

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

ZESZYTY NAUKOWE NR 198

MECHANIKA 40



BYDGOSZCZ - 1996

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

ZESZYTY NAUKOWE NR 198

MECHANIKA 40

1996

BYDGOSZCZ - 1996

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
prof. dr hab. Ojcumiła Stefaniak

REDAKTOR DZIAŁOWY
dr hab. inż. Maciej Woropay

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE
mgr Dorota Ślachciak, 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. 7,75. Ark. druk. 7,25. Papier druk. kl. III.
Oddano do druku w lipcu 1996 r. Druk ukończono w lipcu 1996 r.
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii ATR Bydgoszcz ul. Ks. A. Kordeckiego 20
Zamówienie nr 13/96

Spis treści

1. Maciej Woropay, Jerzy Grzegórski, Leszek Knopik: Model oceny efektywności procesu realizacji celów systemu eksploatacji	5
2. Anna Ławrynowicz: Wiedza w sztucznej inteligencji	17
3. Eugeniusz Ranatowski, Jan Sadowski, Ryszard Strzelecki: Modelowanie i ocena podstawowych parametrów w próbie udarowego zginania ze wspomaganie komputerowym	29
4. Eugeniusz Ranatowski: Analiza fizyczna procesu udarowego zginania	43
5. Lech M. Kamiński: Właściwości dynamiczne pneumatycznego siłownika jednostronnego działania	55
6. Andrzej Laskowski: Wykraplanie się wilgoci z powietrza przy zmianie jego ciśnienia	65
7. Eugeniusz Jarmocik: Równomierność oprysku w praktyce rolniczej	75
8. Bronisław Kłós, Eugeniusz Jarmocik: Analiza współpracy pompy próżniowej ze zbiornikiem przepływowym i regulatorem podciśnienia	81
9. Zdzisław Ławrynowicz: Badania struktury bainitycznej w eksperymentalnej stali 15HM2	89
10. Zbigniew Dąbek: Dyskusyjne uwagi o błędach, niedokładności i niepewności pomiarów	105
11. Zbigniew Dąbek: O pewnych, probabilistycznych aspektach ustalania okresu gwarancji	115

Maciej Woropay
Jerzy Grzegórski
Leszek Knopik

MODEL OCENY EFEKTYWNOŚCI PROCESU REALIZACJI CELÓW SYSTEMU EKSPLOATACJI

W opracowaniu przedstawiono zasady identyfikacji systemu eksploatacji oraz budowy jego modelu ocenowego zawierającego zbiór reprezentatywnych miar cząstkowych oceny efektywności.

Budowę modelu zrealizowano na podstawie analizy rzeczywistego systemu eksploatacji, w której uwzględniono hierarchiczną strukturę systemu oraz oddziaływania zachodzące między tym systemem a jego otoczeniem.

1. WPROWADZENIE

Systemy eksploatacji obiektów technicznych należą do klasy systemów działaniowych. Są to systemy rzeczywiste, które oddziałują na otoczenie i tak reagują na jego wpływ, aby osiągnąć określony cel. Warunkiem koniecznym racjonalnego działania systemu z zachowaniem celowym jest to, aby sekwencja kolejnych stanów systemu zmierzała do zamierzonego stanu, zwanego celem. Zatem system eksploatacji będący systemem sterowalnym, ukierunkowanym na osiągnięcie wyraźnie sprecyzowanego celu, można rozpatrywać jako system cybernetyczny, w którym rolę organu sterującego spełnia człowiek.

Systemy eksploatacji należą zatem do klasy systemów socjotechnicznych typu "człowiek-obiekt techniczny" (<C-OT>), posiadających następujące cechy [1], [2], [4], [5]:

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

W systemach tych można wyodrębnić pięć jakościowo odmiennych składników [8]:

- przedmioty pracy (kierownik i pracownicy),
- obiekty techniczne (maszyny, urządzenia, aparaty, budynki, budowle itd.),
- materiały (surowce, części wymienne, odpady, zasoby mineralne itd.),
- energie (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 [1].

Wymienione składniki systemu są aktywizowane, poddawane wzajemnym oddziaływaniom, często znajdują się w ruchu i ulegają procesom przemiany. Zazwyczaj energie, materiały, informacje i obiekty techniczne przebywają w systemie działaniowym czasowo. Do systemu są one dostarczone z otoczenia oraz odprowadzane z systemu do otoczenia, przez systemy, specjalnie do tych działań wyznaczone (zbudowane). Systemy realizujące te podstawowe zadania to tak zwane systemy logistyczne, usytuowane zarówno w otoczeniu systemu eksploatacyjnego, jak i w jego wnętrzu. 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 prac: [3], [8], [9] można wyróżnić następujące cele działania systemu logistycznego:

- prognozowanie zapotrzebowania na materiały, energię i informacje,
- zaopatrywanie w wyżej wymienione składniki, magazynowanie i zarządzanie ich zapasami,
- pakowanie i konfekcjonowanie wyrobów,
- zarządzanie wykorzystaniem opakowań i odpadów produkcyjnych,
- obsługiwanie oraz użytkowanie obiektów i stanowisk pracy,
- gromadzenie, przetwarzanie i przysyłanie informacji dotyczących realizacji wymienionych czynności logistycznych.

Koordinacja działań logistycznych polega na właściwym podziale zadań, kompetencji i odpowiedzialności między podsystemy (elementy) systemu logistycznego. Racjonalny podział tych zadań może być zrealizowany tylko w systemie o strukturze hierarchicznej. Systemy o strukturze hierarchicznej posiadają następujące cechy [6]:

- składają się ze zbioru 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 uzależniona jest od prawidłowości działania podsystemów znajdujących się na niższych poziomach hierarchicznych,
- między podsystemami znajdującymi się na tych samych poziomach hierarchicznych często występuje konflikt celów działania, co powoduje konieczność koordynacji ich działań przez system nadrzędny.

2. BUDOWA SYSTEMU EKSPLOATACJI

Szczególnie istotne zadania w nadsystemie logistycznym realizuje system eksploatacji, usytuowany na niższym jego poziomie hierarchicznym.

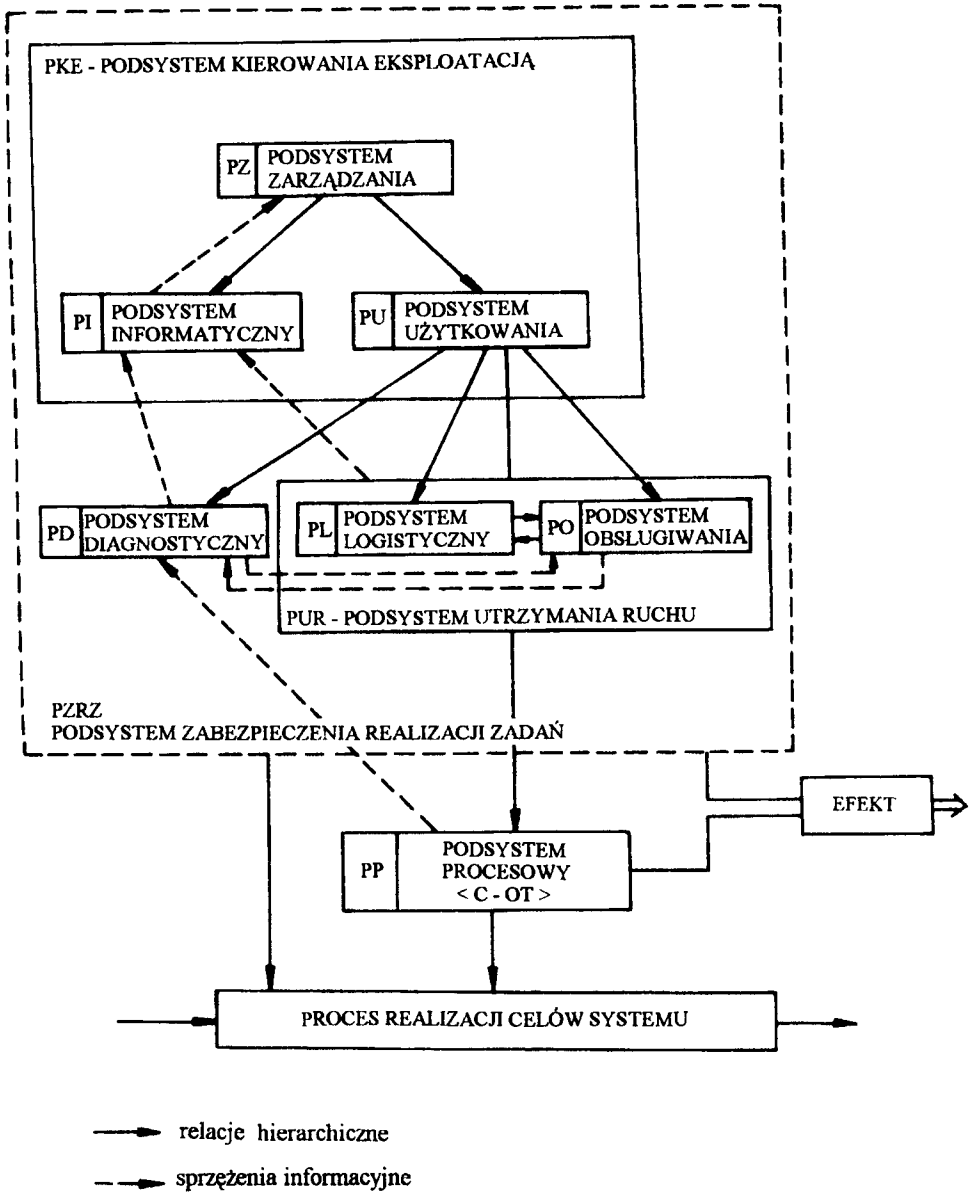
Podstawowymi procesami realizowanymi w systemie eksploatacji są procesy użytkowania i obsługiwanie obiektów technicznych. Efektywność użytkowania obiektów technicznych zależy przede wszystkim od racjonalnego ich wykorzystania, stopnia realizacji zasady oszczędnego ich użycia, wydajności pracy żywej i 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).

W procesie obsługowym istotny problem stanowi jakość odnowy obiektów oraz minimalizacja czasów ich przestojów i kosztów odnow. Optymalizacja procesu odnowy uzależniona jest od efektywności działania podsystemu obsługi, który powinien spełniać kryteria techniczne, organizacyjne i ekonomiczne, wykorzystującego metody diagnostyki technicznej.

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 od podsystemu informatycznego o stopniu realizacji zadań. Podsystem informatyczny otrzymuje również informacje od podsystemów otoczenia.

Informacje te przetworzone 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.

Jak widać na rys. 1, relacje zachodzące między podsystemem procesowym <C-OT> a podsystemem zabezpieczenia realizacji zadań, 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 zabezpieczania realizacji zadań w tworzeniu podsystemowi procesowemu optymalnych (sprzyjających) warunków działania.



Rys.1. Schemat strukturalny systemu eksploatacji

3. MODEL SYSTEMU EKSPLOATACJI

W systemie eksploatacji przedstawionym na rys.1 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 PI, zarządzania PZ oraz użytkownika PU, zagregowano w jeden podsystem tzw. podsystem kierowania eksploatacją PKE, a podsystemy: obsługiwanie PO i logistyczny PL w podsystem utrzymania ruchu PUR. Podsystem kierowania eksploatacją spełnia funkcję kierującą i nadzorującą działanie systemu eksploatacji.

Działanie podsystemu kierowania eksploatacją ukierunkowane jest na realizację następujących zadań [2]:

- precyzowanie celów działania systemu eksploatacji,
- opracowywanie planów działań, obejmujące wyznaczenie podmiotów działania oraz ustalenie kosztów i realnych dochodów uzyskiwanych tych działań,
- opracowywanie planów pozyskiwania, przetwarzania, gromadzenia oraz przepływu materiałów, energii i informacji oraz wyznaczenie podmiotów i środków do realizacji wymienionych zadań,
- sterowanie prawidłowym i zgodnym z planem wykonaniem zadań, obejmującym: pobudzenie do działań, kontrolę bieżącą realizacji działań i ich koordynowanie, nadzorowanie i kontrolowanie wyników działań,
- sterowanie składowaniem i zabezpieczeniem wyrobów,
- sterowanie utrzymywaniem ruchu w podstawowych środkach działań (obiekty techniczne, aparatura itp.).

Natomiast zabezpieczenie stanu zdolności zadaniowej 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 kierowania eksploatacją. Obsługiwanie, a w szczególności naprawa i wynikająca z niej odnowa, realizowane przez podsystem utrzymania ruchu, powodujące przywrócenie właściwości użytkowych obiektom technicznym oraz utrzymywanie ich w stanie zdolności zadaniowej, stanowią podstawowy warunek umożliwiający realizację przyjętych zadań. Zakres, częstości i koszt wykonywania obsług zależą od stanu, typu i rodzaju obiektów technicznych. Rola, współdziałającego z podsystemem utrzymania ruchu, podsystemu diagnostycznego polega na badaniu symptomów diagnostycznych celem wyznaczenia przeszłych, aktualnych lub przyszłych stanów eksploatowanych obiektów technicznych oraz ocenie działania ich operatorów i stanów otoczenia. Działalność diagnostyczna w systemie eksploatacji SE obejmuje trzy etapy działania:

- opracowanie podstaw teoretycznych i metodologicznych umożliwiających rozwiązywanie zadań diagnostycznych dla różnych klas eksploatowanych obiektów technicznych i ich operatorów, nazywanych ogólnie obiektami diagnozowanymi,
- przygotowywanie podsystemu diagnostycznego do realizacji badań diagnostycznych obejmujące: opracowanie sposobów (algorytmów) badania diagnostycznego obiektów, dobór urządzeń diagnostycznych, przygotowanie obiektów i diagnostów do realizacji badań diagnostycznych, laboratoryjno-doświadczalną weryfikację modelu teoretycznego badań diagnostycznych obiektów,
- realizację oraz syntezę wyników diagnostycznych badań stanu obiektów diagnozowanych.

Podsystemy PKE, PD, PUR i PP, stanowią system o strukturze hierarchicznej, 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 przedstawiona na rys. 1 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.

Jak widać, system eksploatacji jest systemem złożonym, realizującym wiele zadań (wielozadaniowym). W zależności od stanu, w którym znajdują się jego podsystemy, może on realizować wszystkie zadania, gdy podsystemy te znajdują się w stanie zdatności, lub tylko niektóre wybrane zadania, gdy któryś z nich utraci swoją zdatność.

Należy również zwrócić uwagę na rolę otoczenia, którego oddziaływanie ułatwia lub uniemożliwia realizację zadań przez system.

Z tego powodu otoczenie O , badanego systemu eksploatacji, potraktowano jako jeden z podsystemów, współdziałający z badanym systemem i włączono go do modelu opisu jego stanów. Przyjęto zatem, że każdy podsystem PKE, PUR, PP oraz otoczenie systemu O , w dowolnej chwili t , $t \in [t_0, t_u]$, może znajdować się tylko w jednym z dwóch możliwych (binarnych) stanów, tj. w stanie zdatności, oznaczonym symbolem 1 lub w stanie niezdatności oznaczonym symbolem 0. Zatem wektor $X(t)$ opisujący stan modelu (systemu eksploatacji oraz jego otoczenia) w chwili- t , jest 5-cio wymiarowym wektorem binarnym o postaci:

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t), x_5(t)]$$

Składowe wektora $X(t)$ opisują kolejno stany podsystemów: procesowego PP, kierowania eksploatacją PKE, utrzymania ruchu PUR, diagnostycznego PD

i otoczenia systemu O. Jeżeli $x_w(t) = 1$ ($w = \overline{1,5}$), to w-ty podsystem jest w stanie zdadności, natomiast jeśli $x_w(t) = 0$, to w-ty podsystem jest w stanie niezdadności. Oznacza to 2^5 możliwych realizacji wektora $X(t)$.

Działania systemu eksploatacji realizowane są w czasie $T = [t_0, t_k]$. W wyniku działania systemu na otoczenie, jak i oddziaływania otoczenia na system, stan systemu, jak i jego otoczenia może być inny niż w chwili poprzedniej. Najbardziej pożądanym i efektywnym działaniem systemu jest takie działanie, w którym każda zmiana jego stanu zbliża go do zadanego celu. Cel działania systemu jest bezpośrednio realizowany przez obiekty (maszyny i operatorów) podsystemu procesowego PP. Działaniem podsystemu procesowego steruje podsystem kierowania eksploatacją PKE. Natomiast podsystemy otoczenia systemu eksploatacji spełniają istotne funkcje w dostarczaniu materiałów, energii i informacji do systemu i z systemu do otoczenia dalszego. Oznacza to, że stany podsystemu kierowania eksploatacją obiektów technicznych i stany otoczenia decydują o efektywności realizacji celu działania systemu przez podsystem procesowy.

Z tego też powodu na podzbiorze realizacji wektora stanu $X(t)$, dla których składowa opisująca stan podsystemu procesowego przyjmuje tylko wartość 1 ($x_1(t) = 1$), opisano trzy istotne stany, w których obiekty są zawsze w stanie zdadności zadaniowej, a mianowicie:

- S_1 - stan intensywnego użytkowania obiektu technicznego,
- S_2 - stan niezdadności podsystemu kierowania eksploatacją,
- S_3 - stan niezdadności otoczenia.

Stan S_1 zachodzi wówczas, gdy podsystemy: kierowania eksploatacją i otoczenia są w stanie zdadności, tzn. składowe wektora stanu $x_2(t)$ i $x_5(t)$ przyjmują wartość 1. Stan S_2 zachodzi, gdy podsystem kierowania eksploatacją jest w stanie niezdadności ($x_2(t) = 0$), a otoczenie znajduje się w stanie zdadności ($x_5(t) = 1$).

Stan S_3 zachodzi wówczas, gdy podsystem kierowania eksploatacją jest w stanie zdadności ($x_2(t) = 1$), natomiast otoczenie znajduje się w stanie niezdadności ($x_5(t) = 0$). Pozostałe podsystemy modelu mogą znajdować się w dowolnych stanach, ponieważ stany te nie mają wpływu na stany modelu. Natomiast na podzbiorze realizacji wektora stanu $X(t)$, dla których składowa opisująca stan podsystemu procesowego przyjmuje tylko wartość 0, ($x_1(t) = 0$), opisano cztery kolejne istotne stany modelu, w których obiekty techniczne są zawsze w stanie niezdadności zadaniowej, a mianowicie:

- S_4 - stan intensywnego obsługiwanania obiektu technicznego,
- S_5 - stan oczekiwania przez obiekt na obsługę lub operatora,
- S_6 - stan diagnozowania obiektu,
- S_7 - stan oczekiwania przez obiekt na diagnozowanie.

Stan S_4 zachodzi wówczas, gdy podsystem utrzymania ruchu jest w stanie zdadności ($x_3(t) = 1$), natomiast pozostałe podsystemy mogą przyjmować dowolne stany. Zmiana stanu podsystemu utrzymania ruchu ze stanem zdadności na stan niezdadności ($x_3(t) = 0$), powoduje zmianę stanu modelu ze stanu S_4 na stan

S_5 . Stan S_6 zachodzi wówczas, gdy podsystem diagnostyczny jest w stanie zdatości ($x_4(t) = 1$), natomiast zmiana stanu tego podsystemu na stan niezdatności ($x_4(t) = 0$) powoduje zmianę stanu modelu na stan S_7 .

4. MODEL OCENY DZIAŁANIA SYSTEMU EKSPLOATACJI

Celem działania systemu jest osiągnięcie zamierzonego efektu - rozumianego jako skutek określonego procesu działania. W każdym spośród siedmiu opisanych istotnych stanów modelu systemu, system osiąga różne efekty działania.

Do opisu efektywności działania modelu systemu eksploatacji przyjęto następujące wektory zmiennych efektywnościowych:

$$T = (T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_k) \quad i = 1, 2, \dots, k$$

gdzie:

T - wektor, którego składowymi są czasy trwania poszczególnych stanów modelu,

T_i - $i = \overline{1,7}$, losowy czas trwania i -tego stanu modelu.

$$N = (N_1, N_2, N_i, \dots, N_k) \quad i = 1, 2, \dots, k$$

gdzie:

N - wektor, którego składowymi są nakłady na działanie systemu jako całości w poszczególnych stanach modelu,

N_i - $i = \overline{1,7}$, wartość losowa nakładów w i -tym stanie modelu.

$$Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_k) \quad i = 1, 2, \dots, k$$

gdzie:

Z - wektor, którego składowymi są zyski uzyskane w poszczególnych stanach modelu,

Z_i - $i = \overline{1,7}$, wartość losowa zysków w i -tym stanie modelu.

Składowe wektorów T , N , Z są zmiennymi losowymi opisującymi stany modelu z punktu widzenia efektywności procesu realizacji celów eksploatacji, realizowanych przez ten system. Zbiór zmiennych efektywnościowych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zmienne efektywnościowe modelu systemu eksploatacji

Wektory zmiennych efektywnościowych		Składowe wektorów zmiennych przy- porządkowane stanom modelu						
Symbole liczbowe wektorów	Symbole literowe wektorów	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇
1	T	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
2	N	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇
3	Z	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇

Punktem wyjścia do oceny efektywności działania systemu eksploatacji jest budowa modelu ocenowego, zawierającego zbiór miar efektywnościowych i kryteriów ich oceny, uwzględniających stopień złożoności systemu. Jako miary (wskaźniki) efektywności W_{ij}^{kl} przyjęto ilorazy zmiennych efektywnościowych $T_i, N_i, Z_i \quad i = \overline{1,7}$ [7]:

$$W_{ij}^{kl} = \frac{Y_i^k}{Y_j^l}$$

gdzie:

i, j - indeksy stanów modelu $i, j = \overline{1, r}$, ($r = 7$),

k, l - indeksy wektorów efektywnościowych $k, l = \overline{1, p}$ ($p = 3$), w szczególności $Y_i^1 = T_i$, $Y_i^2 = N_i$, $Y_i^3 = Z_i$ dla $i = \overline{1,7}$.

Zbiór pełny cząstkowych miar efektywności (wskaźników) przedstawia macierz M o postaci:

$$M = \begin{pmatrix} M^{11} & M^{12} & \dots & M^{1j} \\ M^{21} & M^{22} & \dots & M^{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M^{i1} & M^{i2} & \dots & M^{ij} \end{pmatrix}$$

dla $i, j = \overline{1,7}$ macierz M zawiera 49 podmacierzy M^{ij} . Dla $i = 1, j = 1$ podmacierz $M^{ij} = M^{11}$ można zapisać w następujący sposób:

$$M^{11} = \begin{vmatrix} W_{11}^{11} = \frac{T_1}{T_1} & W_{12}^{11} = \frac{T_1}{N_1} & W_{13}^{11} = \frac{T_1}{Z_1} \\ W_{21}^{11} = \frac{N_1}{T_1} & W_{22}^{11} = \frac{N_1}{N_1} & W_{23}^{11} = \frac{N_1}{Z_1} \\ W_{31}^{11} = \frac{Z_1}{T_1} & W_{32}^{11} = \frac{Z_1}{N_1} & W_{33}^{11} = \frac{Z_1}{Z_1} \end{vmatrix}$$

Każda z podmacierzy M^{ij} zawiera, jak widać, dziewięć wskaźników efektywności. Podmacierze należące do tego samego wiersza lub tej samej kolumny macierzy M zawierają wskaźniki oceny efektywności przyporządkowane konkretnym stanom modelu S . Elementy podmacierzy M^{i1} i M^{ij} ($i, j = \overline{1,7}$) dotyczą stanu S_1 , tj. intensywnego użytkowania obiektów technicznych. Elementy podmacierzy M^{i2} i M^{2j} ($i, j = \overline{1,7}$) dotyczą stanu S_2 , tj. niezdatności podsystemu kierowania eksploatacją. Natomiast elementy podmacierzy M^{i3} i M^{3j} ($i, j = \overline{1,7}$), dotyczą stanu S_3 niezdatności otoczenia. Elementy podmacierzy M^{i4} i M^{4j} ($i, j = \overline{1,7}$) dotyczą stanu S_4 intensywnego obsługiwanie obiektów technicznych. Elementy podmacierzy M^{i5} i M^{5j} dotyczą stanu S_5 oczekiwania obiektów technicznych na obsługę lub na operatora, elementy podmacierzy M^{i6} i M^{6j} dotyczą stanu S_6 diagnozowania obiektów technicznych i elementy podmacierzy M^{i7} i M^{7j} dotyczą stanu S_7 oczekiwania obiektów na diagnozowanie.

Z punktu widzenia oceny efektywności procesu realizacji celów przez system eksploatacji największą wagę (znaczenie) przypisuje się wartości wskaźników dotyczących oceny efektywności w stanach S_1 i S_4 modelu, ponieważ w stanie S_1 system eksploatacji wypracowuje zyski, natomiast w stanie S_4 ponoszone są maksymalne nakłady, związane z naprawami obiektów technicznych. W wyniku analizy postaci wskaźników zawartych w podmacierzach M^{ij} stwierdzono, że pewna ich liczba nie wnosi istotnych informacji o obiektach badań.

Z uwagi na to zredukowano liczbę podmacierzy M^{ij} zawartych w macierzy M , dokonując jej przekształcenia w macierz M_1 o następującej postaci:

$$M_1 = \begin{vmatrix} M^{11} & M^{12} & M^{13} & \dots & M^{1j} \\ & M^{22} & M^{23} & \dots & M^{2j} \\ & & M^{33} & \dots & M^{3j} \\ & & & \dots & \\ & & & & M^{ij} \end{vmatrix}$$

Celem dokonania oceny efektywności procesu realizacji celów systemu eksploatacji, ze zredukowanej macierzy M_1 , należy wyznaczyć podzbiór podmacierzy M^{ij} zawierających reprezentatywny zbiór wskaźników ocenowych, ze szczególnym uwzględnieniem tych podmacierzy, które zawierają wskaźniki ocenowe stanów S_1 i S_4 modelu.

Mając na uwadze cel badań na zbiorze podmacierzy M^{ij} , określono podzbiór reprezentatywnych wskaźników efektywności dla poszczególnych siedmiu stanów modelu. Oznacza to, że z podzbioru macierzy M^{ii} do podzbioru wskaźników reprezentatywnych zaliczono elementy opisujące kolejno intensywność nakładów i zysków oraz zyskowność nakładów w poszczególnych stanach. Natomiast z podzbioru podmacierzy M^{ij} , wybrano wskaźniki opisujące relacje zachodzące tylko między składowymi wektorów zmiennych $T = (T_1, T_2, \dots, T_7)$, $N = (N_1, N_2, \dots, N_7)$ oraz $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_7)$. Utworzony w ten sposób podzbiór wskaźników efektywności wraz z kryteriami oceny stanowi model wynikowy do oceny efektywności realizacji celów działania złożonego systemu eksploatacji.

5. ZAKOŃCZENIE

Opisany model oceny efektywności działania systemu eksploatacji stanowi podstawę do opracowania metody sterowania tym systemem, w zależności od oceny efektywności działania jego podsystemów.

Ocena efektywności działania każdego z podsystemów umożliwi podjęcie kroków, mających na celu modernizację systemu jako całości. Modernizacja dotyczyć może zarówno elementów systemu (wprowadzenie nowych oraz likwidowanie nieprzydatnych), jak i relacji zachodzących między nimi.

LITERATURA

- [1] Busienko N.P., Kałasznikow W.W., Kowalenko J.N.: Teoria systemów złożonych, PWN, Warszawa 1979
- [2] Frąckiewicz J.L.: Systemy sprawnego działania, Ossolineum, Wrocław 1980
- [3] Hunek J.K.: Logistyka w zarządzaniu, Przegląd Organizacji w Przedsiębiorstwie, z.8, 1989
- [4] Kaźmierczak J.: System cybernetyczny, Wiedza Powszechna, Warszawa 1978
- [5] Młynarski S.: Elementy teorii systemów i cybernetyki, PWN, Warszawa 1974
- [6] Mesarovic M.D., Macko D., Tahakara Y.: Theory of hierarchical multilevel systems, Academic Press, New York and London, 1970
- [7] Powierza L.: Efektywność eksploatacyjna maszyn rolniczych, Instytut Budownictwa Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa, Warszawa 1981
- [8] Schulte J.Ch.: Organizational Gestaltung der Logistik, Zeitschrift Führung + Organization, XI-XII 1991 nr 6 RFN
- [9] Twaróg J.: Logistyka w Europie, Przegląd Organizacji w Przedsiębiorstwie, 1992, z.6

Anna Ławrynowicz

WIEDZA W SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

Fundamentalnym problemem w sztucznej inteligencji jest wiedza. W artykule zaprezentowano najpopularniejsze modele reprezentacji wiedzy, m.in. sieci semantyczne, ramy, systemy produkcji oraz modele logiczne. Ponadto opisano strukturę systemu ekspertowego. Pokazano możliwości sformalizowanego zapisu wiedzy w języku Prolog.

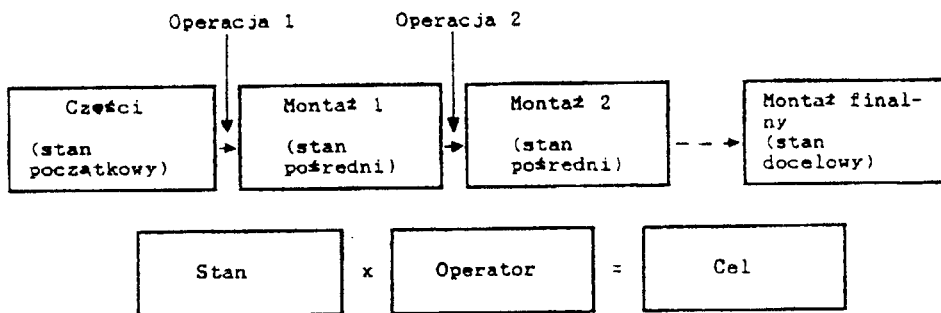
Postęp techniczny powodowany przede wszystkim rozwojem w dziedzinie mikroelektroniki prowadzi do wielokierunkowych zmian we wszystkich obszarach działalności produkcyjnej człowieka. Jednak najbliższym celem postępu technicznego i organizacyjnego wydaje się być komputerowa integracja wytwarzania. Z budową zautomatyzowanych, zintegrowanych komputerowo systemów produkcyjnych wiąże się konieczność pokonania wielu barier. Szczególnie trudne okazuje się m.in. odwzorowanie sytuacji rzeczywistych w postaci modeli, które mogłyby być wykorzystane w komputerowych systemach sterowania. Ten problem, jak również wiele innych związanych z komputerowym wspomaganie działalności produkcyjnej człowieka udało się rozwiązać dzięki rozwojowi badań nad sztuczną inteligencją. Sztuczna inteligencja AI (Artificial Intelligence) to dyscyplina badawcza, która należy do nauk komputerowych zajmujących się rozwiązywaniem problemów, co do których uważa się, że wymagają one zdolności intelektualnych człowieka [por.3,8,12].

Fundamentalnym problemem w sztucznej inteligencji jest wiedza. Obejmuje ona fakty i wiedzę heurystyczną. Fakty to część wiedzy dotycząca danej dziedziny, która jest ogólnie dostępna. Wiedza heurystyczna obejmuje wiedzę zdobytą poprzez wieloletnie doświadczenie, pozwalającą na podstawie intuicji i tzw. zdrowego rozsądku badacza wykrywać nowe fakty i związki między nimi [8]. Wiedza w sztucznej inteligencji jest więc nie tylko do gromadzenia danych, lecz także kojarzeniem lub uogólnianiem doświadczeń na podstawie ustalonych przez człowieka zasad uświadamiania i rozumienia faktów oraz zjawisk rzeczywistości [7]. W związku z tym celowe wydaje się przedstawienie chociażby w zarysie niektórych sposobów reprezentacji wiedzy. Poznanie modeli reprezentacji wiedzy pozwala bowiem zrozumieć istotę tak dynamicznie rozwijających się ostatnio systemów ekspertowych, jak również może zainspirować tworzenie ich nowych koncepcji.

Spośród stosowanych obecnie sposobów reprezentacji wiedzy wyróżnić można grupy: deklaratywnego, proceduralnego oraz mieszanego sposobu repre-

zentacji wiedzy. W reprezentacji typu deklaratywnego zakłada się, że wiedzę można przedstawić w postaci twierdzeń pewnego ustalonego języka. Modelowanie obszaru przedmiotowego za pomocą wiedzy deklaratywnej wymaga utworzenia pełnego opisu jego stanów koniecznych do wnioskowania [8]. Proceduralna reprezentacja wiedzy polega na określeniu zbioru procedur, które mogą zastąpić proces wnioskowania. W reprezentacji wiedzy typu proceduralnego nie jest konieczne przechowywanie wszystkich możliwych stanów niezbędnych do wnioskowania. Wystarczy bowiem znać stan początkowy i odpowiednią procedurę, za pomocą której można generować opisy późniejszych stanów. Podział na typy reprezentacji wiedzy na deklaratywne i proceduralne ma charakter względny, ponieważ konkretne modele w różnym stopniu wykorzystują oba te typy reprezentacji wiedzy.

Oryginalne problemy, które mają być rozwiązane przez inteligentny system komputerowy, muszą być reprezentowane w postaci takich modeli, na których łatwo może manipulować komputer. Jednocześnie reprezentacja sytuacji problemowej w postaci modelu musi być analogiczna do oryginalnego problemu. Takie warunki spełnia reprezentacja problemów w przestrzeni stanów z komputerowej bazy danych. Reprezentacja wiedzy w przestrzeni stanów jest szczególnie dogodna dla reprezentacji zadań. Stany problemów w postaci zadań są przekształcane z użyciem operatorów, które umożliwiają poszukiwanie rozwiązań problemów - osiągnięcie stanu docelowego. Kiedy i gdzie stosowane są operatory, zależy od strategii sterowania. Jako przykład reprezentacji zadania w przestrzeni stanów można przytoczyć zadanie montażu. Na rysunku 1 zilustrowano kolejne stany procesu montażu.



Rys. 1. Stany procesu montażu [13]

Wiele problemów może być określonych poprzez wyszczególnione na tym rysunku trzy składniki: stany, operatory i cele. Rozwiązaniem zadań reprezentowanych w przestrzeni stanów jest sekwencja operatorów, która umożliwia przekształcenia od stanu początkowego do stanu końcowego. Operatory są zbiorami procedur lub reguł, które są wykorzystywane do „produkcji” pożądanego stanu.

Operatory w postaci reguł zawierają dwie części: warunkową i akcji. Akcja nie może nastąpić, dopóki dane warunki nie zostaną napotkane. Taka strategia poszukiwania rozwiązań oparta na idei tzw. systemów „produkcji”, jest szeroko implementowana w opisanych dalej systemach ekspertowych. Do opisu przestrzeni stanów w sztucznej inteligencji bardzo często wykorzystuje się jeden z rodzajów grafu nazywany drzewem. Przykładem mogą tu być problemy planowania działań. Problem planowania działań jest określony poprzez stan początkowy i końcowy (lub zbiór stanów końcowych) oraz sposób tworzenia grafu rozwiązań. Rozwiązaniem problemu jest droga łącząca stan początkowy z końcowym w grafie. Węzły grafu to stany (sytuacje), a luki to operatory przekształcania stanów.

