przegród, kabin, ekranów, obudów i tłumików, natomiast metody aktywne polegają na wyciszeniu hałasu przez interferencję z falą przeciwną emitowaną przez specjalne zewnętrzne źródło energii [A6, A7].

W Katedrze M.S. wykonane zostały pewne prace badawcze w zakresie wyciszania interferencyjnego, których efektem są dwa zastrzeżenia autorskie [P2]. Wyciszenie pasywne jest w Katedrze szeroko stosowane. Najlepsze efekty uzyskane zostały przy wyciszeniu:

- automatów tokarskich w Zakładach „Predom Romet” w Bydgoszczy;
- obrabiarek do drewna w Zakładach Stolarki Budowlanej w Sepólnie Krajeńskim;
- sprzężarek w Janikowskich Zakładach Sodowych [P3];
- młynów do rozdrabniania tworzyw sztucznych w Fabryce Akcesoriów Meblowych w Chełmnie [P5] i rys.5;
- stolarni i odlewni w ZNTK w Bydgoszczy [A8 i A9];
- automatów tokarskich w Zakładzie Akcesoriów Meblowych w Chełmży [A10];
- łamacza szczękowego żelazostopów w Hucie Łaziska w Łaziskach Górnych;
- fragmentu taśmociągu w Kopalni Węgla Brunatnego w Turowie (rys.6).

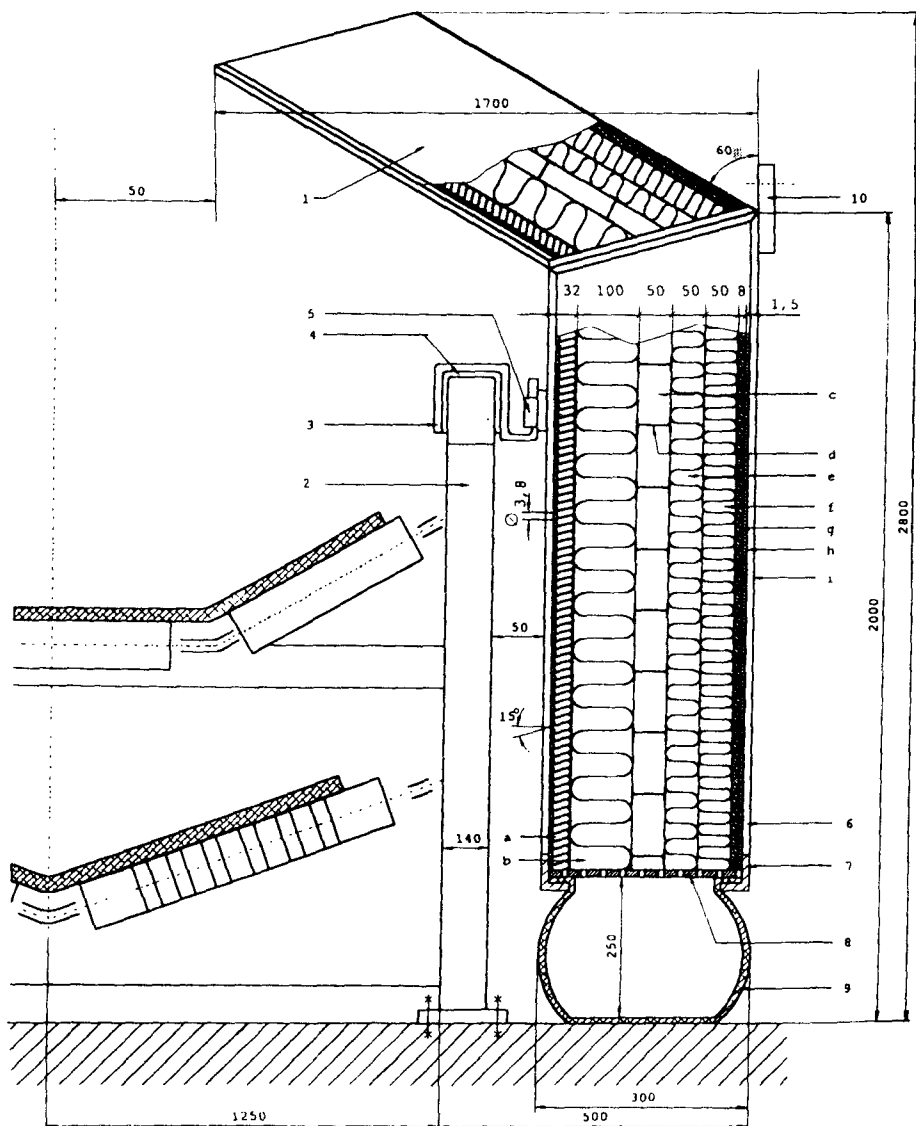
Niektóre zastosowane ustroje wyciszające i badania ich efektywności opisane są w publikacjach [A8 - A14], a najnowsze rozwiązania przykładowe podane są niżej.

Na rysunku 5 podana jest obudowa dźwiękochłonna wewnętrznej komory młyna do tworzyw sztucznych w Fabryce Okuć Meblowych w Chełmnie. Zarys trójkątny blachy perforowanej pokrywy 5 skutecznie tłumi drgania akustyczne o zwiększonej amplitudzie ciśnienia. Natomiast na rysunku 6 przedstawiona jest konstrukcja ekranu wyciszającego segment taśmociągu w Kopalni Węgla Brunatnego w Turowie. Kształt ekranu skutecznie ogranicza propagację hałasu w kierunku zabudowań sąsiedztwa kopalni i nie przeszkadza w obsłudze taśmociągu. Konstrukcja warstw absorbcyjnych z zastosowaną płytą z otworkami  $\varnothing 3,2$  mm typu "Waben" szwajcarskiej firmy PREWI-PHON (warstwa a na rys.6) zapewniła skuteczne tłumienie dźwięków o niskiej częstotliwości do ok. 200 Hz. Uzyskana skuteczność ekranu określona obniżeniem szkodliwych dźwięków wynosi  $\Delta L = 15$  dB (A).



Rys. 5. Rozwiązanie konstrukcyjne obudowy dźwiękochłonnej wewnętrznej komory młyna do tworzyw sztucznych:  
1 - podstawa, 2 - zasyp, 3 - korpus, 4 - materiał dźwiękochłonny, 5 - pokrywa tłumiąca, 6 - osłona





Rys. 6. Przekrój konstrukcji wyciszającej segmentu taśmociągu w Kopalni Węgla Brunatnego Turów: 1 - wielokrotny ekran dźwiękochłonny, 2 - konstrukcja wsporcza przenośnika, 3 - uchwyt osadcy ekranu, 4 - warstwa gumy izolującej, 5 - listwa prowadząca, 6 - konstrukcja nośna ekranu, 7 - kątownik podtrzymujący stopę elastyczną, 8 - blacha perforowana odprowadzająca wodę, 9 - elastyczna stopa tłumiąca (a - płyta z otworami „Waben”, b - wełna mineralna miękka -  $50 \text{ kg/m}^3$ , c - szczelina powietrzna, d - wkład dystansowy, e - wełna mineralna półmiękka -  $60 \text{ kg/m}^3$ , wełna mineralna twarda -  $80 \text{ kg/m}^3$ , g - guma, h - blacha ocynkowana, i - konstrukcja nośna ekranu)

## LITERATURA

**Rozprawy:**

- R1. Siołkowski B. Badania stateczności ruchu szybkoobrotowych mieszadeł. ATR, Bydgoszcz 1986.
- R2. Wernerowski K. Asymptotyczne rozwiązanie wybranych zagadnień nieliniowych wibroakustyki maszyn. ATR, Bydgoszcz 1995.

**Artykuły naukowe :**

- A1. Holka H. Receptance synthesis by means of block diagram in active system testing. VIII- th World Congress of IFToMM, Sevilla 1987.
- A2. Holka H. Kontrola drgań układu dyskretno-ciągłego. Mechanika Z. N. 121, Gliwice 1995.
- A3. Holka H. Układy dyskretno-ciągłe jako wielowymiarowe obiekty sterowania. Zeszyty Naukowe ATR nr 192, Mechanika 37, Bydgoszcz 1995.
- A4. Siołkowski B. Drgania samowzbudne zespołów mieszających. Mech.Teor. i Stos. T. 27 Z.1 PWN W-wa 1989.
- A5. Siołkowski B. Stabilność pracy mieszalników cieczy. Cz.I i Cz. . Zeszyty Naukowe ATR nr 173, Mechanika 35, Bydgoszcz 1992.
- A6. Wernerowski K. Zagadnienia minimalizacji hałasu maszyn na drodze propagacji. Proceedings, Noise Control '85, Kraków 1985.
- A7. Wernerowski K. Noise Reduction of Longitudinal Automatic Lothes. Proceedings, Noise Control '88, Kraków 1988.
- A8. Wernerowski K. Analiza izolacyjności akustycznego ekranu lekkiego i ekonomicznego. Zastosowanie Ergonomii Nr 2, 1992.
- A9. Wernerowski K. Wyciszenie pilarek tarczowych. Przyjaciół przy pracy, Behapress 3, 1993.
- A10. Wernerowski K. Eksploatacja wyciszonych podajników automatów tokarskich wzdłużnych. Materiały VI Krajowego Sympozjum Eksploatacji Urządzeń Technicznych . Jastrzębia Góra 1989.
- A11. Wernerowski K. Wybrane zagadnienia rozwoju pochłaniaczy przestrzennych hałasu. Zastosowanie Ergonomii Nr 5, 1993.
- A12. Wernerowski K. Analiza izolacyjności akustycznej ustroju wyciszającego hałas. Zastosowanie Ergonomii Nr 6, 1994.
- A13. Wernerowski K. Wyciszanie maszyn i urządzeń. Przyjaciół przy pracy, Behapress 3, 1995.
- A14. Wernerowski K. Asymptotic Solution of Acoustic Nonlinear Wave Equation with Friction Archives of Acoustic Vol 20, Nr 3, 1993.

**Sprawozdania z prac badawczych i patenty**

- P1. Malec M., Topoliński A. Sprawozdania z pracy CPBR 12.3 p.t."Przenośne przyrządy do wyważania i diagnostyki". ATR Bydgoszcz 1989-91.
- P2. Katalog wyrobów firmy CIMAT.
- P3. Wernerowski K. Patenty Nr 160895 i Nr 164624.

- P4. Wernerowski K., Waliszko E. Patent Nr 136547.
- P5. Sprawozdanie z pracy naukowo-wdrożeniowej BZ - pt.- Wyciszanie młynów do tworzyw sztucznych na wydziale W-3 Fabryki Akcesoriów Meblowych w Chełmie, 1985.

## **REDUCING TO MINIMUM MECHANICAL VIBRATION AND NOISE**

### **SUMMARY**

This paper contains review of the most important promotion and inculcation works which were conduct in Department of Practical Mechanics over the last years.

Michał STYP-REKOWSKI  
Ryszard WOCIANIEC

## **OSIĄGNIĘCIA W DZIAŁALNOŚCI NAUKOWO-BADAWCZEJ KATEDRY OBRABIAREK I ROBOTÓW I ICH PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE**

W pracy zamieszczono przykłady praktycznego zastosowania wyników działalności naukowej i naukowo-badawczej pracowników Katedry Obrabiarek i Robotów. Przedstawiono wybrane prace, głównie o charakterze projektowo-konstrukcyjnym, które zdaniem autorów ukształtowały dzisiejszy obraz Katedry.

### **1. WPROWADZENIE**

Katedra Obrabiarek i Robotów ma charakter typowo konstrukcyjny. Dotyczy to zarówno dydaktyki, jak i działalności naukowo-badawczej. Efektem tej ostatniej są opracowania projektowo-konstrukcyjne głównie obrabiarek, których prototypy, wykonywane w większej części w Katedrze, pozwalały na praktyczną weryfikację przyjętych założeń konstrukcyjnych. W niniejszej pracy przedstawiono wybrane rozwiązania najlepiej obrazujące osiągnięcia Katedry (wcześniej Zakładu Podstaw Konstrukcji Maszyn Technologicznych) w zakresie działalności naukowej i naukowo-badawczej.

### **2. OBRABIARKI DO OBRÓBEK EROZYJNYCH**

Jeszcze w latach siedemdziesiątych zespół pod kierunkiem Profesora Antoniego F. Budzyńskiego podjął się opracowania honownicy elektrochemicznej. Tworzyli go przede wszystkim pracownicy ówczesnego Zakładu Podstaw Konstrukcji Maszyn obecnie zatrudnieni w Katedrze Obrabiarek i Robotów. Uzupełniali go przedstawiciele innych zakładów Wydziału Mechanicznego.

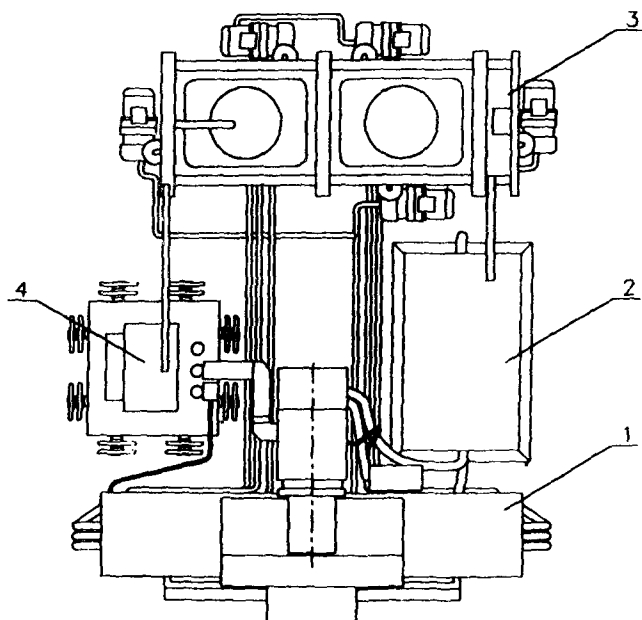
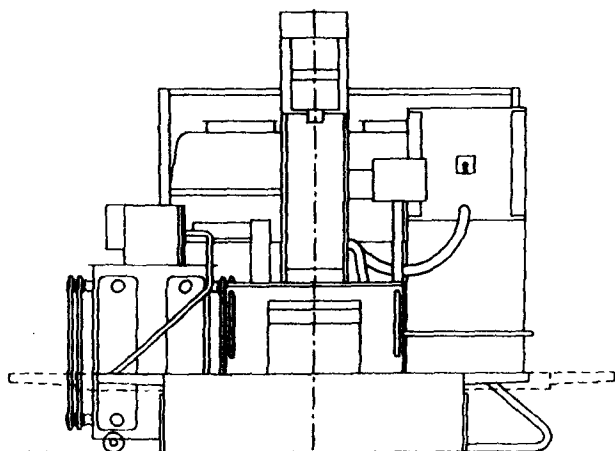
Rezultatem tych prac były dwa egzemplarze honownicy EHCA63. Postać konstrukcyjną obrabiarki oraz rozmieszczenie jej zespołów przedstawiono na rysunku 1. Umożliwiała ona honowanie tradycyjne i elektrochemiczne otworów oraz powierzchni zewnętrznych a także, lecz już w ograniczonym zakresie, nagniatanie tradycyjne oraz nagniatanie wspomagane elektrycznie.

Obrabiarka ta posiadała następujące wielkości charakterystyczne:

- |  |              |
|--|--------------|
| - maksymalna długość obrabianego otworu  | - 630 mm;    |
| - maksymalna średnica obrabianego otworu | - 100 mm;    |
| - napięcie zasilania                     | - 3 x 380 V; |
| - napięcie sterowania                    | - 24 V;      |
| - natężenie prądu technologicznego       | - 0 - 600 A; |

- napięcie międzyelektrodowe  
- moc zainstalowana

- max. 24 V;  
- 34 kW.



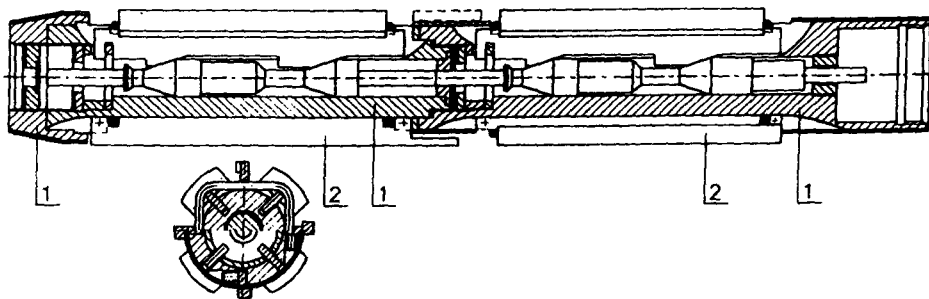
Rys.1. Postać konstrukcyjna honownicy elektrochemicznej EHCA63 oraz rozmieszczenie jej zespołów: 1 - część obrabiarkowa, 2 - zasilacz hydrauliczny, 3 - zasilacz płynów obróbkowych, 4 - zasilacz prądowy

Obrabiarka o napędzie hydraulicznym wyposażona była w adaptacyjny układ sterowania ruchem narzędzia, co zwiększało dokładność obróbki dzięki możliwości samoczynnego korygowania błędów makrogeometrii honowanych otworów.

Wytworzone prawie całkowicie w laboratorium Zakładu PKM pierwsze dwa egzemplarze pozwalały na weryfikacje założeń dokonanych na etapie projektowania, konstruowania, a także wytwarzania obrabiarki. Umożliwiały również prowadzenia badań nad samym procesem obróbki.

Jeden z egzemplarzy honownicy sprawdzany był z powodzeniem w praktyce przemysłowej - używano jej do obróbki stopy korbowodów silników do popularnych motorów w Zakładach Metalowych w Nowej Dębce.

Oddzielną, lecz nierozdzielnie połączoną z obrabiarką, problematykę badawczą stanowiły badania nad narzędziem, a więc dobór właściwej jego postaci i optymalizacja cech konstrukcyjnych. Sporo doświadczeń w tym względzie uzyskano dzięki wspomnianym wyżej próbom przemysłowym w Nowej Dębce. Jedną z kolejnych udoskonalonych w wyniku tych prób wersji narzędzia służącego do obróbki otworów przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Głowica z wymiennymi elektrodami do honowania otworów [3]:

1 - korpus, 2 - wymienne elektrody

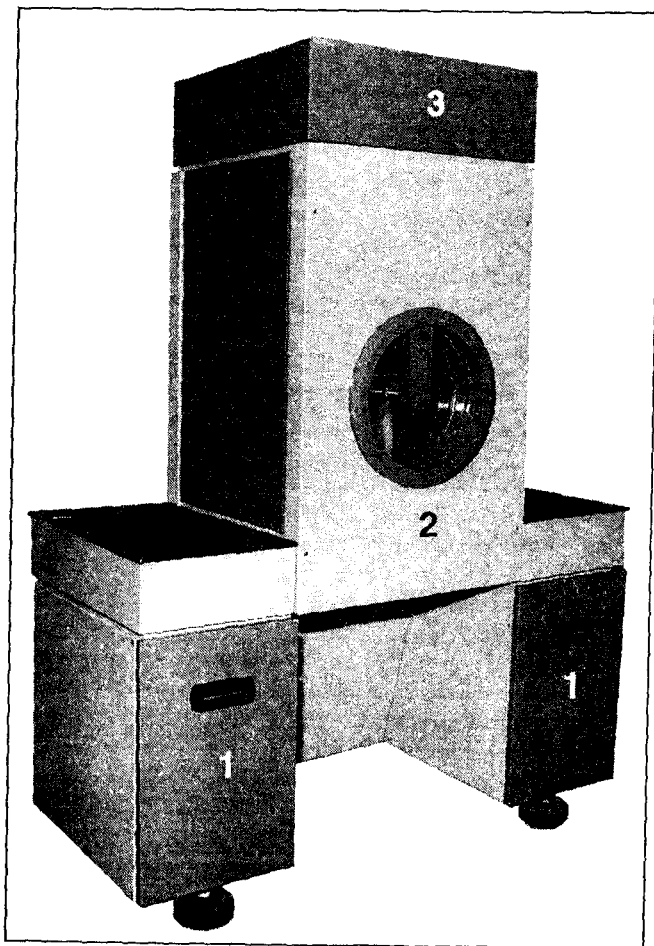
O poziomie zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych mogą świadczyć udzielone na nie liczne (kilkanaście) patenty i wzory użytkowe. Nowatorstwo w ujęciu problemu i jego rozwiązaniu zostały również potwierdzone uzyskaniem pięciu stopni naukowych (jednego doktora habilitowanego i czterech doktorów) przez członków zespołu realizującego tę problematykę badawczą [1].

Drugą obrabiarką z tej grupy zaprojektowaną, wykonaną i przebadaną przez zespół pracowników tworzących obecnie Katedrę Obrabiarek i Robotów jest drążarka elektrochemiczna EDCA 10. Jej część obrabiarkową przedstawiono na rysunku 3, a kinematykę napędu na rysunku 4. Charakteryzuje się ona takimi cechami, jak:

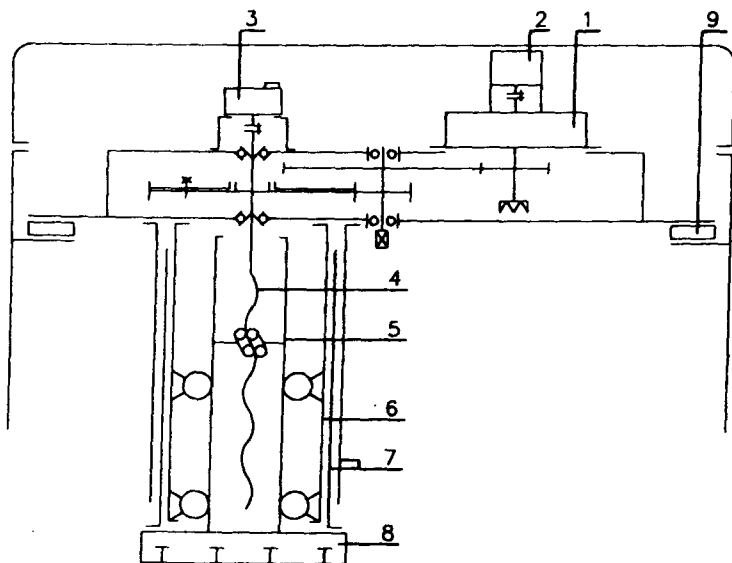
- pionowy układ przesuwu elektrody;
- łatwość wglądu do przestrzeni roboczej przez obsługującego;
- dobry dostęp do elementów mocujących przedmiot obrabiany i elektrodę roboczą.

Na podstawie (1) - rysunek 3, z uchylnymi pulpitemi sterującymi umieszczona jest komora robocza (2), na której znajduje się zespół napędu przesuwu elektrody roboczej (3). Boczne ściany komory roboczej są otwierane umożliwiając wspomniany wyżej łatwy dostęp do przestrzeni roboczej. W przedniej ścianie jest zainstalowana wirująca szyba pozwalająca na wgląd do komory roboczej w czasie obróbki. Wolnostojące ze-

społy pomocnicze: zasilacze płynów obróbkowych i prądu oraz wirówka umożliwiają ustawienie obrabiarki w dowolnej konfiguracji, w zależności od powierzchni, którą dysponuje użytkownik.



Rys.3. Drażarka elektrochemiczna EDCA10 [2]:  
1 - podstawa z uchylnymi pulpitemi sterującymi,  
2 - komora robocza, 3 - zespół napędowy elektrody



Rys. 4. Schemat kinematyczny napędu elektrody roboczej [2]: 1 - silnik tarczowy PTT-20, 2 - prądniczka tachometryczna, 3 - przetwornik obrotowo-impulsowy CPPC50, 4 - przekładnia toczna VNBI68, 5 - prowadnik, 6 - prowadnice toczne, 7 - osłona teleskopowa, 8 - płyta narzędziowa, 9 - wkładka wibroizolacyjna

Niektóre dane techniczne drążarki EDCA10, pozwalające zorientować się w jej możliwościach obróbczych, są następujące:

- |  |                            |
|--|----------------------------|
| - wymiary stołu  | - 400 x 400 mm;            |
| - wymiary płyty narzędziowej                                   | - 200 x 200 mm;            |
| - napięcie zasilające  | - 3 x 380 V;               |
| - natężenie prądu technologicznego                             | - 0 - 600 A;               |
| - napięcie międzyelektrodowe                                   | - max. 24 V;               |
| - skok roboczy elektrody                                       | - 160 mm;                  |
| - prędkość ruchu roboczego elektrody (regulowana bezstopniowo) | - 0,1 - 600 mm/min;        |
| - pojemność zbiorników elektrolitu                             | - 0,4 m <sup>3</sup> ;     |
| - wydatek wirówki  | - 80 dm <sup>3</sup> /min; |
| - moc zainstalowana  | - 25,5 kW.                 |

Zespołami pozwalającymi na realizację założonych możliwości technologicznych obrabiarki są: napęd elektrody roboczej oraz układ sterowania. Istotną cechą świadcząca o nowoczesności rozwiązania (oczywiście w tamtym czasie - na początku lat 80) jest zastosowanie silnika tarczowego z magnesami trwałymi jako wspólnego napędu ruchu roboczego elektrody i przyspieszonego ruchu ustawczego. Silnik tego typu charakteryzuje się małą bezwładnością, co pozwala uzyskać małą stałą czasową układu. Przy zastosowanym przełożeniu mechanicznym uzyskuje się w ten sposób dokładność pozycjonowania 20 μm.



