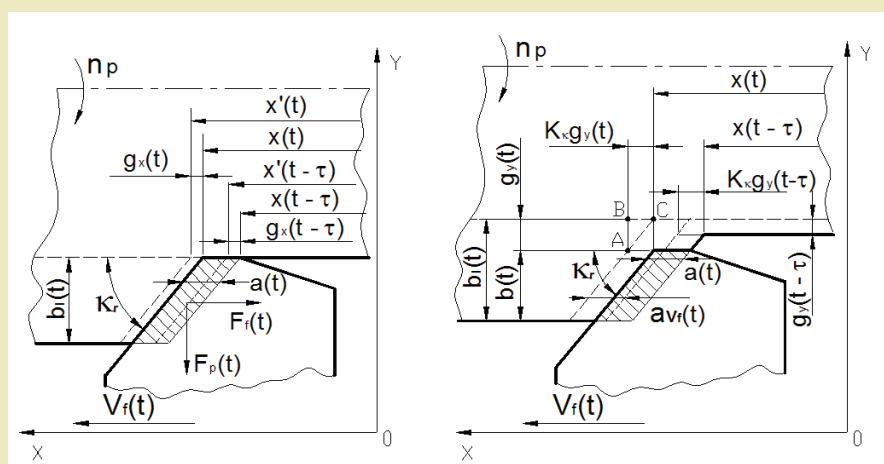


Aleksandr Abakumow, Wiktor Taranenko  
Jarosław Zubrzycki, Georgij Taranenko

# Identyfikacja i sterowanie układem dynamicznym obróbki skrawaniem



# Identyfikacja i sterowanie układem dynamicznym obróbki skrawaniem

# Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
ul. Nadbystrzycka 36  
20-618 LUBLIN

Aleksandr Abakumow, Wiktor Taranenko

Jarosław Zubrzycki, Georgij Taranenko

# Identyfikacja i sterowanie układem dynamicznym obróbki skrawaniem



Politechnika Lubelska  
Lublin 2014

Recenzenci:

prof. dr. hab. inż. Andrzej Buchacz, Politechnika Śląska w Gliwicach

prof. zw. dr hab. inż. Krzysztof Marchelek, Zachodniopomorski Uniwersytet  
Technologiczny w Szczecinie

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2014

ISBN: 978-83-7947-087-7

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

[www.biblioteka.pollub.pl](http://www.biblioteka.pollub.pl)

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

[www.agencjatop.pl](http://www.agencjatop.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Nakład: 100 egz.

# IDENTYFIKACJA I STEROWANIE UKŁADEM DYNAMICZNYM OBRÓBKĄ SKRAWANIEM

## Spis treści

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Wstęp .....                                                                                                                              | 9   |
| 1. Zagadnienia ogólne zwiększenia dokładności i efektywności maszyn technologicznych .....                                               | 12  |
| 1.1. Problem zwiększenia dokładności obróbki skrawaniem .....                                                                            | 12  |
| 1.2. Modele matematyczne układów dynamicznych obrabiarek i procesu skrawania .....                                                       | 15  |
| 1.3. Sterowanie dokładnością maszyn technologicznych (obrabiarek) .....                                                                  | 33  |
| 1.4. Optymalizacja sterowania układem dynamicznym obróbki skrawaniem według kryteriów ekonomicznych .....                                | 37  |
| 2. Analityczna identyfikacja układów dynamicznych obróbki skrawaniem .....                                                               | 45  |
| 2.1. Ogólna charakterystyka obiektu sterowania .....                                                                                     | 45  |
| 2.2. Metodologia opracowania modeli matematycznych układów dynamicznych obróbki skrawaniem .....                                         | 52  |
| 2.2.1. Geometria warstwy skrawanej i siły skrawania przy toczeniu .....                                                                  | 56  |
| 2.2.2. Własności masowo–dyssypacyjno–sprężyste układu technologicznego .....                                                             | 59  |
| 2.2.3. Proces formowania przekroju warstwy skrawanej .....                                                                               | 63  |
| 2.2.4. Układ równań i uogólniony schemat strukturalny modelu matematycznego .....                                                        | 67  |
| 3. Uogólnione modele matematyczne układu dynamicznego procesu technologicznego toczenia .....                                            | 71  |
| 3.1. Uogólniony model matematyczny .....                                                                                                 | 71  |
| 3.2. Analiza możliwości uproszczenia modeli matematycznych .....                                                                         | 75  |
| 3.3. Częstkowe modele matematyczne sterowania posuwem wzdłużnym .....                                                                    | 79  |
| 3.4. Czasowe i częstotliwościowe charakterystyki modeli. Ocena dokładności przybliżeń .....                                              | 82  |
| 3.5. Wyjściowe modele obiektu z uwzględnieniem wielkości zakłócających w postaci zmiany naddatku i twardości obrabianego materiału ..... | 90  |
| 3.5.1. Wyjściowe modele obiektu wielkości zakłócających .....                                                                            | 90  |
| 3.5.2. Częstkowe modele matematyczne wielkości zakłócających .....                                                                       | 93  |
| 3.6. Badania eksperymentalne charakterystyk układu dynamicznego procesu technologicznego toczenia .....                                  | 95  |
| 3.6.1. Stanowisko badawcze .....                                                                                                         | 96  |
| 3.6.2. Badanie charakterystyk statycznych obiektu .....                                                                                  | 99  |
| 3.6.3. Badanie charakterystyk czasowych obiektu przy działaniu zakłóceń oraz sterowaniu posuwem wzdłużnym .....                          | 102 |
| 3.6.4. Badanie charakterystyk częstotliwościowych obiektu dla prędkości posuwu wzdłużnego .....                                          | 107 |

|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4. Symulacja przebiegów przejściowych i charakterystyk częstotliwościowych...                                                                                                                          | 110 |
| 4.1 Krótki opis programu MATMOD .....                                                                                                                                                                  | 110 |
| 4.2. Badania symulacyjne układu dynamicznego procesu skrawania .....                                                                                                                                   | 114 |
| 4.3. Analiza wyników symulacji .....                                                                                                                                                                   | 117 |
| 5. Algorytmy sterowania adaptacyjnego układami dynamicznymi przy<br>zakłóceniach deterministycznych .....                                                                                              | 119 |
| 5.1. Modele matematyczne zakłóceń. Kryteria optymalizacji.....                                                                                                                                         | 120 |
| 5.2. Koncepcja budowy układu sterowania adaptacyjnego dla układu<br>dynamicznego obrabiarki. Uzasadnienie wstępnego doboru układu<br>sterowania adaptacyjnego .....                                    | 124 |
| 5.3. Warianty strojów adaptacyjnego sterowania układem dynamicznym<br>obrabiaarki.....                                                                                                                 | 131 |
| 5.3.1. Strojenie AC wg wariantu 1.....                                                                                                                                                                 | 131 |
| 5.3.2. Strojenie AC wg wariantu 2.....                                                                                                                                                                 | 140 |
| 5.3.3. Strojenie AC wg wariantu 3.....                                                                                                                                                                 | 146 |
| 5.3.4. Strojenie AC wg wariantu 4.....                                                                                                                                                                 | 151 |
| 5.4. Badanie jakości sterowania przy „dużych” zakłóceniach .....                                                                                                                                       | 156 |
| 6. Realizacja optymalnych i adaptacyjnych algorytmów sterowania<br>odkształceniami sprężystymi układów dynamicznych .....                                                                              | 161 |
| 6.1. Układ automatycznego sterowania odkształceniami sprężystymi układów<br>dynamicznych obrabiarek w kanale posuwu.....                                                                               | 161 |
| 6.2. Układ automatycznego sterowania odkształceniami sprężystymi części<br>o małej sztywności w kanale dodatkowych oddziaływań siłowych .....                                                          | 170 |
| 6.3. Procedury i operacje osiągnięcia dokładności i jakości typowego<br>zautomatyzowanego procesu projektowania PT obróbki wałków<br>z uwzględnieniem właściwości układów dynamicznych obrabiarek..... | 176 |
| Podsumowanie .....                                                                                                                                                                                     | 193 |
| Literatura:.....                                                                                                                                                                                       | 196 |

## Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

### Skróty

|      |                                                                      |
|------|----------------------------------------------------------------------|
| AC   | - sterowanie adaptacyjne, układ sterowania adaptacyjnego             |
| ACH  | - amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa                      |
| DCPS | - dynamiczna charakterystyka procesu skrawania                       |
| FCH  | - fazowa charakterystyka częstotliwościowa                           |
| FP   | - funkcja przejścia                                                  |
| LACH | - logarytmiczna amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa        |
| LFCH | - logarytmiczna fazowa charakterystyka częstotliwościowa             |
| MM   | - model matematyczny                                                 |
| MDS  | - układ masowo–dyssypacyjno–sprężysty                                |
| OS   | - obiekt sterowania                                                  |
| OUPN | - obrabiarka – uchwyt – przedmiot – narzędzie                        |
| PT   | - proces technologiczny                                              |
| TO   | -transmitancja operatorowa                                           |
| UAR  | - układ regulacji automatycznej                                      |
| UAS  | - układ sterowania automatycznego                                    |
| UD   | - układ dynamiczny                                                   |
| UMST | - układ masowo – sprężyste - tłumiący                                |
| UT   | - układ technologiczny (OUPN: obrabiarka–uchwyt–przedmiot–narzędzie) |
| WS   | - warstwa skrawana                                                   |

### Ważniejsze oznaczenia

|                  |                                                                                                                     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A(\omega)$      | - amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa                                                                     |
| $a(t)$           | - wartość chwilowa grubości warstwy skrawanej                                                                       |
| $a_p(t)$         | - wartość chwilowa głębokości skrawania                                                                             |
| $bl$             | - naddatek na obróbkę wzdłuż osi części                                                                             |
| $b(t)$           | - wartość chwilowa szerokości warstwy skrawanej                                                                     |
| $d_p$            | - średnica części obrabianej                                                                                        |
| $f$              | - posuw                                                                                                             |
| $G(s)$           | - funkcja przejścia (transmitancja operatorowa)                                                                     |
| $F_i$            | - składowe siły skrawania                                                                                           |
| $g$              | - odkształcenie sprężyste układu technologicznego                                                                   |
| $L_p$            | - długość części                                                                                                    |
| $K$              | -współczynnik wzmocnienia                                                                                           |
| $M(s)$           | - funkcja przejścia (transmitancja operatorowa) układu sprężystego                                                  |
| $M_i(s), N_i(s)$ | - funkcje przejścia (transmitancje operatorowe) procesu skrawania odpowiednio wg przyrostu grubości i szerokości WS |
| $m_i, n_i$       | -współczynniki wzmocnienia procesu skrawania odpowiednio wg przyrostu grubości i szerokości WS                      |
| $n_p$            | - prędkość obrotowa [obr/min]                                                                                       |
| $q$              | - twardość materiału obrabianego                                                                                    |
| $r_z$            | - promień części                                                                                                    |



|            |                                                                           |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $s$        | - operator Laplace'a                                                      |
| $T$        | - stała czasowa                                                           |
| $t_r$      | - czas regulowania                                                        |
| $v_c$      | - prędkość skrawania                                                      |
| $v_f$      | - prędkość posuwu wzdłużnego                                              |
| $x, y, z$  | - osie prostokątnego układu współrzędnych                                 |
| $\kappa_r$ | - kąt przystawienia główny                                                |
| $\tau$     | - czas opóźnienia                                                         |
| $\sigma$   | - maksymalne odchylenie dynamiczne wartości regulowanej (przeregulowanie) |
| $\omega$   | - częstotliwość kątowa                                                    |
| $\omega_p$ | - częstotliwość kątowa części                                             |

## Wstęp

Aktualnym problemem współczesnej technologii maszyn jest zapewnienie wysokiej niezawodności dokładnościowej obrabiarek oraz oprzyrządowania technologicznego i podwyższenia wydajności procesów technologicznych. W szczególności powstaje problem osiągnięcia założonej dokładności wykonania części na obrabiarkach do metali, a także zapewnienia wymaganej wysokiej niezawodności dokładnościowej oprzyrządowania eksperymentalnego, maszyn pomiarowych i robotów. Od rozwiązania tych zagadnień zależy późniejsze podwyższenie jakości i efektywności procesów realizowanych na współczesnych zautomatyzowanych obrabiarkach i oprzyrządowaniu, a także możliwości opracowania nowych technologii i oprzyrządowania konkurencyjnego na światowym rynku.

Dotychczasowe tradycyjne podejście do podwyższenia dokładności dynamicznej obrabiarek i oprzyrządowania technologicznego, opartego na doskonaleniu węzłów i konstrukcji mechanizmów, w znaczącej mierze wyczerpały swoje możliwości. Dla tego też na pierwszy plan wysunęły się nowe metody bazujące na wykorzystaniu układów sterowania automatycznego układem dynamicznym obrabiarek i oprzyrządowania technologicznego.

Koncepcja podwyższenia wydajności procesów obróbki metali i dokładności części obrabianych poprzez sterowanie odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego obrabiarek na początku była zaproponowana przez prof. B. S. Bałakszyna (Rosja) i rozpowszechniona w pracach utworzonej przez niego szkoły naukowej a także przez wielu innych badaczy. Od początku lat 60-tych XX wieku były prowadzone intensywne prace badawcze w zakresie „adaptacyjnego sterowania obrabiarkami”.

Ograniczenie dopuszczalnych odchyłek dokładności wykonania oprzyrządowania technologicznego, w szczególności do wykonania części na obrabiarkach osiągane dzięki automatycznemu sterowaniu odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego, zapewniają rezerwy na zużycie połączeń ruchomych. W efekcie końcowym zapewniają długowieczność mechanizmów, maszyn i urządzeń, w których są one wykorzystane.

Szczególnie aktualnym problemem jest podwyższenie efektywności oprzyrządowania technologicznego w warunkach elastycznych systemów produkcji (ESP). Jeżeli w trakcie realizacji procesu technologicznego z udziałem operatora można osiągnąć dokładność na granicy dokładności oprzyrządowania technologicznego, to w przypadku ESP przy szybkiej zmianie parametrów procesu technologicznego z małym udziałem operatora niezbędnym jest uzyskanie dokładności wynikającej z zastosowanego oprzyrządowania.

We współczesnej budowie maszyn wyraźnie zarysowuje się problem podwyższenia dokładności obróbki części o małej sztywności, mających największe zastosowanie w mechanizmach i maszynach, co związane jest ze

współczesnymi przesłankami zmniejszenia ich materiałochłonności, a także z szerokim wykorzystaniem części ze specyficznym funkcjonalnym przeznaczeniem. Podobne części stanowią znaczną część wyrobów w mechanice precyzyjnej, budowie przyrządów, w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Tradycyjne metody podwyższenia dokładności obróbki części o małej sztywności, oparte są na wprowadzaniu obróbki wielozabiegowej, obniżeniu intensywności parametrów skrawania, zastosowaniu podtrzymek, wprowadzaniu dodatkowych przejść i ręcznego docierania. Prowadzi to do istotnego obniżenia wydajności i w wielu przypadkach, w efekcie końcowym, nie zapewnia osiągnięcia oczekiwanego rezultatu. Stąd szczególne zainteresowanie poszukiwaniem nowych i efektywnych sposobów sterowania jakością układu dynamicznego (UD) wytwarzania części o małej sztywności.

Kompleksowy problem podwyższenia niezawodności dokładnościowej oprzyrządowania technologicznego dzięki sterowaniu odkształceniami sprężystymi UD łączy w sobie aspekty technologiczne, które dość dobrze zostały rozwiązane w pracach [14 – 16, 21, 74, 96]. W niniejszej monografii również rozpatrywany jest krąg wzajemnie powiązanych zagadnień z zakresu tworzenia uogólnionych i szczególnych modeli matematycznych układu dynamicznego dla różnych parametrów sterowania. Opracowano także metody syntezy optymalnych układów automatycznego sterowania odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego, uwzględniających specyficzne własności obiektu i działających na niego zakłóceń.

Monografia składa się ze wstępu, sześciu rozdziałów, podsumowania i literatury. W rozdziale pierwszym podano ogólną charakterystykę problemu podwyższenia dokładności obróbki skrawaniem, przytoczono analizę modeli matematycznych układów dynamicznych obrabiarek do metali i procesu skrawania. Przeanalizowano zagadnienia sterowania dokładnością wykonania oprzyrządowania technologicznego. Rozpatrzone zostały także aspekty optymalizacji sterowania układem dynamicznym obróbki skrawaniem wg kryteriów ekonomicznych. Stwierdzono aktualność zagadnienia identyfikacji analitycznej układu dynamicznego obrabiarek oraz oprzyrządowania technologicznego, a także na podstawie opracowanych modeli matematycznych zadania sterowania dokładnością i jakością w obróbce skrawaniem.

W rozdziale drugim przedstawiona jest ogólna charakterystyka obiektu sterowania, rozpatrywana jest metodologia opracowywania modeli matematycznych układów dynamicznych obróbki skrawaniem. Na podstawie rozpatrzenia geometrii przekroju warstwy skrawanej i sił skrawania analizuje się własności sprężyste układu technologicznego, przedstawiono proces formowania przekroju warstwy skrawanej, przytacza się układy równań i uogólniony schemat strukturalny modelu matematycznego obiektu sterowania – układu dynamicznego obróbki toczeniem.

W trzecim rozdziale przedstawiono uogólnione i szczegółowe modele matematyczne układu dynamicznego obróbki toczeniem dla oddziaływania sterującego w postaci zmian prędkości posuwu wzdłużnego i oddziaływań

zakłócających. Przytacza się i analizuje się charakterystyki czasowe i częstotliwościowe układu dynamicznego obróbki toczeniem, podaje się ocenę dokładności aproksymacji i przybliżeń dla szczegółowych modeli matematycznych wg oddziaływań sterujących i zakłócających. Opisano stanowisko eksperymentalne, przedstawiono metodykę i rezultaty badań eksperymentalnych charakterystyk statycznych, dynamicznych i częstotliwościowych obiektu sterowania.

W czwartym rozdziale przedstawiono krótki opis opracowanego programu MATMOD do symulacji i badania charakterystyk dynamicznych i częstotliwościowych układu dynamicznego obróbki toczeniem, przedstawiono analizę wyników symulacji i dokonano oceny dokładności rezultatów modelowania.

W rozdziale piątym rozpatrzono modele matematyczne zakłóceń deterministycznych oddziałujących na układ dynamiczny obróbki toczeniem. Podano kryteria optymalizacji, algorytmy sterowania układem dynamicznym obrabiarki przy działaniu zakłóceń deterministycznych i algorytm adaptacji układu sterowania adaptacyjnego (AC) wg informacji a priori.

W rozdziale szóstym przedstawiono wybrane struktury układów sterowania automatycznego optymalnego i adaptacyjnego odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego obrabiarek. Przedstawiono także wytyczne, strukturę i zasadę pracy systemu zautomatyzowanego projektowania dla części obrotowych z uwzględnieniem własności dynamicznych obrabiarek do metali.

Zwiększenie dokładności obróbki i niezawodności procesu technologicznego toczenia jest osiąganę dzięki opracowaniu i wykorzystaniu dokładniejszych modeli matematycznych. Uwzględniają one właściwości zjawisk zachodzących w strefie obróbki i odkształcenia sprężyste układu dynamicznego oraz wykorzystują otrzymane modele matematyczne do opracowania optymalnych i adaptacyjnych algorytmów sterowania.

Przedstawione w niniejszej pracy zasady tworzenia modeli matematycznych i układów sterowania mogą być adaptowane także do innych procesów technologicznych: toczenia części o małej sztywności, szlifowania, wiercenia, wiercenia głębokich otworów, wiercenia wibracyjnego, które charakteryzują się szerokim zakresem zmian parametrów układu dynamicznego.

Autorzy wyrażają głęboką wdzięczność i dziękują recenzentom: prof. dr hab. inż. Andrzejowi Buchaczowi, prof. zw. dr hab. inż. Krzysztofowi Marchelkowi za wnikliwą ocenę i cenne uwagi, które wpłynęły na poprawę monografii.

# 1. Zagadnienia ogólne zwiększenia dokładności i efektywności maszyn technologicznych

## 1.1. Problem zwiększenia dokładności obróbki skrawaniem

We współczesnej budowie maszyn jakości wyrobów, w tym dokładności wykonania części, stawia się coraz wyższe wymagania. W przypadku obrabiarek skrawających dokładność polega na utrzymaniu rozmiarów części w granicach dopuszczalnego błędu z zachowaniem pewnej rezerwy dokładności technicznej [22]. Rezerwy dokładności technicznej wykonania części określają wytrzymałość ruchomych połączeń a tym samym niezawodność i długowieczność maszyn oraz mechanizmów, w których one są wykorzystywane. U wiodących światowych producentów obrabiarek wynoszą np. w firmach japońskich budujących obrabiarki do 60-75%. Charakterystyki dokładnościowe wielu rodzajów maszyn technologicznych określone są przez dokładność zapewnienia wymaganego przestrzennego położenia ich organów wykonawczych. W przypadku obrabiarek skrawających dokładność części zależy od dokładności utrzymania w procesie obróbki wzajemnego położenia narzędzia i półfabrykatu, które są ogniwem zamykającym tzw. łańcucha wymiarowego [14, 15, 18].

W procesie sterowania maszyną technologiczną w przypadku ogólnym powinna być zapewniona konieczna dokładność odtworzenia w przestrzeni wymaganych trajektorii ruchu jego elementów wykonawczych. Odchylenie wzajemnego przestrzennego położenia elementów wykonawczych można przedstawić za pomocą wektora

$$\Delta R(t) = [\Delta R_i(t)], \quad i = \{x, y, z\}. \quad (1.1)$$

gdzie  $\Delta R_i(t)$  - projekcja wektora  $\Delta R(t)$  w przyjętym układzie współrzędnych.

Odpowiednio, podczas sterowania układem dynamicznym, rozumie się połączenie układu technologicznego i realizowanego w nim procesu technologicznego, konieczne jest w warunkach działania zakłócenia, zapewnienie ograniczenia o pewien funkcjonal  $\Delta R_i(t)$ .

$$K_r \{\Delta R_i(t)\} \leq K_{ri}.$$

Ważnym jest, aby postać funkcjonału  $K_r$  wybierać z uwzględnieniem charakteru oddziaływań dynamicznych. Podczas oddziaływań stacjonarnych ograniczenia mogą być nałożone na wartość średniokwadratową składowych wektora  $\Delta R_i(t)$ , a podczas zakłóceń skokowych – na maksimum modułu odchylenia. W niniejszym złożonym problemie zapewnienia jakości w zależności od konkretnych warunków funkcjonowania urządzenia można wyodrębnić pewne podproblemy badawcze.

W niektórych rodzajach urządzeń technologicznych, w tym wytaczarek współrzędnościowych, współrzędnościowych obrabiarek do wiercenia głębokich otworów, maszynach pomiarowych, przede wszystkim powinien być rozwiązany problem wprowadzenia elementów wykonawczych do uzyskiwania

wymaganego położenia przestrzennego. Osiągana jakość pozycjonowania zależy od właściwości dynamicznych obiektu i napędu elektrycznego. Możliwości jej podwyższenia, szczególnie dla dokładnych obrabiarek współrzędnościowych, maszyn pomiarowych, w znacznej mierze jest utrudnione obecnością istotnych nieliniowości, które występują przy pozycjonowaniu obiektu do wymaganych współrzędnych. Badaniom problemów podwyższenia dokładności dynamicznej obrabiarek skrawających i maszyn współrzędnościowych pomiarowych, pracujących w systemach pozycjonowania w warunkach tarcia mieszanego poświęcone są prace Ravvy. G., Pałki K., Lysowa V., Galickowa S. i innych. Szereg specyficznych cech ma problem podwyższenia dokładności obrabiarek skrawających na, których realizuje się cykl obróbki wgłębniej. Podczas szlifowania wgłębnego wymiar obrabianej części jest określany przez końcowy punkt trajektorii wzajemnego ruchu ściernicy i części, a sam proces przebiega w warunkach sztywnego ograniczenia współrzędnych fazowych, uwarunkowanych własnościami procesu technologicznego.

Problemy sterowania układem dynamicznym obrabiarek do szlifowania otworów w znacznym stopniu były rozwiązane w pracach przeprowadzonych w Państwowym Uniwersytecie Technicznym w Samarze pod kierunkiem prof. V. Michelkievicha [57] i innych [22, 94]. Prace w zakresie optymalizacji procesu szlifowania otworów w procesie sterowania układem dynamicznym są intensywnie prowadzone w Instytucie Technologii i Obrabiarek (IFW) Uniwersytetu Technicznego w Hanowerze [50].

W przypadku tokarek, tokarek karuzelowych i szlifierek, na których realizuje się procesy toczenia wzdłużnego i szlifowania, w procesie sterowania powinna być zapewniona konieczna dokładność odtworzenia w przestrzeni wymaganej trajektorii ruchu narzędzia skrawającego względem osi przedmiotu obrabianego. Problemowi podwyższenia dokładności i efektywności sterowania układem dynamicznym tokarek i szlifierek omawianego typu poświęcone są prace B. Bazrova, J. Solomenceva, O. Drachova i innych naukowców [14, 15, 18, 36, 58, 80], a także badania, których wyniki przedstawione zostały w niniejszej monografii. Procesowi funkcjonowania urządzeń technologicznych towarzyszą różnorodne oddziaływania zakłócające, w których dla obrabiarek zwykle przyjmuje się losowy proces stacjonarny nałożony na losową funkcję liniową [22]. W tym przypadku w zakłóceniu można wyodrębnić składowe wolno-zmienne i szybkozmienne. Pierwsza składowa jest związana przede wszystkim z odkształceniami cieplnymi układu technologicznego i zużyciem narzędzia skrawającego. Wprowadzane przez te zakłócenia błędy w cyklu obróbki części, z reguły, są niewielkie i mogą być okresowo kompensowane przez wniesienie poprawek w tzw. wymiar nastawienia statycznego [14, 15, 18, 80]. Składowa szybkozmienna błędu wynika przede wszystkim ze zmian naddatku na obróbkę, a także wywoływana jest zróżnicowaniem twardości materiału obrabianego, przypadkowymi drganiami układu skrawania itp. Podstawową i najbardziej efektywną metodą kompensowania wysokoczęstotliwościowej składowej błędu obróbki jest sterowanie odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego obrabiarki.

Dążenie do obniżenia zużycia materiału oraz funkcjonalne przeznaczenie części uwarunkowały szerokie zastosowanie tzw. części o małej sztywności i wysokiej dokładności. Do uprzednio wymienionych części zaliczane są wały, osie, półfabrykaty kół zębatach, elementy przyrządów mechaniki precyzyjnej, wały skrzętne i giętne, osie przyrządów nawigacyjnych, resory, śruby, wkręty, wały-wirniki, cienkościenne korpusy i pokrywy mikromaszyn elektrycznych, jak pokazuje analiza [91], stanowią znaczny procent wyrobów w budowie maszyn precyzyjnych, w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Przy czym ok. 34% z nich to części obrotowe i są one obrabiane na tokarkach i szlifierkach.

Tradycyjne metody podwyższania jakości obróbki części o małej sztywności oparte na wprowadzeniu obróbki wielozabiegowej, obniżeniu intensywności warunków skrawania, zastosowaniu podtrzymek, ręcznej obróbki wykańczającej, prowadzą do istotnego obniżenia wydajności.

W elastycznych systemach produkcyjnych (ESP) ważnym zagadnieniem jest zapewnienie rezerw dokładności technologicznej. Możliwości zapewnienia ich w tradycyjnych warunkach rozwoju budowy obrabiarek w znacznym stopniu uległy wyczerpaniu. Wymagało to poszukiwania nowych efektywnych metod rozwiązań, co doprowadziło do opracowania tzw. „układów sterowania adaptacyjnego obrabiarek”.

Idea sterowania odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego obrabiarek skrawających była po raz pierwszy przedstawiona w latach 60-tych XX wieku przez prof. B. Bałakusza a jej aspekty technologiczne były w znacznym stopniu rozwiązywane w pracach stworzonej przez niego szkoły naukowej [14, 15, 18, 58, 80, 91, 92, 94].

Dodatkowym czynnikiem obniżającym niezawodność dokładnościową precyzyjnego urządzenia technologicznego są odkształcenia sprężyste układu technologicznego wywoływane działaniem zakłóceń kinematycznych ze strony fundamentu. Przy czym, dla obrabiarek precyzyjnych, kompleksów pomiarowych przeznaczonych do regulacji i atestowania przyrządów nawigacyjnych i optycznych w stacjach kosmicznych a także innych urządzeń specjalistycznych, wysoka wibroaktywność fundamentów może doprowadzić do niedopuszczalnego obniżenia charakterystyk dokładnościowych. Temu kierunkowi badań poświęcona jest duża ilość publikacji i jako taki nie jest poruszany w ramach niniejszej monografii.

Obok zadania podwyższenia niezawodności dokładnościowej oprzyrządowania technologicznego może być postawione zadanie zwiększenia wydajności realizowanego na nim procesu technologicznego. Wobec tego, obrabiarki skrawające przyjęto dzielić na produkcyjne, przeznaczone do zapewnienia wysokich wskaźników wydajności i precyzyjne, których podstawowe zadanie polega na osiągnięciu wysokich charakterystyk dokładnościowych obrabianych części. Ten podział nakłada określone specyficzne cechy na kryteria optymalizacji i konsekwentnie na metodykę syntezy układu automatycznego sterownia. Jednak układ sterowania obrabiarkami produkcyjnymi w wielu przypadkach budowany jest jako układ stabilizacji

parametrów siłowych procesu skrawania i związanych z nimi odkształceń sprężystych układu technologicznego. Powoduje to znaczną spójność problemu sterowania odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego oprzyrządowania technologicznego.

W dalszej części zostanie dokładniej omówiony aktualny stan problemu w dziedzinie projektowania i realizacji układów sterowania automatycznego. Umownie wyodrębniono wśród nich układy przeznaczone przede wszystkim do podwyższenia niezawodności dokładnościowej oprzyrządowania i systemy pozwalające optymalizować proces technologiczny wg kryteriów ekonomicznych. Przeprowadzona zostanie także krótka analiza stanu problemu identyfikacji omawianych układów dynamicznych obrabiarek oraz urządzeń technologicznych.

## **1.2. Modele matematyczne układów dynamicznych obrabiarek i procesu skrawania**

Rozwiązanie problemu opracowania metod syntezy układu automatycznego sterowania układów dynamicznych obrabiarek i urządzeń technologicznych jest niemożliwe bez wnikliwego zbadania własności obiektu i opracowania modelu matematycznego, który adekwatnie odzwierciedla charakterystyki obiektu sterowanego. W ogólnym przypadku badanie charakterystyk dynamicznych układu technologicznego obróbki przeprowadza się w celu wykazania wpływu oddziaływań zakłócających i sterujących na wartość odkształceń sprężystych obrabianych przedmiotów w stanach ustalonych i przejściowych, tworzenia optymalnych lub kwaziopptymalnych algorytmów sterowania, pozwalających minimalizować błędy kształtu części.

Opracowanie modelu matematycznego obiektu sterowanego adekwatnego do obiektu rzeczywistego, jest niezbędne przy rozwiązywaniu problemu stabilności układu sterowania i syntezy członów korygujących wg wymaganych wskaźników jakości sterowania w stanach przejściowych. Należy zauważyć, że w podobnych układach wskaźniki jakości sterowania współrzedną wyjściową, za którą zwykle przyjmuje się odkształcenie sprężyste, bezpośrednio charakteryzują błędy kształtu części, spowodowane szybko zmieniającymi się zakłóceniami w postaci zmian naddatku na obróbkę oraz zmieniającymi się własnościami fizyko-mechanicznymi obrabianego materiału.

Wyniki badań statycznych i dynamicznych charakterystyk obiektu sterowania mogą być wykorzystane także przy tworzeniu bazy danych dla zautomatyzowanych systemów projektowania procesów technologicznych w celu organizacji projektowania zorientowanego na technologię.

Do chwili obecnej opracowano wiele analityczno-doświadczalnych modeli dynamicznych charakterystyk procesu skrawania, których struktura jest wynikiem analizy zjawisk fizycznych z zachodzących w czasie skrawania a wartości parametrów występujących w tych modelach są określane na podstawie badań eksperymentalnych.



Rozwiązanie problemu zapewnienia wymaganej dokładności i jakości obróbki utrudnia to, że w procesie obróbki przedmiot obrabiany, narzędzie i zespoły obrabiarki pozostając w ruchu względnym, tworząc skomplikowany dynamiczny układ technologiczny. Wcześniejsze, dokładne określenie jego zachowania, bez ukierunkowanych badań, jest praktycznie niemożliwe.

Dlatego przy kompleksowym rozwiązywaniu problemu sterowania dokładnością kształtowania części niezbędne jest również uwzględnianie własności dynamicznych układu technologicznego. Badania charakterystyk układu dynamicznego i metody ich matematycznego opracowania zostały przedstawione w pracach [30, 41, 49, 54, 57, 61, 78, 94, 100].

Analiza prac poświęconych drganiom samowzbudnym przy skrawaniu pozwala sformułować siedem podstawowych hipotez wyjaśniających przyczyny ich powstawania i podtrzymywania. Możliwe jest to dzięki temu, że:

1. obniżają się wartości siły tarcia lub siły skrawania w zależności od prędkości;
2. wartości siły skrawania zmieniają się na skutek okresowego wzajemnego oddziaływania narzędzia z umocnionymi i nieumocnionymi wiórami obrabianego materiału;
3. podczas drgań zmienia się rzeczywista geometria ostrza;
4. przy zmianach przekroju warstwy skrawania opóźnia się siła skrawania;
5. siła skrawania jest zależna od względnej współrzędnej narzędzia i półfabrykatu w warunkach układu z dwoma stopniami swobody (zasada więzów współrzędnościowych);
6. w procesie skrawania zachodzi zjawisko tworzenia i odrywania się narostu na ostrzu;
7. podczas skrawania zachodzi zjawisko skrawania „po śladzie” [27, 34, 41, 45, 61, 97 – 99].

W roku 1963 Kudinov V. zaproponował model dynamicznej charakterystyki procesu skrawania (CDPS), który przedstawił w [48]. Ze wszystkich znanych modeli ten był, bodajże, najczęściej cytowany w Polsce. Kudinov uznał, że w czasie występowania drgań samowzbudnych, zmiany sił skrawania są wynikiem zmian grubości warstwy skrawanej i zmian geometrii ostrza. W dalszej części swych wywodów Kudinov stwierdził, iż przy częstotliwości drgań nie przekraczającej 500Hz i przy ostrym narzędziu wpływ zmian geometrii ostrza można pominąć. Drgania samowzbudne mają z reguły niższą częstotliwość, a więc w celu uproszczenia wyводу wpływ ten pominięto już w fazie formułowania początkowych założeń dla modelu skrawania.

Omówiony fragment rozważań Kudinova oparty był na analizie powstawania wióra w chwili rozpoczynania skrawania (przy skokowej zmianie grubości warstwy skrawanej). Założył przy tym, że prędkość przyrostu długości kontaktu wióra z powierzchnią natarcia jest stała. Powstawanie wióra przy skokowej zmianie grubości warstwy skrawanej różni się diametralnie od jego kształtowania w trakcie drgań samowzbudnych, kiedy to maksymalne nachylenie toru narzędzia w stosunku do kierunku nominalnej prędkości

skrawania lub pochylenie zewnętrznej powierzchni skrawania nie przekracza kąta przyłożenia narzędzia tj. około  $6^0$ . W takich warunkach długość kontaktu wióra z powierzchnią natarcia może zmieniać się wokół pewnej wartości średniej. W dalszej części przedstawiono analizę podstawowych modeli dynamiki procesu skrawania opracowanych przez różnych autorów.

Model matematyczny dynamiki procesu skrawania opracowany dla toczenia pojedynczym ostrzem może być przez analogię adaptowany do innych kinematycznych odmian skrawania (np. do frezowania czołowego). Dlatego wszelkie prace, zarówno analityczne jak i doświadczalne, których celem jest opracowanie elementarnych modeli matematycznych skupiają się na badaniu zjawisk związanych z tworzeniem wióra w procesie toczenia, przy czym w wielu przypadkach jest to toczenie swobodne.

Zakłada się, że skrawanie pojedynczym ostrzem wyklucza powstawanie w umownym punkcie styku narzędzia i przedmiotu obrabianego momentu siły, zatem wszystkie wyrazy macierzy  $W'_{ps}(s)$ , które opisują zmiany momentu siły od zmian parametrów skrawania, są równe zeru. Oznacza to, że dolna połowa macierzy  $W'_{ps}(s)$  ma wartości zerowe [100]:

$$W'_{ps_{ij}}(s) = 0 \text{ dla } i=4,5,6; j=1, \dots, 6$$

W kierunku osi  $x'_1$  drgania wywołują zmiany grubości warstwy skrawanej, których efektem jest zjawisko regeneracji śladu.

Praktyczne wykorzystanie modelu wymaga jedynie określenia współczynników sztywności właściwej skrawania  $k_{si}$  ( $i=1,2,3$ ) w przypadku każdej z trzech składowych siły skrawania. Współczynniki te wyznacza się doświadczalnie badając zależność składowych siły skrawania od parametrów skrawania. Wspomniane wyżej składowe siły skrawania można wyrazić za pomocą zależności:

$$\begin{bmatrix} F_f \\ F_p \\ F_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{fo} + k_{sf}b_0\Delta a \\ F_{po} + k_{sp}b_0\Delta a \\ F_{co} + k_{sc}b_0\Delta a \end{bmatrix},$$

gdzie:  $F_f, F_p, F_c$  - odpowiednio posuwowa odporowa i główna składowa siły skrawania;  $F_{fo}, F_{po}, F_{co}$  - średnie wartości składowych siły skrawania;  $\Delta a$  - zmiana grubości warstwy skrawanej;  $b_0$  - szerokość warstwy skrawanej;  $k_{sf}, k_{sp}, k_{sc}$  - współczynniki sztywności właściwej procesu skrawania odniesione do odpowiednich składowych siły.

Zdefiniowane w ten sposób współczynniki sztywności właściwej skrawania można wyrazić za pomocą wzoru:

$$\begin{bmatrix} k_{sf} \\ k_{sp} \\ k_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{f1-1}(1-\chi_f)\left(\frac{a_1}{a_0}\right)^{\chi_f}\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^{g_f} \\ C_{p1-1}(1-\chi_p)\left(\frac{a_1}{a_0}\right)^{\chi_p}\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^{g_p} \\ C_{c1-1}(1-\chi_c)\left(\frac{a_1}{a_0}\right)^{\chi_c}\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^{g_c} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} k_{s1} \\ k_{s2} \\ k_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \kappa_r & \cos \kappa_r & 0 \\ -\cos \kappa_r & \sin \kappa_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{sf} \\ k_{sp} \\ k_{sc} \end{bmatrix}$$

gdzie  $\kappa_r$  - kąt przystawienia.

Zależność określająca współczynniki sztywności właściwej skrawania w układzie współrzędnych odniesienia  $x_1', x_2', x_3'$  jest następująca:

$$\begin{bmatrix} k_{s1} \\ k_{s2} \\ k_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{f1-1}(1-\chi_f)\left(\frac{a_1}{a_0}\right)^{\chi_f}\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^{g_f} \sin \kappa_r + C_{p1-1}(1-\chi_p)\left(\frac{a_1}{a_0}\right)^{\chi_p}\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^{g_p} \cos \kappa_r \\ -C_{f1-1}(1-\chi_f)\left(\frac{a_1}{a_0}\right)^{\chi_f}\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^{g_f} \cos \kappa_r + C_{p1-1}(1-\chi_p)\left(\frac{a_1}{a_0}\right)^{\chi_p}\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^{g_p} \sin \kappa_r \\ C_{c1-1}(1-\chi_c)\left(\frac{a_1}{a_0}\right)^{\chi_c}\left(\frac{v_1}{v_0}\right)^{g_c} \end{bmatrix}$$

Elementarny model matematyczny dynamiki procesu skrawania pojedynczym ostrzem skrawającym (mając współczynniki oporu właściwego skrawania) można wyrazić jako:

$$W'_{PS}(s) = b_0 \begin{bmatrix} k_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{s3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (1 - e^{-s\tau})$$

W dalszej części zostaną przedstawione elementarne modele dynamiki procesu skrawania opracowane przez innych badaczy.

**Model Albrechta** [17] – uwzględnia wpływ na proces skrawania: naprężeń stycznych w płaszczyźnie ścinania, kąta tarcia wióra o powierzchnię natarcia, kąta ścinania oraz kąta natarcia. Model ten przedstawia się w postaci:

$$W_{PS}'(s) = b_0 \begin{bmatrix} k_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{s3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (1 - e^{-s\tau})$$

przy czym  $k_{s1}, k_{s3}$  - współczynniki sztywności właściwej procesu skrawania swobodnego:

$$k_{s1} = \frac{\tau \sin(\eta_0 - \gamma_0)}{\sin \Phi_0 \cos(\Phi_0 - \gamma_0 + \eta_0)},$$

$$k_{s3} = \frac{\tau \cos(\eta_0 - \gamma_0)}{\sin \Phi_0 \cos(\Phi_0 - \gamma_0 + \eta_0)},$$

gdzie:  $\tau$  - naprężenia statyczne w płaszczyźnie ścinania,  $\eta_0$  - średnie wartości kąta tarcia wióra o powierzchnie natarcia,  $\Phi_0$  - kąt ścinania,  $\gamma_0$  - kąt natarcia.