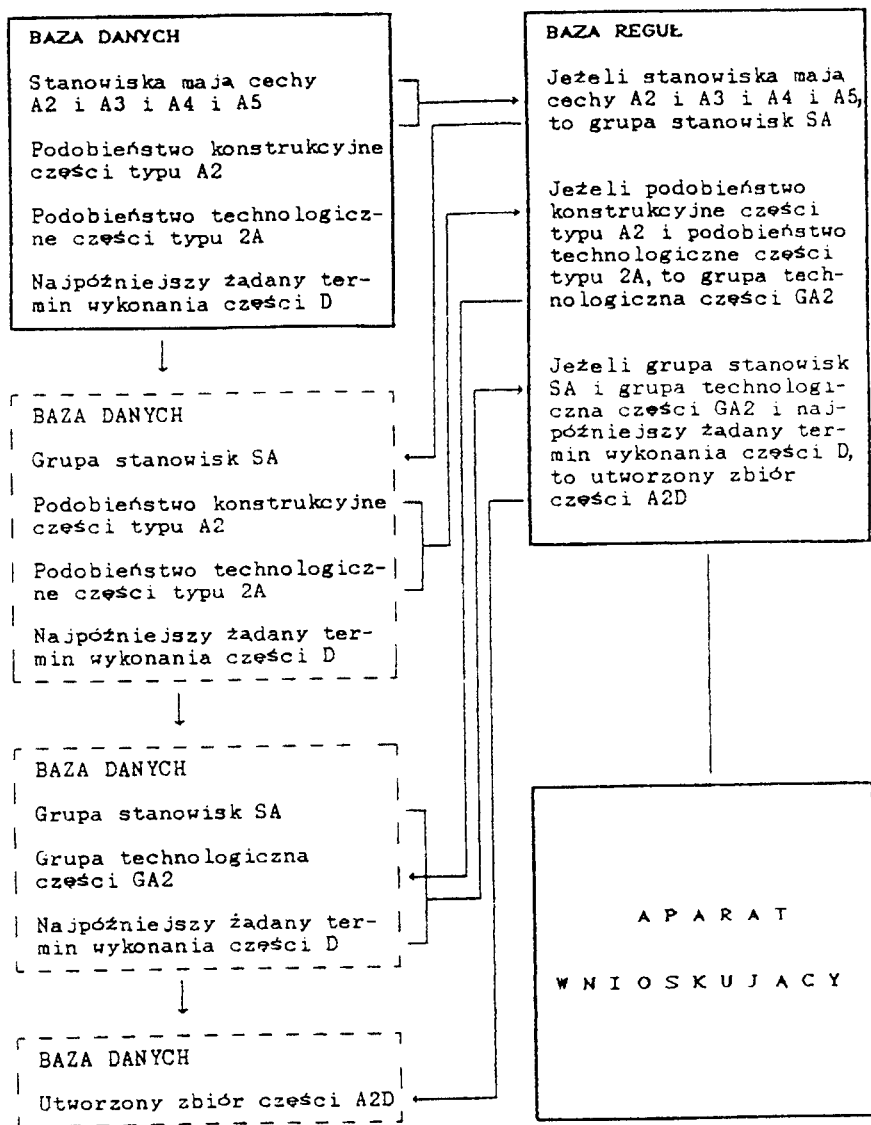
Graf jest podstawą sieciowych modeli reprezentacji wiedzy, do których należą m.in. ramy (frames). Do bardzo popularnych modeli reprezentacji wiedzy należą również systemy „produkcji” (production systems) oraz modele logiczne (logic models). Systemy „produkcji” są szeroko implementowane w systemach ekspertowych. Typowy system „produkcji” funkcjonuje w trybie dwufazowym, obejmując fazy decyzji i działania [1,9]. Faza decyzji obejmuje etapy:

- wyboru zbioru reguł decyzyjnych, tzn. reguł postaci „Jeżeli /to”; mogą to być powiązania typu warunek \rightarrow akcja, sytuacja \rightarrow akcja, przesłanka \rightarrow konkluzja; zarówno lewa, jak i prawa strona reguły może zawierać jedno lub więcej zdań zespolonych łącznikiem „i” oraz „lub”;
- uzgodnienia wzorców występujących w warunkach reguł z faktami baz danych;
- wyboru spośród zbioru uzgodnionych reguł tej, której następnik (np. akcja) ma zostać wykonany.

W fazie działania wprowadzane są odpowiednie zmiany w bazie danych (dopisywanie lub skreślanie pewnych faktów). Modyfikacji może ulegać także baza wiedzy. Reguły służą do „produkcji” nowych faktów i w rezultacie doprowadzają do rozwiązania problemu. Ideę funkcjonowania systemu „produkcji” przedstawiono na rysunku 2.

Po inicjacji pierwszej produkcji baza danych jest aktualizowana, tak jak pokazano to na rys.2 - element „stanowiska mają cechy A2 i A3 i A4 i A5” może być zastąpiony przez nowy element „grupa stanowisk SA”. Tak więc inicjowanie „produkcji” może tworzyć nową bazę danych. Ten nowy element „grupa stanowisk SA” jest włączony do nowej bazy danych, a stary element jest pomijany, co uniemożliwia powtórzenie inicjacji tej samej „produkcji”. Następnie aparat wnioskujący kieruje badaniem dla elementów „podobieństwo konstrukcyjne części typu A2”, „podobieństwo technologiczne części typu 2A”. Te elementy zostają dopasowane do drugiej „produkcji” i ponownie aktualizowana jest baza danych. Ostatecznie aparat wnioskujący bada elementy „grupa stanowisk SA”, „grupa technologiczna części GA2”, „najpóźniejszy żądany termin wykonania części D”. Po dopasowaniu tych elementów inicjowana jest trzecia „produkcja” i osiągana konkluzja „utworzony zbiór części A2D”.

Problemy charakteryzujące się dobrze zdefiniowaną strukturą mogą być formułowane w postaci ramy. Rama umożliwi deklaratywną i proceduralną reprezentację wiedzy, tzn. zawiera opis obiektu lub zjawiska i związane z nim procedury.



Rys.2. System „produkcji” [Opracowanie autora]

Rama jest strukturą posiadającą nazwę, złożoną ze szczelin (slots). Istnieje wiele koncepcji ram [5,6,11]. Przeważnie ramą nazywana jest struktura reprezentacji wiedzy o następującej postaci:

$$\{n, (v_1, g_1, p_1), (v_2, g_2, p_2), \dots, (v_k, g_k, p_k)\}$$

gdzie:

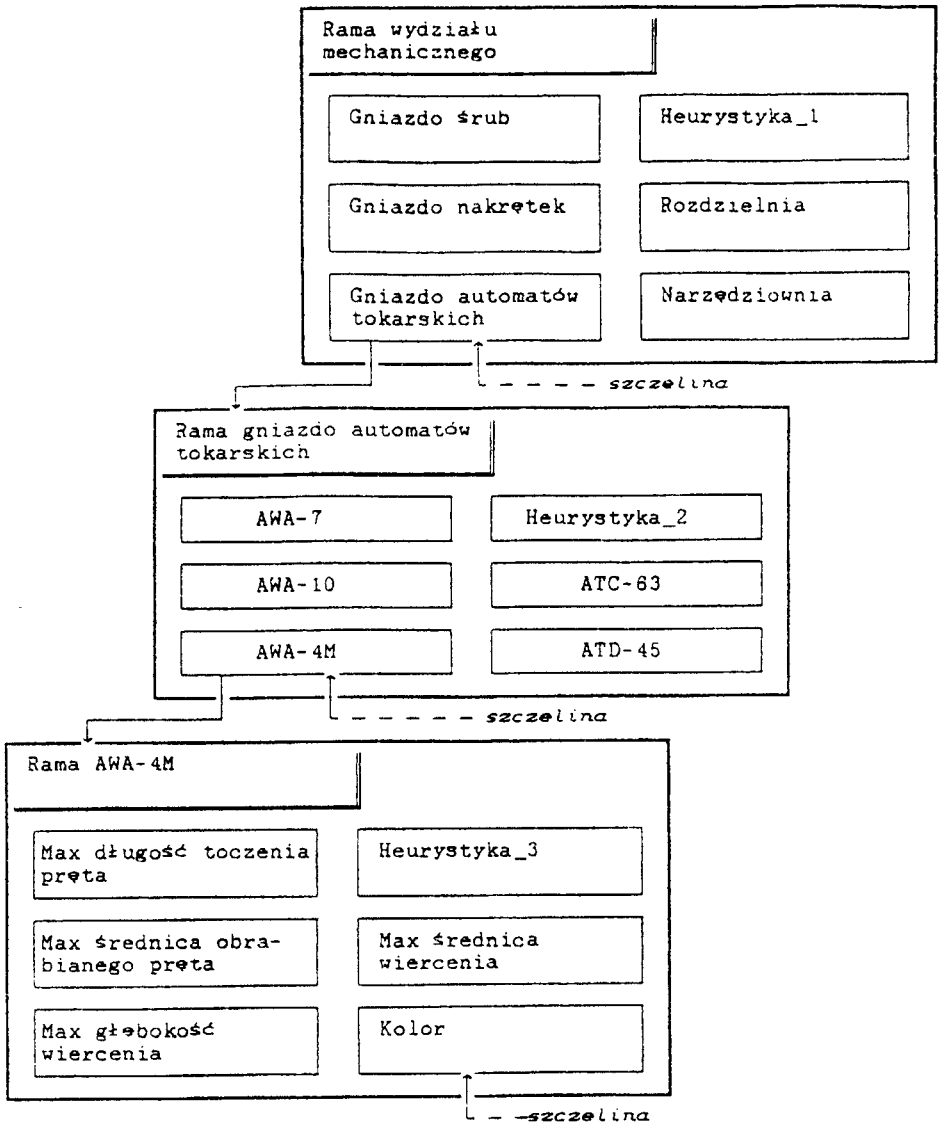
- n - nazwa ramy;
- v_i - nazwa szczeliny;
- g_i - zawartość szczeliny;
- p_i - procedura [8].

Szczeliny o nazwie heurystyka wykorzystuje się do sterowania procesem rozumowania i mogą one zawierać reguły produkcji „jeżeli/to”. Dopuszczalnym elementem w szczeliny ramy może być procedura obliczeniowa. Zawartością szczeliny może być nazwa innej ramy, co pozwala na tworzenie połączeń łańcuchowych lub hierarchicznych między ramami lub „wkładania” jednej ramy w drugą. Przykładem takiej ramy jest rama wydziału mechanicznego przedstawiona na rysunku 3.

Ważną własnością ram jest dziedziczenie. Zgodnie z tą własnością każdy obiekt dziedziczy wszystkie cechy, które zostały określone dla obiektów nadrzędnych [4].

Do reprezentacji wiedzy z użyciem logiki wykorzystuje się rachunek zadań i rachunek predykatów. Rachunek zadań to ogólnie znany dział logiki matematycznej. Predykatem nazywana jest funkcja dowolnej liczby zmiennych, przyjmująca wartości logiczne T i N (tak i nie, prawda i fałsz, 1 i 0). Predykaty są często stosowanym efektywnym narzędziem modelowym wiedzy, a w szczególności mogą służyć do formalizowania faktów, zdarzeń, procesów, opisów strukturalno-funkcjonalnych oraz reguł wnioskowania [3,8,13].

Na logice predykatów pierwszego rzędu jest oparty m.in. język Prolog. Należy on do grupy języków deklaratywnych, tj. opisowych zasadniczo różniących się od języków proceduralnych, takich jak C czy Pascal. Program napisany w języku proceduralnym zawiera szczegółowy opis kolejnych kroków postępowania zgodnie z przyjętym algorytmem, dzięki czemu z wprowadzonych danych otrzymuje się żądane wyniki. W Prologu programista deklaruje jedynie obiekty konieczne do rozwiązania danego problemu oraz relacje logiczne, które zachodzą pomiędzy obiektami, w postaci tzw. faktów oraz reguł. Zadanie do rozwiązania przedstawione jest w postaci tzw. celu (ang. goal). Fakty, reguły oraz podany cel tworzą tzw. program w języku Prolog.

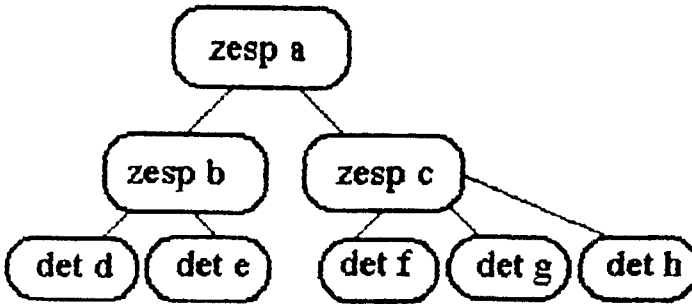


Rys.3. Rama wydziału mechanicznego [Opracowanie autora]

W celu przedstawienia istoty programowania w języku Prolog, poniżej przedstawiono dwa przykłady zawierające podstawowe sekcje programu napisanego w tym języku.¹⁷

¹⁷ Zawarte w niniejszym opracowaniu programy napisano w Turbo Prologu 2.0 i testowano na IBM AT-386

Pierwszy przykład to program opisujący wyrób, który przedstawić można za pomocą struktury zwanej drzewem:



Rys.4. Struktura wyrobu w postaci drzewa

Przykład 1

DOMAINS

nazwa=symbol

PREDICATES

zesp(nazwa,nazwa)

CLAUSES

zesp(zesp_a,zesp_b). /*zespół a zawiera zespół b */

zesp(zesp_a,zesp_c).

zesp(zesp_b,detal_d). /*zespół b zawiera detal d*/

zesp(zesp_b,detal_e).

zesp(zesp_c,detal_f).

zesp(zesp_c,detal_g).

zesp(zesp_c,detal_h).

PREDICATES

wyrob (nazwa,nazwa)

CLAUSES

wyrob (A,B) :- /* A jest wyrobem z B*/

zesp(A,X),

zesp(X,B).

W przytoczonym programie można wyróżnić trzy sekcje: DOMAINS, PREDICATES i CLAUSES. Każda z tych sekcji może wystąpić wielokrotnie. Sekcja DOMAINS (dziedziny) służy do określenia typów obiektów, które występują w programie. W prezentowanym przykładzie zadeklarowano własną dzie-

dzinę danych nazwa, która odpowiada standardowej dla Turbo Prologu dziedzinie symbol (ciąg znaków). Sekcja PREDICATES (predykaty) zawiera deklaracje predykatów użytkownika (stanowi zapowiedź relacji zachodzących między określonymi obiektami). Sekcja CLAUSES (klauzule) służy do zdefiniowania relacji między poszczególnymi obiektami. Każda z klauzul może mieć postać faktu lub reguły. Fakty są stwierdzeniami, że zachodzą określone relacje między obiektami. W ich zapisie występuje jedynie nazwa relacji oraz zestaw argumentów (w nawiasach). Reguły mają charakter warunkowy - relacja zapisana po lewej stronie „: -” (if) jest prawdziwa jedynie wówczas, gdy są prawdziwe wszystkie warunki zapisane po prawej stronie tego znaku. Na przykład ostatnią klauzulę podaną w przykładzie można odczytać: dla każdego wyrobu A i każdego wyrobu B: A jest wyrobem z B, jeśli istnieje takie X, że A zawiera X i X zawiera B.

Między znakiem „/*” a znakiem „/*” zawarty jest komentarz.

Integralną część języka Prolog stanowi tzw. aparat (mechanizm) wnioskowania, którego działanie jest odpowiedzialne za cały proces sterowania, tj. wnioskowania na podstawie zadeklarowanych związków.

Zadanie programisty w przykładzie nr 1 polegało na utworzeniu bazy danych opisujących strukturę wyrobu. Jeżeli chcemy na przykład sprawdzić, które detale zawiera wyrób, to odpowiednie pytanie powinno mieć następującą postać:

GOAL: wyrób (zesp_a,X)

Na tak sformułowane pytanie uzyskamy odpowiedź:

X=detal_d X=detal_e X=detal_f

X=detal_g X=detal_h

5 SOLUTIONS

Można zadać wiele różnych pytań do programu przedstawionego w przykładzie 1. Mogą to być m.in. następujące pytania:

GOAL:	Pytanie:
zesp(X,detal_g)	Do jakiego zespołu należy detal g?
	Odpowiedź:

X=zesp_c 1 SOLUTION

GOAL:	Pytanie:
zesp(zesp_c,detal_i)	Czy zespół c zawiera detal i ?
	Odpowiedź:

No.

Język Prolog umożliwia również tworzenie baz danych. Za pomocą sekcji CLAUSES można reprezentować zawartość informacyjną bazy danych. Poniżej podano przykład programu zawierający relację „detaloperacja”, której postać tabelaryczna jest następująca:

Tabela 1

Kod detalooperacja	Czas przygot. zakończeniowy	Czas jednostkowy	Kod detalu	Nazwa detalu	Priorytet	Stanowisko
2530	1	50	268	walek	11	AWA-1
3143	2	30	352	walek	21	ATC-63
3534	7	85	343	walek	31	AWA-7
1175	2	20	123	walek	18	ATD-45

Przykład 2

DOMAINS

nazwa, stanowisko=symbol

tpz, czas_tj, priorytet=real

kod_det_oper, detal_kod=integer

PREDICATES

det_oper(kod_det_oper, tpz, czas_tj, detal_kod, nazwa, priorytet, stanowisko)

CLAUSES

det_oper(2530, 1, 50, 268, walek, 11, "WAW-7").

det_oper(3143, 2, 30, 352, walek, 21, "ATC-63").

det_oper(3534, 7, 85, 343, walek, 31, "AWA-7").

det_oper(1175, 2, 20, 123, walek, 18, "ATD-45").

CLAUSES

kandydat(K, Tpz, Ctj, D, N, Priorytet, S):-

det_oper(K, Tpz, Ctj, D, N, Priorytet, S),

Priorytet > 19.

Przedstawiony w przykładzie 2 program umożliwia typowanie detalooperacji do wykonania (spośród ich zbioru przedstawionego w tabeli 1) w oparciu o wskaźnik priorytetu. Do wykonania kandydują te detalooperacje, których wskaźnik priorytetu jest wyższy niż 19. Po zadaniu pytania:

GOAL kandydat(K, Tpz, Ctj, D, N, Priorytet, S)

uzyskamy odpowiedź:

K=3143 Tpz=2 Ct=30 D=352 N=walek Priorytet=21 S=ATC-63

K=3534 Tpz=7 Ct=85 D=342 N=walek Priorytet=31 S=AWA-7

2 SOLUTIONS

Nie jest konieczne umieszczenie w programie z przykładu 2 ostatniego predykatu i klauzuli, ponieważ w Prologu można formułować pytania złożone. Dla programu z przykładu 2, w którym pominięto ostatni predykat i klauzulę można sformułować następujące pytanie:

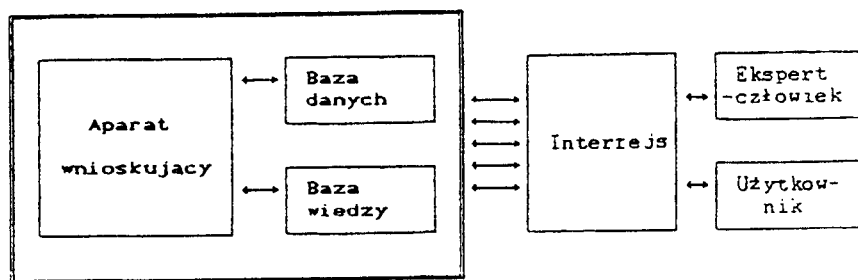
GOAL det_oper(K, T, C, D, N, P, S), P > 25

w rezultacie otrzymamy odpowiedź:

K=3534 T=7 C=85 D=343 N=walek P=31 S=AWA-7

1 SOLUTION

Jedną z możliwych form technicznej realizacji sztucznej inteligencji jest system ekspertowy. System ekspertowy to program, który może być implementowany na określonym sprzęcie komputerowym z odpowiednim oprogramowaniem narzędziowym [3]. Strukturę systemu ekspertowego tworzą na ogół trzy główne człony: baza wiedzy (knowledge), baza danych (data base) i aparat wnioskujący (inference engine) [2,13,14]. Podstawowe człony systemu ekspertowego przedstawiono na rys.5.



Rys. 5. Człony systemu ekspertowego [13]

Baza wiedzy zawiera informacje opisujące prawidłowości danego obszaru przedmiotowego, pozwalające prognozować i wprowadzać nowe fakty nie odwzorowane w bazie danych [8]. Baza wiedzy zawiera więc reguły i procedury wnioskowania. Współczesne systemy ekspertowe używają reguł typu: „IF(jeżeli)...,THEN(to)...”. Baza danych zawiera określone fakty z przedmiotowej dziedziny, z których korzysta człon bazy wiedzy. Przed zastosowaniem reguły elementy jej części warunkowej muszą być prezentowane w bazie danych. Aparat wnioskujący kieruje procesem rozumowania poprzez próbowanie dopasowania faktów z bazy danych do warunków reguł, a następnie rozpatrywanie konkluzji reguły jako przesłanki do następnej reguły. Jest to tzw. „łańcuch do przodu”. Może także występować „łańcuch wstecz” polegający na wyznaczaniu przesłanek z zakładanych konkluzji - od celów do faktów elementarnych.

Działanie systemu ekspertowego jest oparte na interakcji z użytkownikiem. Jakość interfejsu odgrywa więc ogromną rolę w poprawności rozumowania. Język, w którym prowadzony jest dialog, musi być zrozumiały dla użytkownika.

Struktura systemu ekspertowego zależy od przyjętych modeli reprezentacji wiedzy. Przedstawiona na rys.5 uproszczona struktura systemu ekspertowego występuje wtedy, kiedy reprezentacja wiedzy bazuje na systemach „produkcji” (por.rys.2). Wyodrębnienie w reprezentacji wiedzy faktów i reguł nie zawsze jest jednoznaczne [3]. Nie zawsze wyraźnie jest oddzielona baza wiedzy od bazy danych.

Utworzenie bazy wiedzy jest bardzo pracochłonnym etapem budowy systemu ekspertowego i w złożonych systemach wymaga współdziałania specjalisty reprezentującego daną dziedzinę wiedzy (domain expert) oraz inżyniera wiedzy (knowledge engineer). Konstruowanie złożonego systemu ekspertowego w konwencjonalnych językach programowania wymaga ogromnego nakładu pracy programistów. Dlatego powstało wiele języków programowania, które ułatwiają budowę systemu ekspertowego (np. Lisp, KRL, FRL, KL-1, KL-2). Bardzo dobrym narzędziem programistycznym służącym do konstruowania systemów ekspertowych jest także język Prolog, ponieważ posiada wbudowany mechanizm wnioskowania. Ponadto język ten umożliwia bezpośrednią reprezentację wiedzy w postaci reguł, gdyż cały program w języku Prolog (jak łatwo zauważyć w przykładach 1 i 2) stanowią reguły i fakty.

W artykule przedstawiono tylko niektóre modele reprezentacji wiedzy i możliwości ich sformalizowanego zapisu. Dziedzina sztucznej inteligencji jest obecnie o wiele bardziej rozległa i obejmuje między innymi: uczenie się przez komputer, automatyczne dowodzenie twierdzeń, rozpoznawanie obrazów i mowy, rozumienie i tłumaczenie naturalnego języka, gry komputerowe, robotykę.

LITERATURA

- [1] Banaszak Z., Jampolski L.: Komputerowo wspomagane modelowanie elastycznych systemów produkcyjnych. WNT, Warszawa 1991
- [2] Bobrow D.G., Mittal S., Stefik M.J.: Expert Systems: Perils and Promise. Artificial Intelligence in Industry. Springer - Verlag. 1988, s.19-41
- [3] Bubnicki Z.: Wstęp do systemów ekspertowych. PWN, Warszawa 1990
- [4] Cholewa W., Moczulski W.: Reprezentacja wiedzy w diagnostycznych systemach doradczych. Techniki Komputerowe, 5-6/1988, s.53-59
- [5] Kumara S.R.T., Joshi S., Kashyap R.L., Moodie C.L., Chang T.C.: Expert System in Industrial Engineering. Artificial Intelligence in Industry. Springer-Verlag. 1988, s.387-407
- [6] Ławrynówicz A.: Reprezentacja wiedzy w sztucznej inteligencji. Przegląd Mechaniczny, 4/1993
- [7] Makarow J.M.: Systemowe zasady tworzenia zautomatyzowanej produkcji. WNT, Warszawa 1991
- [8] Nazaretow W.M., Kim D.P., Krupa T.: Techniczna imitacja intelektu. WNT, Warszawa 1991
- [9] Nida K., Itoh J., Umeda T., Kobayashi S., Ichikawa A.: Some Expert System Experiments in Process Engineering. Artificial Intelligence in Industry. Springer-Verlag 1988, s.61-77
- [10] Ostrowsky M.F., Swezey R.C.: An expert system shell: expert system environment/WM. ISA Transactions Vol.28, No 1, 1989, s.9-14
- [11] Pham D.T., Pham P.T.N.: Expert systems: A review. Artificial Intelligence in Industry. Springer-Verlag. 1988, s.3-18
- [12] Purvis J.R., Al-Khalifa A.: Artificial Intelligence: Can it be economically applied? ISA Transactions. Vol.28, No1, 1989, s.59-71

- [13] Staugaard A.C.: Robotics and AI: An Introduction to Applied Machine Intelligence. Prentice-Hall, Inc. New Jersey 1997
- [14] Upchurch E.T., Raman K.S., Ranai K.: Designing expert systems for modeling complex computer systems. ISA Transactions. Vol.28, No 1, s.27-29

KNOWLEDGE IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Summary

Development of research on artificial intelligence. Types of knowledge which are represented in intelligent systems. Examples of representation of problems in the state space of computer data base. Representation of knowledge using logic. Expert systems as one of possible technical forms of realization of artificial intelligence.

Eugeniusz Ranatowski
Jan Sadowski
Ryszard Strzelecki

MODELOWANIE I OCENA PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW W PRÓBIE UDAROWEGO ZGINANIA ZE WSPOMAGANIEM KOMPUTEROWYM

W artykule podano zasady modelowania oraz możliwości wykorzystania matematycznych metod dla obróbki szybkich zjawisk dynamicznych w próbie udarowego zginania. Podano przykładowe algorytmy obróbki wykresów w zakresie matematycznej filtracji opartej na uśrednianiu zmiennej losowej i oscylacji w dziedzinie czasu i częstotliwości. Określono procedurę wyznaczania punktów charakterystycznych procesu łamania udarowego próbki na przykładzie konkretnej obróbki wykresu Charpy V ze stali typu C-Mn.

1. WSTĘP

Jedną z dróg prawidłowej oceny parametrów charakteryzujących proces dekohezji badanej próbki jest właściwa korekcja przebiegu zależności siły F w funkcji czasu t , eliminująca wpływ oscylacji związanych ze zjawiskiem inercyjnym oraz drgań będących rezultatem fluktuacji nagromadzonej energii i odbitych fal naprężeniowych, na co zwracają uwagę autorzy prac [1,2].

Osobnym zagadnieniem mającym charakter czysto techniczny jest:

- zapewnienie odpowiedniej czułości pasma przenoszonych częstotliwości oraz kompensacji temperaturowej, a także zniekształceń nieliniowych bloku przetworników i wzmacniaczy pomiarowych,
- skalowanie czujników, wybór odpowiedniej częstotliwości próbkowania i dokładności przetworników oraz wzmacniaczy pomiarowych.

Są to jednakże zagadnienia związane z projektem technicznym stanowiska badawczego: doбором właściwej struktury i rodzaju urządzeń pomiarowych i dlatego nie będą one przedmiotem dalszych rozważań w niniejszej pracy.

Natomiast głównym celem rozważań jest, zgodnie ze wstępną sugestią, dobór odpowiedniego algorytmu filtracji zarejestrowanych przebiegów dynamicznych $F = f(t)$ i dalsza obróbka przebiegów odfiltrowanych w celu ustalenia parametrów procesu dekohezji. Filtracja jest operacją dynamiczną, której idealny model matematyczny można przedstawić za pomocą charakterystyk częstotliwościowych, zaś jej celem jest eliminacja zakłóceń o częstotliwościach różnych

od częstotliwości sygnału pomiarowego. W związku z powyższym w pierwszej kolejności przeprowadzono weryfikację modelową próby udarowego zginania, ażeby w dalszej części ustalić zakres i formę rejestracji sygnałów przebiegu siły $F - t$ lub $F - f$ i sposób ich obróbki.

2. MODELOWANIE PRÓBY UDAROWEGO ZGINANIA

Model fizyczny w swojej istocie stanowi uproszczenie rzeczywistego układu i odpowiada mu tylko pod względem istotnych jego cech. Musi on jednakże przedstawiać rzeczywistość fizyczną z takim przybliżeniem, że zapewnione jest techniczne i praktyczne znaczenie analizy takiego modelu. Warunkiem koniecznym i dostatecznym występowania podobieństwa pomiędzy modelem a rzeczywistym obiektem, którym w tym przypadku jest analizowany układ: młot udarowy - badana próbka, jest opisanie zachodzących w nim procesów:

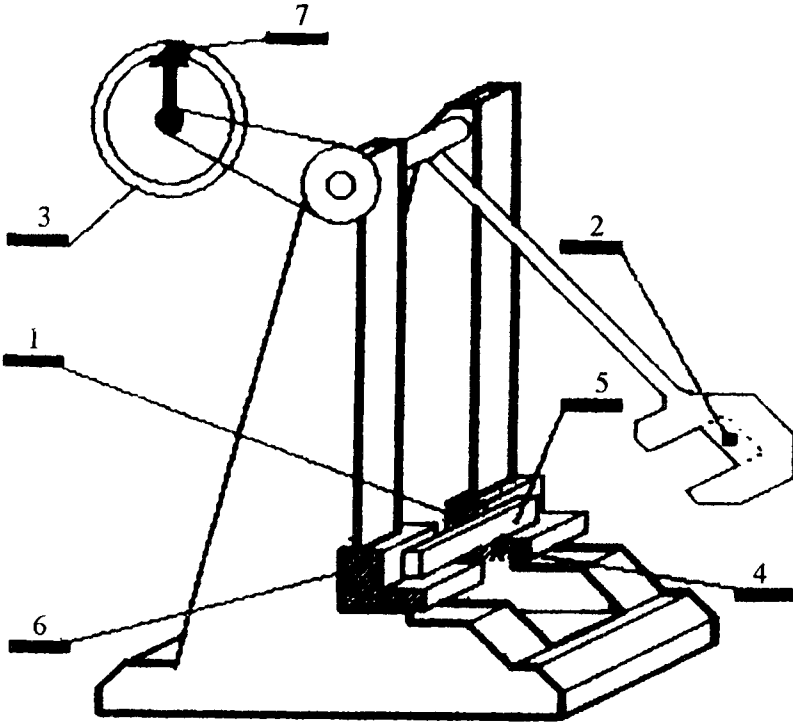
- za pomocą tych samych związków fizykalnych opisujących wewnętrzne prawidłowości procesu wyrażonych np. postaci tych samych równań różniczkowych,
- zgodność występowania kryteriów podobieństwa.

Geometryczne podobieństwo oznacza jednakowy stopień odkształcenia modelu i obiektu rzeczywistego.

Pomiar siły możliwy jest tylko w sposób pośredni, przez pomiar skutków wyrażonych poprzez przemieszczenie liniowe lub kątowe, prowadzące do zmiany energii mechanicznej układu. Energia w dowolnym punkcie układu pomiarowego jest funkcją dwóch wielkości. Jedną z nich jest sygnał pomiarowy, a druga wielkość jest z nim nierozzerwalnie związana na podstawie powszechnie obowiązujących praw fizycznych. Uwzględnienie obu wielkości pozwala więc określić oddziaływanie czujnika pomiarowego na obiekt badany.

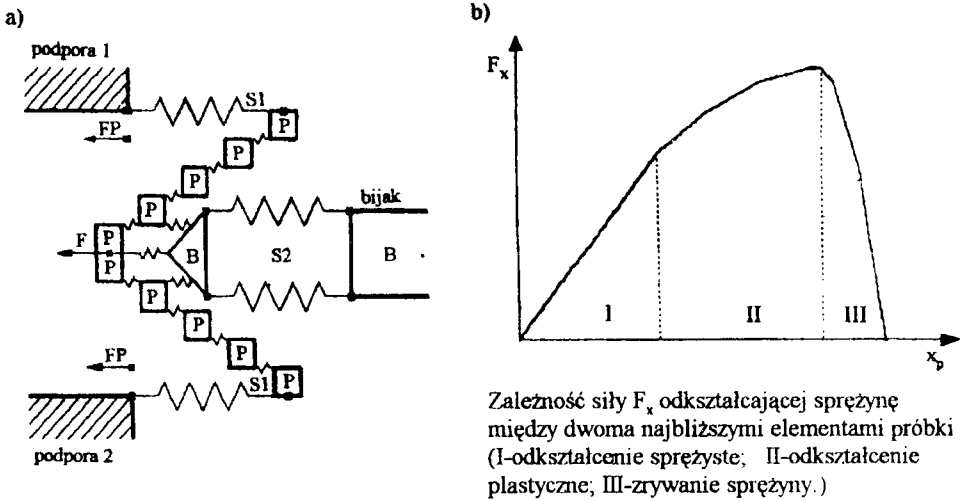
Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie punkty usytuowania czujników pomiarowych, którymi są w tym przypadku czujniki tensometryczne i czujniki małych przemieszczeń liniowych. Przy pomiarach sił za pomocą czujników tensometrycznych, elementy, na których umieszczono czujniki muszą ulegać odkształceniom sprężystym. Pomiar siły F_p z każdej podpory i siły F z noża wahadła dokonuje się odpowiednio za pomocą czujników tensometrycznych $R1$ i $R1'$ oraz $R2$ i $R2'$, a podpory i wahadło młota w momencie uderzenia odkształcają się sprężysto. W aspekcie powyższych wymagań badana próbka powinna być również elementem sprężystym, co można zrealizować przyjmując dyskretny model próbki. Próbkę dzielimy na nieskończenie małe elementy, które są połączone między sobą za pomocą elementarnych sprężynek (rys. 2a). Ponadto sprężynki $S1$ i $S2$ modelują odkształcenia na podporach i bijaku. Dzięki temu możliwe jest modelowanie złożonego stanu odkształcenia próbki w czasie jej obciążenia, co schematycznie zilustrowano na rys.2b. Należy jednakże stwierdzić, iż adekwatny opis matematyczny takiego modelu próby udarowego zginania

proceeds to differential equations of partial order of complexity. This rather complex model is not necessary, when we only want to obtain precise prerequisites for the choice of algorithms of processing and filtering of measurement data of impact test.



1.	Czujniki tensometryczne na podporze
2.	Czujniki tensometryczne umieszczone obustronnie na nożu wahadła
3.	Czujnik potencjometryczny przemieszczenia
4.	Czujniki drgań własnych młota
5.	Próbka Charpy V
6.	Podpory
7.	Mikroprzełącznik

Rys.1. Schemat punktów pomiarowych młota wahadłowego



Rys.2. Dyskretny model próbki w układzie podpory młota - próbka - nóż wahadła wraz z przebiegiem siły F_x odkształcanych sprężynek pomiędzy najbliższymi elementami próbki

W tym celu najwygodniej jest się posłużyć dwoma dyskretnymi modelami uproszczonymi, które wraz z ich opisami matematycznymi przedstawiono na rysunku 3.

Wobec liniowego charakteru odkształceń w obszarze punktów pomiarowych (nóż wahadła, podpory i próbka) oraz liniowego układu przetworników pomiarowych, własności dynamiczne takiego układu można określić za pomocą transmitancji.

Transmitancja jest więc wielkością charakteryzującą własności dynamiczne układu liniowego o skupionych i stałych parametrach.