### 3. ROBOTY I MODUŁY LINIOWE

Drugą grupę maszyn technologicznych opracowanych w Katedrze stanowią roboty i moduły liniowe, a więc strukturalne składniki niezbędne w układach elastycznej automatyzacji. Roboty mające charakter przede wszystkim przemysłowo-edukacyjny, wykonano w dwóch wersjach:

- robot L1 o sześciu stopniach swobody;
- robot L2 o pięciu stopniach swobody.

Są to w pełni oryginalne rozwiązania opracowane w Katedrze. Wykorzystano w nich elementy firm przodujących w projektowaniu i wytwarzaniu zespołów i części obrabiarkowych. Zastosowane rozwiązania konstrukcyjne oraz wyżej wspomniane elementy pozwoliły na uzyskanie założonych wysokich parametrów, porównywalnych w pewnych zakresach z podobnymi rozwiązaniami firm zagranicznych, a przewyższających rozwiązania krajowe.

Przeprowadzone kompleksowe badania prototypów w pełni potwierdziły słuszność i prawidłowość przyjętych założeń i rozwiązań konstrukcyjnych, co w połączeniu z wysoką jakością ich wykonania (głównie w Katedrze) dały efekt w postaci wysokiej klasy maszyn.

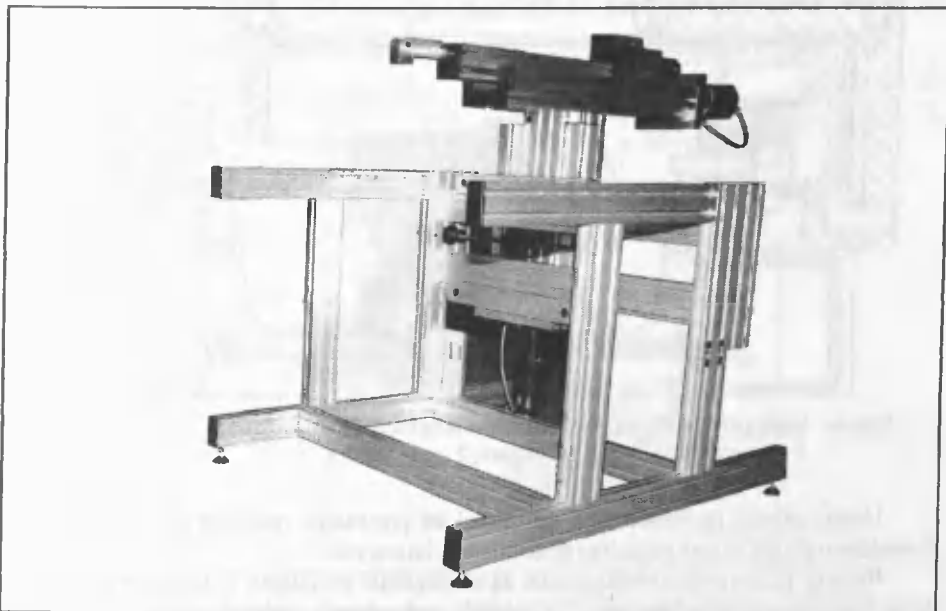
Druga generacja tych robotów wykonana została z ciągnionych profili aluminiowych. Przedstawiono je na rysunkach 5a i b. Efekty ich zastosowania to głównie obniżenie pracochłonności wykonania robotów lecz także, co nie jest obecnie bez znaczenia, zdecydowana poprawa ich estetyki.

Moduły liniowe zaprojektowano i wykonano w kilku wariantach konstrukcyjnych:

- z napędem silnikiem skokowym i śrubą toczną; przemieszczenia w zakresie 0 - 1000 mm,
- z napędem silnikiem skokowym i przekładnią z paskiem zębatym; przemieszczenia w zakresie 0 - 1000 mm,
- z napędem dwoma siłownikami pneumatycznymi; trójpołożeniowy (0 - 500 - 1000 mm),
- z napędem silnikiem skokowym i przekładnią z paskiem zębatym; przemieszczenia w zakresie 0 - 3000 mm.

We wszystkich wariantach konstrukcyjnych zastosowano łożyskowanie toczne, wykorzystując do tego celu liniowe łożyska toczne i prowadnice o przekroju kwadratowym szwajcarskiej firmy SCHNEEBERGER. Gwarantuje to dużą sztywność modułów, co w połączeniu z napędem silnikami skokowymi, pozwoliło na uzyskanie wysokiej dokładności pozycjonowania (20 mm). Przekrój poprzeczny przez jeden z wariantów modułu przedstawiono na rysunku 6.

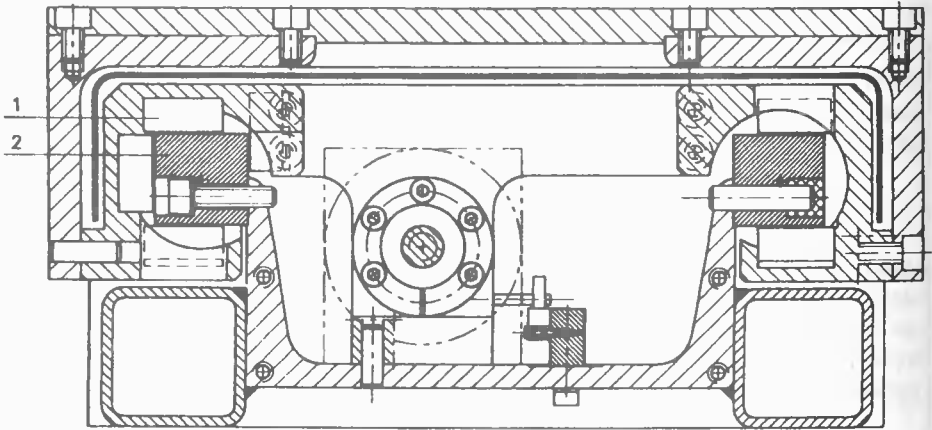
a)



b)



Rys. 5. Postać konstrukcyjna robotów przemysłowo-edukacyjnych: a - robot L1 o sześciu stopniach swobody, b - robot L2 o pięciu stopniach swobody



Rys. 6. Szczegóły konstrukcyjne ułożyskowania modułu liniowego [5]:  
1 - łożyska liniowe Schnebergera, 2 - przewoźnik

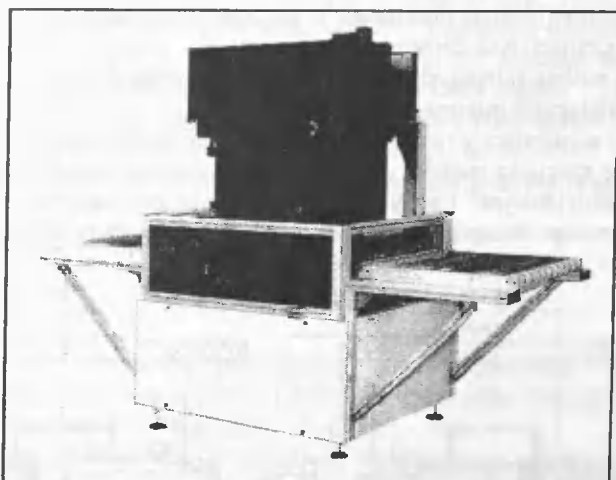
Dzięki prostej metodzie łączenia odcinków przewodnic możliwe jest wykonywanie modułów o dużych wartościach przemieszczeń liniowych.

Roboty przemysłowo-edukacyjne są szczególnie przydatne w procesie dydaktycznym, realizowanym na kierunku "Obrabiarki i urządzenia technologiczne", pozwalając na praktyczne zapoznanie się z programowaniem obrabiarek, a dzięki zastosowaniu modułów liniowych także na budowanie modelowych linii elastycznych systemów wytwarzania - najnowszej ówczesnie tendencji w dziedzinie technik wytwarzania. Jako samodzielne maszyny mogą być one również wykorzystywane w przemyśle przy automatyzacji procesów technologicznych.

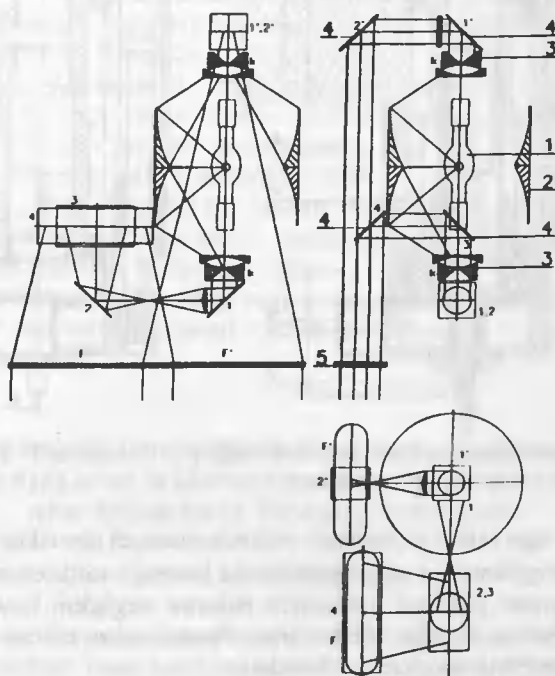
#### 4. MASZYNY DO OBWODÓW DRUKOWANYCH

Kolejną grupą opracowanych i wykonanych w Katedrze maszyn są różnego rodzaju maszyny służące do wytwarzania wielowarstwowych obwodów drukowanych. Jest to działalność na rzecz zleceniodawców zagranicznych, głównie firm niemieckich: Klaus SCHNEIDER CNC Steuerungen i COIMPEX. Realizowana była ona głównie w Jednostce Innowacyjnej stanowiącej integralną część Katedry. Na ich zlecenie wykonano i przebadano prototypy takich maszyn jak: prasa, wiertarki, tester, podajniki, naświetlarki, skanery wykorzystywane na różnych etapach wytwarzania wielowarstwowych obwodów drukowanych. Wyniki doświadczalnej weryfikacji wykonanych prototypów były różne, jednak w zdecydowanej większości przypadków pozytywne. Jako przykład pozytywnych rezultatów działalności Katedry na tym polu mogą posłużyć maszyny z układami optycznymi, a więc naświetlarki, skanery i układy wideokomputerowe, których kolejne udoskonalane w Katedrze wersje są w ofertach firm zamawiających te opracowania, np. naświetlarka przedstawiona na rysunku 7 oferowana przez firmę Electronic Production Equipment Wessel z Detmold (RFN).

Szczególnie odpowiedzialnym układem naświetlarek jest ich układ optyczny. Z tego też względu postać konstrukcyjna tego układu jest ciągle optymalizowana a jedną z nich przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 7. Naświetlarka firmy EPE WESSEL Detmold (RFN)



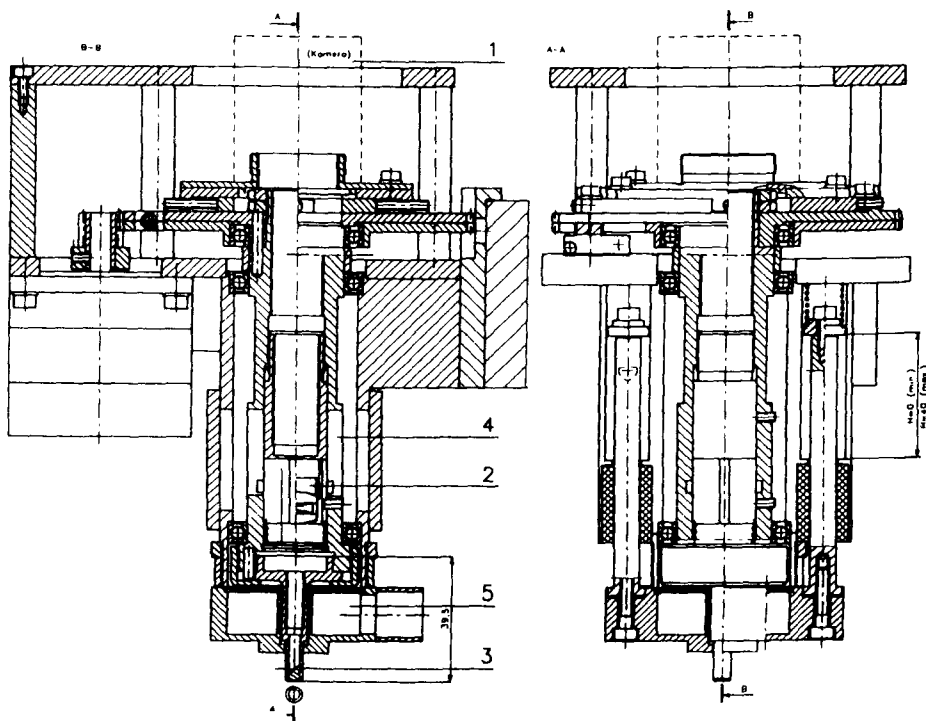
Rys. 8. Schemat funkcjonalny układu optycznego naświetlarki [6]: 1 - źródło światła, 2 - zwierciadło elipsoidalne, 3 - kondensator, 4 - zwierciadło ultrafioletowe, 5 - soczewka Fresnela

Skanery stanowią także istotny fragment dorobku Katedry Obrabiarek i Robotów. Kolejne egzemplarze tych maszyn, modernizowane w wyniku badań wersji poprzednich, wytwarzane były bądź w Laboratorium Katedry bądź pod nadzorem projektantów u zleceniodawcy.

Wielowarstwowe obwody drukowane w procesie ich wytwarzania mogą ulegać deformacjom. Przyczynami tych deformacji są najczęściej:

- względny poślizg sklejanych bądź prasowanych warstw P;
- zmiany dylatacyjne poszczególnych warstw.

Aby usterki wynikające z tych wad usunąć lub zminimalizować ich skutki, opracowano w Katedrze specjalną metodę, w której wykorzystano wideokomputerowy układ z widzeniem "światowidowym". Cechy konstrukcyjne jednego z opracowanych rozwiązań układu peryskopowego służącego do tego celu przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Postać konstrukcyjna układu peryskopowego [4]: 1 - kamera, 2 - obiektyw, 3 - peryskop, 4 - wrzeciono, 5 - oświetlacz.

Zastosowanie tego układu w produkcji wielowarstwowych obwodów drukowanych wykazało jego dużą przydatność, a użycie jego wraz z kamerą o rozdzielczości  $8,6 \times 8,3 \mu\text{m}$  umożliwia korygowanie położenia wierconych otworów względem wewnętrznej struktury połączeń z dokładnością do kilku mikrometrów. Pozwala także na minimalizację błędów powstałych w procesie technologicznym obwodów.

## 5. PODSUMOWANIE

W niniejszym opracowaniu przedstawiono jedynie najważniejsze, według oceny autorów, przykłady zastosowania w praktyce rezultatów prac naukowo-badawczych realizowanych w Katedrze. Cały dorobek naukowy i naukowo-badawczy osób zatrudnionych w Katedrze obecnie, a także i w przeszłości jest znacznie bogatszy, o czym świadczyć może długa lista publikacji, opracowań a także nagród i wyróżnień. Jest to wynikiem przede wszystkim osobistego zaangażowania realizatorów tych prac i firm finansujących. Sukcesy te, gdyż w takich kategoriach należy ocenić ten dorobek, nie byłyby jednak możliwe bez odpowiednich warunków stworzonych przez władze Uczelni i Wydziału.

## LITERATURA

- [1] Budzyński A.F.: Ciekawsze rozwiązania naukowo-badawcze i projektowo-konstrukcyjne zrealizowane w Katedrze Obrabiarek i Robotów. Przyjęte do druku w Zeszytach Naukowych ATR, Mechanika. Bydgoszcz 1996.
- [2] Budzyński A.F., Lango M., Lewandowski Wł., Szymura L.: Drażarka elektrochemiczna EDCA10. Materiały Konferencji EM'82 (Electromachining). Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1982.
- [3] Budzyński A.F., Seroka St.: Badania honowania elektrochemicznego jednokierunkowego wzdłużnego. Materiały Konferencji EM'82 (Electromachining). Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1982.
- [4] Budzyński A.F., Wocianiec R., Zdrojewski J., Bujnowski S.: Wideokomputerowa korekta współrzędnych położenia otworów w wielowarstwowych obwodach drukowanych. Materiały sympozjum "Projektowanie procesów technologicznych". Politechnika Poznańska, Poznań - Czerniejewo 1995.
- [5] Domanowski P., Styp-Rekowski M.: Moduły liniowe o ruchu prostoliniowym. Materiały IV konferencji n.t. "Konstrukcja, technologia i eksploatacja maszyn". Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1992.
- [6] Wocianiec R.: Optymalizacja drogi optycznej naświetlarki do obwodów drukowanych. Zeszyty Naukowe Akademii Techniczno-Rolniczej, Mechanika. Bydgoszcz 1996 (artykuł złożony).

## **ACHIEVEMENTS OF MACHINE TOOLS AND ROBOTS CHAIR ON THE FIELD OF SCIENTIFIC AND RESEARCH ACTIVITY AND THEIR PRACTICAL APPLICATION**

### **SUMMARY**

In this paper are shown the examples of practical application of scientific and research activity of Machine Tools and Robots Chair staff. Some work, mainly design and constructional character, which to authors mind, formed current view of Chair are presented.



Józef Szala

## PROBLEMATYKA ZMĘCZENIA W PROCESIE PROJEKTOWO-KONSTRUKCYJNYM

W pracy omówiono metody obliczeń i badań stosowane w poszczególnych stadiach istnienia obiektów technicznych, kładąc istotny nacisk na możliwość weryfikacji konstrukcji w tych stadiach. Zagadnienia ogólne zilustrowano praktycznymi przykładami oraz wskazaniem źródeł literaturowych zawierających szczegółowe dane o metodach obliczeń i badań. Dane te oparto na pracach zrealizowanych w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy w latach 1969-1996.

### I. WPROWADZENIE

Problematyka zmęczeniowa elementów konstrukcyjnych występuje w procesie projektowo-konstrukcyjnym obok wielu innych ważnych zagadnień, takich jak: bezpieczeństwo, niezawodność, diagnostyka, ergonomia, ekonomia, ponadto ze względu na zachowanie się wytworów i ich uszkodzenia-zagadnienia: tribologiczne, reologiczne, dynamiczne itd. Zagadnienia zmęczeniowe w szczególnych przypadkach nabierają dużego znaczenia np. w technice: lotniczej, kosmicznej, motoryzacyjnej, nuklearnej, w której uszkodzenia zmęczeniowe prowadzą do poważnych w skutkach katastrof.

Pomiędzy wymienionymi na wstępie zagadnieniami istnieje wiele związków (sprzężeń i sprzężeń zwrotnych) i w procesie projektowo-konstrukcyjnym wszystkie zagadnienia powinny być uwzględnione z należytą uwagą, tzn. zgodnie z ich wagą w rozwiązywanym zadaniu projektowym. Mając świadomość potrzeby całkowitego rozwiązania, w tym artykule jedynie skrótowo omówione zostaną zagadnienia konstruowania i metody weryfikacji konstrukcji ze względu na zmęczenie i zmęczeniowe pękanie elementów konstrukcyjnych. Tej problematyce poświęcono w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn 25 lat badań, na podstawie których opublikowano: 90 artykułów naukowych, 7 rozpraw, 2 monografie książkowe, 2 książki oraz wygłoszono na sympozjach krajowych i międzynarodowych ponad 100 referatów naukowych [1].

Celem niniejszej pracy jest ilustracja wybranych zagadnień przykładami z licznych badań prowadzonych w Katedrze PKM, a w odniesieniu do skrótowych opisów - wskazanie literatury, gdzie znaleźć można szczegółowe opisy metod obliczeń i badań zarówno w źródłowych pracach Katedry, jak i w literaturze światowej.

### 2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU I OKREŚLENIE ZAKRESU PRACY

Pozostawiając czytelnikowi refleksję nad skutkami katastrof np. lotniczych czy drogowych, w których uczestniczą ludzie, wskazane zostaną wybrane zagadnienia ekono-



miczne uszkodzeń zmęczeniowych, które w procesie projektowo-konstrukcyjnym należy minimalizować. W badaniach uszkodzeń dużej liczby pojazdów mechanicznych stwierdzono, że około 60% tych uszkodzeń związanych jest z problematyką zmęczenia [2]. Ogólny efekt pęknięć zmęczeniowych w Stanach Zjednoczonych zamykał się stratami 99 miliardów dolarów rocznie. W ocenie specjalistów zastosowanie wiedzy z zakresu zmęczenia mogłoby zredukować te straty do poziomu 29 miliardów dolarów [3]. Japońskie linie lotnicze wykazały, że koszty naprawy i obsługi swoich Boeing'ów 747 były porównywalne z ich ceną, głównie z przyczyn projektowych [4]. Na rys.1 przedstawiono w postaci schematu blokowego elementy procesu projektowo-konstrukcyjnego wzorując się na pracy [5]. Analiza zagadnień zmęczeniowych mieści się we wszystkich stadiach istnienia wytworu, a skutki ekonomiczne w zakresie kosztów wprowadzania zmian zwykle koniecznych w wyniku popełnionych błędów z jednej strony i efektów odpowiednio wcześniej wprowadzonych zmian, przedstawiono schematycznie na rys.2 [6]. Dobrą ilustracją omawianego zagadnienia są co pewien czas pojawiające się doniesienia prasowe o konieczności wymiany wadliwych elementów w sprzedanych samochodach, nie trudno wyobrazić sobie skutki ekonomiczne takiej operacji.

Jakość rozwiązania zadania projektowego zależy przede wszystkim od określenia stanu początkowego, na który składają się dane o obiekcie dotyczące jego własności i dotyczące oddziaływań (wymuszeń) otoczenia, oraz od zastosowanych procedur projektowych. Sformułujemy zatem kilka ogólnych uwag. W zakresie wspomnianych danych istotnie różni się projektowanie nowych wytworów od projektowania w zakresie rozwoju istniejących, często od dziesiątków lat (np. samochody).

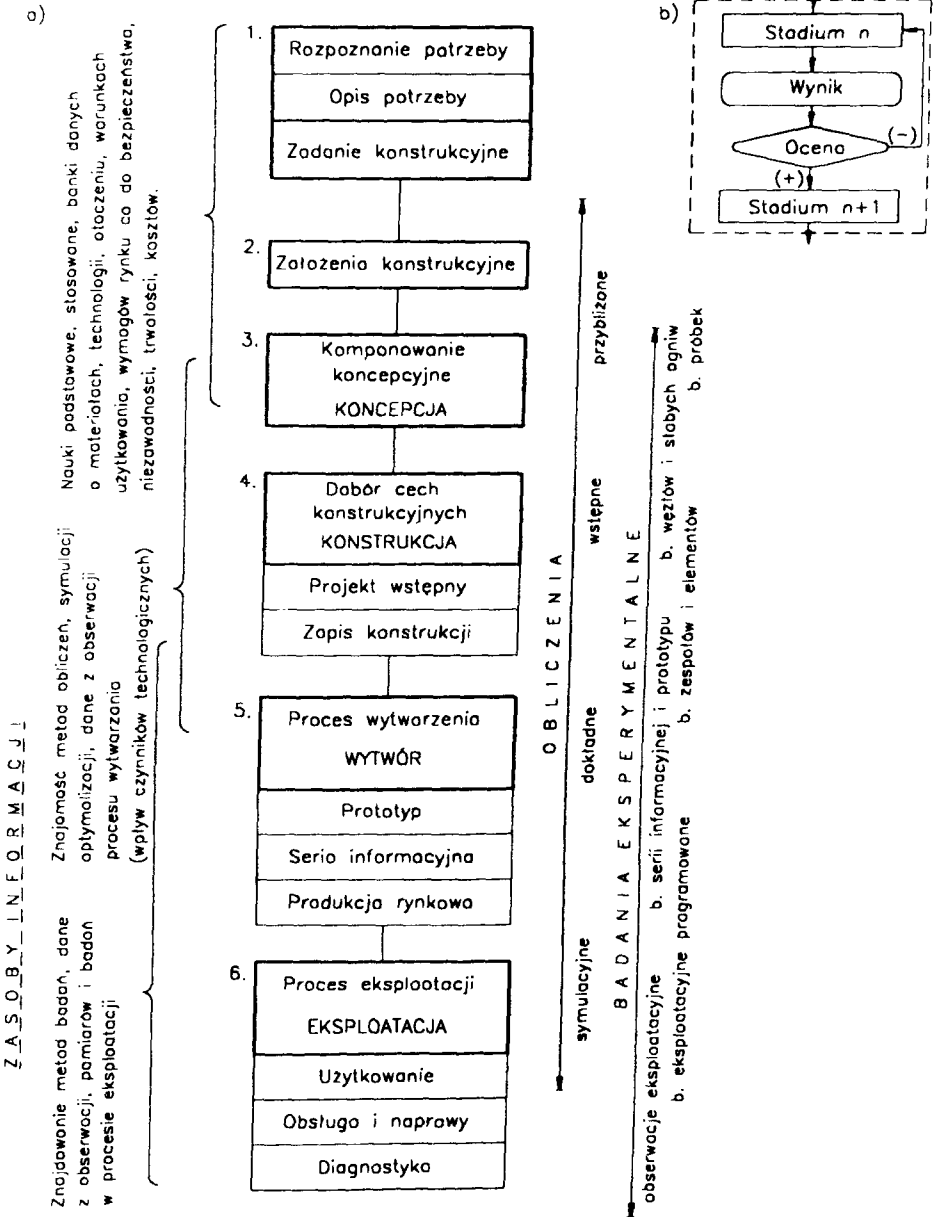
W pierwszym przypadku dysponujemy małą ilością, niepewnych danych, zwykle mamy:

- przybliżone dane o własnościach mechanicznych materiałów konstrukcyjnych;
- niepewne dane o karbach konstrukcyjnych, wadach technologicznych (postać, wielkość i rozkład);
- prawie całkowity brak danych o przebiegach obciążeń eksploatacyjnych, wpływie otoczenia na przebieg procesu zmęczenia.