Kolejny model, **model Dasa-Tobiasa** [26] (jest to model skrawania swobodnego adaptowany do skrawania nieswobodnego) przyjmuje następującą postać:

$$W_{PS}'(s) = b_0 \left( \begin{bmatrix} k_{s1}(1+T_{p1}s) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{s3}(1-T_{p3}s) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{s3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{-s\tau} \right)$$

przy czym  $k_{s1}, k_{s3}$  - współczynniki sztywności właściwej skrawania swobodnego:

$$k_{s3} = \frac{\sigma_s}{\sin \Phi_0}; \quad k_{s1} = k_{s3} = \frac{D \cos \Phi_0 - 1}{D \sin \Phi_0},$$

natomiast:  $T_{p1}, T_{p3}$  - stałe czasowe wyznacza się z zależności:

$$T_{p1} = \frac{k_{s3}}{k_{s1}} \frac{a_0}{v_0}; \quad T_{p3} = \frac{k_{s1}}{k_{s3}} \frac{a_0}{v_0}; .$$

Pozostałe wielkości wyznacza się z następujących zależności:

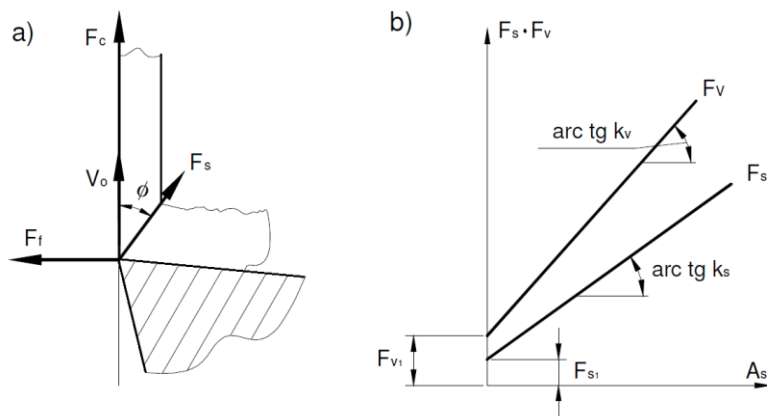
$$D = \frac{\sigma_s}{\tau}; \quad \Phi_0 = 45^\circ + \frac{1}{2}(\gamma_0 - \eta_0); \quad \eta_0 = \arctg(\mu_0),$$

gdzie:  $D$  – tzw. uniwersalny wskaźnik obrabialności materiału (wielkość stała dla określonego gatunku),  $\sigma_s$  – stosunek głównej składowej siły skrawania do pola powierzchni płaszczyzny ścinania

$$(\sigma_s = F_c / A_s),$$

$\tau$  – naprężenia styczne w płaszczyźnie ścinania,  $\mu_0, \eta_0$  – odpowiednio średnie wartości współczynnika tarcia i kąta tarcia wióra o powierzchnię natarcia,  $\Phi_0$  – kąt ścinania,  $\gamma_0$  – kąt natarcia.

W roku 1967 Das i Tobias [26] opublikowali model CDPS, w którym zmienne składowe siły skrawania wyznaczane są na podstawie wyników badań prowadzonych przy skrawaniu statycznym (bez drgań). Stwierdzili oni, że w stanie ustalonym główna siła skrawania  $F_c$  i siła ścinania  $F_s$  są proporcjonalne do pola powierzchni płaszczyzny ścinania  $A_s$  (rys. 1.1).



**Rys. 1.1. Podstawowe założenie modelu Dasa i Tobiasa: a) rozkład sił skrawania; b) uniwersalny wykres skrawalności**

Rok później Knight opublikował pracę [44, 45] poświęconą analizie modelu Dasa i Tobiasa, w której wykazał, że zarówno  $k_s$  i  $k_w$  (rys.1.1) jak i uniwersalny wskaźnik skrawalności  $D$  nie są stałymi materiałowymi lecz zależą od prędkości skrawania i kąta natarcia. Ponadto znaczny wpływ na  $k_w$  i  $D$  ma zużycie na powierzchni przyłożenia, które nie zmieniając sił w płaszczyźnie ścinania ( $k_s$ ) powoduje wzrost siły  $F_c$ .

Model Dasa i Tobiasa został zgodnie z omówionymi wyżej uwagami uściślony przez Dasa, Knighta i Sadeka. Stwierdzili, że mimo wprowadzenia poprawek występują niezgodności granicy stabilności obliczonej na jego podstawie, z otrzymaną doświadczalnie. Wynika to, zdaniem autorów, z nie uwzględnienia zmian kątów natarcia i przyłożenia w kinetycznym układzie odniesienia, zmian grubości warstwy skrawanej pochodzących od zmian kierunku skrawania oraz pochylenia zewnętrznej powierzchni skrawania. Mimo omówionych niedoskonałości model Dasa i Tobiasa zdobył sobie uznanie i był stosowany przez wielu badaczy.

Model **Kudinova** [49] uwzględnia wpływ kąta ścinania, kąta natarcia, średniej wartości współczynników tarcia i kąta wióra o powierzchnię natarcia a także naprężeń stycznych w płaszczyźnie ścinania. Model ten podano w następującej postaci:

$$W'_{PS}(s) = b_0 \begin{bmatrix} \frac{k_{s3}\mu_0}{1+T_{w1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{s3}}{1+T_{w3}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (1 - e^{-s\tau})$$

przy czym:  $k_{s3}$  - współczynnik sztywności właściwej skrawania swobodnego wyznaczony eksperymentalnie tak jak dla modelu proporcjonalnego  $T_{w1}, T_{w3}$  - stałe czasowe wyznaczono ze wzorów:

$$T_{w3} = \frac{m}{n} \frac{a_0 k_{sp0}}{v_0}, \quad T_{w1} = \left( 1 + \frac{1}{\mu_0 k_{sp0}} \right) \frac{a_0 k_{sp0}}{v_0},$$

gdzie:  $m/n$  – współczynnik; w warunkach zmiennej grubości warstwy skrawania przyjmuje wartości z przedziału  $(1 \div 1,5)$ ,  $a_0$  – średnia grubość warstwy skrawania,  $k_{sp0}$  – średnia wartość współczynnika spęczenia wióra,  $v_0$  – średnia wartość prędkości skrawania,  $\mu_0$  – średnia wartość współczynnika tarcia wióra o powierzchnię natarcia.

**Model Grasso-Noto La Diega-Passannanti** [38] przyjmuje następującą postać:

$$W'_{PS}(s) = b_0 \left( \begin{bmatrix} k_{s1}(1+T_{p1}s) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{s2}(1+T_{p2}s) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{s3}(1+T_{p3}s) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{s3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{-s\tau} \right)$$

przy czym  $k_{s1}, k_{s2}, k_{s3}$  - współczynniki sztywności właściwej skrawania wyznaczono ze wzorów:

$$k_{s1} = \frac{1}{\cos\Phi_0} K_1 \sin\kappa_r + \frac{1}{\cos\Phi_0} K_2 \cos\kappa_r, \\ k_{s2} = \frac{1}{\cos\Phi_0} K_1 \cos\kappa_r + \frac{1}{\cos\Phi_0} K_2 \sin\kappa_r, \quad k_{s3} = \frac{1}{\cos\Phi_0} K_3.$$

Stałe czasowe  $T_{p1}, T_{p2}, T_{p3}$  wyznacza się ze wzorów:

$$T_{p1} = T_{p2} = \frac{[M + BK a_0^{-\delta}] a_0 \cos \eta_*}{K_2 v_0 \cos(\eta_* - 90^\circ + \kappa_r)}; \quad T_{p3} = \frac{[D + EK a_0^{-\delta}] a_0}{K_3 v_0 \cos(\eta_* - 90^\circ + \kappa_r)},$$

przy czym:

$$K_1 = [D + E(1 - \delta) K a_0^{-\delta}] \sin \eta_*; \quad K_2 = [D + E(1 - \delta) K a_0^{-\delta}] \cos \eta_* \\ K_3 = M + B(1 - \delta) K a_0^{-\delta},$$

gdzie  $\eta_*$  – kąt między płaszczyzną posuwu i kierunkiem splotu wióra,  $M, B, D, E, K, \delta$  – współczynniki aproksymacji statycznych charakterystyk procesu skrawania przy czym funkcje aproksymujące mają postacie:

$$\frac{F_c}{A_0} = M + B \frac{T_{N0}}{A_0}; \quad \frac{F_{fp}}{A_0} = \frac{\sqrt{F_f^2 + F_p^2}}{A_0} = D + E \frac{T_{N0}}{A_0}; \quad \frac{T_{N0}}{A_0} = K a_0^{-\delta},$$

gdzie:  $F_f, F_p, F_c$  – składowe siły skrawania (posuwowa, odporowa i główna),  $T_{N0}$  – średnia wartość siły tarcia wióra o powierzchnię natarcia,  $A_0$  – średnia wartość pola przekroju warstwy skrawanej,  $\kappa_r$  – kąt przystawienia.

Niemal wszystkie znane modele CDPS, odnoszą się do toczenia swobodnego. Model Dasa i Tobiasa był stosowany także dla skrawania nieswobodnego np. [86], przy czym parametry CDPS były odnoszone do płaszczyzny przekroju głównego. Jest to znaczne uproszczenie. W roku 1979 Grasso, Noto La Diega i Passannanti [38] podjęli próbę przystosowania modelu Dasa i Tobiasa do skrawania wzdłużnego (nieswobodnego). Zdaniem autorów podstawowym parametrem charakteryzującym zarówno skrawanie statyczne jak i dynamiczne jest stosunek siły tarcia wióra o powierzchnię natarcia do pola przekroju warstwy skrawanej.

W **modelu Jemieliaka** uwzględnia się średnią wartość prędkości skrawania, kąt przystawienia, średnią wartość kąta ścinania, a także średnie wartości statycznej siły skrawania przypadające na jednostkę szerokości warstwy skrawanej [32, 33]:

$$W_{PS}^I(s) = \begin{bmatrix} \sin \kappa_r & \cos \kappa_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\cos \kappa_r & \sin \kappa_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T W_{PS}^*(s) = \begin{bmatrix} \sin \kappa_r & \cos \kappa_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\cos \kappa_r & \sin \kappa_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W_{PS}^*(s) = b_0 \begin{bmatrix} k_{sf} \sin \kappa_r (1+T_{ff}s) & k_{sf} \cos \kappa_r (1+T_{fp}s) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{sp} \sin \kappa_r (1+T_{pf}s) & k_{sp} \cos \kappa_r (1+T_{pp}s) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{sc} \sin \kappa_r (1+T_{cf}s) & k_{sc} \cos \kappa_r (1+T_{cp}s) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} +$$

$$- \begin{bmatrix} k_{sf} \sin \kappa_r & k_{sf} \cos \kappa_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{sp} \sin \kappa_r & k_{sp} \cos \kappa_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{sc} \sin \kappa_r & k_{sc} \cos \kappa_r & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} e^{-s\tau},$$

gdzie:  $k_{sf}, k_{sp}, k_{sc}$  – współczynniki sztywności właściwej procesu skrawania swobodnego wyznaczone eksperymentalnie, odniesione do poszczególnych składowych siły skrawania,  $T_{ff}, T_{pf}, T_{cf}, T_{fp}, T_{pp}, T_{cp}$  – stałe czasowe, które wyznaczono z poniższych zależności:

$$T_{ff} = \frac{a_0}{v_0} \frac{1}{\operatorname{tg} \Phi_0} + \frac{1}{k_{sf} v_0 \sin \kappa_r} (-e_{ff} + k_{bc}),$$

$$T_{pf} = \frac{a_0}{v_0} \frac{1}{\operatorname{tg} \Phi_0} - \frac{1}{k_{sp} v_0 \sin \kappa_r} e_{pf},$$

$$T_{cf} = \frac{a_0}{v_0} \frac{1}{\operatorname{tg} \Phi_0} + \frac{1}{k_{sc} v_0 \sin \kappa_r} (-e_{cf} + k_{bf}),$$

$$T_{fp} = \frac{a_0}{v_0} \frac{1}{\operatorname{tg} \Phi_0} + \frac{1}{k_{sf} v_0 \cos \kappa_r} e_{fp},$$

$$T_{pp} = \frac{a_0}{v_0} \frac{1}{\operatorname{tg} \Phi_0} + \frac{1}{k_{sp} v_0 \cos \kappa_r} (-e_{pp} + k_{bc}),$$

$$T_{cp} = \frac{a_0}{v_0} \frac{1}{\operatorname{tg} \Phi_0} + \frac{1}{k_{sc} v_0 \cos \kappa_r} (-e_{cp} - k_{bp}),$$

gdzie:  $a_0$  – średnia grubość warstwy skrawanej,  $v_0$  – średnia wartość prędkości skrawania,  $\kappa_r$  – kąt przystawienia,  $\Phi_0$  – średnia wartość kąta ścinania,  $e_{ij}$  – współczynnik nachylenia stycznej do wykresu funkcji opisującej zależność i-tej składowej siły skrawania przypadającej na jednostkę szerokości warstwy skrawanej od zmian kąta natarcia i położenia związanych z obrotem narzędzia wokół osi odniesienia związanej z j-tą składową siły,  $k_{bf}, k_{bp}, k_{bc}$  – średnie wartości statycznej siły skrawania przypadające na jednostkę szerokości warstwy skrawanej.



**Model uzupełniający Zarsa [109]** (uwzględnia wpływ zmian prędkości skrawania na zmiany składowych sił):

$$W'_{PS}(s) = b_0 \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{e_{z1}s}{1+T_zs} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{e_{z3}s}{1+T_zs} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

przy czym  $e_{z1}, e_{z3}$  - współczynniki nachylenia stycznych do wykresu funkcji opisującej zależność składowych siły przypadających na jednostkę szerokości warstwy skrawanej od prędkości skrawania,  $T_z$  - stała czasowa wyznaczona ze wzoru:

$$T_z = \frac{k_{sp0}}{3v_0}$$

gdzie  $k_{sp0}$  - średnia współczynnika spęczenia wióra,  $v_0$  - średnia wartość prędkości skrawania.

Ogólny zapis modelu matematycznego dynamiki procesu skrawania ma postać:

$$W'_{PS}(s) = W'_P(s) - W'_{P\tau}(s)e^{-s\tau}$$

$$W'_P(s) = W'_{P\tau}(s) = b_0 \begin{bmatrix} k_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{s3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

**Inne modele CDPS.** W poprzednich punktach omówiono najbardziej charakterystyczne modele CDPS. W dalszej części pokrótce zostaną przedstawione inne modele. Najprostszy model CDPS pozwalający na uwzględnienie najważniejszych mechanizmów powstawania drgań samowzbudnych jakimi są sprzężenie przez przemieszczenie i reprodukcja drgań wywodzi się ze wzoru podanego przez Hahna [40]:

$$F_{xd} = -K_{xd}(x_t - x_T)$$

gdzie  $K_{xd} = \partial F_f / \partial a$  - pochodna zależności  $F_f(a)$  określona w punkcie pracy tj. dla nominalnej grubości warstwy skrawania.

Model Hahna jest bardzo uproszczony, ponieważ w rzeczywistości obok sztywności występuje także tłumienie siły skrawania, spowodowane zmianami geometrii ostrza i kierunku skrawania. W większości praktycznych przypadków tłumienie to może być jednak pominięte.

Model matematyczny dynamicznego układu OUPN w postaci wzoru Hahna jest dobrym narzędziem do badania jego stabilności w związku ze zjawiskiem obróbki po śladzie. Z wzoru tego wynika, że o stabilności decyduje dynamiczna sztywność siły posuwowej  $K_{xd}$ . W związku z liniową zależnością między współczynnikiem  $K_{xd}$  a szerokością warstwy skrawanej jako miarę stabilności przyjmuje się tzw. graniczną szerokość warstwy skrawanej  $b_{gr}$ , tzn. taką, powyżej której występują drgania samowzbudne. Zamiennie można przyjmować również graniczną głębokość skrawania.

Model ten jest najczęściej stosowany, szczególnie w pracach poświęconych analizie wpływu właściwości układu masowo - sprężysto - tłumiącego na stabilność obróbki przy prędkościach skrawania przekraczających ok. 100m/min. (np. [71, 104, 105] i in.) Nie umożliwia on jednakże prognozy znanego zjawiska wzrostu granicy stabilności przy niskich prędkościach skrawania [70], co wynika z pominięcia tłumienia procesu skrawania, tj. składników zmiennej składowej siły skrawania zgodnej w fazie z prędkością drgań  $x_t$ .

Model Tobiasa i Fishwicka [98] był pierwszym ujęciem tematu, w którym starano się uwzględnić tłumienie procesu skrawania. Autorzy podjęli próbę doświadczalnego wyodrębnienia wpływu zmian grubości warstwy skrawanej, prędkości wnikania narzędzia w materiał i prędkości obrotowej wrzeczona na zmienne składowe sił skrawania. Model ten ma jednak obecnie znaczenie tylko historyczne.

Eliasberg M. E. [30, 31] przedstawił model oparty na założeniu, że przy skrawaniu pewnych materiałów np. stali, nad krawędzią skrawającą okresowo pojawia się szczelina wyprzedzająca. Kudinow V. A. [49] analizując wyniki badań wykonanych przez Eliasberga M. E. stwierdził, że Eliasberg M. E. błędnie uznał narost obserwowany na zdjęciach za szczelinę wyprzedzającą. Zgodnie ze współczesnym stanem wiedzy o procesie powstawania wióra, rodzaj pęknięcia czy szczeliny wyprzedzającej może pojawić się jedynie w szczególnych warunkach skrawania - np. przy obróbce materiałów bardzo kruchych [103].

Albrecht na podstawie opracowanego przez siebie modelu procesu skrawania statycznego [17], zaproponował model CDPS oparty na założeniu, że siły skrawania zależą od pola powierzchni płaszczyzny ścinania, której położenie jest niezmiennie. Pole to określone jest przez chwilową grubość warstwy skrawanej. Model zaproponowany przez Zarsa [89] oparty jest na założeniu, że główną przyczyną powstawania drgań samowzbudnych jest opadająca charakterystyka siły skrawania w funkcji prędkości skrawania. Hipotezę tą na podstawie badań doświadczalnych obalili Knighta i Tobiasa [45]. Mimo iż statyczne siły skrawania zależą od prędkości skrawania, zależność ta nie jest bezpośrednia [49]: prędkość wpływa na temperaturę skrawania, temperatura zaś na właściwości materiału obrabianego decydujące o sile skrawania. Inercyjność

procesów cieplnych zachodzących w strefie skrawania istotnie osłabia wpływ szybkich zmian prędkości na siły, co sprawia, że wpływ ten można pominąć. Zars zaproponował także [90] połączenie swojego modelu z modelem Kudinowa przy uwzględnieniu reprodukcji drgań.

Wylimowanie niedoskonałości modelu Dasa i Tobiasa było celem prac podjętych przez Nigma, Sadeka i Tobiasa [59]. Opracowany przez nich nowy model opierał się na własnym opisie procesu skrawania statycznego [46] przedstawiającym zależność współczynnika spęczenia wióra i stosunek składowych siły skrawania  $F_t/F_c$  od kąta natarcia, prędkości skrawania i grubości warstwy skrawanej. Autorzy ci przyjęli, że w przypadku skrawania dynamicznego (przy występowaniu drgań samowzbudnych) należy stosować kinetyczny układ odniesienia nie tylko w stosunku do sił skrawania lecz również kąta natarcia i grubości warstwy skrawanej. Dodatkowym przyjętym tutaj założeniem jest współczynnik  $\varepsilon$ , określany na podstawie testów dynamicznych. Podważa to przydatność modelu w warunkach, w których wykonanie takich badań nie jest możliwe. Dysponując odpowiednią aparaturą można określić dynamiczną charakterystykę procesu skrawania doświadczalnie, bez posługiwania się modelami, dającymi z natury rzeczy wyniki przybliżone. Autorzy zastrzegli, że opracowany przez nich model dynamicznej charakterystyki procesu skrawania jest ważny w warunkach skrawania, w których nie występuje narost. Wyklucza to jego wykorzystanie w zakresie niższych prędkości skrawania, gdy tłumienie procesu skrawania, którego wyznaczenie jest najtrudniejsze, odgrywa największą rolę.

Sata, Inamura i Matsushima przystosowali model Dasa i Tobiasa do skrawania nieswobodnego. Uznali, że model ten można odnieść do nieskończonego wąskiego fragmentu szerokości warstwy skrawanej mierzonej prostopadłe do kierunku spływu wióra. Zmienne składowe sił skrawania (leżące w płaszczyźnie spływu wióra) wyznaczyli przez całkowanie sił elementarnych wzdłuż tego kierunku. Ich propozycja różni się zatem od modelu Grasso, Noto La Diega i Passannanti'ego jedynie sposobem wyznaczania pola przekroju warstwy skrawania, pozostając w gruncie rzeczy modelem płaskim.

Kaminskaja V. V. i Kusznir E. F. [41] postanowili zwiększyć dokładność modelu Kudinowa V. A. wychodząc z tych samych co Kudinov V. A. warunków równowagi wióra przy skrawaniu statycznym. Rozpatrywali przemieszczanie się tego wióra jako belki na podatnym podłożu. Zdaniem autorów, dynamiczną charakterystykę procesu skrawania można otrzymać, posługując się zależnościami opisującymi długość kontaktu wióra z powierzchnią natarcia. Nie przedstawili oni żadnych wyników badań doświadczalnych potwierdzających poprawność ich modelu. Model ten należy zatem traktować z daleko idącą rezerwą [54].

Model dynamicznej charakterystyki procesu skrawania opracowany przez Wu i Liu [107, 108] dla skrawania swobodnego opiera się na analizie wpływu drgań narzędzia względem przedmiotu obrabianego na współczynnik tarcia wióra o powierzchnię natarcia i współczynnik spęczenia wióra. Do uzyskania CDPS konieczne jest przeprowadzenie badania granicy stabilności. W swoich badaniach autorzy stosowali prędkości skrawania  $v > 180 \text{ m/min}$ .

Z dokonanej analizy literaturowej modeli dynamicznych charakterystyk procesu skrawania wynika, że różnią się znacznie od siebie zarówno co do podstawowych założeń jak i uzyskiwanych na ich podstawie wyników. Ponadto dotyczą skrawania swobodnego lub traktują skrawanie swobodne jako płaskie.

Istniejące modele powstały w wyniku badań zjawisk fizycznych procesu skrawania lub wielkości fizycznych w strefie skrawania i analizy występowania drgań samowzbudnych. Niektóre zależności mają hipotetyczny charakter i są trudne do potwierdzenia i wyznaczenia.

Różnice w przyjmowanych założeniach, dotyczących zjawisk towarzyszących procesowi skrawania, są jedną z głównych przyczyn rozbieżności między dynamicznymi charakterystykami procesu skrawania. Do chwili obecnej wykonywane są badania doświadczalne, których wyniki jakościowo są zgodne z modelami Kudinova i innych np. [78]

Modele matematyczne, w postaci analizowanej w tym rozdziale, nie mogą być bezpośrednio wykorzystywane do opracowania algorytmów sterowania automatycznego procesem obróbki w warunkach produkcyjnych. Spowodowane jest to tym, że nie opisują własności układu dynamicznego procesu skrawania i nie pozwalają obliczyć współczynników wzmocnień oraz stałych czasowych obiektu regulacji lub obiektu sterowania.

W Polsce największe osiągnięcia w określaniu dynamicznych charakterystyk procesu skrawania ma Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Opracowano tam dwa sposoby określania DCPS. Pierwszy sposób polega na klasycznym, doświadczalnym badaniu funkcji przejścia [34, 54]. Drugim sposobem określania dynamicznej charakterystyki procesu skrawania (DCPS) jest budowa analityczno-dynamicznych modeli, które umożliwiają określenie tej charakterystyki na podstawie właściwości mechanicznych materiału obrabianego i badań prowadzonych w warunkach skrawania ustalonego (statycznego) [33, 78].

Stan modelu dynamicznego w postaci stacjonarnego układu mechanicznego z  $n$ -stopniami swobody określa  $n$ -wymiarowy wektor uogólnionych współrzędnych  $G(t)$  [29]. Ruch układu odbywa się pod wpływem uogólnionych sił wymuszających tworzących wektor  $F(t)$ . Zwykle przyjmuje się, że siły oporu powstające w czasie ruchu są proporcjonalne do prędkości materialnych punktów, oprócz tego zakłada się, że układ posiada pełną dyssypację, tzn. dowolnemu ruchowi towarzyszy rozpraszanie energii. Przy podanych założeniach ruch układu opisuje równanie Lagrange'a drugiego rzędu:

$$A\ddot{G} + B\dot{G} + CG = F, \quad (1.2)$$

gdzie:  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – macierze kwadratowe współczynników metody najmniejszych kwadratów, wyrażających odpowiednio: energię kinetyczną, funkcję dyssypacyjną i energię potencjalną układu.

Przy przejściu do formy operatorowej zapisu równanie (1.2) przyjmuje postać:

i związek pomiędzy wyjściową i wejściową współrzędną układu mechanicznego może być przedstawiony za pomocą transmitancji operatorowej

W szczególnym przypadku modelu jednomasowego z jednym stopniem swobody transmitancja operatorowa będzie miała postać:

gdzie:  $m$  – masa obiektu,  $b$  – współczynnik tłumienia,  $k$  – współczynnik sztywności.

Do analizy charakterystyk dynamicznych układów sprężystych Kudinov [48] zastosował współrzędne modalne  $q_i$ . Pozwala to poszczególne elementy układu sprężystego opisać za pomocą układu równań drugiego rzędu:

gdzie:  $Q$  – zewnętrzna uogólniona siła działająca na układ sprężysty i reprezentująca działanie wejściowe,  $n_i$  – współczynnik przesunięcia siły zewnętrznej do współrzędnej normalnej.

Pozwala to opisać każdy element układu sprężystego za pomocą transmitancji operatorowej (TO) otrzymanej z przekształcenia jednego z równań.

Charakterystyka dynamiczna układu masowo-dysypacyjno-sprężystego (MDS) zwykle przedstawiana jest w postaci charakterystyki amplitudowo-fazowej. Uwzględnienie dynamicznej charakterystyki procesu skrawania komplikuje obliczeniową stronę procesu analizy. Najprostszymi formami omawianej charakterystyki mogą być charakterystyki uwzględniające:

- 28

$$(T_1^2 \cdot s^2 + T_2 \cdot s + 1) \cdot F_p(s) = K_{sk} \cdot g(s),$$

gdzie:  $g$  – współrzędna grubości wióra.

Klasyczna metoda analizy układów dynamicznych, w odniesieniu do dowolnych obiektów dynamicznych, przy opisywaniu złożonego urządzenia technologicznego napotyka na duże trudności obliczeniowe, które dodatkowo zwiększają się przy obecności w strukturze dynamicznej obrabiarki procesu skrawania, podczas realizacji którego powstają dodatkowe oddziaływania na układ dynamiczny.

Bardziej racjonalne i efektywne podczas opracowywania modeli matematycznych układów dynamicznych oprzyrządowania technologicznego są metody oparte na strukturalizacji obiektu, pozwalające przedstawić model złożonego układu w postaci wielopoziomowej konstrukcji wzajemnie powiązanych członów łączonych w podukłady równych poziomów. W metodzie agregatywnej w układzie dynamicznym urządzenia skrawającego można wyodrębnić dwa duże podukłady: podukład technologiczny za pośrednictwem, którego zapewnia się ruch formowania wióra i proces technologiczny zdejmowania nadkładu z obrabianego półfabrykatu.

Układ dynamiczny urządzenia technologicznego zawierający dużą liczbę ruchomo połączonych elementów i członów jest przykładem złożonego układu dynamicznego. Do badania tych układów szeroko wykorzystuje się specjalne metody takie jak: metoda oporów kompleksowych, metoda modeli bazowych i metoda impedancji lub ruchliwości [29].

Istota podanych metod sprowadza się do badania dynamiki rzeczywistych układów technologicznych lub układów lepko-sprężystych za pomocą dyskretnych modeli [89], w których wyodrębnione są elementy bezwzględnie stałe, będące nośnikami własności inercyjnych, oraz nieinercyjne elementy odkształcane, odzwierciedlające sprężyste, lepkie i plastyczne własności rzeczywistego obiektu. Własności układu technologicznego z dyskretnymi parametrami przedstawiane są jako zależność między siłą przyłożoną do elementu i wywoływanym przez tę siłę efektem kinematycznym – przesunięciem, prędkością lub przyspieszeniem.

W badaniach własności układów dynamicznych powszechnie stosuje się pojęcie podatności dynamicznej:

$$H(j\omega) = \frac{g(j\omega)}{F(j\omega)}$$

i sztywności dynamicznej:

$$J(j\omega) = \frac{F(j\omega)}{g(j\omega)}.$$

W odniesieniu do układu mechanicznego część rzeczywista równania zespolonego  $J(j\omega)$  charakteryzuje własności masowo-sprężyste układu, a część urojona określa jego własności dyssypacyjne.

Model matematyczny złożonego układu dynamicznego zawierający równoległe i szeregowo połączone człony, można przekształcić wykorzystując

znane reguły równoważenia. Równoważna sztywność dynamiczna i podatność dynamiczna przy równoległym połączeniu ogniów są opisywane odpowiednio:

$$J = \sum_{i=1}^m J_i, \quad H^{-1} = \sum_{i=1}^m H_i^{-1},$$

Przy połączeniu szeregowym:

$$J^{-1} = \sum_{i=1}^m J_i^{-1}, \quad H = \sum_{i=1}^m H_i.$$

Badaniu charakterystyk dynamicznych konkretnych układów technologicznych obrabiarek poświęconych jest wiele prac np. [28, 45, 50, 61]. W omawianym zagadnieniu można wyróżnić szereg zadań związanych z analizą lokalnych podukładów układu dynamicznego. W wielu pracach związanych z analizą badania układu masowo–dyssypacyjno–sprężystego (MDS) obrabiarki, z reguły rozpatrywany jest jeden z podukładów układu sprężystego: przedmiot obrabiany – opora lub narzędzie – suport, a model matematyczny sprowadza się do jedno lub dwu masowego modelu z różnymi stopniami swobody. Wpływ procesu skrawania na układ technologiczny w tym przypadku wyraża się wprowadzeniem zewnętrznej siły deterministycznej, która zmienia się zgodnie ze znaną regułą w funkcji czasu. Celem tworzenia takich modeli matematycznych jest teoretyczne określenie częstotliwości własnych drgań elementów układu MDS, częstotliwości drgań układu technologicznego i opracowanie metod ich aktywnego tłumienia [49, 61, 65, 67].

Istniejące konstrukcje dynamicznych tłumików drgań razem z układem MDS obrabiarki mogą być przedstawione jako modele jedno-, dwu- i trójmasowe układów drgających z odpowiadającymi im liczbami stopni swobody [91,112].

Istnieje opis matematyczny podobnego układu technologicznego w postaci modelu jednomasowego z trzema stopniami swobody. Jednakże przedstawione rozwiązanie tego problemu nie uwzględnia dynamicznych własności procesu skrawania, wzajemnego oddziaływania mas części i tłumika drgań.

W pracy [28] została zbadana eksperymentalnie struktura modelu układu sprężystego obrabiarki. Otrzymano opis matematyczny obiektu sterowania z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania elementów układu sprężystego w procesie skrawania, przedstawionego w postaci charakterystyki kwazistatycznej. Możliwość uwzględnienia zmieniających się parametrów przedmiotu obrabianego o małej sztywności w układach dynamicznych omówiono w pracy [112]. Oddano w niej cechy szczególne matematycznego opisu obiektu sterowania pod kątem wpływu oddziaływania zakłócającego, przy czym zmienne parametry zgodnie z metodą „zamrożonych” współczynników przedstawione są w postaci częściowo-liniowych funkcji. Jednocześnie uwzględniono cechy szczególne dodatkowych oddziaływań siłowych na układ technologiczny, wykorzystywanych do uzyskania stanu sprężystości odkształcalnego przedmiotu obrabianego o małej sztywności.

Podstawowymi pracami, w których poruszono zagadnienie prowadzenia

badan w oparciu o metody analitycznej identyfikacji i opisu matematycznego układu dynamicznego obrabiarek i przedstawiono model matematyczny jednego z możliwych oddziaływań sterujących w postaci prędkości posuwu wzdłużnego, są prace Protopopova [14,15].

Protopopov dla układów dynamicznych tokarek rozpatrzył różne schematy technologiczne obróbki, przy czym założył, że prędkość obrotowa części jest stała. Jako współrzędną wejściową przyjęto wielkość przemieszczenia noża w kierunku osiowym. Elementy układu sprężystego obrabiarki interpretowane są jako swoistego rodzaju wsporniki obciążone na końcach obciążeniem punktowym. Ich własności opisują odpowiadające im sztywności ekwiwalentne, które charakteryzują własności sprężyste układu technologicznego.

W przypadku, gdy w charakterze współrzędnej wejściowej obiektu przyjmuje się przemieszczenie wzdłuż osi X, a wyjściowej – odkształcenia sprężyste  $g_x$  układu dynamicznego względem tej samej współrzędnej, Protopopov sformułował transmitancję operatorową obiektu w postaci:

$$G(s) = \frac{g_x(s)}{x_w(s)} = -\frac{s \cdot T}{T \cdot s + 1},$$

uwzględniając, że prędkość posuwu wzdłużnego

$$v_f(t) = \frac{dx_w}{dt},$$

przekształca do postaci:

$$G_{st}(s) = \frac{g_x(s)}{v_f(s)} = -\frac{T}{T \cdot s + 1}, \quad (1.3)$$

$$\text{gdzie: } T = \frac{C_{p1}}{J_x}; C_{p1} = C_{f_x} \cdot b_1^{x_{fx}} \cdot v_c^{n_{fx}} \cdot K_{m_{fx}} \cdot K_1;$$

$C_{f_x}, x_{fx}, n_{fx}, K_{m_{fx}}, K_1$  - współczynniki empiryczne,  $v_c$  - prędkość skrawania,  $J_x$  - sztywność układu sprężystego względem współrzędnej  $x$ .

Zależność (1.3) stanowi funkcję przejścia (TO) obiektu względem oddziaływania sterującego. Przy zakłóceniu w postaci zmiany naddatku na obróbkę  $b_1$  otrzymano w tejże pracy następującą transmitancję operatorową obiektu:

$$G_z(s) = \frac{g_x(s)}{b_1(s)} = -\frac{s \cdot T}{T \cdot s + 1}, \quad (1.4)$$

$$\text{gdzie: } T = \frac{C_{p2}}{J_x}, C_{p2} = C_{f_x} \cdot v_c^{n_{fx}} \cdot K_{m_{fx}} \cdot K_1.$$

Przytoczone równania otrzymano z uwzględnieniem wyrażenia dla osiowej składowej siły skrawania:

$$F_f = C_{f_x} \cdot b_1^{x_{fx}} \cdot f^{y_{fx}} \cdot v_c^{n_{fx}} \cdot K_{m_{fx}} \cdot K_1,$$



Przy założeniach, że  $y_{fx} = 1$ , a prędkość skrawania, naddatek i własności obrabianego materiału są stałe, powyższą zależność zapisano w postaci:

$$F_f = C_{p1} \cdot f,$$

gdzie:  $f$  - posuw wzdłużny.

Do określenia transmitancji operatorowej na podstawie oddziaływania zakłócającego równanie siły skrawania przekształcono do postaci:

$$F_f = C_{p1} \cdot f \cdot b_1.$$

W ten sposób Protopopov otrzymał tylko cząstkowe modele matematyczne współrzędnej wyjściowej w postaci składowej osiowej odkształceń sprężystych. Oprócz tego, w uzasadnionych przypadkach wartość posuwu wzdłużnego wyznaczana była z równania:

$$f = K \frac{dx_w}{dt},$$

tn. siły skrawania były proporcjonalne do prędkości posuwu wzdłużnego. Oprócz tego, siły skrawania, jak pokazuje analiza prac z dziedziny teorii skrawania [37, 111], określane są przez przekrój warstwy skrawanej, której parametry powinny uwzględniać zjawisko skrawania „po śladzie” [1, 49, 83, 99]. W związku z tym, uzyskane modele mają charakter cząstkowy i są prawdziwe dla wąskiego zakresu wielkości zmiennych.

W ten sposób zagadnienie identyfikacji układów dynamicznych obrabiarek, rozwiązane zostało tylko częściowo i nadal aktualne jest dalsze ich opracowanie w kierunku określenia modelu matematycznego różnych oddziaływań sterujących oraz zakłócających z uwzględnieniem procesu kształtowania warstwy skrawanej, a także wzajemnego oddziaływania procesu technologicznego i procesów siłowych w strefie skrawania.

Dla omawianych układów dynamicznych charakterystyczne są szerokie zakresy zmian parametrów obiektu sterowanego. Przy tym, w układach dynamicznych zawierających przedmiot obrabiany o małej sztywności, parametry mogą się zmieniać w czasie cyklu obróbki jednego przedmiotu. Wymienione wyżej okoliczności utrudniają zadanie zapewnienia stabilności układu sterowania automatycznego i wymagają wnikliwego podejścia do problemu wyboru jego struktury i syntezy członów korygujących.

Niewłaściwy dobór parametrów procesu skrawania prowadzi do wielu niepożądanych efektów takich jak: niska dokładność geometryczna i zła jakość powierzchni obrabianych części, wibracje układu dynamicznego, nadmierne siły skrawania powodujące szybkie zużycie lub nawet uszkodzenie ostrza skrawającego. Dodatkowo wzrastające w przemyśle wymagania w zakresie zwiększania wydajności i dostępności nowych ostrzy skrawających, zachęcają do stosowania coraz bardziej intensywnych parametrów procesu skrawania co w konsekwencji wybór optymalnych parametrów czyni jeszcze trudniejszym.

Badania symulacyjne procesu skrawania, z wykorzystaniem modeli matematycznych, umożliwiają skrócenie czasu opracowania technologii obróbki.

Dzięki badaniom symulacyjnym możliwe jest prognozowanie przebiegu procesu skrawania zgodnie z wymaganymi jego parametrami bez konieczności przeprowadzania drogich i czasochłonnych eksperymentów. Modele matematyczne procesu skrawania mogą być wykorzystywane w różnych etapach procesu wytwórczego. Technolog może uzyskać odpowiedź na pytanie, czy możliwe jest osiągnięcie wymaganej dokładności przedmiotu obrabianego przy wykorzystaniu określonej technologii obróbki. Operator obrabiarki może wykorzystać model do określenia optymalnych warunków skrawania. Projektant narzędzi skrawających może ocenić ich przydatność, bez potrzeby fizycznej produkcji tych narzędzi. Dlatego uzasadnione jest twierdzenie, że właściwe wykorzystanie modeli matematycznych procesu skrawania redukuje koszt produkcji na różnych jej etapach oraz prowadzi do zwiększenia jakości obrabianej części.

Współcześnie, badania modeli matematycznych procesu skrawania koncentrują się na modelach mechanistycznych a także wykorzystujących metodę elementów skończonych (MES). Podejście mechanistyczne wymaga znajomości empirycznych zależności między narzędziem i obrabianym materiałem uzyskiwanych w czasie testów, z kolei metoda MES wymaga znajomości własności materiału, narzędzia, obrabiarki itp.

### **1.3. Sterowanie dokładnością maszyn technologicznych (obrabiarek)**

Wielorakość konkretnych celów podejmowanych podczas opracowania układu sterowania automatycznego (UAS) układu dynamicznego obrabiarki i urządzenia technologicznego uwarunkowała powstanie do tej pory znacznej ilości UAS. Jednolita terminologia w opisie podobnych układów nie istnieje. Między innymi, w literaturze rosyjskiej takie układy nazywane są „samonastawne”, „adaptacyjne”, w literaturze zachodniej zwykle stosuje się terminy „sterowanie adaptacyjne” – AC i układy z „samonastawianiem parametrów obróbki”.

Termin „adaptacyjne sterowanie obrabiarkami” został wprowadzony przez prof. B. Balakshyna i jest powszechnie stosowany w literaturze, chociaż zdecydowaną większość znanych obecnie układów sterowania układami dynamicznymi stanowią tradycyjne układy stabilizacji lub sterowania programowego. Zasadność stosowania terminu „sterowanie adaptacyjne” opiera się na tym, że wykorzystanie układu automatycznego sterowania nadaje obrabiarce własności adaptacyjne, co jest prawdziwe także w stosunku do innych obiektów sterowania, wyposażonych w UAS. W niniejszej pracy termin sterowanie adaptacyjne wykorzystuje się tylko w znaczeniu określonym w teorii sterowania.

W wyniku przeprowadzonych badań [14, 15, 18, 58, 80, 83, 94, 112] ustalono, że wśród licznych przypadkowych czynników wywierających wpływ na dokładność obróbki, dominującym jest zmienność drgania siły skrawania, uwarunkowana zmianami naddatku i twardości obrabianych części. Wyznaczone oddziaływanie zakłócające powoduje zmiany odkształceń sprężystych układu technologicznego i zmianę nastawień tzw. łańcucha wymiarowego obrabiarki, co prowadzi do obniżenia dokładności obróbki.

Wobec tego, podczas toczenia i szlifowania wzdłużnego odkształcenia sprężyste układu technologicznego prowadzą przede wszystkim do występowania błędu wymiaru części w przekroju wzdłużnym. Średnicę obrabianej części  $d_{cz}$  określa wymiar  $d_s$ , określony przy nastawieniu statycznym (wymiar nastawienia statycznego) i zredukowana wartość odkształceń sprężystych:

$$d_{cz} = d_s + \Delta d_{cz} = d_s + K_{pr} \cdot \bar{g}, \quad (1.5)$$

gdzie:  $K_{pr}$  – współczynnik uwzględniający wpływ odkształceń sprężystych na wymiar części i będący w ogólnym przypadku, funkcją nieliniową wektora  $\bar{g}$  odkształceń sprężystych.

Przy tym, największy wpływ na wartość zredukowanego odkształcenia sprężystego wywiera promieniowa składowa  $g_y$ . Wektor odkształceń sprężystych zależy od zredukowanej sztywności UT i wektora siły skrawania:

$$g(J, \vec{F}). \quad (1.6)$$

Wartość zredukowanej sztywności  $J$  zależy od własności konstrukcyjnych określonego układu technologicznego obróbki i nieliniowo zależy od wartości i kierunku siły skrawania  $F$ , która, z kolei, jest nieliniową funkcją parametrów procesu obróbki.

Wyznaczone powiązania zmiennych pozwoliły zaproponować dwa zasadniczo różniące się od siebie sposoby zwiększenia dokładności obróbki części [15,18]:

- poprzez kompensację zmian odkształceń sprężystych układu technologicznego drogą wprowadzenia dodatkowego przemieszczenia krawędzi skrawającej narzędzia (zmiana wymiaru nastawienia statycznego);
- poprzez stabilizację odkształceń sprężystych układów technologicznych z wykorzystaniem różnych oddziaływań sterujących.