W kontekście przeprowadzonej analizy układu transmitancja określa związek pomiędzy liniowym układem fizycznym opisanym za pomocą równań różniczkowych - o współczynnikach stałych lub zależnych od czasu, ale niezależnych od sygnału - a odpowiedzią układu na sygnał wymuszający (wyjściowy):

$$A_n \frac{dy^m}{dt^m} + \dots + A_2 \frac{dy^2}{dt^2} + A_1 \frac{dy}{dt} + A_0 y = B_m \frac{dx^n}{dt^n} + \dots + B_2 \frac{dx^2}{dt^2} + B_1 \frac{dx}{dt} + B_0 x \quad (1)$$

Wobec powyższego wykonując transformację całkową Laplace'a:

$$\widehat{\mathcal{L}}[f(t)] = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (2)$$

gdzie :

s - zmienna zespolona,

dla obu stron równania (1) otrzymuje się zależność określającą transmitancję W(s) jako:

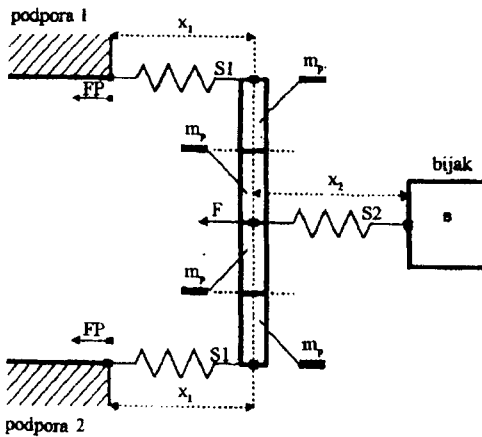
$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{B_n s^n + B_{n-1} s^{n-1} + \dots + B_2 s^2 + B_1 s^1 + B_0}{A_m s^m + A_{m-1} s^{m-1} + \dots + A_2 s^2 + A_1 s + A_0} \quad (3)$$

gdzie:

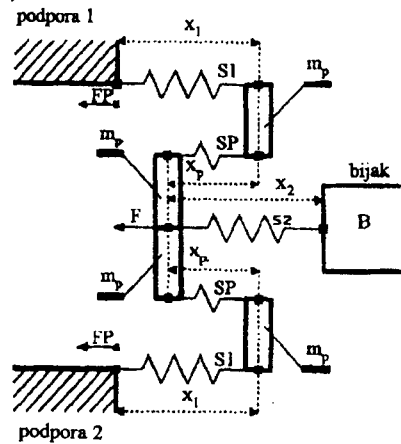
Y(s) - transformata sygnału wyjściowego,

X(s) - transformata sygnału wejściowego.

a)



b)



OPIS MATEMATYCZNY MODELU	
$F = -k_2 x_2;$	
Model a) - próbka sztywna	Model b) - próbka sprężysta
$F = 2(2 m_p \ddot{x}_1 + a_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1);$ $2Fx = (-a_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 + F/2);$ $FP = -k_1 x_1;$	$F = 2m_p(\ddot{x}_p - \ddot{x}_1) + 2a_p \dot{x}_p - 2k_p x_p;$ $2Fx = -2(m_p \ddot{x}_1 + a_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1);$ $2Fx = 2k_p x_p; \quad FP = -k_1 x_1;$

Rys.3. Uproszczone dyskretne modele procesu dynamicznego zginania:

a - model układu z próbką bez sprężyn;

b - model układu ze sprężynami;

SP - sprężynki modelujące wraz z masą 4 mp - odkształcenie próbki,

2Fx - siła odkształcająca próbkę, k₁, k₂, k_p - stałe sprężyn,

a₁, a₂, a_p - stałe tłumienia, m_p - 1/4 masy próbki

Wobec powyższego dla uproszczonych modeli wg rys.3, w zależności od miejsca pomiaru siły ich transmitancje określają następujące zależności:

$$W_p(s) = \frac{2F_p(s)}{2F_x(s)} \quad (4a)$$

$$W_B(s) = \frac{F(s)}{2F_x(s)} \quad (4b)$$

$$W_\Sigma(s) = \frac{F_\Sigma(s)}{2F_x(s)} \quad (4c)$$

gdzie:

$$F_\Sigma(s) = \frac{2F_p(s) + F(s)}{2} \quad (4d)$$

Analiza transmitancji dla przyjętych modeli według rysunku 3a,b pozwala stwierdzić, że [3]:

- przebiegi czasowe sił F i F_p , mierzone odpowiednio na nożu wahadła i podporach, oscylują wokół przebiegu siły $2F_x$ łamiącej badaną próbkę,
- pomiar siły wypadkowej F_Σ pozwala częściowo skompensować przesunięcia fazowe i oscylacje mierzonych sił F i F_p w stosunku do siły $2F_x$.

W powyższym aspekcie, bez odpowiedniej obróbki rejestrowanych przebiegów sił, trudno jest dokonać ich właściwej interpretacji fizycznej [4,5].

Obróbka matematyczna tych przebiegów siłowych będzie polegała na ich filtracji za pomocą specjalnych algorytmów i będzie obejmowała [3]:

- filtrację zakłóceń w rejestrowanych przebiegach, tzw. smoothing,
- wyznaczanie siły wypadkowej F_Σ ,
- zmniejszanie wpływu drgań u podstaw podpór na F_Σ ,
- końcową filtrację, korekcję siły wypadkowej,
- normowanie i obliczanie parametrów charakteryzujących proces pękania.

3. SYNTETYCZNA CHARAKTERYSTYKA MATEMATYCZNEJ OBRÓBKI WYKRESU $F - t$

W tej części opracowania skoncentrowano się tylko na najważniejszych zagadnieniach obróbki danych pomiarowych.

Smoothing (wygładzanie wykresu) - przeprowadzany jest przez zmianę wartości chwilowych każdego przebiegu filtrowanego $f(t)$: $F_p(t)$ - z czujników na podporach, $F(t)$ - z czujników na nożu wahadła; na wartości tzw. momentów

rzędu zerowego $m_o(t)$ (wartości średnie) [3]. Wartości $m_o(t)$ są obliczane dla czasu dyskretnego - $K=t/\Delta_t$ ($\Delta_t \cong 2\mu s$) na podstawie zależności:

$$m_o(k) = \frac{1}{I+1} \sum_{i=k-I/2}^{k+I/2} f(i) = m_o(k-1) - \frac{1}{I+1} [f(k-1-I/2) - f(k+I/2)] \quad (5)$$

gdzie:

- $I+1 = T/\Delta_t + 1$ - liczba uśrednianych danych oceniana w przybliżeniu z nierówności $I \leq M/50$,
- $M+1$ - ogólna liczba danych każdego zarejestrowanego przebiegu, przy czym $k = 0, 1, \dots, M$,
- T - długość przedziału uśredniania.

Oczyszczone w ten sposób z szybkozmiennych zakłóceń przebiegi $FP(k)$, $F(k)$ oznaczamy dalej jako $FP'(k)$, $F'(k)$.

Wyznaczanie siły wypadkowej $F_\Sigma(k)$ - następuje w wydzielonym module programowym, w ogólnym przypadku na podstawie zależności:

$$F'_\Sigma(k) = \frac{1}{2} [a_w 2FP'(k) + (2 - a_w)F'(k)] \quad (6)$$

gdzie:

- a_w - parametr-waga uwzględniająca nierównomierny udział poszczególnych składowych wyrażenia (6).

W stosowanym module parametr " a_w " będzie obliczany ze wzoru (5):

$$a_w = 2 \frac{\sum_{k=0}^M F'_\Sigma(k)}{\sum_{k=0}^M (2FP'(k) + F'(k))} \quad (7)$$

Końcowa filtracja-korekcja siły wypadkowej - przeprowadzana jest wtedy, gdy na podstawie $F'_\Sigma(k)$ nadal jest niemożliwa jednoznaczna interpretacja rezultatów. Taką filtrację będzie można dokonać zarówno w dziedzinie czasu dyskretnego, jak również dyskretniej częstotliwości.

Filtracja końcowa przebiegu $F'_\Sigma(k)$ w dziedzinie czasu dyskretnego jest przeprowadzana tak samo jak "smoothing" (wzór 5), przy czym w odróżnieniu od tego etapu wartości $F'_\Sigma(k)$ są uśredniane wielokrotnie dla większej liczby danych. Przedział ten wyznacza operator i on decyduje o powtarzaniu uśredniania. Dlatego rezultat tej filtracji - przebieg $F''_{\Sigma 1}(k)$ - jest subiektywny, co może utrudnić rozdzielenie charakterystycznych obszarów przebiegu siły $F''_{\Sigma 1}(k)$. Pomocne wydaje się być przy tym różniczkowanie takiego przebiegu [6].

Filtracja w dziedzinie częstotliwości przeprowadzona będzie na podstawie dyskretnego widma częstotliwościowego (DFT), definiowanego dla przebiegu $F'_{\Sigma}(k)$ następującym wzorem:

$$F'_{\Sigma}(jm \Delta\omega) = \sum_{k=0}^M F'_{\Sigma}(k) \exp(-jm \Delta\omega k \Delta t) \quad (8)$$

gdzie:

$\Delta\omega = 2\pi/(M+1)$ - przedział próbkowania w dziedzinie częstotliwości,
 m - numer kolejnego próbkowania w dziedzinie częstotliwości.

Ponieważ jednak $F'_{\Sigma}(jm \Delta\omega)$ jest iloczynem widma $2FX(jm \Delta\omega)$ poszukiwanego przebiegu $2FX(k)$ i nieznannej transmitancji $W'_{\Sigma}(jm \Delta\omega)$ jest logarytmowana. W rezultacie otrzymuje się nowe widmo wyrażone wzorem:

$$\left| F_{\Delta}^L(jm \Delta\omega) \right| = \log \left| F'_{\Delta}(jm \Delta\omega) \right| = \log \left| 2FX(jm \Delta\omega) \right| + \log \left| W_{\Delta}(jm \Delta\omega) \right| \quad (8a)$$

$$\arg(F_{\Sigma}^L(jm \Delta\omega)) = \arg(F_{\Sigma}(jm \Delta\omega)) + \arg(W_{\Sigma} \Delta\omega) \quad (8b)$$

W powyższym wzorze niepożądane zmiany wywołane transmitancją $W_{\Sigma}(jm \Delta\omega)$ są addytywne w stosunku do składowej $\log 2FX(jm \Delta\omega)$. Zmiany te zachodzą zazwyczaj na wysokich częstotliwościach i będą ocenione wizualnie. Na tej podstawie operator zadecyduje o wycięciu odpowiednich części widma $F_{\Sigma}^L(jm \Delta\omega)$. W wyciętych przedziałach widmo $F_{\Sigma}^L(jm \Delta\omega)$ będzie interpolowane odpowiednio wybieraną funkcją. Uzyskane nowe widmo $F''_{\Sigma}(jm \Delta\omega)$ jest antylogarytmowane i podlega odwrotnej transformacie Fourier'a.

Ponieważ przy wycinaniu części widma $F_{\Sigma}^L(jm \Delta\omega)$ i jego interpolacji udział operatora jest większy niż w przypadku "smoothing'u", to rezultat tej filtracji jest zazwyczaj w większym stopniu subiektywny, niż w przypadku filtracji w dziedzinie czasu dyskretnego. Może to istotnie wpływać na interpretację fizyczną rezultatów [4]. Dlatego przebieg $F''_{\Sigma 2}(k)$ otrzymywany w wyniku filtracji w dziedzinie częstotliwości powinien być raczej tylko porównywany z podobnym rezultatem końcowej filtracji w dziedzinie czasu - przebiegiem $F''_{\Sigma 1}(k)$, zazwyczaj końcowym rezultatem filtracji. Pozwala to na pewną ocenę przebiegu $F''_{\Sigma 1}(k)$, w czym pomocna jest też częstotliwość oscylacji fal naprężeniowych określanych na podstawie widma $F_{\Sigma}^L(jm \Delta\omega)$. W uzasadnionych przypadkach, jako końcowy rezultat filtracji, operator może również przyjąć przebieg $F''_{\Sigma 2}(k)$.

Należy zaznaczyć, że w praktycznej realizacji algorytmu filtracji widma $F_{\Sigma}^L(jm \Delta\omega)$ wygodnie jest pominąć operację interpolacji w dziedzinie zmiennych zespolonych. W tym celu, uwzględniając właściwości DFT [4], kolejne operacje

filtracji w dziedzinie częstotliwości będą wykonywane dla tworzonego symetrycznego przebiegu $F_D(i)$, definiowanego następująco:

$$F_D(i) = \begin{cases} F_S(i) & \text{dla } i=0,1,\dots, M \\ F_S(2M-1) & \text{dla } i=M+1,M+2,\dots, 2M1 \end{cases} \quad (9)$$

Aproksymacja przebiegów może być przeprowadzana zarówno przed, jak i po normowaniu, a nawet (ze względu na swoje dobre właściwości filtrujące) z pominięciem etapu filtracji końcowej, którego rezultatem jest przebieg oznaczany dalej jako $2FX''(k)$. Przy tej aproksymacji analizowane przebiegi są przybliżane funkcjami sklejanymi FS o swobodnych węzłach [7], w danym przypadku odciwkami liniowymi, mającymi postać:

$$FS(k) = a_{n-1} + (k - k_{n-1})(a_n) / (k_n - k_{n-1}) \quad (10)$$

gdzie:

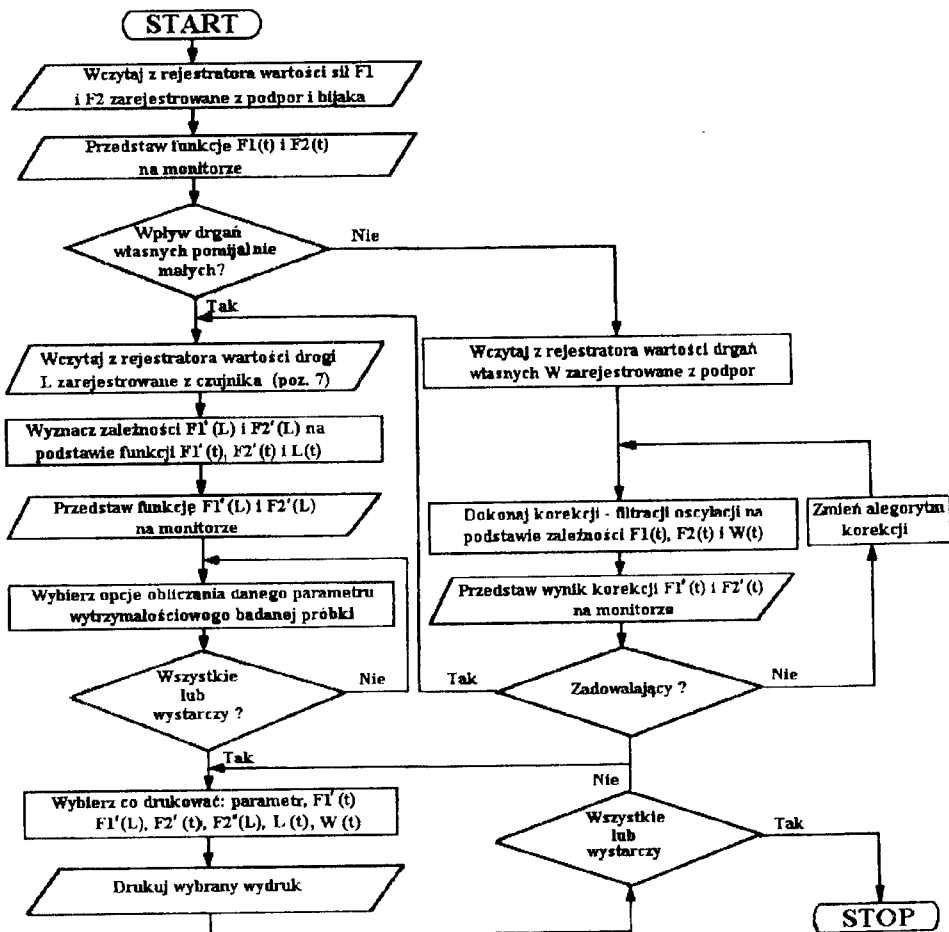
- k_n - dyskretny czas odpowiadający końcowi n-go i początkowi n+1-go przedziału aproksymacji (punkty sklejanie), przy czym $k_0 = 0$; $k_N = M$,
- a_n - wartość funkcji FS w punktach sklejanie, przy czym $a_0 = a_N = 0$,
- N - ilość przedziałów aproksymacji.

Wynika to z głównego celu tego etapu obróbki - jednoznacznego określenia obszarów odkształceń sprężystych, plastycznych oraz pęknięcia stabilnego i niestabilnego badanej próbki.

W module realizującym powyższą aproksymację parametry a_1, a_2, \dots, a_{N-1} oraz k_1, k_2, \dots, k_{N-1} funkcji (10) są wyznaczone w wyniku minimalizacji błędu kwadratowego z wagą $1/(k_n - k_{n-1})^2$ w n-tym przedziale aproksymacji [3]. W tym celu będzie wykorzystywany samouczący się optymalizacyjny algorytm poszukiwań przypadkowych (z modyfikacją) [8]. Wartości początkowe poszukiwanych parametrów funkcji określać będzie operator, na podstawie wybranej ilości przedziałów N (na ogół wystarcza $N = 7$) i aproksymowanego przebiegu odpowiedniej siły.

Normowanie i obliczanie parametrów charakteryzujących odporność na pękanie jest najprostsze spośród omawianych etapów. Wykorzystywany do tego moduł programowy będzie obliczał wartości K_{IC} , G_{IC} , J_d i inne na podstawie znanych wzorów [1÷3]. Obliczenia te przeprowadza się w oparciu o wyznaczone punkty charakterystyczne.

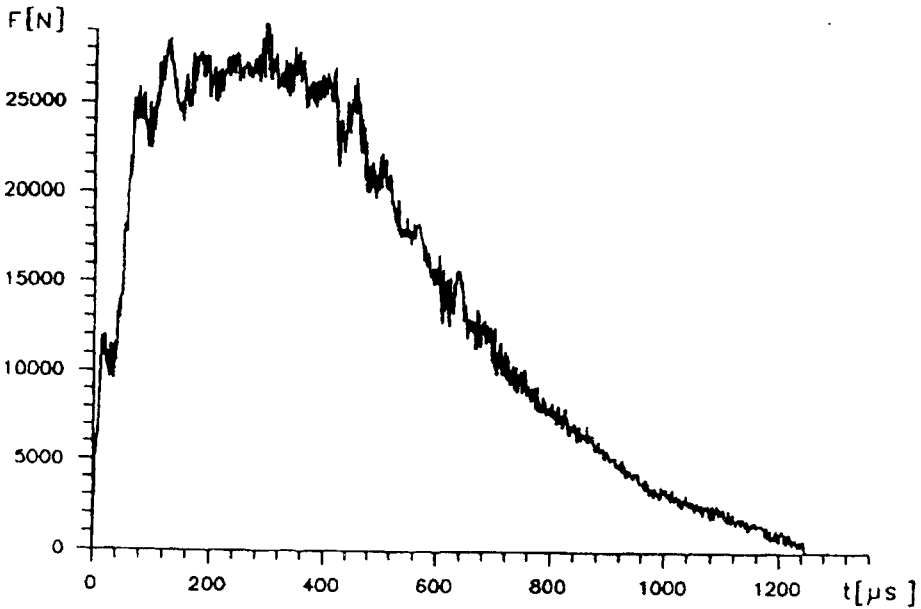
Na rysunku 4. przedstawiono całościowy program obróbki danych pomiarowych zdjętej charakterystyki przebiegu siły $F - t$ wg przyjętego schematu blokowego, uwzględniającego opisaną procedurę matematyczną [3].



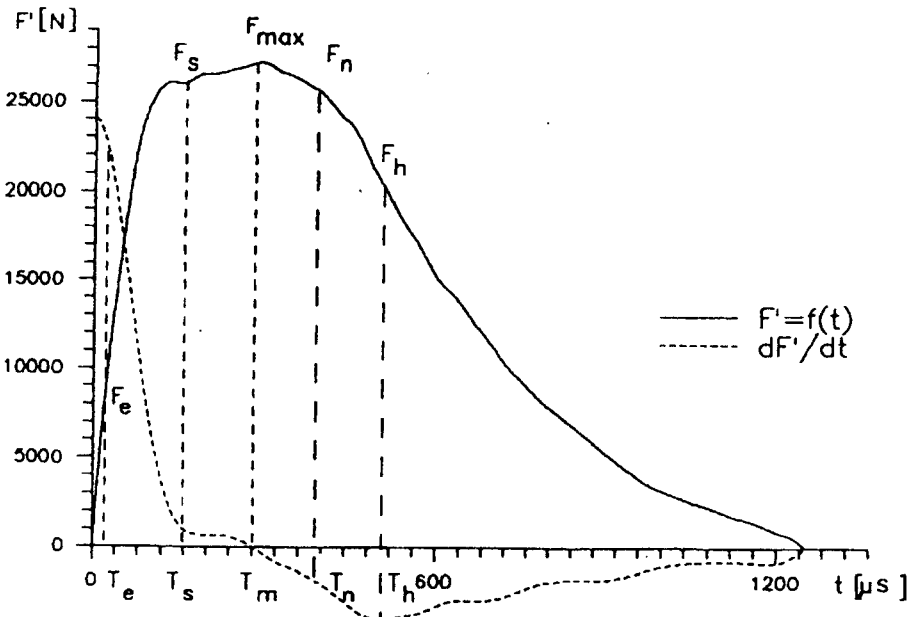
Rys.4. Schemat blokowy programu obróbki danych pomiarowych zapamiętanych w rejestratorze cyfrowym przy użyciu komputera IBM-PC 386

4 PRZYKŁAD PRAKTYCZNY

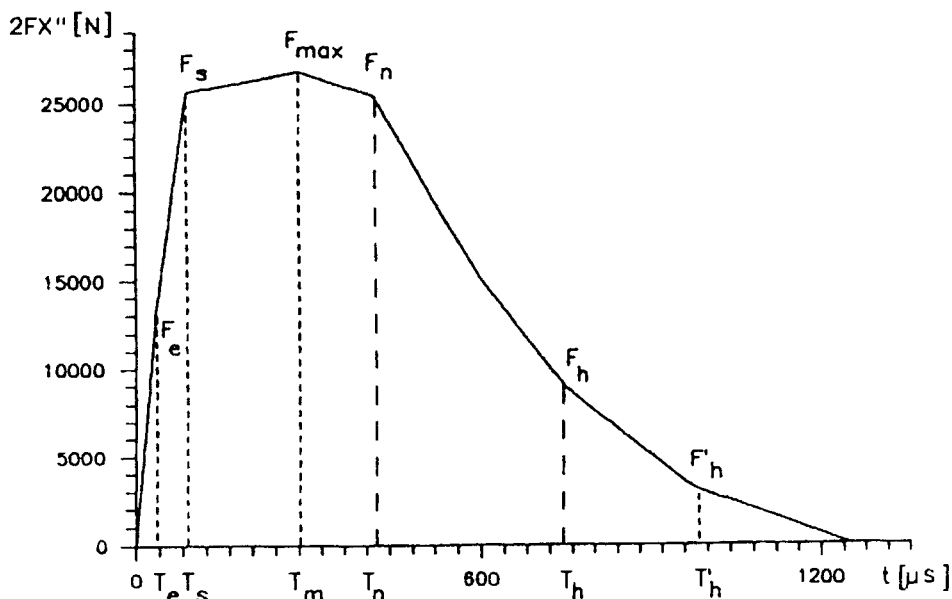
Poniżej, na rysunkach 5 - 7, przedstawiono praktyczne rezultaty wybranych etapów filtracji, korekcy oraz obróbki przebiegów pomiarowych w dziedzinie czasu otrzymane dla próbki Charpy V ze stali 18G2 zginanej udarowo. Zastosowane etapy filtracji-korekcy rzeczywistego wykresu sił w czasie udarowego zginania (rys.5) powodują, że otrzymane wykresy końcowe (rys.6, rys.7) można interpretować o wiele dokładniej, niż wyjściowy. Na ich podstawie możliwe jest dokładniejsze określenie punktów charakterystycznych badanego przebiegu niszczenia próbki w czasie próby udarowego zginania oraz rozdział całkowitej pracy niszczenia badanej próbki A_n i dokładniejsza ocena parametrów pęknięcia badanej próbki takich jak: K_{IC} , G_{IC} , J_d i innych, a także uzyskanie dodatkowych in-



Rys.5. Wykres rzeczywisty $F=f(t)$ zarejestrowany na nożu wahadła

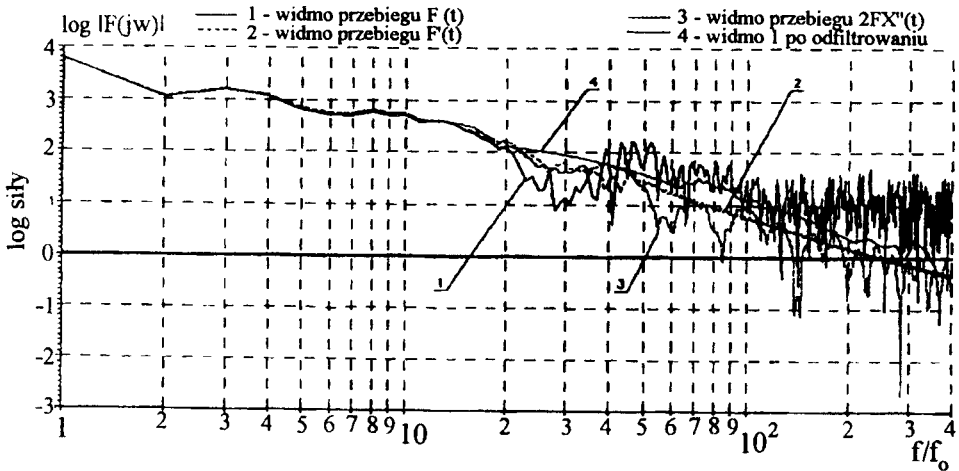


Rys.6 Końcowy rezultat filtracji przebiegu $F(t)$ z rys.5 metodą 3-krotnego "smoothing-u" dla $I=21$, oraz różniczka otrzymanego przebiegu



Rys.7. Rezultat aproksymacji przebiegu z rys.6 metodą funkcji sklejanych (liniowych) dla $N=7$

formacji o samym mechanizmie procesu niszczenia badanego materialu. Przebiegom czasowym $F(t)$, $F'(t)$ i $2FX''(t)$ przedstawionym na rysunkach 5 - 7 odpowiadają przy tym widma amplitudowe pokazane na rysunku 8 (krzywe 1,2,3). Widma te otrzymano symetryzując wstępnie powyższe przebiegi według zależności (9). Na rys.8 (krzywa 4) pokazano również widmo uzyskane po filtracji końcowej w dziedzinie częstotliwości. To widmo otrzymano na podstawie widma przebiegu czasowego uzyskanego po wstępnej filtracji przebiegu $F(t)$ metodą 1-krotnego "smoothingu" dla $l = 11$. Ta wstępna filtracja eliminująca szumy istotnie uprościła filtrację w dziedzinie częstotliwości. Jej wynik, jak widać z rys.8, jest zbieżny z rezultatami filtracji w dziedzinie czasu oraz aproksymacji. Autorzy nie rekomendują jednak stosować filtracji widma niedoświadczonym eksperymentatorom oraz przy dużej liczbie prób (znaczący czas).



Rys. 8. Amplitudowe widma częstotliwościowe przebiegów z rys.5-7 oraz po filtracji w dziedzinie częstotliwości

5. WNIOSKI

Przeprowadzone rozważania pozwalają stwierdzić, że:

- 1) korekcja-filtracja szybkich przebiegów dynamicznych za pomocą odpowiednio dobranych algorytmów, może być podstawą do ich właściwej interpretacji fizycznej i dokładniejszej oceny parametrów niszczenia badanych materiałów w warunkach uderowego zginania,
- 2) matematyczna obróbka szybkozmiennych sygnałów zwiększa możliwości techniczne samej próby uderowej, jak również może być szczególnie pomocna do analizy procesu niszczenia materiałów niejednorodnych, jakimi są np. połączenia spajane.

LITERATURA

- [1] Ranatowski E.: Analiza własności połączeń spajanych. Zeszyty Naukowe ATR, Rozprawy nr 3, Bydgoszcz 1980
- [2] Kobayashi T.: Analysis of impact properties of A533 steel for nuclear reactor pressure vessel by instrumented Charpy test. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, No. 1, 1984, pp. 49-65
- [3] Ranatowski E., Strzeleck R., Sadowski J.: Physical interpretation of impact bend test by means of mathematical methods. Applied Mathematics and Computer Science. Vol.3 No 2, 1993, pp.281-300

- [4] Rabiner L., Gold B.: Theory and application of digital signal processing. New Jersey, Printice Hall, Inc., 1975
- [5] Max J.: Methodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesuers physiques. Tom 1,2. Paris, Masson, 1981
- [6] Parchański J.: Pomiar siły zmiennej w czasie. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Z.89, Gliwice 1984
- [7] Suchomski P.: O pewnej metodzie optymalnej interpolacji funkcjami sklejanymi o swobodnych węzłach. Pomiar Automatyka Kontrola, Nr 19, 1990, s.245-245
- [8] Novosielcev A.V., Zagurskij V.G., Jabłoński W., Strzelecka N.: Zastosowanie statystycznego, samouczącego się algorytmu w zagadnieniach optymalizacji parametrycznej. Zeszyty Naukowe Nr 171, Elektrotechnika 10, ATR, Bydgoszczy 1990

THE MODELING AND OPINION OF ELEMENTARY PARAMETERS IN A TRIAL PERCUSSIVE INFLECTING WITH COMPUTER HELPING

Summary

The paper presents both a principle of modeling and a possibilities of the use of mathematical methods for processing fast dynamic phenomena in an impact bend test. Established are exemplary algorithms of diagram processing within mathematical filtration based on averaging the random variable an oscillation within the scope of time and frequency. There also was made an example of specific processing of $F - t$ diagrams for $C - Mn$ steel sample, which may be the basis for evaluation of failure process parameters in crack mechanics bearing.

Eugeniusz Ranatowski

ANALIZA FIZYCZNA PROCESU UDAROWEGO ZGINANIA

W artykule przedstawiono analizę zjawisk w czasie próby dynamicznego zginania oprzyrządowanego młota wahadłowego. Energia młota w czasie próby jest zmniejszona przez odkształcenie próbki, jej przyspieszenie ze stanu spoczynku, deformację próbki typu Brinell'a, wibrację i sprężyste odkształcenie młota. Analiza sygnału otrzymanego z noża wahadła młota (podpór lub próbki) w celu określenia zmiany energii, ugięcia i przebiegu siły musi być wykonana w oparciu o znajomość rozkładu energii, elektronicznych ograniczeń oraz nakładania się oscylacji układu.

1. WSTĘP

Zgodnie z obowiązującą procedurą badania udarności materiałów według PN-79/H-04370, energia kinetyczna wahadła młota udarowego zostaje częściowo zamieniona na pracę uderzenia K , którą oznaczamy zgodnie z normą odpowiednio dla próbek Charpy i Mesnager przez KV , KU . Wartość zużytej pracy określona zostaje globalnie.

W zależności od rodzaju badanych materiałów (kruchy lub plastyczny) lub warunków przeprowadzania próby (temperatura) może prowadzić do bardzo subiektywnej oceny KV , KU w stosunku do interpretacji fizycznej według ustaleń normy. W tych badaniach KV , KU określa bezpośrednio ilość pracy zużytej na proces dekohezji materiału i powstanie przelomu o charakterze płaskim.

Próbie tej usiłuje się nadać bardziej precyzyjny charakter poprzez pomiar i analizę przebiegu siły łamiącej próbkę w funkcji czasu ($F-t$) lub ugięcia ($F-f$). Procesowi temu sprzyja ogólny postęp w rozwoju elektroniki i zwiększone możliwości w zakresie pomiarów dynamicznych z jednoczesnym wspomaganiami komputerowym [1]. W oparciu o analizę przebiegu siły $F(t)$ jest możliwa głębsza analiza procesu łamania próbki. Wobec tego celem dalszych rozważań jest analiza tej próby i zjawisk towarzyszących, co pozwoli stworzyć podstawę do wprowadzania nowych parametrów wynikających z dynamicznej mechaniki pęknięcia.

2. CHARAKTERYSTYKA ZUŻYCIA ENERGII W CZASIE UDAROWEGO ZGINANIA

Maksimum energii K_o , jaką dysponuje młot udarowy w momencie uderzenia noża wahadła w próbkę, zostaje zredukowane o wartość ΔK_o [2]:

$$\Delta K_o = K_f + K_{sD} + K_B + K_{MV} + K_{ME} \quad (1)$$

gdzie:

- K_f - energia niezbędna do przyspieszenia próbki badanej ze stanu spoczynku do prędkości wahadła,
- K_{sD} - energia zużycia na zginanie próbki,
- K_B - energia zużycia na deformację typu Brinell'a próbki w miejscu uderzenia noża wahadła,
- K_{MV} - energia absorbowana przez młot wahadłowy poprzez wibracje początkowym kontakcie noża wahadła z próbką,
- K_{ME} - energia sprężysta zmagazynowana i absorbowana przez młot wahadłowy jako rezultat działającego na próbkę obciążenia.

Z równania (1) wynika, iż w pierwszym przybliżeniu możemy dokonać podziału zużytej energii ΔK_o na absorbowaną bezpośrednio przez próbkę K_p i absorbowaną przez młot udarowy K_M

$$\Delta K_o = K_p + K_M \quad (2)$$

gdzie:

$$K_p = K_f + K_{sD} + K_B$$

$$K_M = K_{MV} + K_{MB}$$

Z powyższych rozważań wynika więc, że procesowi zginania towarzyszy znaczna dysypacja energii na procesy nakładające się bezpośrednio na proces zginania udarowego próbki. Ponadto energia zużyta na proces zginania i bezpośrednio powiązania z dekohezją materiału, nawet w przypadku kruchych zniszczeń, poprzedzona jest lokalnym odkształceniem plastycznym zachodzącym w pewnej objętości materiału przed frontem karbu, a potem szczeliny. Należy również stwierdzić, iż wartość ΔK_o jest również rozważana wartość KV lub KU:

$$\Delta K_o = KV \quad (3a)$$

$$\Delta K_o = KU \quad (3b)$$

Energia absorbowana w procesie udarowego zginania jest bezpośrednio sprężona z impulsem $\int_0^F F dt$ w formie związku:

$$\Delta K_o = \bar{V} \int_0^{\tau} F dt \quad (4)$$

gdzie:

$$V = \frac{1}{2} (\bar{V}_o + V_f)$$

V_o - prędkość początkowa wahadła młota udarowego w chwili $t=0$,

V_f - prędkość wahadła młota udarowego w chwili τ .

Z przyrównania zależności (2) i (4) otrzymamy:

$$K_p + K_m = \bar{V} \int_0^{\tau} F dt \quad (5)$$

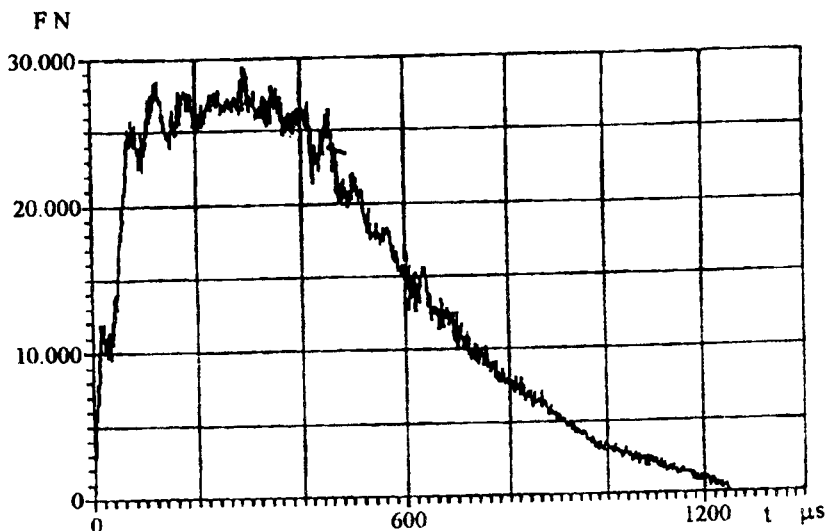
Z równania (5) wynika, iż analiza przebiegu siły wraz z odpowiednią interpretacją wykresu $F - t$ prowadzi wprost do bardziej dokładnej oceny udarności anizeli globalna ocena zmiany energii K_o w czasie dynamicznego zginania.