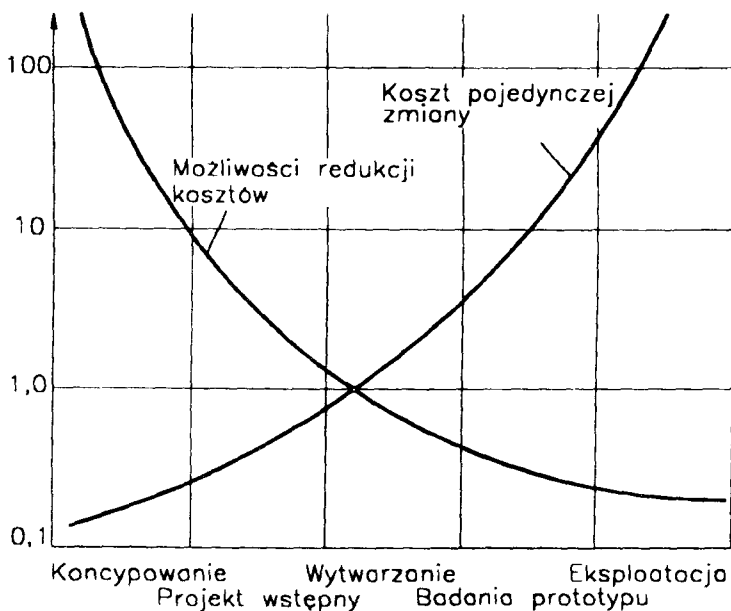
W drugim przypadku dysponuje się bogatym „bankiem danych”, który każdy poważny producent tworzy na tle badań wcześniejszych wersji od momentu ich opracowania w procesie projektowo-konstrukcyjnym do momentu ich likwidacji.

Z przedstawionych dotąd uwag wynika duża złożoność problemu i stąd potrzeba wyboru zaledwie kilku zagadnień do dalszego omówienia. W pracy dokonano wyboru kilku przykładów analizy zmęczeniowej w różnych fazach istnienia wytworu i wskazania źródeł literaturowych przydatnych w rozwiązywaniu dalszych zagadnień dla przypadku rozwiązywania nowych zadań projektowych. Należy podkreślić, że zarówno obliczenia, jak i badania zmęczeniowe są zabiegami sprawdzającymi wcześniej określonych cech konstrukcyjnych.

W dalszych punktach omówione zostaną kolejne stadia procesu projektowo-konstrukcyjnego, wytwórczego, eksploatacyjnego oraz weryfikacji analitycznej i doświadczałnej. W każdym stadium obowiązują zabiegi iteracyjne, których schemat pokazano na rys. 1b.



Rys. 1. Zabiegi weryfikacyjne w poszczególnych stadiach procesu projektowo-konstrukcyjnego, wytwórczego i eksploatacji



Rys. 2. Koszty zmian i efekty zmian w poszczególnych fazach istnienia wyrobu

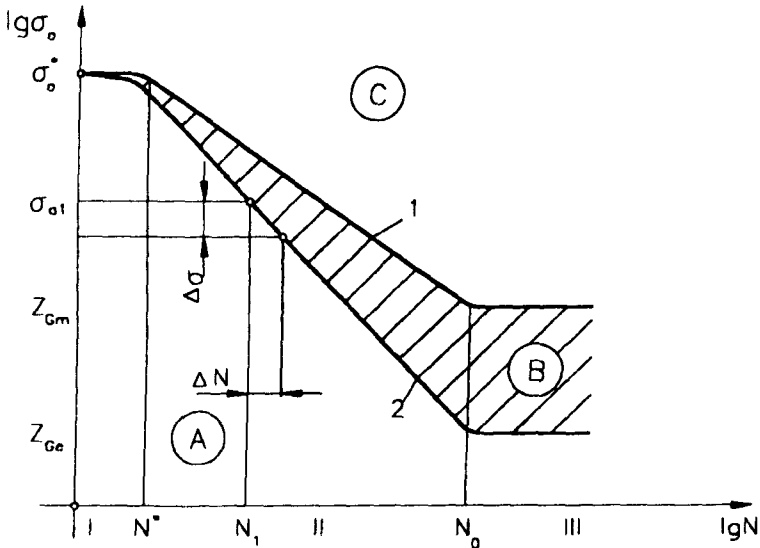
### 3. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE

Założenia konstrukcyjne obejmują: opis (istotę) działania, dane ilościowe i sytuacyjne. W wymienionych grupach zagadnień tkwią problemy zmęczeniowe, które należy uwzględnić. Dane ilościowe mają bezpośredni wpływ na poziom zmiennych obciążeń, ich częstotliwość i charakter przebiegu. Zagadnienia te wyływają z zakładanych wydajności, parametrów ruchu, wymaganej trwałości itp. Dane sytuacyjne określają ponadto główne czynniki oddziaływania otoczenia na maszynę poza czynnikami roboczymi (głównie obciążeniem zmiennym, często zmienną temperaturą); dotyczy to oddziaływań korozyjnych, erozyjnych, promieniowania, temperatury otoczenia itp. Elementom w procesie wytwórczym nadaje się szereg cech zmieniających własności mechaniczne zastosowanych tworzyw, szczególnie własności cyklicznych (np. budowa geometryczna i strukturalna warstwy wierzchniej). Intensywność oddziaływania wymienionych czynników zależy w dużej mierze od założeń konstrukcyjnych i może być zilustrowana na wykresie zmęczeniowym (rys.3), z którego wynikają następujące spostrzeżenia:

- obszar B na wykresie leżącym pomiędzy wykresem zmęczeniowym dla stosowanych materiałów konstrukcyjnych (1) a wykresem dla elementu konstrukcyjnego (2) zależy od cech konstrukcyjnych elementów i oddziaływania czynników wytwórczych i eksploatacyjnych;
- z analizy zjawisk zmęczeniowych wynika, że w zależności od poziomu obciążeń cyklicznych występują w materiale konstrukcyjnym szczególnie w obszarach

- karbów znaczne odkształcenia plastyczne, malejące wraz z obniżaniem się obciążenia, co ma wpływ na dobór odpowiednich metod obliczeń sprawdzających;
- nieznaczne obniżenie poziomu zmiennych naprężeń (np.  $\Delta\sigma = 20\%$ ) powoduje, w zależności od własności cyklicznych analizowanego elementu, wzrost trwałości w granicach 4÷20 krotnie.

Zasygnalizowane dane znaleźć można w licznej literaturze zawierającej tzw. „klastykę zmęczenia materiałów i konstrukcji” [7, 8, 9].



Rys. 3. Schematyczne ujęcie wykresu zmęzeniowego dla próbki 1 i elementu konstrukcyjnego 2

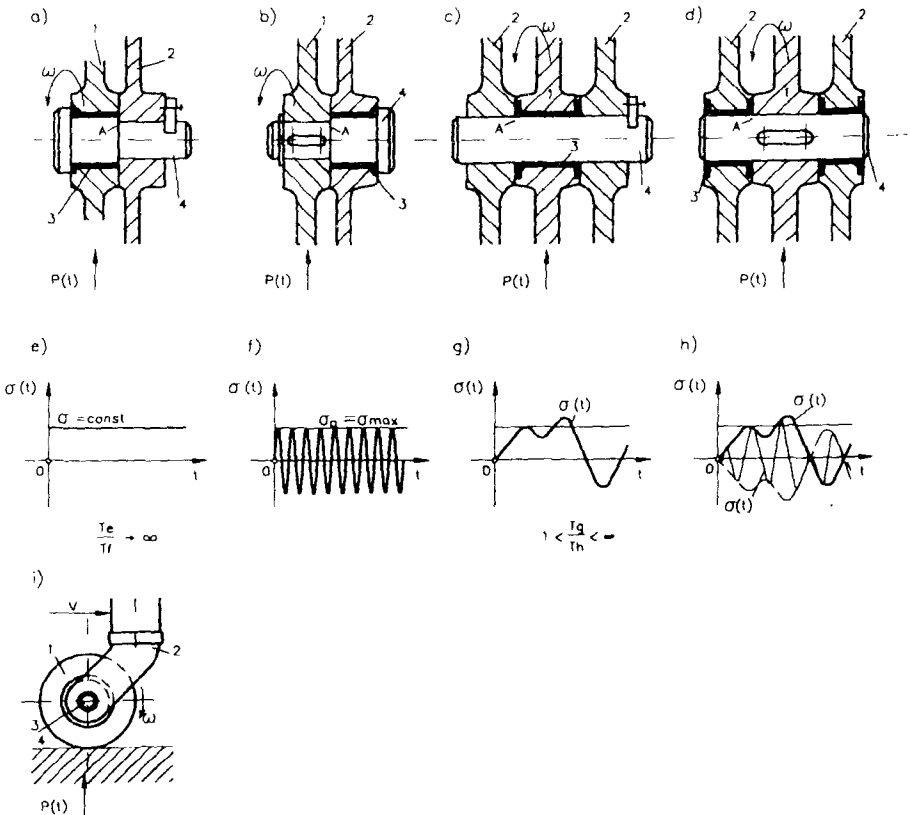
#### 4. ANALIZA KONCEPCYJNA

W analizie koncepcyjnej dążymy do opracowania licznego zbioru możliwych koncepcji, z którego w oparciu o kryteria, dokonuje się wyboru koncepcji do rozwiązania zadania konstrukcyjnego. Wynikiem tej analizy jest zatem koncepcja będąca zarysem rozwiązania konstrukcyjnego. Aby uniknąć w pracy jedynie ogólnych opisów, rozważony zostanie przykład analizy rozwiązań konstrukcyjnych koła jezdnego (np. w szybowcu) ze względu na trwałość zmęzeniową osi (rys.4). Nie wnikamy tu w szczegóły rozwiązania np. ułożyskowania (toczne, ślizgowe, sposobów smarowania itp.). Na rys. 4a i 4b pokazano układy z jednostronnie utwierdzoną osią, natomiast na rys. 4c i 4d osie dwustronnie podparte, ponadto przypadek a i c kwalifikowane są do tzw. osi stałych, natomiast przypadki b i d - do osi ruchomych. Wykres na rys. 4e odpowiada przypadkowi obciążenia osi stałej (a i c) przy jeździe po gładkiej nawierzchni, natomiast wykres na rys.4f odpowiada przypadkowi obciążenia osi ruchomej (b i d) przy jeździe po gładkiej nawierzchni. W przypadku osi stałej w przekroju przewidywanych pęknięć występują naprężenia stałe, natomiast w przekroju osi ruchomej silnie zmienne sinusoidalnie

z częstotliwością równą obrotom koła. Z punktu widzenia pęknięć zmęczeniowych, trwałość osi stałej jest nieskończenie wyższa niż osi ruchomej ( $T/T_f \rightarrow \infty$ ).

Podobnie, jednakże z mniejszym skutkiem, przedstawiają się przypadki jazdy po znacznych nierównościach nawierzchni (rys. 4g i 4h). Wykres zmian naprężeń  $\sigma(t)$  dla osi stałej (rys.4g) jest obwiednią wykresu zmian naprężeń w przekroju osi ruchomej  $\sigma'(t)$ . W zależności od częstotliwości zmian obciążenia  $\sigma(t)$  w przypadku osi stałej (rys. 4g) do obrotów koła [częstotliwość zmian  $\sigma'(t)$ ] z osią ruchomą stosunek trwałości zawiera się w granicach  $1,0 < T_g/T_h < \infty$ . Z tego prostego przykładu wynika, że wybór osi stałej ze względu na zmęczeniowe pękanie jest istotnie korzystniejszy. Należy tu jednak zaznaczyć, że w wyborze rozwiązania mogą w szczególnych przypadkach dominować inne kryteria, np. łożyskowanie (zestawy kołowe w kolejnictwie) i pasowania (stały otwór w przypadku a i b, stały wałek w przypadku c i d).

Przytoczony przykład dowodzi, jak istotne, ze względu na trwałość zmęczeniową, decyzje podejmuje się w fazie analizy koncepcji.



Rys. 4. Wpływ łożyskowania koła jeźdnego na przebieg naprężeń w przekroju przewidywanego pęknięcia zmęczeniowego: 1 - koło, 2 - korpus, 3 - łożysko, 4 - oś (sworzeń)

## 5. DOBÓR CECH KONSTRUKCYJNYCH

W fazie doboru cech konstrukcyjnych (geometrycznych, materiałowych i dynamicznych) istnieje jedynie możliwość ich weryfikacji metodami analitycznymi, ze względu na brak materialnych obiektów do badań. W obliczeniach tych opieramy się na danych literaturowych i zasobach danych eksperymentalnych zrealizowanych wcześniej obiektów podobnych. W tych warunkach celowym jest stosowanie najprostszych metod. W literaturze powszechnie zaleca się stosowanie metod opartych na liniowych hipotezach sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w ujęciu naprężeniowym, np. Palmgre-na-Minera i Haibacha, dane na ich temat i ocenę dokładności obliczeń podano w pracy [10]. W tym opracowaniu zwrócona zostanie uwaga na odmienną metodę opartą na analizie związków statystycznych pomiędzy trwałością wyznaczoną przy obciążeniu sinusoidalnym (podstawowe badania własności cyklicznej materiałów, dobrze opisane w literaturze) a trwałością wyznaczoną w warunkach obciążeń losowych lub programowanych [10]. Na rys.5 przedstawiono rozkłady amplitud dla obciążenia sinusoidalnego (a) i przebiegów losowych o różnym natężeniu obciążenia zmiennego (b, c i d). Najcięższymi ze względu na zmęczeniowe pękanie jest wahadłowe obciążenie sinusoidalne, natomiast pozostałe w kolejności pokazanej na rys. 5b, 5c i 5d. Miarą intensywności obciążenia może być współczynnik wypełnienia widma  $\zeta$  zdefiniowany jako stosunek pól F1/F2, gdzie F1 =  $\sigma_{\text{amax}} n_0$  (jest polem prostokąta na rys.5a), a F2 - jest polem zawartym pod wykresem rozkładu amplitud (pola zakreskowane na rys.5b, 5c i 5d). Wykresem trwałości zmęczeniowej dla obciążenia sinusoidalnego (rys.5a) jest wykres Wöhlera (1) na rys.5e, natomiast dla obciążenia losowego wykres (2). Z badań wynika, że dla tego samego poziomu naprężeń  $\sigma_{a1} = \sigma_{\text{amax}}$  różnica w trwałości  $N_1$  i  $N_{C1}$  jest tym większa, im mniejszą wartość ma współczynnik wypełnienia widma  $\zeta$ . Zależność pomiędzy wymienionymi trwałościami wyprowadzona w pracy [10] ma postać:

$$\lg N_c = \zeta^{-r} \lg N \quad (1)$$

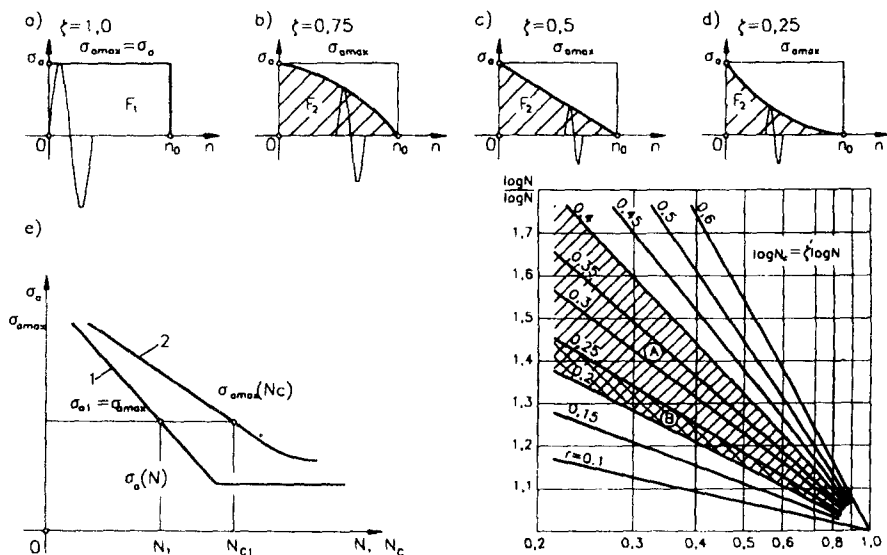
lub podstawiając dane z opisu wykresu zmęczeniowego Wöhlera

$$\sigma_a^m N = C \quad (2)$$

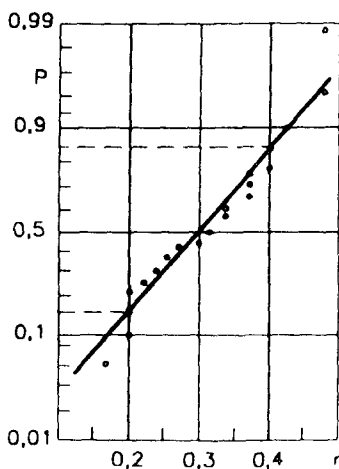
otrzymuje się:

$$\lg N_c = \zeta^{-r} \log \frac{C}{\sigma_{a \text{ max}}^m} \quad (3)$$

Wartość wykładnika  $m$  i stałej  $C$  znaleźć można dla materiałów konstrukcyjnych (nie tylko stali) w bogatej literaturze np. [11]. A zatem na podstawie wzoru (3) lub, opracowanego na jego podstawie, wykresu (rys.5f) można dokonać, w sposób znacznie łatwiejszy niż w przypadku innych metod, analizy wpływu przebiegu obciążenia (współczynnik  $\zeta$ ) i wartości obciążeń  $\sigma_{\text{amax}}$  na trwałość zmęczeniową elementu konstrukcyjnego i dobrać na tej podstawie właściwe cechy konstrukcyjne. Pozostaje jedynie dobranie właściwej wartości  $r$ . Z licznych badań własnych i na podstawie danych z literatury światowej wynika, że wartość  $r$  zawarta jest w przedziale (0,2÷0,4), pełny rozkład wartości  $r$  pokazano na rys.6. Dla elementów zawieszania pojazdów drogowych wartości  $r \cong 0,2$ .



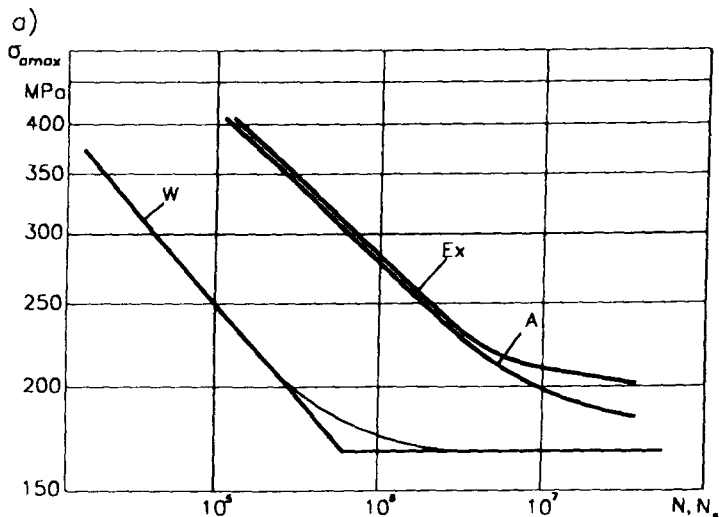
Rys. 5. Ilustracja obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych opartych na zależnościach statycznych



Rys. 6. Rozkład wartości wykładnika potęgi  $r$

Na rys.7 pokazano przebiegi wykresów trwałości zmęczeniowej osi wykonanej ze stali 45 mającej w przekroju przewidywanego pęknięcia współczynnik koncentracji naprężeń  $\alpha_k = 1,63$  oraz poddanej obciążeniu losowemu o  $\zeta=0,33$  na tle wykresu zmęczeniowego Wöhlera (W). Z przebiegu wykresu obliczeniowego A i danych eksperymentalnych  $Ex$  wynika duża zgodność wyników obliczeń i badań. Obliczenia przepro-

wadzone dla  $r=0,2$ . Mając tego rodzaju wykres można dla dowolnej założonej trwałości  $N_c$  wyznaczyć poziom dopuszczalnych wartości  $\sigma_{amax}$  w niebezpiecznym przekroju.



Rys. 7. Przykład zgodności obliczeń z wynikami badań zmęzeniowych osi wykonanej ze stali 45 dla  $z = 0,32$ . W - wykres zmęzeniowy (Wohlera), Ex - wykres trwałości zmęzeniowej wyznaczony eksperymentalnie, A - wykres trwałości wyznaczony analitycznie

## 6. PROJEKT WSTĘPNY - BUDOWA PROTOTYPU

Projekt wstępny umożliwia zastosowanie w obliczeniach odpowiednio złożonych metod obliczeń, natomiast budowa prototypu przeprowadzenie badań doświadczalnych laboratoryjnych na elementach i zespołach.

W zakresie metod obliczeniowych są to tzw. metody: inicjacyjne, propagacyjne i inicjacyjno-propagacyjne. Podziału tego dokonano ze względu na wyróżnienie trwałości do inicjacji makropęknięcia i trwałości związanej z okresem rozwoju pęknięcia zmęzeniowego. W przypadku, gdy okres rozwoju pęknięcia zmęzeniowego jest pomijalnie krótki w całkowitej trwałości, stosujemy tzw. metody inicjacyjne. W przypadku istnienia tolerowanych wad technologicznych (np. spawalniczych, odlewniczych, po kuciu) okres inicjacji pęknięcia może być pomijalnie mały i wówczas stosujemy tzw. metody propagacyjne. W pozostałych przypadkach uwzględniamy okresy inicjacji i propagacji pęknięć, stosując tzw. metody inicjacyjno-propagacyjne.

Trwałość w okresie propagacji wyznaczamy w oparciu o teorię mechaniki pękania, a przykład analizy w tym zakresie omówiono w pracy [12].

Metody tzw. inicjacyjne można podzielić na: naprężeniowe, odkształceniowe i energetyczne. Opierają się one na fenomenologicznych opisach procesu zmęczenia, znanych jako hipotezy sumowania uszkodzeń zmęzeniowych [13].

W zakresie naprężeniowym oryginalnym opracowaniem jest hipoteza sumowania uszkodzeń oparta na koncepcji linii stałych uszkodzeń zmęzeniowych [14]. Koncepcja ta może być zastosowana w ujęciu odkształceniowym i energetycznym oraz w zastoso-



waniach do obliczeń elementów konstrukcyjnych z tworzyw sztucznych [15]. Przykład obliczeń w ujęciu odkształceniowym zamieszczono w pracy [16].

Opisane wyżej obliczenia mogą być przeprowadzone w fazie znajomości cech konstrukcyjnych elementów (karby), technologii wykonania i przebiegów obciążeń, a zatem w fazie projektu wstępnego, budowy i badań prototypu. Faza ta umożliwia realizację badań laboratoryjnych na elementach i zespołach - tzw. programowanych badań uwzględniających obciążenia i inne czynniki eksploatacyjne pochodzące ze wstępnych pomiarów na całym obiekcie.

Metody programowanych badań zmęczeniowych opisane zostały w monografii [17]. Przykład stanowiska do badań programowanych ram motocyklowych z możliwością automatycznego sterowania obciążeniem pokazano na rys.8.

## 7. SERIA INFORMACYJNA - PRODUKCJA RYNKOWA - EKSPLOATACJA

Wykonanie serii informacyjnej stwarza możliwości badań całych obiektów w ilości uzasadniającej statystyczne wnioskowanie. Program tych badań jak i w części badań prototypu, a zwykle badań produkowanych seryjnie obiektów, jest szeroki i znacznie przekracza potrzeby badań trwałości zmęczeniowej jego elementów. Programy te obejmują badania jakościowe, w tym problematykę bezpieczeństwa, a w niej problematykę niezawodności.

Można wyróżnić szereg rodzajów tych badań, w tym opracowaniu wskazane zostaną te, które przeprowadzone zostały w naszym ośrodku akademickim, w kolejności zgodnej ze schematem na rys.1.