Pierwsza metoda była związana ze znacznymi trudnościami technicznymi spowodowanymi przede wszystkim przez skomplikowaną realizację małych przemieszczeń, ale obecnie, zadanie to można z powodzeniem rozwiązać wykorzystując współczesne napędy elektryczne ze sterowaniem mikroprocesorowym. Stabilizacja odkształceń sprężystych zgodnie z (1.6) może zostać osiągnięta poprzez zmianę sztywności elementów specjalnych [14, 18, 91] wprowadzanych w tym celu do łańcucha wymiarowego obrabiarki. Osiąga się to także poprzez sterowanie parametrami zmiennymi procesu skrawania, a przede wszystkim prędkością posuwu, które określają siłę skrawania. Jako współzrzedną regulowaną procesu wskazane byłoby przyjąć wymiar części, jednak jego pomiar związany jest z dużymi trudnościami technicznymi. Dlatego uważa się za racjonalne uzyskiwanie informacji o zredukowanej wartości odkształceń sprężystych poprzez pomiary siły skrawania. Przy tym należy ustalić zależność funkcyjną między siłą skrawania i wielkością  $\Delta d_{cz}$  [15].

W większości przypadków w celu uproszczenia realizacji technicznej urządzenia pomiarowego za wielkość regulowaną przyjmuje się jedną ze składowych

odkształceń sprężystych układu technologicznego obrabiarki lub siły skrawania, która najdokładniej odzwierciedla odchylenie wymiaru obrabianego przedmiotu od wartości określonej (nastawionej).

W przypadkach, gdy zredukowana sztywność układu sprężystego zmienia się w znacznym zakresie w czasie cyklu obróbki jednego półfabrykatu, zależność zmian  $J$  może być wystarczająco dokładnie określona. Np. przy obróbce półfabrykatów o dużym stosunku długości do średnicy (półfabrykaty o małej sztywności), proponuje się dokonywanie programowych zmian wartości siły skrawania w funkcji współrzędnej położenia narzędzia skrawającego wzdłuż osi przedmiotu obrabianego [18, 91]. Jednak przy tym istotnie obniża się wydajność obróbki.

Wiele specyficznych zagadnień wynikających podczas sterowania układem dynamicznym z półfabrykatami o małej sztywności spowodował konieczność przeprowadzenia specjalnych badań ukierunkowanych na poszukiwanie sposobów zwiększenia dokładności układu dynamicznego w takich warunkach [83, 91, 92, 112].

W omawianych pracach podkreśla się, że błędy z powodu zmian odkształceń sprężystych podczas obróbki przedmiotu o małej sztywności mogą osiągać 80-85% całkowitego błędu i proponuje się nowe oryginalne metody realizacji dodatkowych oddziaływań siłowych na układ technologiczny w celu kompensowania odkształceń sprężystych.

Wybór współrzędnej regulowanej w systemach sterowania układów dynamicznych przeznaczonych do podwyższania jego niezawodności dokładnościowej, powinien uwzględniać konkretne informacje o zakresie zmian parametrów obróbki i charakterystykach układu sprężystego.

Do chwili obecnej przeprowadzono dużą ilość badań własności konkretnych układów technologicznych i ustalono parametry określające dokładność obróbki w tych warunkach.

Doświadczenie w projektowaniu i wyniki badań eksperymentalnych układu sterowania automatycznego układem dynamicznym obrabiarek świadczą o tym, że ich zastosowanie wraz z rozwiązaniem podstawowego zagadnienia pozwala dodatkowo:

- obniżyć lub nawet wyeliminować niebezpieczeństwo uszkodzenia obrabiarki, noża i obrabianego przedmiotu z powodu przeciążeń powstających podczas gwałtownego wzrostu siły skrawania;
- zmniejszyć zależność procesu obróbki od operatora, co jest szczególnie ważne w warunkach ESP przy zwiększonych wymaganiach dokładnościowych i jakościowych obróbki;
- uprościć przygotowanie programów dla obrabiarek NC i CNC;
- obniżyć kwalifikacje operatora obrabiarki;
- wdrożyć nowe procesy obróbki i wprowadzić automatyczną kontrolę wymiarów części.

Podczas projektowania układu sterowania automatycznego układem dynamicznym obrabiarki głównym problemem jest wybór kryterium optymalizacji: priorytet może być przyznany kryteriom charakteryzującym

parametry dokładnościowe obróbki, lub funkcjom oceny związanym ze wskaźnikami ekonomicznymi procesu technologicznego (wydajnością) i kosztami.

Doświadczenie zgromadzone w obszarze technologii maszyn świadczy o tym, że priorytetowe są wskaźniki dokładnościowe – rozbieżność dokładności z wymaganiami wyznaczonymi czynią nieracjonalną a w wielu przypadkach nawet bezsensowną eksploatację obrabiarek i innego oprzyrządowania technologicznego. Efekt sumaryczny będący wynikiem zwiększenia dokładności obróbki części, przejawiający się w zwiększeniu resursu i czasu pracy maszyn, i mechanizmów, w których te części pracują, może być znacznie większy niż uzyskany w wyniku optymalizacji według kryteriów ekonomicznych.

W wielu pracach z tego zakresu podczas rozpatrywania zagadnień sterowania omawiane są modele statyczne obiektu odzwierciedlające zmianę odkształceń sprężystych przedmiotu obrabianego wzdłuż jego osi w funkcji sił skrawania i dodatkowych oddziaływań siłowych ukierunkowanych na kompensację tych odkształceń. Celem sterowania jest minimalizacja lub eliminacja odkształceń sprężystych układu technologicznego w kierunku promieniowym.

W pracy [91] omawia się oryginalne kryterium optymalizacji w postaci minimum funkcji kwadratowej przemieszczenia punktu na powierzchni przedmiotu obrabianego pod wpływem sił skrawania i oddziaływań sterujących z uwzględnieniem ograniczenia trwałości i stabilności półfabrykatu. W wyniku rozwiązania zagadnienia statycznego otrzymano optymalny algorytm sterowania w postaci reguł zmiany dodatkowych oddziaływań siłowych w funkcji współrzędnej przyłożenia siły skrawania. Niektóre kryteria optymalizacji możliwe przy budowie układów automatycznego sterowania układu dynamicznego obrabiarek, uwzględniające własności dynamiczne obiektu zostały omówione w [53] i zaproponowano zmodyfikowane ww. kryterium, przy tym z technologicznego punktu widzenia, nie jest uzasadniona celowość jego stosowania.

Układy sterowania automatycznego układem dynamicznym obrabiarki pozwalają w wielu przypadkach rozwiązać także problem podwyższenia dokładności obróbki i intensyfikacji procesu technologicznego. Przy ich opisanu zwykle wykorzystuje się ogólny termin „adaptacyjny układ sterowania” bez konkretyzowania jego przeznaczenia. Niektóre z licznych znanych obecnie realizacji podobnych układów zostaną omówione w następnych podrozdziałach.

Analiza prac, w których omawia się zagadnienia podwyższenia dokładności obrabiarki poprzez sterowanie odkształceniami sprężystymi układu technologicznego i siłowymi zmiennymi procesu technologicznego pozwala wyciągnąć wniosek, że w znacznej mierze rozwiązano w nich aspekty techniczne omawianego problemu. Przy tym, zagadnienie zasadności niektórych kryteriów optymalizacji i w oparciu o te kryteria syntezy optymalnych układów sterowania obiektami określonej klasy, pozostaje w znacznym stopniu nierozwiązane.

Poza tym, jak pokazują wyniki niniejszej pracy, parametry układu dynamicznego obrabiarki jako obiektu sterowania mogą zmieniać się

w szerokim zakresie przy zmianie parametrów obróbki. W związku z tym pojawiają się specyficzne zadania zapewnienia stabilności układu automatycznego sterowania i osiągnięcia wymaganych wskaźników jakości sterowania. Bez rozwiązania tych zagadnień nie może zostać osiągnięta wysoka ogólna dokładność sterowania i dlatego nie mogą zostać osiągnięte potencjalne możliwości podwyższenia niezawodności dokładnościowej obrabiarki.

Analiza niektórych zagadnień syntezy układów sterowania omawianej klasy przeprowadzona została w [14, 36, 42, 66], jednak nie uwzględniają one omówionych wcześniej specyficznych cech obiektu sterowania.

#### **1.4. Optymalizacja sterowania układem dynamicznym obróbki skrawaniem według kryteriów ekonomicznych**

Zagadnienie podwyższenia wydajności obrabiarki poprzez sterowanie układem dynamicznym jest aktualne w odniesieniu do obrabiarek produkcyjnych, na których realizowana jest obróbka zgrubna i kształtująca.

W tym przypadku, jako kryterium optymalności przy opracowywaniu układu automatycznego sterowania, rozpatruje się funkcjonały charakteryzujące wydajność procesu technologicznego i jego koszty własne, okres trwałości narzędzia, nakłady zredukowane i inne.

W wyniku działających na obiekt zakłóceń o charakterze losowym proces technologiczny obróbki części na obrabiarkach jest procesem stochastycznym. Podczas badań nad optymalizacją, w celu uproszczenia analizy zazwyczaj warunki obróbki przedstawia się w postaci procesu kwazistacjonarnego i wykorzystuje się zależności charakteryzujące związek korelacyjny współrzędnych procesu w ustalonych warunkach.

W ustaleniu ekonomicznie optymalnych warunków funkcjonowania największe znaczenia ma ocena części nakładów zależnych od warunków obróbki. Np. w [75] przy badaniu ekonomicznych kryteriów optymalności warunków skrawania ogólne nakłady na obróbkę w okresie trwałości narzędzia wyraża zależność:

$$VZ_{sr} = B_1(T_{nar} + t_{zm}) + B_2, \quad (1.7)$$

gdzie:  $B_1$  – koszty własne czasu maszynowego obrabiarki,  $B_2$  – koszty własne narzędzia w okresie trwałości,  $T_{nar}$  – trwałość narzędzia między wymianami,  $Z_{sr}$  – nakłady na zdjęcie naddatku, średnie dla przedziału trwałości,  $t_{zm}$  – czas wymiany narzędzia.

$$Z_{sr} = \frac{1}{T_{nar}} \cdot \int_0^{T_{nar}} Z dt, \quad (1.8)$$

$Z$  – bieżąca wartość nakładów na usunięcie objętości jednostkowej metalu,

$V$  – objętość całkowita usunięta w okresie trwałości:

$$V = \int_0^{T_{nar}} V_{zm} dt, \quad (1.9)$$

$V_{zm}$  – prędkość usuwania naddatku.

Równanie (1.7) z uwzględnieniem (1.8) można zapisać w postaci:

$$Z_{sr} = \frac{B_1 + \frac{1}{T_{nar}} [B_1 \cdot t_{zm} + B_2]}{\frac{1}{T_{nar}} \int_0^{T_{nar}} V_{sm} dt}. \quad (1.10)$$

Uwzględniając, że dopuszczalne zużycie narzędzia do wymiany:

$$\nu_{dop} = \int_0^{T_{nar}} \mu_z dt,$$

określa prędkość zużycia  $\mu_z$ , równanie (1.10) po podstawieniu wielkości  $Z_{sr}$  z (1.8) może być zapisane w postaci:

$$\frac{1}{T_{nar}} \int_0^{T_{nar}} Z dt = \frac{B_1 + \frac{1}{T_{nar}} \cdot \frac{[B_1 \cdot t_{zm} + B_2]}{\nu_{dop}} \cdot \int_0^{T_{nar}} \mu_z dt}{\frac{1}{T_{nar}} \int_0^{T_{nar}} V_{sm} dt}.$$

Ostatnie równanie zawiera wiele parametrów uśrednionych w okresie trwałości narzędzia. Zależność dla wartości chwilowych można otrzymać przy przejściu granicznym:

$$Z = \lim_{T_{nar} \rightarrow 0} \frac{1}{T_{nar}} \int_0^{T_{nar}} Z dt = \frac{B_1 + \frac{B_1 \cdot t_{zm} + B_2}{\nu_{dop}} \mu_z}{V_{sm}}. \quad (1.11)$$

Okres trwałości ostrza przy nieuwzględnieniu okresów jego początkowego dotarcia i przyspieszonego zużycia

$$T_{nar} = \frac{\nu_{dop}}{\mu_z},$$

co pozwala uprościć równanie (1.11) kosztów i zapisać kryterium optymalizacji w postaci:

$$J = \frac{1}{Z} = \frac{V_{sm}}{B_1 \left[ 1 + \frac{t_{zm}}{T_{nar}} \right] + \frac{B_2}{T_{nar}}}.$$

Biorąc pod uwagę fakt, że prędkość usuwania naddatku podczas obróbki wzdłużnej

$$V_{sm} = v_c \cdot f \cdot b,$$

gdzie:  $v_c, f, b$  - odpowiednio, prędkość skrawania, posuw na obrót i głębokość skrawania, otrzymamy:

$$J = \frac{v_c \cdot f \cdot b}{B_1 \left[ 1 + \frac{t_{zm}}{T_{nar}} \right] + \frac{B_2}{T_{nar}}}.$$

Równanie kryterium odpowiadającego maksymalnej wydajności i określającego faktyczną wydajność obrabiarki w czasie skrawania, otrzymuje się z ostatniej zależności przy pominięciu kosztów własnych narzędzia:

$$J_1 = \frac{v_c \cdot f \cdot b}{B_1 \left[ 1 + \frac{t_{zm}}{T_{nar}} \right]}.$$

Z reguły [75], warunki skrawania zgodnie z kryteriami  $J$  i  $J_1$  nie pokrywają się i proponuje się z uwzględnieniem konkretnych wymogów procesu produkcyjnego wyznaczać kryterium kompromisowe.

W ogólnym przypadku wartość kryterium optymalizacji zależy od okresu trwałości ostrza narzędzia skrawającego, jednak obecnie nie ma jednolitej teorii opisującej proces jego zużycia i wykorzystuje się dostępne zależności empiryczne. Najbardziej rozpowszechniona jest zależność Taylora, zgodnie z którą okres trwałości narzędzia określa równanie:

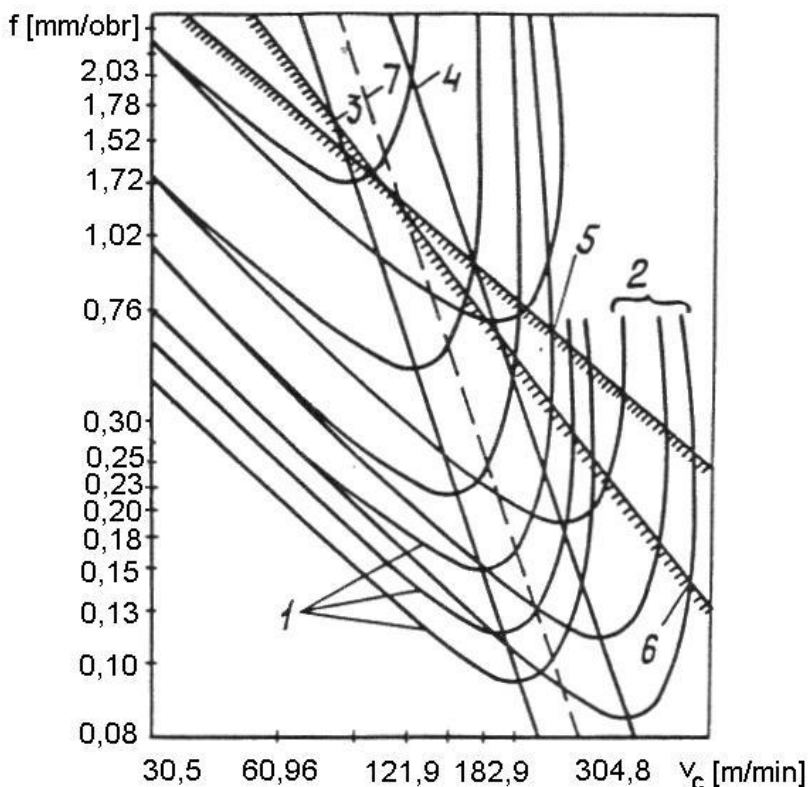
$$T_{nar} = C_v \cdot v_c^{\gamma}.$$

Równanie to, pozwala określić ekonomicznie optymalną prędkość skrawania tylko w przypadku, gdy znana jest wielość posuwu i ekonomiczny okres trwałości ostrza narzędzia skrawającego. Bardzo często wykorzystuje się zależność:

$$v_c \cdot T_{nar} \cdot f^{\gamma_v} \cdot b^{x_v} = C_v. \quad (1.12)$$

Analiza zależności przyjętego kryterium od parametrów procesu z wykorzystaniem ostatniego równania dla prędkości zużycia ostrza noża [42] pozwala ustalić, że kryterium nie ma ekstremalnych wartości w dopuszczalnym obszarze i optymalny algorytm sterowania określany jest przez narzucone ograniczenia. Jako przykład na rys. 1.2 przedstawiono krzywe stałej wartości kosztów jednostki długości obrobionego przedmiotu (1) i stałego czasu obróbki przedmiotu obrabianego (2), otrzymane w [42] w obróbce toczeniem przedmiotu ze stali. Krzywe na rysunku opisują: 3-prosta minimalnej wartości kosztów obróbki; 4-prosta minimalnego czasu obróbki; 5-ograniczenie poziomu odkształceń narzędzia; 6-ograniczenia mocy silnika napędowego wrzeciona, która w obliczeniach wynosi 4,5 kW; 7-zależność minimalnego iloczynu czasu i trwałości proponowana przez autorów jako uogólniona funkcja oceny.





**Rys. 1.2. Zależności do określania optymalnych warunków skrawania**

Jak wynika z przytoczonych zależności, wraz ze zwiększeniem prędkości skrawania przy stałym posuwie, koszty i czas obróbki obniżają się do pewnego minimum a następnie wzrastają. Ze wzrostem posuwu jednostajnie obniżają się koszty i czas obróbki. Opisany charakter zależności (1.2) świadczy o tym, że optymalne warunki obróbki powinny być wyznaczone z uwzględnieniem ograniczenia mocy skrawania lub dopuszczalnych odkształceń sprężystych narzędzia.

W wielu innych pracach podczas analizy zagadnień optymalizacji obróbki na podstawie kryterium nakładów zredukowanych ustalono także, że rozpatrywany funkcjonal  $J(v_c, f)$  nie ma ekstremum w granicach nałożonych ograniczeń a więc, zagadnienie sterowania optymalnego w warunkach działania zmiennych zakłóceń (głębokości skrawania i podatności materiału na obróbkę) może być sprowadzone do stabilizacji siłowych parametrów skrawania. Jako optymalny algorytm dla obróbki toczeniem zaleca się albo prawo stałości mocy i stycznej składowej siły skrawania, albo prawo stałości trwałości ostrza narzędzia i tej samej składowej siły skrawania. Przy tym jako oddziaływania sterujące na obiekt przyjmuje się prędkość obrotową części i prędkość posuwu wzdłużnego.

Podstawowe ograniczenia, których uwzględnienie jest konieczne w przypadku obróbki zgrubnej i kształtującej mają charakter siłowy. Są to ograniczenia mocy zasilania ruchu głównego, trwałości i sztywności narzędzia i elementów obrabiarki itd. Uwzględniając to, że w większości przypadków ograniczenia te mogą być usunięte lub ich strefa może być przesunięta dzięki zastosowaniu innego narzędzia i obrabiarki o innych parametrach. Pojawia się, wychodzące poza ramy omawianego problemu, pytanie o metody wyboru urządzeń technologicznych do obróbki przedmiotów obrabianych konkretnego rodzaju. Do chwili obecnej ten problem nie został rozwiązany.

Należy podkreślić, że brak ekstremum kryterium optymalizacji jest charakterystyczne przy wykorzystaniu zależności na trwałość w postaci (1.12). Przy zastosowaniu innej zależności, funkcja oceny może mieć minimum. Np. w [113] omówiono rozszerzone równanie zależności trwałości:

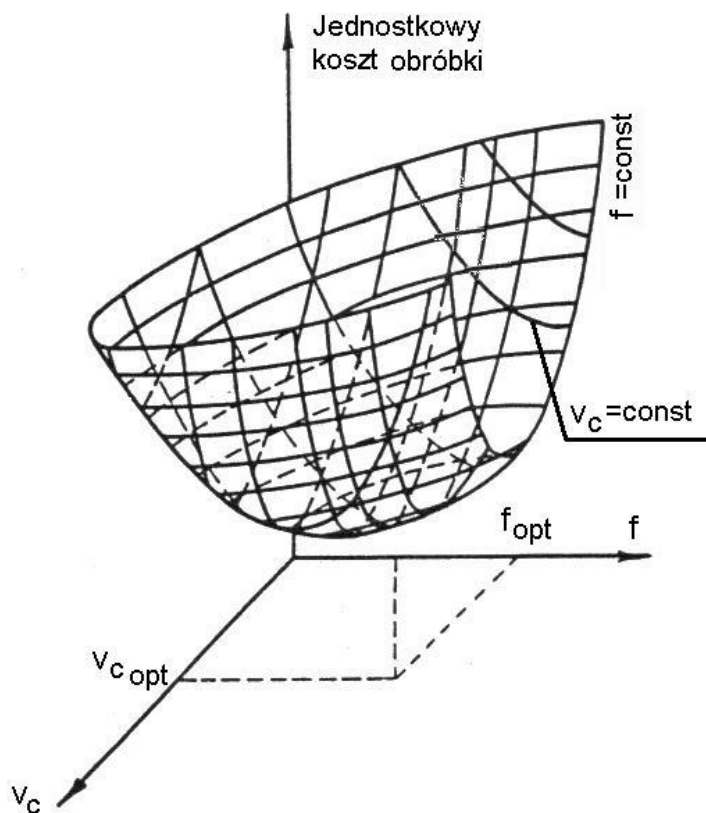
$$T_{nar} = n_p \cdot f^{m_p} \cdot v_c^{k_{pv}}.$$

Zaproponowano uwzględnianie zależności wskaźników  $m_p$  i  $k_{pv}$  od prędkości skrawania i wartości posuwu. W wyniku badań eksperymentalnych procesu toczenia stali 55N ostrzami z węgla spiekanego z grupy R15 ujawniono zależności wskazanych współczynników od parametrów technologicznych i otrzymano równania wartości względnego kosztu obróbki, które opisują powierzchnię z ekstremum (rys. 1.3).

W tym przypadku udaje się określić optymalną wartość zmiennych technologicznych, które powinny być utrzymywane przez układ sterowania.

Problemem optymalizacji warunków obróbki z uwzględnieniem kryteriów ekonomicznych i budowy wielokanałowych układów sterowania obiektem poświęcone są prace [15, 58, 66, 114, 115, 116, 117].

Prawdziwość pokazanej uprzednio rozszerzonej zależności na trwałość narzędzia sprawdza się tylko dla wąskiego przedziału zmian warunków obróbki, w związku z czym przy badaniu zagadnień optymalizacji warunków pracy obiektu wg kryteriów ekonomicznych, zależność na trwałość zwykle przedstawia się w postaci (1.12) i algorytmy sterowania opracowane są z uwzględnieniem ograniczeń zmiennych siłowych.



**Rys. 1.3. Zależność kryterium optymalizacji od prędkości skrawania i posuwu**

Do chwili obecnej znanych jest wiele postaci układów automatycznego sterowania układem dynamicznym obrabiarki. Charakterystycznym przykładem jest opracowany przez Moskiewską Fabrykę Obrabiarek i Narzędzi elektrohydrauliczny układ stabilizacji stycznej składowej siły skrawania z oddziaływaniem sterującym na prędkość posuwu. Wielkość regulowana, proporcjonalna przy stałej prędkości obrotowej wrzeciona oraz niezmienniej średnicy części i mocy skrawania, w tym układzie określana jest pośrednio poprzez pomiar prądu w obwodzie stojana silnika ruchu głównego. Przy zmianie warunków skrawania na obrabiarce aby zapewnić stabilność układu zaleca się dostosowywanie współczynnika wzmacnienia, co przy braku dokładnych kryteriów wyboru jego wartości istotnie obniża parametry eksploatacyjne urządzenia.

Wiele światowych firm również zajmuje się zagadnieniem opracowania układów sterowania obrabiarek, przy czym dużą uwagę poświęca się wyposażeniu obrabiarek CNC w „układy adaptacyjne” [18,66]. Np. firma Gildemeister wyposaża tokarki CNC w układ sterowania adaptacyjnego firmy Siemens. Kontrolowanymi zmiennymi w układzie są: moment na wale silnika ruchu głównego mierzony za pomocą specjalnego czujnika oraz prędkość

obrotowa wrzeciona. Wg ich wartości oblicza się moc skrawania i składową styczną siły skrawania. W charakterze oddziaływań sterujących na obiekt wykorzystywane są prędkość obrotowa wrzeciona i prędkość posuwu.

Wg analogicznych zasad opracowany jest układ sterowania adaptacyjnego AC typu ASEMA dla tokarek CNC. Zastosowanie wymienionych układów pozwala istotnie podwyższyć wskaźniki jakościowe produkcji i wydajność procesu technologicznego. Układy sterowania zmiennymi siłowymi procesu skrawania i odkształceniami sprężystymi układu technologicznego tokarek i frezarek w USA produkowane są przez firmy General Electric, Boeing, Macotech, Westinghouse. Budową układów AC zajmują się także japońskie firmy Okuma i Mazak.

Zastosowanie układów mikroprocesorowych CNC w znacznym stopniu ułatwia realizację układu automatycznego sterownia, ponieważ nie wymaga instalowania dodatkowych bloków sterowania (oprócz czujników zmiennych siłowych lub odkształceń sprężystych) i synchronizacji, pozwala przechowywać informację o indywidualnych parametrach obrabiarki.

Jak wynika z analizy, optymalne, wg kryterium ekonomicznego algorytmy sterowania, w większości przypadków, sprowadzają się do utrzymania na wymaganym poziomie parametrów siłowych procesu, w tym składowych siły skrawania. Uwzględniając fakt, że składowe siły skrawania są wzajemnie powiązane z odkształceniami sprężystymi układu, zagadnienie sterowania w wielu przypadkach można sprowadzić do stabilizacji na pewnym granicznym poziomie odkształceń sprężystych. Przy syntezie takich układów pojawiają się takie same, wymienione już wyżej trudności, jak i przy projektowaniu układów automatycznego sterowania przeznaczonych do podwyższenia dokładności obróbki.

Podsumowując niniejszy rozdział można sformułować kilka następujących wniosków. Jedną z głównych przyczyn obniżenia niezawodności dokładnościowej urządzeń technologicznych są zmiany odkształceń sprężystych układu technologicznego, powstające w wyniku zmiany sztywności obrabianego przedmiotu i oddziaływań siłowych, wywołanych przez realizację procesu skrawania na obrabiarce. Znaczne podwyższenie dokładności i efektywności wykorzystania urządzeń precyzyjnych, robotów, maszyn pomiarowych, obrabiarek można osiągnąć dzięki sterowaniu automatycznemu odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego. Do chwili obecnej w znacznym stopniu rozwiązane zostały aspekty technologiczne tego zagadnienia. Potencjalne możliwości podwyższenia niezawodności dokładnościowej urządzeń nie są w pełni wykorzystane, ponieważ opracowane modele matematyczne obiektu sterowania nie są zbyt dokładne oraz jest niewystarczająco uzasadnione naukowe podejście do syntezy optymalnych układów automatycznego sterowania odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego z uwzględnieniem własności specyficznych obiektu.

W związku z tym, w kolejnych rozdziałach niniejszej monografii zostaną przedstawione następujące podstawowe zagadnienia:

- opracowanie na bazie metod identyfikacji analitycznej, uogólnionego modelu matematycznego wyjściowego oraz aproksymującego układu dynamicznego obrabiarki dla możliwych oddziaływań sterujących i zakłócających na obiekt sterowany;
- ustalanie kryteriów optymalizacji i opracowanie metod syntezy optymalnych układów sterowania automatycznego odkształceniami sprężystymi uwzględniających własności specyficzne układu dynamicznego jako obiektu sterowanego i specyfikę działających nań zakłóceń.

Opracowanie inżynierskiej metodyki obliczeń i syntezy układów automatycznego sterowania omawianej klasy i konkretnych układów sterowania odkształceniami sprężystymi odnosi się do obrabiarek, na których realizowany jest proces toczenia wzdłużnego przedmiotów obrabianych.

## 2. Analityczna identyfikacja układów dynamicznych obróbki skrawaniem

Jakość sterowania obiektem zależy w zasadniczym stopniu od jakości opracowanego modelu matematycznego obiektu sterowania. Przy dużej niedokładności modelu obiektu sterowanego względem jego opisu matematycznego, tj. przy dużym niedopasowaniu modelu obiektu względem jego samego, efektywne sterowanie obiektem może być utrudnione lub nawet niemożliwe. Dlatego problem budowy optymalnego (w sensie określonego kryterium) modelu matematycznego obiektu, tj. problem **identyfikacji** własności statycznych i dynamicznych obiektu sterowania, jest ważnym zadaniem automatyki, automatyzacji oraz sterowania automatycznego procesami technologicznymi obróbki skrawaniem.

Rozpatrywane dalej metodologiczne podejście do analitycznej identyfikacji układów dynamicznych procesów technologicznych obróbki skrawaniem, a także formułowane na jej podstawie modele matematyczne różnych zmiennych sterujących, realizowane są od 1972 r. i rozwijano je w latach następnych. Podstawowe wyniki w tym zakresie przedstawione zostały w pracach A. Abakumowa [1 – 13, 68, 69, 83, 120, 121 – 125, 130 – 132], W. Taranenko [21, 24, 25, 28, 68, 69, 83 – 93, 130 – 132], J. Zubrzyckiego [9, 10, 13, 129 – 132], G. Taranenko [68, 69, 85, 90, 93, 132]. Przydatność opracowanych modeli matematycznych potwierdzono wynikami badań eksperymentalnych [28, 84, 87], a także badań innych autorów [41, 53, 71, 78, 94] oraz praktyką syntezy układów sterowania odkształceniami sprężystymi układów dynamicznych obrabiarek.

### 2.1. Ogólna charakterystyka obiektu sterowania

Układ dynamiczny procesu obróbki jest układem technologicznym obrabiarki bądź maszyny technologicznej wraz z realizowanymi na niej procesem obróbki skrawaniem (toczenie, szlifowanie, wiercenie, frezowanie) [95]. Aktywne oddziaływanie na proces technologiczny, zrealizowany za pośrednictwem układu automatycznej regulacji, daje możliwości zwiększenia dokładności wymiarowej i kształtowej przedmiotów obrabianych, zmniejszenia chropowatości powierzchni, polepszenia wskaźników technicznych i ekonomicznych oraz zwiększenia dokładności funkcjonowania układów technologicznych. Rozbudowa istniejącego modelu matematycznego sterowania obiektem, nie jest możliwa bez uwzględnienia procesów działających w strefie obróbki i w zamkniętym układzie technologicznym przez proces skrawania.

Przy projektowaniu układów regulacji dowolnego procesu technologicznego najważniejsze znaczenie ma opracowanie podstaw teoretycznych sterowania, które zawierają w sobie opracowania modelu matematycznego procesu i algorytmów sterowania tym procesem oraz opracowanie podstawowych wymagań w zakresie wskaźników jakościowych układu regulacji i jego

charakterystyk dynamicznych. Przy braku pełnej, dokładnej informacji o obiekcie sterowania (idealizacja własności dynamicznych) elementów układu automatycznej regulacji, jego model matematyczny może w znacznej mierze różnić się od rzeczywistości, a zastosowanie przy projektowaniu parametrów regulatorów, nie zapewnia żądanej jakości sterowania. Trzeba brać pod uwagę w przypadku rozpatrywanego układu dynamicznego możliwie szeroki zakres zmian parametrów obiektu sterowanego. Układ dynamiczny rozumie się tu jako układ technologiczny i realizowany w nim proces obróbki [95]. W danym układzie technologicznym w związku ze zmieniającym się charakterem ograniczeń, parametry mogą zmieniać się w czasie obróbki jednego przedmiotu obrabianego. Wskazane własności komplikują zadania syntezy układu regulacji i wymagają precyzyjnego podejścia do zagadnień dotyczących doboru jego struktury. Badania charakterystyk dynamicznych układów technologicznych poświęcono prace Dasa i Tobiasa [26], Grasso, Noto La Diega i Passannanti'ego [38] oraz innych badaczy [35, 41, 45, 53, 78]. Celem budowy wyżej wymienionych modeli matematycznych było teoretyczne wyznaczenie częstotliwości własnych drgań układu i jego elementów, a także opracowanie metod ich aktywnego tłumienia. W opracowanych modelach nie bierze się pod uwagę zjawisk, które zachodzą w strefie obróbki i własności dynamicznych procesu skrawania. Opracowanie matematycznego modelu obiektu sterowania jest niezbędnym etapem dla syntezy układu regulacji i elementów korygujących dla zapewnienia potrzebnych wskaźników jakości, oraz opracowania racjonalnych algorytmów sterowania.

Ogólny obraz jakościowy powiązań wzajemnych zmiennych w układzie dynamicznym urządzenia mechanicznego ilustruje schemat przedstawiony na rys. 2.1. Osiągnięcie wymaganej niezawodności dokładnościowej urządzenia mechanicznego w procesie jego funkcjonowania wymaga zagwarantowania zadanego położenia przestrzennego lub zadanych trajektorii ruchu wykonawczych (zamykających) elementów.

W związku z tym najważniejszymi zmiennymi wyjściowymi układu dynamicznego są odkształcenia sprężyste układu technologicznego, które można charakteryzować wektorem  $\vec{g}_{UT}$ . Zmienność odkształceń sprężystych układu technologicznego obrabiarki skrawającej prowadzi do zmiany położenia przestrzennego noża i części, będących wykonawczymi (zamykającymi) elementami układu technologicznego, co prowadzi do zmniejszenia dokładności obróbki części [3, 86, 89]. Odkształcenia sprężyste elementów układu technologicznego precyzyjnych systemów pomiarowych, robotów i maszyn pomiarowych wpływają na ustawienie czujników, co w wyniku, obniża charakterystyki dokładnościowe urządzeń.

Jako zmienne wyjściowe współrzędnych układu dynamicznego obrabiarki mogą również być przyjmowane zmienne bezpośrednio charakteryzujące dokładność i jakość obróbki części, np. średnica obrobionej części  $d_{CZ}$ , chropowatość  $H_{CZ}$  i falistość  $E_{CZ}$  jej powierzchni, mimośród  $e_{CZ}$  itp.

Zgodnie ze schematem (rys. 2.1) wektor uogólniony możliwych współrzędnych regulowanych układu technologicznego oznaczono jako:

$$\vec{Y}_{UT} = (\vec{g}_{UT}, d_{cz}, H_{cz}, E_{cz}, e_{cz}, \dots).$$

Do układu technologicznego przekazywany jest kształtowany w napędach ruchu głównego, posuwów i ruchów dodatkowych wektor oddziaływań sterowniczych  $\vec{U}$ , który gwarantuje zadane przemieszczenie przestrzenne i (lub) pozycjonowanie elementów wykonawczych obrabiarki i kompleksów pomiarowych. Ponieważ dla obrabiarek wektor oddziaływań sterowniczych kształtowany jest przez napęd elektryczny ruchu głównego umożliwiający ruch obrotowy części  $n_{cz}$ , i napędy posuwów umożliwiającymi w ogólnym przypadku ruch według trzech współrzędnych  $V_x, V_y, V_z$ . Oprócz tego, odpowiednie napędy umożliwiają, na przykład sterowanie kątem obrotu  $\mathcal{G}_i$  elementów wykonawczych obrabiarek i kompleksów pomiarowych według różnych osi:

$$\vec{U} = (n_{cz}, V_x, V_y, V_z, \mathcal{G}_i, \dots).$$

Układ technologiczny obrabiarki skrawającej przekształca wejścia, oddziaływania sterownicze w przemieszczenia i prędkości przemieszczeń elementów UT, w wyniku czego formowany jest  $\vec{T}$  zmiennych technologicznych, określających przebieg procesu technologicznego. Składowymi tego wektora są prędkość skrawania  $v_c$ , głębokość skrawania  $a_p$ , prędkość posuwu poprzecznego  $v_f$ , wymiar nastawienia statycznego  $\Delta_s$  [15, 18].:

$$\vec{T} = (v_c, a_p, v_f, \Delta_s, \dots).$$

Proces technologiczny obróbki mechanicznej związany jest z usuwaniem materiału z przedmiotu obrabianego, jego realizacja prowadzi do powstania wektora siły skrawania  $\vec{F}_{sk}$ . Procesy siłowe w strefie skrawania można charakteryzować odpowiednio, na przykład siłą skrawania, mocą skrawania  $P_{sk}$ , momentami  $M_{wr}, M_p$  na wale wrzeciona i napędów posuwu. Układ technologiczny obrabiarki skrawającej przekształca wchodzące na jego wejścia oddziaływania sterownicze w przemieszczenia i prędkości przemieszczeń elementów:

$$\vec{Y}_{pt_1} = (\vec{F}_{sk}, P_{sk}, M_{wr}, M_p, \dots).$$

Oprócz tego, jako wyjściowe zmienne procesu technologicznego mogą być stosowane: jego wydajność  $W_{PT}$ , prędkość usuwania materiału  $V_m$ , prędkość zużycia narzędzia skrawającego  $V_z$ , różne wskaźniki ekonomiczne i inne:

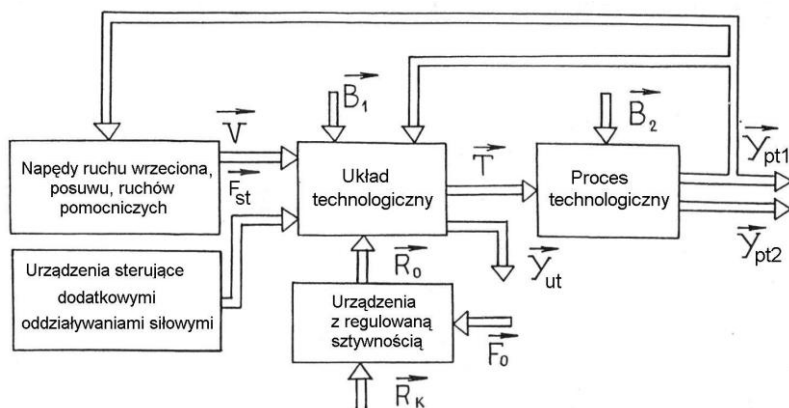
$$\vec{Y}_{pt_2} = (W_{PT}, V_m, V_z, E_i, \dots).$$



Należy odnotować, że wyjściowe współrzędne układu dynamicznego kształtowane są w wyniku oddziaływania UT i PT, w związku z czym pokazany podział i odniesienie do poszczególnych bloków UD jest w dużym stopniu umowne. Wpływ parametrów siłowych procesu technologicznego na napędy ruchu głównego i posuwu, a także na odkształcenia sprężyste układu technologicznego prowadzi do pojawienia się w strukturze obiektu obwodów zewnętrznego i wewnętrznego sprzężenia zwrotnego.

Do podwyższenia dokładności obróbki części, szczególnie o małej sztywności aktualnie obok oddziaływań sterujących pochodzących od napędów posuwów i ruchu głównego, stosowane są dodatkowe oddziaływania siłowe pochodzące od specjalnych urządzeń sterujących zmieniające stan sprężysto-odkształcalny części [91, 92]. Do nich zalicza się oddziaływania w postaci: siły zacisku  $F_{x1}$ ; nieosiowej siły rozciągającej powodującej siłę rozciągającą i moment gnący  $M_{zg} = F_{x1} \cdot e$  ( $e$  - mimośród); jednej lub kilku dodatkowych sił przeciwdziałających  $F_d$ ; momentów gnących  $F_{zg}$ ; sił elektromagnetycznych  $F_{em}$  i innych. Dodatkowe oddziaływania siłowe reprezentowane są na schemacie (rys. 2.1) przez wektor:

$$\vec{F}_{st} = (F_{st}, F_d, e, M_{zg}, F_{em}, \dots).$$



**Rys. 2.1** Ogólny schemat układu dynamicznego obrabiarki

Na układ technologiczny działa wiele zakłóceń, do których, przede wszystkim można zaliczyć wariacje zmiennych siłowych powodowanych realizacją procesu technologicznego. Zakłócenia te można rozpatrywać jako zakłócenia wewnętrzne układu dynamicznego.

Na niezawodność dokładnościową precyzyjnych urządzeń mechanicznych (w szczególności precyzyjnych obrabiarek skrawających, optyczno-mechanicznych systemów pomiarowych, maszyn pomiarowych i robotów) istotny wpływ mają także odkształcenia sprężyste, spowodowane oddziaływaniami kinematycznymi ze strony fundamentu.

W ogólnym przypadku oddziaływanie fundamentu można przedstawić w postaci wektora oddziaływań kinematycznych  $\vec{R}_k$ , wywołującego dodatkowe przemieszczenia względne elementów wykonawczych (zamykających), na przykład narzędzia i przedmiotu obrabianego dla obrabiarek lub elementów układu optycznego systemu pomiarowego. W celu obniżenia poziomu pól wibracyjnych ze strony aktywnej wibracyjnie podstawy – fundamentu, w wielu przypadkach między fundamentem i elementami nośnymi układu technologicznego, na przykład a korpusem obrabiarki umieszczane są specjalne elementy sprężyste – amortyzatory lub elementy o sterowanej sztywności dynamicznej. Przy tym oddziaływania kinematyczne na elementy nośne układu technologicznego (wektor  $\vec{R}_o$ ), powodujące przemieszczenie jego elementów wykonawczych (zamykających) zależą nie tylko od własności UT, lecz także od charakterystyk amortyzatorów lub, w przypadku zastosowania układu aktywnej ochrony antywibracyjnej od wektora  $\vec{F}_o$  oddziaływania sterowniczego na elementy wykonawcze układu antywibracyjnego.

Na układ technologiczny działają także zakłócenia w postaci: zmiany temperatury  $T^\circ$ , zmienności współczynnika tarcia  $f_{tar}$ , wpływu luzów  $\alpha$ , zużycia elementów  $J_i$  itd. Wskazane dodatkowe oddziaływania zakłócające mogą być reprezentowane przez wektor:

$$\vec{B}_1 = (T^\circ, f_{tar}, \alpha, J_i, \dots).$$

Zakłócenia działające na proces technologiczny można przedstawić w postaci wektora  $\vec{B}_2$ , którego składowymi są: zmiana naddatku na długości  $b_l$  i promieniu  $b_r$  części, zmiana twardości materiału obrabianego  $q$ , zmiana własności skrawnych  $r_i$  narzędzia itp.:

$$\vec{B}_2 = (b_l, b_r, q, r_i, \dots).$$

Uogólniona struktura układu dynamicznego maszyny technologicznej może być konkretyzowana z uwzględnieniem specyficznych własności obiektu sterowania. Dla obrabiarek skrawających charakterystyczny jest cały kompleks rozpatrzonych zakłóceń i wzajemnych powiązań zmiennych. Realizacja procesu technologicznego na robotach pomiarowych, systemach pomiarowo – badawczych i innych analogicznych urządzeniach szczególnie, kiedy proces badań przebiega przy ustalonych parametrach, w zasadzie nie prowadzi do powstania dodatkowych oddziaływań siłowych [8, 24]. W tych warunkach wewnętrzne sprzężenia zwrotne przez proces technologiczny nie są zamknięte i struktura obiektu ulega znacznemu uproszczeniu a podstawowymi zakłóceniami są oddziaływania kinematyczne ze strony fundamentu.