3. CHARAKTERYSTYKA I INTERPRETACJA PRZEBIEGU SIŁY W UKŁADZIE $F-t$

Prawidłowy pomiar przebiegu siły F i jej interpretacja wymagają uporządkowania i zrozumienia podstawowych zjawisk fizycznych w czasie próby udarowego zginania. Na rysunku 1 przedstawiono przebieg siły F jako funkcji czasu t dla materiału o wysokiej udarności. Nieregularny przebieg wykresu $F - t$ jest rezultatem nakładania się kilku różnych zjawisk fizycznych, o których w ogólnym zarysie wspomniano poprzednio. Charakteryzując z fizycznego punktu widzenia przebieg próby udarowego zginania należy stwierdzić, iż oddziaływanie pomiędzy nożem wahadła młota a próbką ma charakter falowy. W momencie uderzenia nożem wahadła w próbkę, jej reakcja jest określona przez sprzężone oddziaływanie fal naprężeniowych o charakterze rozciągającym lub ściskającym i ściśniętym, rozprzestrzeniających się w próbce odpowiednio z prędkościami C_1 i C_2 . Samo oddziaływanie układu: młot wahadłowy - próbka należy więc sprowadzić do:

- obciążenia mechanicznego zginającego próbkę,
- oscylacyjnej tłumionej reakcji układu na impuls,
- obciążenia inercyjnego przyspieszającego próbkę.

Głównym celem analizy przebiegu siły F jest ocena mechanicznej reakcji próbki z jednoczesnym uwzględnieniem drugiego i trzeciego składnika reakcji, mogącego często zaciemnić prawdziwą mechaniczną reakcję próbki.



Rys.1. Rzeczywisty przebieg siły F w funkcji czasu t :
 $F = f(t)$, zarejestrowany na nożu wahadła

Pierwsza nieciągłość obciążenia w przebiegu $F - t$ jest identyfikowana jako reakcja na obciążenie inercyjne. Jest ono spowodowane przyspieszeniem próbki ze stanu spoczynku do prędkości zbliżonej do prędkości noża wahadła. Składowa ta dominuje na wykresie przez początkowe 20-30 μs . Wielkość inercji oscylacji siły F jest powiązana z [3]:

- akustyczną impedancją noża wahadła próbki,
- prędkością początkową uderzenia noża wahadła, V_0 .

W powyższym aspekcie możemy wnioskować, iż początkowe obciążenie przekazane do próbki odbywa się przez mechanizm elementarnych fal sprężystych. Dopiero po dłuższym przebiegu czasowym $t > 50 \mu\text{s}$ na wykresie $F - t$ dominuje siła jako rezultat mechanicznego zginania próbki.

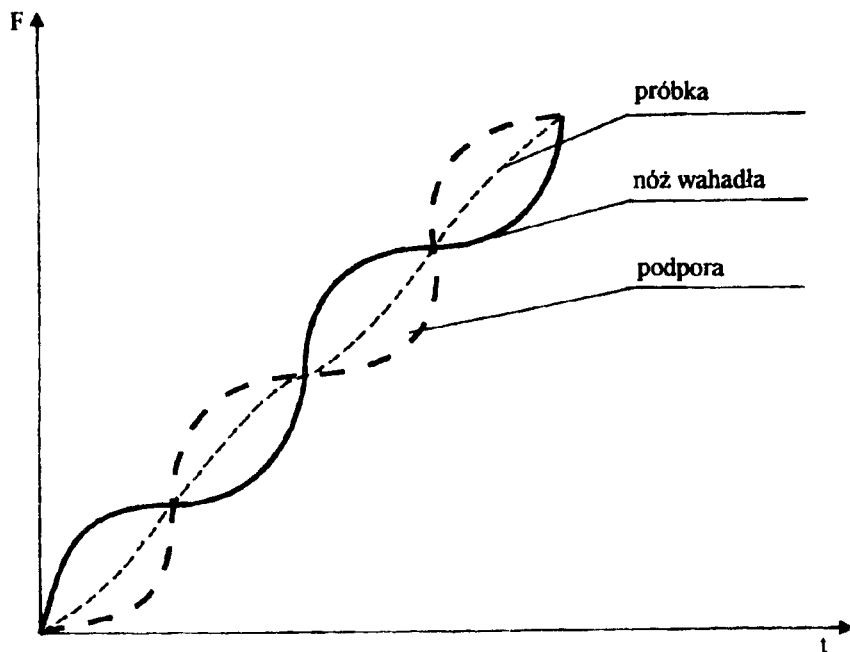
Następne oscylacje na wykresie $F - t$ są rezultatem wyzwolenia nagromadzonej energii sprężystej w układzie młot - próbka oraz odbitych fal naprężeniowych. Należy podkreślić, iż w wyniku nagłego uderzenia noża wahadła w próbkę i dalszych raptownych zmian siły F w procesie dekohezji próbki, np. w momencie osiągnięcia granicy sprężystości, kruche pęknięcia, procesowi temu wówczas odpowiada nagła zmiana energii zgromadzonej w młocie. Jest ona przenoszona w postaci tłumionej sinusoidy prowadzącej do oscylacji siły wzajemnego oddziaływania pomiędzy nożem wahadła a próbką. Nagła zmiana siły wzajemnego oddziaływania pomiędzy nożem wahadła a próbką również generuje odbite fale naprężeń w układzie. Częstotliwość odbitych fal naprężeń wynosi [3]:

- 100 kHz pomiędzy punktami obciążenia próbki,
- 50 kHz na nożu wahadła.

Czystym efektem odbitych fal naprężenia i tłumienia nagle wyzwolonej energii sprężystej jest częstotliwość $\sim 30\text{kHz}$.

Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie konsekwencje frustracji energetycznych w badanym układzie poprzez charakterystykę zmiany siły F na:

- nożu wahadła,
- podporach,
- w próbce.



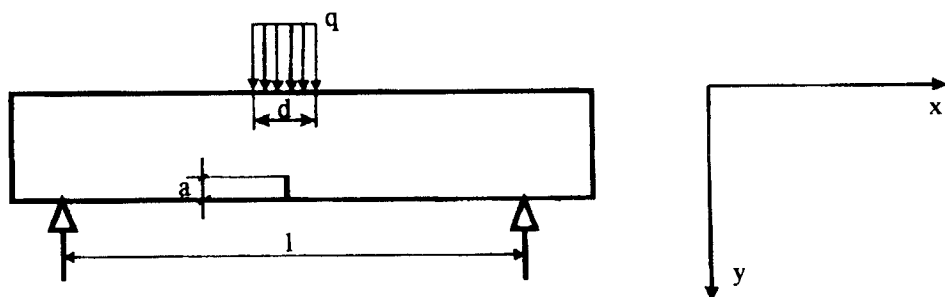
Rys.2. Schematyczna charakterystyka przebiegu obciążenia $F=f(t)$ na nożu wahadła, podporach i badanej próbce

Z rysunku wynika, iż oscylacja siły występująca w próbce jest fazowo zgodna z reakcją na podporach i opóźniona w fazie o $\sim 180^\circ$ w stosunku do reakcji noża wahadła. Równocześnie amplituda oscylującej siły na nożu wahadła i podporach jest znacznie większa niż dla badanej próbki. W związku z powyższą sytuacją ocena wartości siły F i przebiegu dynamicznego zginania próbki w sposób jednoznaczny będzie uzależniona od umiejscowienia czujników rejestrujących sygnały od powstałych fal naprężeniowych.

4. ANALITYCZNA OCENA PRZEBIEGU SIŁY F I PROCESU DEKOHEZJI W PRÓBIE UDAROWEGO ZGINANIA

Jako podstawę do analizy wartości siły F w procesie dynamicznego zginania przyjęto schemat przedstawiony na rysunku 3. Założono, iż szerokość noża wa-

hadła bezpośrednio uderzającego w próbkę wynosi d , a skutki jego działania przejawiają się w równomiernie rozłożonym obciążeniu q .



Rys. 3. Schemat obciążenia zginanej dynamicznie próbki

Wobec powyższego siłę dynamicznego obciążenia próbki przez młot możemy określić jako [4]:

$$F_d = q(x, t) \quad d = kt^N \quad d \quad (6)$$

gdzie:

- k, N - stałe,
- t - czas,

jako

$$F_i = \int_0^l y'' \varphi \quad s \quad dx \quad (7)$$

gdzie:

- y - przemieszczenie belki w kierunku osi y ,
- φ - gęstość,
- s - pole przekroju poprzecznego zginanej próbki.

Wyrażenie określające przemieszczenie próbki y , które jest rezultatem rozwiązania równania różniczkowego wynikającego z dynamicznej analizy równowagi sił i momentów:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \alpha^2 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \gamma^2 \frac{\partial y}{\partial t} = B^2 q(x, t) \quad (8)$$

ma postać [5]:

$$y + \left(\frac{8 V_0' e^{-\alpha t}}{\pi^4 EJ} \sin \omega_1 t + \frac{4 Fd l^3}{\pi^4 EJ} \right) \sin \frac{\pi x}{l} \quad (9)$$

$$\omega = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho s}} \quad (9a)$$

gdzie:

- E - moduł Young'a,
- J - moment bezwładności,
- a - współczynnik tłumienia,
- ω - częstotliwość drgań własnych próbki,
- ω_1 - częstotliwość drgań własnych próbki z uwzględnieniem tłumienia.

Oddziaływanie wzajemne pomiędzy siłami F_d i F_i ma szczególnie istotne znaczenie w przypadku kruchego łamania próbki. W związku z powyższym wprowadzamy rozróżnienie pomiędzy pękaniem kruchym i ciąglym, zakładając dwa rodzaje obciążenia dynamicznego F_d :

- liniowe obciążenia dla kruchych materiałów,
- paraboliczne obciążenie dla ciąglych materiałów.

Wartości ich określają odpowiednio następujące zależności:

$$F_d = kt_d \quad \text{dla} \quad t(t_c) \quad (10a)$$

$$F_d = F_m - k(t - t_f)^2 d \quad \text{dla} \quad t \geq t_c \quad (10b)$$

oraz

$$F_d = k \cdot t_d \quad \text{dla} \quad t(t_f) \quad (11a)$$

$$F_d = F_c - k_1 \cdot t_d \quad \text{dla} \quad t \geq t_f \quad (11b)$$

gdzie:

- t_c - czas przejścia od liniowego do parabolicznego obciążenia,
- t_f - czas pękania próbki.

Wobec tego wykorzystując zależności (9), (10) i (11) i wstawiając je do równania (7), ostatecznie wartość F_i wynosi [4]:

- dla parabolicznego obciążenia:

$$F_i = - \left[\frac{8V_0 \rho s l e^{-at}}{2} - (\omega_1 \sin \omega_1 t + 2a \cos \omega_1 t) + \frac{16 l^4 \rho s k_1 d}{\pi^5 E J} \right] \quad (12)$$

- dla liniowego obciążenia:

$$F_i = - \frac{8V_0 \rho s l e^{-at}}{\pi^2} (\omega_1 \sin \omega_1 t + 2a \cos \omega_1 t) \quad (13)$$

Wzajemne relacje pomiędzy siłami F_d i F_1 na nożu wahadła młota i próbce wynoszą:

- dla próbki

$$F = F_d + F_1 \quad (14)$$

- dla noża wahadła

$$F = F_d - F_1 \quad (15)$$

Analiza przebiegu siły F pozwala wyznaczyć punkty charakterystyczne procesu dekohezji próbki i wykorzystać je w dalszej kolejności do wyznaczania warunków wyteżenia i pęknięcia materiału badanego. Proces ten może odbywać się poprzez wykorzystanie wartości $F(t)$ do oceny odporności na pęknięcie w warunkach dynamicznego obciążenia K_{id} . Wartość K_{id} identyfikuje się z wartością dynamicznego współczynnika intensywności naprężenia $K_I(t)$.

$$K_I(t) + K_{Id} \quad (16)$$

Problem sprowadza się więc do teoretycznego wyznaczania $K_I(t)$ oraz eksperymentalnego określenia K_{id} . Ocenę $K_I(t)$ dokonuje się w wyniku rozwiązania równań liniowej elastodynamiki, natomiast ocena K_{id} związana jest z wykorzystaniem wykresów $F(t)$.

Dla próbek typu Charpy wartość K_{id} wynosi [5]:

$$K_{Id} = K_{Is} \frac{\omega}{F(t)} \int_0^t F(\tau) \sin \omega_1(t - \tau) d\tau \quad (17)$$

Wyrażenie określające K_{Is} ma postać:

$$K_{Is} + \frac{6IF(t)}{4bh^2} \sqrt{\pi a \psi \left(\frac{a}{h} \right)} \quad (8)$$

gdzie:

$$\psi \left(\frac{a}{h} \right) = 1,090 - 1,735 \left(\frac{a}{h} \right) + 8,20 \left(\frac{a}{h} \right)^2 - 14,18 \left(\frac{a}{h} \right)^3 + 14,57 \left(\frac{a}{h} \right)^4 \quad (19)$$

Do kreślenia ω wykorzystamy zależność (9a).

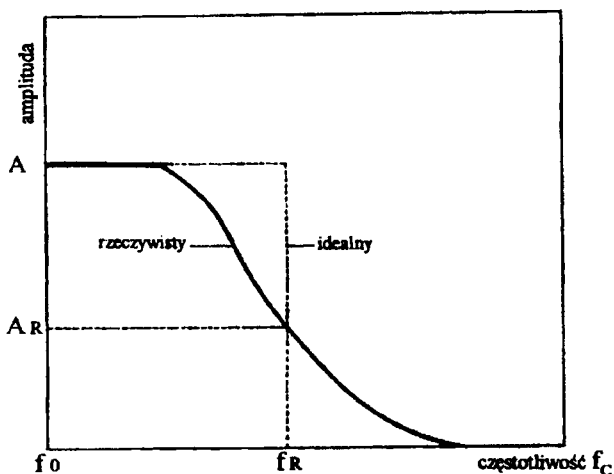
5. NIEKTÓRE WYMAGANIA TECHNICZNE UKŁADU POMIAROWEGO SIŁY $F(t)$

Mierzona wielkość fizyczna, która jest siłą F zmiennie w czasie pomiaru, stawia określone wymagania układowi pomiarowemu. Dotyczy to zarówno przetworników pomiarowych, jak i struktury układu pomiarowego. W praktycznych zastosowaniach pomiarowych stosuje się szeroko charakterystyki czasowe i czę-

stotliwościowe, przedstawiające własności dynamiczne układu. Jest to o tyle ważne, że zastosowane oprzyrządowanie elektroniczne młota uderowego posiada ograniczoną reakcję częstotliwościową układu f i reakcję czasową t_r . Analityczny związek pomiędzy częstotliwością sygnału pomiarowego f_0 i reakcją czasową t_r fali o przebiegu sinusoidalnym ma postać [6]:

$$t_r \cong \frac{0,35}{f_c} \quad (20)$$

Na rysunku 4 przedstawiono schematycznie rzeczywisty i idealny przebieg sygnału pomiarowego, określony za pomocą krzywej określającej związek pomiędzy częstotliwością f a amplitudą sygnału A .



Rys. 4. Schematyczny przebieg krzywej charakteryzującej związek pomiędzy amplitudą i częstotliwością sygnału siły dynamicznej

Dla idealnego przypadku f_R reprezentuje najwyższą częstotliwość, dla której sygnał charakteryzujący np. przebieg siły F może zostać przesłany bez osłabienia. W rzeczywistych przypadkach częstotliwość f_R odpowiada częstotliwość wytworzonej przez układ pomiarowy w wyniku osłabienia amplitudy sygnału od A do A_R . Jeżeli do oceny sygnału pomiarowego przyjmiemy tzw. skalę decybelową, to wartość sygnału w dB określamy z zależności [7]:

$$\bar{x} = 20 \log_{10} \left(\frac{x}{x_{\text{prog}}} \right) \quad (21)$$

gdzie:

- x - sygnał w dB,
- x - sygnał w skali dziesiętnej,
- x_{prog} - progowa wartość sygnału w skali dziesiętnej.

Dla sygnału pomiarowego młota uderowego osłabienie to wyrażone w dB ma postać:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{U_{\text{wejśc.}}}{U_{\text{wyjśc.}}} \right) \quad (22)$$

$U_{\text{wejśc.}}$ - napięcie wejściowe,

$U_{\text{wyjśc.}}$ - napięcie wyjściowe.

W badaniach z oprzyrządowanym elektronicznie młocie uderowym dopuszcza się dla całego systemu pomiarowego młota osłabienie amplitudy sygnału o 10%, co odpowiada 0,915 dB.

Wobec tego reakcja czasowa T_R wynosi:

$$T_R \cong \frac{0,35}{f_{0,915}} \quad (23)$$

W praktyce T_R wykorzystuje się do zestawienia ograniczeń dla dynamicznej analizy sygnału pomiarowego.

I tak potencjalny problem ograniczonej reakcji częstotliwości dla przetworników wzmacniających sygnał zanika, jeżeli:

$$t \geq 1,1 T_R \quad (24)$$

Nie spełnienie powyższego warunku prowadzi do zniekształcenia sygnału pomiarowego.

Ponadto, jeżeli

$$T_R \geq 1,4 t \quad (25)$$

i przy równoczesnym spełnieniu warunku:

$$t \geq 2,3 \tau \quad (26)$$

$\tau \cong 30 \mu s$ dla próbek stalowych, odpowiada momentowi impulsu inercyjnemu. Świadczy to o prawidłowym doborze rezystancji oporowo - pojemnościowej obwodu pomiarowego.

Reakcja mechaniczna w układzie pomiarowym dominuje, jeżeli:

$$t \geq 3\tau \quad (27)$$

gdzie:

τ - okres oscylacji próbki.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

1. Prawidłowa ocena parametrów procesu pęknięcia w czasie dynamicznego zginania wymaga dodatkowych czynności związanych z analizą przebiegi F-t.

2. Z zapisu przebiegu próby udarowego zginania F-t lub F-f należy usunąć zakłócenia i deformacje sygnału pomiarowego w czasie badań eksperymentalnych.
3. Eliminacja wpływu czynników dynamicznych w procesie zdejmowania przebiegu siły F-t lub F-f, w praktyce oznacza konieczność uwzględnienia:
 - a) zjawiska inercyjnego,
 - b) niskoczęstotliwościowych oscylacji przebiegu siły F-t lub f-f.
4. Proces eliminacji czynników dynamicznych może być wykonany w sposób kontrolowany jedynie z uwzględnieniem fizyki tego procesu, co w praktyce jest możliwe poprzez analityczną weryfikację tego procesu z uwzględnieniem zasad modelowania i aplikacji metod matematycznych opartych o metody komputerowe.

7. LITERATURA

- [1] Ranatowski E., Strzelecki R., Sadowski J.: Physical interp[retation of impact bend test by means of mathematical methods. Applied Mathematic and Computer, Science nr 2, 1993, Vol.3
- [2] Ireland D.R.: Procedures and problems associated with reliable control of the instrumented impact test. ASTM-STP 563, June 1973
- [3] Saxton H.J., Ireland D.R., Server W.L.: Analysis and control of inercial effects during instrumented impact testing. ASTM-STP 563, June 1973
- [4] Yongning L., Jinghao Z., Huijiu.: The inertia effect in Charpy impact tests. Engineering Fracture Mechanics Nr 6, 1991
- [5] Kishimoto K., Aoki S., Sakata M.: Simple formula for dynamic stress intensity factor of precracked Charpy specimen. Engineering Fracture Mechanics Nr 3, 1980, Vol.13
- [6] Server W.L.: Charpy impact testing. Dynamic fracture testing, in Mechanical testing. Vol.8. ASM. Ohio. 1985
- [7] Kruszewski J., Wittbrodt E.: Drgania układów mechanicznych w ujęciu komputerowym. Zagadnienia liniowe. t.1 WNT Warszawa 1992

PHYSICAL ANALYSIS OF IMPACT BEND TEST

Summary

The inherent characteristic of the instrumented impact test are discussed. The hammer energy is reduced by deforming the test specimen, accelerating the specimen from rest, Brinell - type deformation at the load points, vibrations of the hammer assembly and elastic deformation within the machine.

The analysis of instrumented impact signals for determination of various energy, deflection and load values must be done with a understanding of distribution of hammer energy, electronic limitation and superimposed oscillations.

Lech M. Kamiński

WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE PNEUMATYCZNEGO SIŁOWNIKA JEDNOSTRONNEGO DZIAŁANIA

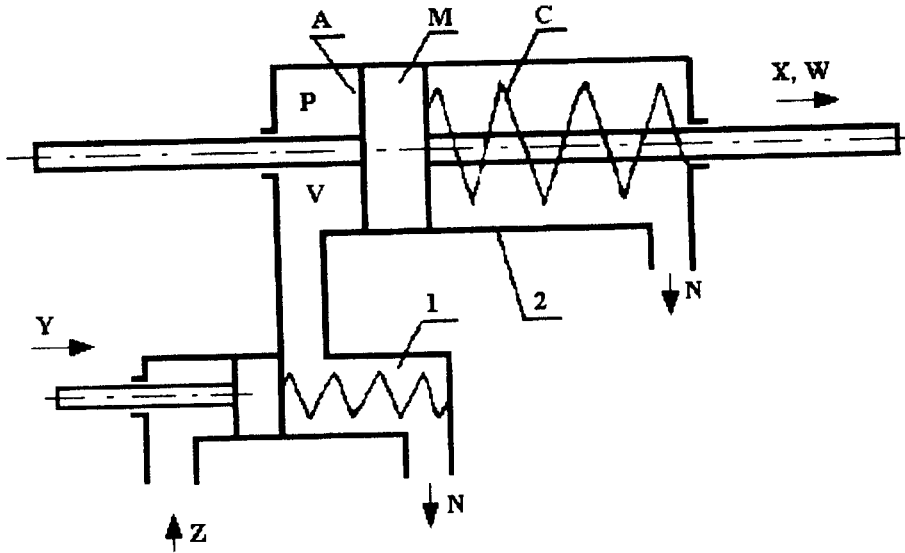
W pracy przedstawiono model liniowy pneumatycznego siłownika tłokowego jednostronnego działania z tłoczyskiem i sprężyną powrotną. Model liniowy opisany jest różniczkowym równaniem ruchu 3-go rzędu. Model ten analizowany jest za pomocą programu komputerowego dla różnych wartości parametrów siłownika pneumatycznego.

W obliczeniach komputerowych wyznaczono zmiany ciśnienia w komorze roboczej, prędkości i położenia tłoka w funkcji czasu w kolejnych małych odstępach czasu.

Porównanie wyników obliczeń komputerowych i danych z wykresu Wysznegradzkiego dla równania 3-go rzędu prowadzi do wniosku, że proponowana metoda jest dokładna. Metoda ta może być stosowana również dla modeli nieliniowych siłownika pneumatycznego (rzeczywista objętość komory roboczej, nieliniowa charakterystyka elementów przepływowych, siła tarcia, siła obciążenia itp.) Wyniki pracy mogą być wykorzystane przy konstruowaniu siłowników pneumatycznych.

1. PNEUMATYCZNY SIŁOWNIK TŁOKOWY JEDNOSTRONNEGO DZIAŁANIA

Na rysunku 1 przedstawiono schemat pneumatycznego siłownika tłokowego jednostronnego działania ze sprężyną powrotną. Ruch tłoka i związanych z nim elementów o masie M siłownika 2 następuje po przełączeniu rozdzielacza 1 sygnałem Y . Sprężone powietrze o ciśnieniu zasilania Z podłączone zostaje do komory siłownika o objętości V . Ciśnienie P w komorze napełnianej wzrasta i działając na powierzchnię A tłoka wywołuje siłę pokonującą opory ruchu i siłę sprężyny o sztywności c , powodując ruch tłoka. Po przełączeniu rozdzielacza 1 w położenie wyjściowe i połączeniu komory siłownika z otoczeniem o ciśnieniu N następuje ruch powrotny tłoka pod wpływem sprężyny [1,2]. W pracy analizowane są właściwości dynamiczne liniowego modelu siłownika pneumatycznego jednostronnego działania ze sprężyną.



Rys. 1. Schemat pneumatycznego siłownika tłokowego jednostronnego działania

2. RÓWNANIE RUCHU SIŁOWNIKA

Na podstawie równania stanu gazu dla powietrza w komorze siłownika można zapisać:

$$m = \frac{VP}{RH} \quad (1)$$

gdzie:

- m [kg] - masa powietrza w komorze siłownika,
- V [m³] - objętość komory siłownika,
- R [J/kg K] - stała gazowa powietrza,
- P [Pa] - ciśnienie absolutne w komorze siłownika,
- H [K] - temperatura bezwzględna powietrza siłownika,

a po zlinearyzowaniu przy zmianie masy powietrza w komorze siłownika przy stałej temperaturze ($H = \text{const.}$ [7]), otrzymuje się:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{V_0}{RH} \frac{dP}{dt} + \frac{P_0}{RH} \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

gdzie:

- V_0 [m³] - początkowa objętość komory siłownika,
- P_0 [Pa] - początkowe ciśnienie absolutne w komorze siłownika,
- t [s] - czas.

Linearyzując charakterystykę przepływową kanału doprowadzającego sprężone powietrze można napisać:

$$Q = U(Z - P) \quad (3)$$

gdzie:

- Q [kg/s] - masowe natężenie przepływu powietrza,
 Z [Pa] - ciśnienie absolutne powietrza zasilającego,
 U [kg/s Pa] - stały współczynnik.

Zmiana ilości powietrza w komorze napełnianej siłownika w jednostce czasu równa jest natężeniu przepływu powietrza w kanale doprowadzającym powietrze

$$\frac{dm}{dt} = Q \quad (4)$$

natomiast zmiana objętości komory napełnianej wywołana jest przesunięciem X tłoka:

$$dV = AdX \quad (5)$$

gdzie:

- A [m²] - powierzchnia czynna tłoka,
 X [m] - przesunięcie liniowe.

Po uwzględnieniu zależności (3), (4) i (5) w równaniu (2) oraz:

$$W \frac{dX}{dt} \quad [\text{m} / \text{s}] - \text{prędkość tłoka}$$

otrzymuje się:

$$T \frac{dP}{dt} + P = Z - KW \quad (6)$$

gdzie:

$$T = \frac{V_0}{URH} \quad [\text{s}] - \text{stała czasowa,}$$

$$K = \frac{P_0 A}{URH} \quad [\text{Ns} / \text{m}^3] - \text{współczynnik.}$$

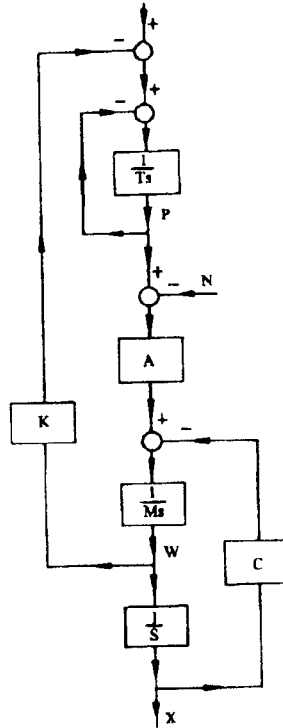
W analizowanym modelu siłownika założono, że na tłok działają jedynie siły od ciśnienia, siła bezwładności i siła sprężyny:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + CX = A(P - N) \quad (7)$$

gdzie:

- M [kg] - masa tłoka, tłoczyska i elementów z nim związanych,
 C [N/m] - sztywność sprężyny,
 N [Pa] - ciśnienie absolutne w komorze opróżnianej.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy siłownika tłokowego jednostronnego działania otrzymany na podstawie równań (6) i (7). Transmitancja układu:



Rys.2. Schemat blokowy liniowego modelu siłownika jednostronnego działania

$$G(s) = \frac{X(s)}{Z(s)} = \frac{A}{TM s^3 + Ms^2 + [TC + AK]s + C} \quad (8)$$

oraz równanie ruchu siłownika:

$$TM \frac{d^3 X}{dt^3} + M \frac{d^2 X}{dt^2} + [TC + AK] \frac{dX}{dt} + CX = AZ \quad (9)$$

3. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE LINIOWEGO MODELU SIŁOWNIKA

Liniowy model siłownika jednostronnego działania opisany równaniem ruchu (9), które stanowi równanie różniczkowe 3-go rzędu, może być badany za pomocą wykresu Wyszniegradzkiego [6]. Po podstawieniu w równaniu ruchu (9):

$$\tau = \sqrt[3]{\frac{C}{TM}} t$$

pierwiastkowi rzeczywistemu ujemnemu (linia przerywana lub linia kropka - kreska). W obszarze III przebiegi okresowe są rosnące, co odpowiada dodatniej wartości części rzeczywistej pierwiastka zespolonego sprzężonego. Każdy punkt wykresu odpowiada określonym wartościom pierwiastków równania charakterystycznego i wartościom współczynników W_x i W_y , które zależą od parametrów konstrukcyjnych układu. Pierwiastki równania charakterystycznego określają w pełni przebieg przejściowy po wyznaczeniu stałych całkowania.

4. GRANICA APERIODYCZNOŚCI

W niektórych zastosowaniach wymaga się zachowania aperiodycznego charakteru ruchu siłownika pneumatycznego. Może on być uzyskany przez tłumienie za pomocą tarcia. W przypadku rozpatrywanego modelu pneumatycznego siłownika tłokowego tarcie nie występuje, ale możliwe jest uzyskanie ruchu aperiodycznego.

Ruch aperiodyczny uzyskuje się, gdy pierwiastki równania charakterystycznego są rzeczywiste ujemne. Równanie charakterystyczne dla równania ruchu (10) ma postać:

$$s^3 + W_x s^2 + W_y s + 1 = 0 \quad (11)$$

Zgodnie z wykresem Wyszniegradzkiego [6] granica aperiodyczności określona jest zależnością:

$$4[W_x^3 + W_y^3] - W_x^2 W_y^2 - 18W_x W_y + 27 = 0 \quad (12)$$

Przy zastosowaniu współrzędnych bezwymiarowych masy i sztywności sprężyny [3,4]:

$$g = \frac{M(URH)^2}{V_o A^2 P_o} = \frac{M}{ATK} \quad (13)$$

$$f = \frac{CV_o}{A^2 P_o} = \frac{CT}{AK}$$

współczynniki W_x i W_y w równaniu (10) wynoszą:

$$W_x = \sqrt[3]{\frac{g}{f}} \quad (14)$$

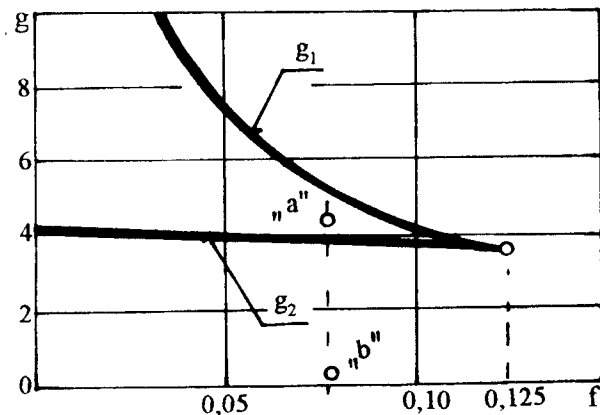
$$W_y = \frac{f+1}{\sqrt[3]{gf^2}}$$

a granicę aperiodyczności zgodnie z zależnością (12) uzyskuje się, gdy:

$$g_{1,2} = 2,5 + \frac{1}{8f} - f \pm \left[\frac{1}{8f} - 1 \right] \sqrt{1 - 8f} \quad (15)$$

Na rysunku 4 przedstawiono wykres granicy aperiodyczności określonej zależnością (15). Krzywe g_1 i g_2 ograniczają obszar, w którym spełnione są warunki aperiodyczności (obszar aperiodyczności). Punkt ($f=0,125$; $g=3,375$) odpowiada punktowi (W_x+3 ; W_y+3) wykresu Wyszniegradzkiego.

Wprowadzone współrzędne bezwymiarowe masy g i sztywności sprężyny f ułatwiają analizę własności dynamicznych liniowego modelu siłownika. W pracy ograniczono się do poszukiwania warunków aperiodyczności. Z przedstawionych zależności wynika, że warunki ruchu aperiodycznego mogą być osiągnięte w przypadku masy odpowiadającej wartości g_2 , która dla $f = 0,125$ wynosi $g_2 = 3,375$, a dla $f \rightarrow 0$ osiąga wartość $g_2 \rightarrow 4$. Odpowiada to stosunkowo dużym wartościom masy M tłoka, tłoczyska i związanych z nim elementów, przy praktycznie spotykanych wymiarach konstrukcyjnych siłowników. Uzyskane wyniki posłużyły jednak do sprawdzenia stosowanej następnie metody numerycznego obliczania przebiegów przejściowych w siłownikach pneumatycznych polegającej na wyznaczaniu przyrostów wielkości określających stan układu w kolejnych małych odstępach czasu przy użyciu odpowiednich programów komputerowych.



Rys.4. Granica aperiodyczności liniowego modelu siłownika

5. OBLICZENIA PRZEBIEGÓW PRZEJŚCIOWYCH

Obliczenia przebiegów przejściowych w liniowym modelu siłownika opisanym równaniem ruchu (9) i schematem blokowym podanym na rysunku 2 prze-

prowadzono metodą wyznaczania przyrostów ciśnienia P , prędkości W i przesu-
nięcia tłoka X w kolejnych odcinkach czasu t na podstawie zależności:

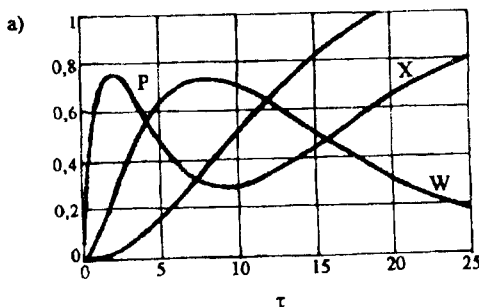
$$T \frac{dP}{dt} = Z - KW - P \quad (16)$$

$$M \frac{dW}{dt} = A(p - N) - CX$$

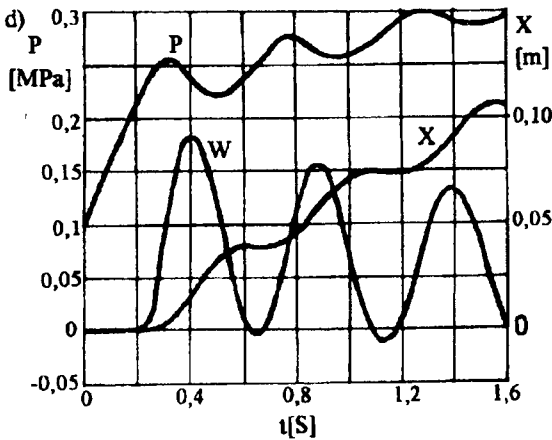
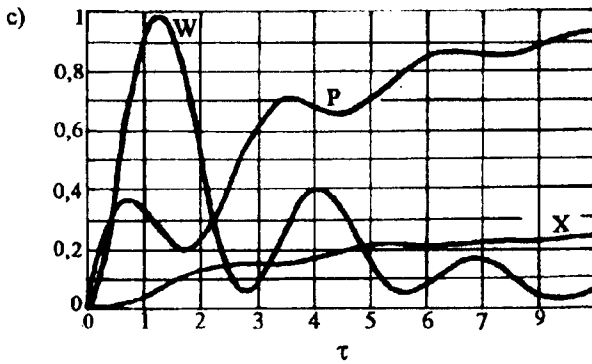
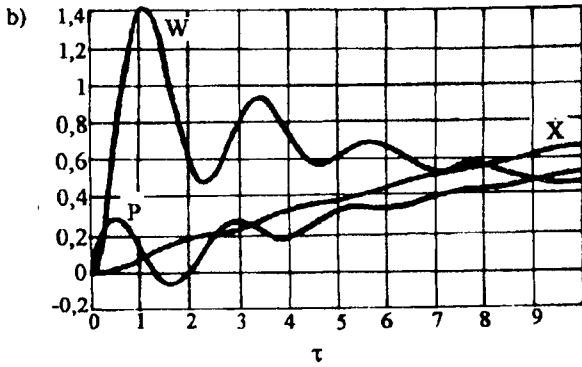
$$\frac{dx}{dt} = W$$

Na rysunku 5a, 5b i 5c przedstawiono fragmenty przebiegów przejściowych dla danych: a) $g = 4,5$; $f = 0,0785$, b) $g = 0,1414$; $f = 0,0785$, c) $g = 0,26$; $f = 0,3925$. Otrzymane przebiegi odpowiadają przewidywanym przebiegom na podstawie wykresu na rysunku 4.