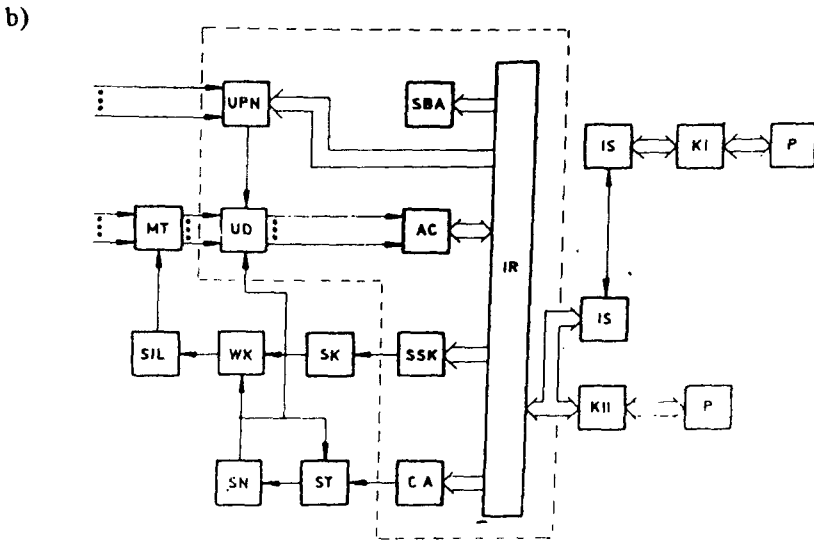
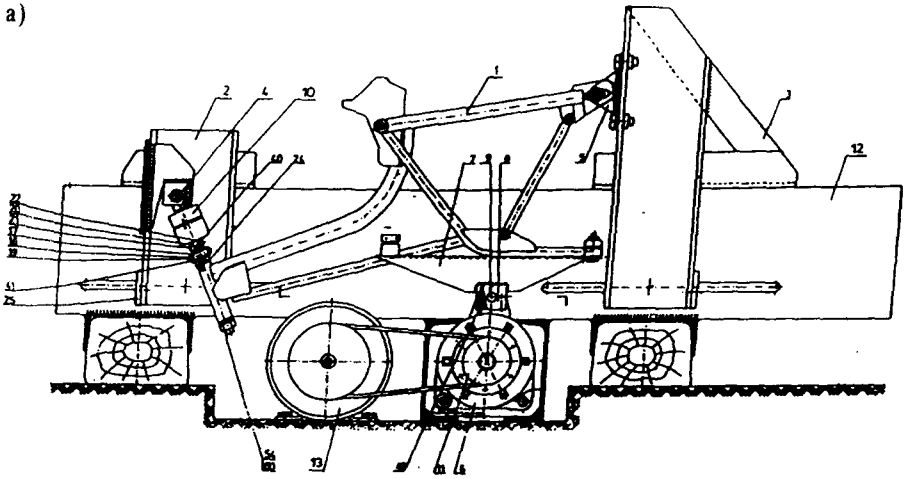
*Badania stanowiskowe całych obiektów* z symulacją wymuszeń opracowanych na podstawie wstępnych pomiarów eksploatacyjnych przeprowadza się na prototypach i egzemplarzach z serii informacyjnej.

*Programowane badania eksploatacyjne* prowadzone na torach doświadczalnych i wydzielonych do testowania grupach użytkowników, przeprowadzane zgodnie ze ściśle określonym programem badań.

*Badania eksploatacyjne dozorowane*, które przeprowadza się w naturalnych warunkach eksploatacji, według ustalonego programu badań przede wszystkim w zakresie uzasadnionej statystycznie liczby obiektów badań, np. losowego doboru użytkowników, odpowiedniego doboru warunków użytkowania, obsługi, napraw, diagnostyki itp.

*Badania eksploatacyjne*, w których minimalizuje się ingerencję prowadzących badania w procesie eksploatacji, polegają zwykle na badaniach ankietowych użytkowników, badań dokumentów warsztatów serwisowych, reklamacji itp.

Procedury szczegółowe przeprowadzonych badań eksploatacyjnych pojazdów jednośladowych, analiza niezawodności, w tym uszkodzeń zmęczeniowych elementów tych pojazdów, szczegółowe badania warunków eksploatacji, danych o użytkownikach itp. przedstawione zostały w raportach z tych badań i opublikowane w monografiach książkowych [18, 19] oraz w pracy [20].



Rys.8. Stanowisko do programowanych badań zmęczeniowych ram pojazdów jednośladowych:  
 a) część mechaniczna [20]: 1 - rama motocykla, 2 i 3 - podpory, 4 i 5 - uchwyty, 6-wibrator kinematyczny o zmiennej amplitudzie przemieszczeń, 7, 8 i 9 - układ przyłożenia obciążenia, 10 - siłomierz, 11 - układ sterowania wibratorem, 12 - rama stanowiska, 13 - silnik napędowy (ważniejsze elementy i zespoły),  
 b) schemat blokowy układu sterowania: P - program, KI - komputer centralny, KII - komputer sterujący, IS - interfejs szeregowy, IR - interfejs równoległy, C/A - przetwornik cyfrowo-analogowy, ST - sterownik tyrystorowy, SN - silnik napędzający, Wk - wzbudnik kinematyczny, SIŁ - siłomierz tensometryczny, Ssk - układ sterowania silnikiem krokowym, SK - silnik krokowy, MT - mostek tensometryczny, US - układ dopasowania, UPN - układ pomiaru napięć, SBA - układ sygnalizacji błędów i awarii.

## 8. PODSUMOWANIE

Jubileuszowe okoliczności publikacji (Jubileusz 45-lecia Wydziału Mechanicznego i Akademii Techniczno-Rolniczej) sprawiły, że praca ma charakter pewnego ogólnego podsumowania prac badawczych zrealizowanych w okresie 25 lat badań dotyczących problematyki zmęczenia w procesie projektowo-konstrukcyjnym. W artykule przedstawiono procedury postępowania, które stosuje się w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn i które w przeważającej części zostały w tej Katedrze opracowane. Należy podkreślić, że metod postępowania w tym względzie jest znacznie więcej, szczególnie w odniesieniu do szczegółowych dziedzin techniki np. budowa samochodów [21] czy maszyn roboczych ciężkich [22].

Z uwag szczegółowych dotyczących podsumowania należy podkreślić:

- konieczność uwzględniania problematyki zmęczenia i zmęczeniowego pękania we wszystkich stadiach procesów: projektowo-konstrukcyjnych, wytwórczego i eksploatacji;
- dokonywanie zmian w konstrukcji w jak najwcześniejszych stadiach procesów ze względu na ekonomiczne skutki;
- iteracyjny charakter metody, obejmujący pętle iteracji wewnątrz poszczególnych stadiów oraz sprzężania iteracyjne pomiędzy poszczególnymi stadiami o różnym zakresie (skrajne zewnętrzne sprzężanie od eksploatacji do opisu potrzeby i sformułowania zadania projektowego);
- przenikanie się metod obliczeniowych i eksperymentalnych w całym ciągu działań zasadniczych (rys. 1a), z podkreśleniem niewspółmiernie niższych kosztów weryfikacji analitycznej i symulacji komputerowych w porównaniu z kosztami badań;
- możliwość ograniczenia zakresu badań eksperymentalnych przez odpowiednią weryfikację analityczną;
- konieczność obserwacji i ciągłego gromadzenia danych o obiekcie, procesach, środowisku i rynku.

## LITERATURA

- [1] Szala J.: Badania zmęczeniowe w pracach Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn, Akademia Techniczno-Rolnicza, Zeszyty Naukowe ATR nr 192, Mechanika 37, Bydgoszcz 1995.
- [2] Ohchuda H.: Analysis of Service Failures of Hitachi Products (1970-1975), 1979.
- [3] Duga J.J., et.al.: The Economic Effects of Fracture in the United States, Part 2 - A Report to NBS by Battelle Columbus Laboratories, 1983.
- [4] Kobayaski, Skinobu: Optimum Aircraft Structural Design and Verification for Users, in Proc. of the 18<sup>th</sup> Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, Melbourne, Australia, 1995.
- [5] Dietrych J.: System i konstrukcja, WNT, Warszawa 1985.
- [6] Masing W.: Handbuch der Qualitätssicherung, Carl-Hauser-Verlag, München, Wien 1988.
- [7] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych, PWN, Warszawa 1991.
- [8] Kocańda S.: Zmęczeniowe pęknięcie metali, PWN, 1985.

- [9] Szala J.; Obciążenia i trwałość zmęczeniowa elementów maszyn, Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 1989.
- [10] Szala J.: Ocena trwałości zmęczeniowej elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych, Zeszyty Naukowe ATR nr 79, Mechanika 22, Bydgoszcz 1980.
- [11] Troščenko V. T., Sosnovskij L.A.: Soprotivlenije ustalości metallov i splavov, Naukova Dumka, Kijev 1987.
- [12] Szala J., Topolinski T.: Obliczenia elementów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń stochastycznych dla etapu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego, Zeszyty Naukowe ATR nr 137, Mechanika 30, Bydgoszcz 1986.
- [13] Szala J.: Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych - wybrane zagadnienia. Mechanika, Bydgoskie Towarzystwo Naukowe, Prace Wydziału Nauk Technicznych, Seria B Nr 15, PWN Warszawa-Poznań 1986.
- [14] Szala J., Zawisłak S.: Application of Computer Simulation Method for Determining a Distribution Type of Construction Parts Patigue Life. The Archive of Mechanical Engineering, 1990. Zeszyt 3.
- [15] Szala J., Topolinski T.: Obliczenia trwałości zmęczeniowej itamidu 35 oparte na hipotezie linii stałych uszkodzeń zmęczeniowych. PAN, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Rozprawy Inżynierskie, Engineering Transactions, 38, 3-4, 415-428, 1990.
- [16] Szala J., Topoliński T.: Obliczenia elementów konstrukcyjnych przy obciążeniach stochastycznych dla etapu do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. Zeszyty Naukowe ATR nr 137, Mechanika 30, Bydgoszcz 1986.
- [17] Szala J.: Podstawy programowanych badań i obliczeń zmęczeniowych w konstrukcji maszyn. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1978.
- [18] Jazdon A., Harmoza J.: Uszkodzenia pojazdów jednośladowych, WKiŁ, Warszawa 1981.
- [19] Jazdon A.: Niezawodność pojazdów jednośladowych, WPM-Wema, Warszawa 1988.
- [20] Szala J., Boroński D.: Fatigue Investigations of One-Track Vehicles, Symposium Fatigue Design, Helsinki 1995.
- [21] Fatigue Design Handbook, Society of Automotive Engineers, USA, 1988.
- [22] Sobczykiewicz W.: Wymiarowanie spawanych konstrukcji nośnych maszyn w zakresie trwałości zmęczeniowej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.

## THE FATIGUE PROBLEMS IN DESIGNING PROCESS

### SUMMARY

The methods of calculation and testing of structures in particular phases of their existing were discussed in the paper. The paper emphasised on possibility of a structure verification in these phases. General problems were illustrated by practical examples and by indicating the references containing detailed data on methods of calculations and testing. These data were grounded on the investigations realised in Department of Machines Design of University of Technology and Agriculture in Bydgoszcz over the period of 1969-1996 year.



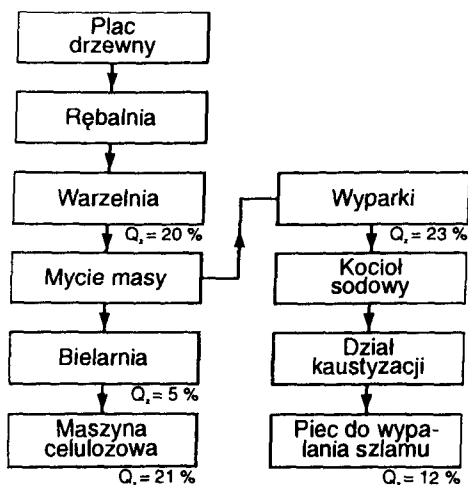
Marian SZYMAŃSKI

## DOSKONALENIE OBIEGÓW CIEPŁA W PROCESACH TECHNOLOGICZNYCH CELULOZOWNI

Na podstawie bilansów cieplnych i przeprowadzonych badań rozpatrzono możliwości zmniejszenia zużycia ciepła poprzez zamykanie jego obiegu w procesach technologicznych w celulozowniach siarczanowych. Rekuperacja ciepła odpadowego winna być przeprowadzona przy możliwie wysokich parametrach - temperaturze i ciśnieniu czynników. Odzyskane ciepło należy zwracać do procesu technologicznego stosując je do wstępnego podgrzewania czynników.

### 1. WPROWADZENIE

W wielu procesach technologicznych wykorzystywana jest tylko część doprowadzanego ciepła, a część pozostała odprowadzana jest od procesu jako ciepło odpadowe i poddawana rekuperacji dla odzysku energii i poprawie gospodarki cieplnej procesu. Przykładem takiego procesu technologicznego jest wytwarzanie masy celulozowej z drewna. Proces ten składa się z licznych operacji przeprowadzanych w oddzielnych działach celulozowni. Schemat blokowy celulozowni przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy celulozowni siarczanowej

Na schemacie tym podano w procentach orientacyjne zużycie energii cieplnej  $Q_c$  w poszczególnych działach celulozowni. W nowoczesnych celulozowniach siarczanowych energia uzyskana ze spalania łągi i kory wystarcza z nadwyżką dla pokrycia zapotrzebowania zarówno na ciepło, jak i energię elektryczną. Energia elektryczna stanowi około 20% całkowitej energii - sumy energii cieplnej i elektrycznej - potrzebnej do przeprowadzenia procesu roztwarzania siarczanowego [1].

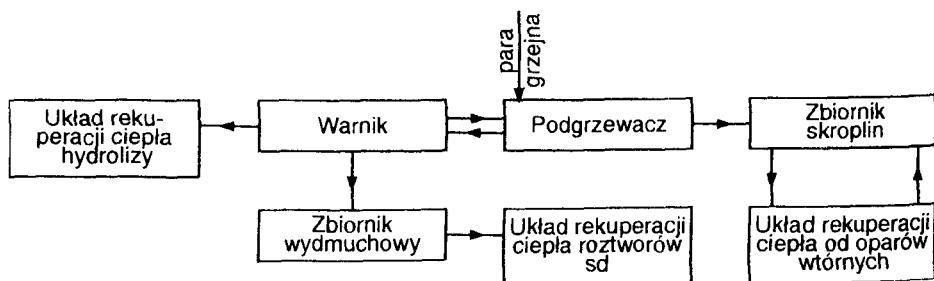
Podstawowym źródłem oszczędności w zużyciu ciepła w celulozowni jest ciepło odpadowe odprowadzane z operacji procesu technologicznego. Powtórne wykorzystanie go w procesie technologicznym umożliwi uzyskanie oszczędności pary grzejnej doprowadzanej do podgrzewania czynników biorących udział w procesie wytwarzania masy celulozowej.

Na podstawie analizy przepływu energii w poszczególnych działach celulozowni oraz wyników przeprowadzonych badań nad zużyciem w nich ciepła określono w dalszej części pracy możliwości poprawy gospodarki cieplnej w celulozowniach siarczanowych.

## 2. ANALIZA PRZEPIYU CIEPŁA W CELULOZOWNI

Plac drzewny i rębarnia są działami pobierającymi przede wszystkim energię elektryczną używaną do zasilania silników zainstalowanych w nich maszyn. Duże ilości energii w postaci ciepła doprowadzane są do warzelni. Przepływ energii w tym dziale rozpatrzono na przykładzie warzelni siarczanowej roztwarzającej drewno metodą dwustopniową i wytwarzającą masę celulozową wiskozową. Pierwszy stopień roztwarzania stanowi hydroliza wstępna, a drugi roztwarzanie siarczanowe.

Układ technologiczny warzelni przedstawiono w sposób uproszczony na schemacie blokowym zamieszczonym na rysunku 2.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy warzelni siarczanowej dwustopniowego roztwarzania drewna

Ilość ciepła odprowadzanego od procesu technologicznego do układów rekuperacji w warzelni określa zależność :

$$Q_0 = Q_{01} + Q_{02} + Q_{03} + Q_{04} , \quad (1)$$

gdzie:

- $Q_0$  - ilość ciepła odprowadzanego od procesu technologicznego;
- $Q_{01}$  - ciepło odprowadzane z podgrzewaczy warków ze skroplinami pary grzejnej;
- $Q_{02}$  - ciepło odprowadzane z warków z oparami z odgazowania przy hydrolizie wstępnej;
- $Q_{03}$  - ciepło odprowadzane z hydrolizatem;
- $Q_{04}$  - ciepło odprowadzane z oparami ze zbiornika wydmuchowego.

Wartość ciepła odzyskanego w układach rekuperacji jest równa:

$$Q_r = Q_{r1} + Q_{r2} + Q_{r3} + Q_{r4}, \quad (2)$$

gdzie:

- $Q_r$  - ciepło odzyskane z ciepła odpadowego w układach rekuperacji;
- $Q_{r1}$  - ciepło odzyskiwane od skroplin pary grzejnej;
- $Q_{r2}$  - ciepło odzyskiwane w skraplaczach oparów odprowadzanych ze zbiornika hydrolizatu;
- $Q_{r3}$  - ciepło odzyskiwane w skraplaczu wtórnym i chłodnicy skroplin hydrolizatu;
- $Q_{r4}$  - ciepło odzyskiwane w wymiennikach ciepła od brudnego kondensatu siarczanowego.

W warzelni odzyskiwana jest część ciepła unoszonego ze skroplinami pary grzejnej. Skropliny odprowadzane z podgrzewaczy warków do zbiornika skroplin ulegają w nim rozprężeniu, któremu towarzyszy powstawanie oparów wtórnych, a następnie w wyniku skraplania w skraplaczach przeponowych odprowadzana jest od nich ilość ciepła określona zależnością:

$$Q_{r1} = m_s \frac{i_{s1} - i_{s2}}{i_o'' - i_{s2}} i_o'', \quad (3)$$

gdzie:

- $m_s$  - masa skroplin pary grzejnej równa w przybliżeniu masie odprowadzanej do podgrzewaczy pary w kg;
- $i_{s1}$  - entalpia skroplin doprowadzanych do zbiornika w kJ/kg;
- $i_{s2}$  - entalpia skroplin odprowadzanych ze zbiornika w kJ/kg;
- $i_o''$  - entalpia oparów wtórnych powstających w zbiorniku w kJ/kg.

Wartości ciepła  $Q_{r2}$ ,  $Q_{r3}$  i  $Q_{r4}$  obliczono z bilansów cieplnych wymienników ciepła na podstawie zależności:

$$Q = m_w \cdot c_w \cdot (t_2 - t_1), \quad (4)$$

gdzie:

- $m_w$  - masa wody przepływającej przez wymiennik ciepła w kg;
- $c_w$  - ciepło właściwe wody w kJ/kg;
- $t_1$  i  $t_2$  - temperatura wody na wlocie i wylocie z wymiennika ciepła w K.

Cała ilość ciepła odzyskanego w układach rekuperacji w warzelni zużywana jest do podgrzania wody technologicznej do temperatury około 60 - 70 °C.



Działem celulozowni pobierającym duże ilości ciepła jest również bielarnia. Ciepło doprowadzane jest tu z masą celulozową, wodą stosowaną do mycia masy i parą grzejną. Przepływ ciepła w bielarni rozpatrzono na przykładzie instalacji złożonej z sześciu wież bielarskich pracujących w układzie: I wieża  $\text{Cl}_2$  - II wieża alkaliczna 1 NaOH - III wieża podchlorynowa NaOCl - IV wieża alkaliczna 2 NaOH - V wieża  $\text{ClO}_2$  - VI wieża podchlorynowa 2 NaOCl.

Proces bielenia zakończony jest w wieżach magazynowych, gdzie masa celulozowa jest traktowana  $\text{SO}_2$ .

Para grzejna o ciśnieniu 0,6 MPa doprowadzana jest bezpośrednio do mieszalników ślimakowych zainstalowanych przy wieżach IV i V. Między kolejnymi stopniami bielenia masa celulozowa jest myta w filtrach bębnowych ssących typu "Kamyrl".

Oszczędność ciepła w bielarni uzyskano stosując do mycia masy w odpowiadających sobie stopniach bielenia poprzedzających, filtrat odprowadzany ze stopni następujących, o wysokiej temperaturze rzędu 60 °C.

Do mycia masy po I wieży bielarskiej stosowany jest filtrat z mycia masy po V wieży, do mycia masy po II wieży filtrat z filtru po IV wieży, masa po III wieży myta jest filtratem z filtru po VI wieży.

Do suszenia masy w maszynach celulozowych stosowane są suszarki wielocylindrowe lub konwekcyjne. W obu typach suszarek przeprowadzana jest rekuperacja ciepła odpadowego. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy schemat układu rekuperacji ciepła w suszarce wielocylindrowej.

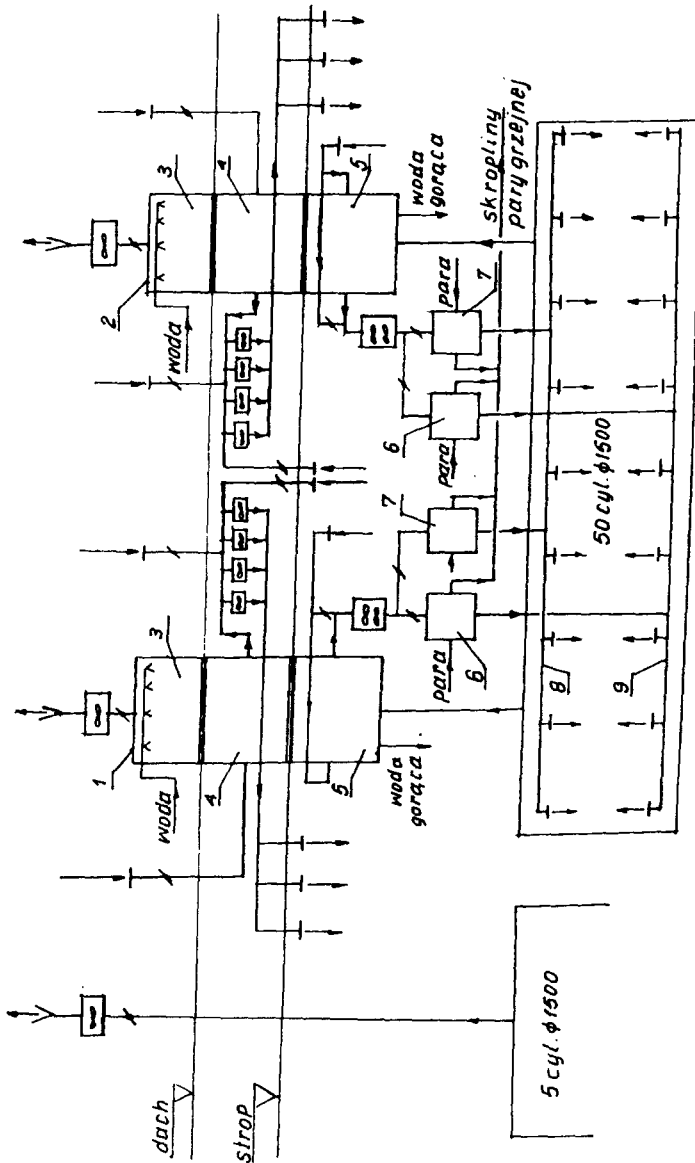
Ciepło do suszenia jest dostarczane z parą grzejną doprowadzaną do cylindrów suszących i z gorącym powietrzem nawiewanym rurami wentylującymi "kieszenie" międzycylindrowe. Powietrze to podgrzewane jest w wymiennikach płytowych układu rekuperacji.

Suszarka składa się z części wstępnej obejmującej 5 cylindrów okapturzonych osłoną otwartą oraz części suszącej, liczącej 50 cylindrów, okapturzonej osłoną całkowicie zamkniętą. Część ta podzielona jest na dwie grupy parowe i ma zainstalowaną prasę odpowietrzającą.

Opary z części wstępnej odprowadzane są za pomocą wentylatora wyciągowego nad dach hali maszyny bez rekuperacji od nich ciepła. Opary z osłony zamkniętej odprowadzane są do układu rekuperacji ciepła. Układ ten składa się z dwóch trójstopniowych, wieżowych wymienników ciepła. W wymiennikach płytowych pierwszego stopnia podgrzewane jest powietrze czerpane spod stropu hali i tłoczone następnie dwustopniowymi wentylatorami osiowymi poprzez wymienniki ciepła zasilane parą grzejną do rur wentylujących kieszenie międzycylindrowe. Powietrze to jest podgrzewane do temperatury 90 °C.

W wymiennikach płytowych drugiego stopnia ciepłem pobieranym od oparów przepływających ze stopnia pierwszego podgrzewane jest powietrze świeże tłoczone następnie do hali maszyny.

Wymienniki trzeciego stopnia są wymiennikami bezprzeponowymi, w których ciepło od oparów jest odprowadzane do wody natryskiwanej natryskami zainstalowanymi w górnej części wymiennika. Podgrzana woda odprowadzana jest z dolnej części wieży wymiennikowej. Układ rekuperacji ciepła zainstalowany przy suszarce maszyny wentyluje i ogrzewa hale maszyny celulozowej.