Przeanalizujemy proces wyboru wyjściowych regulowanych współrzędnych obiektu. Najważniejsze cele sterowania układem dynamicznym obrabiarek skrawających to intensyfikacja procesu technologicznego

i podwyższenie dokładności obróbki części. Uwzględniając, że główną przyczyną powstania błędów kształtu części przy toczeniu wzdłużnym i szlifowaniu, szczególnie części o małej sztywności są odkształcenia sprężyste układu technologicznego, omawiane zmienne celowo jest rozpatrywać jako wyjściowe współrzędne obiektu. Świadczy to o tym, że jakość obrobionej powierzchni i dokładność obróbki w tym przypadku określane są wielkością promieniowej siły skrawania  $F_p$ , przy czym do optymalizacji procesu technologicznego wielkość  $F_p$  należy zmieniać w funkcji bieżącego naddatku na obróbkę.

Układy automatycznego sterowania przeznaczone są przede wszystkim do zwiększenia wydajności procesu technologicznego. Budowane są jako układy stabilizacji siły skrawania (tak zwane układy regulowania granicznego), przy tym jako wielkość regulowana zwykle przyjmowana jest jedna ze składowych siły skrawania lub zmienne funkcjonalnie powiązane z  $F_p$ .

W związku z powyższym, jako zmienne wyjściowe modeli matematycznych rozpatrywanych układów dynamicznych przyjmowane są siły skrawania i odkształcenia sprężyste układu technologicznego.

Należy zauważyć, że przy budowie układów gwarantujących zwiększenie dokładności obróbki, jako czujniki sprężenia zwrotnego stosowane są także czujniki za pomocą, których bezpośrednio jest mierzony wymiar obrobionych części. W tym przypadku ma miejsce kompensacja błędów spowodowanych działaniem różnorodnych zakłóceń. Przy obliczaniu i projektowaniu podobnych układów można również zastosować rozpatrzone niżej układy, ponieważ procesy dynamiczne w takich układach automatycznego sterowania przede wszystkim są określane przez właściwości układu sprężystego obrabiarki i procesu technologicznego.

Istnieją różne podejścia [73, 76] do rozwiązania zagadnienia identyfikacji obiektów sterowania: analityczne oparte na nagromadzonych danych teoretycznych i eksperymentalnych o zjawiskach fizycznych badanego procesu oraz intensywnie rozwijanym w ostatnim czasie podejściu statystycznym bazującym na opracowaniu materiałów badań eksperymentalnych.

W niniejszej pracy modele matematyczne układów dynamicznych urządzeń mechanicznych budowane są w oparciu o metodę analityczną. Następnie poszczególne parametry wchodzące do równań uszczegółowiane są na bazie danych eksperymentalnych. Takie podejście do rozwiązania zagadnienia identyfikacji obiektu bazuje na następujących założeniach.

Wyjściowe współrzędne procesu toczenia, na przykład składowe siły skrawania i odkształcenia sprężyste zależą od kilku dziesiątków czynników, które mogą się zmieniać w szerokim zakresie w zależności od parametrów skrawania, właściwości obrabianego materiału, charakterystyk ostrza, właściwości układu sprężystego itp. Opisane uwarunkowania czynią zagadnienie eksperymentalnego określenia modeli matematycznych niezwykle pracochłonnym i uniemożliwiają uzyskanie wystarczająco ogólnych wyników.

Dodatkowym argumentem na korzyść identyfikacji analitycznej są następujące uwarunkowania. Analiza oddziaływań zakłócających na układ dynamiczny pokazuje, że większość z nich ma charakter losowy, w szczególności odnosi się to do oddziaływań kinematycznych ze strony fundamentu oraz zmienności naddatku na obróbkę. Jak pokazano niżej przy identyfikacji analitycznej obiektu sterowania, parametry modelu matematycznego układu dynamicznego są funkcjami zarówno zmiennych deterministycznych takich jak prędkość obrotowa części, a także zmiennych, które mogą zmieniać się w sposób losowy (twardość obrabianego materiału, naddatek na obróbkę itp.).

Podczas tworzenia modelu matematycznego na bazie identyfikacji analitycznej udaje się ustalić wzajemne powiązanie deterministyczne między parametrami charakteryzującymi właściwościami procesu technologicznego i układu technologicznego oraz parametrami modelu. W rezultacie, przy deterministycznych charakterystykach technologicznych udaje się sformułować deterministyczny model matematyczny obiektu, natomiast dla określonych produkcji o znanych losowych charakterystykach procesu technologicznego i układu technologicznego można otrzymać oceny losowe parametrów modeli.

Zasadność formułowania zagadnienia identyfikacji analitycznej wynika z wysokiego poziomu osiągniętej wiedzy w zakresie teorii skrawania metali, ogólnych podstaw teoretycznych analizy stabilności i jakości dynamicznej urządzeń mechanicznych a także z badań poszczególnych elementów i procesów wchodzących w zamkniętą strukturę dynamiczną urządzeń mechanicznych [19, 39, 55, 61, 63, 100].

Bardzo istotne znaczenie w zakresie opracowania modeli matematycznych układu dynamicznego urządzeń mechanicznych mają prace V. A. Kudinowa [49] i K. Marchelka [54], w których zostały sformułowane podstawy teoretyczne badań jakości dynamicznej obrabiarek. Analizie pewnych zagadnień powstawania drgań obrabiarek w procesie obróbki mechanicznej i metod zwiększenia ich odporności wibracyjnej w procesie obróbki mechanicznej poświęcono wiele badań wykonywanych w różnych krajach. Wspomniane badania umożliwiają pełne pokazanie charakteru wzajemnych powiązań w strukturze dynamicznej urządzeń mechanicznych ich wyniki można wykorzystać do analitycznego kształtowania modeli matematycznych.

Zagadnienie identyfikacji układu dynamicznego urządzenia mechanicznego jak i innych obiektów sterowania polega na określeniu pewnego operatora, ustalającego wzajemne powiązanie wyjściowych i wejściowych zmiennych modelu matematycznego [73, 76]. Dla uzyskanych tutaj wyników podobnie jak i przy rozwiązywaniu zagadnienia identyfikacji innych obiektów złożonych nie uwzględnia się szeregu istotnych zjawisk i procesów.

Przy opracowywaniu modeli matematycznych dla wybranych zmiennych wyjściowych, jak pokazuje analiza, można zaniedbać kanały sprzężeń w sterowanym obiekcie przez napędy elektryczne ruchu głównego oraz

posuwu i przyjąć zamkniętość procesu technologicznego tylko przez układ sprężysty obrabiarki i przedmiotu obrabianego. Dopuszczalne jest również pominięcie oddziaływań związanych ze zużyciem narzędzia skrawającego i procesami cieplnymi, ponieważ ich inercyjność jest wyższa o rząd wielkości od inercyjności członów układu technologicznego i procesu technologicznego.

W niektórych rodzajach maszyn technologicznych, np. obrabiarkach współrzędnościowych, organy wykonawcze muszą mieć wysoką dokładność pozycjonowania, przy tym bardzo istotne są procesy tarcia, określające stabilność ruchu zespołów obrabiarki [35]. Dla rozpatrywanych typów obrabiarek, w których proces obróbki przebiega przy ciągłym posuwie narzędzia skrawającego, wskazane zjawiska mogą nie być uwzględniane. Układ kinematyczny obrabiarki charakteryzuje się istotnymi nieliniowościami typu „luz”, jednak dzięki wstępnemu napięciu i wysokiej jakości wykonania współczesnych mechanizmów posuwu, tych nieliniowości również można nie uwzględniać.

Możliwość linearyzacji równań ruchu poszczególnych członów układu dynamicznego maszyn technologicznych określana jest także tradycyjnymi sposobami, polegającymi na tym, że spełnienie wysokich wymagań odnośnie dokładności regulowania prowadzi do realizacji układu automatycznego sterowania, pracujących przy „małych” odchyłkach zmiennych.

Wobec tego, układ dynamiczny maszyn technologicznych może być rozpatrywany jako obiekt wielowymiarowy sterowania z podukładami w postaci układu technologicznego. Struktura obiektu sterowania zawiera obwody sprzężenia zwrotnego poprzez układ MDS maszyny technologicznej uwarunkowane oddziaływaniami siłowymi, powstającymi przy realizacji procesu technologicznego.

## **2.2. Metodologia opracowania modeli matematycznych układów dynamicznych obróbki skrawaniem**

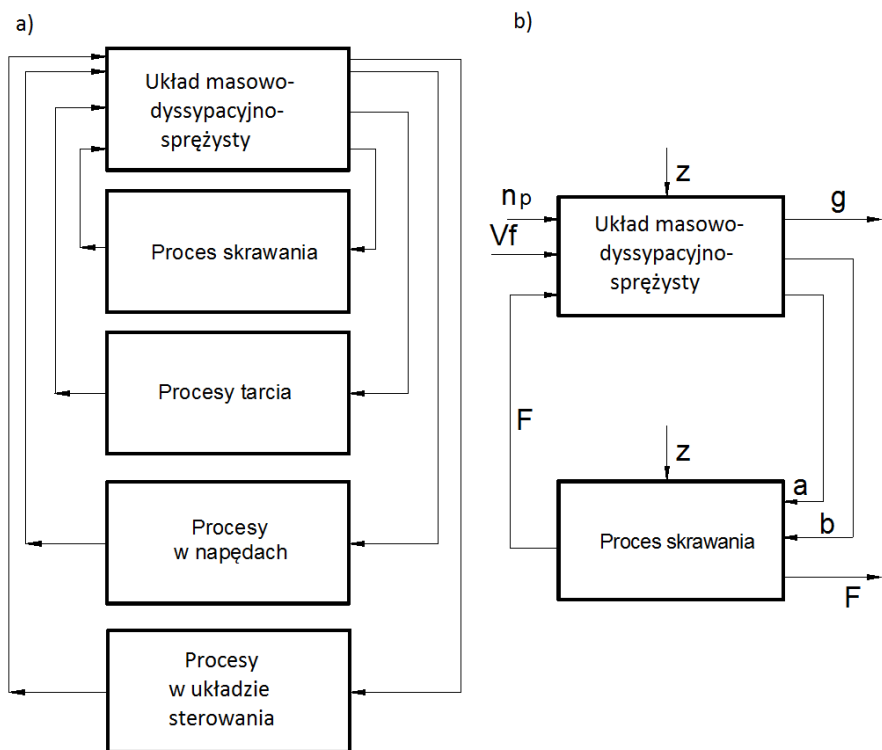
W niniejszej pracy, pod pojęciem modelu matematycznego obiektu, w szerokim zakresie, rozumie się zbiór zależności analitycznych, tablicowych i graficznych, które ilościowo obrazują związki między charakterystycznymi wielkościami działania obiektu. W ogólnym przypadku regułę przekształcania oddziaływania wejściowego  $X$  w odpowiedź obiektu  $Y$  przedstawia się w postaci operatora lub wektora modelu  $F_m$ , który reprezentuje zbiór operacji matematycznych lub logicznych, pokazując zależność między funkcjami wejściowymi i wyjściowymi.

Metoda syntezy modelu matematycznego obiektu sterowania w znacznej mierze zależy od objętości wykorzystanej informacji apriorycznej, pod którą w każdym konkretnym przypadku rozumie się informacje o obiektach, jakimi dysponuje się do momentu rozpoczęcia bieżącego etapu badań. W tym przypadku zadanie opracowania modelu może być zrealizowane w dwóch etapach. W pierwszym etapie na podstawie tych apriorycznych informacji o procesach fizycznych występujących w obiekcie sterowania opracowuje się pierwotny model strukturalny. Zwykle model ten zawiera nieznane parametry,

których znalezienie na podstawie danych apriorycznych jest skomplikowane lub niemożliwe. Pierwotny model strukturalny może zawierać w sobie niektóre elementy, które nie są niezbędne, w następnych etapach opracowania modelu matematycznego. W drugim etapie na podstawie badań eksperymentalnych określa się nieznane parametry obiektu i precyzuje się jego strukturę.

W przypadku, gdy istnieje pełna informacja o obiekcie sterowania, możliwe jest opracowanie modelu drogą analityczną. Taki proces, prowadzący do opracowania struktury i określenia parametrów modelu nazywa się identyfikacją analityczną. W przypadku układów złożonych opracowanie modelu matematycznego drogą analityczną wymaga często dodatkowych badań eksperymentalnych w celu sprawdzenia otrzymanych wyników teoretycznych a także określenia wybranych i niezbędnych parametrów modelu. Przedstawiony schemat pokazuje, że podstawowy zakres badań przy opracowaniu modelu matematycznego opiera się na głębokiej analizie teoretycznej powiązań pomiędzy zmiennymi parametrami i opracowaniu zależności, określających procesy występujące w obiekcie. Proces toczenia na obrabiarce realizuje się w wyniku złożonego współdziałania układu sprężystego, procesów skrawania i tarcia, procesów w napędach posuwu i wrzeciona, a także procesów w układzie sterowania, co schematycznie przedstawiono na rys. 2.2a.

Istnienie zamkniętych obwodów w przedstawionym schemacie, uwarunkowane jest siłowym współdziałaniem elementów dynamicznej struktury obrabiarki przez jej układ MDS np. siła skrawania odkształca układ MDS obrabiarki i wywołuje zmiany względne położenia narzędzia i przedmiotu obrabianego, co wywołuje zmiany przekroju warstwy skrawanej. Odpowiednie zmiany siły skrawania wpływają na wartość odkształceń sprężystych układu itp. [1, 2, 10, 83, 85, 86].



**Rys. 2.2. Schematy współdziałania procesów i układu sprężystego:**  
**a) zamkniętego układu dynamicznego obrabiarki,**  
**b) uproszczony schemat procesu toczenia**

Przy opracowywaniu modelu matematycznego układu dynamicznego, rozpatrywanego jako obiekt sterowania, połączenie układu MDS obrabiarki z procesami tarcia, mającymi poważne znaczenie w analizie stabilności ruchu węzłów obrabiarki, można pominąć.

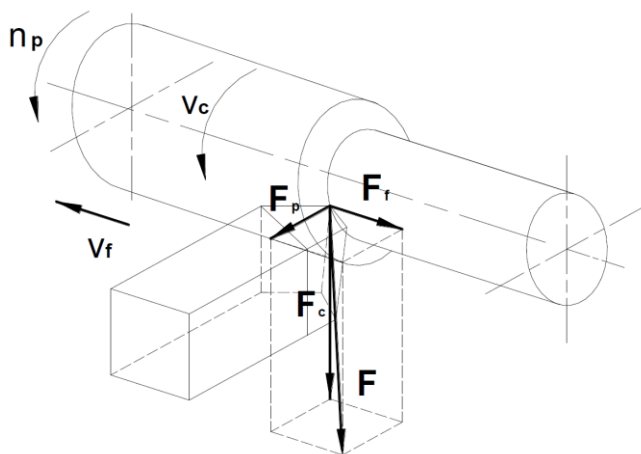
Nowoczesne napędy elektryczne wrzeciona i posuwu zapewniają wysoką dokładność sterowania prędkością elementów wykonawczych, co pozwala także pominąć obwód sprzężenia zwrotnego w obiekcie sterowania poprzez procesy w napędach i rozpatrywać prędkość obrotową wrzeciona  $n_p$ , i prędkość posuwu  $v_f$ , jak oddziaływania skierowane. Istotna nieliniowość typu „luz”, w mechanizmie posuwu wzdłużnego, w większości przypadków nie wpływa na właściwości dynamiczne obiektu sterowania w układach adaptacyjnych, dzięki wcześniej uzyskanemu obciążeniu, istniejącemu w schemacie kinematycznym obrabiarki podczas jej działania.

Uwzględniając wyszczególnione założenia i możliwe zakłócenia  $z$ , schemat obiektu sterowania można przedstawić w postaci jak na rys. 2.1b. Przekształcona struktura uwzględnia zamkniętość procesu technologicznego tylko przez układ MDS obrabiarki i części obrabianej.

W celu osiągnięcia wymaganej niezawodności dokładnościowej oprzyrządowania podczas jego działania, należy zapewnić żądane położenie przestrzenne lub żądane trajektorie ruchów elementów wykonawczych. Dlatego też, ważnymi zmiennymi wyjściowymi układu dynamicznego są odkształcenia sprężyste  $g$  układu technologicznego. Wahania odkształceń sprężystych układu technologicznego obrabiarek powodują zmiany przestrzennego położenia ostrza i przedmiotu obrabianego, co w końcowym efekcie zmniejsza dokładność obróbki przedmiotu. Uwzględniając, że główną przyczyną pojawienia się błędów kształtu przedmiotu przy toczeniu wzdłużnym są odkształcenia sprężyste układu technologicznego, wymienione zmienne należy rozpatrywać jako współrzędne wyjściowe obiektu sterowania.

Badania eksperymentalne procesu skrawania [23, 64], świadczą o tym, że jakość powierzchni obrobionej i dokładność obróbki są określane w tym przypadku za pomocą wartości promieniowej siły skrawania  $F_p$ . W przypadku optymalizacji procesu technologicznego wartość  $F_p$  powinna zmieniać się w funkcji bieżącej wartości naddatku na obróbkę.

Układy sterowania automatycznego, przeznaczone przede wszystkim do zwiększania wydajności procesu technologicznego, buduje się jako układy stabilizacji siły skrawania, przy tym jako wielkość regulowaną zwykle przyjmuje się jedną ze składowych  $F_c$  siły skrawania lub zmiennych funkcjonalnie powiązanych z  $F_p$  (rys. 2.3.)



**Rys. 2.3. Główne składowe siły skrawania przy toczeniu**

W związku z powyższym, składowe siły skrawania lub odkształcenia sprężyste układu technologicznego przyjmowane są jako zmienne wyjściowe modelu matematycznego układu dynamicznego.

W prezentowanej pracy modele matematyczne układu dynamicznego opracowuje się na podstawie badań analitycznych i uściśleniu na podstawie danych eksperymentalnych wybranych parametrów, które występują w równaniach ruchu. Takie podejście rozwiązywania zadania identyfikacji obiektu



opiera się na następujących założeniach. Współrzędne wyjściowe procesu toczenia np. składowej siły skrawania i odkształceń sprężystych zależą od kilkudziesięciu czynników, które mogą zmieniać się w szerokim zakresie w zależności od parametrów skrawania, właściwości materiału obrabianego, charakterystyk ostrza, właściwości układu MDS. Jak pokazano dalej parametry modeli matematycznych układu dynamicznego są funkcjami zmiennych regulowanych takich jak prędkość obrotowa przedmiotu, charakterystyki układu sprężystego. Ale również zmiennych, które mogą zmieniać się przypadkowo np. twardość materiału obrabianego, naddatek na obróbkę itp.

W czasie opracowywania modeli matematycznych na podstawie identyfikacji analitycznej udaje się ustalić ścisły wzajemny związek między parametrami, które charakteryzują właściwości procesu oraz układu technologicznego i parametrami modelu. W rezultacie przy ustalonych charakterystykach technologicznych możliwe jest opracowanie deterministycznego modelu matematycznego obiektu [83, 86].

Przy opracowaniu modeli matematycznych w odniesieniu do wybranych wielkości wyjściowych można pominąć sprzężenia zwrotne w obiekcie sterowania poprzez napędy wrzeciennika i posuwu, a uwzględnić jedynie sprzężenia zwrotne procesu technologicznego tylko przez układ MDS.

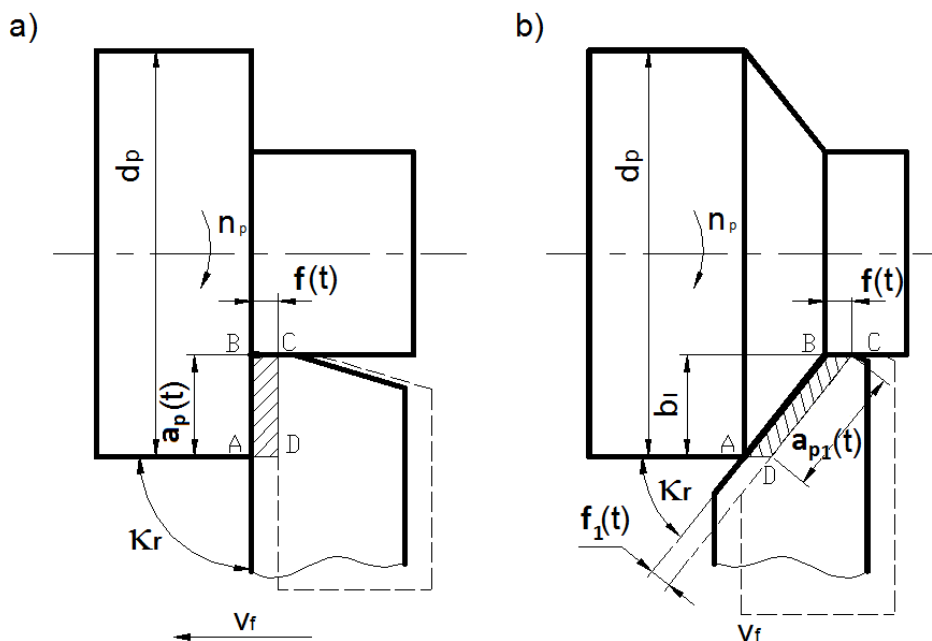
Dopuszczalne jest także pominięcie oddziaływań związanych ze zużyciem narzędzi i procesami cieplnymi, ponieważ ich inercja jest o jeden rząd wielkości wyższa od inercji członów układu technologicznego i procesu technologicznego.

Możliwość linearyzacji równań ruchu poszczególnych elementów układu dynamicznego opiera się także na tradycyjnych poglądach, że zapewnienie ścisłych wymagań w stosunku do dokładności sterowania sprowadza się do realizacji układu automatycznej regulacji, które działają przy „małych” odchyleniach zmiennych. W takim razie, układ dynamiczny procesu toczenia może być rozpatrywany jako wielowymiarowy obiekt sterowania z podukładami w postaci procesu technologicznego i układu MDS. Struktura obiektu sterowania zawiera obwody sprzężeń zwrotnych przez układ MDS, wywołanych oddziaływaniami siłowymi, które pojawiają się podczas realizacji procesu technologicznego.

### **2.2.1. Geometria warstwy skrawanej i siły skrawania przy toczeniu**

Proces skrawania materiału na tokarce realizuje się za pośrednictwem ruchu przedmiotu z prędkością obrotową  $n$  i prędkością posuwu wzdłużnego  $v_f$  (rys. 2.4) [1, 83]. Głównymi zmiennymi, którymi charakteryzuje się stan procesu skrawania są: prędkość skrawania  $v_c$ , prędkość posuwu  $v_f$  oraz elementy przekroju WS.

Elementami przekroju warstwy skrawanej są: grubość warstwy skrawanej  $a_1$ , szerokość  $b_1$ , lub wzajemnie powiązane z nimi wartości  $a$  i  $b$  (rys. 2.4), przy czym przy skrawaniu nożem z  $\kappa_r = 90^\circ$ ,  $a_1 = a$ ,  $b_1 = b$ . W teorii skrawania metali [111] charakterystyki przebiegu procesu technologicznego wykorzystuje się wielkości  $a$  i  $b$ .



**Rys. 2.4. Elementy geometryczne przekroju poprzecznego warstwy skrawanej przy toczeniu wzdłużnym**

Wielkość  $f$  – nazywamy posuwem mm/obrót części, wielkość  $a_p$  – głębokością skrawania. Wartości te rozpatruje się jako parametry stanu ustalonego i są one stałe w czasie jednego obrotu przedmiotu. Przy opracowaniu modeli matematycznych procesu toczenia niezbędne jest uwzględnienie zmian  $f$  i  $a_p$  nawet w czasie jednego obrotu przedmiotu i należy rozpatrywać je jako zmienne, które zależą od czasu bieżącego  $t$ . W związku z tym należy wykorzystywać pojęcie chwilowej (bieżącej) wartości grubości przekroju  $f(t)$ , i chwilowej bieżącej wartości szerokości przekroju  $a_p(t)$ .

Siłę skrawania w procesie toczenia można przedstawić w postaci dwóch składników [37, 111]:

$$F_i = F_{1i} + F_{2i}, \quad i = \{x, y, z\}. \quad (2.1)$$

Siła  $F_{1i}$  jest siłą powstawania wióra tzn., siłą z którą powstający wiór działa na powierzchnię natarcia ostrza. Siłę tą zależy od właściwej pracy powstawania wióra i pola przekroju skrawanej warstwy materiału:

$$F_{1i} = Q_c \cdot a \cdot b \cdot k_i, \quad i = \{x, y, z\}, \quad (2.2)$$

gdzie:  $Q_c$  - praca właściwa powstawania wióra,  $k_i$  – współczynnik, który zależy od geometrii ostrza noża i tarcia usuwanego materiału po powierzchni natarcia ostrza [39].

Składniki  $F_{2i}$  z zależności (2.1) są siłami kontaktowych odkształceń na powierzchni przyłożenia i zależą one od fizycznych właściwości obrabianego materiału, prędkości skrawania i grubości warstwy skrawanej. W większości ważnych praktycznie przypadków siły skrawania, na powierzchni przyłożenia są znacznie mniejsze od sił na powierzchni natarcia i dlatego można je pominąć w obliczeniach. Konieczność uwzględnienia  $F_{2i}$  zachodzi tylko w przypadkach znacznego zużycia ostrza, przy małych względnych wartościach grubości warstwy skrawanej i obróbce materiałów twardych.

W większości praktycznie ważnych przypadków, przy stałej prędkości skrawania siły skrawania można rozpatrywać jako proporcjonalne do twardości obrabianego materiału i powierzchni przekroju warstwy skrawanej [111]:

$$F_i \cong Q_c \cdot a \cdot b \cdot k_i. \quad (2.3)$$

Wartości liczbowe współczynników  $Q_c$  i  $k_i$ , można odnaleźć w literaturze przedmiotu. Równanie (2.3) opisuje wpływ parametrów przekroju warstwy skrawanej na siły skrawania. W teorii skrawania metali w celu obliczenia sił skrawania również wykorzystuje się poniższą zależność empiryczną [81, 91]:

$$F_i = 10 \cdot C_p \cdot b^{X_{fi}} \cdot a^{Y_{fi}} \cdot v_c^{n_{pi}} \cdot k_i, \quad (2.4)$$

gdzie wartości: stałej  $C_p$ , współczynników  $k_i$  i wykładników potęgowych  $x_{fi}, y_{fi}, n_{pi}$ , wyznacza się empirycznie dla konkretnych warunków obróbki.

Linearyzując równanie (2.3) i (2.4), przyrosty siły skrawania można przedstawić w postaci:

$$\Delta F_i = m_i \cdot \Delta a + n_i \cdot \Delta b + c_i \Delta q + s_i \Delta v_c. \quad (2.5)$$

Współczynniki procesu skrawania, w funkcji przyrostu grubości warstwy skrawanej  $\Delta a$ , szerokości warstwy skrawanej  $\Delta b$ , twardości materiału obrabianego  $\Delta q$ , i prędkości skrawania  $\Delta v_c$  definiuje się następująco:

$$m_i = \left( \frac{\partial F_i}{\partial a} \right)_o; \quad n_i = \left( \frac{\partial F_i}{\partial b} \right)_o; \quad c_i = \left( \frac{\partial F_i}{\partial q} \right)_o; \quad s_i = \left( \frac{\partial F_i}{\partial v_c} \right)_o. \quad (2.6)$$

Wykładnik potęgowy  $n_{pi}$  we wzorze (2.4) w wielu przypadkach jest w przybliżeniu równy 0, a w zależności (2.3) siły skrawania praktycznie nie zależą od prędkości skrawania  $v_c$ . Natomiast współczynnik linearyzacji  $s_i$  w (2.6) jest bliski lub równy 0.

Podane wyżej równania przedstawiają zależność sił od parametrów skrawania w stanie ustalonym. W stanach przejściowych, jak pokazano w pracy [38], siły skrawania są ściśle powiązane z parametrami przekroju warstwy skrawanej. Związki te uwzględniają właściwości plastyczne materiału obrabianego, które powodują opóźnienie zmian siły skrawania względem zmian parametrów przekroju warstwy skrawanej.

Właściwości dynamiczne procesu skrawania zmiennej wyjściowej w postaci całkowitej siły skrawania  $F_c$  i zmiennej wejściowej – grubość warstwy skrawanej, mogą być opisane funkcją przejścia członu inercyjnego:

$$M_c(s) = \frac{\Delta F_c(s)}{\Delta a(s)} = \frac{m_i}{T_c \cdot s + 1}, \quad (2.7)$$

gdzie:  $m_i$  - współczynnik wzmocnienia procesu skrawania, który oblicza się wg (2.6);  $T_c$  - stała czasowa powstawania wióra dla  $F_c$ . Funkcję przejścia (2.7), otrzymano dla przypadku procesu skrawania swobodnego. Wyniki te bez większych błędów mogą być przeniesione na proces skrawania nieswobodnego w przypadku, kiedy grubość warstwy skrawanej jest o jeden rząd mniejsza od jej szerokości. Wówczas inercyjność procesu skrawania dla każdej składowej siły skrawania może być przedstawiona w postaci funkcji przejścia przyrostów grubości i szerokości przekroju warstwy skrawanej.

Wyrażenie (2.5) określające przyrost siły skrawania, przechodząc do zapisu operatorowego i pomijając zależność sił od prędkości skrawania można przedstawić w postaci:

$$\Delta F_i(s) = M_i(s) \cdot \Delta a(s) + N_i(s) \cdot \Delta b(s) + C_i(s) \cdot \Delta q(s). \quad (2.8)$$

## 2.2.2. Własności masowo–dyssypacyjno–sprężyste układu technologicznego

W procesie obróbki części w układzie technologicznym działanie sił skrawania prowadzi do powstania odkształceń sprężystych  $g$  tegoż układu, które w ogólnym przypadku zależą od sił skrawania, miejsca ich przyłożenia, właściwości materiału i postaci rozwiązania konstrukcyjnego [49, 54].

Związki między wielkością odkształceń sprężystych a składowymi siłami skrawania w postaci operatorowej opisuje się linearyzowanymi zależnościami:

$$\Delta g_i(s) = \Delta H_i(s) \Delta F_i(s), i = \{x, y, z\}. \quad (2.9)$$

W powyższych zależnościach wyrażenie  $H_i(s)$  należy traktować jako funkcje przejścia ekwiwalentnego układu MDS, zbudowanego z wrzeciona, zespołu suportu, przedmiotu obrabianego i narzędzia skrawającego [49]. W stanie ustalonym operator  $H_i(s)$  jest funkcją nieliniową, którą linearyzujemy ustaloną wartością współrzędnej  $X$ . Uwzględnia się, że w ogólnym przypadku odkształcenia układu technologicznego względem każdej współrzędnej są zależne nie tylko od składowej siły skrawania, skierowanej wzdłuż tej współrzędnej, ale także od dwóch innych składowych, co można zapisać w postaci przyrostowej:

$$\begin{aligned} \Delta g_x &= h_{xx} \Delta F_f + h_{xy} \Delta F_p + h_{xz} \Delta F_c, \\ \Delta g_y &= h_{yx} \Delta F_f + h_{yy} \Delta F_p + h_{yz} \Delta F_c, \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\Delta g_z = h_{zx}\Delta F_f + h_{zy}\Delta F_p + h_{zz}\Delta F_c.$$

Współczynniki  $h_{ij}$ , występujące w równaniach (2.10) i charakteryzujące stosunek przesunięcia ostrza noża względem jednej z osi ortogonalnego układu współrzędnych do przyrostu składowej siły skrawania, określają zależności:

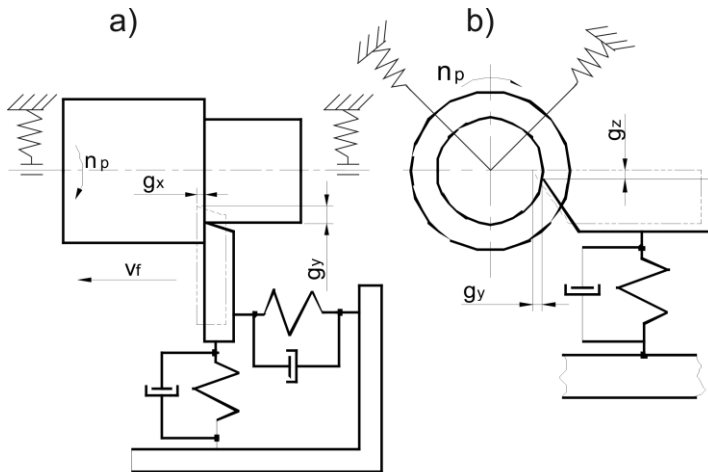
$$h_{ij} = \left( \frac{\partial y_i}{\partial F_j} \right), \quad i = \{x, y, z\}, \quad j = \{x, y, z\}, \quad (2.11)$$

i można je traktować jako podatność UT. Podatność (lub odwrotna do niej wielkość – sztywność) jest podstawową właściwością sprężystego układu w stanie ustalonym.

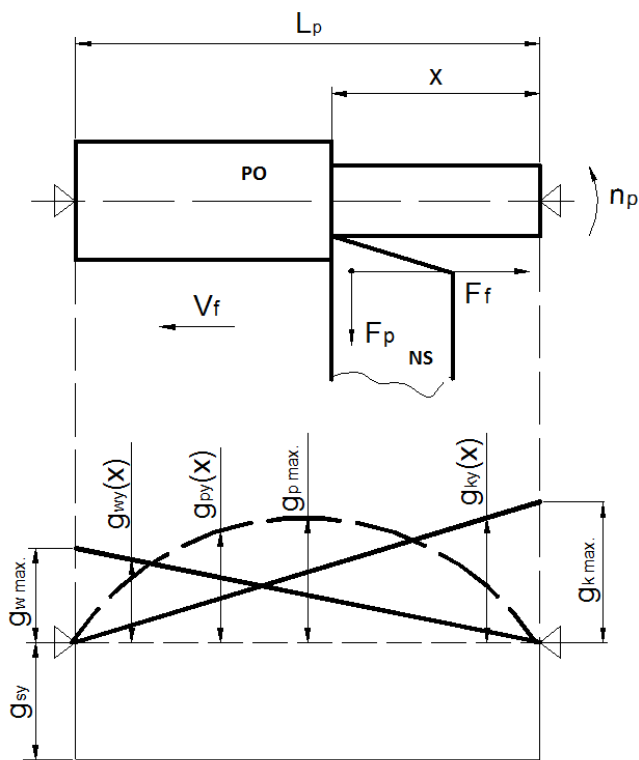
Współczynniki  $h_{xx}$ ,  $h_{yy}$ ,  $h_{zz}$  opisują podatności układu technologicznego we współrzędnych X, Y, Z względem przyrostów składowych sił skrawania tych współrzędnych (podatności własne). Współczynniki  $h_{ij}$  przy  $i \neq j$  charakteryzują podatność układu technologicznego dla i-tej współrzędnej względem składowej siły skrawania dla j-tej współrzędnej (podatności skrośne).

W dalszej części przedstawiono bardziej szczegółową metodykę określenia współczynników  $h_{ij}$  i wpływ poszczególnych składowych na właściwości dynamiczne układu.

Największy wpływ na dokładność obróbki mają odkształcenia sprężyste układu technologicznego współrzędnej Y (rys. 2.5). Powodują one zwiększenie odległości krawędzi ostrza od osi obrotu półfabrykatu, a następnie do zmiany promienia obrabianego przedmiotu o wartość  $g_y(x, F_p)$ . Oprócz tego, zmieniają się przy tym parametry przekroju warstwy skrawanej i siły skrawania (rys. 2.5, rys. 2.6) [86].



**Rys. 2.5. Uproszczony schemat układu masowo-dyssypacyjno-sprężystego tokarki**



**Rys. 2.6. Schemat odkształceń sprężystych układu technologicznego**

Przy toczeniu wzdłużnym (rys. 2.6) odkształcenia sprężyste współrzędnej Y są zależne przede wszystkim od siły promieniowej  $F_p$ , powodującej odkształcenia  $g_{wy}$ ,  $g_{ky}$  – wrzeciona i konika,  $g_{sy}$  – noża i suportu oraz  $g_{py}$  – przedmiotu obrabianego w kierunku promieniowym. Wartość odkształceń sprężystych części, a także wrzeciona i konika, istotnie zależy od punktu przyłożenia siły  $F_p$  wzdłuż osi części:

$$g_y(x, F_p) = g_{ky}(x, F_p) + g_{wy}(x, F_p) + g_{sy}(x, F_p) + g_{py}(x, F_p).$$

Do dalszej analizy celowe jest przedstawienie odkształceń sprężystych w postaci dwóch składowych. Pierwsza z nich reprezentuje elementy obrabiarki (pierwsze trzy składowe w powyższym wyrażeniu), a druga - odkształcenia części:

$$g_y(x, F_p) = g_{oby}(x, F_p) + g_{py}(x, F_p), \quad (2.12)$$

$$g_{oby}(x, F_p) = g_{ky}(x, F_p) + g_{wy}(x, F_p) + g_{sy}(x, F_p). \quad (2.13)$$

Z uwzględnieniem zależności (2.12), podatność ekwiwalentnego układu sprężystego współrzędnej Y, i analogicznie innych współrzędnych, określa się za pomocą odpowiednich podatności obrabiarki i przedmiotu obrabianego:

$$h_{ij} = h_{obj} + h_{pij}. \quad (2.14)$$

W związku ze złożonością struktury układu technologicznego obrabiarki, wynikającą z występowania dużej liczby elementów i połączeń ruchomych. W obecnej chwili za najbardziej niezawodne uważa się metody eksperymentalne badania charakterystyk układu MDS przy użyciu, których wyznacza się współczynniki  $h_{obj}$ .

Wartość i charakter zmian odkształceń sprężystych części  $g_{py}(x, F_i)$  zależą od sposobu zamocowania części w obrabiarce i jej własności sprężystych. Odkształcenia sprężyste  $g_{py}(x, F_p)$  w stanie ustalonym mogą być obliczone, na przykład przy zamocowaniu części w kłach i rozpatrywane jako ugięcie belki swobodnie leżącej na dwóch podporach [71]:

$$g_{py}(x, F_p) = \frac{F_p x^2 (L_p - x)}{3EI L_p}, \quad (2.15)$$

gdzie  $E$  - moduł sprężystości materiału przedmiotu obrabianego,  $I$  - moment bezwładności przekroju przedmiotu obrabianego.

Funkcja  $g_{py}(x)$  ma maksimum gdy  $x = \frac{L_p}{2}$ , a maksymalne przemieszczenie promieniowe przedmiotu obrabianego wynikające z jego odkształcenia własnego :

$$g_{p\max} = \frac{F_p L_p^3}{48EI}.$$

Wyrażenie opisujące ugięcie  $g(x, F_i)$  innych układów technologicznych układów obróbki zostały podane w [23, 91]. Na podstawie tych wyrażeń, z wykorzystaniem zależności (2.11) wyznaczono wartości podatności części, a podatność ekwiwalentną UT opisuje zależność (2.14).

Analizując stany dynamiczne UT, zwykle wykorzystuje się założenie o współrzędnych normalnych [49]. W tym przypadku dynamiczne własności różnych członów UT można opisać równaniami drugiego rzędu, natomiast ekwiwalentną funkcję przejścia układu sprężystego „obrabiarca – przedmiot obrabiany” w postaci:

$$H_{ij}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta F_j(s)} = \sum_{k=1}^n \frac{h_{ijk}}{m_k h_{ijk} s^2 + \xi_{ijk} h_{ijk} s + 1}, \quad (2.16)$$

gdzie:  $m_k$ ,  $\xi_{ijk}$ ,  $h_{ijk}$  - odpowiednio masa, względny współczynnik tłumienia i podatność elementów układu sprężystego i-tej współrzędnej względem j-tej składowej siły skrawania.

Badania eksperymentalne układów MDS maszyn pokazują, że w większości przypadków zastępczy układ MDS posiada tylko jedną istotną częstotliwość, tak zwany "ton podstawowy" [49,54]. Dzięki temu możliwe jest opisywanie własności dynamicznych za pomocą równania różniczkowego drugiego rzędu.

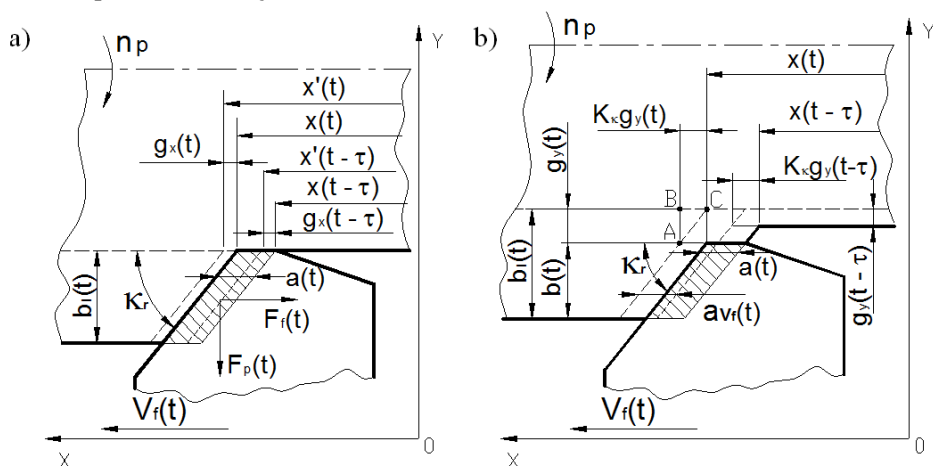
W ten sposób, z uwzględnieniem dynamicznych własności ekwiwalentnego układu MDS można rozpatrywać funkcje przejścia  $H_{ij}$  jako odpowiadające członom oscylacyjnym, natomiast w charakterze składowych wejściowych i wyjściowych zmiennych układu MDS rozpatrywać operatorowe wyrażenia (2.8) i (2.16).