Na rysunku 5d przedstawiono fragment przebiegu przejściowego w siłowniku nieliniowym o danych konstrukcyjnych bliskich podanym w przykładzie analizowanym w [2] na str. 303-309. W obu przypadkach przebieg jest oscylacyjny o okresie około 0,4 s, początek ruchu tłokowego nastąpił po około 0,25 s, w czasie 1,5 s tłok przesunął się o 0,1 m i ciśnienie w komorze osiągnęło wartość około 0,3 Mpa. Przebieg przejściowy uzyskany został za pomocą metody stosowanej poprzednio, ale ciśnienie w komorze obliczano na podstawie aktualnej w danej chwili objętości komory i zgromadzonej w niej masy powietrza. Poza tym uwzględniono nieliniową charakterystykę przepływową przewodu doprowadzającego sprężone powietrze oraz siłę obciążającą od napięcia wstępnego sprężyny i oporów ruchu. Dane siłownika: objętość początkowa komory $V_0 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$, powierzchnia tłoka $A = 0,01 \text{ m}^2$, sztywność sprężyny $C = 7850 \text{ N/m}$, siła obciążająca i napięcie wstępne sprężyny $F = 1200 \text{ N}$, masa tłoka i elementów z nim związanych $M = 200 \text{ kg}$, absolutne ciśnienie zasilania $Z = 0,5 \text{ Mpa}$, ciśnienie otoczenia $N = 0,1 \text{ Mpa}$.



Rys.5a. Fragmenty przebiegów przejściowych w siłowniku pneumatycznym



Rys. 5bcd. Fragmenty przebiegów przejściowych w siłowniku pneumatycznym

6. WNIOSKI

Równanie ruchu liniowego modelu siłownika pneumatycznego jednostronnego działania ze sprężyną może być analizowane za pomocą wykresu Wysznie-

gradzkiego, szczególnie gdy zamiast współczynników równania wprowadzi się wielkości bezwymiarowe masy i sztywności sprężyny. Uzyskane wyniki posłużyły do sprawdzenia stosowanej metody obliczeń numerycznych przebiegów przejściowych. Rozbudowanie metody obliczeń pozwoliło na badanie własności dynamicznych siłowników pneumatycznych zawierających elementy nieliniowe.

LITERATURA

- [1] Dimitriew V.N., Gradeckij V.G.: Osnovy pnevmoavtomatiki - Izd Mašinostrojenie, Moskwa 1973
- [2] Gerc E.W.: Napędy pneumatyczne. Teoria i obliczanie. WNT, Warszawa 1973
- [3] Kamiński L.M.: Aperiodyczny ruch siłownika pneumatycznego. Materiały VII Zjazdu Termodynamików, Krościenko 1972, AGH Kraków, s. 62-67
- [4] Kamiński L.M.: Pneumatic Cylinder with Aperiodic Motion. 13-th International Conference on „Models in Designing and Constructions of Machines” 25-28.04 1989 Zakopane, Zesz.Nauk. Pol. Śl. nr 1027/1989, z. 92, s.75-80
- [5] Kamiński L.M.: Oscilation of Pneumatic Power Cylinders. XIII Polish Conference of Theory of Machines and Mechanisms. Koszalin-Mielno, September 19-21.1992, Abstracts s.107-108
- [6] Krutov W.I.: Avtomatizieskoje regulirovanije dvigatielej wnutrjennego sgoranija. Maszgiz, Moskwa 1958
- [7] Leśkiewicz H.J.: Człony schematów blokowych pneumatycznych urządzeń automatyki. Archiwum Automatyki i Telemechaniki, t.II, z. 1-2, 1957, s. 121-128

DYNAMIC PROPERTIES OF PNEUMATIC POWER CYLINDERS SINGLE ACTING

Summary

The paper presents linear models of pneumatic power cylinders single acting with end rod with spring return. The linear model determined by differential equation 3-rd order. The computer program of this linear for differently design parameters of pneumatic power cylinders is considered.

The computer calculation enabled to mark pressure at working chamber, piston velocity and piston displacement as time function at small time limit.

Analisis of the computer calculation and Wiszniegradzki-diagram for differential equation 3-rd order leads to conclusion that the proposed method of computer calculation is exact. This method may be used for the nonlinear models of pneumatic power cylinders (with real volume of working chamber, nonlinear characteristics of pneumatic resistance, friction force, load force...). The results obtained may be used for design of pneumatic power cylinders.

Andrzej Laskowski

WYKRAPLANIE SIĘ WILGOCI Z POWIETRZA PRZY ZMIANIE JEGO CIŚNIENIA

Omówiono sposób postępowania przy wyznaczaniu ilości wilgoci wykrop-
lonej ze sprężonego powietrza oraz wykazano, posługując się przykładem licz-
bowym i zbudowanymi w oparciu o niego wykresami, że zagadnienie to można
rozwiązać mniejszym nakładem pracy przez odpowiednie dobranie zmiennych
na osiach układu współrzędnych.

1. WPROWADZENIE

W procesach produkcyjnych, w których eksploatowane są urządzenia tech-
nologiczne zasilane sprężonym powietrzem, mają miejsce problemy związane
z wydzielaniem się wilgoci, bowiem po sprężeniu gazu wilgotnego i następnie
ochłodzeniu go np. w chłodnicy lub zbiorniku wyrównawczym, jego wilgotność
względna wzrasta i po osiągnięciu punktu rosy zaczyna się wykraplać wilgoć.

Wykroplona wilgoć w postaci wody powoduje rdzewienie odbiorników sprę-
żonego powietrza i zmywanie warstwy oleju z powierzchni ślizgowych, co jest
przyczyną kilkakrotnie szybszego zużycia niż w przypadku stosowania powietrza
osuszonego. Wydzielanie się wody prowadzi również do wzrostu zużycia sprę-
żonego powietrza i wysokich kosztów utrzymania maszyn i narzędzi pneumatycz-
nych. Duże szkody i długie przerwy w pracy mogą powstać wskutek rozerwania
przewodów przez zamarzającą wykroploną wodę w okresie zimy, zwłaszcza
w przypadku dłuższych przerw w pracy i wyłączania ogrzewania pomieszczeń
z przyczyn ekonomicznych.

Wykraplanie się wilgoci ze sprężonego powietrza, czy też innych gazów jest
przyczyną licznych kłopotów i dlatego należy ją usuwać. Podstawowym spo-
sobem, którym można to osiągnąć, jest chłodzenie sprężonego gazu w chłodnicy
zainstalowanej za sprężarką, jednak ten sposób osuszania jest niewystarczający
i należy stosować dodatkowo jeszcze inne sposoby usuwania wilgoci [1,2], a mian-
owicie przez:

- absorpcję różnymi roztworami, np. roztwór wodny gliceryny (85 %),
- absorpcję materiałami higroskopijnymi, np. dwutlenek krzemu (koloidalny $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$),

- wewnętrzne chłodzenie gazu poniżej punktu rosy, tj. osuszanie gazu w urządzeniu stanowiącym element obiegu chłodniczego, np. suszarka chłodnicza zasilana parującym czynnikiem chłodniczym,
- zewnętrzne chłodzenie gazu poniżej punktu rosy, tj. sprężenie go do ciśnienia wyższego niż żądane, ochłodzenie w chłodnicy, a następnie rozprężenie do ciśnienia nominalnego.

2. OKREŚLENIE ILOŚCI WILGOCI WYKROPLONEJ ZE SPRĘŻONEGO POWIETRZA

Aby było możliwe wybranie najbardziej odpowiedniego sposobu usuwania wilgoci ze sprężonego powietrza, jak również dobór lub opracowanie urządzenia oddzielającego ciecz, konieczna jest znajomość ilości wilgoci wydzielonej w jednostce czasu. Jak wiadomo, ta ilość wykroplonej wilgoci zależy od parametrów powietrza zasysanego, a więc jego ciśnienia, temperatury i zawartości wilgoci oraz ciśnienia i temperatury powietrza dostarczanego do maszyn i narzędzi pneumatycznych, a także od wydajności agregatu sprężarkowego. Ponieważ graficzny sposób obliczania ilości pary wodnej wykroplonej ze sprężonego powietrza, przedstawiony w [4], pozwala jedynie orientacyjnie określić tę ilość, autor uważa za wskazane przytoczyć w niniejszej pracy analityczną metodę obliczeń.

Przyjmując zatem, że sprężarka zasysa wilgotne powietrze o parametrach p_1 , t_1 i φ_1 oraz zakładając, że przy niezbyt wysokich temperaturach para wodna i suche powietrze zachowują się jak gazy doskonałe, można napisać poniższe zależności [5]

$$\psi_1 = \frac{x_1}{x_{\max 1}} \approx \varphi_1 \quad (1)$$

$$x_{\max 1} = \frac{\rho''_1}{\rho_{g01}} \quad (2)$$

$$\rho_{g01} = \frac{p_1 - p_{n1}}{R_g \cdot T_1} \quad (3)$$

gdzie p_1 , t_1 , φ_1 , ψ_1 , x_1 , $x_{\max 1}$, ρ''_1 , ρ_{g01} , p_{n1} , T_1 i R_g odpowiednio ciśnienie, temperatura, wilgotność względna i stopień nasycenia powietrza wilgotnego, zawartość wilgoci aktualna oraz maksymalna, gęstość pary nasyconej suchej, gęstość suchego powietrza w przypadku, gdy przy stałym ciśnieniu powietrza wilgotnego zostanie ono nasycone całkowicie parą, ciśnienie nasycenia pary i tempe-

ratura bezwzględna dla początkowych warunków ssania (w praktyce parametrów otoczenia) oraz stała gazowa powietrza suchego.

Podobnymi zależnościami można opisać stan powietrza wilgotnego sprężonego do ciśnienia p_2 , a następnie oziębionego do temperatury t_2 , tj.

$$\rho_{g02} = \frac{p_2 - p_{n2}}{R_g \cdot T_2} \quad (4)$$

$$X_{\max 2} = \frac{\rho''_2}{\rho_{g02}} \quad (5)$$

Sposób prowadzenia obliczeń jest następujący. Z tablicy "Własności pary wodnej w niskich temperaturach" [3] należy odczytać dla temperatury t_1 wartości ciśnienia, p_{n1} nasycenia i gęstości ρ''_1 pary nasyconej suchej, a następnie z zależności (3) wyznaczyć gęstość ρ_{g01} powietrza suchego w przypadku, gdy przy stałym ciśnieniu powietrza wilgotnego zostanie ono całkowicie nasycone parą. Znając wartość ρ_{g01} , z wyrażenia (2) można obliczyć maksymalną możliwą zawartość $x_{\max 1}$, a z zależności (1) aktualną zawartość x_1 wilgoci w powietrzu zasysanym przez sprężarkę. W podobny sposób wyznacza się ilość wilgoci w powietrzu o parametrach t_2 i p_2 , tzn. z tablicy "Własności pary wodnej w niskich temperaturach" należy odczytać dla temperatury t_2 wartości ciśnienia p_{n2} nasycenia oraz gęstości ρ''_2 pary nasyconej suchej i ze wzoru (4) wyznaczyć gęstość ρ_{g02} powietrza, a z zależności (5) maksymalną możliwą zawartość $x_{\max 2}$ wilgoci w powietrzu sprężonym do ciśnienia p_2 , a następnie oziębionym do temperatury t_2 . Znajomość wartości x_1 i $x_{\max 2}$ pozwala określić ilość wykroplonej wilgoci Δx w odniesieniu do 1 kg powietrza suchego, które uczestniczy w przemianie termodynamicznej, będącej przedmiotem rozważań, a mianowicie

$$\Delta x = x_1 - x_{\max 2} \quad (6)$$

przy czym strumień masy powietrza suchego, uczestniczącego w przemianie, można obliczyć z równania stanu znając wydajność objętościową \dot{Q}_v , czyli rzeczywistą ilość gazu wytłaczanego przez króciec tłoczny sprężarki zredukowaną do warunków panujących w normalnym punkcie zasysania sprężarki, tj. ciśnienia wlotowego ssania $p_{sn} = 0,1$ MPa i temperatury wlotowej ssania $t_{sn} = 20^\circ\text{C}$ [4]. Należy przy tym nadmienić, że wydajność objętościowa \dot{Q}_v nie zależy od początkowych warunków ssania, natomiast ilość substancji zasysanej przez sprężarkę, czyli strumień masy gazu, zmienia się wraz ze zmianą początkowych parametrów ssania, a zatem strumień masy powietrza suchego

$$m = \frac{(p_1 - \varphi_1 \cdot p_{n1}) \cdot \dot{Q}_v}{R_g \cdot T_1} \quad (7)$$

i całkowita ilość wykroplonej wilgoci

$$W = m \cdot \Delta x \quad (8)$$

Przykład liczbowy, ilustrujący powyższe rozważania, rozwiązany został dla różnych kombinacji parametrów początkowych t_1 i φ_1 powietrza na ssaniu sprężarki oraz dla różnych wartości temperatury t_2 powietrza do jakiej zostało ono oziębione po sprężeniu i przy założeniu, że sprężanie przebiegało od ciśnienia $p_1 = 0,1$ MPa do $p_2 = 0,8$ MPa. (Agregat sprężarkowy stacjonarny typu WS-100 o wydajności $\dot{Q}_v = 10$ m³/min przeznaczony do sprężania powietrza potrzebnego do napędu maszyn, narzędzi i innych urządzeń pneumatycznych).

Wyniki obliczeń zamieszczone są w tablicach 1 i 2 oraz dla wybranej grupy parametrów przedstawione w postaci wykresów na rysunkach 1, 2, 3 i 4.

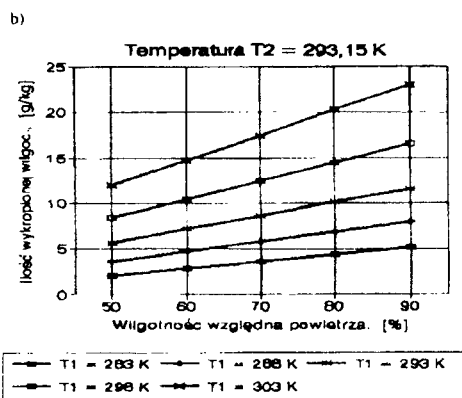
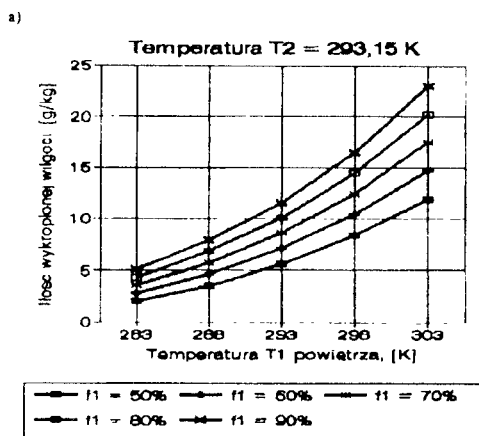
Tablica 1

Ilość wilgoci Δx [g] wykroplonej z powietrza o parametrach t_1 i φ_1 , sprężonego od ciśnienia $p_1 = 0,1$ MPa do $p_2 = 0,8$ MPa i oziębionego do temperatury t_2 , w odniesieniu do 1 kg powietrza suchego

φ_1 %	t_1 °C	t_2 °C	5	10	15	20	25	30	35	40	45
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
50	10	Dx	3,19	2,91	2,54	2,04	1,39	0,55	-	-	-
	15		4,72	4,44	4,07	3,57	2,92	2,07	0,98	-	-
	20		6,77	6,49	6,12	5,62	4,97	4,13	3,04	1,65	-
	25	g/kg	9,50	9,22	8,85	8,36	7,71	6,86	5,77	4,38	2,62
	30		13,12	12,84	12,47	11,97	11,32	10,48	9,38	8,00	6,24
60	10	Dx	3,96	3,68	3,31	2,82	2,16	1,32	0,23	-	-
	15		5,80	5,52	5,15	4,65	4,00	3,15	2,06	0,67	-
	20		8,26	7,98	7,61	7,11	6,46	5,62	4,53	3,14	1,38
	25	g/kg	11,54	11,26	10,89	10,39	9,74	8,90	7,81	6,42	4,66
	30		15,88	15,60	15,23	14,73	14,10	13,23	12,14	10,75	8,99
70	10	Dx	4,73	4,45	4,08	3,59	2,94	2,09	1,00	-	-
	15		6,87	6,60	6,22	5,73	5,08	4,23	3,14	1,75	-
	20		9,75	9,47	9,10	8,60	7,95	7,11	6,01	4,63	2,87
	25	g/kg	13,57	13,30	12,92	12,43	11,78	10,93	9,84	8,45	6,69
	30		18,64	18,36	17,99	17,49	16,84	15,99	14,90	13,51	11,75
90	10	Dx	6,28	6,00	5,63	5,14	4,48	3,64	2,55	1,16	-
	15		9,03	8,76	8,38	7,89	7,24	6,39	5,30	3,91	2,15
	20		12,73	12,45	12,08	11,58	10,93	10,08	8,99	7,60	5,84
	25	g/kg	17,65	17,37	17,00	16,50	15,86	15,00	13,91	12,53	10,76
	30		24,15	23,88	23,50	23,01	22,36	21,51	20,42	19,03	17,27

3. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ

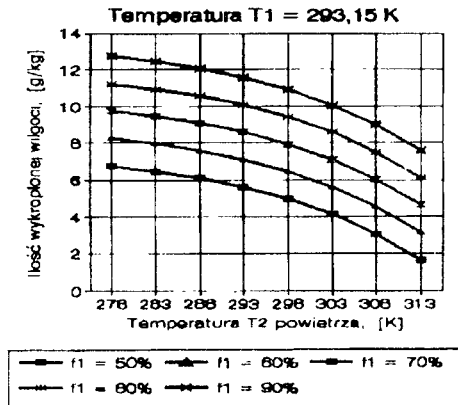
Analizując otrzymane wykresy można stwierdzić, że do wykreślenia krzywych przedstawionych na rysunkach 1a i 2a konieczne jest wyznaczenie metodą analityczną dużej ilości punktów, a zatem jest to przedsięwzięcie dosyć żmudne i pracochłonne. Istnieje jednak sposób umożliwiający rozwiązanie rozważanego zagadnienia mniejszym nakładem pracy, a mianowicie jeżeli ilość wykropionej wilgoci Δx zostanie przyjęta jako zmienna zależna, natomiast wilgotność względna φ_1 powietrza zasysanego przez sprężarkę jako zmienna niezależna, a jego temperatura t_1 oraz temperatura t_2 , do której zostało ono ochłodzone po sprężeniu, jako parametry, wówczas otrzymuje się zależność liniową. Zatem, aby otrzymać



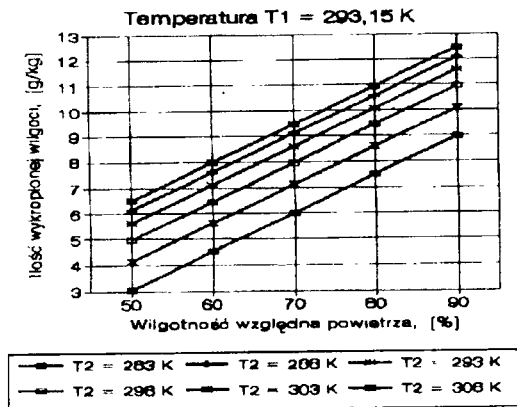
Rys 1 Ilość wilgoci Δx [g] wykropionej z powietrza sprężonego od początkowych parametrów ssania, tj. temperatury T_1 , wilgotności względnej φ_1 (na rysunku oznaczona f_1) oraz ciśnienia $p_1 = 0,1$ MPa do ciśnienia $p_2 = 0,8$ MPa i oziębionego do temperatury $T_2 = 293,15$ K w odniesieniu do 1 kg powietrza suchego

wykras przedstawiony na rysunku 1b wystarczy wyznaczyć analitycznie po dwa punkty dla każdej linii i poprowadzić przez nie proste, natomiast dla wykresu przedstawionego na rysunku 2b przebieg tylko jednej linii oraz po jednym punkcie dla linii pozostałych i poprowadzić przez te punkty linie równoległe. Należy również nadmienić, że przebieg zmian ilości wilgoci Δx [g/kg] wykroplonej ze sprężonego powietrza przedstawiony na rysunkach 1b i 2b nie zależy od wydajności sprężarki, a zatem są to wykresy obejmujące wszystkie sprężarki, dla których końcowe ciśnienie tłoczenia $p_2 = 0,8$ MPa. Jeżeli uwzględni się wartości strumienia masy m powietrza suchego zasysanego przez sprężarkę zamieszczone w tabelicy 2, wówczas przebieg zmian ilości wykroplonej wilgoci W [kg/h] (rys. 3 i 4) będzie odniesiony tylko do danego typu sprężarki, w rozważanym przykładzie jest to agregat sprężarkowy typu WS-100.

a)



b)

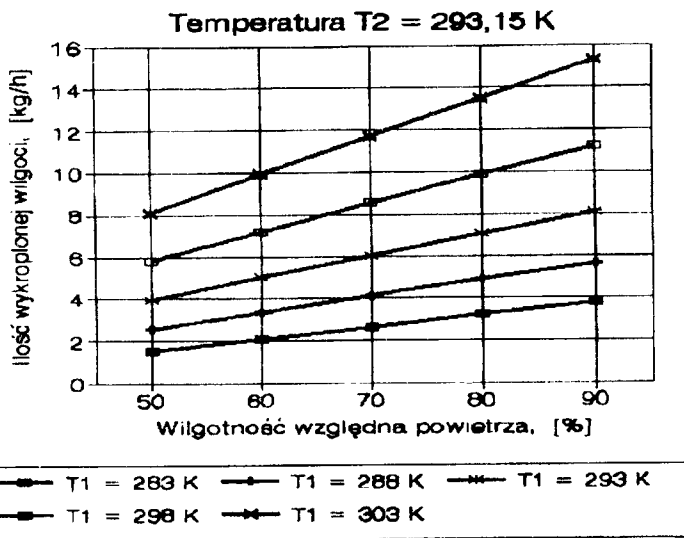


Rys.2. Ilość wilgoci Δx [g] wykroplonej z powietrza sprężonego od początkowych warunków ssania, tj. ciśnienia $p_1 = 0,1$ MPa, temperatury $T_1 = 293,15$ K i wilgotności względnej ϕ_1 (na rysunku oznaczona f_1) do ciśnienia $p_2 = 0,8$ MPa, a następnie oziębionego do temperatury T_2 w odniesieniu do 1 kg powietrza suchego

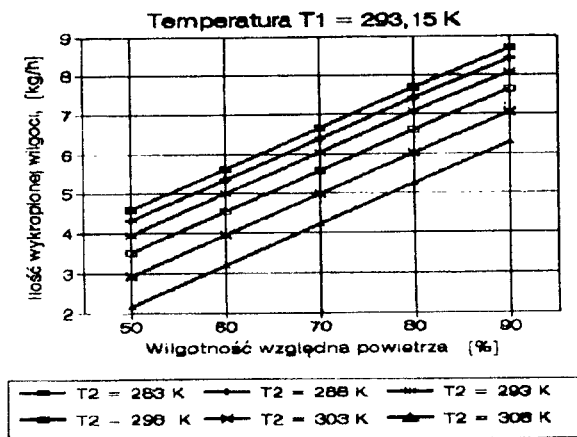
Tablica 2

Wartości strumienia masy m [kg/min] powietrza suchego zasysanego przez sprężarkę typu WS-100 dla różnych kombinacji parametrów początkowych ssania, tj. wilgotności względnej φ_1 i temperatury T_1

T_1 , K	283,15	288,15	293,15	298,15	303,15
φ_1 , %	50	60	70	80	90
50	12,231	11,989	11,747	11,501	11,251
60	12,215	11,968	11,719	11,464	11,201
70	12,199	11,951	11,691	11,431	11,151
80	12,185	11,927	11,664	11,389	11,099
90	12,171	11,909	11,636	11,353	11,055



Rys.3. Ilość wilgoci \dot{W} [kg/g] wykroplonej z powietrza sprężonego od początkowych parametrów ssania, tj. temperatury T_1 , wilgotności względnej φ_1 oraz ciśnienia $p_1 = 0,1$ MPa do ciśnienia $p_2 = 0,8$ MPa i oziębionego do temperatury $T_2 = 293,15$ K



Rys.4. Ilość wilgoci \dot{W} [kg/h] wykroplonej z powietrza sprężonego od początkowych warunków ssania, tj. ciśnienia $p_1 = 0,1 \text{ MPa}$, temperatury $T_1 = 293,15 \text{ K}$ i wilgotności względnej ϕ_1 do ciśnienia $p_2 = 0,8 \text{ MPa}$, a następnie oziębionego do temperatury T_2

4. WNIOSKI

Przytoczony sposób postępowania przy wyznaczaniu ilości wilgoci wydzielonej w postaci wody ze sprężonego powietrza może być wykorzystany przy aktualizacji Katalogu Sprężarek w części poświęconej Aparaturze Dodatkowej.

Wykresy zamieszczone w niniejszej pracy, zwłaszcza w układzie współrzędnych przedstawionym na rysunkach 1b, 2b, 3 i 4, mogą być wykorzystane w prospektach, kartach katalogowych i instrukcjach obsługi agregatów sprężarkowych, bowiem umożliwiają w sposób łatwy i wystarczająco dokładny wyznaczenie ilości wykroplonej wilgoci, a ponadto bez większych trudności można je uzupełnić, posługując się przytoczoną metodą analityczną, w przypadku gdy warunki pracy sprężarki wychodzą poza zakres przedstawiony na wykresie.

Rozważania stanowiące przedmiot niniejszej pracy mogą być przydatne projektantom i użytkownikom instalacji sprężonego powietrza jako pomoc przy wyborze odpowiedniego sposobu jego osuszania, a także doborze urządzeń oddzielających ciecz, jak również mogą być wykorzystane w procesie projektowania instalacji klimatyzacji samolotów, zwłaszcza z napędem turbodoładowym, bowiem powietrze dla zapewnienia właściwych warunków mikroklimatu w kabinie pobierane jest z za turbosprężarki silnika i podlega przemianom termodynamicznym, w trakcie których wykrapla się z niego wilgoć.

LITERATURA

- [1] Chlumský V.: Sprężarki tłokowe. PWT, Warszawa 1961
- [2] Druckluft Aufbereitung: Kältetrockner. ProspektfirmyAGRE-Kompressorenun Druckluftgäte Vertriebsgesellschaft m.b.H
- [3] Kołodziejczyk L., Rubik M.: Technika chłodnicza w klimatyzacji. Arkady, Warszawa 1969
- [4] Sprężarki do powietrza i gazów. Katalog branżowy Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego "WEMA", Warszawa 1983
- [5] Staniszewski B.: Termodynamika. PWN, Warszawa 1969

THE OUTDROPPING OF MOISTURE FROM AIR BY
PRESSURE CHANGES

Summary

The way of action by the calculation of quantity of the outdropping moisture from compressed air was discussed. It was pointed out, by the numerical example and graph, that is bounded with its, how this problem can be solved by adequate selecting of variables on axes of cartesian coordinates system with less cost of labour.

Eugeniusz Jarmocik

RÓWNOMIERNOŚĆ OPRYSKU W PRAKTYCE ROLNICZEJ

W części wstępnej pracy przedstawiono zasadnicze kierunki postępu technicznego w zakresie konstrukcji opryskiwaczy, zmierzające do poprawy efektów oprysku. Zasadniczą częścią pracy jest pomiar równomierności poprzecznej oprysku oraz ocena stanu technicznego opryskiwaczy przygotowanych do pracy przez rolników

Wykazano, że w aktualnej sytuacji polskiego rolnictwa, realnym i efektywnym sposobem uzyskania właściwych efektów oprysku jest: upowszechnianie pomiaru równomierności poprzecznej rozpylanej cieczy i poprawa obsługi opryskiwaczy

1. WSTĘP

W minionej dekadzie postęp techniczny w konstruowaniu opryskiwaczy był ukierunkowany na poprawę oprysku i ograniczenie skażeń środowiska. Szczegółowe rozwiązania techniczne można sprowadzić do czterech zasadniczych kierunków [1,4,5]:

- wprowadzenie oprysków małoobjętościowych,
- zwiększenie penetracji środków chemicznych w zwartym lamie,
- zwiększenie osiadania kropli na opryskiwanej plantacji,
- ograniczenie znoszenia kropli przez wiatr.

Kompleksowo i zadawalająco problemy te są rozwiązywane w opryskiwaczach typu Twin System (TS) np.: duńskiej firmy Hardi oraz izraelskiej Degania.

Z uwagi na wysoki koszt opryskiwaczy typu TS, nie należy oczekiwać ich szybkiego wdrożenia w polskim rolnictwie. Zatem należy poszukiwać możliwości poprawy efektów oprysku sprzętem jakim dysponuje krajowe rolnictwo.

Wzrostu skuteczności zabiegu i zmniejszenia skażeń środowiska przy założonej dawce cieczy, można oczekiwać na drodze upowszechnienia zasad prawidłowej eksploatacji opryskiwaczy [1,2,5].

Dotychczas w praktyce rolniczej nie funkcjonuje jakakolwiek ocena jakości oprysków przed rozpoczęciem pracy. Z analizy parametrów rozpylania cieczy [1.5] wynika, że w warunkach gospodarstwa rolnego, pomiar rozkładu poprzecz-

nego rozpylanej cieczy jest jedynym możliwym sposobem określania jakości oprysku. Jest to następna możliwość poprawy efektów oprysku, pod warunkiem wdrożenia do praktyki przenośnych stołów rynienkowych, niezbędnych do pomiaru poprzecznego rozkładu oprysku. Brak badań w zakresie równomierności oprysków bezpośrednio w gospodarstwie rolnym, nie stwarza podstaw do racjonalnej strategii w zakresie techniki ochrony roślin.

Celem pracy jest ocena równomierności oprysku wyrażona współczynnikiem zmienności η .

2. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

Do realizacji wyznaczonego celu przyjęto następujący program badań:

- a) pomiar wydatku jednostkowego rozpylaczy,
- b) pomiar rozkładu poprzecznego cieczy rozpylanej przez opryskiwacz,
- c) rejestr i analiza przyczyn nierównomierności rozkładu poprzecznego rozpylanej cieczy.

Realizacja programu badań była poprzedzona wykonaniem czynności obsługowych zalecanych przez producentów opryskiwaczy. Do badań wytypowano najczęściej spotykane w praktyce typy rozpylaczy, tj. wirowe KWP 015 oraz szczelinowe krajowej produkcji RS 02 (pomarańczowe) i firmy Teejet 03. Badania przeprowadzono na 60-ciu opryskiwaczach (20 x 3 typy rozpylaczy) przy ciśnieniu 0.5 MPa.

Pomiary wydatku jednostkowego poszczególnych rozpylaczy zamontowanych na belkach opryskiwaczy przeprowadzono za pomocą przepływomierza McKenziego. Jeżeli różnica pomiędzy wydatkiem jednostkowym poszczególnych rozpylaczy a ich wartością średnią nie przekraczała 7 %, to zgodnie z wymaganiami SMR [3] kwalifikowano je do dalszych badań.

Pomiary rozkładu poprzecznego rozpylanej cieczy wykonano na przenośnym stole rynienkowym firmy Lurmark. Czas oprysku wynosił 30 s, a liczba powtórzeń 3. Charakter rozkładu określano za pomocą wskaźnika nierównomierności poprzecznej η [1].

η jest współczynnikiem zmienności objętości cieczy zebranych z poszczególnych cylindrów miarowych stołu rowkowego, względem średniej arytmetycznej tych objętości i jest określony wzorem:

$$\eta = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (q_i - q_{sr})^2}}{q_{sr}} \times 100 \quad (\%)$$

gdzie:

- η - wskaźnik nierównomierności poprzecznej (%),
- n - liczba rowków pomiarowych,

- q_i - objętość cieczy z i-tego rowka pomiarowego (cm^3),
 q_{sr} - średnia arytmetyczna objętość cieczy z n rowków pomiarowych (cm^3).

Zatem η jest stosunkiem odchylenia standardowego danej wielkości do jej wartości średniej.

Pomiary rozkładu poprzecznego rozpylanej cieczy przeprowadzono na opryskiwaczach przygotowanych przez rolników, a następnie po wykonaniu dodatkowej obsługi przez prowadzących badania.

Szczegółowa analiza rozpylenia cieczy na belkach opryskiwacza pozwoliła na wyodrębnienie siedmiu podstawowych przyczyn mających wpływ na wartość wskaźnika η . Przyczyny te rejestrowano oddzielnie dla każdej grupy (typu) opryskiwaczy.

Badania przeprowadzono w trzydziestu miejscowościach woj. bydgoskiego i dziesięciu woj. kaliskiego w latach 1992-93.

3. WYNIKI POMIARÓW I OBSERWACJI ORAZ ICH ANALIZA

Skrócone wyniki pomiaru rozpylanej przez opryskiwacze ilustruje tab. 1, z której wynika, że najczęstszą przyczyną wartości η przekraczającej wymagania

Tabela 1

Wyniki pomiarów nierównomierności oprysku

Typ - odmiana rozpylaczy						Stwierdzona przyczyna nierównomierności oprysku
wirowe KWP 015		RS 02		Teejet 02		
Wartości wskaźnika η (od-do)						
przed dodatkową obsługą	po dodatkowej obsłudze	przed dodatkową obsługą	po dodatkowej obsłudze	przed dodatkową obsługą	po dodatkowej obsłudze	
13-38	9-31	12-33	7-18	11-16	8-13	
Liczba stwierdzonych przyczyn nierównomierności						7
1	2	3	4	5	6	
12	-	9	-	3	-	niedrożność rozpylaczy
8	-	6	-	-	-	nieszczelne złącza
7	-	4	-	-	-	przeszkody zakłócające oprysk
4	-	1	-	-	-	zużycie rozpylaczy
3	-	7	-	-	-	błędny montaż rozpylaczy

1	2	3	4	5	6	7
3	3	-	-	-	-	fabryczna wada rozpylaczy
2	-	2	-	-	-	niejednorodność rozpylaczy
-	-	1	1	-	-	skorodowanie belki
1	1	-	-	-	-	skręcenie belki
-	-	1	1	-	-	zużycie uniemożliwiające poziomowanie belki
Liczba opryskiwaczy spełniających wymagania SMR odnośnie wartości η w badanej populacji						-
5	16	8	18	17	20	-

SMR była niedrożność rozpylaczy (zaczopowanie rdzą, osadem lub brudem) krążka wytryskowego lub wirowego. Na kolejnych miejscach odnotowano: nieszczelne złącza, przeszkody zakłócające oprysk, zwisające przewody elastyczne i strzemiona ochronne rozpylaczy oraz błędy w montażu rozpylaczy. W przypadku rozpylaczy szczelinowych błęd w ich montażu polegał na dowolnym ustawieniu osi szczeliny względem belki polowej opryskiwacza. Natomiast w rozpylaczach wirowych stwierdzono przypadki odwrócenia krążka wytryskowego lub wirowego.

W trzech przypadkach odnotowano fabrycznie wadliwe komplety rozpylaczy KWP 015, w których różnica pomiędzy wydatkiem jednostkowym poszczególnych rozpylaczy a ich wartością średnią dochodziła do 20%, a więc znacznie przekraczała wartość określoną przez SMR.

Najbardziej występującą przyczyną nierównomierności oprysku była niejednorodność rozpylaczy zamontowanych na belce polowej np.: RS 02, KWP 015 i KWP 010.

W grupie rozpylaczy firmy Teejet uzyskano wartości wskaźnika η zgodne z wymaganiami SMR, co jest zasługą zarówno wysokiej jakości sprzętu, jak i poprawnej jego obsługi.

Uogólniając przyczyny powodujące nierównomierności oprysku można stwierdzić, że główne usterki techniczne koncentrują się na rozpylaczach i belce polowej. W tabeli 2 dokonano zestawienia usterek technicznych, co pozwala na ocenę stanu technicznego badanych zestawów. W tabeli 3 dokonano zestawienia opryskiwaczy wg liczebności usterek, z której wynika, że tylko 46,7% opryskiwaczy było bez usterek technicznych. Pozostałe opryskiwacze posiadały od jednej do ośmiu usterek technicznych

4. PODSUMOWANIE

Wyniki zawarte w tabeli 1-3 wskazują na istotne rozbieżności wartości wskaźnika η z wymaganiami SMR w tym zakresie. Przyczyną negatywnej oceny równomierności oprysku są usterki techniczne skoncentrowane na rozpylaczach i belce polowej.