Rys. 3. Schemat układu rekuperacji ciepła wielocylindrowej suszarki maszyny celulozowej: 1 - wieża I wymienników ciepła, 2 - wieża II wymienników ciepła, 3 - wymiennik bezprzeponowy 3-go stopnia, 4 - wymiennik płytowy 2-go stopnia, 5 - wymiennik płytowy 1-go stopnia, 6 - wymiennik płytowy pary podgrzewający powietrze wentylujące dolny rząd kieszeni międzycylindrowych, 7 - wymiennik płytowy pary podgrzewający powietrze do wentylowania górnego rzędu kieszeni międzycylindrowych, 8 - górny przewód powietrza wentylującego kieszenie, 9 - dolny przewód powietrza wentylującego kieszenie

Duże ilości ciepła zużywane są w wyparkach zagęszczających ług powarzelny przed spaleniem go w kotle sodowym. Część tego ciepła jest odzyskiwana i wykorzystywana do podgrzewania wody technologicznej. W rozpatrywanej celulozowni ług powarzelny jest zagęszczany w wyparce pięciostopniowej. Para grzejna jest doprowadzana do pierwszego stopnia. Stopnie kolejne ogrzewane są oparami doprowadzonymi ze stopni poprzedzających. Ciepło od procesu zagęszczania jest odprowadzane z kondensatem czystym z pary grzejszej po pierwszym stopniu, z kondensatami brudnymi po kolejnych stopniach oraz z kondensatem ze skraplacza próżniowego. W wyniku rekuperacji ciepła odprowadzanego ze skroplinami ze skraplacza próżniowego odzyskiwana jest pewna ilość ciepła, którą wykorzystuje się do podgrzewania wody technologicznej do temperatury około 45 °C. Szlam pokaustyzacyjny wypalany jest w celulozowniach krajowych w piecach obrotowych. Ciepło do pieców obrotowych doprowadzane jest poprzez spalanie oleju opałowego. Spaliny odprowadzane z pieców unoszą z wodą duże ilości ciepła. Część z niego jest odzyskiwana w płuczkach Venturiego, gdzie ciepło odprowadzane od spalin wykorzystywane jest do podgrzewania wody technologicznej stosowanej następnie w dziale kaustyzacji.

Ciepło odzyskane w wyniku rekuperacji zawracane jest bezpośrednio do obiegu w bielarni w suszarce maszyny celulozowej lub wykorzystywane jest do podgrzewania wody technologicznej do temperatury 60 - 70 °C w pozostałych działach.

Rekuperacja ciepła w warzelni przebiega przy obniżaniu jego parametrów w wyniku rozprężania oparów będących nośnikiem ciepła odpadowego. Odzyskane ciepło ma zbyt niskie parametry aby mogło być efektywnie zastosowane do podgrzewania wsadu warnika. Konwencjonalna metoda rekuperacji ciepła w warzelni nie stwarza więc możliwości wykorzystania odzyskanej energii w tym dziale do zmniejszenia zużycia pary grzewczej do podgrzewania wsadu warnika i częściowego zamykania w nim w ten sposób obiegu ciepła.

Zasada dążenia do zamykania obiegu ciepła w warzelni znalazła zastosowanie w metodzie R.D.H., w której rekuperacja ciepła przeprowadzana jest od ługu powarzelnego o wysokiej temperaturze bez jego rozprężania, wypieranego z warnika po zakończeniu roztwarzania.

Ciepło odprowadzane od ługu wykorzystywane jest do podgrzewania ługu białego tłoczzonego do warnika. Zawrócenie do procesu odzyskanego ciepła umożliwia uzyskanie oszczędności pary grzejszej do 85%.

### 3. BADANIA PRZEPLYWU CIEPŁA W CELULOZOWNI

Badania nad zużyciem ciepła w celulozowni przeprowadzono metodą badań statycznych, dokonując pomiarów parametrów pracy w poszczególnych jej działach w warunkach normalnej eksploatacji w okresie rocznym.

Ze względu na sposób pracy warzelni z warnikami okresowymi, polegający na jednoczesnym roztwarzaniu drewna w kilku warnikach przy różnych etapach procesu, badania odniesiono do warzelni traktowanej jako całość rozpatrując jej prace w czasie jednej doby. Odniesienie badań do pojedynczego, wybranego warnika podczas normalnej pracy warzelni byłoby trudne, gdyż jednocześnie przeprowadzane jest w tej samej instalacji odgazowywanie dwóch lub więcej warników. Duża objętość zbiornika wydmuchowego, przy stosunkowo częstych wydmuchach masy z warników, umożliwia ciągłą pracę urządzeń do rekuperacji ciepła.

W pozostałych działach celulozowni proces technologiczny prowadzony jest w sposób ciągły.

W tabeli 1 podano zestawienie wyników badań zużycia ciepła w warzelnii. Podane wartości są odniesione do jednego turnusu roztwarzania w warniku o pojemności 125 m<sup>3</sup>. Sprawność cieplną rekuperacji obliczono jako iloraz ciepła odzyskanego i ciepła odprowadzonego do rekuperacji.

Tabela 1. Bilans cieplny warzelnii pracującej metodą roztwarzania dwustopniowego - pierwszy stopień - hydroliza wstępna, drugi stopień - roztwarzanie siarczanowe, i wytwarzającego masę celulozową wiskozową, wydajność  $m = 8000$  kg cel./turnus, pojemność warnika  $V = 125$  m<sup>3</sup>

Lp.	Czynnik przenoszący ciepło	Ilość ciepła	
		MJ/turnus	Udział w %
	<b>Hydroliza wstępna</b>		
1.	Ciepło doprowadzane:		
	- ze zrębkami	1435,40	2,49
	- z wodą	6699,20	9,69
	- z parą grzejną	49455,30	87,82
	razem	57589,93	100,00
2.	Ciepło odprowadzane:		
	- do układu rekuperacji	36107,70	62,70
	- zaakumulowane we wsadzie warnika po hydrolizie	18729,40	32,50
	- straty do otoczenia	2752,80	4,78
	razem	57589,90	100,00
3.	Ciepło odzyskane:	15516,80	26,9
	<b>Roztworzenie siarczanowe</b>		
4.	Ciepło doprowadzane:		
	- zaakumulowane we wsadzie	18729,40	25,80
	- z ługiem białym	12696,66	17,50
	- z parą grzejną	41122,18	56,60
	razem	72548,24	100,00
5.	Ciepło odprowadzane:		
	- do układu rekuperacji	33992,80	46,80
	- ciepło pozostałe w masie w zbiorniku wydmuchowym	31060,36	42,80
	- strata energii na wydmuch masy z wirnika	4597,50	6,30
	- straty cieplne do otoczenia	2897,50	3,90
	razem	72548,16	100,00
6.	Ciepło odzyskane:	10834,20	14,90
7.	Sprawność cieplna rekuperacji:		
	- układ hydrolizy		43,00
	- układ roztwarzania siarczanowego		31,87
	- całość procesu		37,60

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań zużycia ciepła w bielarni, maszynie celulozowej, wyparce i w piecu obrotowym do wypalania szlamu pokaustyzacyjnego. Dane zamieszczone w tabelach charakteryzują ilości ciepła odzyskiwanego w poszczególnych działach celulozowni. Ciepło to wykorzystywane jest do podgrzewania wody technolo-

gicznej. Konwencjonalny układ do rekuperacji ciepła odpadowego w warzelni działa przy rozprężaniu czynników unoszących ciepło do ciśnienia otoczenia i wykorzystaniu ciepła skraplania powstających przy rozprężaniu oparów. Rekuperacji ciepła towarzyszy więc obniżanie parametrów odzyskiwanej energii, co utrudnia ponowne wprowadzenie jej do procesu technologicznego.

Tabela 2. Zużycie ciepła w niektórych działach celulozowni siarczanowej

Lp.	Dział celulozowni	Zużycie ciepła	
		w MJ/24h	udział w %
1.	BIELARNIA		
	- ciepło doprowadzane z masą celulozową	226260	6,2
	- ciepło doprowadzane z parą grzejną bezpośrednią	544231	14,9
	- ciepło doprowadzane z wodą do mycia i rozcieńczania	2284723	62,7
	- ciepło unoszone przez filtrat zawracany do mycia	587986	16,1
2.	MASZYNA CELULOZOWA		
	- ciepło odprowadzane do układu rekuperacji	1159680	100,0
	- ciepło odzyskane	66261	5,7
3.	WYPARKA ŁUGU POWARZELNEGO		
	- ciepło doprowadzane z parą grzejną	1944166	55,9
	- ciepło doprowadzane z ługiem powarzelnym	1532582	44,1
	- ciepło odprowadzane z kondensatem pary grzejnej	571533	16,4
	- ciepło odprowadzane z brudnym kondensatem	637388	18,3
	- ciepło odzyskane w skraplaczu próżniowym	149432	4,3
	- ciepło odprowadzane z ługiem zagęszczonym	717038	20,6
4.	PIEC OBROTOWY DO WYPALANIA SZLAMU POKAUSTYZACYJNEGO		
	- ciepło doprowadzane z olejem opałowym	1390747	
	- ciepło odzyskane w płuczce Venturiego	368720	27,1

Niskie parametry - temperaturę niższą niż 100 °C, ma również energia cieplna odzyskiwana w bielarni i dziale wyparek oraz suszarce maszyny celulozowej. Jedyne opary wtórne powstające przy rozprężaniu skroplin pary grzejnej w zbiorniku kondensatu w warzelni ( $t = 130$  °C) oraz spaliny z pieca obrotowego ( $t = 200$  °C) mają temperaturę wyższą niż 100 °C. Unoszone przez nie ciepło wykorzystywane jest również do podgrzewania wody technologicznej do temperatury około 70 °C. Z ługiem zagęszczonym w wyparce odprowadzane jest 20,6% ciepła doprowadzanego do procesu zagęszczania. Ług ten jest ponadto źródłem energii, gdyż spalony w kotle sodowym wydziela znaczne ilości ciepła wykorzystywanego przede wszystkim do wytwarzania pary wodnej wysokociśnieniowej.

Ciepła tego nie uwzględniono w bilansie rozpatrywanej celulozowni. Korzystniejszym dla gospodarki cieplnej warzelni jest wykorzystanie ciepła odzyskanego w wyniku rekuperacji do podgrzewania wsadu warmika, co zapewnia zmniejszenie zużycia pary grzejnej.

W ograniczonym stopniu bez konieczności instalowania zbiorników ciśnieniowych dla ługów można zastosować zasadę zamykania obiegów ciepła również i w warzelniach siarczanowych o konwencjonalnym układzie rekuperacji.

Instalując dodatkowe wymienniki ciepła, można podgrzać ług biały do temperatury 95 °C przed dozowaniem go do warkików, ciepłem odzyskanym od oparów wtórnych w zbiorniku kondensatu pary grzejącej oraz od ługu powarzelnego odprowadzanego częściowo z warkików dla obniżenia ciśnienia po zakończeniu procesu roztwarzania. Przy roztwarzaniu z zastosowaniem hydrolizy wstępnej można do podgrzewania ługu białego wykorzystać również ciepło odprowadzane od hydrolizatu, kierując go bez rozprężania poprzez wymiennik ciepła do zbiornika magazynowego. Uzyskać można wtedy zmniejszenie zużycia pary grzejącej o około 25%.

#### 4. WNIOSKI

Gospodarka ciepła celulozowni zależy w decydującym stopniu od wykorzystania ciepła odpadowego odprowadzanego od procesów technologicznych.

Część tego ciepła poddawana jest rekuperacji, a odzyskana energia w celulozowniach z konwencjonalnymi układami rekuperacyjnymi wykorzystywana jest w całości do podgrzewania wody technologicznej. Ilość uzyskanej w ten sposób wody gorącej przekracza często zapotrzebowanie na nią w działach celulozowni.

Ze względu na zmniejszenie zużycia energii cieplnej do przeprowadzania procesów technologicznych w celulozowni, rekuperacje należy przeprowadzać przy możliwie najmniejszym obniżaniu parametrów - temperatury i ciśnienia odzyskiwanej energii i stosując zasadę zamykania obiegu ciepła, zawracać ją do procesu technologicznego, wykorzystując do podgrzewania wstępnego biorących w nim udział czynników.

#### LITERATURA

- [1] Palenius I.: Przegląd Papierniczy nr 4, 1988.
- [2] Szymański M.: Analiza możliwości zmniejszenia zużycia ciepła w celulozowni siarczanowej - materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej "INPAP 94", Łódź 1994.
- [3] Szymański M.: Obniżenie zużycia energii cieplnej w celulozowniach. ATR, Bydgoszcz 1989 (praca niepublikowana - wykonana wspólnie z I.C.P. w Łodzi).

### PROGRESS IN THE CIRCULATIONS IN THE PULP MILLS

#### SUMMARY

An analysis of the heat balance and the results of research there were determined of possibilities of lowering energy in technology process in the pulp mills.

Dependence optimal values were defined for heat regeneration.

Heat recovery must be recirculation into the technology process.



Maciej WOROPAY

## **METODA RACJONALNEGO STEROWANIA SYSTEMEM EKSPLOATACJI (NA PRZYKŁADZIE SYSTEMU TRANSPORTU MIEJSKIEGO)**

### **1. WPROWADZENIE**

W literaturze dotyczącej eksploatacji maszyn proces eksploatacji utożsamia się z reguły z dwoma podstawowymi procesami; użytkowania i obsługiwanania. Niewielu autorów proponuje zaliczenie do zbioru tych procesów, również procesu zasilania.

Z punktu widzenia teorii systemów ujęcia te są dalekie od całościowego potraktowania procesu eksploatacji maszyn i "unaocznienia" całości procesów, które są realizowane przez człowieka, lub zachodzą niezależnie od niego w fazie eksploatacji i dotyczą bezpośrednio tych maszyn.

### **2. SYSTEMOWE UJĘCIE PROCESU EKSPLOATACJI**

Biorąc powyższe pod uwagę **proces eksploatacji maszyn zdefiniowano jako - ogół procesów dotyczących maszyn w fazie ich eksploatacji decydujących o efektywności ich zastosowania lub możliwościach realizacji celów cząstkowych.**

Stopień ogólności przedstawionej definicji umożliwia wyznaczenie podziału procesu eksploatacji na dwa zbiory procesów:

- zbiór procesów sterowanych;
- zbiór procesów niesterowanych.

Jak widać na rys. 1, zbiory procesów sterowanych można zdekomponować na podzbiory procesów:

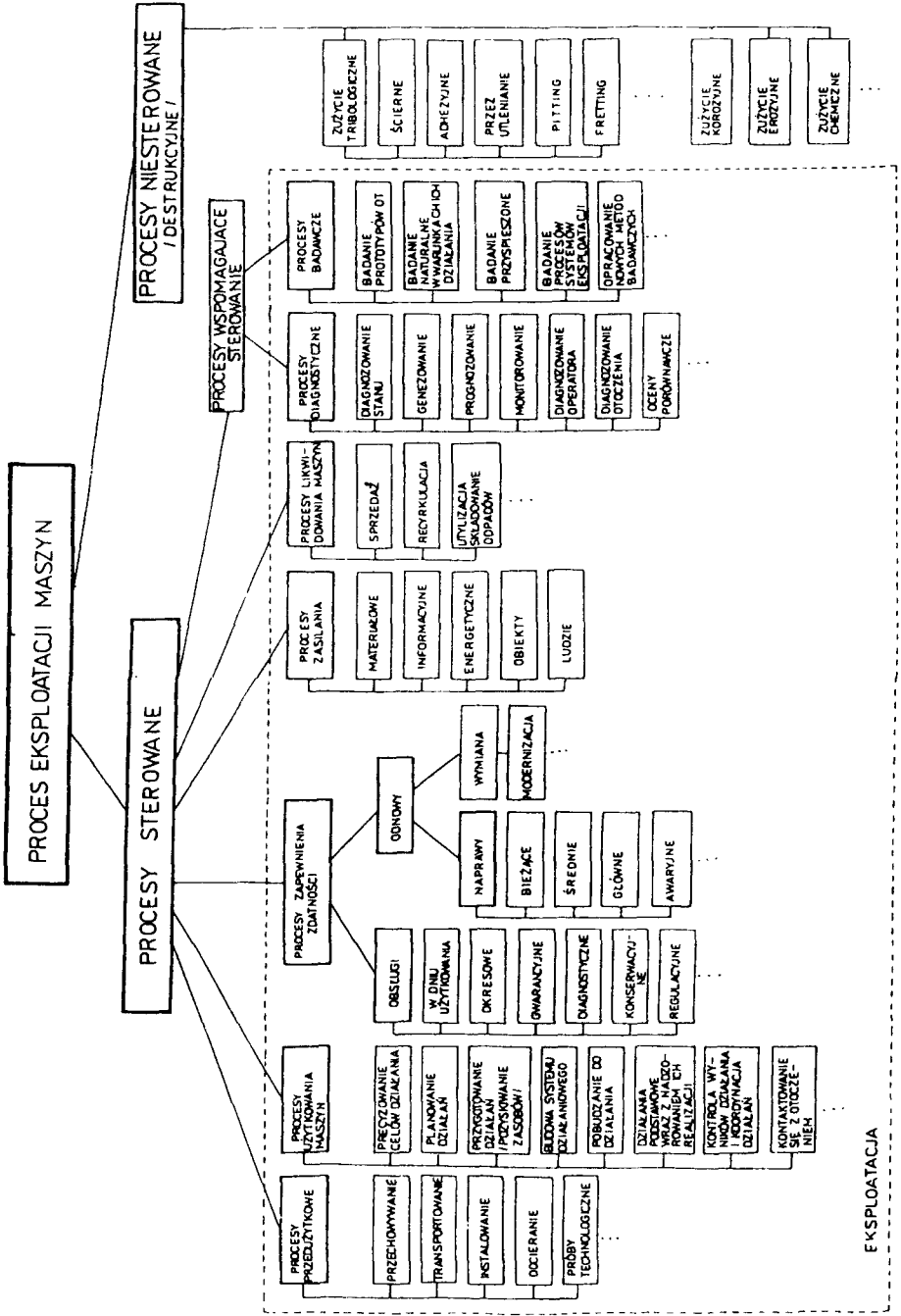
- procesy przygotowania maszyn do użytkowania;
- procesy użytkowania;
- procesy zapewnienia zdatności;
- procesy wspomagające sterowanie;

oraz zbiór procesów niesterowanych na podzbiór procesów:

- procesy destrukcyjne.

Należy jednak podkreślić, że **najważniejszym procesem, w zbiorze procesów eksploatacyjnych, jest proces użytkowania maszyn, ponieważ tylko poprzez ich użytkowanie zaspokojone są potrzeby, dla których maszyny zostały zaprojektowane i wykonane. Proces ten stanowi ciąg zdarzeń związanych z realizacją zadań podsystemu procesowego (<C - OT>), istotnego podsystemu systemu eksploatacji.**





Rys. 1. Dekompozycja procesów eksploatacji maszyn

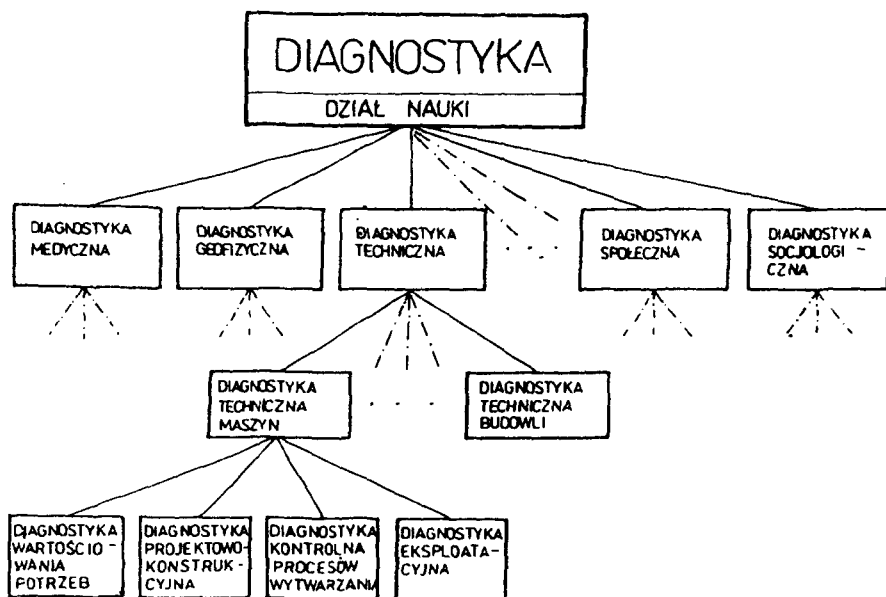
### 3. ZAKRES POJĘCIA - DIAGNOSTYKA TECHNICZNA MASZYN

W ogólnym zarysie **diagnostyka jest nauką o procesach i metodach uzyskiwania informacji o obiekcie i jego otoczeniu, a w nim również o człowieku oraz o relacjach (oddziaływaniach) między nimi [1].**

Przy tym obiektem może być każdy twór materialny lub abstrakcyjny, a zatem zarówno maszyna, człowiek, system socjotechniczny, układ geologiczny, sytuacja na polu walki, jak również teoria naukowa, projekt maszyny, jej model itd.

W przedstawionym ujęciu dziedzina diagnostyki jest niezmiernie obszerna, a charakter procesów diagnostycznych ogromnie złożony.

Natomiast diagnostyka techniczna maszyn jest wybranym obszarem tej nauki. Przedmiotem jej zainteresowania są maszyny w kolejnych fazach ich istnienia (rys. 2).



Rys. 2. Diagnostyka - dział nauki

Z racji celu niniejszego opracowania szczególną uwagę poświęcono **diagnostyce eksploatacyjnej maszyn, która dotyczy środków i sposobów rozpoznawania stanu maszyny na podstawie obserwacji skutków jej działania oraz na podstawie wyników badań, uzyskanych technikami pomiarowymi bezinwazyjnymi (bez demontażu) celem uzyskania diagnozy [3].**

Jak widać uzyskanie diagnozy łączy się z koniecznością realizacji procesu diagnostycznego, tzn. ciągu wyznaczonych działań, w wyniku których dokonuje się identyfikacji aktualnego stanu maszyny oraz oceny przeszłych i prognozy przyszłych jej stanów z uwzględnieniem oddziaływań operatora i otoczenia, w którym on działa.

#### 4. ROLA I ZADANIA DIAGNOSTYKI TECHNICZNEJ W PROCESIE EKSPLOATACJI MASZYN

Znaczenie i zadania diagnostyki maszyn w fazie eksploatacji należy oceniać i wyznaczać na podstawie istotnych problemów, które nauka ta ma rozwiązywać, w kolejnych fazach ich istnienia, tj.:

- wartościowania;
- projektowania i konstruowania;
- wytwarzania;
- eksploatacji;

co przedstawiono na rys. 3.

Na etapie wartościowania niezbędne jest dokonanie oceny trafności wyboru wariantu (sposobu) zaspokojenia potrzeby oraz oceny stopnia spełnienia oczekiwań odbiorcy, związanych z proponowanym wytworem. Kryteria, jakie preferują odbiorcy to: kryterium ekonomiczne (np. cena zakupu, koszty instalowania, użytkowania, napraw, konserwacji itd.), kryterium bezpieczeństwa, kryterium wydajności, kryterium satysfakcji, kryterium ekologiczności, kryterium ergonomiczności, kryterium mody itd.

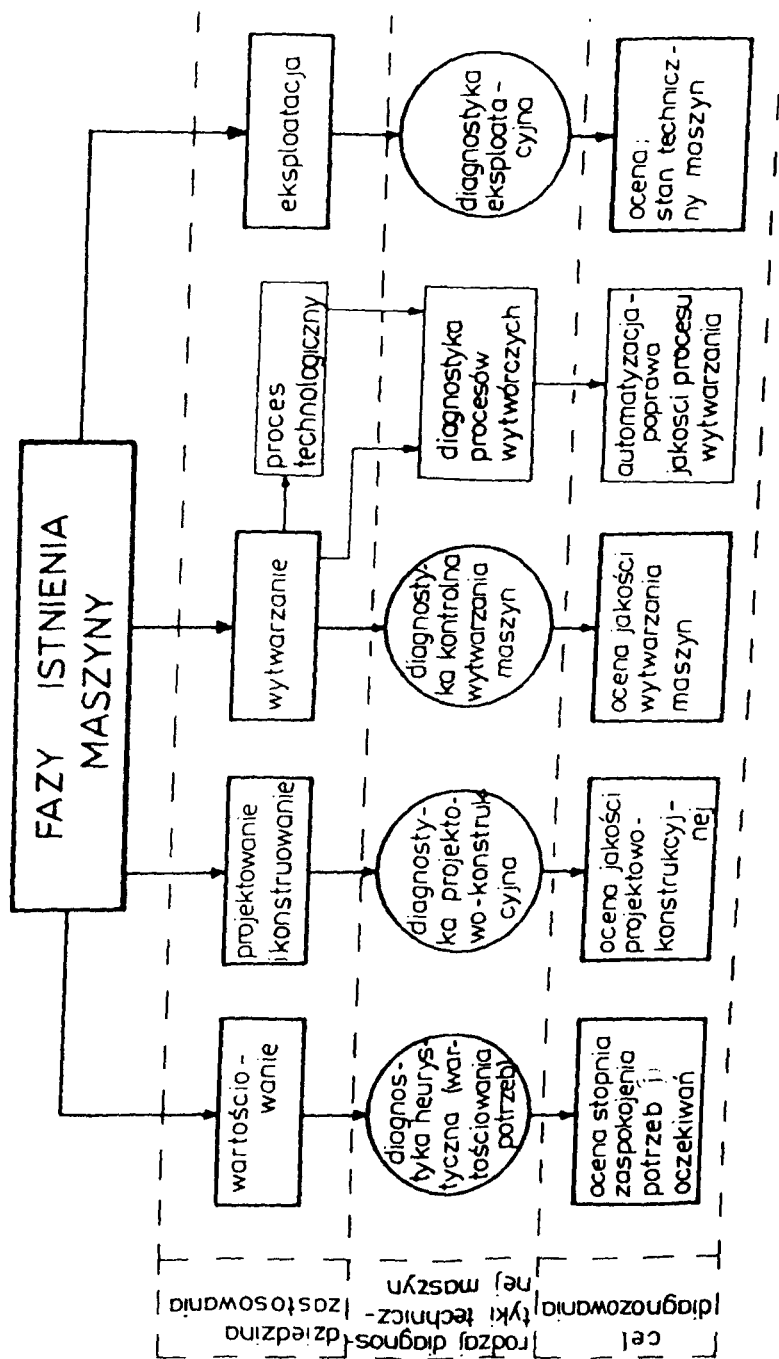
Analiza istniejących preferencji odbiorców w znacznym stopniu wyznacza zakres kryteriów wartościowania.