### 2.2.3. Proces formowania przekroju warstwy skrawanej

W procesie toczenia charakterystyczny jest wpływ śladów obróbki powstałych w poprzednim przejściu ostrza skrawającego na przebieg procesu jest to tak zwane zjawisko skrawania „po śladzie” [32, 38, 80]. Przejawia się ono w tym, że składowe warstwy skrawanej materiału w chwili bieżącej są określone zarówno przez chwilowe położenie krawędzi ostrza, jak i jego współrzędnymi w chwili poprzedniego obrotu półfabrykatu, tzn. w chwili opóźnionej o czas jednego obrotu

$$\tau = \frac{1}{n_p}.$$

Sposób formowania przekroju warstwy skrawanej przy toczeniu wzdłużnym ostrzem pokazano na rys. 2.7.



**Rys. 2.7. Schemat formowania poprzecznego przekroju:**

- a) z uwzględnieniem odkształceń sprężystych dla współrzędnej X,**  
**b) z uwzględnieniem odkształceń sprężystych dla współrzędnych X i Y**

Na rys. 2.6a pokazano przekrój warstwy skrawanej z uwzględnieniem odkształceń sprężystych tylko współrzędnej X. Na rys. 2.6b uwzględniono odkształcenia sprężyste w osi X i Y. Chwilową wartość grubości warstwy skrawanej opisuje zależność [1, 83]:

$$a(t) = x(t) - x(t - \tau), \quad (2.17)$$

gdzie  $x(t)$  i  $x(t - \tau)$  - położenie skrawającej krawędzi ostrza, odpowiednio, w chwili bieżącej  $t$  i w chwili opóźnionej o czas  $\tau$  jednego obrotu części.



Współrzędne położenia krawędzi ostrza skrawającego bez uwzględnienia odkształceń sprężystych zależą od prędkości posuwu wzdłużnego, wyznacza się je jako:

$$x'(t) = \int_0^t v_f(t) dt, \quad x'(t-\tau) = \int_0^{t-\tau} v_f(t-\tau) dt.$$

W przypadku ogólnym, jak wynika z rys. 2.7, na położenie krawędzi skrawającej ostrza w chwili bieżącej, dodatkowy wpływ mają odkształcenia sprężyste w osi X i Y:

$$x(t) = \int_0^t v_f(t) dt - g_x(t) - K_{\kappa_r} g_y(t), \quad (2.18)$$

gdzie  $K_{\kappa_r} = \text{ctg } \kappa_r$  - współczynnik, uwzględniający wpływ odkształceń sprężystych w osi Y na grubość warstwy skrawanej,  $\kappa_r$  - kąt przystawienia krawędzi skrawającej. Położenie krawędzi skrawającej w chwili poprzedniego obrotu podaje się jako:

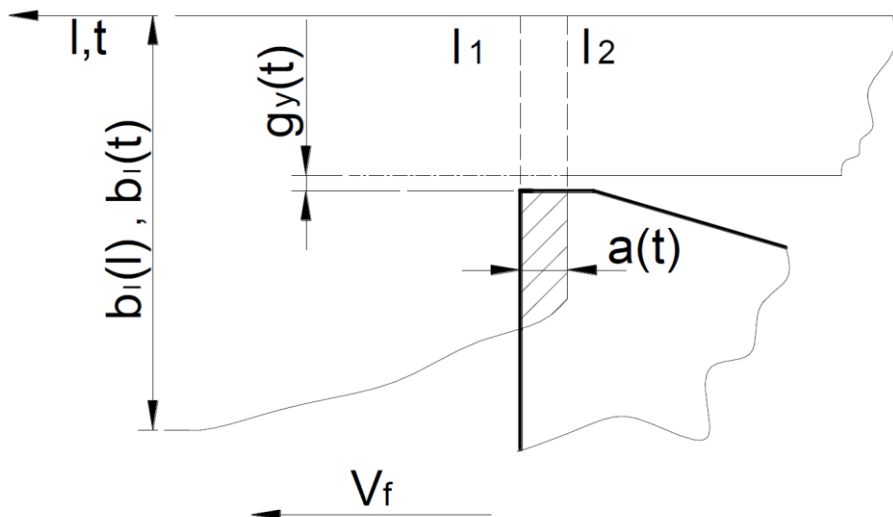
$$x(t-\tau) = \int_0^{t-\tau} v_f(t-\tau) dt - g_x(t-\tau) - K_{\kappa_r} g_y(t-\tau). \quad (2.19)$$

Uwzględniając zależności (2.17) do (2.19) grubość warstwy skrawanej można wyznaczyć z zależności:

$$a(t) = \int_0^t v_f(t) dt - g_x(t) - K_{\kappa_r} g_y(t) - \left[ \int_0^{t-\tau} v_f(t-\tau) dt - g_x(t-\tau) - K_{\kappa_r} g_y(t-\tau) \right]. \quad (2.20)$$

Bieżącą wartość średniej wartości głębokości skrawania można otrzymać jeśli znana jest zależność zmiany nadkładu na obróbkę  $b_l$  wzdłuż osi części (rys. 2.8), to nie uwzględniając odkształceń sprężystych w kierunku promieniowym i dla średniej wartości głębokości skrawania i grubości warstwy  $l_1 - l_2 = a$  można przedstawić zależność:

$$b(l) = \frac{1}{l_1 - l_2} \left[ \int_0^{l_1} b_l(l) dl - \int_0^{l_2} b_l(l) dl \right].$$



Rys.2.8. Przekrój poprzeczny WS przy zmianach naddatku wzdłuż osi części

Mając na uwadze rozpatrywany model zlinearyzowany a także  $v_f = const$ , można przejść do zależności opisującej zmiany naddatku w funkcji czasu  $b_1(t)$  (pomijając zmiany odkształceń sprężystych w osi X) i zapisać:

$$b(t) = \frac{1}{t_1 - t_2} \left[ \int_0^{t_1} b_l(t) dt - \int_0^{t_2} b_l(t) dt \right] - g_y(t), \quad (2.21)$$

gdzie:  $t_1 - t_2 = \tau$ .

Na parametry WS mają także wpływ odkształcenia sprężyste we współrzędnej Z. Ten wpływ może być istotny przy obróbce przedmiotów podatnych o małej średnicy. Przyrost szerokości warstwy wskutek odkształceń sprężystych współrzędnej Z, zgodnie z rys. 2.9 przyjmie postać [83]:

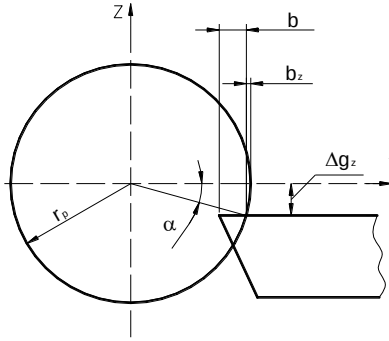
$$b_z = r_p - r_p \cos \alpha.$$

Linearyzując powyższe wyrażenie, otrzymano:

$$\Delta b_z = K_{bz} \Delta g_z,$$

gdzie wzmocnienie, ustalające związek między przyrostami  $\Delta b_z$  i  $\Delta g_z$ , z uwzględnieniem małej wartości kąta  $\alpha$  przyjmuje postać:

$$K_{bz} = \sin \frac{g_{z0}}{r_p} \cong \frac{g_{z0}}{r_p}.$$



**Rys. 2.9. Schemat wpływu odkształceń sprężystych w kierunku współrzędnej Z na głębokość skrawania**

Rozpatrując procesy technologiczne toczenia zewnętrznego, wzrost odkształceń sprężystych wzdłuż współrzędnej Z prowadzi do zmniejszenia głębokości skrawania (sprężenie ujemne). W procesach roztaczania odkształcenia sprężyste współrzędnej Z prowadzą do dodatkowego dodatniego przyrostu szerokości warstwy skrawanej. Powstający obwód dodatniego sprężenia zwrotnego w strukturze dynamicznej obiektu może mieć istotny niekorzystny wpływ na jego stabilność.

Uwzględniając dodatkową zmianę naddatku na obwodzie części  $b_r$  i wpływ odkształceń osi Z (rozpatrywano proces toczenia zewnętrznego), przyrost zastępczej szerokości przekroju warstwy skrawanej przyjmuje postać:

$$\Delta b(t) = \frac{1}{t_1 - t_2} \left[ \int_0^{t_1} \Delta b_l(t) dt - \int_0^{t_2} \Delta b_l(t) dt \right] - \Delta g_y(t) - K_{bz} \Delta g_z(t). \quad (2.22)$$

W przypadku, gdy znana jest zależność zmiany twardości obrabianego materiału wzdłuż osi części  $q_l(t)$ , wtedy przeprowadzając podobną analizę, można otrzymać wyrażenie dla średniej wartości twardości materiału na odcinku przekroju warstwy skrawanej:

$$q(t) = \frac{1}{t_1 - t_2} \left[ \int_0^{t_1} q_l(t) dt - \int_0^{t_2} q_l(t) dt \right] \quad (2.23)$$

Po zastosowaniu do równań (2.21), (2.22), (2.23) przekształcenia Laplace'a otrzymuje się:

$$\Delta a(s) = \frac{1}{s} \left[ 1 - e^{-s\tau} \right] \Delta v_f(s) - \left[ 1 - e^{-s\tau} \right] \Delta g_x(s) - \left[ 1 - e^{-s\tau} \right] K_{kr} \Delta y_y(s), \quad (2.24)$$

$$\Delta b(s) = \frac{1}{s\tau} \left[ 1 - e^{-s\tau} \right] \Delta b_l(s) - \Delta g_y(s) - K_{bz} \Delta g_z(s), \quad (2.25)$$

$$\Delta q(s) = \frac{1}{s\tau} \left[ 1 - e^{-s\tau} \right] \Delta q_l(s). \quad (2.26)$$

Równanie zastępczej grubości przekroju WS otrzymano przy założeniu stałej prędkości obrotowej części. Sterowanie prędkością obrotową przedmiotu obrabianego powoduje, że w zależności (2.24) pojawia się dodatkowa składowa w postaci:

$$- \frac{v_{no}\tau}{s} \left[ 1 - e^{-s\tau} \right] \Delta n_p(s). \quad (2.27)$$

#### 2.2.4. Układ równań i uogólniony schemat strukturalny modelu matematycznego

Układ równań opisujących obiekt sterowania – układ dynamiczny obróbki toczeniem może być przedstawiony w postaci:

$$\Delta F_f(s) = M_x(s)\Delta a(s) + N_x(s)\Delta b(s) + C_x(s)\Delta q(s), \quad (2.28)$$

$$\Delta F_p(s) = M_y(s)\Delta a(s) + N_y(s)\Delta b(s) + C_y(s)\Delta q(s), \quad (2.29)$$

$$\Delta F_c(s) = M_z(s)\Delta a(s) + N_z(s)\Delta b(s) + C_z(s)\Delta q(s), \quad (2.30)$$

$$\Delta g_x(s) = H_{xx}(s)\Delta F_f(s), \Delta g_y(s) = H_{yy}(s)\Delta F_p(s),$$

$$\Delta g_z(s) = H_{zz}(s)\Delta F_c(s), \quad (2.31)$$

Schemat strukturalny obiektu sterowania, odpowiadający układom równań (2.24), (2.25), (2.26), (2.27), (2.28) (2.29), (2.30) przedstawiono na rys. 2.10 [134].

Wprowadzając oznaczenia:

$$G_\tau(s) = 1 - e^{-s\tau}, \quad G_{v_f}(s) = \frac{1}{s} G_\tau(s),$$

$$G_{nv}(s) = - \frac{v_{no}\tau}{s} G_\tau(s),$$

$$G_b(s) = \frac{1}{s\tau} G_\tau(s), \quad G_q(s) = \frac{1}{s\tau} G_\tau(s)$$

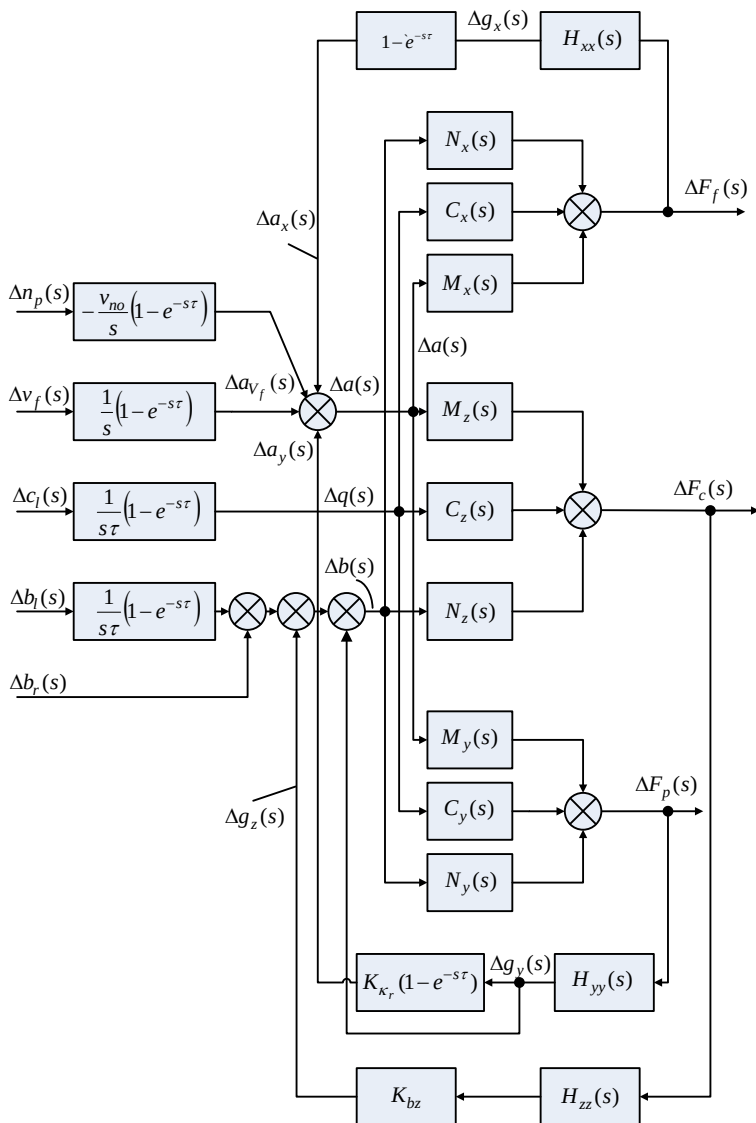
można przekształcić wyrażenia (2.24) do (2.26) do postaci:

$$\begin{aligned} \Delta a(s) = & G_{v_f}(s)\Delta v_f(s) + G_{nv}(s)\Delta n_p(s) - \\ & - G_\tau(s)\Delta g_x(s) - K_{\kappa_r} G_\tau(s)\Delta g_y(s) \end{aligned}, \quad (2.32)$$

$$\Delta b(s) = G_b(s)\Delta b_l(s) - \Delta b_r(s) - \Delta g_y(s) - K_{bz}\Delta g_z(s), \quad (2.33)$$

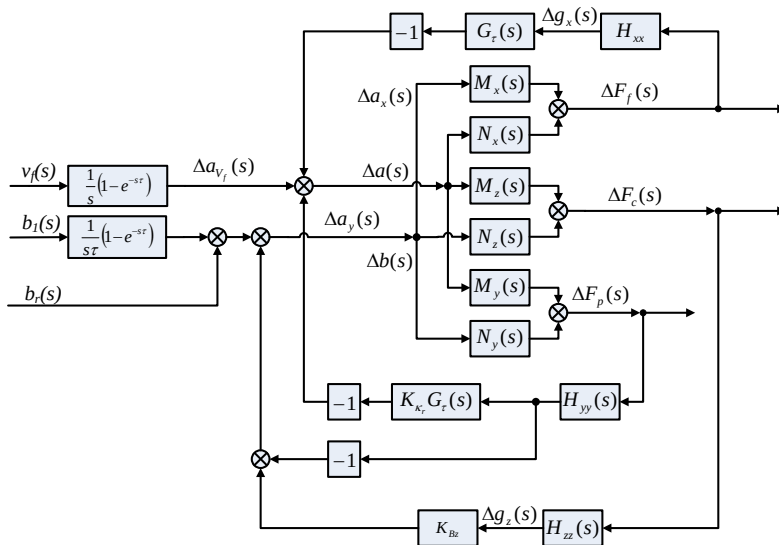
$$\Delta q(s) = G_q(s)\Delta q_l(s). \quad (2.34)$$

Schemat strukturalny obiektu sterowania odpowiadający układowi równań (2.28), (2.29), (2.30), (2.31), (2.32) (2.33), (2.34) przedstawiono na rys. 2.11.



Rys. 2.10. Wyjściowy schemat strukturalny obiektu sterowania

Na proces formowania przekroju WS duży wpływ ma zjawisko skrawania „po śladzie” i odkształcenia sprężyste układu technologicznego. Przy tym, proces formowania przekroju warstwy skrawanej można opisać układem równań całkowo-różniczkowych z opóźnionym argumentem. Zmienne charakteryzujące przekrój warstwy skrawanej zależą od zmiennych wejściowych i odkształceń sprężystych układu technologicznego.



**Rys. 2.11. Schemat strukturalny obiektu sterowania**

Zadanie opracowania numerycznych modeli matematycznych układów dynamicznych maszyn, które uwzględniają znaczną zgromadzoną wiedzę o procesach podstawowych, które charakteryzują rozpatrywane obiekty, należy rozwiązywać metodami identyfikacji analitycznej.

W celu osiągnięcia wymaganej niezawodności dokładnościowej dynamicznych układów maszyn, w warunkach oddziaływania zakłóceń, należy zapewnić wzajemne przestrzenne położenie układów wykonawczych lub trajektorii ich ruchu. Dominujący wpływ na niezawodność dokładnościową układów dynamicznych rozpatrywanej klasy mają odkształcenia sprężyste układu technologicznego o przestrzennym wektorze odkształceń sprężystych.

W dynamicznej strukturze identyfikowanego obiektu sterowania można wyróżnić podsystemy w postaci procesu technologicznego i układu technologicznego. W przypadku procesów technologicznych z występującymi oddziaływaniami siłowymi, co jest charakterystyczne dla obrabiarek, struktura dynamiczna obiektu ma obwody sprzężeń zwrotnych, co jest uwarunkowane wzajemnym oddziaływaniem wskazanych układów.

W trakcie budowy modeli matematycznych dopuszczalna jest linearyzacja równań ruchu opisujących układ dynamiczny obrabiarki. Układ dynamiczny należy rozpatrywać jako wielowymiarowy obiekt, którego stan określono odpowiednimi zmiennymi.

W przypadku obrabiarek podstawowymi elementami wejściowymi zmiennych technologicznych procesu skrawania są chwilowe wartości grubości i szerokości warstwy skrawanej, a także twardości obrabianego materiału. Natomiast elementami wektora wyjściowego są składowe siły skrawania.

Dynamiczne właściwości procesu skrawania mogą być opisane równaniami różniczkowymi pierwszego rzędu.

W zbiorze zmiennych technologicznych, tworzonych przez układ dynamiczny, można wyróżnić dwie składowe. Jedna z nich jest określona wektorem oddziaływań wejściowych, a druga – wektorem odkształceń sprężystych.

Elementami wielkości wejściowych są wielkości sterujące: prędkość posuwu wzdłużnego, prędkość obrotowa przedmiotu, a także zakłócenia w postaci zmiany twardości obrabianego materiału i naddatku względem długości i średnicy części.

Na wybór zmiennych technologicznych istotny wpływ ma zjawisko skrawania "po śladzie", przejawiające się w tym, że chwilowe wartości ich składowych są określone przez wartości elementów wektora wejściowego i wektora odkształceń sprężystych nie tylko w bieżącym momencie czasu, ale także w czasie poprzedniego obrotu części. W wyniku tego, układ dynamiczny jest opisywany układem równań całkowo-różniczkowych ze zmiennym opóźnionym argumentem. W wyniku analizy procesów, zachodzących w układzie dynamicznym maszyn, otrzymano układ równań i funkcje przejścia, a także uogólnioną strukturę obiektu sterowania.

### 3. Uogólnione modele matematyczne układu dynamicznego procesu technologicznego toczenia

Wejściowe modele matematyczne różnych oddziaływań sterujących mogą być określone na podstawie układu równań przedstawionych w rozdziale 2.2.4. W tym i następnych przypadkach przy budowaniu MM rozpatrywany jest przykład układu dynamicznego obrabiarki, w którym realizowany jest proces toczenia wzdłużnego przedmiotu obrabianego ostrzami z kątem przystawienia  $\kappa_r \neq 90^\circ$ . W tym przypadku w strukturze dynamicznej obiektu istnieje dodatkowy obwód sprzężenia, który uwzględnia wpływ odkształceń sprężystych wzdłuż współrzędnej Y na szerokość warstwy skrawanej.

Proces toczenia wzdłużnego ostrzem z  $\kappa_r = 90^\circ$  jest szczególnym przypadkiem omawianego PT, przy czym struktura obiektu upraszcza się dzięki temu, że współczynnik  $K_{\kappa_r} = 0$ .

W procesie toczenia poprzecznego siłę skrawania można przedstawić w postaci dwóch składowych: promieniowej i stycznej. Zerowa wartość osiowej siły skrawania prowadzi do dalszego uproszczenia modelu matematycznego obiektu sterowanego.

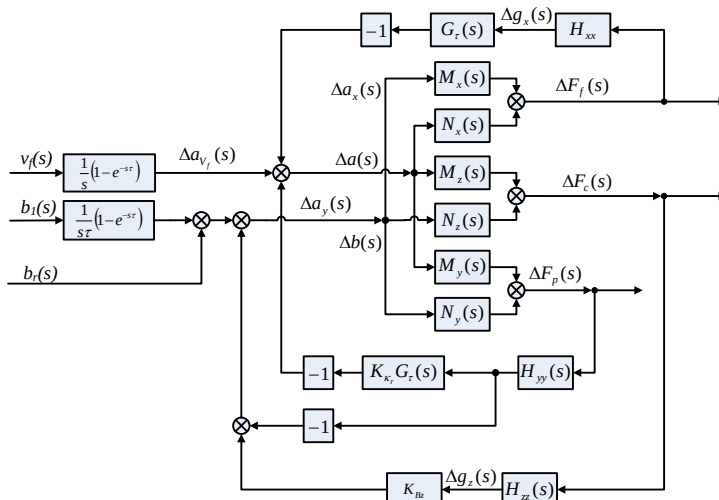
#### 3.1. Uogólniony model matematyczny

Oddziaływanie sterujące w postaci posuwu wzdłużnego, wykorzystuje się efektywnie do optymalizacji procesów obróbki na obrabiarkach przedmiotów o względnie dużej sztywności. Wstępna analiza pokazuje, że w tym przypadku można uwzględnić tylko własne podatności elementów układu technologicznego. Zgodnie z ułożonym układem równań (2.28) i równań (2.29-2.31), wyjściowy schemat struktury obiektu sterowania można przedstawić w postaci jak na rys. 3.1 (na rys. 3.1 przedstawiono dodatkowo wielkości wejściowe w postaci naddatku na obróbkę i prędkości obrotowej części i nie pokazana wielkość wejściowa twardość materiału). Wynika z niej, że bieżąca wartość grubości przekroju warstwy skrawanej i jej przyrost są określane przez trzy składowe jako:

$$\Delta a(s) = \Delta a_{v_f}(s) - \Delta a_x(s) - \Delta a_y(s),$$

gdzie  $\Delta a_{v_f}$  - składowa zależna od prędkości posuwu wzdłużnego (szerokość przekroju warstwy skrawanej bez uwzględnienia sprężystych odkształceń),  $\Delta a_x$  i  $\Delta a_y$  - składowe, uwarunkowane odkształceniami sprężystymi w kierunku współrzędnych X i Y.





**Rys. 3.1. Schemat strukturalny obiektu sterowania**

Przyrost bieżącej wartości szerokości przekroju warstwy skrawanej zależy od odkształceń sprężystych układu dynamicznego dla współrzędnych Y i Z.

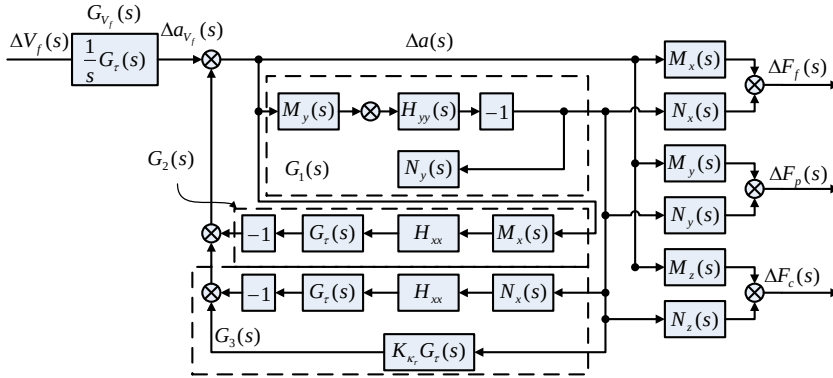
W ten sposób, w rozpatrywanym modelu matematycznym charakterystyczna jest obecność w jego strukturze wewnętrznych sprzężeń zwrotnych, reprezentujących wpływ odkształceń sprężystych na przekrój warstwy skrawanej, oraz skrawanie "po śladzie".

W dalszej analizie pominięto jako nieistotny, wpływ odkształceń sprężystych w kierunku współrzędnej Z na szerokość warstwy skrawanej i przekształcono rozpatrywaną strukturę do postaci pokazanej na rys. 3.2 przy czym przyjęto jako wielkość wejściową prędkość posuwu wzdłużnego. Ekwiwalentne transmitancje operatorowe oznaczone na rys. 3.2. jako  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$ ,  $G_3(s)$  są równe:

$$G_1(s) = -M_y(s) \frac{H_{yy}(s)}{1 + N_y(s)H_{yy}(s)},$$

$$G_2(s) = -G_{\tau}(s)M_x(s)H_{xx}(s),$$

$$G_3(s) = G_{\tau}(s)[K_{K_r} - N_x(s)H_{xx}(s)].$$



**Rys. 3.2. Przekształcony schemat strukturalny OS w obwodzie posuwu wzdłużnego**

Transmitancja operatorowa układu sprzężenia zwrotnego:

$$G_{os}(s) = G_2(s) + G_1(s)G_3(s).$$

Transmitancja operatorowa jednej ze składowych sił skrawania, np.  $F_f$  :

$$G_{v_f Fx}(s) = \frac{\Delta F_f(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{G_\tau(s)[M_x(s) + G_1(s)N_x(s)]}{s[1 - G_{os}(s)]}, \quad (3.1)$$

Do oznaczenia współczynników wzmocnień i transmitancji operatorowych tutaj i dalej przyjęto następujący schemat indeksów. Pierwszy indeks literowy wskazuje na oddziaływanie wejściowe (w danym przypadku  $v_f$ ), natomiast drugi to wielkość wyjściowa ( $F$  - siła skrawania,  $g$  - odkształcenia sprężyste), trzeci w razie konieczności, wskazuje składową siły skrawania lub odkształcenia sprężystego  $i = \{x, y, z\}$ .

Po podstawieniu do ostatniej zależności wyrażeń na  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$ ,  $G_3(s)$  otrzymamy:

$$G_{v_f Fx}(s) = \frac{D(s)}{A(s)},$$

gdzie:

$$D(s) = G_\tau(s) \left[ M_x(s) - M_y(s) \frac{N_x(s)H_{yy}(s)}{1 + N_y(s)H_{yy}(s)} \right],$$

$$A(s) = s \left[ 1 + G_\tau(s)M_x(s)H_{xx}(s) + \frac{M_y(s)H_{yy}(s)}{1 + N_y(s)H_{yy}(s)} G_\tau(s)(K_{\kappa r} - N_x(s)H_{xx}(s)) \right].$$

Współczynniki wzmocnień transmitancji operatorowych  $M_i(s)$ ,  $N_i(s)$  określono poprzez linearyzację zależności opisujących siły skrawania [111]:

$$m_i = \left( \frac{\partial F_i}{\partial a} \right)_0 = qb_0 k_i, \quad n_i = \left( \frac{\partial F_i}{\partial b} \right)_0 = qa_0 k_i.$$

W szczególności  $m_x = qb_0 k_x$ ,  $n_x = qa_0 k_x$ ,  $m_y = qb_0 k_y$ ,  $n_y = qa_0 k_y$ .

Należy zauważyć, że

$$m_x n_y = m_y n_x.$$

Jeśli uwzględnić także, że stałe czasowe powstawania wióra przy różnych składowych sił skrawania nie różnią się znacznie, to można przyjąć:

$$M_x(s)N_y(s) = M_y(s)N_x(s).$$

Wykorzystując powyższą zależność, transmitancję operatorową (3.1) obiektu można po przekształceniach zapisać w postaci:

$$G_{v_f Fx}(s) = \frac{M_x(s)G_\tau(s)}{s[1 + N_y(s)H_{yy}(s) + G_\tau(s)[M_x(s)H_{xx}(s) + K_{\kappa_r} M_y(s)H_{yy}(s)]]}, \quad (3.2)$$

lub dla  $i$  - tej składowej siły:

$$G_{v_f Fi}(s) = \frac{M_i(s)G_\tau(s)}{s[1 + N_y(s)H_{yy}(s) + G_\tau(s)[M_x(s)H_{xx}(s) + K_{\kappa_r} M_y(s)H_{yy}(s)]]}. \quad (3.3)$$

Biorąc pod uwagę, że odkształcenia sprężyste są związane, przy wspomnianych założeniach, z siłą skrawania transmitancją operatorową  $H_{ii}(s)$ , zależność transmitancji operatorowej wielkości wyjściowej w postaci odkształceń sprężystych UD można przedstawić w postaci:

$$G_{v_f gi}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{M_i(s)H_{ii}(s)G_\tau(s)}{s[1 + N_y(s)H_{yy}(s) + G_\tau(s)[M_x(s)H_{xx}(s) + K_{\kappa_r} M_y(s)H_{yy}(s)]]}. \quad (3.4)$$

W dalszej części, w pierwszej kolejności zostanie przekształcony mianownik otrzymanej zależności. Przyjmując transmitancję operatorową procesu skrawania według (3.4) w postaci TO członu aperiodycznego ze stałą czasową  $T_c$  i wprowadzając ekwiwalentność własności dynamicznych układu sprężystego wg (2.16) – członu oscylacyjnego ze stałą  $T_{us}$ , otrzymamy:

$$\begin{aligned} A(s) &= s[1 + N_y(s)H_{yy}(s) + G_\tau(s)[M_x(s)H_{xx}(s) + K_{\kappa_r} M_y(s)H_{yy}(s)]] = \\ &= s \left( 1 + \frac{K_{\kappa_r} m_y h_{yy}}{(T_c s + 1)(T_{us}^2 s^2 + 2\zeta T_{us} s + 1)} \right) + G_\tau(s) \left( \frac{m_x h_{xx}}{(T_c s + 1)(T_{us}^2 s^2 + 2\zeta T_{us} s + 1)} + \frac{n_y h_{yy}}{(T_c s + 1)(T_{us}^2 s^2 + 2\zeta T_{us} s + 1)} \right). \end{aligned}$$

Przekształcając zależność  $G_{v_f gi}(s)$ , z uwzględnieniem ostatniego wyrażenia dla mianownika, można uzyskać:

$$G_{v_f gi}(s) = \frac{m_x h_{xx} G_\tau(s)}{s[(T_c s + 1)(T_{us}^2 s^2 + 2\xi T_{us} s + 1) + B_1 G_\tau(s) + n_y h_{yy}]}, \quad (3.5)$$

gdzie:

$$B_1 = m_x h_x + K_{kr} m_y h_y. \quad (3.6)$$

### 3.2. Analiza możliwości uproszczenia modeli matematycznych

Przeprowadzono dalej analizę otrzymanych zależności transmitancji operatorowej obiektu sterowania ukierunkowaną na możliwości ich uproszczenia.

Model matematyczny obiektu w postaci transmitancji operatorowej (3.5) uwzględnia inercyjność procesu powstawania wióra i układu sprężystego, a także opóźnienie, spowodowane skrawaniem "po śladzie". Charakterystyczną cechą MM jest obecność w jego strukturze wewnętrznego sprzężenia zwrotnego. Dlatego najważniejszym zadaniem jest zbadanie właściwości tego obwodu i analiza jego stabilności.

Stabilność tego obwodu określa tzw. "wibrostabilność" obrabiarki. W przypadku, gdy warunki stabilności nie są spełnione, przy skrawaniu w układzie dynamicznym pojawiają się drgania samowzbudne. Zagadnieniu analizy "wibrostabilności" obrabiarek poświęconych jest szereg publikacji [np. 49, 100]. W czasie opracowywania MM układu dynamicznego obrabiarki zakłada się, że "wibrostabilność" obrabiarki jest zapewniona, tzn. układ zamknięty jest stabilny.

W kolejnym etapie zostaną przeanalizowane zależności między stałymi czasowymi układu MDS  $T_{us}$ , procesu powstawania wióra  $T_c$  i czasu opóźnienia  $\tau$ . Opóźnienie  $\tau$ , odwrotnie proporcjonalne do prędkości obrotowej części, na tokarkach wynosi nie mniej niż 0,1 – 0,2 s. Obrabiarki średniej wielkości np. 16B16P mają maksymalną prędkość obrotową wrzeczona do 2000 obr/min., stąd minimalna wartość  $\tau$  wynosi 0,03s [131]. Częstotliwości drgań własnych układu sprężystego obrabiarki i przedmiotu obrabianego w tokarkach średniej wielkości znajdują się w zakresie częstotliwości większych od 50 Hz, tzn. największa ekwiwalentna stała czasowa  $T_{us}$  nie przekracza 0,003s. Obliczenia stałej czasowej powstawania wióra wg zależności (2.7) pokazują, że dla typowych warunków skrawania wartości  $T_c$  nie przekraczają 0,005 do 0,001s. Kolejno, w zależności (3.5) opóźnienie  $\tau$ , wchodzące w TO  $G_\tau(s)$  ma największą wartość i przewyższa o rząd stałe czasowe  $T_{us}$  i  $T_c$ .

Właściwości ekwiwalentnego zamkniętego obwodu, przy spełnieniu warunków jego stabilności, są zależne przede wszystkim od właściwości członu o największej inercyjności, którym w tym przypadku jest człon z transmitancją operatorową o równaniu:

$$G_\tau(s) = 1 - e^{-s\tau}.$$

W dalszym ciągu oceniono możliwości pominięcia "małych" stałych czasowych w zależnościach transmitancji operatorowej rozpatrywanego obiektu.

Charakterystyki częstotliwościowe modelu uzyskuje się, podstawiając do (3.5)  $s = j\omega$ , a także wykorzystując wzory Eulera funkcji wykładniczej, czyli:

$$e^{-j\omega\tau} = \cos \omega\tau - j \sin \omega\tau.$$

Po przekształceniu, zależności charakterystyk amplitudowej (ACH) i fazowej (FCH) mogą one być zapisane w postaci:

$$A(\omega) = m_i h_{ii} \frac{|2 \sin(\omega\tau/2)|}{\omega \sqrt{C_1^2 + D_1^2}}, \varphi(\omega) = -\frac{\omega\tau}{2} - \arctg\left(\frac{D_1}{C_1}\right), \quad (3.7)$$

gdzie:

$$C_1 = 1 + n_y h_{yy} + B_1 - B_1 \cos \omega\tau - (T_{us}^2 + 2\xi T_{us} T_c) \omega^2,$$

$$D_1 = B_1 \sin \omega\tau + (T_c + 2\xi T_{us}) \omega - T_{us}^2 T_c \omega^3.$$

W charakterze przykładu na rys. 3.3 przedstawiono przebiegi (linie przerywane) charakterystyk częstotliwościowych  $A_1(\omega)$ ,  $L_1(\omega)$ ,  $\varphi_1(\omega)$  modelu matematycznego w przypadku wyjściowej transmitancji operatorowej (3.5) otrzymanych na podstawie obliczeń komputerowych wg następujących danych:  $m_i n_i = 1$ ,  $\tau = 1$ ,  $B_1 = 0.6$ ,  $T_{us} / \tau = 0.1$ ,  $T_c / \tau = 0.05$ . Dzięki podanym jednostkowym wartościom  $m_i n_i$  i  $\tau$  przedstawione zależności można rozpatrywać jako uogólnione charakterystyki MM w jednostkach względnych. Ich postać nie zależy od konkretnych wartości stałych czasowych a zależy tylko od ich stosunku i współczynnika  $B_1$ . Przy tym, argumentem w charakterystykach częstotliwościowych jest częstotliwość względna  $\omega^0 = \omega / \omega_b$ , gdzie jako bazową częstotliwość przyjęto wartość  $\omega_b = 1 / \tau$ .

Na rys. 3.3. pokazano ciągłymi liniami charakterystyki uproszczonego modelu  $A(\omega^0)$ ,  $\varphi(\omega^0)$ ,  $L(\omega^0)$ , otrzymane przy pominięciu stałych czasowych układu MDS i procesu powstawania wióra:  $T_{us} = T_c = 0$ .

Analiza otrzymanych zależności pokazuje, że wyjściowe i aproksymowane ACH i FCH są okresowymi funkcjami częstotliwości. Przy krytycznych wartościach częstotliwości  $\omega_k^0 = 2\pi k / \tau$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) charakterystyka amplitudowa przyjmuje wartości zerowe, odpowiednio, współrzędne logarytmicznej charakterystyki amplitudowej (LACH)  $L(\omega_k) \Rightarrow -\infty$ , a przesunięcie fazowe osiąga  $-180^\circ$ .

Zmniejszenie do zera zastępczego współczynnika wzmocnienia obiektu przy częstotliwościach krytycznych można objaśnić osobliwościami skrawania „po śladzie”. Przy częstotliwościach krytycznych trajektoria ruchu ostrza na

rozwinętej powierzchni dla bieżącego obrotu, pozostaje w jednakowej odległości od trajektorii ruchu w stosunku do poprzedniego obrotu. W wyniku tego, przyrost grubości przekroju warstwy skrawanej i, odpowiednio, sił skrawania oraz odkształceń sprężystych są równe zero.

W przypadku częstotliwości większych od pierwszej krytycznej  $\omega_{k1}^0 = 2\pi k$  maksymalna wartość  $A(\omega^0)$ , jak pokazuje analiza, nie przekracza  $(0,08 \text{ do } 0,18)A(0)$  przy zmianach współczynnika  $B_1$  w przedziałach  $0,1 - 1$ . LFCH stanowią nieciągłą funkcję okresową. Punkty nieciągłości LFCH pokrywają się z wartościami krytycznymi częstotliwości. Wartości LFCH aproksymowanego modelu zmieniają się w przedziale od 0 do  $-\pi$ .

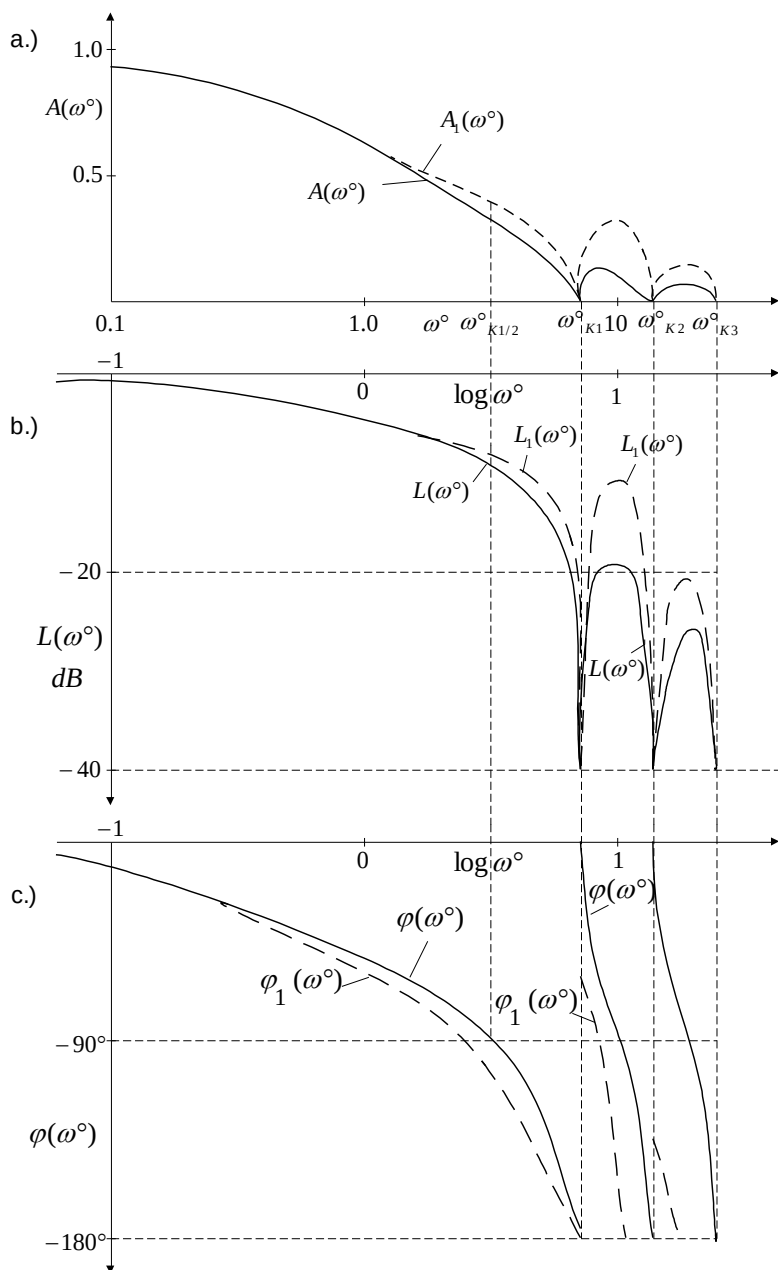
Uwzględnienie inercyjności procesu powstawania wióra i układu MDS prowadzi do zmiany wartości LACH i LFCH oraz dodatkowych przesunięć fazowych, przy czym do pierwszej krytycznej częstotliwości różnica między wyjściową i aproksymowaną LACH nie przekracza 3 do 4 dB. W tym zakresie częstotliwości odchyłka między przybliżoną  $\varphi(\omega^0)$  LFCH i wyjściową  $\varphi_1(\omega^0)$  powstaje tylko w pobliżu krytycznej wartości częstotliwości. W zakresie częstotliwości, większych od wartości krytycznej, rozbieżność LFCH jest znaczna (rys. 3.3).