Z badanej grupy sześćdziesięciu opryskiwaczy uznanych przez ich właścicieli za sprawne do zabiegu, tylko 28 było sprawnych technicznie. Przy czym po dokonaniu dodatkowej obsługi (usunięciu usterek - tab.2) sprawność techniczną uzyskało jeszcze 26 opryskiwaczy. Zatem 90 % opryskiwaczy z badanej populacji uzyskało sprawność techniczną (tab.1 - liczba opryskiwaczy spełniających wymagania SMR po dodatkowej obsłudze).

Tabela 2

Stan techniczny badanych zestawów

Lp.	Rodzaj usterki	Liczebność	%
1.	Stan rozpylaczy	4	6,7
1.1.	zużycie	12	20,0
1.2.	niedrożność	3	5,0
1.3.	fabryczna wada	3	5,0
1.4.	niewłaściwy montaż	2	3,3
1.5.	niejednorodność		
2.	Stan techniczny belki		
2.1.	nieszczelne złącza	8	13,3
2.2.	przeszkody zakłócające oprysk	7	11,3
2.3.	skręcenie belki	3	3,3
2.4.	zużycie uniemożliwiające poziomowanie	3	5,0
2.5.	skorodowanie belki	4	6,7
3.	Braki w wyposażeniu	5	8,3

Tabela 3

Usterki techniczne

Stan techniczny opryskiwaczy	Liczebność usterek						
	0	1	2	3	4	5	>5
Liczebność	28	10	7	5	4	4	2
%	46,7	16,7	11,7	8,3	6,7	6,7	3,3

Główną przyczyną wadliwego stanu technicznego opryskiwaczy była nieznanomość obsługi opryskiwaczy, jak i niedbałość w jej wykonaniu. W znacznie mniejszym stopniu wpływa na to zużycie techniczne opryskiwaczy (tab.2).

Wniosek końcowy: można znacząco poprawić efekty ochrony roślin poprzez poprawę równomierności oprysku sprzętem jakim dysponuje polskie rolnictwo. Nieodzownym warunkiem spełnienia tego zadania jest upowszechnienie stołów rynienkowych oraz podniesienie na wyższy poziom obsługi technicznej opryskiwaczy.

LITERATURA

- [1] Gajtkowski A.: Dobór parametrów pracy rozpylaczy i opryskiwaczy polowych. Rozprawy naukowe. Zeszyt 151. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, 1985
- [2] Jarmocik E., Wojciechowska M.: Technika i zasady chemicznej ochrony roślin. ODR Minikowo 1992
- [3] Opracowanie zbiorowe: System Maszyn Rolniczych i Leśnych, część V, Warszawa 1988
- [4] Opracowanie zbiorowe: Twin System. Hardi International, Taastrup, Denmark, 1991
- [5] Wargocki W.: Podstawowe elementy techniki opryskiwania. Ochrona roślin 3/87

THE UNIFORMITY OF SPRAYING IN PRACTICAL AGRICULTURE

Summary

In the leading part this article there were shown basic trends towards technical development in sprayer constructions, driving at improvement of spraying effects. The basic part of this study is concerned with the measurement of uniformity of transversal distribution of applied liquids and the analysis of technical condition of sprayers readied for work by farmers.

It was pointed that dissemination of measurement of uniformity of transversal distribution of applied liquids and sprayer service improvement are the real and effective methods of obtaining the proper spraying effects in present situation in Polish agriculture.

Bronisław Kłós
Eugeniusz Jarmocik

ANALIZA WSPÓŁPRACY POMPY PRÓŻNIOWEJ ZE ZBIORNIKIEM PRZEPIYWOWYM I REGULATOREM PODCIŚNIENIA

W części wstępnej pracy przedstawiono istotę prawidłowej współpracy pompy próżniowej VP - 76 z regulatorem podciśnienia.

W części obliczeniowej pracy wyprowadzono równanie pozwalające na określenie ciśnienia roboczego w zbiorniku oraz podano wzór na określenie wydajności pompy próżniowej odniesionej do warunków otoczenia.

Badania laboratoryjne przeprowadzono w oparciu o stosowną metodykę [3] na stanowisku pomiarowym (rys.1), którego zasadniczym zespołem jest: pompa próżniowa VP-76, regulator VV - 40 (regulator A) i regulator grzybkowo-suwakowy konstrukcji autorów (regulator B).

Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresu (rys.2). Analiza wyników z badania współpracy pompy próżniowej z dwoma regulatorami podciśnienia wykazała, że lepsze efekty uzyskano przy zastosowaniu regulatora B. Regulator A - jako nie spełniający wymagań ISO - powinien być zastąpiony regulatorem o doskonalszej konstrukcji, np. regulatorem B.

1. WSTĘP

Do wytworzenia podciśnienia w instalacjach udojowych służy zespół próżniowy złożony z pompy próżniowej, zbiornika przepływowego oraz regulatora podciśnienia. Stosowane obecnie w dojarkach pompy próżniowe są typu rotacyjnołopatkowego; wytwarzające podciśnienie pulsujące, którego wahania ulegają wytłumieniu w zbiorniku przepływowym.

Do normalnej pracy aparatów udojowych wymagane jest podciśnienie rzędu 50- 52 kPa. Pompa próżniowa może jednak wytworzyć znacznie większe podciśnienie; aby do tego nie dopuścić, należy zastosować odpowiedni regulator podciśnienia.

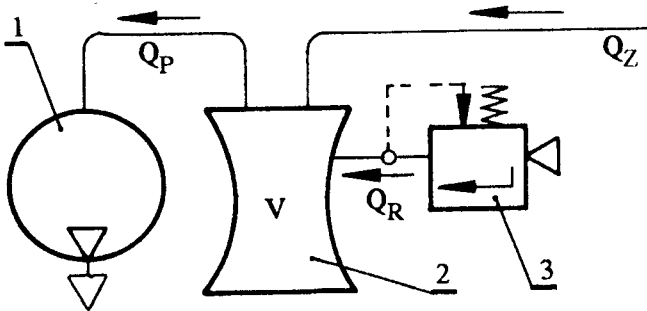
Prawidłowa współpraca pompy próżniowej z regulatorem podciśnienia istotnie wpływa na utrzymanie stabilnego podciśnienia w zbiorniku przepływowym.

Celem niniejszej pracy jest:

- a) teoretyczne określenie wartości ciśnienia roboczego w zależności od pojemności zbiornika oraz od dopływu i wypływu powietrza z instalacji,
- b) dobór regulatora podciśnienia z uwzględnieniem rezerwy wydajności pompy próżniowej.

2. WYZNACZENIE CIŚNIENIA ROBOCZEGO W ZBIORNIKU PRÓŻNIOWYM ORAZ OKREŚLENIE WYDAJNOŚCI POMPY

Dopływ powietrza do zbiornika próżniowego odbywa się poprzez aparaty udojowe, regulator podciśnienia i nieszczelności. Natomiast wypływ powietrza ze zbiornika zapewnia pompa próżniowa. Napływ powietrza poprzez nieszczelności jest niewielki i można go pominąć. Schemat zespołu próżniowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zespołu próżniowego: 1 - pompa próżniowa, 2 - zbiornik podciśnienia, 3 - regulator podciśnienia

Masę powietrza znajdującą się w zbiorniku próżniowym można określić na podstawie równania stanu gazu:

$$m = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} \quad (1)$$

gdzie:

- m - masa powietrza (kg),
- P - ciśnienie w zbiorniku (Pa),
- V - pojemność zbiornika (m³),
- R - indywidualna stała gazowa powietrza (J/kg*K),
- T - temperatura powietrza (K).

Zakładając, że pojemność instalacji próżniowej oraz temperatura nie ulegają zmianie ($V = \text{const}$, $T = \text{const}$), różniczkując wyrażenie (1), otrzymamy:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{V}{RT} \cdot \frac{dP}{dt} \quad (2)$$

Człon dm/dt stanowi prędkość zmian masy powietrza w instalacji próżniowej i równa się różnicy masowego natężenia przepływu powietrza dopływającego i odpływającego z instalacji, czyli

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_d - \dot{m}_w \quad (3)$$

Ilość powietrza dopływającego \dot{m}_d i odpływającego \dot{m}_w można wyrazić z następującej zależności [1]:

$$\dot{m}_w = \frac{P(Q_{tz} + Q_{tr})}{RT} \quad (4)$$

$$\dot{m}_w = \frac{P_p \cdot Q_{tp}}{RT} = r_p \cdot Q_{tp} \quad (5)$$

Podstawiając wyrażenia (4) i (5) do równania (3), a następnie do równania (2), otrzymamy

$$\frac{V}{R \cdot T} \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{P(Q_{tz} + Q_{tr})}{R \cdot T} - \frac{P_p \cdot Q_{tp}}{R \cdot T} \quad (6)$$

Po rozdzieleniu zmiennych będzie

$$dt = \frac{V \cdot dP}{P(Q_{tz} + Q_{tr}) - P_p \cdot Q_{tp}} \quad (7)$$

Po kolejnych przekształceniach otrzymamy

$$\int_0^t dt = \frac{V}{Q_{tz} + Q_{tr}} \int_{P_r}^{P_p} \frac{dP}{P - P_p \frac{Q_{tp}}{Q_{tz} + Q_{tr}}}$$

Po scałkowaniu otrzymamy wzór

$$t = \frac{V}{Q_{tp} + Q_{tr}} \cdot \ln \left| P - P_p \frac{Q_{tp}}{Q_{tz} + Q_{tr}} \right|_{P_r}^{P_p} \quad (8)$$

Stąd, po przekształceniach otrzymamy końcowy wzór na obliczanie ciśnienia roboczego w zbiorniku:

$$P_r = P_p \left[\frac{Q_{tp}}{Q_{tz} + Q_{tr}} + \left(1 - \frac{Q_{tp}}{Q_{tz} + Q_{tr}} \right) \cdot \exp \left(- \frac{Q_{tz} + Q_{tr}}{V} \cdot t \right) \right] \quad (9)$$

gdzie:

- P_r - ciśnienie robocze w zbiorniku (Pa),
- P_p - ciśnienie wytwarzane przez pompę próżniową (PA),
- Q_{tp} - wydajność pompy próżniowej przy ciśnieniu P_n (m^3/s),
- Q_{tz} - ilość powietrza w jednostce czasu, dopływająca do zbiornika przy ciśnieniu P_r (m^3/s),
- Q_{tr} - ilość powietrza w czasie, przepływająca przez regulator przy ciśnieniu P_r (m^3/s),
- t - czas, po upływie którego następuje stan ustalonej pracy pompy (s).

W stanach ustalonej pracy zawsze będzie spełniony warunek $Q_{tp} = Q_{tz} + Q_{tr}$ i wtedy, jak wynika ze wzoru (9), ciśnienie robocze P_r w zbiorniku będzie równe ciśnieniu P_p wytworzonemu przez pompę próżniową.

Natomiast w stanach przejściowych drugi człon równania (9) będzie dążył do zera, a po ustaleniu się nowego stanu - ciśnienia znów się wyrównają.

Wydajność pompy próżniowej powinna być odniesiona do warunków otoczenia. Zgodnie z zasadą zachowania masy powietrza możemy zapisać:

$$\dot{m}_w = r_p \cdot Q_{tp} = r_b \cdot Q_p \quad (10)$$

gdzie:

- Q_p - wydajność objętościowa pompy próżniowej przy ciśnieniu otoczenia P_b ,
- ρ_b - gęstość powietrza przy ciśnieniu P_b .

Zakładając, że proces rozprężania się powietrza w zbiorniku jest izotermiczny, z równania Boyle'a - Mariotta otrzymamy:

$$\frac{P_p}{\rho_p} = \frac{P_b}{\rho_b} \quad (11)$$

W praktyce częściej korzysta się z podciśnienia ze względu na prostszą konstrukcję przyrządów pomiarowych, służących do jego wyznaczania. Zatem ciśnienie absolutne P_p można wyrazić za pomocą podciśnienia w myśl relacji:

$$P_p = P_b - P_v \quad (12)$$

Podstawiając powyższe dane do równania (10), otrzymamy po kolejnych obliczeniach wzór na określenie wydajności pompy próżniowej, odniesionej do ciśnienia atmosferycznego

$$Q_p = \left(1 - \frac{P_v}{P_b}\right) \cdot Q_{tp} \quad (13)$$

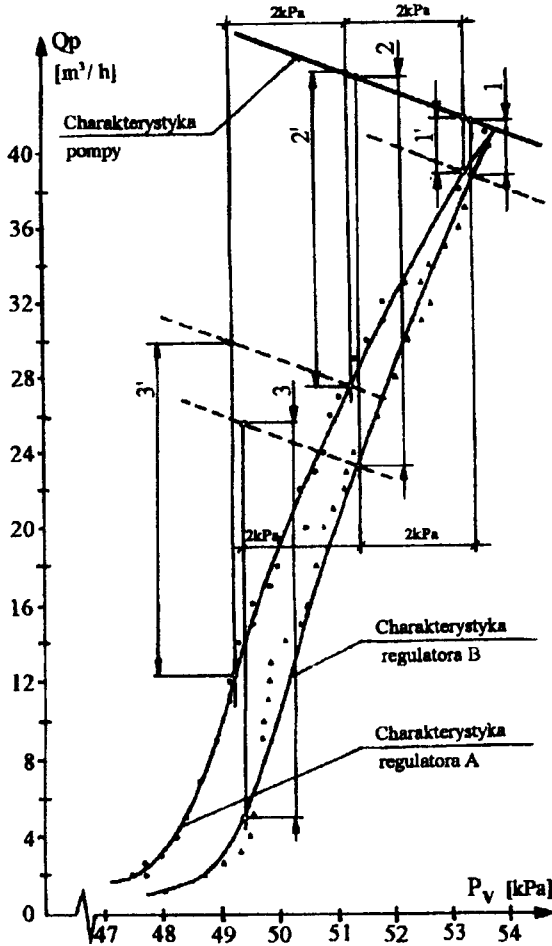
Z powyższego równania wynika, że im wyższe podciśnienie wytwarza pompa próżniowa, tym jej wydajność maleje. W granicznym przypadku, gdy $P_v = P_b$ wydajność pompy spada do zera. Natomiast przy podciśnieniu $P_v = 0$, wydajność pompy równa się wydajności teoretycznej (geometrycznej) [1].

3. DOBÓR REGULATORA PODCIŚNIENIA DO POMPY PRÓŻNIOWEJ

Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym w oparciu o uprzednio opracowaną metodykę [3]. Na stanowisku tym badano współpracę pompy próżniowej VP-76 z seryjnie produkowanym regulatorem VV-40 (regulator A) oraz regulatorem grzybkowo-suwakowym konstrukcji autorów (regulator B) [2]. Wyniki badań przedstawiono graficznie (rys.2). Analizę wyników przeprowadzono w oparciu o normę Międzynarodowego Standardu ISO [5].

Jak wynika z wykresu, przy współpracy pompy z regulatorem B, przy spadku podciśnienia o 2 kPa, ilość powietrza przepływającego przez rurociąg wynosi 21 m³/h. Ta ilość powietrza pokrywa jego zapotrzebowanie na 8 aparatów udojowych [4]. Natomiast przy współpracy tejże pompy z regulatorem A, przy spadku podciśnienia o 2 kPa, ilość powietrza przepływającego przez rurociąg spadła do 17 m³/h, co pokrywa zapotrzebowanie powietrza dla siedmiu aparatów udojowych. Aby można było w tym przypadku podłączyć wymagane 8 aparatów udojowych, to spadek podciśnienia musiałby wynieść 2,6 kPa, co nie jest zgodne z wymaganiami normy.

Rezerwa efektywna pompy przy współpracy z regulatorem B wynosi 21 m³/h, a przy współpracy z regulatorem A wynosi 18 m³/h. W obu przypad-



Rys.2. Wykres współpracy pompy próżniowej z regulatorami podciśnienia: 1 - charakterystyka regulatora A, 2 - charakterystyka regulatora B, 3 - charakterystyka pompy

kach przyjęto zasadę dwukrotnej rezerwy powietrza, co jest zgodne z wymaganiami normy [5].

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza współpracy pompy próżniowej z regulatorem podciśnienia z uwzględnieniem pojemności instalacji udojowej pozwala określić ciśnienie robocze, występujące w zbiorniku próżniowym.

Badania przeprowadzone na stanowisku pomiarowym wykazały, że lepszy efekt osiągnięto przy współpracy pompy z regulatorem B. Regulator A nie speł-

wymagań normy ISO i powinien być zastąpiony regulatorem o doskonalszej konstrukcji.

LITERATURA

- [1] Kłos B., Wietrzykowski W.: Badania nad wydajnością pomp próżniowych przeznaczonych do dożarek mechanicznych. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, CXXVIII, 1981
- [2] Kłos B., Kupczyk A.: Badania grzybkowo-suwakowego regulatora podciśnienia w dożarkach mechanicznych. Maszyny i Ciągniki Rolnicze, 10-11, 1986
- [3] Kłos B.: Badania suwakowo-szczelinowego zaworu przeznaczonego do regulacji podciśnienia w dożarkach mechanicznych. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, CLXVII, 1986
- [4] Kłos B.: Badania suwakowo-szczelinowego zaworu przeznaczonego do regulacji podciśnienia w dożarkach mechanicznych. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, CLXVII, 1986
- [5] Opracowanie zbiorowe: International Standard ISO 5707 Milking machine installations - konstruktion and performance 1983
- [6] Tuliszka E.: Termodynamika techniczna. PWN, Warszawa 1980

THE ANALYSIS OF THE COOPERATION BETWEEN THE VACUUM PUMP AND THE FLUX-TANK AND UNDERPRESSURE REGULATOR

Summary

In the introductory part of this article there was shown the essence of the correct cooperation between the vacuum pump and the underpressure regulator. The second part introduces to the equation which allows to calculate the work - pressure in the tank and shows the formula for calculation of the working capacity of the vacuum pump with reference to the surroundings.

The laboratory examinations were made with reference to the being in use methodics [3] on the measuring stand (fig. 1) composed of: vacuum pump VP - 76, regulator VV - 40 (regulator A) and poppet - slider regulator constructed by authors (regulator B).

The findings were shown in form of graph (fig. 2). The analysis of the results the cooperation between vacuum pump and two underpressure regulators proved that the better effects were obtained by using the regulator B. Regulator A as inadequate to ISO requirements should be replaced by regulator B.

Zdzisław Ławrynowicz

BADANIA STRUKTURY BAINITYCZNEJ W EKSPERYMENTALNEJ STALI 15HM2

W artykule przedstawiono wyniki badań struktury bainitycznej w eksperymentalnej stali 15 HM2. Obróbkę cieplną wykonano w oparciu o badania dylatometryczne i analizę termodynamiczną przemiany bainitycznej w tej stali. Wykonano metalograficzne i elektroniomikroskopowe badania strukturalne. Bainit o klasycznej morfologii listwowej w formie pakietów wystąpił jedynie po przemianie w niższych temperaturach zakresu bainitycznego po wcześniejszym austenityzowaniu w 1200°C. Stwierdzono, iż postęp przemiany bainitycznej, rozmieszczenie oraz morfologia austenitu szczątkowego, oraz morfologia ferrytu bainitycznego zależą od temperatury przemiany izotermicznej, jak i od temperatury austenityzowania.

1. WPROWADZENIE

Do chwili obecnej wiele istotnych kwestii dotyczących przemiany bainitycznej, takich jak mechanizm przemiany ferrytu bainitycznego oraz miejsce i źródła wydzielania węglików, pozostaje nadal kontrowersyjnych [1,13]. Prezentowana praca podejmuje próbę zbadania przemiany bainitycznej w laboratoryjnym wytopie niskostopowej stali chromowo-molibdenowej oraz ma na celu wyjaśnienie niektórych problemów związanych z mechanizmem tworzenia się bainitu.

Badany materiał zaliczyć można do grupy niskostopowych stali o wysokiej wytrzymałości (tzw. stale HSLA) i w stosunku do istniejącego w Polsce gatunku stali typu 10H2M charakteryzować się miał wyższymi własnościami wytrzymałościowymi podczas pracy w podwyższonych temperaturach. Stale z tej grupy posiadają szczególnie korzystną kombinację wysokiej wytrzymałości, ciągliwości oraz dobrej spawalności, które to własności warunkują szerokie zastosowanie w praktyce przemysłowej. Niska zawartość węgla zabezpiecza wysoką ciągliwość i dobrą sprawność stali, m.in. poprzez wyeliminowanie występowania składników strukturalnych zawierających węgliki o małej dyspersji (np. perlit).

Głównym celem prezentowanej pracy było zbadanie wpływu temperatury austenityzowania (zmieniającej ilość rozpuszczonych węglików w austenicie, a w związku z tym skład chemiczny austenitu) oraz temperatury przemiany izotermicznej na przemianę bainityczną. W stalach Fe-C-X, gdzie X jest pierwiastkiem silnie węglilotwórczym, podczas przemiany izotermicznej w tempe-

raturach powyżej zakresu temperatur odpowiadających tzw. „zatoce” na wykresie CTPi, tworzy się nieperlityczna forma cutektoidu zawierającego węgliki szeregowe i włókniste [4,6,19,20,24]. W przedstawionej pracy skupiono się na mechanizmie przemiany bainitycznej oraz na morfologii ferrytu bainitycznego i austenitu szczątkowego, uzyskanych po przemianie izotermicznej w znacznie niższych temperaturach, tzn. w temperaturach zakresu bainitycznego.

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Skład chemiczny badanej stali podano w tablicy 1. Skład chemiczny został tak dobrany, aby wyeliminować tworzenie się węglików żelaza w zakresie temperatur powyżej „zatoki”, gdzie możliwa jest dyfuzja pierwiastków substytucyjnych. Laboratoryjny wytop wykonano w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach. Wytopione wlewki przekuto na pręty o średnicy około 15 mm. Obróbkę izotermiczną wykonano poprzez zanurzanie austenitzowanych próbek w kąpeli cynowej pokrytej warstwą sproszkowanego węgla drzewnego. Po zakończeniu obróbki izotermicznej próbki dochładzano w wodzie.

Tablica 1

Skład chemiczny badanej stali (w % wag.)

Materiał	C	Si	Cr	Mn	Mo	V	Ti	P	S	Al
15HM2	0,14	0,23	0,88	0,73	2,4	-	-	0,021	0,017	0,03

Badania dylatometryczne wykonano w dylatometrze próżniowym firmy Leitz-Wetzlar na próbkach o długości 20 mm i średnicy 3,5 mm, których celem było określenie temperatur A_1 i A_3 (tablica 2). Dylatometr LK-02 Adamel Lhomargy umożliwiający realizację szybkich przebiegów nagrzewania i chłodzenia użyto do wyznaczania temperatur początku przemiany martenzytowej M_s (tablica 2). W celu uzyskania dużej prędkości chłodzenia (300 ks^{-1}) próbki miały długość 12 mm i średnicę 1,0 mm. Próbki austenitzowano w piecu dylatometrycznym w temperaturze 1000°C w czasie 10 min., po czym chłodzono je strumieniem sprężonego helu do temperatur przemiany izotermicznej lub do temperatury otoczenia.

Tablica 2

Temperatury krytyczne A_1 , A_3 , B_s i M_s

Materiał	Temperatura, $^\circ\text{C}$				Doświadczalne określone***		Termodynamicznie obliczone			
	A_{C_1}	A_{C_3}	A_{T_1}	A_{T_3}	M_s	B_s	M_s^*	B_s^*	M_s^{**}	B_s^{**}
15HM2	793	941	771	914	467	-	445	574	486	607

* Zakładając pełną austenitzację (1200°C) zapewniającą całkowite rozpuszczenie węglików w austenicie

** Zakładając częściowe rozpuszczenie węglików w austenicie (1000°C)

*** Po austenitzowaniu w $1000^\circ\text{C}/10 \text{ min.}$

W celu określenia zawartości austenitu szczątkowego po zakończonej obróbce izotermicznej wykorzystano ilościową rentgenowską analizę dyfrakcyjną. W tym celu próbki badano na dyfraktometrze rentgenowskim DRON-1,5, używając promieniowania $\text{CoK}\alpha$ filtrowanego żelazem. Dyfraktometr pracował przy napięciu 38 kV i prądzie żarzenia katody 10 mA. Zawartość austenitu szczątkowego obliczano z intensywności poszczególnych pików w tym celu zastosowano technikę separacji pików służącą oddzieleniu pików (111) γ od nakładającego się pików (111) α .

Badania elektromikroskopowe wykonano techniką cienkich folii. Cienkie folie poddawano pocienianiu elektrolitycznemu w temperaturze pokojowej w elektrolicie złożonym z: 25% gliceryna, 5% kwas nadchlorowy i 70% alkohol etylowy, stosując napięcie 55-60V. Badania przeprowadzono na mikroskopie elektro-nowym Tesla BS-540 przy napięciu przyspieszającym 120 kV.

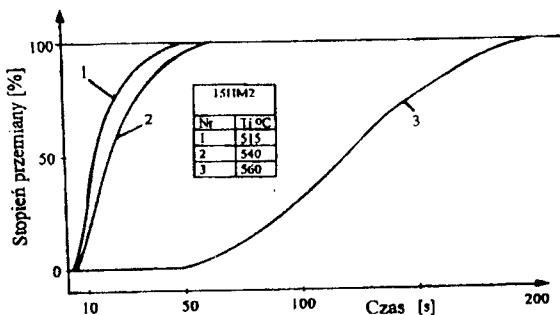
3. WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

W celu ułatwienia planowania warunków obróbki cieplnej wykonano, na podstawie zależności termodynamicznych, obliczenia pozwalające na sporządzenie wykresu CTP i badanej stali, której skład chemiczny zamieszczono w tablicy 1. Obliczenia wykonano, uwzględniając podane w tablicy 1 zawartości węgla, krzemu, manganu, niklu, molibdenu, wanadu i chromu w badanej stali, wykorzystując metody opracowane przez H. Bhadeshię [10,11]. Według opracowanych metod, zakłada się, iż wykres CTPi tworzą dwie oddzielne krzywe C, z których jedna reprezentuje początek dyfuzyjnej przemiany austenitu (w ferryt allotriomorficzny, eutektoid), a druga początek przemiany austenitu z suwliwą granicą międzyfazową (w ferryt Widmanstättena i baninit). Metoda ta była sprawdzana przez wiele ośrodków uniwersyteckich na dużej liczbie niskostopowych stali niskowęglowych, potwierdzając dużą, zgodność obliczonych krzywych CTPi z istniejącymi wykresami CTPi uzyskanymi doświadczalnie. Umożliwia ona jednoczesne wygenerowanie obszaru tzw. „zatoki” na wykresie CTPi oraz uwzględnia wzajemne przesunięcie krzywych C dla przemian zachodzących według różnych mechanizmów (mechanizmu ścinania i mechanizmu dyfuzyjnego), które są funkcją składu chemicznego stali.

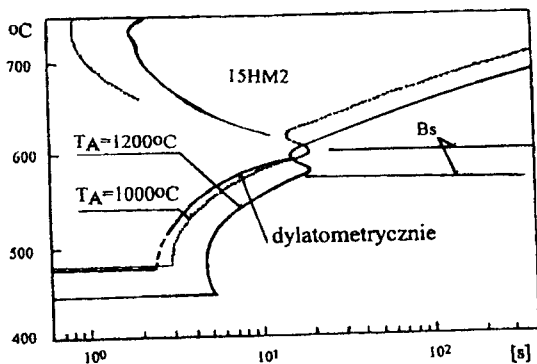
Temperatury początku tworzenia się ferrytu bainitycznego Bs oraz temperatury początku przemiany martenzytycznej Ms obliczono, korzystając również z tych samych metod. Temperatura początku przemiany bainitycznej Bs odpowiada dokładnie punktom, w których zarodkowanie ferrytu, którego dalszy wzrost zachodzi w sposób bezdyfuzyjny, staje się po raz pierwszy termodynamicznie możliwe [10,28]. Temperatury przemian fazowych zamieszczone zostały w tablicy 2.

Wyniki badań dylatometrycznych wykorzystane zostały do weryfikacji obliczeń termodynamicznych. Próbki dylatometryczne chłodzono do temperatur prze-

miany izotermicznej i wytrzymywano przez dostatecznie długi czas (do zatrzymania przemiany bainitycznej). Zmiany objętości związane z zachodzącą przemianą fazową były rejestrowane i dostarczały informacje o kinetyce przemiany. Wybrane przykłady krzywych dylatometrycznych pokazujących zmianę wydłużenia próbki w czasie przemiany izotermicznej w funkcji czasu przedstawiono na rysunku 1. Wykres CTPi przedstawiający krzywe początku przemiany izotermicznej wykonane na podstawie badań dylatometrycznych oraz obliczeń termodynamicznych przedstawiono na rysunku 2. Generalnie, przemiana zachodziła szybciej, gdy obniżana była temperatura izotermiczna tej przemiany. Ponadto, przemiana bainityczna zachodzi szybciej po austenitowaniu w niższej temperaturze, tj. 1000°C , ponieważ jest wiadome, iż szybkość przemiany bainitycznej wzrasta z obniżaniem zawartości węgla i składników stopowych rozpuszczonych w austenicie. Niższe wartości temperatur M_s i B_s po austenitowaniu w 1200°C również można wytłumaczyć wyższą zawartością węgla w austenicie w porównaniu z austenitowaniem w temperaturze 1000°C .



Rys. 1. Przykłady krzywych dylatometrycznych przedstawiających kinetykę przemiany bainitycznej w stali 15HM2 po austenitowaniu w $1000^{\circ}\text{C}/10$ min. Dla przemiany izotermicznej w każdej temperaturze zapewniono dość czasu, aby upewnić się, iż przemiana bainityczna została zakończona



Rys. 2. Obliczone na podstawie zależności termodynamicznych i określone doświadczalnie (dylatometrycznie) krzywe początku przemiany bainitycznej w stali 15HM2 po austenitowaniu w temperaturze 1000°C i 1200°C

Opierając się na badaniach dylatometrycznych oraz na wynikach analizy termodynamicznej, zaplanowano następujące warunki obróbki cieplnej stali 15HM2: dwie temperatury austenitzowania - 1000 i 1200°C/20 min. oraz dwie skrajne temperatury zakresu bainitycznego, tj. odpowiednio dla temperatur austenitzowania: 600 - 500°C i 550 - 450°C. Czyli ustalono, iż będzie prowadzona w temperaturze tuż powyżej temperatury M_s , celem uniknięcia tworzenia się martenzytu w czasie obróbki izotermicznej, i tuż poniżej temperatury „zatoki” badanej stali (temperatura „zatoki” lub T_b jest określona jako temperatura, w której okres inkubacji przemiany osiąga wartość maksymalną [1]). Temperatura austenitzowania 1200°C wymagana była do całkowitego rozpuszczenia węglików [5,26], natomiast 1000°C nieznacznie przekraczała temperaturę Ac_3 badanej stali.

Badania metalograficzne wykonano w celu określenia zmian ilościowych parametrów mikrostruktury, tj. określenia wielkości ziarna austenitu, wymiarów pakietów bainitycznych i obserwacji bloków nieprzemienionego austenitu w trakcie obróbki cieplnej. Parametry ilościowe mikrostruktury podano w tablicy 3. Próbki przeznaczone do pomiaru wielkości ziarna były wstępnie wyżarzone w temperaturze 600°C w czasie 1 h, szczególnie po austenitzowaniu w 1000°C, ponieważ granice ziarn były bardzo słabo widoczne.

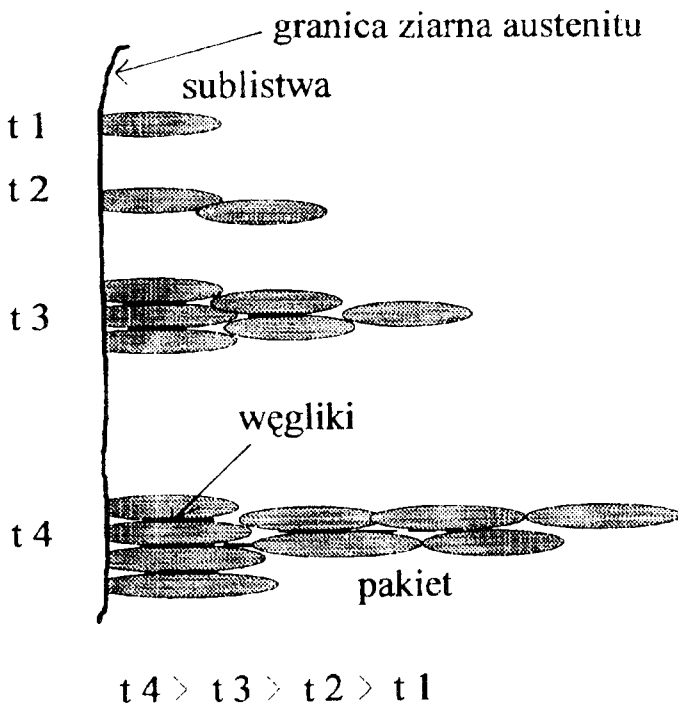
Tablica 3

Parametry mikrostrukturalne

Materiał	Temperatura austenitzowania 1200°C Temperatura izotermiczna 450°C			Temperatura austenitzowania 1000°C Temperatura izotermiczna 500°C		
	Średnia średnica ziarna austenitu [μm]	Długość pakietu [μm]	Szerokość pakietu [μm]	Średnia średnica ziarna austenitu [μm]	Długość pakietu [μm]	Szerokość pakietu [μm]
15HM2	75	64	36	30	22	15

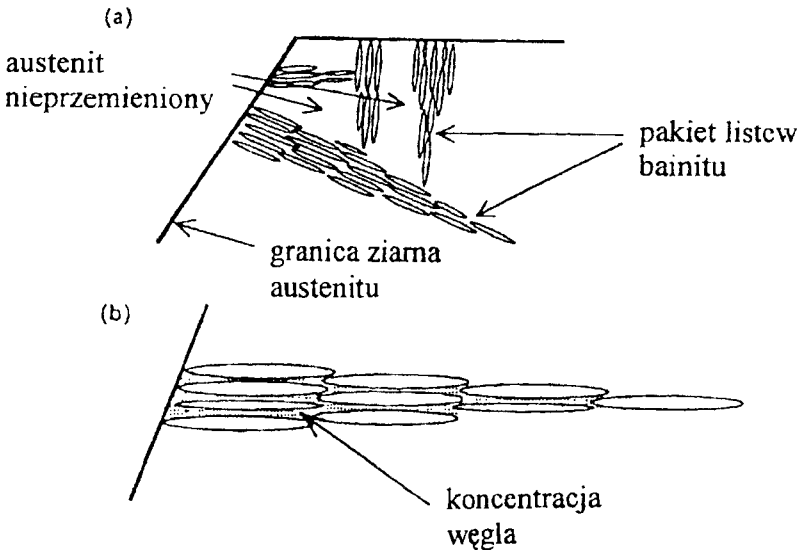
W celu ułatwienia analizy charakterystycznych struktur bainitycznych uzyskanych w badanej stali, które występują również w innych niskostopowych, niskowęglowych stalach konstrukcyjnych, przedstawiono poniżej w bardzo ograniczonym zakresie najistotniejsze, aktualnie akceptowane, cechy przemiany bainitycznej w tego typu stalach. Ta krótka charakterystyka pozwoli również wykluczyć ewentualne rozbieżności dotyczące używanej terminologii. Należy mieć świadomość, iż istnieje olbrzymia różnorodność postaci morfologicznych bainitu, na które mają wpływ warunki prowadzenia przemiany bainitycznej (warunki izo- i anizotermiczne), skład chemiczny stali, temperatura, w której zachodzi przemiana bainityczna itp. Można zaznaczyć, iż tylko w stosunku do jednego rodzaju bainitu, którym jest bainit nodularny [36], wielu badaczy używało różnych terminologii, np. bainit kolumnowy (blocky columnar bainite) [27], struktura wa-chlarzowa (fan structure) [32], bainit ziarnisty (granular bainite) [21] itp.