W literaturze zagranicznej problem wartościowania jest prawidłowo doceniany. Omawia i analizuje się zbiory wyróżników głównych służących do oceny różnych możliwych wariantów rozwiązania problemów projektowych. Chociaż sensowny dobór tych kryteriów z racji ekonomicznych jest problemem bardzo trudnym i złożonym, to w sytuacji działania tzw. „wolnego wyniku” jest to działanie jedynie słuszne [6].

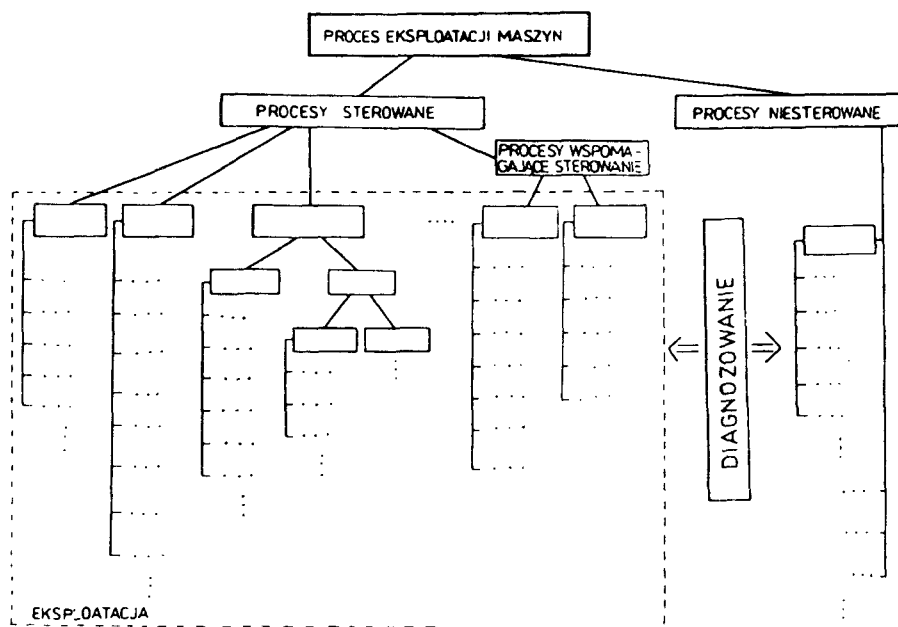
Na etapie projektowania i konstruowania maszyn z racji dokonywania ocen dotyczących funkcjonowania, niezawodności, trwałości, efektywności, bezpieczeństwa, sprawności energetycznej, technologiczności, estetyki, ergonomii efektywności eksploatacji itd., postacie diagnoz są bardzo złożone i różnorodne. Z tego powodu diagnostyka projektowo-konstrukcyjna jest nauką multidyscyplinarną, natomiast celem diagnozowania konstrukcyjnego, realizowanego zwykle na prototypach maszyn, jest identyfikacja źródeł drgań i hałasu, których przekroczenie ustalonych kryteriów świadczy o błędach konstrukcyjno-montażowych, oraz identyfikacja własności dynamicznych i diagnozowalności maszyn.

Diagnostyka kontrolna jest nauką zawierającą zbiór metod służących do kontroli jakości wytworzonych elementów i użytych do tego celu materiałów oraz metod oceny jakości procesu technologicznego i montażu elementów.

Najbardziej do tej pory rozwinięta i opłacalna ekonomicznie **diagnostyka eksploatacyjna zawiera metody ocen bieżących, przyszłych i poprzedzających stanów maszyn. Przy tym podstawowym zadaniem diagnozowania maszyn, w fazie eksploatacji jest dostarczanie informacji decydentowi (operatorowi) o stanach procesów destrukcyjnych elementów maszyn niezbędnych do podejmowania racjonalnych decyzji eksploatacyjnych, dotyczących sposobu postępowania z maszynami w stanach, w których się one znajdują. Tylko wiarygodna ocena stanów procesów destrukcyjnych, zachodzących w elementach maszyn, może spowodować wyeliminowanie błędnych decyzji eksploatacyjnych i stworzyć takie warunki, w których zastosowanie tych maszyn spowoduje osiągnięcie maksymalnych efektów w systemie eksploatacji (rys.4).**



Rys. 3. Zadania diagnostyki technicznej w fazach istnienia maszyn [2]



Rys. 4. Rola diagnozowania w procesie eksploatacji maszyn

## 5. SYSTEM EKSPLOATACJI MASZYN

Systemy eksploatacji maszyn należą do klasy systemów działaniowych. Są to systemy rzeczywiste, które oddziałują na otoczenie i tak reagują na jego wpływ, aby osiągnąć określony cel. Systemy te, ze względu na możliwość realizacji wyraźnie sprecyzowanego celu, można rozpatrywać jako systemy cybernetyczne, w których rolę sterującego spełnia człowiek.

Systemy eksploatacji należą zatem do systemów socjotechnicznych typu "człowiek - obiekt techniczny" (<C - OT>), posiadających następujące cechy:

- składają się z podsystemów różnych klas i same są systemami w nadsystemie zawierającym wiele innych, różnorodnych systemów działania;
- są systemami względnie odosobnionymi, tzn. powiązаны z otoczeniem tylko przez swoje wejścia i wyjścia;
- prawidłowość ich działania ma istotny wpływ na prawidłowość działania nad-systemu, którego są elementami składowymi;
- struktury ich są z reguły strukturami hierarchicznymi.

W systemach tych można wyodrębnić pięć jakościowo odmiennych składników;

- podmioty pracy (kierownik i pracownicy);
- obiekty techniczne (maszyny, urządzenia, aparatura, budynki, budowle i inne);
- materiały (surowce, części wymienne, odpady, zasoby mineralne i inne);
- energię (różne rodzaje i formy energii, a także oddziaływania różnych pól);

- informacje, rozumiane jako wszelka treść, która jest przekazywana w czasie lub w przestrzeni od nadawcy do odbiorcy.

Wymienione powyżej składniki są w systemie aktywizowane, poddawane wzajemnym oddziaływaniom, często znajdują się w ruchu oraz ulegają procesom przemiany. Zazwyczaj obiekty techniczne, materiały, informacje i energia, przebywają w systemie działaniowym czasowo.

Do systemu są one dostarczone z otoczenia oraz odprowadzone z systemu do otoczenia przez systemy, specjalne do tych działań wyznaczone lub zbudowane.

Systemy realizujące te podstawowe zadania, to tak zwane systemy logistyczne, usytuowane zarówno w otoczeniu systemu eksploatacji, jak i w jego obrębie.

Nazwa tych systemów wywodzi się z pojęcia logistyki, rozumianej jako ogół czynności planowania, realizacji i kontroli czasowo-przestrzennej, transformacji energii materii i informacji z miejsca wytworzenia do miejsca wykorzystania.

Na podstawie opracowań dotyczących teorii logistyki można wyróżnić następujące cele działania systemów logistycznych:

- prognozowanie zapotrzebowania na usługi, materiały, wyroby, energię i informacje;
- zaopatrywanie w wyżej wymienione składniki, magazynowanie i zarządzanie zapasami;
- obsługiwanie oraz użytkowanie maszyn, urządzeń, stanowisk pracy i obiektów;
- pakowanie wyrobów;
- zarządzanie wykorzystaniem opakowań i odpadów produkcyjnych;
- gromadzenie, przetwarzanie i przesyłanie informacji dotyczących realizacji wymienionych procesów logistycznych.

Koordinacja (uporządkowanie) działań logistycznych polega na właściwym podziale zadań, kompetencji i odpowiedzialności między podsystemy (elementy) systemu logistycznego.

Racjonalny podział tych zadań oraz ich realizacja może się odbywać tylko w systemach o strukturach hierarchicznych. Systemy te charakteryzują się następującymi cechami:

- składają się ze zbiorów celowo zorganizowanych podsystemów, usytuowanych na różnych poziomach hierarchicznych (szczeblach), między którymi istnieją relacje podporządkowania tzw. relacje nadrzędności i podrzędności;
- prawidłowość działania podsystemów znajdujących się na wyższych poziomach hierarchicznych (tzw. nadrzędnych) uzależniona jest od prawidłowości działania podsystemów znajdujących się na niższych poziomach hierarchicznych (tzw. podrzędnych);
- między podsystemami znajdującymi się na tych samych poziomach hierarchicznych często występuje konflikt celów działania, co powoduje konieczności koordynacji ich działań przez system nadrzędny.

Koordinacja działań w systemie eksploatacji o strukturze hierarchicznej polega na takim sterowaniu działaniami podsystemów podrzędnych, przez system nadrzędny, które zapewnią realizację celu nadrzędnego w sposób optymalny dla całego systemu.

## 6. BUDOWA SYSTEMU EKSPLOATACJI MASZYN

Podstawowymi procesami realizowanymi w systemie eksploatacji są procesy użytkowania i zapewnienia zdatności obiektów technicznych.

Efektywność użytkowania obiektów technicznych zależy przede wszystkim od racjonalnego ich wykorzystania, stopnia realizacji zasady oszczędnego ich użycia, wydajności pracy żywej i uprzedmiotowionej, organizacji procesu użytkowania oraz ich właściwości technicznych. W optymalizacji procesu użytkowania zasadnicze znaczenie mają następujące właściwości obiektów technicznych: funkcjonalność, efektywność, wydajność, elastyczność (ze względu na wielozadaniowość) i gotowość techniczna (trwałość i niezawodność).

Utrzymanie wymaganych wartości istotnych parametrów działania systemów złożonych osiągane jest za pomocą sterowania poszczególnymi ich podsystemami. Z uwagi na to w systemie należy wyróżnić podsystemy sterujące i obiekty sterowane. Od podsystemów sterowanych kanałami informacji napływają informacje do podsystemu informatycznego o stopniu realizacji zadań. Podsystem informatyczny przetwarza również informacje dotyczące stanów podsystemów jego otoczenia.

Zbiory tych informacji, przetworzonych w odpowiedni sposób w podsystemie informatycznym, są niezbędne do podejmowania racjonalnych decyzji sterujących przez decydenta, usytuowanego w podsystemie zarządzania, który je przekazuje do podsystemów umieszczonych na niższych poziomach hierarchicznych. Powoduje to konieczność dopasowania struktury podsystemu informatycznego do struktury hierarchicznej systemu eksploatacji.

Jak widać na rysunku 5, efektywność działań podsystemu procesowego <C - OT> i podsystemu logistycznego decydują o efektywności realizowanego procesu eksploatacji.

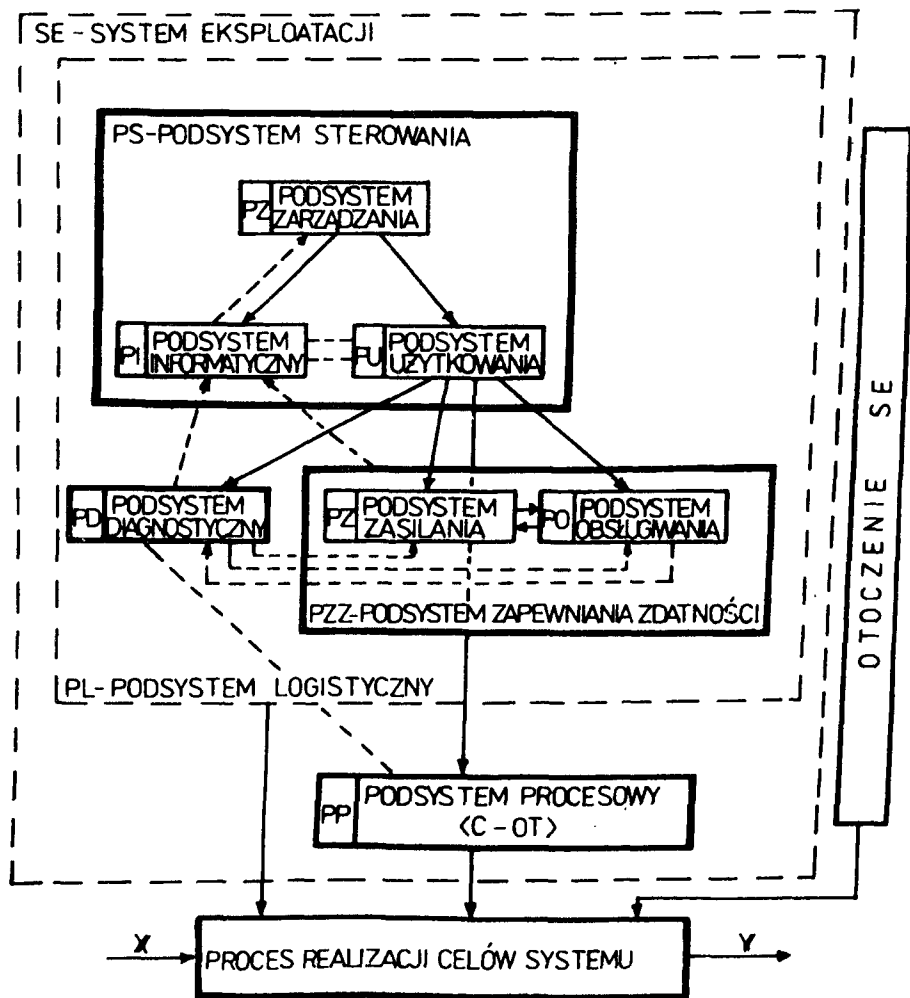
Z tego powodu w systemie eksploatacji wyróżniono podsystem realizujący zadania systemu jako całości tzw. podsystem procesowy, celem wyznaczenia jego roli i zadań w procesie realizacji celów systemu jak również po to, aby wykazać znaczenie podsystemu logistycznego w tworzeniu podsystemowi procesowemu optymalnych (sprzyjających) warunków działania.

W systemie eksploatacji przedstawionym na rysunku 5 wyróżniono 7 podsystemów. Z uwagi na cel opracowania oraz założoną prostotę budowanego modelu zagregowano te podsystemy, według kryterium podobieństwa spełnianych funkcji, których działania można przyporządkować temu samemu celowi. Przyjmując powyższy punkt widzenia jako uzasadniony podsystemy: informacyjny, zarządzania oraz użytkownika zagregowano w jeden podsystem tzw. podsystem sterowania, a podsystemy: zapewnienia zdatności i zasilania w podsystem utrzymania ruchu.

Działanie podsystemu sterowania ukierunkowane jest na realizację następujących zadań:

- precyzowanie celów działania systemu eksploatacji;
- opracowanie planów działań, obejmujące wyznaczenie podmiotów działania, przedmiotów działania, form, czasu, miejsca i zakresu działania oraz ustalenie kosztów i realnych dochodów uzyskiwanych z tych działań;
- opracowanie planów pozyskiwania, przetwarzania, gromadzenia oraz przepływu materiałów, energii i informacji oraz wyznaczenie podmiotów i środków do realizacji wymienionych zadań;

- sterowanie zgodnie z planem, realizacją badań, obejmującą: pobudzenie do działań, kontrolę bieżącą realizacji podzadań oraz ich koordynowanie, nadzorowanie i ocenianie wyników działań;
- sterowanie składowaniem i zabezpieczeniem wyrobów;
- sterowanie utrzymaniem w ruchu podstawowych środków działań (obiekty techniczne, aparatura itp.).



- relacje hierarchiczne
- - -→ sprzężenia informacyjne

Rys. 5. Model strukturalny systemu eksploatacji



Natomiast zabezpieczenie stanu zdatności zadaniowej obiektom systemu procesowego realizowane jest przez podsystem utrzymania ruchu PUR i współdziałający z nim podsystem diagnostyczny PD. Cele podsystemu utrzymania ruchu wynikają głównie z zadań przyjętych do realizowania przez podsystem sterowania.

Obsługiwanie, a w szczególności odnowa realizowane przez podsystem utrzymania ruchu powodujące przywrócenie właściwości użytkowych obiektów technicznych oraz utrzymywanie ich w stanie zdatności zadaniowej, stanowią podstawowy warunek umożliwiający realizację przyjętych zadań.

Zakres, częstości i koszt wykonywania obsługi zależą od stanu, typu i rodzaju obiektów technicznych. Rola podsystemu diagnostycznego, współdziałającego z podsystemem utrzymania ruchu polega na badaniu symptomów diagnostycznych celem wyznaczenia przeszłych, aktualnych lub przyszłych stanów eksploatowanych obiektów technicznych oraz ocenie działania ich operatorów i stanów otoczenia.

Podsystemy PS, PD, PUR i PP sprzężone są strukturą hierarchiczną, która umożliwia systemowi (jako całości) realizację jego celów.

Zaprezentowany podział systemu eksploatacji na podsystemy jest podziałem umownym, niezbędnym do opracowania formalnego opisu działania systemu i umożliwiającym uproszczenie badania złożonego systemu. Istota przedstawionych na rysunku 5 podsystemów jest z formalnego punktu widzenia dwoista: z jednej strony podsystem jest systemem składającym się z pewnej liczby podsystemów (elementów), natomiast z drugiej jest on elementem systemu złożonego.

Poszczególne podsystemy, w ograniczonym zakresie, są samodzielnie funkcjonującymi elementami systemu, które oddziałują na siebie relacjami hierarchicznego podporządkowania.

## 7. ALGORYTM STEROWANIA DZIAŁANIEM I TRANSFORMACJĄ SYSTEMU EKSPLOATACJI

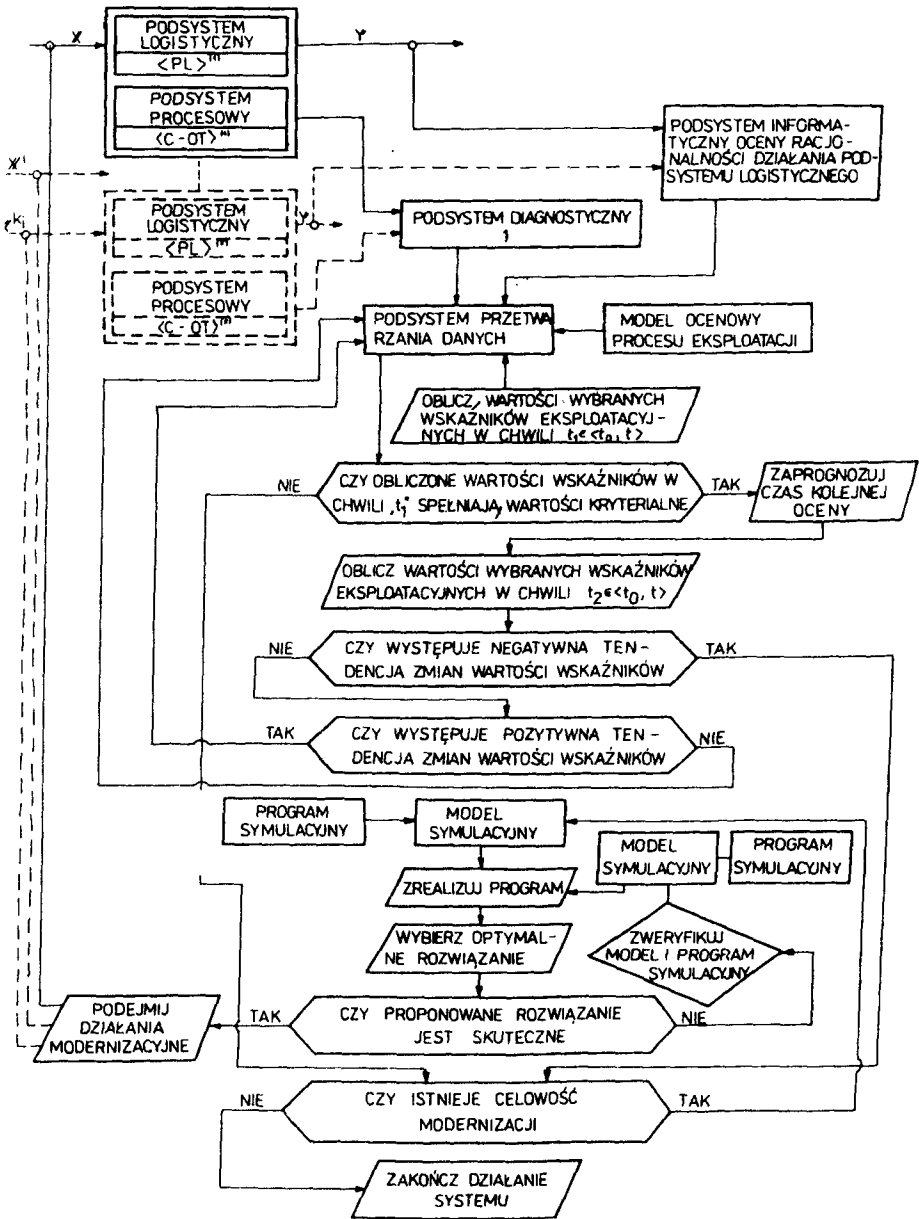
Warunkiem koniecznym racjonalnego działania systemu eksploatacji, w trakcie zmiennych oddziaływania otoczenia oraz zmieniających się stanów jego obiektów technicznych, jest tworzenie możliwości transformacji tego systemu (modernizacji).

Na rysunku 6 przedstawiono algorytm metody transformacji systemu eksploatacji na podstawie informacji diagnostycznych. Istotne bloki algorytmu to:

- podsystem diagnostyczny, którego celem jest zbieranie danych o stanach obiektów technicznych usytuowanych w podsystemie procesowym;
- podsystem informatyczny oceny racjonalności działania podsystemu logistycznego, którego celem jest zbieranie danych dotyczących nakładów na działanie systemu eksploatacji;
- model ocenowy procesu eksploatacji, dotyczy ocen działania podsystemu logistycznego i podsystemu procesowego;
- podsystem przetwarzania danych, którego celem jest opracowanie informacji decyzyjnych, dotyczących sposobów sterowania systemem eksploatacji;
- program i model symulacyjny;
- blok decyzyjny dotyczący sposobu transformacji systemu.

W wyniku realizacji algorytmu powstaje możliwość transformacji systemu (modernizacji), o konfiguracji dostosowanej do realizacji zadań w zmienionych warunkach.

Należy podkreślić, że metoda transformacji systemu, przedstawiona na rysunku 6 pozwala na racjonalne sterowanie działaniem systemu eksploatacji jak i jego modernizacją.



Rys. 6. Algorytm sterowania transformacją systemu eksploatacji

## LITERATURA

- [1] Będkowski L.: Elementy diagnostyki technicznej. WAT, Warszawa 1992.
- [2] Cempel C.: Modele diagnostyki wibroakustycznej. Diagnostyka Maszyn Roboczych i Pojazdów, Bydgoszcz 1994.
- [3] Cholewa W., Kaźmierczak J.: Diagnostyka techniczna maszyn. Politechnika Śląska 1992.
- [4] Downarowicz O.: Teoretyczne podstawy eksploatacji obiektów technicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Mechanika nr 70, Gdańsk 1993.
- [5] Mesarowic M.D., Macko D., Tahara Y.: Theory of hierarchical multilevel systems. Academic Pres, New York 1970.
- [6] Oziemski S.: Zastosowanie logistyki do kształtowania niezawodności maszyny. Problemy Maszyn Roboczych, Warszawa 1993.
- [7] Weinberg G.M.: Myślenia systemowe. WNT, Warszawa 1979.
- [8] Woropay M., Landowski B.: Metoda wyboru strategii eksploatacyjnej złożonych obiektów technicznych. Konferencja Naukowa DIAG '94. Borówno 1994.
- [9] Woropay M.: System eksploatacji jako hierarchiczny system biotechniczny. Inżynieria Systemów Biogrotechnicznych, Zeszyty Naukowe nr 3, Warszawa 1993.