Przy syntezie członów korekcyjnych układu regulacji automatycznej częstotliwość odcięcia wybiera się z lewej strony od pierwszej częstotliwości krytycznej modelu matematycznego obiektu sterowania. Pozwala to rozpatrywać charakterystyki częstotliwościowe modele matematyczne obiektu, ograniczając zakres częstotliwości do mniejszych od pierwszej krytycznej równej  $2\pi/\tau$ . We wskazanym zakresie częstotliwości, można, bez znacznych błędów, pominąć inercyjność procesu powstawania wióra i układu MDS, a w konsekwencji przyjąć:

$$H_{ii}(s) = h_{ii}, \quad M_i(s) = m_i, \quad N_i(s) = n_i, \quad C_i(s) = c_i. \quad (3.8)$$

Wtedy, aproksymowane zależności transmitancji operatorowej obiektu przy rozpatrywanym oddziaływaniu sterującym oraz w przypadku wielkości wyjściowych w postaci siły skrawania i odkształceń sprężystych można przedstawić jako:

$$G_{v_f Fi} = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{K_{1v_f Fi} G_\tau(s)}{s(1 + BG_\tau(s))}, \quad (3.9)$$



Rys. 3.3. Charakterystyki częstotliwościowe modelu matematycznego układu dynamicznego

$$G_{v_f gi} = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{K_{1v_f gi} G_\tau(s)}{s(1 + BG_\tau(s))}, \quad (3.10)$$

gdzie:

$$K_{1v_f Fi} = m_i \left[ 1 - \frac{m_y h_{yy} n_i}{(1 + n_y h_{yy}) m_i} \right], K_{1v_f gi} = K_{1v_f Fi} h_{ii}, \quad (3.11)$$

$$B = \frac{m_x h_{xx} + m_y h_{yy} K_{\kappa_r}}{1 + n_y h_{yy}}. \quad (3.12)$$

W ten sposób, przy opracowywaniu modeli matematycznych dla potrzeb sterowania UD obrabiarki i przy spełnieniu warunku "wibrostabilności", dopuszczalne jest opisywanie właściwości układu MDS i procesu powstawania wióra współczynnikami wzmocnienia, tzn. rozpatrywać wspomniane człony jako proporcjonalne.

W celu wykorzystania do potrzeb sterowania zależności między współrzędnymi wyjściowymi (składowymi siły skrawania i odkształceń sprężystych) oraz pośrednią współrzędną – grubością warstwy skrawanej  $\Delta a_{v_f}$  jako wejściem, przedstawiono transmitancję operatorową układu zamkniętego w postaci:

$$G_{zkF}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta a_{v_f}} = \frac{m_i}{1 + n_y h_{yy}} \frac{1}{[1 + BG_\tau(s)]}, \quad (3.13)$$

$$G_{zkg}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta a_{v_f}(s)} = \frac{m_i h_i}{1 + n_y h_{yy}} \frac{1}{[1 + BG_\tau(s)]}. \quad (3.14)$$

Dzięki ogólności struktury modelu oraz zależności w modelach matematycznych różnych wielkości wejściowych, wspomniane założenie wykorzystuje się w dalszej analizie modeli matematycznych obiektu dla zakłóceń i innych wielkości sterujących.

### 3.3. Częstkowe modele matematyczne sterowania posuwem wzdłużnym

W praktyce inżynierskiej projektowania układów automatycznej regulacji (UAR) szeroko wykorzystuje się reprezentację dynamicznych własności elementów w postaci typowych członów i ich kombinacji, co pozwala istotnie uprościć zadanie wyznaczania charakterystyk czasowych i częstotliwościowych tych układów. W pracy rozpatrzono możliwość dalszego uproszczenia otrzymanych modeli matematycznych i przedstawienia ich opisu w postaci typowych członów dynamicznych.

W wyniku przeprowadzonej analizy [85] ustalono, że wybór racjonalnej przybliżonej zależności opisującej właściwości dynamiczne otrzymanych modeli matematycznych zależy od liczbowej wartości współczynnika  $B$  – zależność (3.12). Wskazany bezwymiarowy współczynnik  $B$  jest kombinacją iloczynów współczynników wzmocnień procesu skrawania (współczynniki te poprzez analogię ze sztywnością układu MDS nazywany jest inaczej sztywnością skrawania) oraz podatności układu MDS. Oznacza to, że ten współczynnik można rozpatrywać jako charakterystykę względnej sztywności układu



dynamicznego obrabiarki. Przy absolutnie sztywnym układzie ( $h_{ij} \Rightarrow 0$ ), współczynnik  $B$  względnej sztywności dynamicznej jest równy zero, dla absolutnie miękkiego  $-B \Rightarrow \infty$ .

Wartość współczynnika  $B$  może zmieniać się w szerokich granicach przy zmianach warunków skrawania i właściwości układu MDS. Przy tym przy niezmiennych właściwościach układu MDS wartość współczynnika  $B$  zależy od warunków skrawania. W warunkach skrawania o małej intensywności i obróbce przedmiotów o dużej podatności, wartości współczynnika  $B$  są małe, tzn. układ dynamiczny ma wysoką względną sztywność. Natomiast, w warunkach obróbki przedmiotu z dostatecznie małą podatnością, wartość współczynnika  $B$  może być wysoka, tzn. układ dynamiczny będzie mieć niską względną sztywność. W warunkach toczenia wykańczającego z małymi wartościami grubości i szerokości warstwy skrawanej, wartości współczynnika  $B$  nie przewyższają 0,1. W bardziej intensywnych warunkach toczenia zgrubnego i kształtującego wartości współczynnika  $B$  wynoszą od 0,4 do 1,2.

Przy małych wartościach współczynnika  $B$  składnik  $BG_\tau(s)$  w mianowniku transmitancji operatorowej TO (3.9) i (3.10) nie ma istotnego wpływu na dynamiczne własności modelu, i przybliżone zależności można zapisać w postaci:

$$G_{v_f g_i}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{K_{1v_f g_i} G_\tau(s)}{s} = \frac{K_{1v_f g_i}}{s} (1 - e^{-s\tau}), \quad (3.15)$$

$$G_{v_f F_i}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{K_{1v_f F_i} G_\tau(s)}{s} = \frac{K_{1v_f F_i}}{s} (1 - e^{-s\tau}). \quad (3.16)$$

Zależności te można rozpatrywać jako cząstkowe przybliżone modele matematyczne, które z wysokim stopniem zaufania można wykorzystywać przy wartościach współczynnika  $B$ , zawartych w przedziale  $0 \leq B \leq 0,1$ . Uwzględniając, że rozpatrywane osobliwości charakterystyki przejściowej członów z transmitancją operatorową typu (3.15), dalej będą określane terminem całkowo-statyczne.

W warunkach obróbki zgrubnej i kształtującej, kiedy wartości współczynnika  $B > 0,1$ , w celu przejścia do uproszczonych zależności należy wykorzystać rozkład funkcji wykładniczej w szereg Pade. Wykorzystując tylko dwa pierwsze człony szeregu Padee, można przyjąć, że:

$$e^{-s\tau} = \frac{1 - \frac{1}{2}\tau s + \frac{1}{12}\tau^2 s^2}{1 + \frac{1}{2}\tau s + \frac{1}{12}\tau^2 s^2}.$$

Podstawiając powyższą zależność opisującą  $e^{-s\tau}$  w rozważanych modelach (3.15) i (3.16), po przekształceniu otrzyma się:

$$G_{v_f gi}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{K_{v_f gi}}{(T_{o1}s+1)(T_{o2}s+1)}, \quad (3.17)$$

$$G_{v_f Fi}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{K_{v_f Fi}}{(T_{o1}s+1)(T_{o2}s+1)}, \quad (3.18)$$

gdzie:

$$K_{v_f gi} = K_{1v_f gi}\tau; K_{v_f Fi} = K_{1v_f Fi}\tau \quad (3.19)$$

$$T_{o1,o2} = 0,5\tau \left[ 0,5 + B \pm \sqrt{(0,5 + B)^2 - \frac{1}{3}} \right]. \quad (3.20)$$

W ten sposób, w rozpatrywanych warunkach przybliżony cząstkowy model obiektu jest aperiodycznym członem drugiego rzędu.

W stanach ustalonych sprzężenie zwrotne nie działa poprzez człony z transmitancją operatorową  $G_\tau(s)$  w strukturze obiektu, tzn. współczynnik wzmocnienia takiego członu jest równy zero. W wyniku tego, przyrost grubości warstwy skrawanej  $\Delta a$  jest określony tylko przez prędkość posuwu wzdłużnego. W tym przypadku, w stanie statycznym współczynnik  $G_v(s)$  wzmocnienia TO wynosi  $\tau$ . Kolejno w stanach ustalonych grubość warstwy skrawanej wynosi:

$$a = v_f \tau = v_f / n_p.$$

Otrzymany wynik jest całkowicie zgodny z rozpatrzonymi założeniami o parametrach warstwy skrawanej – w stanach ustalonych grubość warstwy skrawanej jest równa posuwowi na jeden obrót przedmiotu.

Otrzymane modele matematyczne układu dynamicznego obrabiarki przy sterowaniu posuwem mają najbardziej ogólną postać. Modele układów dynamicznych szlifierek przy szlifowaniu wzdłużnym charakteryzują się tym, że kąt przystawienia ściernicy, rozpatrywanej jako ekwiwalentne ostrze,  $\kappa_r = 90^\circ$ . Odpowiednio:  $K_{\kappa_r} = \text{ctg } \kappa_r = 0$ . W tym przypadku jak i przy toczeniu wzdłużnym ostrzem z  $\kappa_r = 90^\circ$ , zależność dla współczynnika  $B$  upraszcza się do postaci:

$$B = \frac{m_x h_{xx}}{1 + n_y h_{yy}}. \quad (3.21)$$

Szczególnymi przypadkami otrzymanych modeli są także modele układów dynamicznych obrabiarek przy toczeniu i szlifowaniu wglębnym.

W tym przypadku osiowa składowa siły skrawania jest równa zero i na formowanie przekroju warstwy skrawanej mają tylko wpływ prędkość posuwu i odkształcenia sprężyste wg współrzędnych  $Y$  i  $Z$ . W wyniku tego, zmieniają się tylko zależności określające parametry wchodzące w TO (3.15) do (3.18):

$$B = m_y h_{yy}, \quad K_{1v_f Fi} = m_i, \quad K_{1v_f gi} = K_{1v_f Fi} h_{ii},$$

$$K_{v_f gi} = K_{1v_f gi} \tau, \quad K_{v_f Fi} = K_{1v_f Fi} \tau.$$

W otrzymanych zależnościach transmitancji operatorowej można zauważyć, że struktura i parametry obiektu sterowania zależą od warunków obróbki na obrabiarce. Na stałą czasową obiektu sterowania dominujący wpływ ma wartość opóźnienia  $\tau$ , zależna od prędkości obrotowej części. Oprócz tego, inercyjność obiektu zależy od wartości współczynnika  $B$ . Zakres regulacji prędkości obrotowej napędu głównego na obrabiarkach konwencjonalnych osiąga duże wartości (100 i większe). W odpowiednim zakresie także, mogą zmieniać się stałe czasowe obiektu sterowania.

Współczynnik wzmocnienia obiektu, jak wynika z (3.11) i (3.19), jest zależny od czasu opóźnienia, parametrów układu dynamicznego, współczynników wzmocnienia procesu skrawania i może zmieniać się o rząd wielkości. Równocześnie, należy wziąć pod uwagę, że tak szerokie zakresy zmian parametrów układu dynamicznego obrabiarki są charakterystyczne w całym zakresie technologicznym jej działania. W czasie realizacji cyklu obróbki przedmiotu jego prędkość obrotowa zwykle pozostaje stała i zmiany parametrów obiektu są głównie spowodowane zmianami naddatku na obróbkę. Prowadzi to do zmian współczynników wzmocnienia procesu skrawania. Dodatkowo, na zmienność właściwości dynamicznych mają wpływ zmiany właściwości układu MDS wzdłuż osi przedmiotu obrabianego, co jest charakterystyczne w przypadku, kiedy w skład układu technologicznego wchodzi przedmiot o małej sztywności.

Niestacjonarność parametrów obiektu i charakter ich zmian powoduje konieczność szczególnego podejścia do syntezy układu automatycznego sterowania układu dynamicznego obrabiarek.

### 3.4. Czasowe i częstotliwościowe charakterystyki modeli. Ocena dokładności przybliżeń

Otrzymane TO dla różnych współrzędnych mają podobną postać, różnią się jedynie tylko zależnościami współczynników wzmocnienia. Dlatego do dalszych rozważań wprowadzono wyjściową współrzędną  $Y_o = \{F_i, g_i\}$ , uogólniony współczynnik wzmocnienia  $K_o$  i w charakterze wyjściowej transmitancji operatorowej do analizy przyjęto:

$$G_o(s) = \frac{\Delta Y_o(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{K_o G_\tau(s)}{s[1 + B G_\tau(s)]}. \quad (3.22)$$

Analogicznie, przybliżone wyrażenia (3.15) do (3.18) przedstawiono w uogólnionej postaci:

$$G_o(s) = \frac{\Delta Y_o(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{K_o}{s} (1 - e^{-s\tau}), \quad (3.23)$$

$$G_o(s) = \frac{\Delta Y_o(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{K_o}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}. \quad (3.24).$$

Rozpatrzono charakterystyki czasowe wyjściowego i uproszczonego modelu matematycznego. Przyjęto, że  $\kappa_r = 90^\circ$  i odpowiednio  $K_{\kappa_r} = 0$  (takie założenie nie ma wpływu na ogólność rozważań, a tylko je upraszcza). Wtedy, przyrosty odkształceń sprężystych i sił skrawania są proporcjonalne do grubości warstwy skrawanej  $\Delta a_f$ , a ostatnią zmienną wygodnie jest rozpatrywać jako wyjściową. W analizie, wyjściową strukturę z rys. 3.2 celowo jest przekształcić do postaci pokazanej na rys. 3.4.

Dodatkowy zamknięty obwód zastąpiono członem z zastępczym współczynnikiem wzmocnienia (rys. 3.4a):

$$K_z = \frac{1}{1 + m_y h_{yy}} = \frac{1}{1 + B}.$$

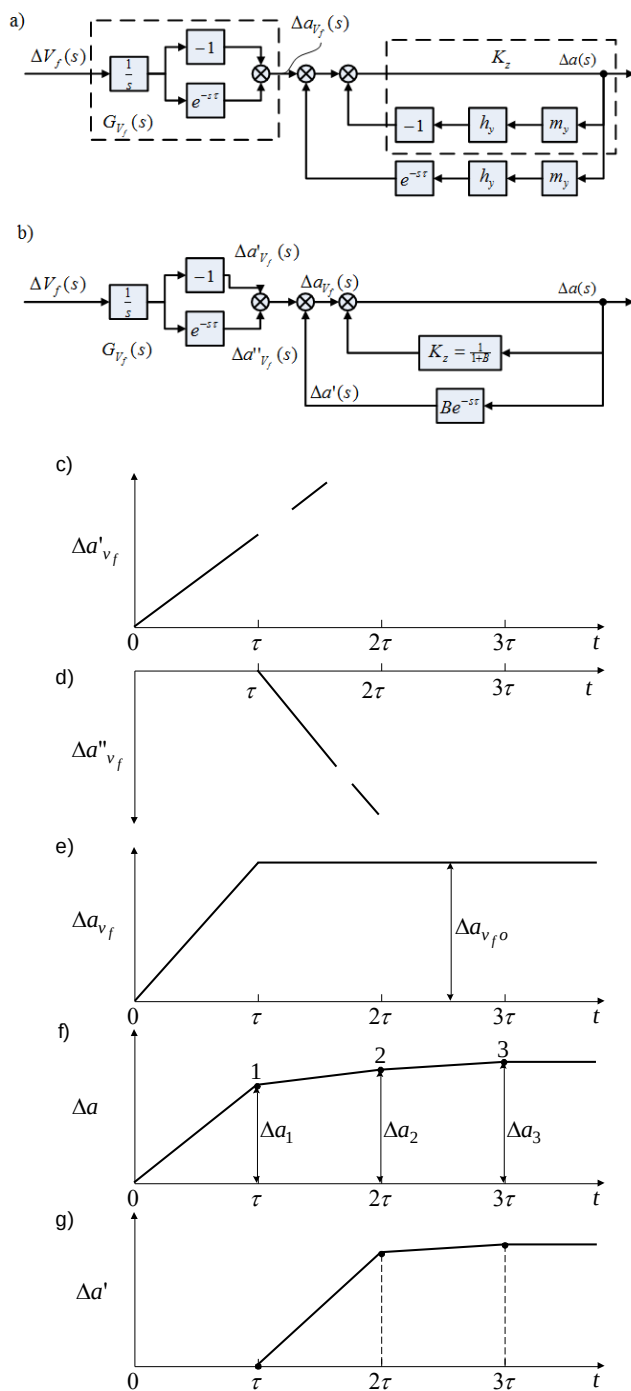
Rozpatrzono odpowiedź obiektu na skok wielkości wejściowej  $\Delta v_f$ . Przede wszystkim przeanalizowano zachowanie się członu z transmitancją operatorową:

$$G_{v_f}(s) = \frac{1}{s} (1 - e^{-s\tau}).$$

W wyniku całkowania sygnału wejściowego dwoma równoległymi obwodami, w tym jednym zawierającym człon opóźnienia, sygnał na wyjściu sumatora będzie mieć postać krzywej  $\Delta a_{v_f}$  z wartością ustaloną (rys. 3.4 e):

$$\Delta a_{v_f o} = \Delta v_f \tau = \Delta v_f / n_p.$$

W przypadku zerowej wartości współczynnika  $B$  (nieskończona względna sztywność) obwód sprzężenia zwrotnego, zamknięty przez człon z transmitancją operatorową  $Be^{-s\tau}$  nie działa i proces przejściowy kończy się w ciągu jednego obrotu. Przy tym, współrzędna wyjściowa narasta liniowo w czasie  $\tau$  osiągając wartość ustaloną. To znaczy, w pierwszym okresie procesu przejściowego  $(0, \tau)$  człon zachowuje się jak całkujący czyli statyczny.



Rys. 3.4. Schemat strukturalny i odpowiedzi modelu matematycznego

W ogólnym przypadku, gdy  $B > 0$ , w pierwszym przedziale czasu  $(0, \tau)$ , opóźniające sprzężenie zwrotne w obwodzie zamkniętym nie działa. Wówczas zostaje przekształcona zmienna wejściowa  $\Delta a_{vf}$  w wyjściową  $\Delta a$  ze współczynnikiem wzmocnienia  $K_z$ . Ponieważ  $K_z < 1$ , to przyrost  $\Delta a$  przebiega mniej intensywnie niż  $\Delta a_{vf}$  (rys. 3.4f).

W punkcie węzłowym 1 przy  $t = \tau$  wartość grubości warstwy skrawanej wyniesie  $\Delta a_1 = K_z \Delta a_{vf0}$ . W kolejnych przedziałach czasowych wielokrotnych o  $\tau$ , wyjściowy sygnał obwodu sprzężenia zwrotnego  $\Delta a'$  (rys. 3.4g) ze współczynnikiem przekształcenia  $B$  i opóźnieniem  $\tau$ ,  $\Delta a$  zachowuje się jak poprzednio (rys. 3.4e).

Intensywność narastania w drugim przedziale czasowym  $(\tau, 2\tau)$  zmniejsza się. W węzłowym punkcie 2, gdy  $t = 2\tau$  wartość grubości warstwy skrawanej wynosi:

$$\Delta a_2 = \Delta a_1 + \Delta a_1 B K_z = K_z a_{vf0} (1 + K_z B).$$

Dalej proces przebiega podobnie, i w  $j$ -tym punkcie węzłowym wartość wielkości wyjściowej przyjmuje postać:

$$\Delta a_j = K_z a_{vf0} [1 + K_z B + K_z^2 B^2 + K_z^{j-1} B^{j-1}]. \quad (3.25)$$

W ten sposób, przy skoku prędkości posuwu zmiana grubości warstwy skrawanej opisana jest odcinkowo-liniową funkcją (rys. 3.4 e), których wartości w dyskretnych momentach czasu  $j\tau$  są określone zależnością (3.25). Przy tym intensywności narastania  $\Delta a(t)$  i odpowiednio  $\Delta F_i(t)$  i  $\Delta g_i(t)$  są tym mniejsze, im większa jest wartość współczynnika  $B$ .

Oceniono dokładność aproksymacji w dziedzinie czasu. Wartości transmitancji operatorowej modelu wyjściowego w punktach węzłowych, zgodnie z zależnością (3.25), mają postać:

$$Y_{Wj} = K_z [1 + K_z B + K_z^2 B^2 + K_z^{j-1} B^{j-1}]$$

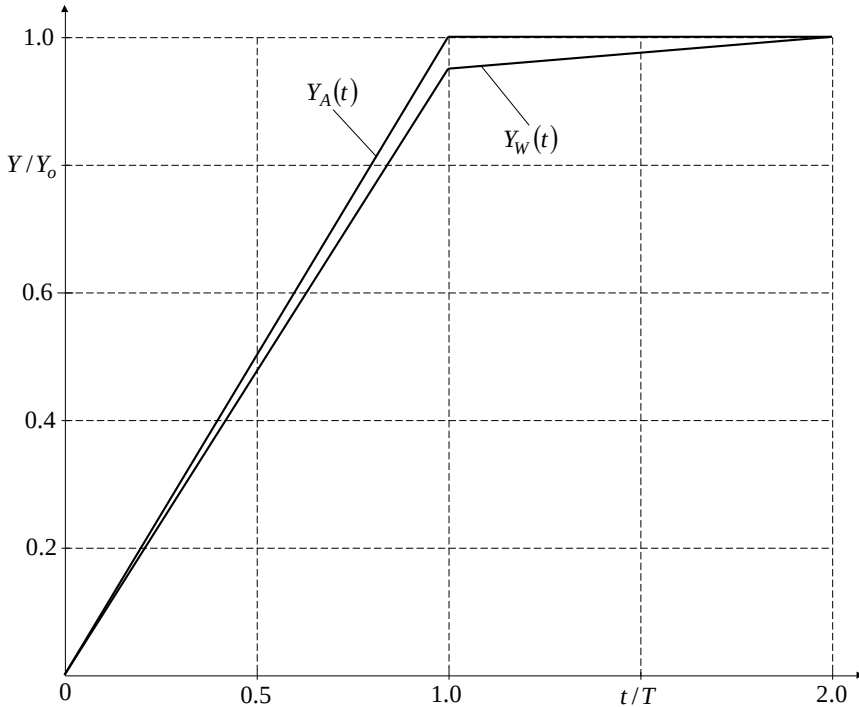
Na odcinkach  $\tau(j-1) < t < j\tau$  współrzędna wyjściowa zmienia się liniowo i w chwilach czasu  $t = \tau(j-1 + \rho)$ , gdzie  $\rho < 1$  można zapisać jako:

$$Y_{Wj}(t) = Y_{W(j-1)} + \rho \tau (Y_{Wj} + Y_{W(j-1)}). \quad (3.26)$$

Powyższa zależność pozwala rozpatrywać charakterystykę przejściową modelu wyjściowego. W pierwszym przybliżonym modelu (3.23) w postaci członu całkowo-statycznego, którego zakresy racjonalnego wykorzystania odpowiadają wartościom współczynnika  $B \leq 0.1$ , TO ma postać:

$$Y_A(t) = \begin{cases} \frac{K_o}{\tau} t, & 0 \leq t \leq \tau, \\ K_o, & t > \tau. \end{cases}$$

Normalizowane ( $K_o = 1$ ) wykresy odpowiedzi wyjściowego  $Y_W(t)$  i przybliżonego  $Y_A(t)$  modelu w funkcji czasu względnego  $\left(\frac{t}{\tau}\right)$ , uzyskano za pomocą opracowanego pakietu programów użytkowych. Przypadek, gdy  $B=0,06$  przedstawiono na rys. 3.5.

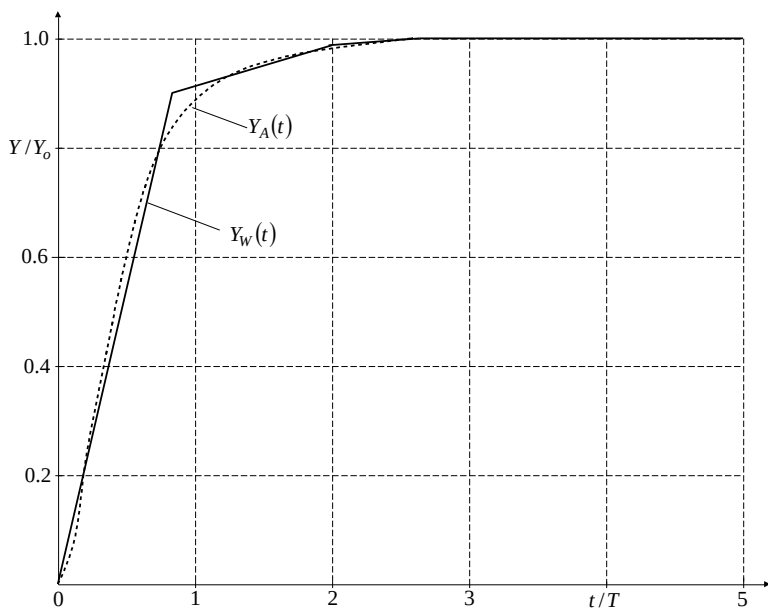


**Rys. 3.5. Normalizowane wykresy odpowiedzi wyjściowego i aproksymowanego modelu obiektu na skok jednostkowy wielkości sterującej**

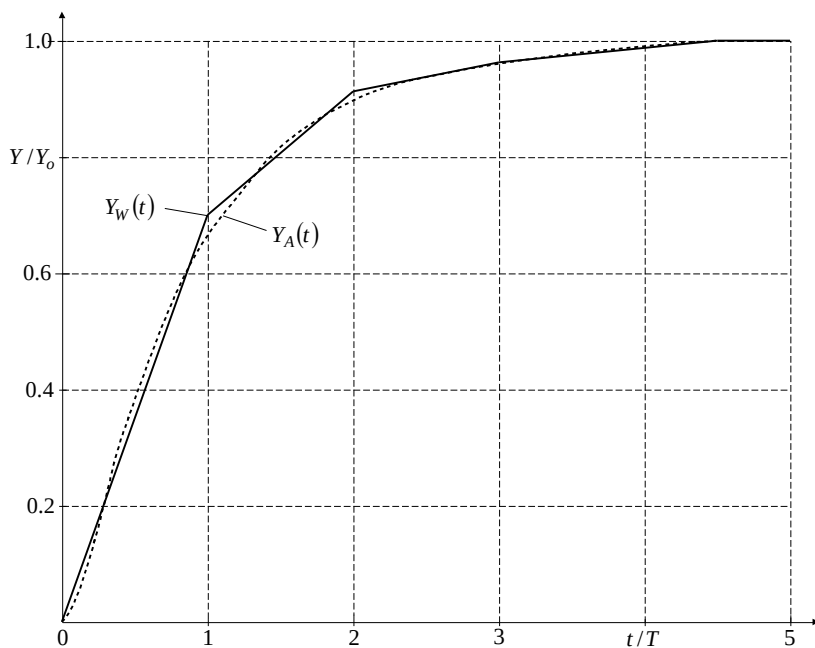
Odpowiedź na skok jednostkowy drugiego modelu przybliżonego według zależności (3.24), którą zaleca się wykorzystywać w przypadku  $B > 0,1$ , jest opisana funkcją wykładniczą czyli:

$$Y_A(t) = K_o \left[ 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right].$$

Normalizowane wykresy odpowiedzi wyjściowego i drugiego modelu przybliżonego, gdy  $B = 0,11$ , pokazano na rys. 3.6, a przy  $B = 0,6$  – na rys. 3.7.



**Rys. 3.6. Normalizowane wykresy odpowiedzi modelu wyjściowego i aproksymowanego obiektu na skok jednostkowy wielkości sterującej**



**Rys. 3.7. Normalizowane wykresy odpowiedzi modelu wyjściowego i aproksymowanego obiektu na skok jednostkowy wielkości sterującej**



Analiza krzywych w przypadku różnych wartości współczynnika  $B$  świadczy, że wraz ze zwiększeniem  $B$  wartości błędu aproksymacji zmniejszają się. Największy błąd aproksymacji występuje gdy  $B \Rightarrow 0,1$ . Przy tym, największa względna wartość błędu ma postać:

$$\Delta_{\max} = \max \frac{|Y_W(t) - Y_A(t)|}{Y_o}$$

i nie przekracza 0,1.

Następnie oceniono wartości błędów powstających przy wykorzystaniu aproksymowanych zależności w dziedzinie częstotliwości. Przedstawiono w tym celu transmitancję operatorową (3.22) w postaci:

$$G_o(s) = \frac{K_o}{s} G_2(s), \quad G_2(s) = \frac{G_\tau(s)}{1 + BG_\tau(s)},$$

oraz zastosowano przekształcenia częstotliwościowe Fouriera, czyli:

$$G_2(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega\tau}}{B(1 + 1/B - e^{-j\omega\tau})}.$$

Po przekształceniu podanej zależności do postaci:

$$G_2(j\omega) = \frac{(1/B + 2)(1 - \cos \omega\tau)}{B[(1 + 1/B^2) - 2(1 + 1/B)\cos \omega\tau + 1]} + \frac{(1/B)\cos \omega\tau}{B[(1 + 1/B^2) - 2(1 + 1/B)\cos \omega\tau + 1]}.$$

charakterystyki częstotliwościowe ACH i FCH odpowiadające transmitancji operatorowej  $G_o(s)$ , po przekształceniach trygonometrycznych można doprowadzić do postaci:

$$A_W(\omega) = K_o \frac{1}{\omega\sqrt{C_1}}, \quad \varphi_W(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{\ctg(\omega\tau/2)}{1 + 2B}\right), \quad (3.27)$$

gdzie:

$$C_1 = B^2 + B + 0.25 + 0.25\ctg^2(\omega\tau/2).$$

Po przekształceniu transmitancji operatorowej (3.23) dla pierwszego modelu obiektu aproksymowanych odpowiednio amplitudową charakterystyką częstotliwościową i fazową charakterystyką częstotliwościową otrzymuje się:

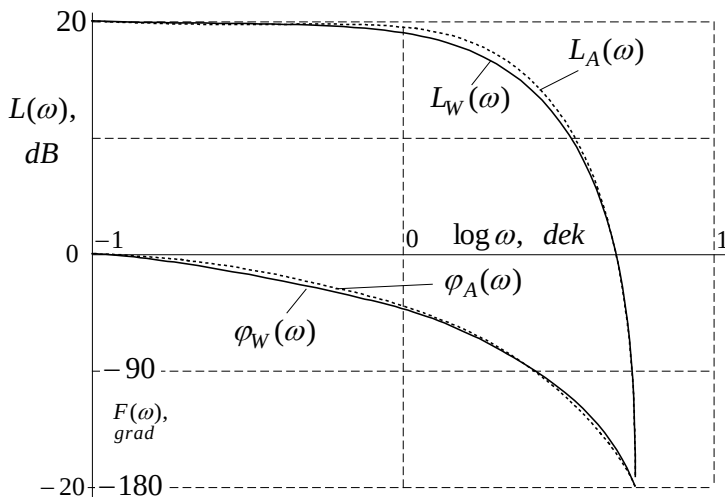
$$A_A(\omega) = K_o \frac{|2\sin(\omega\tau/2)|}{\omega}, \quad \varphi_A(\omega) = -\frac{\omega\tau}{2}.$$

Normalizowane wykresy charakterystyk logarytmicznych LACH modelu wyjściowego  $L_W(\omega)$  i modelu aproksymowanego  $L_A(\omega)$ , a także logarytmicznych charakterystyk fazowych LFCH modelu wyjściowego  $\varphi_W(\omega)$

i aproksymowanego  $\varphi_A(\omega)$  obiektu, otrzymane za pomocą opracowanego pakietu programów użytkowych, przy  $B = 0,06$  przedstawiono na rys. 3.8.

W dalszym ciągu przy przedstawianiu wykresów LACH przyjęto współczynnik wzmocnienia obiektu równy 10, a na osi odciętych występuje w skali logarytmicznej względna wartość częstotliwości w postaci  $\omega\tau$ . Rozpatrzono zakres częstotliwości, nie przekraczający pierwszej wartości krytycznej równej  $2\pi/\tau$ .

Z analizy charakterystyk częstotliwościowych wynika, że największy błąd aproksymacji występuje, gdy  $B \Rightarrow 0,1$ . Maksymalny błąd aproksymacji LACH nie przekracza 2 dB, a LFCH –  $3^\circ$ .



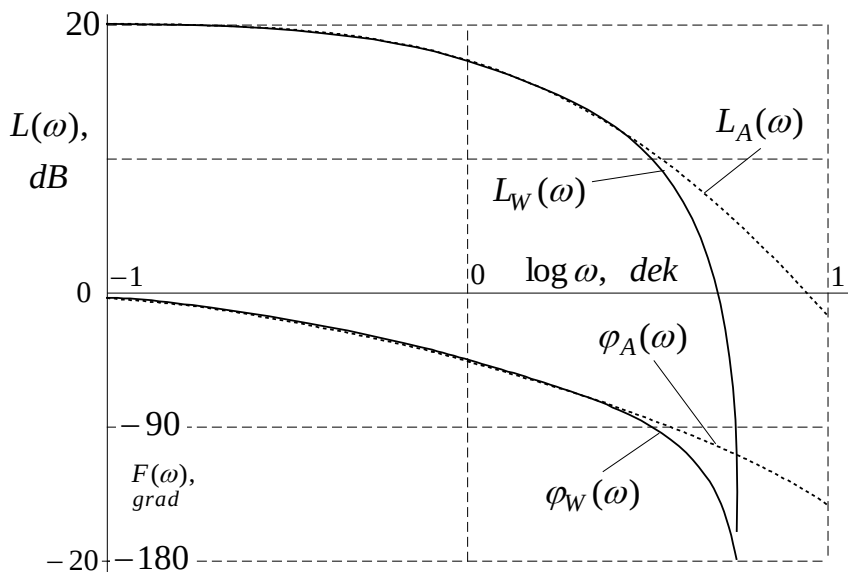
**Rys. 3.8. Normalizowane wykresy LACH i LFCH modelu wyjściowego i aproksymowanego obiektu**

Przy wykorzystaniu drugiego modelu aproksymowanego (3.24), charakterystyki częstotliwościowe opisano zależnościami:

$$A_A(\omega) = \frac{K_o}{\sqrt{1+T_1^2\omega^2}\sqrt{1+T_2^2\omega^2}},$$

$$\varphi_A(\omega) = -\arctg \omega T_1 - \arctg \omega T_2.$$

Jako przykład na rys. 3.9 pokazano normalizowaną logarytmiczną amplitudową charakterystykę częstotliwościową (LACH) i logarytmiczną fazową charakterystykę częstotliwościową (LFCH) modelu obiektu przy  $B = 0,6$ . Z analizy charakterystyk częstotliwościowych wynika, że przy wykorzystywaniu drugiego modelu aproksymowanego (3.24) znaczna rozbieżność LACH i LFCH względem charakterystyk modelu wyjściowego występuje tylko w zakresie wysokich częstotliwości, nie mających istotnego znaczenia przy projektowaniu UAR procesu technologicznego toczenia.



Rys. 3.9. Normalizowane wykresy LACH i LFCH modeli wyjściowego i aproksymowanego obiektu

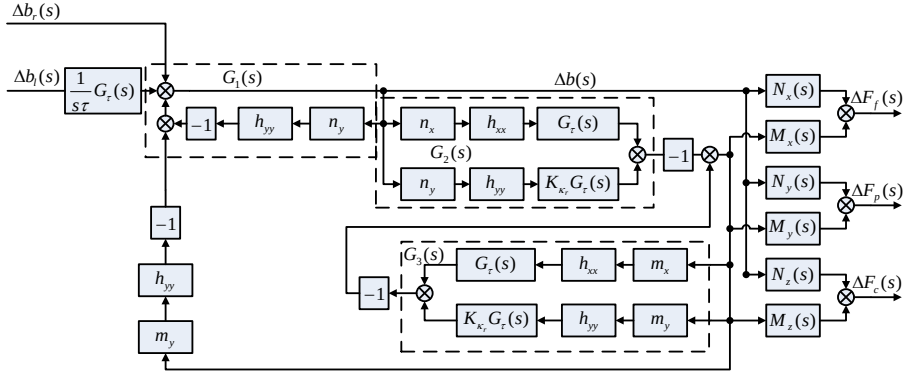
Wyniki analizy charakterystyk czasowych i częstotliwościowych pokazują możliwość opisanía właściwości układów dynamicznych obrabiarek w zależności od zmian współczynnika B. Do tego celu wykorzystuje się modele matematyczne w postaci członu całkująco-statycznego lub członu aperiodycznego drugiego rzędu.

### 3.5. Wyjściowe modele obiektu z uwzględnieniem wielkości zakłócających w postaci zmiany naddatku i twardości obrabianego materiału

W tym podrozdziale rozpatrzono modele matematyczne układu dynamicznego obrabiarki przy zakłóceniach w postaci zmiany naddatku  $b_l$ , twardości  $q$  względem długości przedmiotu i zmiany naddatku  $b_r$  na jego obwodzie. W tym celu wykorzystuje się uzasadnione wyżej założenia o możliwości zaniedbania inercyjności procesu powstawania wióra i układu sprężystego.

#### 3.5.1. Wyjściowe modele obiektu wielkości zakłócających

W celu uzyskania transmitancji operatorowej modelu wielkości zakłócających i rozpatrywanych wielkości wyjściowych schemat wyjściowy należy przekształcić do postaci pokazanej na rys. 3.10.



**Rys. 3.10. Przekształcony schemat strukturalny OS w obwodzie działania zakłóceń**

Z uwzględnieniem oznaczeń, przyjętych na rys. 3.10 transmitancja operatorowa obiektu, w przypadku wielkości wyjściowej – siły skrawania, przyjmuje postać:

$$G_{bFi}(s) = G_b(s)G_1(s) \left[ \frac{n_i}{1 - m_y h_{yy} G_1(s)G_3(s)G_4(s)} - m_i \frac{G_2(s)G_4(s)}{1 - m_y h_{yy} G_1(s)G_3(s)G_4(s)} \right] \quad (3.28)$$

gdzie:

$$G_b(s) = \frac{1}{s\tau} G_\tau(s), \quad G_\tau(s) = (1 - e^{-s\tau}), \quad G_1(s) = \frac{1}{1 + n_y h_{yy}},$$

$$G_2(s) = G_\tau(s)(n_x h_{xx} + K_{\kappa_r} m_y h_{yy}), \quad G_3(s) = G_\tau(s)(m_x h_{xx} + K_{\kappa_r} m_y h_{yy}),$$

$$G_4(s) = \frac{1}{1 + G_3(s)}.$$

Podstawiając powyższe zależności do wyrażenia (3.28), po przekształceniach i uproszczeniach, analogicznych do wykonanych przy wyprowadzeniu transmitancji operatorowej wielkości sterującej, otrzymuje się:

$$G_{bFi}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta b_l(s)} = \frac{K_{bFi}(s)G_\tau(s)}{s\tau[1 + BG_\tau(s)]}, \quad (3.29)$$

gdzie:

$$K_{bFi} = \frac{n_i}{1 + n_y h_{yy}}, \quad B = \frac{m_x h_{xx} + K_{\kappa_r} m_y h_{yy}}{1 + n_y h_{yy}}. \quad (3.30)$$

Jeśli za współrzędną wyjściową przyjąć jedną ze składowych odkształceń sprężystych, to transmitancja operatorowa obiektu przy rozpatrywanym zakłóceniu będzie mieć analogiczną postać:

$$G_{bgi}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta b_l(s)} = \frac{K_{bgi} G_\tau(s)}{s\tau[1 + BG_\tau(s)]}, \quad (3.31)$$

gdzie:

$$K_{bgi} = \frac{n_i h_{ii}}{1 + n_y h_{yy}}. \quad (3.32)$$

Jak wynika z zależności (3.29) i (3.31), transmitancja operatorowa obiektu wielkości zakłócającej pokrywa się z TO sterowania prędkością posuwu z dokładnością do współczynnika wzmocnienia.

W dalszym ciągu rozpatrywano osobliwości właściwości układu dynamicznego obrabiarki przy rozpatrywanych zakłóceniach. Ważnym wskaźnikiem układu dynamicznego jest dokładność przygotowania przedmiotu obrabianego w przekroju wzdłużnym. Do obróbki przeznaczane są półfabrykaty z pewną średnicą wyjściową  $d_{wyj}$ . Po obróbce należy otrzymać przedmiot

o zadanej średnicy  $d_o$ . Wielkość  $\frac{(d_{wyj} - d_o)}{2}$  opisuje naddatek na obróbkę  $b_l$ .

Układy dynamiczne, przeznaczone do obróbki przedmiotów, można rozpatrywać jako pewien układ sterowania, w którym jako wielkość wyjściową celowo należy wybrać odkształcenia sprężyste w kierunku współrzędnej  $Y$ , ponieważ, powodują one odchyłki średnicy części od wartości zadanej.

Zadaniem układu dynamicznego jest uzyskanie  $g_y = 0$  w warunkach działania zakłócenia  $b_l$ , prowadzącego do odchyłek wielkości wyjściowej od żądanej wartości zerowej. Naddatek na obróbkę  $b_l$  w technologii maszyn rozpatrywany jest jako wyjściowy błąd wartości średnicy. Obrobiona część będzie miała błąd równy  $g_y$ . W celu oceny właściwości układu technologicznego wykorzystuje się pojęcie "precyzji", pod którą rozumie się stosunek błędu półfabrykatu do błędu części  $b_l/g$ . Oczywiście, że "sprecyzowanie" jest to wartość odwrotna do współczynnika  $K_{bgy}$ , tzn. współczynnikiem tego typu charakteryzuje się "sprecyzowanie" osiągalne w stanach ustalonych. Przyjmując absolutnie sztywny układ technologiczny współczynniki  $h_{ii}$  charakteryzujące podatność układu sprężystego różnych współrzędnych  $h_{ii} \Rightarrow 0$ , odpowiednio, współczynnik  $K_{bgy} \Rightarrow 0$ . W układzie osiąga się idealne (nieskończone) "sprecyzowanie" w stanie statycznym, transmitancję operatorową  $G_{bgi}(s)$  można rozpatrywać jako operator, charakteryzujący "dynamiczne spreycyzowanie".