Powszechnie sądzi się, że przemiana zaczyna się zazwyczaj na powierzchni ziaren austenitu zarodkowaniem i wzrostem pojedynczych listew ferrytu. Przemieszczenia, które występują podczas wzrostu ferrytu, reprezentują zmianę kształtu, która jest odkształceniem z niezmienniczą płaszczyzną (invariant plane strain - IPS) [23]. Wzrost listew jest powstrzymywany przez spiętrzenia dyslokacji powstałe w wyniku plastycznej relaksacji odkształcenia z IPS [7,9] lub hamowany w wyniku tzw. efektu wleczenia, w przypadku jeśli przyjmujemy, iż wzrost bainitu zachodzi za pomocą tzw. stopni wzrostu, przemieszczających się na półkoherentnej granicy międzyfazowej austenit-ferryt [17,31,36,39]. Stąd, pomijając ocenę, który z mechanizmów ograniczających wzrost rzeczywiście operuje, listwy rosną do określonej wielkości, zazwyczaj mniejszej od wielkości ziarna austenitu. Dalsza przemiana zachodzi poprzez tworzenie się nowych, równoległych płytek w wiązkach zwanych jako pakiety (rysunek 3). Morfologia tych płytek nie przypomina typowych listew lub płytek ferrytu bainitycznego istniejącego w stalach o wyższej zawartości węgla, dlatego płytki te nazywane są jako sublistwy (substructural units-subunits) pakiet [14,18,29,30]. Poszczególne sublistwy w obrębie jednego pakietu, mogą być odseparowane od siebie wzdłuż większości ich powierzchni przez cienkie warstwy nieprzemienionego austenitu,



Rys.3. Schemat różnych etapów rozwoju mikrostruktury bainitycznej (doprowadzającej do utworzenia mikrostruktury bainitu górnego) w trakcie postępującej przemiany bainitycznej. Kolejne etapy zaznaczono za pomocą czasu wzrastającego od t1 do t4 [24]

szczególnie wtedy, gdy nie zachodzi wydzielenie węglików [13,16,30] (rysunek 4). Inna sytuacja występuje w przypadku dużych obszarów (bloków) austenitu, który może nieprzemieniony, gdy wzrost bainitycznych pakietów rosnących w różnych kierunkach jest wzajemnie blokowany. Rysunek 4 przedstawia omawiane dwa rodzaje nieprzemienionego austenitu. Stąd, maksymalny zakres postępu przemiany bainitycznej określony jest przez skład austenitu szczątkowego. Gdy austenit w czasie przemiany bainitycznej zostanie wzbogacony węglem do tego stopnia, że siła pędna przemiany osiągnie wartość zerową, wtedy przemiana ulegnie zatrzymaniu, chociaż znaczna część austenitu nieprzemienionego pozostaje w strukturze.



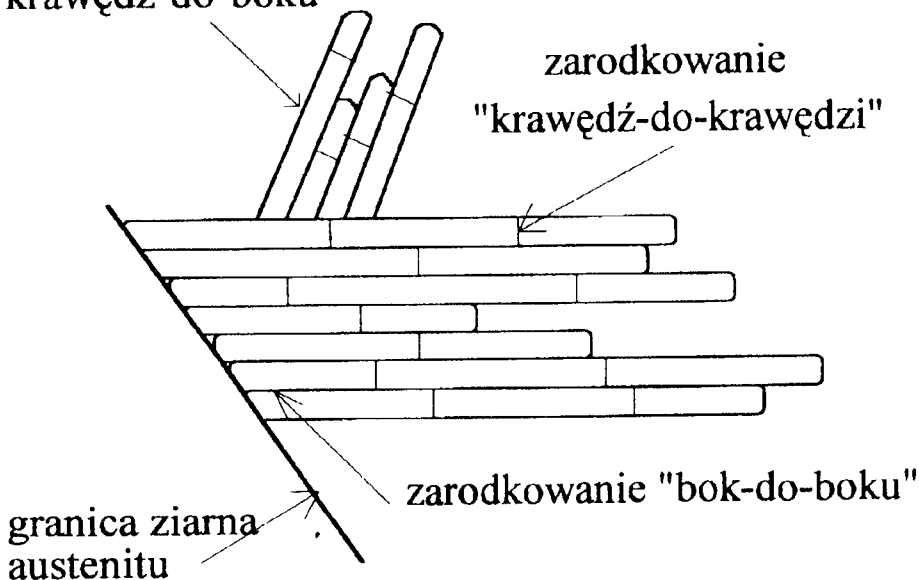
Rys.4 Umieszczenie austenitu nieprzemienionego w mikrostrukturze bainitycznej:
 a) obszary austenitu o morfologii blokowej występującego między pakietami bainitu,
 b) cienkie warstwy silnie wzbogaconego w węgiel austenitu między sublistwami ferrytu bainitycznego [2]

Przeważa pogląd, iż sublistwy rosną w sposób bezdyfuzyjny, lecz nadmiar węgla w ferrycie jest natomiast usuwany do austenitu szczątkowego [13,16]. Utrudnia to wzrost kolejnej sublistwy, gdyż zwiększa się wtedy stabilność austenitu nieprzemienionego spowodowana wzrostem w nim koncentracji węgla. Świadczy o tym, między innymi czas wymagany do wzrostu sublistwy, który jest stosunkowo krótki w porównaniu do czasu potrzebnego do zarodkowania kolejnych sublistew [2,12]. Wiadomo jest bowiem, iż prędkość wzrostu pojedynczych sublistew [13], jest znacznie większa od prędkości wzrostu pakietu [2,13]. Przedstawiono poniżej kinetykę, przemiany komplikuje jednak zjawisko wzajemnego blokowania się wielu różnych, jednocześnie rosnących pakietów oraz fakt

wydzielania węglików ze wzbogaconego w węgiel austenitu szczątkowego lub z przesyconego ferrytu, co ma miejsce w przypadku bainitu dolnego.

Wydaje się również właściwe, aby przedstawić mechanizm zarodkowania opierający w trakcie przemiany bainitycznej, gdyż ma on bezpośredni związek z morfologią tworzących się wtedy struktur, ułatwi to ponadto interpretację tych mikrostruktur (rysunek 5). Należy przypomnieć, że określenie wiązka (sheaf) zostało pierwotnie wykorzystane do opisu pakietu wydzielonych płytek, szczególnie ferrytu, utworzonego przez proces kolejnego „bok-do-boku” (face-to-face) sympathetic nucleation [15,36]. Pokazano to schematycznie na rysunku 5. Sympathetic nucleation zostało zdefiniowane jako zarodkowanie wydzielanego kryształu na granicy międzyfazowej innego wydzielonego kształtu tej samej fazy, gdy osnowa i wydzielenie różnią się w sposób ciągły składem chemicznym [36]. Linie narysowane w poprzek listew ferrytu na rysunku 5 wskazują na występowanie innej formy sympathetic nucleation, tzw. zarodkowanie „krawędź-do-krawędzi” (edge-to-edge) [15,36], które ma podstawowy udział we wzroście długości listew bainitu. Możliwa jest również trzecia forma sympathetic nucleation, tzw. zarodkowanie „krawędź-do-boku” (edge-to-face), które według wielu autorów dominuje w tworzącej się listwie bainitu dolnego [1,17,35,36], które umożliwia, między innymi powstawanie pakietów listew ferrytu bainitycznego o dużym kącie dezorientacji względem siebie.

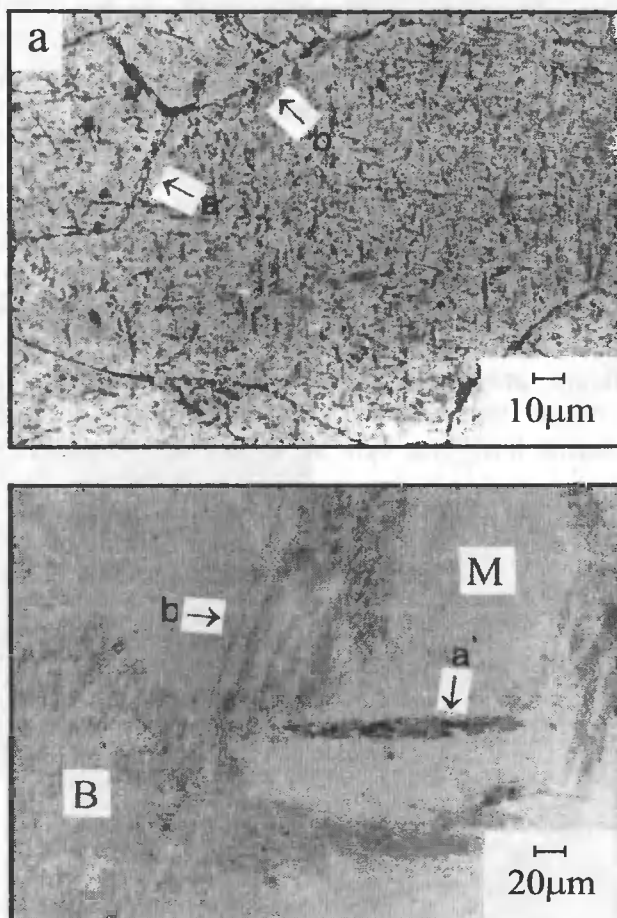
**nowy pakiet powstały
w wyniku zarodkowania
"krawędź-do-boku"**



Rys.5. Schemat pakietów bainitu górnego z zaznaczonym mechanizmem zarodkowania tzw. „sympathetic nucleation”[31]

W dalszej części artykułu, w miejsce określenia nucleation (które nie ma swojego odpowiednika w języku polskim), używane będą takie określenia, jak zarodkowanie „bok-do-boku”, zarodkowanie „krawędź-do-krawędzi” i zarodkowanie „krawędź-do-boku”. W przypadku niskowęglowych, niskostopowych stali konstrukcyjnych istotę budowy struktury bainitycznej znacznie lepiej charakteryzują schematy przedstawione na rysunkach 3 i 4, aniżeli schemat na rysunku 5.

Fotografie mikrostruktury po austenitowaniu w temperaturze 1200°C i przemianie izotermicznej w 550°C przedstawiono na rysunku 6. Na prezentowanych fotografiach mikrostruktur (rys.6a,b) można zauważyć, iż przemiana bainityczna nie doszła do końca i widoczne są obszary austenitu, który uległ przemianie na martenzyt w wyniku późniejszego dochładzania w wodzie z temperatury przemiany izotermicznej do temperatury otoczenia.



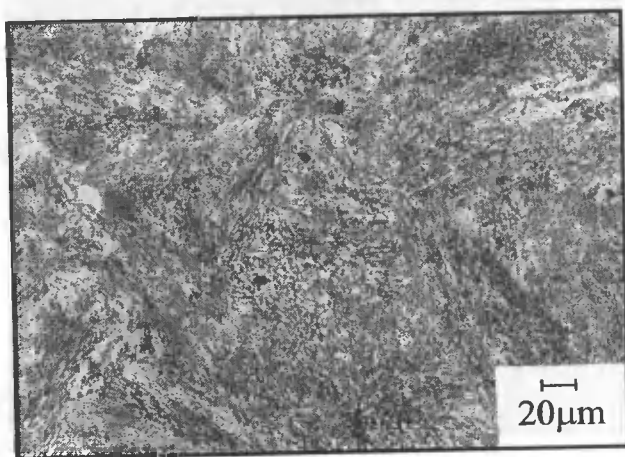
Rys.6. Mikrofotografia przedstawiająca strukturę bainityczną w stali 15HM2 po austenitowaniu w temperaturze 1200°C i przemianie izotermicznej w 550°C:
a) w czasie 2h, b) w czasie 3h

Widoczne jest również, iż przemiana rozpoczyna się od granic ziaren austenitu, w wyniku zarodkowania ferrytu allotriomorficznego (rys.6a miejsce oznaczone jako a) oraz sublistew bainitu (rys.6a miejsce oznaczone jako b). Granice ziaren austenitu nie są jednak jedynymi miejscami zarodkowania bainitu. Jak widać na mikrofotografii, na której uchwycono początkowy etap przemiany bainitycznej, zarodkowanie sublistew bainitu zachodzi również we wnętrzu austenitu, gdzie zaobserwować można istnienie drobnych sublistew ferrytu bainitycznego. W niektórych miejscach utworzyły one szeregi, co jest konsekwencją mechanizmu zarodkowania „krawędź-do-krawędzi”.

Na rysunku 6b (pozycja a) przedstawiono, przy większym powiększeniu, pojedynczą wiązkę (sheaf) bainitu rosnącą według mechanizmu „krawędź-do-krawędzi” oraz początkowy etap formowania się pakietu złożonego z wielu wiązek (pozycja b), na którego morfologię wpływa również mechanizm zarodkowania „bok-do-boku”. Na początku przemiany rozmieszczenie sublistew ferrytu bainitycznego w ziarnie austenitu jest bardzo nierównomierne. Niektóre obszary przygraniczne austenitu są całkowicie przemienione, podczas gdy inne nie zawierają wcale lub bardzo mało ferrytu bainitycznego (rys.6b).

Należy zaznaczyć, iż najwyższej temperaturze przemiany izotermicznej, po zakończeniu przemiany bainitycznej, trudno jest wyodrębnić typowy pakiet bainitu, gdyż struktura ta jest bardzo nieregularna i zaliczyć ją należałoby bardziej do struktury bainitu ziarnistego. Na tego typu morfologię ferrytu bainitycznego często używa się również określenia jako zdegenerowany ferryt Widmanstättena [1,17,31,36,39]. Natomiast efektu tego nie obserwuje się w stalach węglowych.

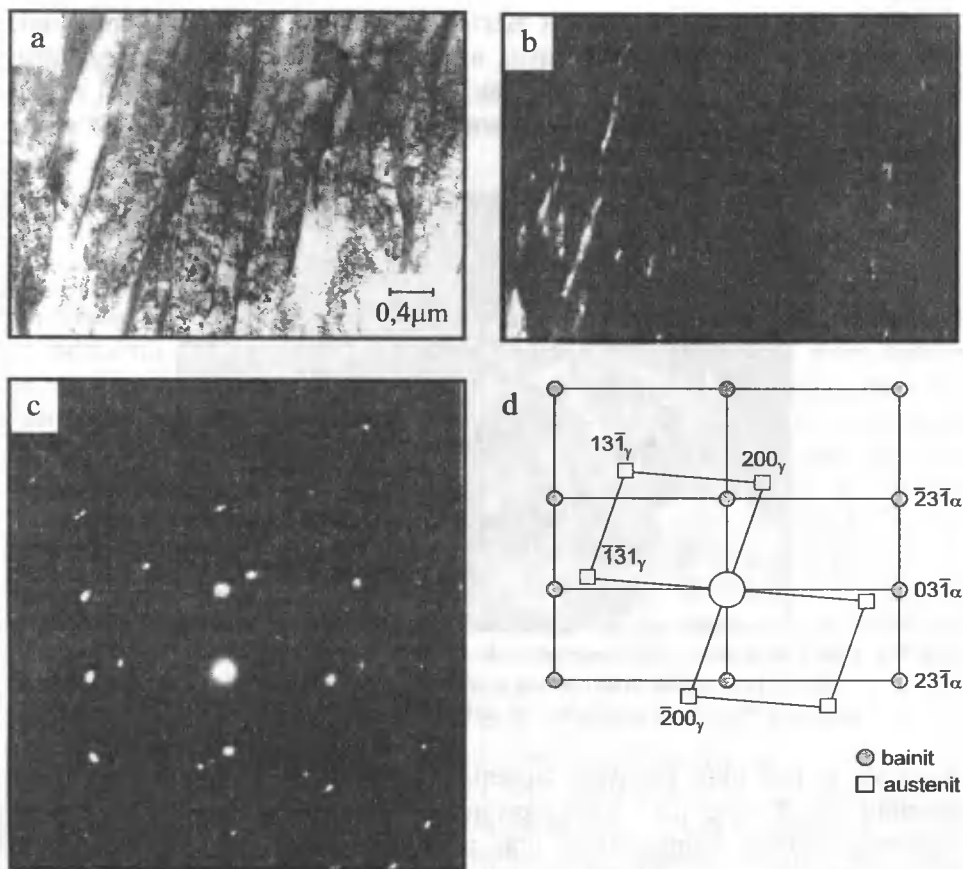
Obniżenie temperatury przemiany izotermicznej do 450°C prowadziło do powstania struktury przypominającej bardziej strukturę bainitu listwowego (rys.7). Listwy ferrytu bainitycznego przyjmowały kształt bardziej wydłużony i regularny. Znacznie łatwiejsze było wyodrębnienie poszczególnych pakietów



Rys.7. Mikrostruktura stali 15HM2 po austenityzowaniu w temperaturze 1200°C i przemianie izotermicznej w 450°C w czasie 1 min.

w tej strukturze. Zjawisko to jest przez wielu autorów określane jako zanik struktury zdegenerowanego ferrytu Widmanstättena w wyniku obniżania temperatury przemiany bainitycznej, które obserwuje się w stalach niskowęglowych z dodatkiem silnie węglilotwórczych pierwiastków, szczególnie molibdenu [17, 31, 39].

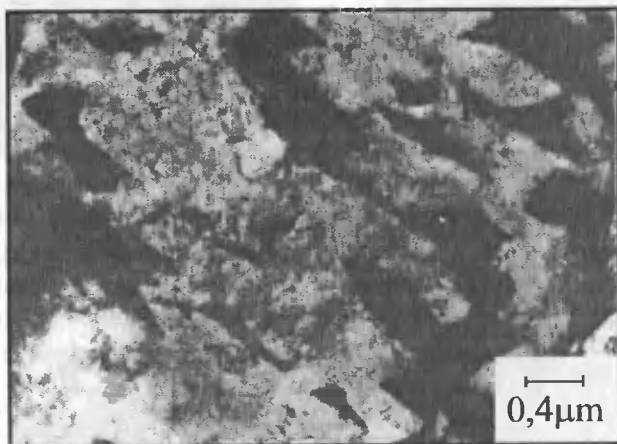
Po przemianie izotermicznej w najniższej temperaturze zakresu bainitycznego (450°C), austenit szczątkowy występował głównie w postaci cienkich warstw pomiędzy listwami ferrytu bainitycznego (rys. 8).



Rys. 8. Mikrostruktura widoczna na cienkiej folii stali 15HM2 po austenityzowaniu w temperaturze 1200°C i przemianie izotermicznej w 450°C w czasie 60s.; a) obraz w jasnym polu, b) obraz w ciemnym polu z wykorzystaniem refleksu od austenitu (220) γ , c) dyfrakcja, d) rozwiązanie dyfrakcji

Badania elektronmikroskopowe nie ujawniły obecności węglików w tej strukturze. Zatem, w wyniku obniżenia temperatury przemiany izotermicznej z 550 do 450°C zachodziła zasadnicza zmiana struktury, od bainitu górnego (ziarnistego) do struktury bainitu górnego listwowego. Takie określenie otrzymanej struktury jest słuszne, gdy przyjmie się, iż bainit górny w badanej stali jest strukturą złożoną z pozbawionych wydzielań węglikowych listew ferrytu bainitycznego, rozdzielonych cienką warstwą austenitu szczątkowego, który zastępuje międzylistwowe wydzielenia cementytu, co ma miejsce w klasycznych mikrostrukturach bainitu górnego [8,25,37]. Ponadto w badanej stali międzylistwowe warstwy austenitu szczątkowego były bardzo stabilne i nie zaobserwowano ich przemiany na martenzyt.

W wyniku austenitizowania w niższej temperaturze (1000°C), i przemianie izotermicznej w zakresie bainitycznym, uzyskano strukturę bardzo nieregularną, lecz względem na temperaturę przemiany bainitycznej. Ilustracją tego jest mikrografia struktury po przemianie izotermicznej w temperaturze 500°C w czasie 2 min. przedstawiono na rysunku 9.



Rys.9. Obraz w jasnym polu struktury stali 15HM2 po austenitizowaniu w temperaturze 1000°C i przemianie izotermicznej w 500°C w czasie 120s. Obszary ciemne widoczne na mikrografii są austenitem szczątkowym o morfologii blokowej (wysypowej)

Widoczne są tam bloki (wysypy) austenitu szczątkowego, tego typu morfologia austenitu jest dominująca. Zdecydowanie brak jest tutaj struktury typowego listwowego ferrytu bainitycznego oraz międzylistwowych wydzielań austenitu nieprzemienionego. Nie stwierdzono również występowania wydzielań węglikowych w bainicie po austenitizowaniu w temperaturze 1000°C.

Prezentowanie badania mają bezpośrednie praktyczne znaczenie, gdyż w przypadku wystąpienia międzylistwowych wydzielań węglików, pojawia się silny wzrost kruchości stali [33]. Potwierdzają to badania w innych stalach HSLA, gdzie fakt występowania międzylistwowych wydzielań cementytu, związany był z gwałtowną zmianą ciągliwości tych stali [38].

W badanej stali zaobserwować można ogólną tendencję do rozdrobnienia struktury w wyniku obniżenia temperatury austenitowania i temperatury przemiany izotermicznej. Wielkość pakietu listew bainitu po austenitowaniu w wyższej temperaturze ma ścisły związek z wielkością ziarna austenitu (tablica 3). Ponadto temperatura przemiany izotermicznej wpływa na morfologię bainitu nie mniej istotnie. Poprzemianie bainitycznej w górnym przedziale temperatur zakresu bainitycznego, austenit szczątkowy posiada blokową, nieregularną budowę (rysunki 6,9). Stwierdzono, iż zawartość objętościowa austenitu szczątkowego zmniejsza się, wraz z obniżeniem temperatury przemiany izotermicznej (tablica 4).

Tablica 4

Procentowa zawartość objętościowa austenitu szczątkowego po austenitowaniu w temperaturze 1200°C

Temperatura izotermiczna, °C	stal 15HM2
500	7,6
450	6,2

W czasie obniżenia temperatury przemiany izotermicznej, austenit szczątkowy o morfologii blokowej występującej w bainicie, zastępowany był przez austenit o morfologii cienkich pasm, rozdzielających listwami ferrytu bainitycznego. Sądzi się, iż te cienkie pasma austenitu szczątkowego, z powodu umiejscowienia w bezpośrednim sąsiedztwie listew ferrytu, zawierają wyższą koncentrację węgla od zawartości węgla występującej w austenicie blokowym i fakt ten utrudnia przemianę cienkich warstw austenitu szczątkowego na martenzyt [22,34]. Z tego powodu, wzrost zawartości objętościowej austenitu szczątkowego występujący jednocześnie ze wzrostem temperatury przemiany izotermicznej, prowadzi w efekcie do powstania większej objętościowej ilości austenitu, ale zawierającego niższą koncentrację węgla. Zawartość objętościowa austenitu szczątkowego w bainicie uzyskanym po austenitowaniu w temperaturze 1000°C była niemożliwa do określenia z powodu jego niskiej zawartości, będącej poniżej poziomu rozdzielczości zastosowanego dyfraktometru rentgenowskiego.

Zatem zawartość, rozmieszczenie i morfologia austenitu szczątkowego oraz morfologia ferrytu bainitycznego, zmienia się wraz ze zmianą temperatury austenitowania i temperatury przemiany izotermicznej. Cienkie i ciągłe warstewki austenitu szczątkowego występującego między listwami ferrytu, mają, jak się oczekuje, hamujący wpływ na rozprzestrzenianie się pęknięć [40]. Austenit szczątkowy o morfologii blokowej ma tendencję do przemiany na wysokowęglowy nieodpuszczony martenzyt pod wpływem zewnętrznych niewielkich naprężeń, co w konsekwencji prowadzi do dużej kruchości [3].

4. PODSUMOWANIE

Proces przemiany bainitycznej w stali 15HM2 badany był za pomocą transmisyjnej mikroskopii elektronowej, metod dylatometrycznych i rentgenowskich oraz z wykorzystaniem analizy termodynamicznej przemiany bainitycznej. Zastosowano dwie temperatury austenitowania tj. 1200°C, powodującą austenitację stali oraz 1000°C, w której w austenicie pozostawały nierozpuszczone węgliki stopowe.

Badania elektronomikroskopowe wykazały, że po zakończonej przemianie izotermicznej, struktura materiału była mieszaniną ferrytu bainitycznego oraz austenitu szczątkowego. Po austenitowaniu w temperaturze 1200°C i przemianie izotermicznej w najniższej temperaturze (450°C) bainit posiadał morfologię klasycznych pakietów. W miarę wzrostu temperatury przemiany izotermicznej morfologia ferrytu bainitycznego stawała się bardziej nieregularna i przypominała morfologię bainitu ziarnistego. Po austenitowaniu w 1000°C otrzymywano, bez względu na temperaturę przemiany bainitycznej, strukturę bainityczną bardzo nieregularną, podobną do bainitu ziarnistego.

LITERATURA

- [1] Aaronson H.I. et al: Metall. Trans. A, vol.21A, 1990, s.1343.
- [2] Ali A., Bhadeshia H.K.D.H.: Sci. and Technol., vol.5, 1989, s.398
- [3] Babu S.S.: Mat. Sci. and Technol., vol.6, 1990, s.1005
- [4] Barbacki A., Honeycombe R.W.K.: Metallography, vol.9, 1976, s. 277
- [5] Batte A.D., Honeycombe R.W.K.: Met. Sci. J., vol.7, 1973, s.160
- [6] Berry F.G., Honeycombe R.W.K.: Metall. Trans., vol.1, 1970, s.3279
- [7] Bhadeshia H.K.D.H., Edmonds D.V.: Metall. Trans. A, vol. 10A, 1979, s.895
- [8] Bhadeshia H.K.D.H.: Acta Metall., vol.28, 1980, s.1103
- [9] Ibidem, s.1265
- [10] Bhadeshia H.K.D.H.: Acta Metall., vol.29, 1981, s.1117
- [11] Bhadeshia H.K.D.H.: Met. Sci., vol.16, 1982, s.159
- [12] Bhadeshia H.K.D.H.: Phase transformations in ferrous alloys, (ed.A.R.Marder and J.I.Goldstein), 1984, s. 335-3440, Warrendle, PA TMS-AIME
- [13] Bhadeshia H.K.D.H., Christian J.W.: Metall. Trans. A, vol.21A, 1990, s.767
- [14] Bhadeshia H.K.D.H. et al: Mater. Sci. and Technol., vol.7, 1991, s.686
- [15] Chawala Y.K., Brooks C.R.: Metallography, vol.19, 1986, s.421
- [16] Christian J.W., Edmonds D.V.: Phase transformations in ferrous alloys, (ed.A.R. Marder and J.I. Goldstein) 1984 s. 293-327, Warrendale, PA, TMS-AIME
- [17] Goldenstein H., Aaronson; Metall. Trans. A, vol.21A, 1990s, s.1465
- [18] Hehemann R.F.: Phase transformation, 1970, s.397-432, Metals Park, OH, ASM
- [19] Honeycombe R.W.K.: Metall. Trans.A, vol.7A, 1976, s.915

- [20] Honeycombe R.W.K.: *Met. Sci.*, vol.14, 1980, s.201
- [21] Jolivet H.: *J.Iron Steel Inst.*, vol. 140, 1939, s.95
- [22] Khan et al.: *Mat. Sci. and Eng.*, vol.A129, 1990, s.257
- [23] Ko T., Cottell S.A.: *J.Iron.*, vol. 172, 1952, s.307
- [24] Ławrynowicz Z., Barbacki A.: *Arch. Nauki o Mat.*, t.8, 1987, s.205
- [25] Miihkinen V.T.T., Edmonds D.V.: *Mat. Sci. and Technol.*, vol. 3, 1987, s.422
- [26] Mishima Y. et al.: *Metall. Trans.A*, vol.11A, 1980, s.431
- [27] Nilan T.G.: *Transformation and Hardenability in Steels*, Climax Molybdenum Co., Ann Arbor, MI, 1967, s.57
- [28] Olson G.B., Cohen M.: *Metall. Trans.A*, vol.7A, 1976, s.1915
- [29] Rees G.I., Bahadreshia H.K.D.H.: *Mater. Sci. and Technol.*, vol.8, 1992, s.985
- [30] *Ibidem.* s.994
- [31] Reynolds W.T. et al.: *Metall. Trans. A*, vol.21A, 1990, s.1433
- [32] Robertson J.M.: *J. Iron Steel Inst.*, vol. 119, 1929, s.391
- [33] Sandvik B.P.J.: *Metall. Trans. A*, vol. 13 A, 1982, s.789
- [34] Self P. et al.: *Ultramicroscopy*, vol.6, 1981, s.29
- [35] Spanos G., Fang H.S., Aaronson H.I.: *Metall. Trans. A*, vol.21A, 1990, s.1381
- [36] *Ibidem.* s. 1391
- [37] Takahashi M. et al.: *Mat. Sci. and Technol.*, vol. 6, 1990, s.592
- [38] Thomas G.: *Metall. Trans.A*, vol.9A, 1978, s.439
- [39] Tsubakino H., Aaronson H.I.: *Metall. Trans.A*, vol. 18A, 1987, s.2047
- [40] Yang J.R. et al.: *Mat. Sci. and Eng.*, vol.A131, 1991, s.99

INVESTIGATIONS OF BAINITIC STRUCTURE IN AN EXPERIMENTAL 15HM2 STEEL

Summary

This paper presents investigations of bainitic structure in an experimental 15HM2 steel. Heat treatment was planned on the basis of dilatometric analysis and thermodynamic calculations taking into account chemical composition of the investigated steel. Microstructure was investigated using optical metallography and TEM method. After austenitization at 1200°C followed by bainitic reaction in lower temperatures of isothermal transformations, the bainite was in the form of classical sheaves. The development of bainitic transformation, the amount, distribution and morphology of retained austenite and morphology of bainite ferrite strongly depend on both; prior austenitization and isothermal transformation temperatures within the bainitic range.

Zbigniew Dąbek

DYSKUSYJNE UWAGI O BŁĘDACH, NIEDOKŁADNOŚCI I NIEPEWNOŚCI POMIARÓW

W artykule przedstawione zostały uwagi i sugestie autora związane z definicjami i sposobem obliczania błędów, niedokładności i niepewności pomiarów w konfrontacji ze sformułowaniami zawartymi w Polskiej Normie PN-71/N-02050. Należy podkreślić, że artykuł nie jest krytyką wspomnianej normy (która zdaniem autora, jest jedną z lepiej opracowanych norm tego rodzaju), lecz próbą jej uzupełnienia w obszarze dotyczącym wspomnianych pojęć.

Polska Norma PN-71/N-02050 definiuje niedokładność pomiaru podając, że jest to "niedokładność wyrażona przez zespół błędów granicznych, zawierający wszystkie błędy systematyczne oraz graniczne błędy przypadkowe". Wyjaśnia jednocześnie, że "Jeżeli wszystkie błędy systematyczne zostały wyeliminowane, niedokładność staje się równa niepewności pomiaru."

Wyeliminowanie wszystkich błędów systematycznych jest przypadkiem czysto teoretycznym. Niezmiernie rzadko udaje się wyeliminować jakiś błąd systematyczny. Wynika to zarówno z dużej złożoności, jak i współzależności zjawisk. Nawet jeśli błędy systematyczne są wyraźnie widoczne, to na ogół trudno je oszacować ilościowo. Ta trudność powoduje, iż często rezygnuje się z tych poprawek i traktuje wszystkie błędy jako przypadkowe. Ma to jednak swoje konsekwencje. Rozkład prawdopodobieństwa wielkości mierzonej, traktowanej jako zmienna losowa, odbiega zwykle znacznie od rozkładu normalnego. I tu jest dodatkowe źródło błędów, nieporozumień i mylnych interpretacji. Należy pamiętać, że rozkład normalny został wyprowadzony w oparciu o "błędy matematyczne", które są matematycznie przypadkowe. Zarówno historyczny model Laplace'a, jak i model Herschela zakładają symetrię i niezależność. "Jednakże rozkład normalny błędów pomiarowych nie jest "absolutnym" prawem natury. Przyczyny błędów pomiarowych są bardzo skomplikowane, szczególnie jeśli brać pod uwagę wszystkie możliwe zakłócenia doświadczenia. Symetria i niezależność nie zawsze mogą być spełnione;...¹⁾" - więc w zasadzie powinno się mówić o niepewności pomiaru, a nie o jego niedokładności.

¹⁾ Brandt S.: Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych, PWN Warszawa 1974, s.66.

Wspomniana norma definiuje niepewność pomiaru jako "rozrzut wyników pomiaru wyznaczony przez błędy graniczne", nic precyzując co to są błędy graniczne w ogóle. Zdefiniowane są jedynie błędy graniczne pojedynczego pomiaru w danej serii: błędy krańcowe (dodatnie i ujemne), dla których prawdopodobieństwo P , że będą większe od błędu któregośkolwiek pomiaru w danej serii, ma taką wartość, iż różnicę $1-P$ można uważać za znikomą.²⁾ Wynika stąd, że definicja błędu krańcowego pojedynczego pomiaru ma charakter probabilistyczny i to jest słuszne. Norma wyjaśnia, że "Błędy graniczne pojedynczego pomiaru wyznacza się na ogół jako iloczyn odchylenia średniego kwadratowego s jednego pomiaru w danej serii i liczby t (całkowitej lub ułamkowej): $e_1 = +ts$ i $e_2 = -ts$, gdzie s oblicza się według 9.13³⁾, zaś "liczba t jest ustalona jako funkcja przyjętego prawdopodobieństwa P nieprzekroczenia wartości e_1 albo e_2 ."⁴⁾

Dodatkowo wspomniana norma wyjaśnia, że "W powyższej definicji błędów granicznych przyjęto, że w zasadzie błędy systematyczne zostały wyeliminowane, mimo to jednak pozostają pewne ich resztki."⁵⁾

Całe to rozumowanie jest teoretycznie poprawne przy założeniu, że rozkłady błędów są normalne, co - jak wynika z poczynionych już uwag wstępnych - jest dyskusyjne.

O ile jednak, z pewną dozą nieufności, można przyjąć, że błędy, niejednorodność i niepewność pomiarów w odniesieniu do pojedynczego pomiaru bezpośredniego zostały zdefiniowane, to w odniesieniu do pomiarów pośrednich nie jest to tak jednoznacznie określone, co dopuszcza możliwość mylnych interpretacji.

Norma podaje, że jeśli "Wielkość Y , mierzona pośrednio, jest związana z niezależnymi wielkościami składowymi X_1, \dots, X_m (mierzonymi bezpośrednio) równaniem:

$$Y = F(X_1, \dots, X_m) \quad (1)$$

Błąd systematyczny ΔY wartości wielkości Y wyraża się (przeważnie w przybliżeniu) następującym prawem sumowania się błędów w postaci równania:

$$DY = \frac{\partial F}{\partial X_1} DX_1 + \dots + \frac{\partial F}{\partial X_m} DX_m \quad (2)$$

gdzie $\Delta X_1, \dots, \Delta X_m$ przedstawiają błędy systematyczne pomiaru bezpośredniego X_1, \dots, X_m .⁶⁾

2) PN-71/N-02050, s.21.

3) Odchylenie średnie kwadratowe - PN-71/N-02050, s.21.

4) Tamże, s.21.

5) Tamże, s.22.

6) Tamże, s.20.

Istnieją wprawdzie metody obliczeniowe (opublikowane np. w [7]), przy pomocy których można wartość Y obliczyć dokładniej niż przy pomocy wzoru (2), który z założenia jest wzorem przybliżonym, ale nie to jest tutaj najistotniejsze. Należy pamiętać, że obliczony błąd systematyczny ma sens poprawki, która zmniejsza lub zwiększa wartość liczbową wyniku pomiaru nie mówiąc nic o niedokładności czy niepewności pomiaru.

Dokonując jakiegokolwiek pomiaru, zwłaszcza użytkowego, zawsze stawia się pytanie: jak ustalić przedział, do którego należy rzeczywista wartość wielkości mierzonej?