**THE DIAGNOSTIC INFORMATION IMPORTANCE AND INFLUENCE  
ON THE CONTROLABILITY OF HIERARCHICAL MACHINES OPERATING  
SYSTEM**

**SUMMARY**

The paper deals with the modern method of machines operating and maintenance system description considering its hierarchical structure which ensures the objective function realisation.

System's approach to the controlability analysis of system's model shows the importance of diagnostic subsystem on the background of other subsystems.

The algorithm built for machines operation and maintenance system control shows principles for transformation of the system in dependence of its environment's states as well as states of its subsystems which ensure the ability of system's continuous development (developing systems).

Bogdan ŻÓLTOWSKI

## **KSZTAŁTOWANIE I OCENA JAKOŚCI MASZYN W KATEDRZE MASZYN ROBOCZYCH I POJAZDÓW**

Kształtowanie jakości maszyn odbywa się przez wszystkie fazy istnienia maszyny. Ma to na celu zapewnienie wysokiej niezawodności działania oraz spełniania zadań stawianych przed nowoczesnymi maszynami. Jako narzędzie do tego można wykorzystać metody i środki diagnostyki technicznej, z wykorzystaniem sztucznej inteligencji.

W tej pracy omówiono zakres problematyki i prac realizowanych w Katedrze Maszyn Roboczych i Pojazdów, wskazując jednocześnie na kierunki rozwoju metod kształtowania jakości maszyn w pracach prowadzonych przez pracowników Katedry.

### **WPROWADZENIE**

W procesie rozwoju techniki i produkcji istotnym zagadnieniem jest zapewnienie wyrobom odpowiedniej „jakości” i efektywności. Właściwości obiektu, wpływające na jakość i efektywność, wywołują coraz to nowe problemy techniczne dla specjalistów różnych dziedzin techniki, jak i dla ekonomistów zainteresowanych nimi w aspekcie potrzeb gospodarki narodowej.

Zainteresowania naukowe pracowników Katedry Maszyn Roboczych i Pojazdów dotyczą problemów kształtowania „jakości” maszyn i pojazdów w całym procesie ich istnienia.

Problematyka ta rozwijana jest w dziedzinie niezawodności, diagnostyki technicznej, napraw i regeneracji oraz użytkowania i obsługiwań technicznych. Uwarunkowania gospodarki rynkowej spowodowały przesunięcie tej problematyki zainteresowań na początkowe fazy istnienia obiektów.

Szczególne znaczenia w takim ujęciu nadano problematyce diagnostyki technicznej, traktowanej jako narzędzie kształtowania cech użytkowych nowo tworzonych i modernizowanych obiektów technicznych.

Traktując eksploatację maszyn jako główny etap weryfikacji ich przydatności i spełniania oczekiwań społecznych, coraz częściej na tym etapie prowadzi się intensywne badania poprawności działania maszyn w odpowiednio sformalizowanych strukturach eksploatacji.

Możliwości dokonania wszystkich dziedzin teorii eksploatacji, rozwijanych w Katedrze, pozwalają na optymalne procedury projektowania, konstruowania, wytwarzania i eksploatacji maszyn, przy szerokim wspomaganium badań techniką komputerową.

W tej pracy przedstawiono skrótowo problemy główne składowych dziedzin teorii eksploatacji, jednoznacznie określające kierunki, możliwości i potrzeby realizowanych

badania, wspomaganymi głównie diagnostyką techniczną wraz z elementami sztucznej inteligencji.

Interdyscyplinarne powiązanie problemów eksploatacji maszyn wyraźnie wskazuje na dominującą wśród nich rolę diagnostyki technicznej, traktowanej jako narzędzie badania stanu maszyn oraz kształtowania ich jakości i sposobów wykorzystania.

## 1. DETERMINIZM I LOSOWOŚĆ RZECZYWISTOŚCI

Opis otaczającej nas rzeczywistości opiera się na przyjmowaniu modeli tworzonych na prawach i faktach uwzględniających:

- zasady przyczynowości;
- zasady determinizmu;
- zasady nieoznaczoności;
- zasady losowości.

Poglądy na istotę związku przyczynowego opierają się na związkach przyczynowo-skutkowych zachodzących w następstwie czasowym oddziaływania pomiędzy zjawiskami, określającymi zależności pomiędzy przyczynami i ich skutkami. Formuła: *nic nie dzieje się bez przyczyny lecz wszystko z jakiejś racji i konieczności* stała się podstawą gromadzenia wiedzy, formułowanych praw i na ich podstawie teorii tworzących naukę.

Zasada przyczynowości jest podstawą skrajnego determinizmu w poglądzie na zjawiska zachodzące w otaczającej nas rzeczywistości, formułowane w postaci jednoznacznej odpowiedzi na pytania:

„ Czy każde zjawisko ma ustaloną jednoznacznie przyczynę? ”

„ Czy każda przyczyna ma jednoznacznie określony skutek? ”.

Modelowe przedstawianie rzeczywistości z konieczności wielu ograniczeń opiera się na deterministycznym pojmowaniu zjawisk, wykorzystującym newtonowski pogląd na otaczający nas świat.

Przyczynowość i determinizm jego opisu zostają coraz częściej modyfikowane przez zasadę nieoznaczoności, traktującą otaczający nas świat w kategoriach losowości. Początkowo zjawiska losowości opisywano w kategoriach prawdopodobieństw i za pomocą metod statystycznych, skrywając niewiedzę ludzką dalej w modelach deterministycznych.

Dopiero stworzenie teorii chaosu deterministycznego, opartego na nieliniowych transformacjach deterministycznych pozwala na przybliżone opisywanie zjawisk w warunkach losowości. Z chaosem deterministycznym ściśle związane jest występowanie tzw. atraktorów, którymi są zazwyczaj nieokresowe trajektorie przyciągające inne trajektorie ze swego otoczenia. Prowadzi to wprost do teorii fraktali, gdzie cechy fraktalne (powtarzające się) propagują się w przestrzeni, stanowiąc dobre przybliżenie systemów rozwijających się.

Tak więc nowoczesne traktowanie obiektów i zjawisk, opisywanych w kategoriach chaosu zdeterminowanego, daje nowe metody analizy systemów deterministycznych zaburzonych losowo.

Przedstawione sygnałnie problemy zdecydowanie zmieniają podejście do zagadnień diagnostyki technicznej, szczególnie w zakresie modelowania diagnostycznego, a także dobrze obrazują uznane, lecz mało dokładne, deterministyczne założenie metodologiczne:

„maszyna jest urządzeniem zdeterminowanym, gdzie każdemu stanowi odpowiadają jednoznaczne objawy”.

Przekonanie o tym, że świat jest newtonowski, ustępuje pod naciskiem koncepcji kwantowego i relatywistycznego poznawania świata, stając się źródłem nowych koncepcji i obszarów badań.

## 2. KSZTAŁTOWANIE „JAKOŚCI” MASZYN

Aktualny stan maszyny można określać obserwując funkcjonowanie obiektu, tzn. jego wyjście główne przekształconej energii (lub produktu), oraz wyjście dyssypacyjne, gdzie obserwuje się procesy resztkowe np. termiczne, wibracyjne, akustyczne, elektromagnetyczne. Obserwacja tych wyjść daje całą gamę możliwości diagnozowania stanu poprzez :

\* **obserwację procesów roboczych**, monitorując ich parametry w sposób ciągły, czy też prowadząc badania sprawnościowe maszyn na specjalnych stanowiskach (moc, prędkość, ciśnienie itp.);

\* **badania jakości wytworów**, zgodności pomiarów, pasowań, połączeń itp., gdyż ogólnie tym lepszy stan techniczny maszyny, im lepsza jakość produkcji [rys.1];

\* **obserwację procesów resztkowych**, stanowiących bazę wielu atrakcyjnych metod diagnostycznych, opartych głównie na modelach symptomowych.

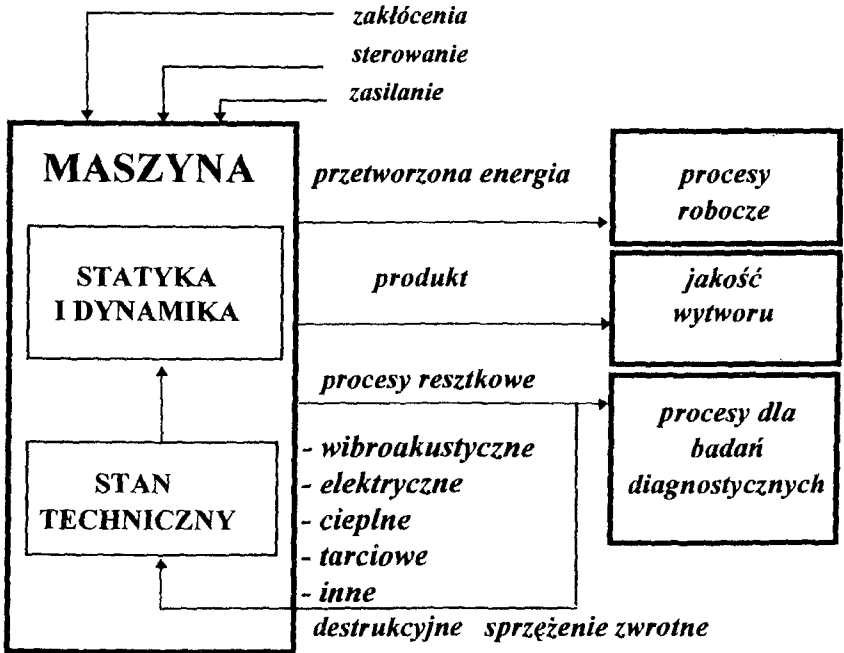
Efektywne wykorzystanie diagnostyki jest uwarunkowane dynamicznym rozwojem następujących zagadnień :

- modelowania diagnostycznego (strukturalnego, symptomowego);
- metod diagnozowania, genezowania i prognozowania;
- podatności diagnostycznej (przyjazne metody i obiekty);
- budowy ekonomicznych i dokładnych środków diagnozy;
- precyzowania możliwości diagnostyki w kolejnych fazach istnienia maszyny;
- metod oceny efektywności zastosowań diagnostyki;
- metodologii projektowania i wdrażania diagnostyki technicznej;
- metod inteligencji w diagnostyce.

Oczywistym jest przy tym, że powyższe problemy winny być rozwiązane w oparciu o najnowsze dokonania różnych dziedzin wiedzy. Zatem jest tu miejsce na szerokie stosowanie wspomaganie komputerowego w zakresie: modelowania holistycznego i symptomowego, planowania i realizacji badań, wnioskowania, miejsce dla sztucznej inteligencji obejmującej systemy doradcze i sieci neuronowe z udziałem logiki rozmytej [1,3,4].

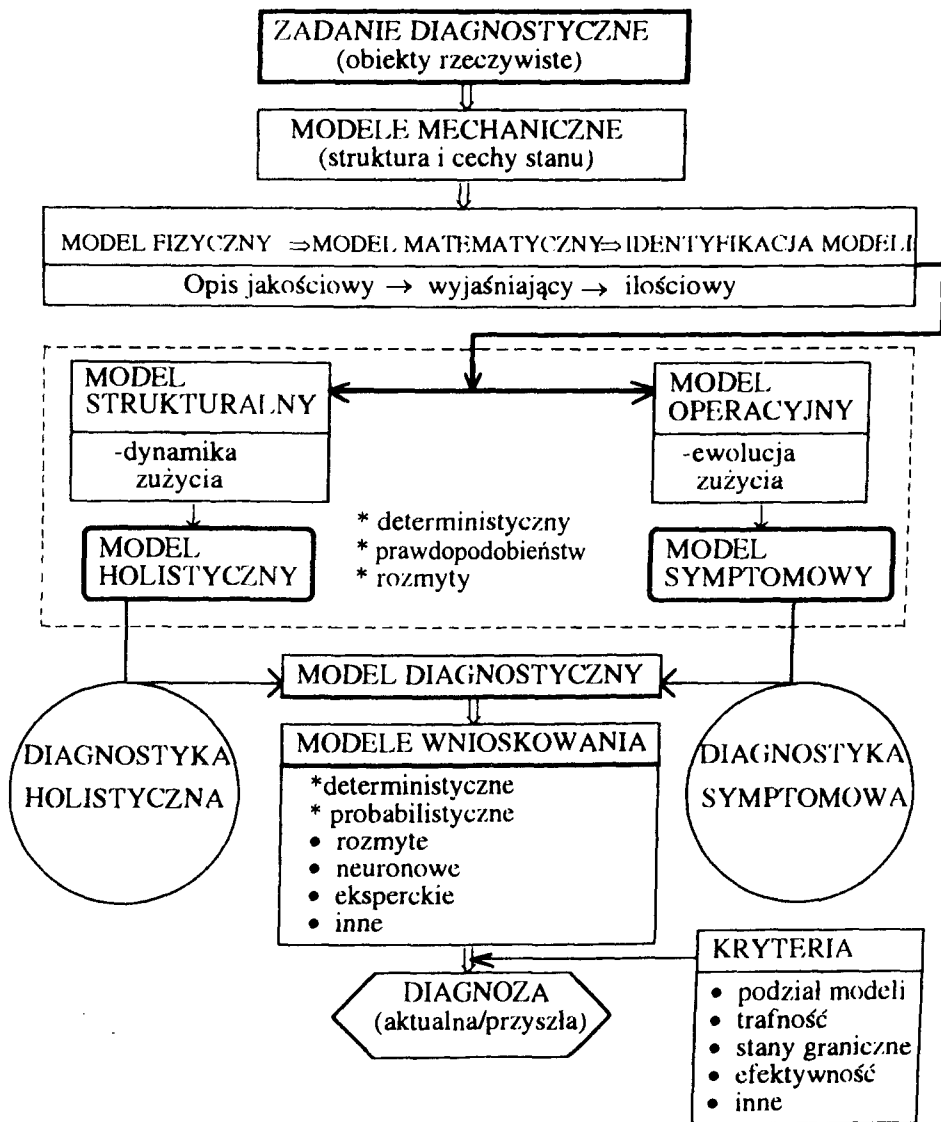
Wiedza i technologia diagnozowania łączą się zawsze z rodzajem modelu diagnostycznego, który można stworzyć dla badanego obiektu. Jak zawsze rzeczywisty obiekt musi poddany być obserwacjom oraz badaniom stanowiskowym i eksploatacyjnym. W zależności od posiadanej wiedzy można stworzyć model fizyczny przedstawiający obiekt w zadanej skali lub najczęściej jego model abstrakcyjno-ilościowy. W zależności od rodzaju cech obiektu zawartych w modelu będzie on miał charakter **symptomowy** lub **strukturalny** (rys.2).

Po stronie opisu symptomowego mamy diagnostykę opartą na symptomach stanu (**diagnostyka symptomowa**), zaś po stronie strukturalnego opisu analitycznego obiektu mamy **diagnostykę holistyczną**, wspartą modelowo. W zależności od naszych możliwości kompensacji zakłóceń procesu i otoczenia model ten może być deterministyczny, probabilistyczny lub rozmyty.



Rys.1. Możliwe trzy sposoby obserwacji stanu maszyny

Dla oceny stanu obiektu oba rodzaje diagnostyki mogą wykorzystywać ten sam bagaż metod wnioskowania, od deterministycznych począwszy a na sztucznej inteligencji kończąc. O ile podejście symptomowe jest faktem dnia codziennego w działaniach diagnostycznych, to modelowanie strukturalne umożliwiające badanie całego cyklu życia obiektu oraz projektowanie zakresu i systemu diagnozowania staje się możliwością do wykorzystania w przyszłości.



Rys. 2. Możliwości modelowania diagnostycznego obiektów

### 3. PRZEMYSŁOWE SYSTEMY NADZORU MASZYN

We współczesnym świecie rywalizacja gospodarcza przebiega praktycznie na płaszczyźnie szeroko rozumianej "jakości", z tytułu której można uzyskać określone korzyści ekonomiczne. Korzyści te są uprzedzająco zabudowywane w kolejnych fazach



istnienia obiektów i dotyczą właściwie wszystkich aspektów ich istnienia: funkcjonalnego, materiałowego, energetycznego, wydajnościowego, ekologicznego itp.

Każda maszyna przechodzi cztery fazy swego istnienia: **wartościowanie (C)**, **projektowanie (P)**, **wytwarzanie (W)** i **eksploatację (E)**. Coraz większe wymagania stawiane maszynom określiły szereg kryteriów, które są badane na każdym z etapów. Metody i środki dające taką możliwość kontroli "jakości" maszyn - spełniania stawianych kryteriów - są zakresem zainteresowań diagnostyki technicznej (rys.3).



Rys. 3. Fazy istnienia maszyny w aspekcie diagnostyki

Patrząc syntetycznie na ogół możliwych zastosowań diagnostyki w każdej z faz istnienia obiektu, można wyróżnić **dziedziny** i **zakres wiedzy** niezbędnej do prawidłowego rozwoju tej dziedziny.

Są to: **wiedza o obiektach, ich modelowaniu, identyfikacji, symulacji zachowań, nauka o sygnałach i symptomach, teoria eksperymentu, teoria decyzji oraz komputerowe wspomaganie badań diagnostycznych.**

Z praktycznego punktu widzenia **problemy główne diagnostyki**, warunkujące racjonalny rozwój i praktyczne jej stosowanie, obejmują:

- **fizykochemiczne podstawy diagnostyki technicznej** (tworzywo konstrukcyjne, warstwa wierzchnia, smarowanie, stany graniczne),
- **metodologiczne podstawy badań diagnostycznych** (zadania diagnostyczne, modele diagnostyczne, identyfikacja modeli, symulacja wrażliwości miar, techniki wnioskowania, sposoby prezentacji diagnoz),
- **komputerową obsługę zadań diagnostycznych** (oprogramowanie, planowanie eksperymentów, badania, przetwarzanie sygnałów, estymacja charakterystyk, redukcja wymiarowości, estymacja modeli),
- **techniczne metody kontroli stanu obiektu** (metodyki, metody, środki - od najprostszych do systemów doradczych),

- **rolę i miejsce diagnostyki w cyklu istnienia obiektu** (projektowanie układów diagnostyki, projektowanie diagnostyczne, określanie charakterystyk użytkowych, wartości graniczne, sterowanie eksploatacją),
- **przesłanki ekonomiczne stosowania diagnostyki** (mierniki wartości, modele decyzyjne, wskaźniki efektywności, rachunek optymalizacyjny),
- **kształcenie dla potrzeb diagnostyki** (zawód, sylwetka absolwenta, poziomy kształcenia, doskonalenie, materiały dydaktyczne).

Są to więc grupy podstawowych problemów z różnych dyscyplin podstawowych i stosowanych, zawierające w sobie wyróżniki odrębności naukowej diagnostyki technicznej.

Uwzględnienie kryteriów stawianych obiektom w poszczególnych fazach ich istnienia: **C - P - W - E**, daje podstawę oceny spełniania potrzeb, a także wytycza kierunki rozwoju wiedzy i badań diagnostyki technicznej.

### 3.1. Funkcja sterująca diagnostyki

Rola i znaczenie diagnostyki technicznej w każdej z faz istnienia maszyny jest bardzo istotna i ukazana na tle zadań spełnianych przez wytwór w poszczególnych strategiach eksploatacji. Szczególnie istotna jest jednak rola diagnostyki na etapie eksploatacji maszyn, gdzie decyzję o sposobie wykorzystania maszyny podejmuje się w oparciu o wyniki badania stanu technicznego. Na tym tle można już w sposób oczywisty sprecyzować funkcję sterującą diagnostyki, gdzie sposób wykorzystywania informacji do sprawnego działania maszyny odpowiada wymogom teorii sterowania.

Na podstawie zebranej informacji diagnostycznej z podsystemu diagnostycznego podejmowane są następujące decyzje :

- ocena stanu maszyny w chwili "t" (zdatna, niezdatna);
- uszkodzone elementy , w przypadku niezdatności maszyny;
- rozregulowane elementy , w przypadku niezdatności maszyny;
- przewidywany stan maszyny w chwili  $t_p = t + \Delta t$  (prognozowanie);
- czas pracy maszyny do naprawy głównej;
- czas rezerwy do likwidacji maszyny;
- termin następnego diagnozowania maszyny.

Proces postępowania z maszyną jest więc następujący:

- a) w przypadku maszyny zdatnej: badanie stanu - wykonanie niezbędnie koniecznych zabiegów obsługowych - prognozowanie stanu - ustalenie terminu następnego badania;
- b) w przypadku maszyny niezdatnej: badanie stanu - ustalenie przyczyn niezdatności (rozregulowanie, uszkodzenie, wykonana praca do naprawy głównej lub likwidacji) - usunięcie uszkodzenia - ocena jakości wykonanej naprawy - wykonanie niezbędnych czynności obsługowych - prognozowanie - termin kolejnego diagnozowania.

Funkcja sterująca diagnostyki w utrzymaniu zdatności maszyn polega więc na:

- \* ocenie aktualnego stanu maszyny, określającego możliwości dalszej ich pracy;
- \* eliminacji niezdatnych, a więc i niebezpiecznych maszyn z użytkowania;

- \* zapobieganiu uszkodzeniom lub nagłym awariom maszyn, dzięki uprzedzającym badaniom i ocenie stanu;
- \* przewidywaniu przyszłych stanów maszyn, stwarzając podstawy planowania materiałowo-technicznego i zadaniowego systemu eksploatacji.

Biorąc za podstawę przedstawione możliwości diagnostyki w zakresie nadzorowania zmienności stanów maszyn, zasadne są propozycje metody obsługi maszyn według stanu technicznego w ramach autoryzowanej strategii eksploatacji maszyn.

Doskonalenie tej przyszłościowej strategii opiera się o nowe, skuteczne metody diagnozowania stanu maszyn, o opracowania pokładowych i stacjonarnych układów diagnostycznych, wspieranych techniką komputerową i dokonaniem sztucznej inteligencji.

Nowoczesne formy organizacji produkcji umożliwiają uzyskanie wysokiej wydajności produkcji, elastyczności, jakości oraz ekonomicznej efektywności produkcji, pod warunkiem prowadzenia prawidłowej eksploatacji obiektów mechanicznych w przedsiębiorstwie.

Realizując w przedsiębiorstwie nowoczesne strategie rozwoju należy właściwie zorganizować gospodarkę środkami trwałymi, a w niej system utrzymania ruchu maszyn i urządzeń.

Utrzymanie maszyn i urządzeń w stanie gotowości technicznej polega na zapobieganiu i minimalizacji procesów fizycznego zużywania się ich elementów oraz usuwaniu skutków tego zużycia. Informacji o przebiegu tych procesów dostarcza diagnostyka techniczna.

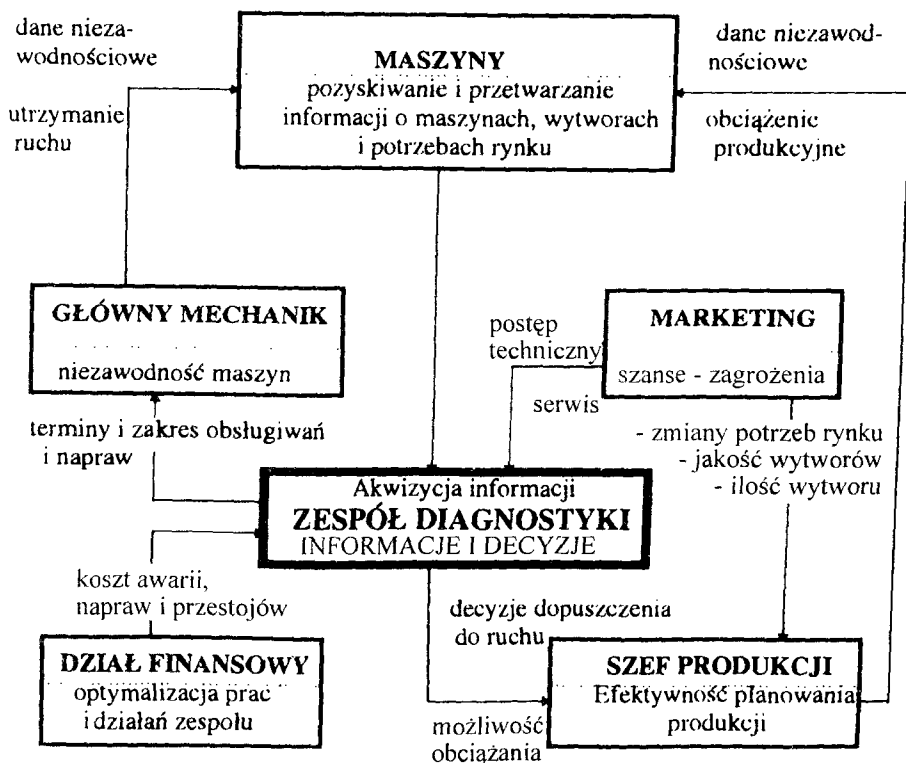
Znaczenie diagnostyki technicznej w działalności przedsiębiorstw wynika z funkcji:

- **prognostycznej**, pozwalającej określać z pewnym prawdopodobieństwem procesy zużycia i stany eksploatacyjne maszyn w określonej przyszłości;
- **prewencyjnej**, umożliwiającej skuteczne planowanie i realizację działań zapobiegających procesom zużywania się oraz awariom maszyn;
- **korekcyjnej**, polegającej na dokonywaniu zmian konstrukcyjno-technologicznych w produkcji maszyn oraz zmian warunków eksploatacji zmierzających do poprawy ich funkcjonalności i niezawodności.