Podstawową klasyfikującą cechą istniejącego systemu podziału części na "sztywne" i o "małej sztywności" [92, 93], jest stosunek długości części do jej średnicy. Równocześnie, właściwości układu dynamicznego określone są nie tylko przez charakterystykę przedmiotu obrabianego, ale także przez warunki obróbki.

Z uwzględnieniem wskazanych cech układu dynamicznego w charakterze bardziej informacyjnego, klasyfikującego kryterium podziału części, w zależności od ich sztywności, można zaproponować wartość współczynnika wzmocnienia  $K_{bgi}$  lub wielkość odwrotną do tego współczynnika.

W ten sposób można określić transmitancję operatorową układu dynamicznego w przypadku działania na nią zakłócenia w postaci zmiany naddatku na obwodzie części.

Transmitancję operatorową obiektu współrzędnej wyjściowej – siły skrawania na podstawie struktury na rys. 3.10 opisuje zależność:

$$G_{b_r Fi}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta b_r(s)} = G_1(s) \left[ \frac{n_i}{1 - m_y h_{yy} G_1(s) G_3(s) G_4(s)} - m_i \frac{G_2(s) G_4(s)}{1 - m_y h_{yy} G_1(s) G_3(s) G_4(s)} \right].$$

Po przekształceniach zależność ta może być zapisana w postaci:

$$G_{b_r Fi}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta b_r(s)} = \frac{K_{bFi}}{s\tau[1 + BG_\tau(s)]}. \quad (3.33)$$

Do postaci analogicznej sprowadzają się TO w przypadku, kiedy w charakterze współrzędnej wyjściowej rozpatruje się odkształcenia sprężyste:

$$G_{b_r gi}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta b_r(s)} = \frac{K_{bgi}}{s\tau[1 + BG_\tau(s)]}. \quad (3.34)$$

Przy tym współczynniki wzmocnienia tych zależności określane są wyrażeniami, odpowiednio, (3.30) i (3.32).

Transmitancję operatorową obiektu oddziaływania zakłócającego jako zmiany twardości obrabianego materiału  $q_l$  wzdłuż długości przedmiotu obrabianego przy współrzędnych wyjściowych – siły skrawania i odkształceń sprężystych, otrzymano na podstawie przekształceń oraz założeń, analogicznie do przedstawionych uprzednio, czyli:

$$G_{qFi}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta q_l(s)} = \frac{K_{qFi} G_\tau(s)}{s\tau[1 + BG_\tau(s)]}, \quad (3.35)$$

$$G_{qgi}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta q_l(s)} = \frac{K_{qgi} G_\tau(s)}{s\tau[1 + BG_\tau(s)]}, \quad (3.36)$$

$$K_{qFi}(s) = \frac{c_i}{1 + n_y h_{yy}}, \quad K_{qgi}(s) = \frac{h_i c_i}{1 + n_y h_{yy}}.$$

### 3.5.2. Częstkowe modele matematyczne wielkości zakłócających

Podobieństwo zależności transmitancji operatorowej wielkości sterującej (3.9), (3.10) i TO (3.29) i (3.31) w przypadku wielkości zakłócającej w postaci

zmiany naddatku i twardości materiału wzdłuż osi części pozwala rozciągnąć otrzymane w poprzednim podrozdziale wyniki na dynamiczne właściwości obiektu względem zakłócenia. W szczególności przy aproksymacji rozpatrywanych modeli może być wykorzystane to samo podejście.

Aproksymowane transmitancje operatorowe obiektu wskazanych zakłóceń wartości współczynnika  $0 \leq B \leq 0,1$  celowe jest przedstawić w postaci, podobnej do (3.15) i (3.16) czyli:

$$G_{bFi}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta b_l(s)} = \frac{K_{bFi}}{s\tau} (1 - e^{-s\tau}) \quad (3.37)$$

$$G_{bgi}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta b_l(s)} = \frac{K_{bgi}}{s\tau} (1 - e^{-s\tau}) \quad (3.38)$$

$$G_{qFi}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta q_l(s)} = \frac{K_{qFi}}{s\tau} (1 - e^{-s\tau}) \quad (3.39)$$

$$G_{qgi}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta q_l(s)} = \frac{K_{qgi}}{s\tau} (1 - e^{-s\tau}) \quad (3.40)$$

W przypadkach, gdy wartość współczynnika  $B > 0,1$ , należy wykorzystać zależności przybliżone rozpatrywanych modeli, podobne do (3.17), (3.18):

$$G_{bFi}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta b_l(s)} = \frac{K_{bFi}}{(T_{o1}s + 1)(T_{o2}s + 1)}, \quad (3.41)$$

$$G_{bgi}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta b_l(s)} = \frac{K_{bgi}}{(T_{o1}s + 1)(T_{o2}s + 1)}, \quad (3.42)$$

$$G_{qFi}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta q_l(s)} = \frac{K_{qFi}}{(T_{o1}s + 1)(T_{o2}s + 1)}, \quad (3.43)$$

$$G_{qgi}(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta q_l(s)} = \frac{K_{qgi}}{(T_{o1}s + 1)(T_{o2}s + 1)}. \quad (3.44)$$

Stałe czasowe  $T_{o1}$ ,  $T_{o2}$  określa wyrażenie (3.20).

Modele matematyczne układu dynamicznego toczenia wzdłużnego ostrzami z  $\kappa_r = 90^\circ$  i szlifowania wzdłużnego, są szczególnymi przypadkami już rozpatrzonych. W tym przypadku, współczynnik  $K_{\kappa_r} = 0$  i zależność na  $B$  upraszcza się do postaci:

$$B = \frac{m_x h_{xx}}{1 + n_y h_{yy}}.$$

Dzięki podobieństwu transmitancji operatorowej sterowania i zakłócenia, pozostają prawdziwe otrzymane wyżej oceny błędów w dziedzinie czasu i częstotliwości, powstających przy aproksymacji przyjętymi zależnościami wyjściowych modeli matematycznych.

Przedstawione w czasie analizy właściwości obiektu, uwagi odnośnie szerokiego zakresu i charakteru zmian jego parametrów w całości odnoszą się do charakterystyk układu dynamicznego rozpatrywanych wielkości zakłócających.

W tym celu oddzielnie rozpatruje się właściwości obiektu z uwzględnieniem zakłócenia w postaci zmiany naddatku na obwodzie przedmiotu obrabianego. Podobne zakłócenia mają okresowy charakter i częstotliwość, będącą wielokrotnością częstotliwości obrotów przedmiotu obrabianego. Np. przy mimośrodowym umocowaniu półfabrykatów naddatek na obwodzie zmienia się zgodnie z prawem, bliskim harmonicznemu, z częstotliwością podstawową równą częstotliwości obrotów przedmiotu obrabianego.

Wykorzystując wzory Eulera funkcji  $e^{-s\tau}$  dokonano przejścia od zależności (3.34) do transmitancji częstotliwościowej obiektu rozpatrywanego oddziaływania:

$$G_{b,gi}(j\omega) = \frac{K_{bgi}}{(1+B-B\cos\omega\tau) + jB\sin\omega\tau},$$

na podstawie której, w przypadku ACH i FCH otrzymano:

$$A(\omega) = \frac{K_{bgi}}{\sqrt{(1+B-B\cos\omega\tau)^2 + (B\sin\omega\tau)^2}},$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{B\sin\omega\tau}{(1+B-B\cos\omega\tau)}.$$

W przypadku mimośradowości części częstotliwość kątowa zakłócenia wynosi:

$$\omega_1 = 2\pi/\tau \text{ i } A(\omega_1) = K_{b,gi}, \quad \varphi(\omega_1) = 0.$$

Następnie, błąd kształtu przedmiotu obrabianego na jego obwodzie w postaci mimośradowości odtwarza się w układzie dynamicznym ze współczynnikiem  $K_{b,gi}$

### 3.6. Badania eksperymentalne charakterystyk układu dynamicznego procesu technologicznego toczenia

Celem badań eksperymentalnych było stwierdzenie adekwatności opracowanych modeli matematycznych względem obiektu – oryginału. Oprócz tego, w trakcie badań eksperymentalnych wykrywane są charakterystyki wielkości zakłócających działających na obiekt, a także liczbowe wartości parametrów, wchodzących do zależności opisujących modele matematyczne, w szczególności, wzmocnienia układu MDS obrabiarki, których określenie metodami analitycznymi jest utrudnione.



### 3.6.1. Stanowisko badawcze

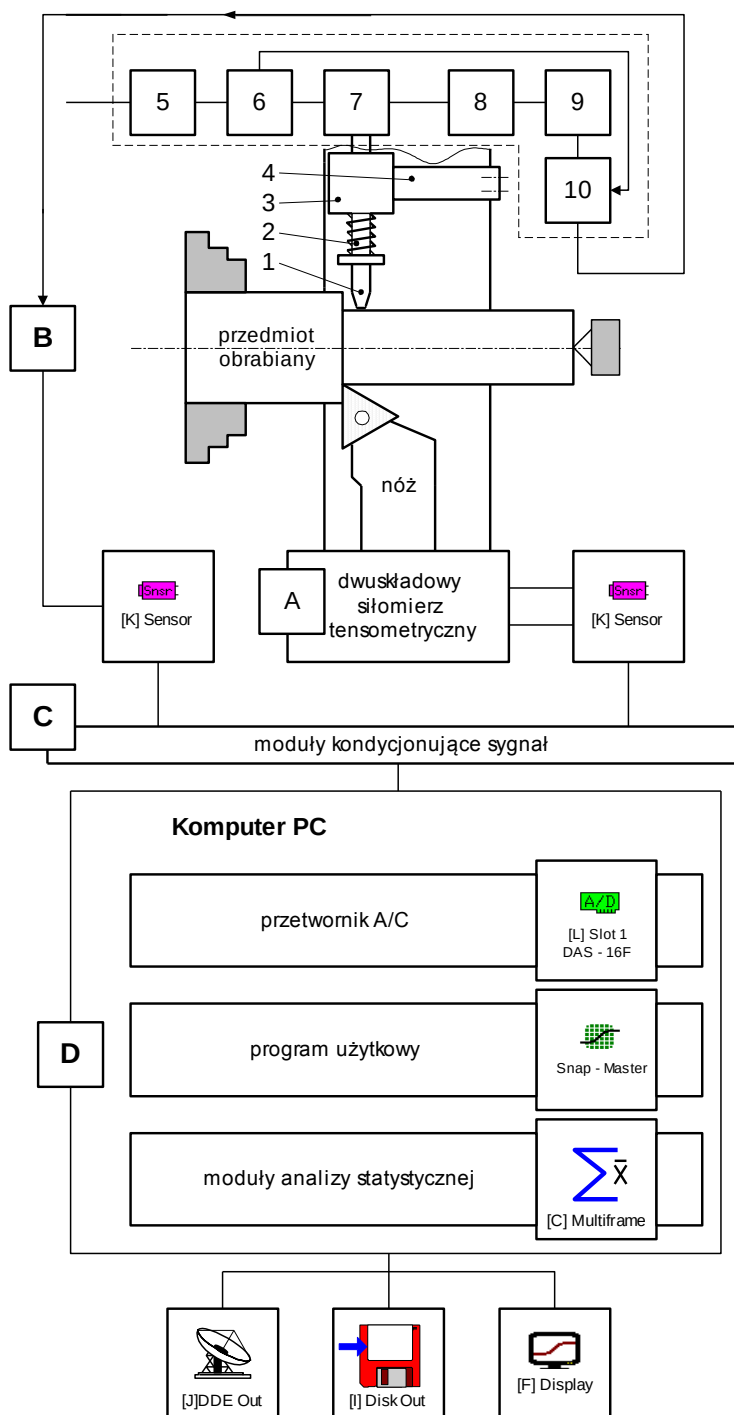
Wykorzystywane obecnie systemy pomiarowe wyposażone są w układy mikroprocesorowe. Ze względu na stawiane przed nimi zadania pomiarowe, wymagają indywidualnego podejścia w projektowaniu [84]. Tak więc, komputer PC, wyposażony w profesjonalne oprogramowanie do akwizycji danych jest już w wielu przypadkach standardowo wykorzystywany do identyfikacji zjawisk fizycznych w procesie skrawania [129].

Podstawowym elementem stanowiska badawczego jest precyzyjna tokarka kłowa I6B16P. W miejscu imaka nożowego umieszczono dwuskładowy siłomierz tensometryczny do pomiaru sił składowych  $F_c$  i  $F_f$ . Do rejestracji wyników eksperymentu wykorzystano komputerowy system akwizycji danych [132]. Wyboru obrabiarki dokonano ze względu na jej bardzo dobry stan techniczny, dostateczną moc napędu wrzeciona oraz dostosowanie zakresu prędkości obrotowej wrzeciona i posuwu do stanu adekwatnego obiektowi badań.

Stanowisko badawcze, którego schemat przedstawiono na rys. 3.11, zawiera dwa podstawowe podukłady: podukład pomiarowy i podukład rejestrująco-analizujący [133].

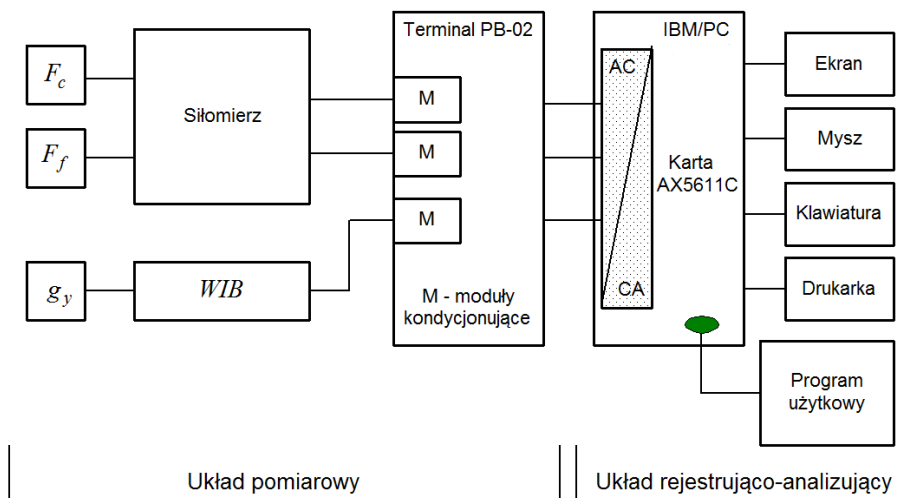
Podukład pomiarowy składa się z:

- siłomierza (A) do pomiaru siły skrawania  $F_c$  i siły posuwowej  $F_f$ , które działają podczas obróbki brył obrotowych metodą toczenia ortogonalnego swobodnego,
- zestawu (B) do pomiaru odkształceń sprężystych i drgań,
- zestawu (C) do kondycjonowania sygnału pomiarowego z czujników (sensorów) – karty pomiarowe z interfejsem USB,
- zestawu (D) do akwizycji danych –komputer PC.



Rys. 3.11. Schemat strukturalny układu pomiarowego i akwizycyjnego

Na rys. 3.12 przedstawiono schemat torów pomiarowych stanowiska badawczego. Do pomiaru odkształceń sprężystych i drgań wykorzystano zestaw aparatury BI6-6TN, w skład której wchodzi: stabilizator 5 napięcia sieciowego, przetwornik 6 napięcia, przetwornik 7 typu DW-ISG umocowany na trzpieniu 2; demodulator 8; filtr 9; wzmacniacz 10 prądu stałego.

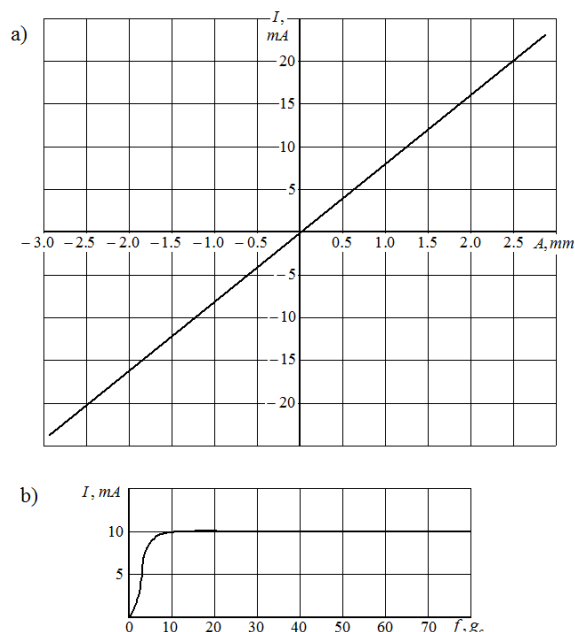


**Rys. 3.12. Schemat torów pomiarowych**

Statyczną charakterystykę przetwornika 7 przedstawiono na rys. 3.13a, a jego charakterystykę amplitudowo – częstotliwościową na rys. 3.13b. Pasma przenoszenia przetwornika znajduje się w przedziale 10-120 Hz.

Obróbkę półfabrykatów (rys. 3.11) wykonywano ostrzem, umocowanym w dwuskładowym siłomierzu na suporcie obrabiarki, na którym także ustawiono za pomocą wspornika urządzenie do detekcji odkształceń sprężystych i drgań przedmiotu obrabianego. Urządzenie wykonano w postaci trzpienia 2, umieszczonego w prowadnicy w postaci tulei 3 z prowadzeniem kulkowych. Sprężyna 4 jest przeznaczona do uzyskania stałego kontaktu urządzenia z przedmiotem obrabianym.

Sygnały analogowe generowane w systemie obróbkowym są izolowane galwanicznie, wzmacniane i filtrowane. Do tego celu zastosowano moduły pojemnościowe (C), które zbierają sygnały z różnych czujników o wartości wejściowej do 10mV. Sygnały te przekazywane są do komputera (D) przy użyciu karty pomiarowej DAS-16F. Tam ulegają kwantyzacji przy górnej częstotliwości próbkowania do 100 KHz. Zastosowany w badaniach system akwizycji danych uzupełniono programem użytkowym Snap-Master for Windows firmy Hem Data Corporation. Program ten charakteryzuje się łatwością konfiguracji, polegającej na zestawieniu układu przy pomocy ikon, między którymi następuje szeregowy bądź równoległy przepływ informacji.



**Rys. 3.13. Charakterystyki elementów schematu blokowego:**

**a) charakterystyka statyczna przetwornika 7,**

**b) charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przetwornika 7**

Wybór odpowiedniego oprogramowania użytkowego jest dokonywany indywidualnie, gdyż zależy on od cech badanego procesu, liczby użytych urządzeń w torze pomiarowym i żądanego czasu reakcji na zmiany sygnałów pomiarowych. Użyte oprogramowanie charakteryzuje się dużą elastycznością, co pozwala na tworzenie przez użytkownika odpowiednich do potrzeb, torów pomiarowych równocześnie w przypadku wielkości, mierzonych w jednym cyklu. Wyniki pomiarów i analiz mogą być prezentowane na ekranie monitora w postaci wykresów, względnie drukowane. Istnieje możliwość zapisu danych na dysku twardym łącznie z całą konfiguracją toru, wynikami wzorcowania, wartościami progowymi mierzonych wielkości i ustalonymi wskaźnikami kontrolnymi. Zapisane dane pomiarowe, po eksporcie do innych programów kalkulacyjnych, mogą być poddane dalszej, szerszej analizie matematycznej i statystycznej.

### 3.6.2. Badanie charakterystyk statycznych obiektu

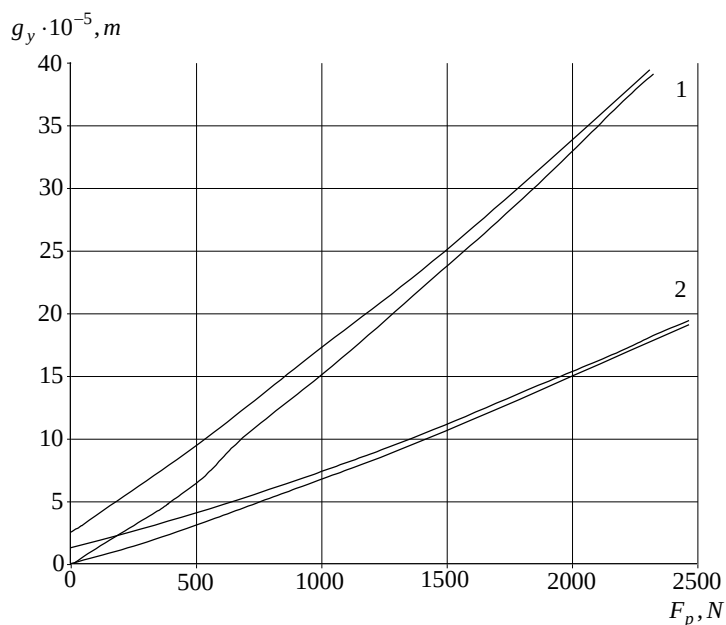
W podrozdziale tym skoncentrowano się głównie na metodyce i podstawowych wynikach, otrzymanych w czasie eksperymentalnych badań układów dynamicznych obrabiarek [49, 84].

W wyrażeniach transmitancji operatorowych układu dynamicznego kanałów sterowań i zakłóceń, występują współczynniki  $h_{ij}$ , które charakteryzują jego podatność. Wartości tych współczynników, z powodu znacznej złożoności analizy teoretycznej, określono eksperymentalnie.

W celu identyfikacji statycznych charakterystyk tokarki kłowej I6B16P, na podstawie których oblicza się wartości współczynników  $h_{ij}$ , układu dynamicznego obrabiarki przedmiot obrabiany poddano działaniu siły obciążającej imitującej skrawanie. Za pomocą przymiarów mikrometrycznych ustalano odkształcenia elementów układu dynamicznego wzdłuż odpowiednich współrzędnych. Obciążenie zrealizowano za pomocą urządzenia TG-1000, które pozwala wywołać siłę, działającą pod kątem  $60^\circ$  względem osi pionowej. Ponadto, może imitować dwie składowe siły skrawania: styczną i osiową lub styczną i promieniową, w zależności od sposobu umocowania urządzenia do wytwarzania obciążenia. Eksperymenty przeprowadzono zgodnie z zalecaną metodyką: przed wykonaniem pomiarów układ MDS wielokrotnie obciążano maksymalną siłą i przywracano do stanu bez obciążenia.

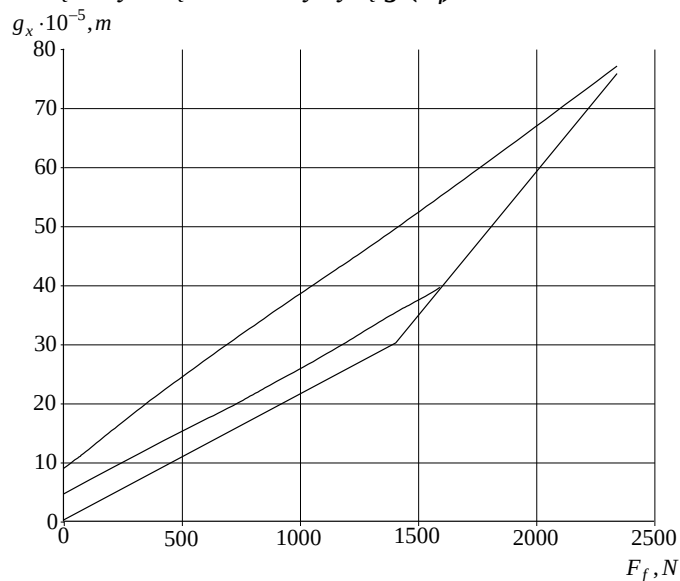
Charakterystykę  $g_y(F_p)$  układu sprężystego, składającego się z wrzeciennika i suportu obrabiarki, przedstawiono na rys. 3.14 (krzywa 1). Podatność zastępczego układu sprężystego, zawierającego konik i suport, w znacznym stopniu zależy od długości wysunięcia konika. Krzywą 2 na rys. 3.14 uzyskano przy długości wysunięcia konika 0,13m.

Przy próbach toczenia przedmiotów mocowanych w kłach, z powodu zmian współczynników wzmocnień układu sprężystego, wartości odkształceń sprężystych  $g_y$ , nawet w sytuacji, gdy można pominąć podatność przedmiotu obrabianego, są zależne od miejsca przyłożenia siły skrawania względem wrzeciennika i konika. W związku z tym, wartości współczynnika  $h_{yy}$  uściślono przy konkretnych warunkach obróbki tak zwaną " metodą przemysłową". Polega ona na tym, że wartości odkształceń sprężystych względem osi Y są oceniane na podstawie dokładności obróbki półfabrykatu, znając dokładność obróbki (wartość  $g_y$ ) i określając metodą eksperymentalną lub analityczną siłę skrawania, można znaleźć współczynnik  $h_{yy}$  [49].



**Rys. 3.14. Charakterystyki statyczne wzdłuż współrzędnej Y**

Współczynnik wzmocnienia  $h_{xx}$  układu sprężystego, w związku z wysoką sztywnością przedmiotu w kierunku osi X, zależy głównie od podatności wrzeciennika i zespołu suportu obrabiarki. Na rys. 3.15 pokazano eksperymentalną statyczną charakterystykę  $g_x(F_f)$ .



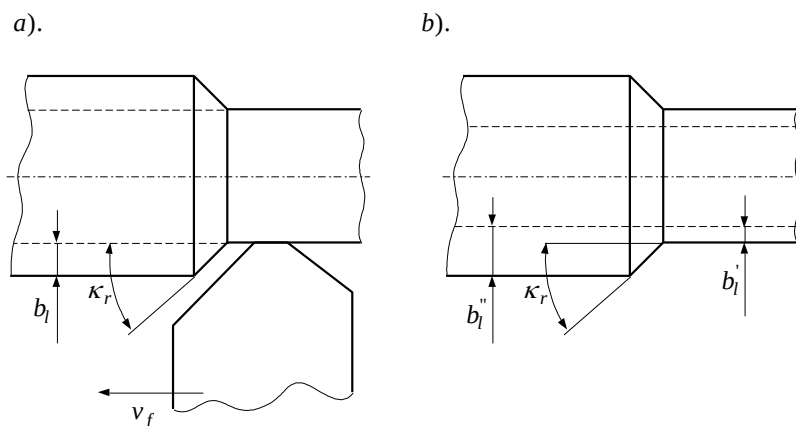
**Rys. 3.15. Charakterystyki statyczne współrzędnej X**

### 3.6.3. Badanie charakterystyk czasowych obiektu przy działaniu zakłóceń oraz sterowaniu posuwem wzdłużnym

Badanie charakterystyk dynamicznych obiektu przeprowadzono z wykorzystaniem metod aktywnego eksperymentu. W celu otrzymania charakterystyk czasowych rejestrowano na oscyloskopie sygnały wyjściowe obiektu w czasie wcinania ostrza skrawającego w przedmiot obrabiany.

Proces wcinania ostrza w przedmiot obrabiany przy stałych wartościach posuwu wzdłużnego i prędkości obrotowej przedmiotu może być rozpatrywany jako proces przejściowy wielkości sterującej jak również jako proces przejściowy zakłócenia. Równocześnie, pierwsze i drugie oddziaływanie można rozpatrywać jako skokowe, jeśli główna krawędź skrawająca ostrza jest równoległa do powierzchni poddawanej skrawaniu a grubość warstwy skrawanej pozostaje stała po wcięciu ostrza w przedmiot obrabiany.

Wspomniane procesy przejściowe charakteryzują się zerowymi warunkami początkowymi. Przejściowe charakterystyki obiektu w odniesieniu do zakłócenia przy niezerowych warunkach początkowych, były rejestrowane w czasie prób toczenia półfabrykatów ze skokową zmianą nadatku (rys. 3.16).



**Rys. 3.16. Szkice półfabrykatów służące do określenia funkcji przejścia:**  
**a – przy sterowaniu posuwem wzdłużnym,**  
**b – przy zakłóceniu w postaci skokowej zmiany nadatku**

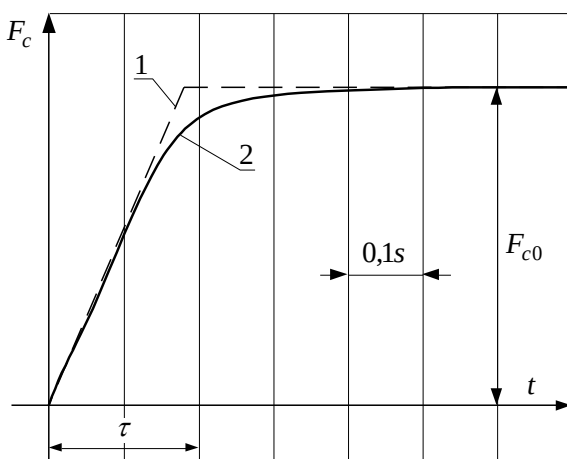
W czasie badań eksperymentalnych jako wyjściową wielkość obiektu przyjęto składową styczną siłę skrawania. Do jej pomiaru wykorzystano siłomierz dwuskładnikowy. Pod działaniem stycznej siły skrawania, "ruchoma" część siłomierza, w której umocowano nóż, przemieszcza się względem umieszczonej na suporcie "nieruchomej" części wskutek odkształceń sprężystych elementu o zmniejszonym przekroju. Wartości przemieszczeń sprężystych mierzono czujnikami indukcyjnym przemieszczeń liniowych. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych pokazały, że wielkość przemieszczeń sprężystych części "ruchomej" względem części "nieruchomej",

dzięki wysokiej sztywności elementu o zmniejszonym przekroju w kierunkach osiowym i promieniowym, zależy praktycznie tylko od stycznej siły skrawania.

W celu wyznaczenia charakterystyki statycznej siłomierza, do noża umocowanego w siłomierzu, przykładano siłę równoważną co do kierunku ze styczną siłą skrawania. W wyniku tych eksperymentów wyznaczono współczynnik wzmocnienia siłomierza i ustalono, że nieliniowość jego statycznej charakterystyki nie przekracza 2%. Dynamiczne charakterystyki siłomierza uzyskano z rejestracji oscyloskopowej sygnałów procesów przejściowych, wywołanych wzrostem i spadkiem obciążenia. Inercyjność siłomierza, jak pokazały przeprowadzone eksperymenty, jest o rząd mniejsza od inercyjności obiektu, co pozwala rozpatrywać siłomierz jako człon proporcjonalny.

Aby otrzymać w czasie rejestracji oscylograficznej znacznik początku procesu przejściowego, w momencie wcinania ostrza w przedmiot obrabiany na nóż izolowany elektrycznie od imaka, podawano napięcie ze źródła niskiego napięcia, którego drugi biegun był podłączony do korpusu obrabiarki. Moment zetknięcia krawędzi skrawającej ostrza z obrabianym półfabrykatem był wykrywany poprzez zamknięcie obwodu elektrycznego.

Przykładowo, na rys. 3.17 i rys. 3.18 pokazano oscylogramy procesów przejściowych, otrzymanych w czasie eksperymentalnego badania układu dynamicznego tokarki.



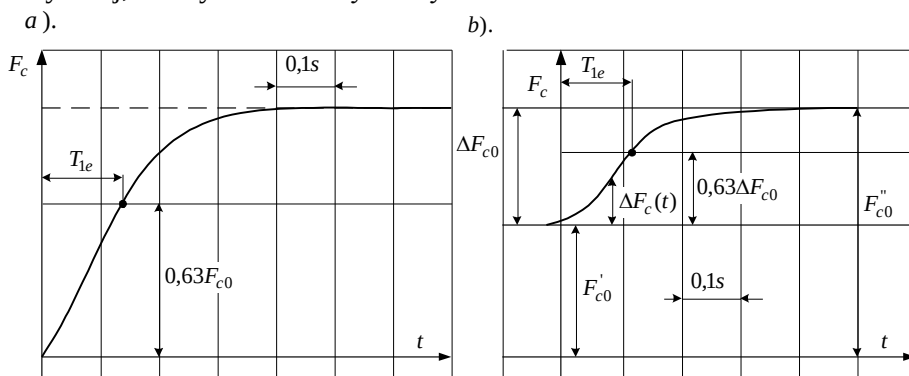
Rys.3.17. Eksperymentalne charakterystyki przejściowe obiektu sterowania

Pierwszy z nich (rys. 3.17) otrzymano w przypadku procesu skrawania w następujących warunkach: materiał półfabrykatu – stal 45, nóż z płytką Ti15Co6, wartość kąta przystawienia ostrza  $\kappa_r = 90^\circ$ , prędkość skrawania  $v_c = 90 \text{ m/min}$ , głębokość skrawania  $a_p = 1 \text{ mm}$ , prędkość posuwu wzdłużnego  $v_f = 60 \text{ mm/min}$ , wartość grubości warstwy skrawanej w stanie ustalonym  $a = 0,2 \text{ mm}$ , wartość stycznej siły skrawania w stanie ustalonym  $F_{c0} = 350 \text{ N}$ , czas



obrotu przedmiotu  $\tau=0,2s$ , średnica przedmiotu  $d=30mm$ . Obliczenia współczynników wzmocnienia procesu skrawania z uwzględnieniem danych poradnikowych, podanych np. w [98, 168], wynoszą:  $m_x=0,66 \times 10^6 N/m$ ,  $m_y=0,14 \times 10^6 N/m$ . Podatność przedmiotu obrabianego, można w danym przypadku pominąć. Z charakterystyk statycznych (rys. 3.14, rys.3.15) wyznaczono:  $h_{xx}=1,5 \times 10^{-7} m/N$ ,  $h_{yy}=0,66 \times 10^{-7} m/N$ . Wartość współczynnika  $B=0,099$  obliczono za pomocą wzoru (3.16), zaś przybliżony model matematyczny można przyjąć w postaci członu całkującego z transmitancją operatorową (3.23).

Odpowiedź członu na skokową zmianę wielkości wejściowej teoretycznie przedstawia liniowo narastający sygnał w czasie  $\tau$  (krzywa 1 na rys. 3.17). Rzeczywista krzywa 2 wielkości wyjściowej jest dostatecznie bliska krzywej teoretycznej; maksymalna odchyłka wynosi 12%.



**Rys.3.18. Eksperymentalne charakterystyki przejściowe obiektu sterowania**

Na rys. 3.18a pokazano charakterystykę przejściową, otrzymaną w czasie skrawania w następujących warunkach: materiał przedmiotu obrabianego – stal 45, nóż z płytką Ti15Co6,  $\kappa_r=45^\circ$ ,  $v_c=96m/min$ ,  $a_p=1mm$ ,  $v_f=100mm/min$ ,  $a=0,2mm$ , wartość stycznej siły skrawania w stanie ustalonym  $F_{c0}=1450N$ ,  $\tau=0,12s$ . Podobnie, wyznaczono współczynniki wzmocnienia procesu skrawania i układu MDS oraz obliczono wartość współczynnika:  $B=1,2$ . Jako model przybliżony, z uwzględnieniem wartości parametru  $B$ , należy przyjąć model (3.18) w postaci członu aperiodycznego drugiego rzędu.

Stałe czasowe, wyznaczone za pomocą wzoru (3.20), wynoszą  $T_{o1}=0,2s$ ,  $T_{o2}=0,006 s$ . Biorąc pod uwagę, że druga stała czasowa obiektu jest o rząd mniejsza od pierwszej, do dalszych obliczeń można przyjąć  $T_{1p}=T_{o1}$  i krzywą eksperymentalną aproksymować eksponentą i ustalić stałą czasową na  $T_{1e}=0,18 s$ , jako czas po którym wielkość wyjściowa osiąga 0,63 swojej wartości w stanie ustalonym. Błąd oceny obliczonej stałej czasowej wynosi:

$$\delta = \frac{T_{1e} - T_{1p}}{T_{1e}} * 100\% = -11\% . \quad (3.45)$$

Na rys. 3.18b pokazano oscylogram charakterystyki czasowej obiektu, otrzymanej w czasie obróbki przedmiotu obrabianego ze skokową zmianą głębokości skrawania od wartości  $a_{p1}=1,5\text{mm}$  do  $a_{p2}=3\text{mm}$ , co daje zmianę naddatku  $\Delta a_p=1,5\text{mm}$ . Materiał przedmiotu obrabianego stal 45, nóż z płytką Ti15Co6,  $\kappa_r=45^\circ$ ,  $v_c=98\text{m/min}$ ,  $v_f=100\text{mm/min}$ ,  $a=0,2\text{mm}$ ,  $\tau=0,075\text{s}$ , wartość stycznej siły skrawania w stanie ustalonym  $F'_{c0}=620\text{N}$ ,  $F''_{c0}=1240\text{N}$ . Według przytoczonej wyżej zależności, średnia obliczona wartość współczynnika  $B=0,9$ . Odpowiednio, charakterystykę czasową obiektu aproksymowano eksponentą z obliczoną stałą czasową  $T_{1p}=0,106\text{s}$ . Proces przejściowy charakteryzuje się niezerowymi warunkami początkowymi a eksperymentalną wartość stałej czasowej  $T_{1e}=0,1\text{s}$  określono z oscylogramu wielkości wyjściowej. Błąd obliczenia stałej czasowej wg wzoru (3.45) wynosi 6%.

W tabelicy 3.1 przedstawiono podstawowe informacje o warunkach skrawania, w których przeprowadzono eksperymenty, a także obliczone i eksperymentalne wartości stałych czasowych procesu przejściowego.

**Tab.3.1. Zestawienie parametrów skrawania oraz eksperymentalnych i obliczonych stałych czasowych**

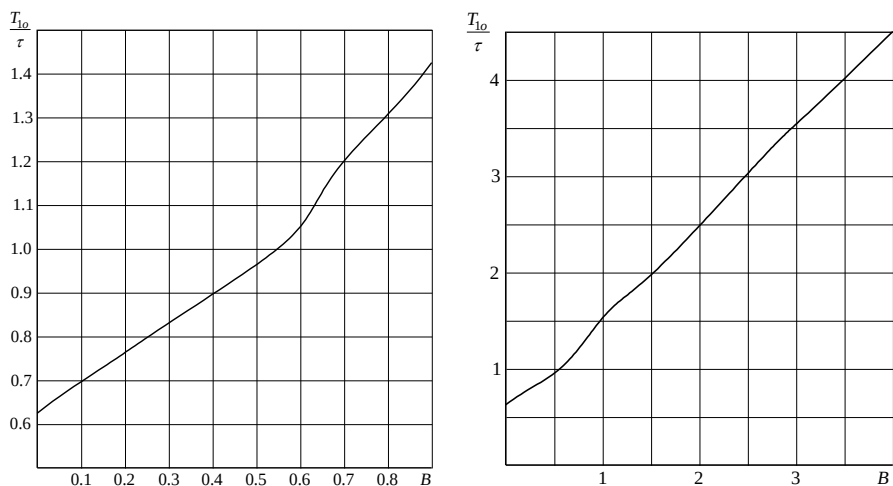
| Nr  | $\tau$ , [s] | $\chi_r$ | $v_c$<br>[m/s] | $a_p$ ,<br>[mm] | $a$  | $F_{c0}$ ,<br>[N] | $T_{1e}$ , [s] | $T_{1p}$ , [s] | $\delta$ , % |
|-----|--------------|----------|----------------|-----------------|------|-------------------|----------------|----------------|--------------|
| 1.  | 0.48         | 45       | 0.8            | 2.0             | 0.2  | 900               | 0.59           | 0.55           | 7            |
| 2.  | 0.48         | 45       | 0.8            | 3.0             | 0.2  | 1380              | 0.7            | 0.625          | 11           |
| 3.  | 0.375        | 45       | 0.85           | 1.0             | 0.2  | 480               | 0.3            | 0.3            | 0            |
| 4.  | 0.375        | 45       | 0.85           | 2.0             | 0.25 | 1140              | 0.46           | 0.43           | 7            |
| 5.  | 0.375        | 45       | 0.85           | 3.0             | 0.2  | 1400              | 0.55           | 0.48           | 13           |
| 6.  | 0.24         | 45       | 1.3            | 1.5             | 0.25 | 855               | 0.23           | 0.215          | 7            |
| 7.  | 0.24         | 45       | 1.3            | 2.0             | 0.25 | 1150              | 0.34           | 0.28           | 18           |
| 8.  | 0.24         | 45       | 1.3            | 3.0             | 0.2  | 1370              | 0.36           | 0.31           | 14           |
| 9.  | 0.12         | 45       | 1.6            | 1.5             | 0.2  | 730               | 0.12           | 0.13           | -8           |
| 10. | 0.12         | 45       | 1.6            | 3.0             | 0.2  | 1470              | 0.18           | 0.161          | 11           |
| 11. | 0.095        | 45       | 1.65           | 1.0             | 0.2  | 475               | 0.08           | 0.076          | 5            |
| 12. | 0.095        | 45       | 1.65           | 3.0             | 0.2  | 1475              | 0.15           | 0.13           | 13           |
| 13. | 0.095        | 45       | 1.65           | 5.0             | 0.1  | 1180              | 0.2            | 0.19           | 5            |
| 14. | 0.075        | 45       | 1.67           | 1.0             | 0.2  | 470               | 0.06           | 0.064          | -7           |
| 15. | 0.075        | 45       | 1.67           | 2.0             | 0.2  | 981               | 0.11           | 0.09           | 18           |
| 16. | 0.075        | 45       | 1.67           | 3.0             | 0.2  | 1430              | 0.12           | 0.105          | 5            |
| 17. | 0.048        | 45       | 1.69           | 1.0             | 0.2  | 390               | 0.04           | 0.04           | 0            |
| 18. | 0.048        | 45       | 1.69           | 3.0             | 0.2  | 795               | 0.072          | 0.065          | 10           |

|     |       |    |      |     |      |      |       |       |     |
|-----|-------|----|------|-----|------|------|-------|-------|-----|
| 19. | 0.48  | 90 | 0.9  | 1.0 | 0.25 | 610  | 0.3   | 0.38  | -26 |
| 20. | 0.48  | 90 | 0.9  | 2.0 | 0.25 | 1200 | 0.42  | 0.43  | -2  |
| 21. | 0.19  | 90 | 1.33 | 2.0 | 0.25 | 1100 | 0.18  | 0.17  | 6   |
| 22. | 0.19  | 90 | 1.33 | 5.0 | 0.1  | 1270 | 0.32  | 0.37  | -16 |
| 23. | 0.12  | 90 | 1.7  | 1.0 | 0.25 | 590  | 0.088 | 0.096 | -9  |
| 24. | 0.12  | 90 | 1.7  | 3.0 | 0.25 | 1770 | 0.16  | 0.14  | 12  |
| 25. | 0.095 | 90 | 1.65 | 1.0 | 0.25 | 580  | 0.07  | 0.076 | 7   |
| 26. | 0.095 | 90 | 1.65 | 5.0 | 0.1  | 1200 | 0.16  | 0.18  | 13  |

Zestawienie eksperymentalnych i obliczonych krzywych procesów przejściowych wykonano zgodnie z następującą metodyką. Eksperymentalne charakterystyki przejściowe aproksymowano następującym wyrażeniem:

$$F_c(t) = F_{c0}[1 - \exp(-t/T_{1e})],$$

gdzie:  $F_{c0}$  - ustalona wartość wielkości wyjściowej lub jej przyrostu,  $T_{1e}$  – ekwiwalentna stała czasowa, określana na podstawie oscylogramu, jako czas, po którym wielkość wyjściowa lub jej przyrost osiągnie 0,63 wartości w stanie ustalonym. Znalezione wartości  $T_{1e}$  porównano z obliczonymi  $T_{1p}$ . Te ostatnie określono jako czas, w którym obliczona charakterystyka przejściowa opisana przedstawionymi wyżej zależnościami, osiąga 0.63 wartości ustalonej. Względne wartości  $T_{1p}$  zależą od współczynnika  $B$  i można je wyznaczyć na podstawie krzywych pokazanych na rys. 3.19.