Norma PN-71/N-02050 podchodzi do tego w sposób dość enigmatyczny. Omawiając prawo sumowania się błędów: "prawo wiążące błąd wyniku pomiaru pośredniego pewnej wielkości z błędami popełnionymi w czasie pomiarów bezpośrednich wielkości składowych⁷⁾", norma podaje w zamieszczonym przykładzie jedynie takie wyjaśnienie: "Odchylenie średnie kwadratowe (p.9.26) pomiaru pośredniego wielkości Y wyraża się (przeważnie w przybliżeniu) następującym prawem sumowania się odchyień średnich kwadratowych:

$$s_y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial X_1}\right)^2 s_1^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial X_m}\right)^2 s_m^2} \quad (3)$$

gdzie s_1, \dots, s_m przedstawiają odchylenia średnie kwadratowe (p.9.26) pomiaru bezpośredniego wielkości X_1, \dots, X_m .

Wyrażenia składowe w powyższych wzorach powinny być obliczone dla pewnego określonego punktu.⁸⁾

Wszystko to jest niewątpliwie prawdą, natomiast bez odpowiedzi pozostaje zasadnicze pytanie o przedział wartości, do którego należy wartość rzeczywista wielkości mierzonej, bo nie wiadomo jak zinterpretować informację o obliczonej wartości s_y , czego norma już nie wyjaśnia, a co staje się przedmiotem różnych dowolnych interpretacji.

Najczęściej spotykana jest interpretacja następująca: przyjmuje się, że rozkład zmiennej losowej Y jest normalny, wobec czego wartość s_y interpretuje się tak samo jak wartość s przy określaniu błędu pojedynczego pomiaru. Interpretacja taka, aczkolwiek dość powszechna, jest błędna i prowadzi do mylnych ocen, a wynikające stąd przybliżenie jest trudne do oszacowania. Źródłem nieporozumień jest przyjęcie, że zmienna losowa Y ma rozkład normalny. W tym miejscu szereg autorów powołuje się na centralne twierdzenie graniczne, jako podstawę przyjęcia rozkładu normalnego za kompozycję n dowolnych rozkładów. Założenie takie jest bezpodstawne, a czasami wręcz błędne i może prowadzić do nierzeczywistych rozwiązań.

⁷⁾ Tamże, s.20

⁸⁾ Tamże, s.20

Centralnych twierdzeń granicznych jest wiele, a jedno z nich, na które autorzy najczęściej się powołują - (pod nazwą twierdzenia Lapunowa), jest następujące: "Jeśli niezależne zmienne losowe X_1, X_2, \dots, X_n , mają rozkłady o parametrach $\mu_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,n,\dots$), przyjmować mogą wartości z pewnego przedziału $[-a,+a]$ i

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n E|X_i - \mu_i|^3}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \delta}} \quad (4)$$

to ciąg dystrybuant $F_n(Y)$ zmiennych losowych

$$\dots Y_n = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n \mu_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n s_i^2}} \quad (5)$$

jest zbieżny do rozkładu normalnego $N(0,1)$, tzn.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F_n(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (6)$$

Oznacza to, że standaryzowana suma X_i dostatecznie wielu zmiennych losowych, przyjmujących wartości z pewnego przedziału $[-a,+b]$, ma rozkład różniący się nieznacznie od rozkładu normalnego $N(0,1)$.⁹⁾ Bardzo uproszczoną interpretacją tego twierdzenia byłoby, że wystarczy kilka składników, aby suma miała rozkład normalny. Teoria badania sum niezależnych zmiennych losowych bardzo się rozwinęła. Istnieje szereg opracowań monograficznych z tej dziedziny [4,5], gdzie przy bardzo słabych założeniach dowodzi się asymptotycznej zbieżności rozkładu sumy zmiennych losowych do rozkładu normalnego. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że przez cały czas jest mowa o asymptotycznej zbieżności, tzn. o przypadku, kiedy liczba zmiennych losowych dąży do nieskończoności. Zachodzi zatem pytanie, na ile te rozważania mają wobec tego sens praktyczny. Założenia twierdzenia Lapunowa są na ogół spełnione, jeśli chodzi o własności rozkładów wielkości składowych, a zatem ciąg dystrybuant, o których mowa w tym twierdzeniu, będzie zbieżny do rozkładu normalnego, tylko nigdy nie wiadomo, jak szybka będzie ta zbieżność.

⁹⁾Bobrowski D.: Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT Warszawa, 1980, s.324.

Jeśli przyjąć, że błędy wielkości mierzonych bezpośrednio traktowane jako zmienne losowe mają rozkłady normalne, to suma tych zmiennych losowych też będzie miała rozkład normalny. Łatwo to udowodnić przy pomocy funkcji charakterystycznych. Jeśli dane są niezależne zmienne losowe X_i , $i = 1, \dots, n$ o rozkładach normalnych $N(m_i, \sigma_i)$, to suma X_i ma także rozkład normalny $N(\sum m_i, \sqrt{\sum \sigma_i^2})$.¹⁰⁾

Twierdzenie to rozwiązuje problem jednoznacznie w przypadku pomiaru pośredniego, w którym wielkości mierzone bezpośrednio mają rozkłady normalne bez względu na liczbę wielkości składowych. Jest to jednak przypadek czysto teoretyczny, który można nazwać optymistycznym.

Dla rozkładów dowolnych, gdzie nie wymaga się żadnych założeń, można korzystać z nierówności Czebyszewa

$$P(|Y - m| \geq ts) \leq \frac{1}{t^2} \quad (7)$$

Jest to jak gdyby uogólnione prawo t-sigmowe dla dowolnego rozkładu, a więc może być nim również dowolna kompozycja rozkładów. Jeśli w takim przypadku przyjąć np. granice 3-sigmowe, to

$$P(|Y - m| \geq 3\sigma) \leq \frac{1}{9} \quad (8)$$

co oznacza, że prawdopodobieństwo tego, iż zmienna losowa Y przyjmie wartość różniącą się od wartości oczekiwanej o więcej niż 3, będzie mniejsze niż 1/9, czyli ok. 0,1. Jest to oszacowanie skrajnie pesymistyczne, ale uniwersalne w tym sensie, że dotyczy dowolnych rozkładów.

Praktyczne zastosowanie nierówności Czebyszewa prowadzi do nadmiernie dużych obszarów niepewności pomiarów. Daje to mylne wyobrażenie o dokładności prowadzonych pomiarów i przydatność takiego zastosowania jest wątpliwa.

Dla rozkładów absolutnie ciągłych, jednodalnych i symetrycznych można stosować lepsze oszacowanie:¹¹⁾

$$P(|Y - m| \geq t\sigma) \leq \frac{4}{9t^2} \quad (9)$$

co dla granic 3-sigmowych odpowiada wartości 0,05, a więc mniej więcej tyle, ile dla granic dwusigmowych rozkładu normalnego.

¹⁰⁾ Twierdzenie i dowód można znaleźć w większości podręczników z rachunku prawdopodobieństwa, np. M. Fiz: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. Warszawa: PWN 1969, s.162 podaje twierdzenie i dowód dla sumy dwóch zmiennych, co łatwo uogólnić

¹¹⁾ Bobrowski D.: Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT. Warszawa, 1980, s.316

Badając rozkład sumy zmiennych losowych o rozkładach jednostajnych i o jednakowych obszarach zmienności można zauważyć, że maksymalna wartość funkcji gęstości:

$$f(y)_{\max} = \frac{1}{T} \quad \text{dla dwóch składników}$$

$$f(y)_{\max} = \frac{3}{4T} \quad \text{dla trzech składników}$$

$$f(y)_{\max} = \frac{2}{3T} \quad \text{dla czterech składników}$$

$$f(y)_{\max} = \frac{1}{2,4T} = \frac{0,42}{T} \quad \text{dla sześciu składników}$$

Dla 6 składników obszar zmienności sumy jest równy $6T$, a przyjmując, że rozkład normalny ma praktycznie taki sam obszar zmienności, tzn., że $6\sigma = 6T$, to dla rozkładu normalnego:

$$f(y)_{\max} = \frac{1}{T\sqrt{2\pi}} \approx \frac{1}{2,5T} \approx \frac{0,4}{T} \quad (10)$$

Można więc uważać, że kompozycja 6 rozkładów jednostajnych jest już bardzo bliska rozkładowi normalnemu i nie popełni się dużego błędu zastępując rozkład sumy rozkładem normalnym, dla którego $\sigma_y = 6T$.

Wynikają stąd generalne założenia praktyczne. Można przyjąć, że rozkład sumy n zmiennych losowych jest bardzo bliski rozkładowi normalnemu, jeśli:

- obszary zmienności każdej ze zmiennych są jednakowe (jednakowe obszary niepewności pomiaru bezpośredniego), oraz
- liczba składników sumy wynosi:
 - n_6 - przy założeniu modelu rozkładów jednostajnych,
 - n_3 - przy założeniu modelu rozkładów trójkątnych,¹²⁾
 - n - dowolne, przy założeniu modelu rozkładów normalnych.

Przyjmując zatem, że wielkość wynikowa ma rozkład normalny, można posługiwać się następującymi wzorami:

- dla modelu rozkładów jednostajnych

$$T_y = \sqrt{3} \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} \approx 1,723 \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} \quad (11)$$

¹²⁾ Ponieważ można udowodnić, że w takim przypadku (równe obszary niepewności) kompozycja dwóch rozkładów jednostajnych jest rozkład trójkątny (Simpsona)

- dla modelu rozkładów trójkątnych (Simpsona)

$$T_y = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} \approx 1,225 \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} \quad (12)$$

- dla modelu rozkładów normalnych

$$T_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} \quad (13)$$

W ten sposób osiągnęliśmy "nieśmiertelny" wzór na geometryczne sumowanie błędów, który można spotkać w każdej prawie książce traktującej o błędach pomiarów, a który - jak widać z przedstawionych rozważań - jest wprawdzie słuszny, ale tylko w niezwykle rzadkich przypadkach.

Temu rozumowaniu można zarzucić powoływanie się na rozkład jednostajny, który jest też rozkładem typowo teoretycznym, mającym zastosowanie w szczególnie rzadkich przypadkach.

Wbrew pozorom, połączenie obu tych rzadkich, teoretycznych przypadków ma sens praktyczny. Obliczony obszar niepewności pomiaru pośredniego - przy założeniu, że błędy pomiarów wielkości mierzonych bezpośrednio mają rozkłady jednostajne - prowadzi do rozwiązania pesymistycznego.

Obliczony obszar niepewności pomiaru pośredniego - przy założeniu, że błędy pomiarów wielkości mierzonych bezpośrednio mają rozkłady normalne - prowadzi do rozwiązania optymistycznego. A prawda leży jak zwykle po środku. Niemniej jest to jedyne, wydaje się, słuszne rozwiązanie, aby dla oszacowania rzeczywistej wartości obszaru niepewności obliczyć jego dolne i górne ograniczenie. Daje to może niedokładną, ale sensowną ocenę.

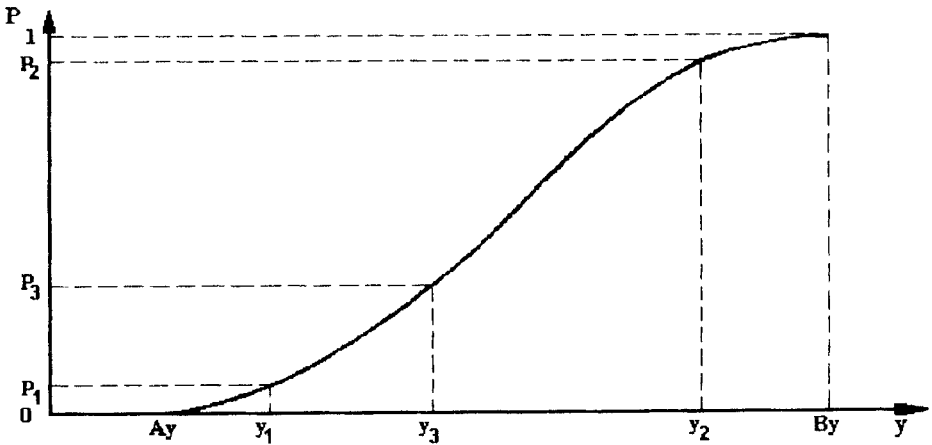
Rozważania dotychczasowe dotyczyły przypadku, kiedy wielkość mierzona pośrednio jest określona funkcją liniową. W przypadku funkcji nieliniowej sprawa się bardziej komplikuje, ponieważ brak jest twierdzeń matematycznych, które w przypadku ogólnym pozwalałyby na uzyskanie dostatecznej informacji o rozkładzie zmiennej losowej będącej dowolną funkcją innych zmiennych losowych o dowolnych rozkładach. Brak jest takiego twierdzenia nawet dla przypadku rozkładów normalnych. Równanie (3) pozostaje oczywiście słuszne, ale prawo 3-ch sigma dla każdego rozkładu jest inne, a skoro nie wiadomo, jaki to jest rozkład, to informacja o wartości parametru "σ" jest trudna do praktycznego wykorzystania.

W takich przypadkach pozostaje, do celów orientacyjnych, posługiwanie się oszacowaniem wynikającym z nierówności Czebyszewa bądź też z oszacowania (9).

Wszystkie rozpatrywane dotąd metody analityczne można określić jako metody parametryczne, tzn. określa się wartość pewnego parametru (najczęściej jest

to średnie odchylenie kwadratowe) i na podstawie tej wartości wnioskuje się lub określa obszar niepewności pomiaru oraz prawdopodobieństwo oceny. Jeżeli zmieni się żądane prawdopodobieństwo oceny lub wymagany obszar niepewności, to prawie całe obliczenia trzeba zaczynać od początku.

Wydaje się, że w tym stanie rzeczy można zaproponować inne rozwiązanie oparte na metodzie nieparametrycznej, tzn. takiej, która daje pełną informację o rozkładzie prawdopodobieństwa wielkości mierzonej pośrednio, co jest podstawą wszelkich rozważań, przy czym ze względów praktycznych wygodniej jest korzystać nie z funkcji gęstości, lecz z dystrybuanty, jak to jest pokazane na rys. 1.



Rys. 1. Dystrybuanta wielkości mierzonej pośrednio

Wtedy można zadawać pytania, np. jakie będzie prawdopodobieństwo, że obszar niepewności pomiaru będzie zawarty pomiędzy y_1 i y_2 ? Odpowiedź: $p_2 - p_1$. Jakie będzie prawdopodobieństwo, że wielkość mierzona nie przekroczy wartości y_3 ? Odpowiedź - p_3 . Mając określone (zadane) prawdopodobieństwo, można szukać odpowiedniego przedziału wartości, do którego będzie należała wartość rzeczywista mierzonej wielkości itp. Na marginesie można zauważyć, że niepewność pomiaru odpowiadająca prawdopodobieństwu 1 będzie przedziałem $\langle A_y, B_y \rangle$. Będzie to wartość określająca maksymalny, możliwy do popelnienia błąd pomiaru. Liczbowo będzie to wartość zbliżona (ponieważ będzie obliczona dokładnie) do wartości otrzymanej ze wzoru (2), w którym, w miejsce wartości pochodnych i błędów pomiarów bezpośrednich, podstawią się ich wartości bezwzględne.

Sposób wykorzystania informacji wynikających z dystrybuanty jest, jak widać, elementarny. Rozwiązanie zadania sprowadza się więc jedynie do jej wy-

znaczenia. Autorowi nie są znane analityczne metody wyznaczenia dystrybuanty w przypadku dowolnej funkcji wielu zmiennych o dowolnych rozkładach. Wydaje się, że jeśli by nawet było to możliwe, to pracochłonność takiego rozwiązania będzie znaczna. Zadanie jest natomiast całkiem łatwe do rozwiązania na drodze numerycznej, a powszechność użycia komputerów daje możliwość praktycznego zastosowania takiej metody.¹³⁾

Podsumowując powyższe rozważania można stwierdzić, że:

- Polska Norma PN-71/N-02050 nie precyzuje, co jest błędem granicznym w przypadku wielkości mierzonej pośrednio,
- błąd systematyczny wielkości mierzonej pośrednio można obliczyć dokładniej, niż wynika to ze wzoru podanego przez Normę - zależność (2),
- podana przez Normę zależność (3) do obliczenia średniego odchylenia kwadratowego, w przypadku wielkości mierzonej pośrednio, jest prawdziwa, ale trudna do praktycznego wykorzystania wobec nieznaności rozkładu prawdopodobieństwa kompozycji rozkładów wielkości składowych,
- autor proponuje ustalanie błędu granicznego wielkości mierzonej pośrednio poprzez wyznaczenie dystrybuanty tej wielkości, a następnie przez określenie przedziału odpowiadającego obszarowi niepewności pomiaru zgodnic z żądanym prawdopodobieństwem oceny.

LITERATURA

- [1] Bobrowski D.: Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT Warszawa 1980
- [2] Brandt S.: Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych. PWN Warszawa 1974
- [3] Dąbek Z.: Obliczanie błędów pomiarów pośrednich. Normalizacja 6, s.14-18, 1977
- [4] Fisz M.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. PWN Warszawa 1969
- [5] Gnienenko B.W., Kołmogorow A.N.: Rozkłady graniczne sum zmiennych losowych niezależnych. PWN Warszawa 1957
- [6] Pietrow W.W.: Summy niezawisimych slučajnych wieliczyn. Nauka Moskwa 1972
- [7] Polska Norma PN-71/N-02050. Metrologia. Nazwy i określenia
- [8] Riedel T., Sędziwy S.: Matematyczne podstawy analizy wymiarowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Mechanika, 2, 1959

¹³⁾ Autor dysponuje odpowiednim programem do realizacji na popularnych komputerach typu PC

REMARKS FOR DISCUSSION OF MEASUREING ERRORS,
INACCURACY AND UNCERTAINTY PROBLEM

Summary

In the paper author has presented the set of remarks and sugestions related to some definitions and methods used for calculation of measureing errors, inaccuracy and uncertainty on the base of comparison with formulas contained in The Polish Standard PN-71/N-02050.

Zbigniew Dąbek

O PEWNYCH, PROBABILISTYCZNYCH ASPEKTACH USTALANIA OKRESU GWARANCJI

W artykule przedstawiono probabilistyczną metodę określania czasu wymaganego, co może być istotnym czynnikiem przy ustalaniu bezpiecznego dla producenta okresu gwarancji. Metoda obliczeń oparta jest na kompozycji dowolnych rozkładów prawdopodobieństwa z preferencją rozkładów jednostajnych.

Gwarancja - to odpowiedzialność wobec nabywcy za używalność i dobry stan wyrobów, przedmiotów handlu przez określony czas. Z prawnego punktu widzenia jest ona zastrzeżeniem w umowie sprzedaży dotyczącym odpowiedzialności producenta za wady fizyczne rzeczy w terminie określonym w dokumencie gwarancyjnym. Zakres i formy odpowiedzialności producenta mogą być różne. Począwszy od najbardziej łagodnych, kiedy wystarczy naprawić wyrób dostarczony przez użytkownika do miejsca naprawy, do najbardziej uciążliwych, związanych z demontażem urządzeń w miejscu użytkowania i pokryciu strat użytkownika powstałych wskutek postoju tych urządzeń.

Zdarza się, że gwarancja nie jest ograniczona w czasie. Jest to jednak przypadek niezmiernie rzadki. Najczęściej takie ograniczenie istnieje. W interesie producenta nie leży wydłużanie okresu gwarancji ponad określone minimum.

Ustalanie okresu gwarancji jest pewnego rodzaju kompromisem pomiędzy względami reklamowymi a ryzykiem poniesienia kosztów reklamacji i zależy od wielu czynników technicznych i ekonomicznych. Jest to temat bardzo szeroki, którego wyczerpanie przekraczałoby ramy pojedynczego artykułu, dlatego też autor postanowił ograniczyć się jedynie do omówienia pewnych matematycznych, a ściślej probabilistycznych aspektów określania czasu wymaganego¹⁾, co jako pewna metoda matematyczna może być przydatna do ustalenia okresu gwarancji dla danego wyrobu.

Warunkiem prowadzenia wszelkich rozważań na ten temat jest istnienie funkcji określającej czas działania obiektu w zależności od warunków eksploatacji, które

¹⁾ Według PN-93/N-50191 "czas wymagany - przedział czasu, w którym zgodnie z wymaganiami użytkownika obiekt powinien być w stanie umożliwiającym wypełnianie danej funkcji "

można przedstawić w postaci zbioru niezależnych zmiennych losowych, a więc musi być dana funkcja postaci:

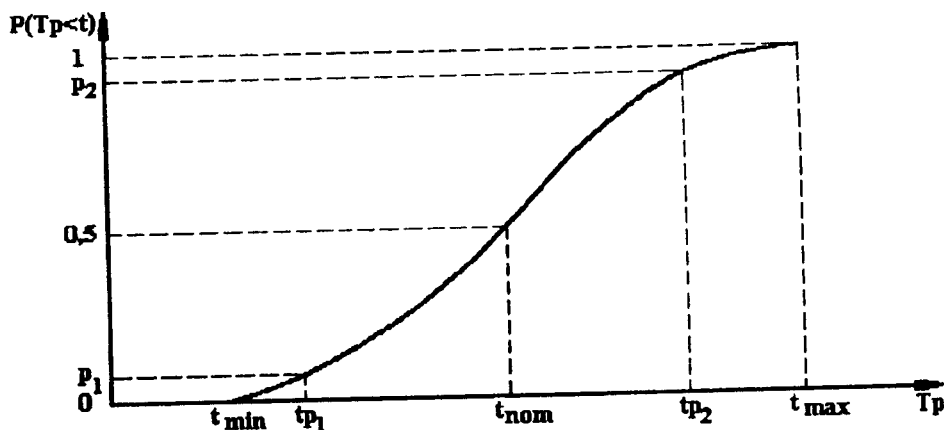
$$T = f(X_1, \dots, X_n) \quad (1)$$

gdzie:

- T - czas działania obiektu, po którym następuje utrata jakości poniżej określonego dopuszczalnego progu, np. może to być tzw. okres trwałości,
 X_1, \dots, X_n - zbiór niezależnych zmiennych losowych.

Należy przy tym wyjaśnić, że losowość wartości zmiennych X_1, \dots, X_n często wynika z faktu, że wielkości składowe mają charakter wielkości tolerowanych, a tolerancja każdej z nich określa jednocześnie przedział ich zmienności. Ponieważ w takim przypadku wartość rzeczywista każdej zmiennej może być różna od przyjętej wartości nominalnej - stąd t_{rzecz} też będzie różne w zależności od przypadkowego doboru wartości rzeczywistych wielkości składowych.

Znając rozkłady zmiennych losowych X_1, \dots, X_n można wyznaczyć rozkład prawdopodobieństwa funkcji losowej T . W praktyce wygodniej jest korzystać z dystrybuanty, która ma zwykle przebieg zbliżony do pokazanego na rysunku 1, na którym można wyróżnić trzy punkty charakterystyczne: t_{min} , t_{nom} i t_{max} .



Rys.1. Dystrybuanta funkcji losowej T oraz jej punkty charakterystyczne

t_{min} jest to czas działania, w którym prawdopodobieństwo uszkodzenia wyrobu jest równe zero;

t_{nom} jest to czas działania obiektu wynikający z zależności (1), jeśli w miejsce X_1, \dots, X_n podstawimy ich wartości nominalne. Jeśli wartości te są symetrycznie po-

łożone w obszarach zmienności każdej z nich, to t_{nom} ma wartość zbliżoną do wartości oczekiwanej;

t_{max} jest to maksymalny czas działania, po którym nastąpi nieuniknione, pewne pogorszenie parametrów jakościowych poniżej granic dopuszczalnych.

Wartość t_p to czas wymagany, po którym może nastąpić niedopuszczalne zużycie obiektu, przy czym prawdopodobieństwo takiego zdarzenia wynosi p .

Wynika z tego, że:

$$P(T_p < t_{min}) = 0$$

$$P(T_p < t_{nom}) = 0.5$$

$$P(T_p < t_{max}) = 1$$

Wynika z tego również, że:

$$P(T_p \in \langle t_{p1} - t_{p2} \rangle) = p2 - p1 \quad (2)$$

Posługiwanie się dystrybuantą wymaga jedynie wiadomości elementarnych i nie stanowi trudności nawet dla użytkownika nie znającego rachunku prawdopodobieństwa i metod statystyki matematycznej.

Wyznaczenie dystrybuanty metodami analitycznymi nie jest prawdopodobnie możliwe w przypadku ogólnym (dowolna funkcja, dowolne rozkłady zmiennych składowych) ze względu na brak odpowiednich twierdzeń matematycznych. Jest natomiast dość łatwe do realizacji na drodze numerycznej z wystarczającą dla praktyki dokładnością [2]. (Autor dysponuje odpowiednim programem przeznaczonym do realizacji na ogólnie dostępnych komputerach klasy PC IBM lub kompatybilnych). Cały więc problem jest łatwy do praktycznego rozwiązania - wymaga jedynie odpowiedniego przygotowania danych i właściwej interpretacji wyników. Aby całość postępowania nie budziła wątpliwości, można przedstawić przykład zastosowania tej metody w przypadku konieczności określenia okresu trwałości ostrza noża tokarskiego punktowego dla toczenia stali 45.

Okres trwałości ostrza (czas działania) określony jest w rozpatrywanym przypadku następującą zależnością [4]:

$$T = \frac{C_v^s}{v^s p^{su_v} g^{se_v}} \quad \text{min} \quad (3)$$

- gdzie:
- C_v - stała ujmująca wpływ czynników osobno we wzorze nie wyodrębnionych,
 - s - wykładnik potęgi prędkości skrawania, charakteryzuje on intensywność wpływu prędkości skrawania na okres trwałości ostrza. Zależny jest od materiału ostrza i materiału skrawanego,

- v - prędkość skrawania w m/min,
- p - posuw na obrót w mm/obr,
- u_w - wykładnik potęgi posuwu określający wpływ posuwu na okresową prędkość skrawania,
- g - głębokość skrawania w mm,
- e_w - wykładnik potęgi głębokości skrawania określający wpływ tej głębokości na okresową prędkość skrawania.

Do celów przykładowych obliczeń przyjęto następujące dane:

$$\begin{array}{lll} C_v = 349 \pm 5 & e_v = 0.15 \pm 0.01 & p = 0.5 \text{ mm/obr} \\ s = 2.857 & u_v = 0.35 \pm 0.02 & \\ v = 101 \text{ m/min} & g = 7 + 0.5 \text{ mm} & \end{array}$$

Współczynniki, wykładniki potęgowe itp. parametry w normatywach podane są dla danego materiału o określonej wytrzymałości.

Żaden materiał nie jest tak jednorodny, żeby wybrane próbki posiadały taką samą wytrzymałość. Przyjęto, że tolerancja C_v wynika z oporów skrawania niejednorodnego materiału oraz ze zmiennej głębokości skrawania.

Wykładniki potęgowe we wzorze (3) zostały ustalone na drodze empirycznej w wyniku odpowiedniej aproksymacji danych doświadczalnych. Tolerancja wykładników potęgowych wynika z błędów aproksymacji wartości tych wykładników. Ponieważ zostały one ustalone empirycznie, a więc takie błędy są nieuniknione. Normy i tablice nie podają wartości błędów aproksymacji i dlatego dla celu niniejszej analizy wartości te przyjęto arbitralnie (przykładowo).

Dla nominalnych wartości parametrów łatwo obliczyć, że $t_{nom} = 30.06$. Jest to wartość zbliżona do wartości oczekiwanej, którą można traktować jako wartość szacunkową, orientacyjną. Niestety nie daje ona żadnych podstaw do określenia okresu gwarancji na trwałość ostrza przy tych parametrach obróbki.

Określanie okresu trwałości ostrza narzędzia skrawającego zajmowało się już szereg autorów, rozpatrując problem w różnych aspektach. Różne też były czynione modele matematyczne określające rozkłady prawdopodobieństwa wielkości składowych. Próby te były jednak czynione głównie w celach określenia okresu trwałości przewidywanej (planowanej, prognozowanej) [1,3]. Cechą wspólną tych prób był wynik oparty na założeniu a priori, że rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej T odpowiada pewnemu rozkładowi teoretycznemu, przy czym najczęściej przyjmowano rozkłady: normalny, logarytmo-normalny, gamma, Weibulla.

Autor proponuje inne rozwiązanie, polegające na wyznaczeniu rozkładu zmiennej losowej T drogą kompozycji rozkładów prawdopodobieństwa założonych dla zmiennych składowych, poprzez znajomość postaci funkcji (3), przy czym sposób postępowania będzie następujący:

- 1) przyjąć, że wielkości składowe mają rozkłady jednostajne,
- 2) wyznaczyć dystrybuantę funkcji losowej T na drodze numerycznej bez korzystania z jakichkolwiek twierdzeń granicznych i założeń o normalności rozkładu.

Rozkłady jednostajne też są rozkładami teoretycznymi. Są to rozkłady, które można nazwać pesymistycznymi, ponieważ w rzeczywistości rozkłady zmiennych losowych zawsze będą bardziej skupione wokół wartości oczekiwanej niż rozkłady jednostajne. Wynika stąd bardzo ważne przekonanie, że rozrzut rzeczywisty będzie zawsze mniejszy niż rozrzut obliczony przy założeniu rozkładów jednostajnych, a to daje podstawę do ustalenia bezpiecznego okresu trwałości. Oczywiście lepiej byłoby prowadzić całe obliczenia na bazie rozkładów empirycznych, ale w praktyce jest to trudne do realizacji. Rozkłady empiryczne są zmienne w czasie, zależą od wielu zmiennych czynników i ich rzetelne określenie jest dość pracochłonne. Przyjęcie założenia rozkładów jednostajnych daje zawsze rozwiązanie bezpieczne, tj. istnieje zawsze pewien margines bezpieczeństwa w ustalonym okresie gwarancyjnym. Niewątpliwie jest to pewna strata dla przedsiębiorstwa, bo wykorzystując ten margines można by dawać dłuższe okresy gwarancji.

Przyjmując przykładowe dane dla przypadku toczenia nożem punktowym stali 45 oraz sugerowane przez autora założenia, otrzymuje się następujące wyniki ²⁾:

Obliczenie okresu trwałości ostrza dla omawianego przykładu toczenia

Wartości obliczeniowe dla wielkości wynikowej

Wartości graniczne: $T_{\min} = 24.9057$ $T_{\max} = 36.1824$
 Tolerancja: $T_w = 11.2767$

Parametry rozkładu

Środek przedziału $sr = 30.4057$
 Wartość oczekiwana $m = 30.0644$
 Odchylenie standardowe $\sigma = 1.5199$
 Mediana $Me = 30.0305$
 Modalna $Mo = 29.9511$
 Wsp. asymetrii $a_3 = 0.1148$
 Wsp. spłaszczenia $a_4 = 2.6967$

Rozkład

Wartość zmiennej losowej	Gęstość	Dystrybuanta
25.0057	0.0000	0.0000
25.4057	0.0000	0.0000
25.8057	0.0015	0.0003
26.2057	0.0062	0.0017
26.6057	0.0166	0.0061
27.0057	0.0349	0.0162
27.4057	0.0622	0.0354
27.8057	0.0974	0.0671
28.2057	0.1373	0.1140
28.6057	0.1773	0.1770

²⁾ Algorytm oraz podstawy matematyczne metody obliczeń przedstawiono w [2]

Wartość zmiennej losowej	Gęstość	Dystrybuanta
29.8057	0.2503	0.4436
30.2057	0.2483	0.5437
30.6057	0.2329	0.6403
31.0057	0.2066	0.7284
31.4057	0.1732	0.8044
31.8057	0.1366	0.8663
32.2057	0.1013	0.9139
32.6057	0.0703	0.9480
33.0057	0.0453	0.9710
33.4057	0.0268	0.9852
33.8057	0.0143	0.9933
34.2057	0.0067	0.9974
34.6057	0.0026	0.9992
35.0057	0.0007	0.9998
35.4057	0.0001	1.0000
35.8057	0.0000	1.0000

Uzyskana wartość okresu trwałości, obliczona dla wartości nominalnych przyjętych współczynników i parametrów skrawania jest bardzo zbliżona do wartości oczekiwanej. Jest to więc wynik, jaki otrzymujemy dokonując obliczeń wg powszechnie stosowanej procedury. Wynik ten może być zadowalający w przypadku porównawczych analiz okresów trwałości dla różnych warunków pracy narzędzia. W praktyce jednak występują znaczne rozbieżności między obliczonym a rzeczywistym okresem trwałości. Spowodowane są one między innymi głównie przez:

- przyjęcie do obliczeń wartości nominalnych występujących w modelu wielkości bez uwzględnienia odchyłek i błędów ich określenia,
- przyjęcie założenia, że w rozpatrywanym przypadku - model nieliniowy - obowiązywać będzie rozkład normalny.

Gdyby na podstawie otrzymanych wyników obliczeń w zamieszczonym przykładzie należało zdecydować o okresie gwarancji, to można przyjąć wartość $T_{0,05} = 27.67$, co daje teoretycznie jedynie 5 % prawdopodobieństwa reklamacji. Ponieważ rozkład komponowany na bazie założonych rozkładów jednostajnych wielkości składowych jest pesymistyczny, a zatem można mieć dodatkową przesłankę wskazującą na to, że rzeczywiste ryzyko reklamacji będzie dużo mniejsze.

Rozkład skomponowany różni się istotnie od rozkładu normalnego, ponieważ współczynnik asymetrii różni się istotnie od zera, a współczynnik spłaszczenia od 3.

Niektórzy autorzy operując pojęciem "okres planowany" rozwiązują to zadanie na bazie założeń o normalności rozkładów. W metodzie, o której mowa w niniejszym artykule, też jest to możliwe, przy czym zadanie to może być rozwiązane o tyle efektywniej, że pojęcie "okres planowania" można związać z określonym prawdopodobieństwem. Jeśli np. chcemy planować z ryzykiem 20 %, to okres trwałości wyniesie 28.87, jeśli 50 % -(wartość oczekiwana) - to 30.06 itd. Ten sposób postępowania ma tę dodatkową zaletę, że można rozważać różne warianty ekonomiczne bez potrzeby każdorazowego ponownego liczenia zadania od początku.

PODSUMOWANIE

1. Fakt istnienia tolerancji wielkości składowych w zależnościach typu (1) powoduje, że T staje się też wielkością tolerowaną.
2. Posługiwanie się dystrybuantą zmiennej losowej T daje możliwość rozważania wielu wariantów ekonomicznych bez potrzeby rozwiązywania zadania od początku.
3. Wyznaczenie dystrybuanty powinno się odbywać na podstawie rozkładów empirycznych, bo są one najbliższe rzeczywistości. Z braku takowych, należy korzystać z założenia rozkładów jednostajnych, ponieważ tak stworzony model matematyczny daje praktycznie pewność, że rzeczywisty czas wymagany będzie większy od obliczonego.

LITERATURA

- [1] Bartosiewicz J.: Niezawodność narzędzi skrawających. WNT, Warszawa 1982
- [2] Dąbek Z.: Numeryczne metody analizy wielkości tolerowanych. Wyd. ATR Bydgoszcz 1980
- [3] Kacew P.G.: Kontrola narzędzi skrawających metodami statystycznymi. WNT, Warszawa 1978
- [4] Normatywy Technologiczne Obróbki Skrawaniem. Warunki obróbki przy toczeniu stali i żeliwa na tokarkach kłowych, uchwytowych tarczowych, karuzelowych i rewolwerowych. Część I, Wyd. "WEMA", Warszawa 1979
- [5] Polska Norma PN-93/N-50191 Słownik terminologiczny Elektryki. Niezawodność; Jakość Usługi

SOME PROBABILISTIC ASPECTS OF GUARANTY
PERIOD ESTABLISHING

Summary

In the paper the probabilistic method for required time estimation is presented. The required time can be the important factor for producers for the safe guaranty period planning. The estimation method was built on the ground of a set of optional probability distributions with preference for the uniform distribution.

**Biblioteka Główna ATR
w Bydgoszczy**

Cz	1006 40 1896
----	-----------------