Wdrożenie diagnostyki technicznej w przedsiębiorstwie uwarunkowane jest odpowiednim przygotowaniem organizacyjnym i obejmuje:

- pełną dokumentację techniczną dotyczącą aparatury diagnostycznej, określającą także technologię jej instalacji i eksploatacji (w tym symptomy stanu i instrukcje diagnostyczne);
- system informacji diagnostycznej zawierający źródła, sieć przepływu, odbiorców, sposób wykorzystania, techniczne środki przesyłania i przetwarzania oraz dokumentację;
- technologie obsługi, organizację i jednostki odpowiedzialne za zaopatrzenie i gotowość funkcjonalną diagnostyki technicznej;
- zasady doboru i program szkolenia personelu odpowiedzialnego za wykonywanie, nadzór i kontrolę czynności diagnostycznych;
- analizę ekonomicznej efektywności zastosowania diagnostyki w przedsiębiorstwie;
- opracowanie mechanizmów pozytywnej stymulacji ekonomicznej pracowników i jednostek związanych z wykonywaniem zadań diagnostyki.

Problematykę diagnostyki w zakładzie najczęściej powierza się zespołowi diagnostycznemu, który określa zakres, metody i środki niezbędne do nadzoru maszyn (krytycznych, ważnych, mało istotnych). Swoje zadania zespół realizuje w powiązaniu z działem głównego mechanika, szefa produkcji, kierownikiem działu marketingu i księgowości (rys.4).



Rys.4 Powiązania informacyjne zespołu diagnostyki w zakładzie

Zróznicowaną informacją o stanie maszyn zainteresowane są poszczególne działy zakładu, zależnie od zakresu użytkowanych maszyn i specyfiki produkcji.

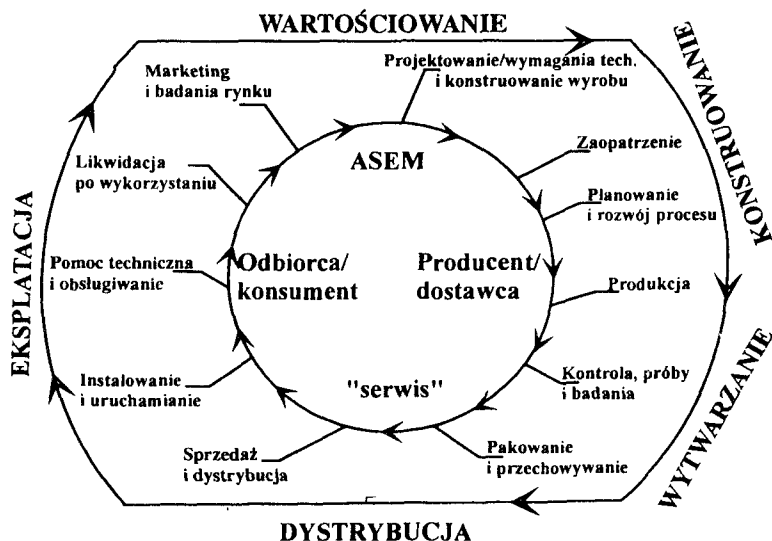
Zespół diagnostyki pozyskuje i przetwarza informacje o maszynach i na tej podstawie podejmuje odpowiednie decyzje. Decyzje o dopuszczeniu do ruchu danej maszyny oraz informacje o możliwości obciążenia maszyny, a także o konieczności wyłączenia maszyny z ruchu przekazywane są do szefa produkcji. Do głównego mechanika zakładu przekazywane są informacje o terminie i zakresie spodziewanych napraw, a od niego otrzymuje dane niezawodnościowe w celu lepszego zorientowania swych prac. Dla optymalizacji zakresu swych prac i potwierdzenia swej przydatności zespół otrzymuje informacje o potrzebach rynku z działu marketingu, zaś o kosztach napraw i przestoju z działu finansowego.

### 3.2. Autoryzowana strategia eksploatacji maszyn

Jakościowe zmiany wymuszone gospodarką rynkową mają rozległe konsekwencje we wszystkich sferach gospodarowania, w tym również w eksploatacji środków trwałych. Wymagania od strony "jakości", marketingu i logistyki zmieniają radykalnie kryteria oceny maszyn, dając przesłanki do dalszego, rosnącego zainteresowania metodami i środkami diagnostyki technicznej.

Potrzeby i uwarunkowania gospodarki rynkowej uzasadniają konieczność wprowadzenia nowoczesnej **autoryzowanej strategii wytwarzania i eksploatacji maszyn (ASEM)**.

W propozycji tej strategii nie traci się dotychczasowych dokonań najnowszej strategii eksploatacji według stanu, lecz twórczo się ją modernizuje. Sama idea tej strategii, pokazana na rys.5, opiera się na wykorzystaniu "pętli jakości", którą uzupełniono elementami teorii eksploatacji (fazy istnienia maszyny, serwis) oraz diagnostyki technicznej.



Rys. 5. Autoryzowana strategia eksploatacji maszyn

Proponowana strategia eksploatacji **ASEM** imiennie wskazuje na twórcę i odpowiedzialnego za wyrób. Producent zainteresowany jakością i późniejszym zbytem jest odpowiedzialny za wyrób od zamysłu, poprzez konstrukcję, wytwarzanie i eksploatację, aż do utylizacji po likwidacji obiektu. Tym samym producent konstruuje i wytwarza swoje wyroby w oparciu o najnowsze osiągnięcia myśli technicznej, zabezpiecza swój wytwór własnym serwisem obsługowym w czasie eksploatacji, a także wyposaża obiekty w środki diagnostyczne (najlepiej automatyczne).

### 4. ELEMENTY SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

Rozwój techniki komputerowej powoduje coraz szersze przenikanie do różnych dziedzin techniki zarówno całych komputerów, jak i ich elementów, takich jak mikro-

procesory, pamięci, układy wejściowe i wyjściowe itp. W diagnostyce technicznej istnieje wiele różnych możliwości wykorzystania komputerów w zależności od sytuacji diagnostycznych oraz stopnia automatyzacji procesu i systemu diagnostycznego. Sposoby te można podzielić na trzy grupy, które mogą być ogólnie nazwane:

- 1) konwencjonalne wykorzystanie komputera do celów diagnostycznych;
- 2) komputeryzacja systemu diagnostycznego;
- 3) komputeryzacja urządzeń diagnostycznych.

W każdym przypadku wykorzystanie techniki komputerowej umożliwi szybszą realizację procesu diagnozowania, optymalizację programu lokalizacji uszkodzeń lub okresu przeprowadzania prac profilaktycznych.

### **Konwencjonalne wykorzystanie komputera do diagnozowania**

Podstawowym zadaniem każdego komputera jest wykonywanie obliczeń i przedstawianie ich wyników w dogodnej dla użytkownika postaci. Stąd najprostsze, a jednocześnie bardzo efektywne zastosowanie komputera w procesie diagnozowania, to wykorzystanie go tylko do celów obliczeniowych.

W takim przypadku w komputerze można wyróżnić trzy podzespoły:

- klawiaturę, jako urządzenie wejściowe, umożliwiające sterowanie komputerem;
- pamięć, w której gromadzi się programy, dane i wyniki obliczeń;
- monitor (ewentualnie drukarkę), jako urządzenie wyjściowe, na którym diagnosta odczytuje wytyczne do dalszego postępowania (np. jak korzystać z aparatury kontrolno-pomiarowej) i wyniki obliczeń, diagnozy.

Elementem sprzęgającym komputer z pozostałymi elementami systemu diagnostycznego i obiektem jest w tym przypadku diagnosta (lub pracownik obsługujący komputer). Najpierw za pomocą stosownych urządzeń kontrolno-pomiarowych oddziaływanie się na obiekt i uzyskuje informacje o jego stanie, a następnie wprowadza się je do komputera (za pomocą klawiatury). Na monitorze odczytuje się częściowe lub końcowe diagnozy jako wynik zadanych programów obliczeniowych.

Podstawowe zalety tego sposobu wykorzystania komputera do celów diagnostycznych to:

- 1/ uwolnienie diagnosty od konieczności pamiętania (lub szukania w instrukcjach) różnego rodzaju danych; zmniejsza to możliwość popełnienia omyłek i wypracowania błędnych diagnoz;
- 2/ znaczne skrócenie czasu trwania procesu diagnozowania;
- 3/ eliminacja subiektywnych wniosków i ocen oraz konsekwentna rejestracja danych, co znacznie wpływa na wiarygodność wyników kontroli.

Zastosowanie komputera w tej strukturze systemu diagnostycznego wymaga opracowania odpowiednich programów (software'u), nie wiąże się natomiast z żadnymi zmianami w oprzyrządowaniu pomiarowym, sieci połączeń itp. Rozwiązanie takie jest najtańszą, a zarazem bardzo efektywną formą komputeryzacji systemu diagnostycznego. Zazwyczaj nie wymaga to nawet zakupu komputera, gdyż w zakładzie coraz częściej jest dostępny komputer, stosowany do różnych celów w wydziałach **technicznych lub księgowości**.

### **Komputeryzacja systemu diagnostycznego**

Omówione wyżej sposoby wykorzystania komputera umożliwiają znaczne usprawnienie realizacji procesów diagnozowania bez naruszania struktury systemu diagnostycznego, która umożliwia wypracowanie diagnozy również bez komputera. Jego funkcje spełnia wówczas człowiek-diagnosta. Dalsze zwiększenie roli komputera polega przede wszystkim na przekazaniu komputerowi funkcji sterowania oprzyrządowaniem kontrolno-pomiarowym.

Elementem sprzęgającym obiekt i jego oprzyrządowanie kontrolno-pomiarowe jest tu interfejs, to jest układ pośredniczący w dwustronnym przekazywaniu informacji pomiędzy podzespołami komputera a urządzeniami zewnętrznymi.

Dzięki temu, program zawarty w pamięci komputera powoduje generację komend sterujących, oddziaływujących poprzez układ interfejsu na przyrządy pomiarowe, generatory sygnałów testujących itp. Kolejne komendy powodują przekazanie po przez interfejs wyników pomiarów z przyrządów do pamięci komputera. Dalsze ich przetwarzanie w komputerze prowadzi do wypracowania diagnozy lub jej wariantów i za pośrednictwem monitora przekazanie jej do akceptacji diagnosty.

Sterowanie przyrządami pomiarowymi polega na:

- powodowaniu wykonania określonych działań za pomocą przyrządów w zadanych chwilach lub co zadany okres;
- wyborze wielkości badanych według zadanego stałego programu lub w zależności od wyników poprzednich pomiarów;
- tworzenie odpowiedniej dla danego pomiaru struktury systemu diagnostycznego poprzez włączanie odpowiednich przyrządów pomiarowych i innych urządzeń stymulujących odpowiednie warunki badania.

### **Mikroprocesorowe urządzenia diagnostyczne**

Komputeryzacja systemu diagnostycznego ma tę zaletę, że umożliwia elastyczne wykorzystanie zgromadzonej aparatury kontrolno-pomiarowej (hardware'u) do różnych celów po przez zmianę programu (software'u). Jest to korzystne w przypadkach, gdy często zmienia się diagnozowany obiekt lub wymagania diagnostyczne. Jeśli występuje potrzeba wielokrotnego diagnozowania tego samego lub takiego samego obiektu, celowym staje się doprowadzenie systemu diagnostycznego do postaci mikroprocesorowego urządzenia diagnostycznego.

Główne zalety mikroprocesorowych urządzeń to:

- szybkość działania (możliwość rejestracji i uwzględniania wartości chwilowych procesów przejściowych);
- automatyczna, bez udziału obsługi realizacja skomplikowanych działań pomiarowych i obliczeniowych;
- selektywny wybór informacji dostarczanych użytkownikowi w postaci najłatwiejszej do percepcji;
- duża niezawodność działania i wiarygodność wyników;
- obiektywność diagnoz, niezależna od kwalifikacji, solidności i koncentracji uwagi personelu.

Zastosowanie mikroprocesorowych urządzeń diagnostycznych ma szczególnie duże znaczenie w sytuacjach, gdy trzeba kontrolować wielkości w wielu punktach obiektu.

## 5. DIAGNOSTYCZNE SYSTEMY EKSPERTOWE

Pojęcie "eksperta" jest intuicyjnie rozumiane jako określenie człowieka posiadającego ugruntowaną wiedzę i doświadczenie w danej dziedzinie oraz cieszącego się autorytetem w środowisku. Oceny wydawane przez eksperta z jednej strony zależą od jego wiedzy i doświadczenia, a z drugiej od subiektywnych odczuć związanych z wynikami jego zawodowych doświadczeń, aktualnych tendencji w podejściu do zagadnień wymagających rozwiązania itp.

Oparty na takich subiektywnych odczuciach proces doboru ekspertów oraz generowane przez nich oceny wymagają starannej realizacji i dokładnej weryfikacji.

Główną przyczyną odwoływania się do systemów ekspertowych jest świadomość, że posiadana o rozpatrywanym problemie wiedza nie jest ani pełna, ani całkowicie pewna. W odniesieniu do diagnostycznych systemów ekspertowych ma to miejsce w sytuacji, gdy wnioskowanie diagnostyczne nie może być dostatecznie wiarygodne w wyniku logicznego wnioskowania, przeprowadzanego na podstawie analizy budowy obiektu, zasad jego funkcjonowania i wyników przeprowadzonych obserwacji i pomiarów.

Sytuacje takie mają miejsce zwłaszcza w okresie opracowywania przez projektanta wytycznych (np. instrukcji, projektów urządzeń diagnostycznych) do diagnozowania obsługowego (lokalizacji uszkodzeń).

Jeśli diagnoza wypracowana przez system diagnostyczny nie spełnia wymagań użytkownika (np. jest fałszywa), zwraca się on o pomoc do eksperta, który korzystając z dodatkowych informacji zaleca zmiany w procesie diagnostycznym (badanie innych właściwości obiektu, inne wartości odniesienia, inna relacja diagnostyczna), w wyniku czego uzyskuje się diagnozę bardziej wiarygodną.

Aby zrealizować to zadanie, system umożliwi tworzenie wiedzy diagnostycznej, korzystając z różnych źródeł informacji. Są to:

- 1) badania literaturowe; pozwalają one określić czego nie wiemy. Należy zwrócić uwagę, że źródłem informacji w tym zakresie mogą być, oprócz opracowań naukowych, również instrukcje obsługi, protokoły reklamacyjne i wyniki badań zarówno obiektu którego dotyczy opracowywany system diagnostyczny, jak i innych obiektów należących do tej samej klasy;
- 2) analiza budowy i funkcjonowania obiektu;
- 3) badania eksperymentalne, uzupełniające lub weryfikujące już posiadaną wiedzę dotyczącą obiektu i jego diagnozowania. Badania te mogą być symulacyjne lub modelowe, prowadzone w warunkach laboratoryjnych lub eksploatacyjnych.

Uzyskana wiedza diagnostyczna zostaje wykorzystana we współpracy z ekspertem w ten sposób, że:

- a) na podstawie 1) i 2) tworzy się zestaw możliwych stanów niezdatności obiektu i zestaw objawów tych stanów;
- b) drogą wywiadów (np. w postaci kwestionariusza ankietowego) uzyskuje się od ekspertów określenie zależności między objawem a stanem niezdatności. Użyte relacje mogą być zapisane za pomocą tzw. **tablic bazowych reprezentacji wiedzy**;
- c) wyniki te poddaje się weryfikacji poprzez badania eksperymentalne, przeprowadzając różne eksperymenty diagnostyczne.



Końcowym wynikiem tych działań jest utworzenie reguł wnioskowania w postaci implikacji: "*jeżeli  $\{x\}$  to  $y$* "; gdzie  $x$  - "przesłanki" a  $y$  - "konkluzje". Reguły te różnią się od relacji diagnostycznych tym, że:

- związana jest z nimi niepewność charakteryzowana stopniami pewności, gdyż zarówno fakty, jak i oparte na nich reguły wnioskowania nie są całkowicie pewne;
- reguły wnioskowania mogą być proste, w postaci implikacji: *jeżeli  $x$  to  $E_i$*  albo złożone, w postaci: *jeżeli  $x$  to  $E_i$  lub  $E_j$*  ( $i \neq j$ ).

Utworzenie reguł wnioskowania, to jest implikacji łączących objawy ("przesłanki") i diagnozy ("konkluzje"), wymaga zebrania wielu informacji o obiekcie, ustalenia sposobu ich pozyskiwania, a zwłaszcza wyboru interesujących symptomów, które mogą zawęzić nieokreśloność stanu obiektu.

Związane z tym problemy można połączyć w następujące, powiązane ze sobą moduły:

- 1/ moduł pozyskiwania informacji (akwizycji wiedzy) diagnostycznej;
- 2/ moduł sterowania dialogiem z użytkownikiem;
- 3/ moduł tworzenia reguł wnioskowania;
- 4/ moduł bazy wiedzy diagnostycznej.

Pierwszy z nich wiąże się z zestawem aparatury pomiarowej i przetworników umożliwiających uzyskiwanie danych. Drugi dotyczy doboru objawów, symptomów i stanów obiektu (możliwych uszkodzeń), które należy badać i określać. Trzeci moduł obejmuje metodykę wypracowywania relacji coraz dokładniej i pewniej wiążących obserwowane symptomy ze stanami obiektu.

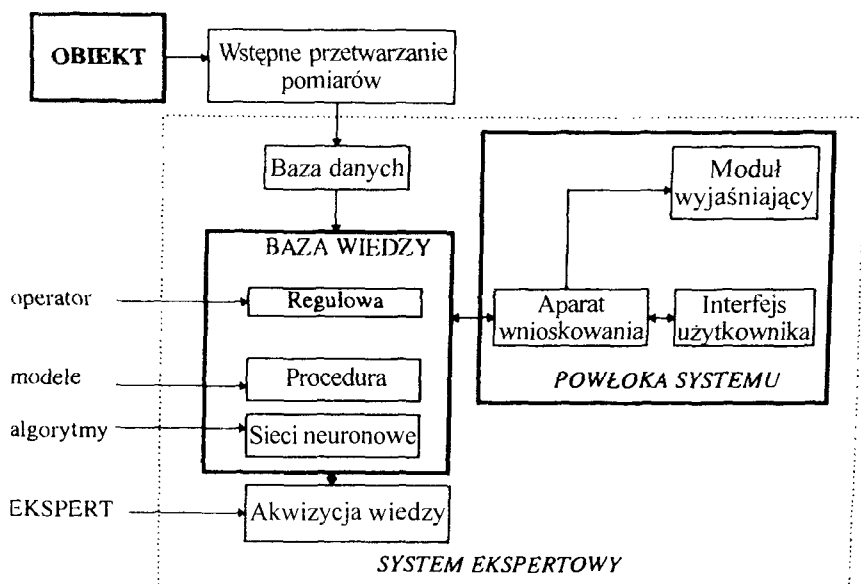
Wyniki uzyskiwane w toku prowadzonych badań literaturowych (w tym dane projektowe o obiekcie), badań eksperymentalnych (w tym dane z eksploatacji) oraz wyniki wnioskowania i ich weryfikacja gromadzone są w module bazowym wiedzy diagnostycznej i są wykorzystywane w kolejnych procesach diagnostycznych realizowanych przez system diagnostyczny.

Znacznym ułatwieniem opracowywania diagnoz w ekspertowym systemie diagnostycznym jest stworzenie tzw. szkieletowego systemu jako wyspecjalizowanego narzędzia pozyskiwania wiedzy. System taki jest w znacznym stopniu uniwersalny (może być zastosowany do różnych obiektów). Po uzupełnieniu danymi (tj. wprowadzeniu informacji do modułu bazowego) może być wykorzystywany przez różnych użytkowników do tworzenia relacji umożliwiających wnioskowanie o stanie obiektu. Opracowanie takiego systemu pozwala wykorzystać komputer do konstruowania systemów ekspertowych - rysunek 6.

Komputerowy system doradczy jest zbiorem programów umożliwiających opracowanie odpowiedniej bazy wiedzy, na którą składa się:

- zespół danych uzyskiwanych w wyniku pomiarów;
- zbiór reguł wnioskowania generujących konkluzje na podstawie przesłanek;
- programy umożliwiające zapis modeli matematycznych (zwykle w postaci równań różniczkowych) oraz ich odwracanie.

W miarę udoskonalania komputerowego wspomaganie systemów ekspertowych będą one coraz szerzej wykorzystywane dla potrzeb diagnozowania złożonych obiektów przemysłowych, jak również optymalizacji innych procesów eksploatacyjnych.



Rys. 6 Architektura diagnostycznego systemu ekspertowego

## 6. ZAKRES ZAINTERESOWAŃ

Kształtowanie i ocena jakości maszyn metodami diagnostyki technicznej wiąże się ściśle z koniecznością utrzymania na odpowiednim poziomie ich cech użytkowych w określonych warunkach eksploatacji. Cechy te, spełniające wymogi reprezentatywnych dla stanu obiektu, winny być określone już na etapie konstruowania, a weryfikowane podczas wytwarzania i eksploatacji.

Do wyróżnienia, oceny i podtrzymywania cech użytkowych wykorzystuje się:

- możliwości diagnostyki technicznej, w tym konstruowanie diagnostyczne, ocenę jakości wytworów, diagnostykę eksploatacyjną, metody i środki diagnostyki technicznej, wspomaganie badań diagnostycznych techniką komputerową;
- badania niezawodności maszyn w fazach: przedprodukcyjnej, produkcyjnej i poprodukcyjnej przy wykorzystaniu programowanych badań stanowiskowych, modelowania deterministycznego i stochastycznego czynników wymuszających, wspomaganie komputerowe badań niezawodności;
- metodologię kształtowania „jakości” maszyn przez „jakościowy system sterowania przedsiębiorstwem” z uwzględnieniem kryteriów norm jakości EN serii 29 000;
- możliwości regeneracji części maszyn, w tym regenerację wielokrotną, badania zmęczeniowe i modelowanie obciążeń części regenerowanych, nowe techniki i technologie odtwarzania jakości części maszyn;
- badania technologiczności obsługowej i naprawczej maszyn, kształtowanie intensywności starzenia i zużywania się elementów maszyn, kształtowanie podatności eksploatacyjnej maszyn oraz ocenę efektywności eksploatacji maszyn.

Powyższe grupy tematyczne stanowią obszar zainteresowań pracowników Katedry, przyczyniając się do rozwoju metod i metodologii kształtowania i podtrzymywania jakości maszyn.

## ZAKOŃCZENIE

Przedstawiony obszar działalności naukowej Katedry Maszyn Roboczych i Pojazdów obejmuje problematykę kształtowania i oceny jakości maszyn, przy wypukleniu dominującej w tym względzie roli diagnostyki technicznej. Dotychczasowe osiągnięcia w tej problematyce jednoznacznie określają kierunki dalszych prac, szczególnie w obszarze doskonalenia metodologii badań z uwzględnieniem fraktalnych cech systemów i losowości zdarzeń opisywanych chaosem zdeterminowanym.

Problematyka prac badawczych, obejmująca niezawodność, diagnostykę, regenerację, użytkowanie i obsługiwane jest nakierowana na współczesne metody kształtowania jakości, przy wykorzystaniu techniki komputerowej i osiągnięć sztucznej inteligencji.

## LITERATURA

- [1] Żółtowski B., Józefik W.: Diagnostyka techniczna elektrycznych urządzeń przemysłowych. Wyd. ATR. Bydgoszcz. 1996.
- [2] Żółtowski B.: Utrzymanie maszyn w ruchu. Zeszyty Naukowe ATR nr 152, Mechanika 32, Bydgoszcz 1988, s. 5-22.
- [3] Żółtowski B.: Ocena podatności diagnostycznej maszyn. Zeszyty Naukowe ATR nr 152, Mechanika 32, Bydgoszcz 1988, s. 49-62.
- [4] Żółtowski B.: Diagnostowanie silnika wysokoprężnego. ITE. Radom 1995.
- [5] Żółtowski B.: Diagnostyka polska. Konfer. sc. Bydgoszcz 1995.
- [6] Żółtowski B.: Diagnostyczne aspekty jakości maszyn. ZN P.Gdańskiej. Mechanika 1996.

## FORMING AND ESTIMATION OF QUALITY FOR MACHINES IN CHAIR OF MACHINES AND VEHICLES

### SUMMARY

The machine's quality forming proceed through all phases of machine's existance. It has in view assure high-unfailing operation and fulfil tasks which stand in front of modern machines. As an instrument for this task we can use methods and means of technical diagnostics including artificial intelligence.

In this paper the range of problems and labours which are realizing in Chair of Machines and Vehicles is shown. Simultaneously the work indicates the development trends for methods quality forming of machines.

ISSN 0208-6395

**Biblioteka Główna ATR  
w Bydgoszczy**

Cz	1006 41 1996
----	-----------------