**Rys. 3.19. Wykresy dla obliczania wartości stałych czasowych  $T_{10}$  obiektu sterowania**

Przytoczone wyniki otrzymano w czasie obróbki przedmiotów obrabianych ze stali 45 nożem z płytką Ti15Co6, z kątami przystawienia 45° i 90°. Wartości stałych czasowych, podanych w tablicy 3.1, obliczano jako średnie z obróbki

trzech, czterech oscylogramów uzyskanych w takich samych warunkach. W czasie analitycznego wyznaczania stałych czasowych wykorzystano uściślone, w czasie przeprowadzonych eksperymentów, wartości współczynników wzmocnienia układu MDS i procesu skrawania. Błędy obliczania stałych czasowych nie przekraczają w zasadzie 20%.

Wyniki badań eksperymentalnych charakterystyk obiektu dla wielkości sterujących w postaci prędkości posuwu wzdłużnego i prędkości obrotowej wrzeciona, a także wielkości zakłócającej, w postaci zmiany naddatku na obwodzie przedmiotu obrabianego świadczą o zadowalającej przydatności modeli matematycznych, otrzymanych drogą identyfikacji analitycznej. Oprócz tego, badania te potwierdzają wyprowadzony wcześniej wniosek o możliwym szerokim zakresie zmian parametrów obiektu sterowania.

### **3.6.4. Badanie charakterystyk częstotliwościowych obiektu dla prędkości posuwu wzdłużnego**

Jednocześnie z czasowymi, badano charakterystyki częstotliwościowe układu dynamicznego obrabiarki przy sterowaniu prędkością posuwu wzdłużnego.

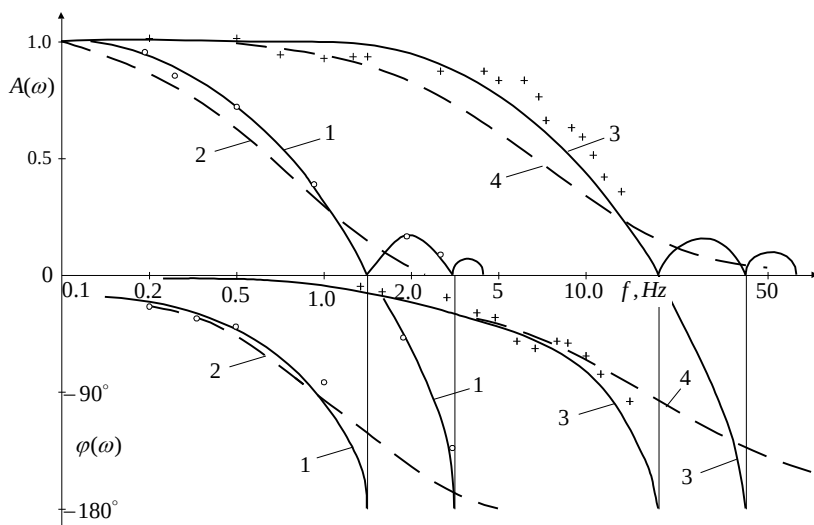
Badanie charakterystyk częstotliwościowych obiektu dla posuwu wzdłużnego, przeprowadzono na tej samej tokarce, wyposażonej w czujnik posuwu wzdłużnego i siłomierz dwuskładnikowy. Sygnał, zawierający stałą i harmoniczne składowe, podawano na wejście generatora posuwu w układzie sterowania CNC, z wyjścia którego przechodził on poprzez interpolator i komutator na wejście napędu posuwu wzdłużnego. Rejestrację charakterystyk wykonano w czasie toczenia przedmiotów ze stali 45 przy ustalonych prędkościach obrotowych wrzeciona 90, 710 i 1400 obr./min. nożem z płytą Ti15Co6. W celu oceny adekwatności MM obiektu przeprowadzono porównanie charakterystyk częstotliwościowych eksperymentalnych i obliczonych. Jako wzory do obliczenia charakterystyk amplitudowej i fazowej wykorzystano zależności podstawowego modelu, czyli:

$$A(\omega) = K_0 \cdot \frac{1}{\omega \sqrt{C_1}},$$

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{\operatorname{ctg}(\omega\tau/2)}{1 + 2B}\right), \quad (3.46)$$

$$C_1 = B^2 + B + 0.25 + 0.25\operatorname{ctg}^2(\omega\tau/2).$$

Na rys. 3.20 pokazano, we względnych jednostkach skali półlogarytmicznej otrzymane charakterystyki ACH i FCH dla prędkości obrotowej wrzeciona równej 90 obr./min. (krzywe1) i 1400 obr./min. (krzywe 3).



**Rys. 3.20. ACH i FCH obiektu sterowania przy sterowaniu posuwem wzdłużnym**

Na rys. 3.20 pokazano również charakterystyki ACH i FCH (krzywe 2 i 4) odpowiadające przybliżonemu modelowi (3.17) w postaci członu aperiodycznego drugiego rzędu.

Dane eksperymentalne przy prędkości obrotowej  $n_p=90$  obr./min. (nóż z płytką Ti15Co6,  $\kappa_r=55^\circ$ , średnica półfabrykatu  $d=58$ mm, głębokość skrawania  $a_p=2,5$  mm, obliczona wartość współczynnika  $B=0,22$ ) przedstawiono w postaci kółeczek. W przypadku prędkości obrotowej  $n_p=1400$  obr./min. (nóż z płytką Ti15Co6,  $\kappa_r=55^\circ$ , średnica półfabrykatu  $d=30$ mm, głębokość skrawania  $a_p=2,5$ mm, obliczona wartość współczynnika  $B=0,25$ ); dane przedstawiono przy pomocy krzyżyków.

Amplitudowe i fazowe charakterystyki obiektu, mają szereg charakterystycznych punktów: przy wartościach krytycznych częstotliwości charakterystyka amplitudowa przyjmuje wartości zerowe, a charakterystyka fazowa ma nieciągłości. Przy  $n_p=90$  obr./min. wartości krytyczne częstotliwości wynoszą:  $f_k = k / \pi$  ( $k=1,2,3,\dots$ )  $f_{k1}=1,5$  Hz,  $f_{k2}=3$  Hz,  $f_{k3}=4,5$  Hz. Jak wynika z rys.3.20 dane eksperymentalne toczenia wzdłużnego przedmiotów ze stali konstrukcyjnych są zbliżone do obliczonych wg zależności (3.46) w modelu podstawowym. Przy wykorzystywaniu przybliżonych modeli z TO (3.17), zgodność danych eksperymentalnych i obliczeniowych można ocenić jako zadowalające w obliczeniach praktycznych. Dotyczy to zakresu najbardziej istotnych częstotliwości z punktu widzenia syntezy układu sterowania automatycznego.

Otrzymane wyniki świadczą o zbieżności krzywych teoretycznych oraz obliczonych podstawowego modelu obiektu, z danymi eksperymentalnymi. Jeśli chodzi o modele przybliżone w postaci członu aperiodycznego drugiego rzędu, to wyniki analityczne i eksperymentalne są zgodne w zakresie częstotliwości, mniejszych od pierwszej częstotliwości krytycznej.

Dla sterowania prędkością obrotową wrzeciona i posuwu wzdłużnego w oparciu na otrzymane dane eksperymentalne pokazujące słuszność modeli podstawowych i przybliżonych układów dynamicznych względem obiektu–oryginału ich przydatność jest potwierdzona. Ma to swoje odzwierciedlenie również w wynikach eksperymentów przeprowadzonych przez innych badaczy np. [47, 101].

W wyniku analizy charakterystyk częstotliwościowych modeli układów dynamicznych obrabiarek w odniesieniu do wielkości wejściowych w postaci prędkości posuwu wzdłużnego, zmiany naddatku obrabianego materiału wzdłuż osi przedmiotu obrabianego ustalono, że ACH i FCH modeli opisują okresowe funkcje częstotliwości z okresem będącym wielokrotnością  $1/\tau$ .

Inercyjność układu MDS obrabiarki i procesu powstawania wióra istotnie wpływa na postać ACH i FCH obiektu tylko w zakresie "wysokich" częstotliwości  $\omega > 1/\tau$ . Wiedza ta jest wykorzystywana przy budowie modeli matematycznych obiektu sterowania, gdy zakres istotnych częstotliwości układu automatycznej regulacji leży na lewo od częstotliwości  $\omega = 1/\tau$  i są spełnione warunki "wibrostabilności" układu dynamicznego. Wówczas można opisywać układ MDS i proces skrawania równaniami algebraicznymi.

Opis matematyczny podstawowych modeli układu dynamicznego obrabiarki przy wybranych wielkościach wejściowych jest przedstawiony w postaci równań operatorowych z opóźnionym argumentem. Wartość opóźnienia określono za pomocą prędkości obrotowej przedmiotu, a współczynniki równań zależą od sztywności układu technologicznego i współczynników wzmocnienia procesu skrawania.

W wyniku analizy charakterystyk czasowych i częstotliwościowych modeli podstawowych, stwierdzono możliwość ich aproksymacji w zakresie istotnych częstotliwości układu sterowania transmitancjami operatorowymi typu całkująco–statycznego lub członu aperiodycznego drugiego rzędu. Ustalono, że współczynniki wzmocnienia i stałe czasowe modeli aproksymowanych, zmieniają się przede wszystkim z powodu zmiany prędkości obrotowej przedmiotu obrabianego i złożonego współczynnika, charakteryzującego stosunek sztywności układu MDS oraz współczynników skrawania. Na uniwersalnych tokarkach i szlifierkach, z powodu zmiennych warunków pracy parametry modeli mogą się wielokrotnie zmieniać.

Wyniki badania eksperymentalnego charakterystyk częstotliwościowych i czasowych obiektu przy różnych wielkościach sterujących i zakłócających, potwierdzają przydatność modeli matematycznych, sformułowanych na podstawie metod identyfikacji analitycznej.

## 4. Symulacja przebiegów przejściowych i charakterystyk częstotliwościowych

### 4.1 Krótki opis programu MATMOD

Na potrzeby badania charakterystyk układu dynamicznego opracowano program komputerowy MATMOD 1 [9, 10, 21, 46,130].

Program ten realizuje następujące funkcje:

1. ustala warunki procesu skrawania poprzez podanie parametrów obrabiarki, przedmiotu obrabianego i warunków skrawania procesu technologicznego,

2. oblicza w oparciu o modele układu dynamicznego procesu skrawania (przedstawione w rozdziale trzecim) podstawowe charakterystyki dynamiczne (w tym transmitancję operatorową), odpowiedzi sił skrawania na skokową zmianę posuwu oraz charakterystyki częstotliwościowe: amplitudową i fazową.

W programie możliwe jest wykonanie szeregu symulacji numerycznych układu dynamicznego procesu skrawania. Przewidziano w nim trzy rodzaje mocowania przedmiotu obrabianego, które mają istotny wpływ na końcowy wynik obliczeń. Są to: mocowanie przedmiotu w kłach, mocowanie w uchwycie i w kle oraz w dwóch uchwytach. W zależności od rodzaju mocowania program wyznacza maksymalną podatność przedmiotu w kierunku promieniowym. Do programu mogą zostać wprowadzone przedmioty obrabiane o różnych długościach. Dodatkowym atutem programu jest możliwość zdefiniowania własności obrabianego materiału poprzez podanie np.  $E$  i  $R_m$ . Jako dane wejściowe do procesu obliczeniowego podawane są także wartości podatności obrabiarki w kierunku współrzędnych  $X$ ,  $Y$  i  $Z$ , a także: głębokość skrawania, posuw (mm/obr.), kąt  $\kappa_r$  (w zakresie od  $45^\circ$  do  $90^\circ$ ) oraz prędkość obrotowa części  $n_p$  w zakresie od 100 do 2000 obr./min. Po wprowadzeniu danych wejściowych program przystępuje do wykonywania obliczeń.

Na podstawie wprowadzonych danych w pierwszej kolejności obliczane są wartości sił  $F_t$ ,  $F_c$  i  $F_p$ . W dalszej kolejności – współczynniki wzmocnienia procesu skrawania  $m_x$ ,  $m_y$  oraz  $m_z$  przy zmianie posuwu i głębokości skrawania  $a_p$  (wielkości te mogą być traktowane jako zakłócenie). Następnie obliczany jest współczynnik względnej sztywności dynamicznej  $B$ . Etapem kolejnym jest podanie dokładnej transmitancji operatorowej przy sterowaniu, odpowiadającej podanym warunkom wg odpowiedniego wzoru (rozdział trzeci), a także współczynniki wzmocnienia obiektu  $K_{ox}$ ,  $K_{oy}$ ,  $K_{oz}$  oraz opóźnienie  $\tau$ . Następnie ponownie obliczana jest wartość współczynnika  $B$ . Następnie wyznaczana jest TO przy zakłóceniu. Jej postać może być następująca:

$$G_{bFi}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta b_i(s)} = \frac{K_{bFi}(s)(1 - e^{-\tau s})}{s\tau[1 + B(1 - e^{-\tau s})]}.$$

Dla tej TO obliczane są współczynniki  $K_{bx}$ ,  $K_{by}$ ,  $K_{bz}$  i wyznaczana jest wartość współczynnika  $B$  oraz opóźnienie  $\tau$ .

Kolejnym krokiem pracy programu jest wyznaczenie transmitancji operatorowej obiektu aproksymowanego w przypadku sterowania. W tym przypadku transmitancja operatorowa ma postać:

$$G_o(s) = \frac{\Delta Y_o(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{K_o}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}.$$

Po obliczeniu transmitancji operatorowej wyznaczane są współczynniki  $K_{0x}$ ,  $K_{0y}$ ,  $K_{0z}$ . Następnie wyznaczane są stałe czasowe  $T_1$  i  $T_2$ .

Etapem końcowym części obliczeniowej programu jest wyznaczenie TO obiektu przy zmiennym naddatku  $b(s)$ , traktowanego jako zakłócenie. W fazie początkowej wyznacza się transmitancję obiektu zgodnie z określonymi regułami. W przypadku zmian naddatku  $b(s)$  TO obiektu może przyjąć następującą postać:

$$G_{bFi}(s) = \frac{\Delta F_i(s)}{\Delta b_i(s)} = \frac{K_{bFi}(s)(1 - e^{-s\tau})}{s\tau[1 + B(1 - e^{-s\tau})]},$$

natomiast współczynnik  $B$ , w tym przypadku, przybiera postać:

$$B = \frac{m_x h_{xx} + K_{Kr} m_y h_{yy}}{1 + n_y h_{yy}}.$$

Na zakończenie procesu obliczeniowego program umożliwia obliczenie wartości odkształceń sprężystych wg współrzędnych  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  oraz współczynników  $K_{ab}$ :  $K_{abx}$ ,  $K_{aby}$ ,  $K_{abz}$ . Wyznacza się wartości zastępczych stałych czasowych  $T_1$  i  $T_2$  współczynnik wzmocnienia obiektu  $K_0$  oraz współczynnik  $B$ . Jako ostatnie wyznaczane są: wartość ustalona wielkości wyjściowej  $Y_{ust}$  i maksymalny względny błąd aproksymacji.

Po uzyskaniu wartości liczbowych z obliczeń można zażądać, aby program wykreślił charakterystyki graficzne wykonanych symulacji numerycznych.

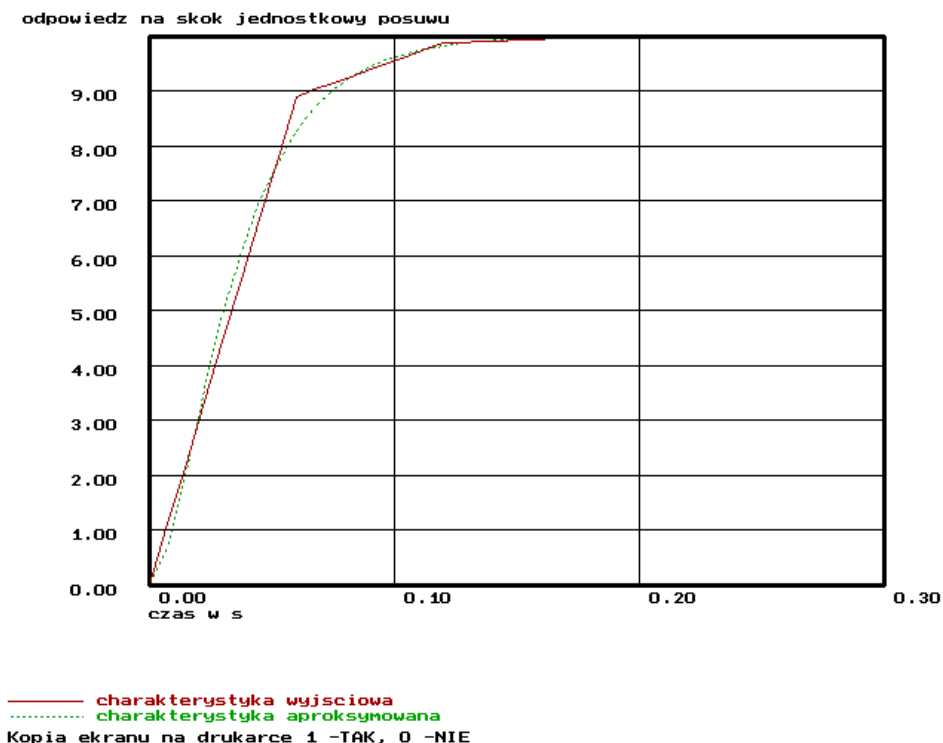
Po uruchomieniu programu należy wprowadzić parametry procesu skrawania oraz parametry geometryczne i właściwości przedmiotu obrabianego. Wartości graniczne parametrów (wartość minimalna i maksymalna) są podawane w momencie pojawienia się na ekranie zapytania o wartość danego parametru. Następnie użytkownik może wybierać opcje programu: obliczanie odpowiedzi na skok jednostkowy oraz obliczanie charakterystyki częstotliwościowej. Amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa przedstawia zależność (wykres) modułu  $A(\omega)$  transmitancji widmowej  $G(j\omega)$  w funkcji częstotliwości kołowej  $\omega = 2\pi f$ . Fazową charakterystykę częstotliwościową przedstawia wykres  $\varphi(\omega)$  w funkcji częstotliwości kołowej  $\omega = 2\pi f$ .



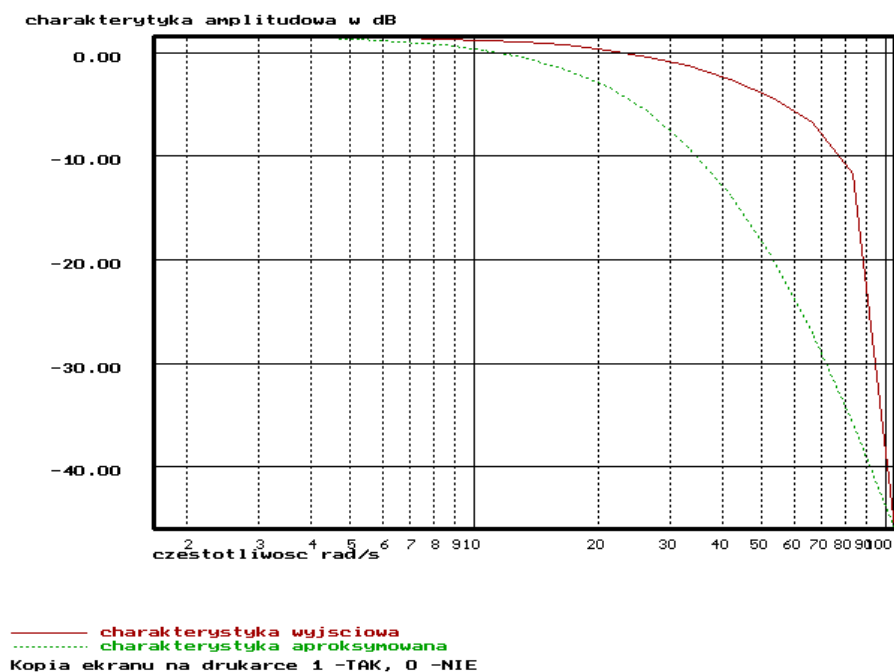
W przypadku odpowiedzi na skok jednostkowy posuwu wzdłużnego na ekranie pojawia się wykres zmian siły skrawania w czasie, modelu dokładnego i aproksymowanego, wartości dyskretne odpowiedzi (40 punktów) mogą być wydrukowane w postaci tabeli, można również wydrukować pełną informację o wprowadzonych danych oraz uzyskanych wynikach obliczeń różnych parametrów procesu skrawania. Program umożliwia wykonanie kopię ekranu graficznego z odpowiedzią na skok jednostkowy posuwu wzdłużnego.

W przypadku wybrania opcji obliczania charakterystyki częstotliwościowej amplitudowej i fazowej na ekranie pojawiają się wykresy charakterystyki amplitudowej i fazowej dla modelu dokładnego i aproksymowanego. Dyskretne wartości charakterystyk (20 punktów) można wydrukować w postaci tabeli. Charakterystyki częstotliwościowe są przedstawione w skali półlogarytmicznej i można również wydrukować kopię ekranu z charakterystyką amplitudową i fazową.

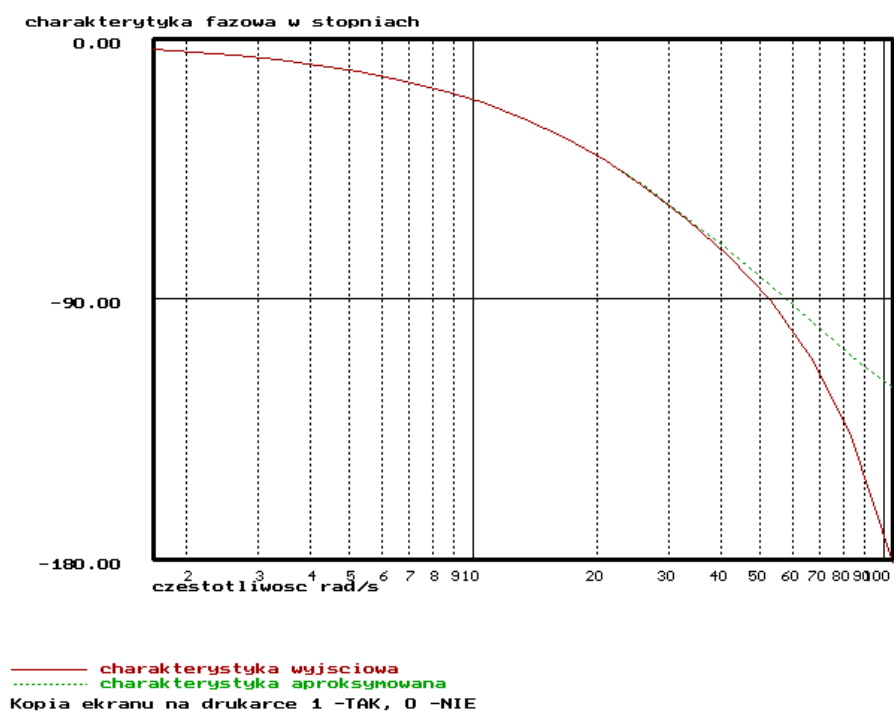
Poniżej przedstawiono przykładowe obliczenia wykonane za pomocą programu MATMOD 1. Na rys. (4.1), (4.2), (4.3), przedstawiono przykładowe wyniki badań numerycznych wykonanych w programie MATMOD 1 w postaci odpowiednich charakterystyk.



Rys. 4.1 Charakterystyka czasowa wyjściowa (dokładna) i aproksymowana



Rys. 4.2 Charakterystyka amplitudowo–częstotliwościowa



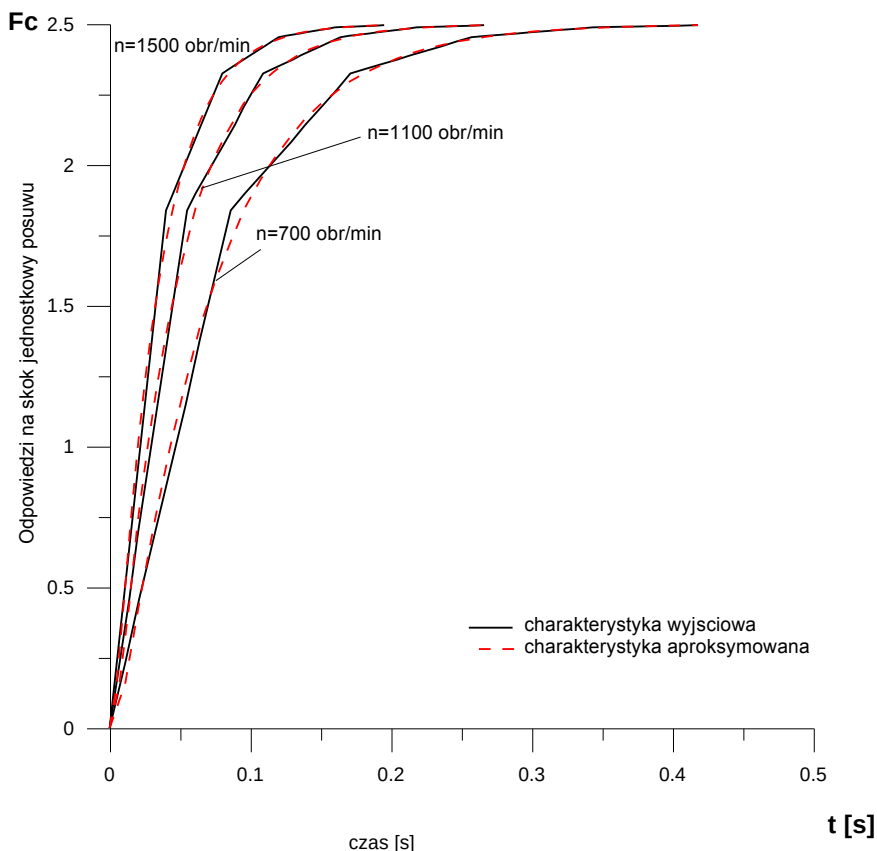
Rys. 4.3. Charakterystyka fazowo–częstotliwościowa

## 4.2. Badania symulacyjne układu dynamicznego procesu skrawania

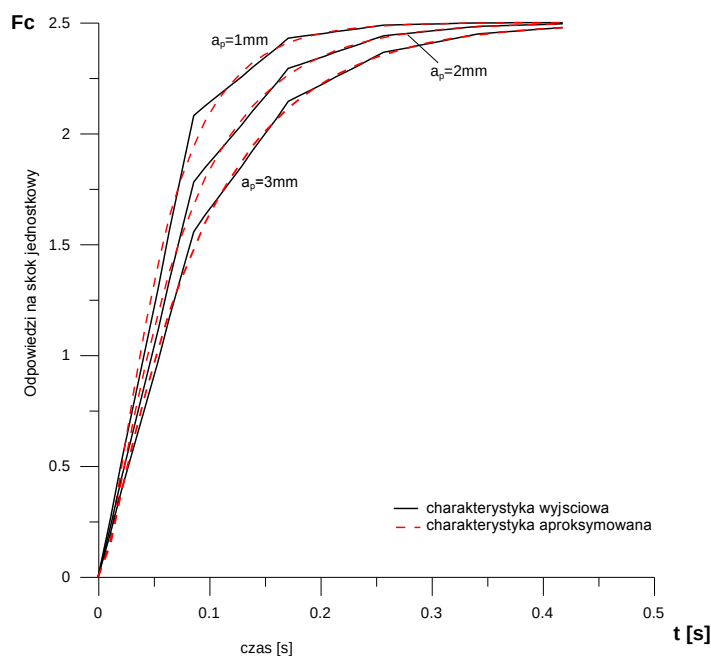
W celu zaobserwowania zmian w układzie dynamicznym obrabiarki przeprowadzono symulacje przebiegów charakterystyk czasowych i częstotliwościowych procesu skrawania przy zmianie wartości parametrów skrawania.

Do tego celu użyto wałka ze stali 45 o wymiarach  $l_p=280\text{mm}$ ,  $d_p=40\text{mm}$ . Zmieniane parametry wejściowe to: prędkość obrotowa  $n_p$ , która wynosiła kolejno  $n_p=700$ ; 1100; 1500 obr./min. prędkość posuwowa  $v_f=0,1$ ; 0,25; 0,5 mm/obr., głębokość skrawania  $a_p=1$ ; 2; 3 mm.

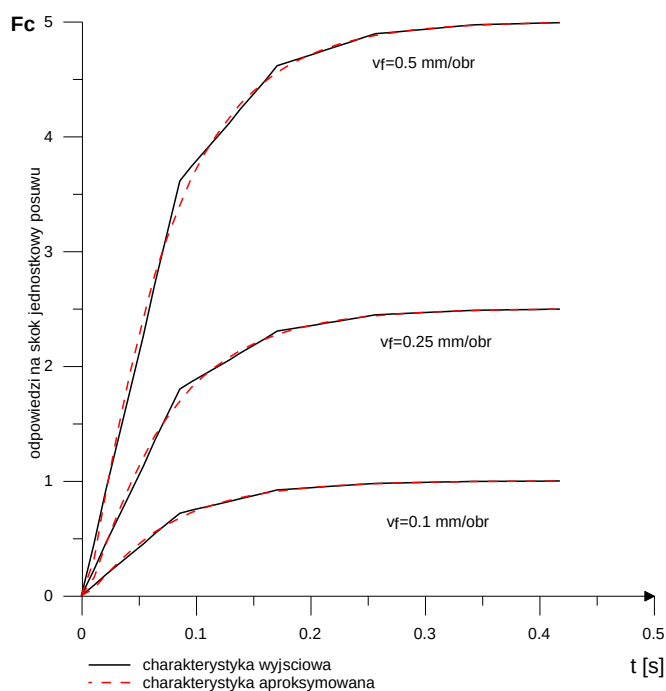
Na rys. 4.4–4.8 przedstawiono w postaci graficznej wyniki badań symulacyjnych procesu skrawania z wykorzystaniem programu MATMOD 1. Rysunki 4.4 – 4.6, przedstawiają odpowiedzi siły skrawania przy skokowych zmianach posuwu, przy różnych warunkach procesu skrawania. Rys. 4.7 – 4.8 przedstawiają odpowiednio charakterystyki fazowo–częstotliwościowe i amplitudowo–częstotliwościowe procesu skrawania.



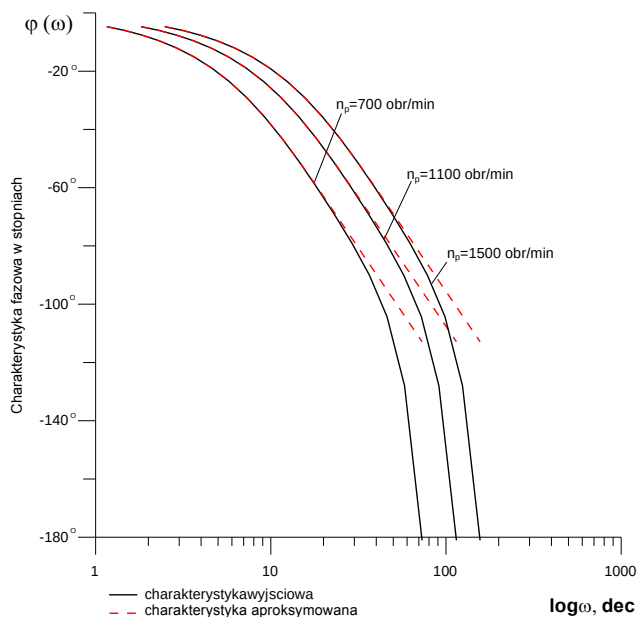
Rys. 4.4. Odpowiedzi siły skrawania na skok jednostkowy posuwu przy różnych prędkościach obrotowych



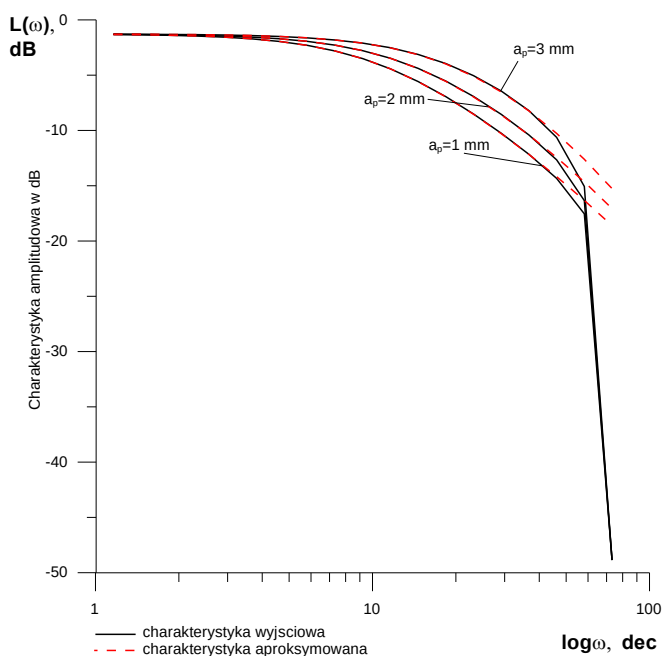
Rys. 4.5. Odpowiedzi siły skrawania na skok jednostkowy posuwu przy różnych grubościach warstwy skrawanej



Rys. 4.6. Odpowiedzi siły skrawania na skok jednostkowy posuwu przy różnych prędkościach skrawania



**Rys. 4.7. Charakterystyki fazowo–częstotliwościowe procesu skrawania przy różnych prędkościach obrotowych przedmiotu obrabianego**



**Rys. 4.8. Charakterystyki amplitudowo–częstotliwościowe procesu skrawania przy różnych grubościach warstwy skrawanej**

### 4.3. Analiza wyników symulacji

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można zauważyć, że:

- zmiana prędkości obrotowej wpływa na zmianę czasu ustalania się przebiegu przejściowego,
- zmiana grubości WS powoduje odpowiednio zmianę odpowiedzi na skok jednostkowy posuwu, ale w stałych odstępach czasu,
- zmiana prędkości posuwu wpływa na zmianę wartości sił skrawania w stanie ustalonym w odpowiedzi na skok jednostkowy posuwu,
- zmiany charakterystyk fazowych uwiadcniają się najbardziej podczas zmian prędkości obrotowej, natomiast przy zmianach prędkości posuwu i grubości WS różnice te nie są wielkie,
- zmiany charakterystyk amplitudowych można zaobserwować głównie w przypadku zmian grubości warstwy skrawanej.

W oparciu o wyniki badań eksperymentalnych procesu skrawania [44] oraz wyniki uzyskane w czasie badań symulacyjnych, przeprowadzonych przy takich parametrach procesu skrawania, jakie zastosowano w czasie badań eksperymentalnych, sporządzono tabelę porównawczą wyników eksperymentalnych i symulacyjnych (tabela 4.1). W kolumnie 1 zamieszczono kolejne numery eksperymentu przeprowadzonego na stanowisku badawczym wyposażonym w obrabiarkę, urządzenia pomiarowe oraz sprzęt komputerowy do rejestracji zmian parametrów w czasie eksperymentu. W kolejnych kolumnach 2 – 7 umieszczono parametry procesu skrawania w kolejnych eksperymentach. W kolumnie 8 podano stałe czasowe procesu, otrzymane w czasie eksperymentu, a kolumna 9 zawiera stałą czasową obliczoną przy użyciu opracowanego modelu matematycznego. W kolumnie 10 umieszczono błąd względny określenia stałej czasowej na podstawie modelu.

Eksperymentalne charakterystyki przejściowe aproksymowano następującym wyrażeniem:

$$F_c(t) = F_{c0}[1 - \exp(-t/T_{1e})],$$

gdzie:  $F_{c0}$  – ustalona wartość wielkości wyjściowej lub jej przyrostu,  $T_{1e}$  – zastępcza stała czasowa, określana na podstawie eksperymentalnego przebiegu przejściowego, jako czas, po którym wielkość wyjściowa lub jej przyrost osiągnie 0,63 wartości w stanie ustalonym.

Uzyskane eksperymentalnie wartości  $T_{1e}$  porównano z obliczonymi na podstawie modelu  $T_{1p}$ . Te ostatnie określono także jako czas, w którym obliczona charakterystyka przejściowa modelu, opisana przedstawionymi wyżej zależnościami, osiąga 0,63 wartości ustalonej.

**Tab. 4.1. Zestawienie parametrów skrawania oraz obliczonych i eksperymentalnych stałych czasowych**

| 1   | 2            | 3          | 4              | 5               | 6    | 7                 | 8                 | 9                 | 10           |
|-----|--------------|------------|----------------|-----------------|------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Nr  | $\tau$ , [s] | $\kappa_r$ | $v_c$<br>[m/s] | $a_p$ ,<br>[mm] | $a$  | $F_{c0}$ ,<br>[N] | $T_{1e}$ ,<br>[s] | $T_{1p}$ ,<br>[s] | $\delta$ , % |
| 1.  | 0.48         | 45         | 0.8            | 2.0             | 0.2  | 900               | 0.59              | 0.55              | 7            |
| 2.  | 0.48         | 45         | 0.8            | 3.0             | 0.2  | 1380              | 0.7               | 0.625             | 11           |
| 3.  | 0.375        | 45         | 0.85           | 1.0             | 0.2  | 480               | 0.3               | 0.3               | 0            |
| 4.  | 0.375        | 45         | 0.85           | 2.0             | 0.25 | 1140              | 0.46              | 0.43              | 7            |
| 5.  | 0.375        | 45         | 0.85           | 3.0             | 0.2  | 1400              | 0.55              | 0.48              | 13           |
| 6.  | 0.24         | 45         | 1.3            | 1.5             | 0.25 | 855               | 0.23              | 0.215             | 7            |
| 7.  | 0.24         | 45         | 1.3            | 2.0             | 0.25 | 1150              | 0.34              | 0.28              | 18           |
| 8.  | 0.24         | 45         | 1.3            | 3.0             | 0.2  | 1370              | 0.36              | 0.31              | 14           |
| 9.  | 0.12         | 45         | 1.6            | 1.5             | 0.2  | 730               | 0.12              | 0.13              | -8           |
| 10. | 0.12         | 45         | 1.6            | 3.0             | 0.2  | 1470              | 0.18              | 0.161             | 11           |
| 11. | 0.095        | 45         | 1.65           | 1.0             | 0.2  | 475               | 0.08              | 0.076             | 5            |
| 12. | 0.095        | 45         | 1.65           | 3.0             | 0.2  | 1475              | 0.15              | 0.13              | 13           |
| 13. | 0.095        | 45         | 1.65           | 5.0             | 0.1  | 1180              | 0.2               | 0.19              | 5            |
| 14. | 0.075        | 45         | 1.67           | 1.0             | 0.2  | 470               | 0.06              | 0.064             | -7           |
| 15. | 0.075        | 45         | 1.67           | 2.0             | 0.2  | 981               | 0.11              | 0.09              | 18           |
| 16. | 0.075        | 45         | 1.67           | 3.0             | 0.2  | 1430              | 0.12              | 0.105             | 5            |
| 17. | 0.048        | 45         | 1.69           | 1.0             | 0.2  | 390               | 0.04              | 0.04              | 0            |
| 18. | 0.048        | 45         | 1.69           | 3.0             | 0.2  | 795               | 0.072             | 0.065             | 10           |
| 19. | 0.48         | 90         | 0.9            | 1.0             | 0.25 | 610               | 0.3               | 0.38              | -26          |
| 20. | 0.48         | 90         | 0.9            | 2.0             | 0.25 | 1200              | 0.42              | 0.43              | -2           |
| 21. | 0.19         | 90         | 1.33           | 2.0             | 0.25 | 1100              | 0.18              | 0.17              | 6            |
| 22. | 0.19         | 90         | 1.33           | 5.0             | 0.1  | 1270              | 0.32              | 0.37              | -16          |
| 23. | 0.12         | 90         | 1.7            | 1.0             | 0.25 | 590               | 0.088             | 0.096             | -9           |
| 24. | 0.12         | 90         | 1.7            | 3.0             | 0.25 | 1770              | 0.16              | 0.14              | 12           |
| 25. | 0.095        | 90         | 1.65           | 1.0             | 0.25 | 580               | 0.07              | 0.076             | 7            |
| 26. | 0.095        | 90         | 1.65           | 5.0             | 0.1  | 1200              | 0.16              | 0.18              | 13           |

Na podstawie uzyskanych względnych wartości odchyłek  $\delta$  (w %) pomiędzy danymi eksperymentalnymi i pochodzącymi z symulacji wyznaczono wartość średnią, która wyniosła 9,61%. Dla tak małej wartości rozbieżności pomiędzy stałymi czasowymi modelu i wynikami eksperymentalnymi świadczą o dużej zgodności modelu z rzeczywistym przebiegiem procesu toczenia. Fakt ten można wykorzystać jako punkt wyjścia do dalszych prac idących w kierunku projektowania układów automatycznej regulacji.

## 5. Algorytmy sterowania adaptacyjnego układami dynamicznymi przy zakłóceniach deterministycznych

Rozpatrywane układy dynamiczne powinny w warunkach działania zakłóceń zapewnić wymaganą dokładność przestrzennego położenia organów wykonawczych, np. ostrza i przedmiotu obrabianego w przypadku obrabiarek. Odpowiednio, układy automatycznej regulacji członami dynamicznymi rozpatrywanej klasy zapewniają stabilizację wyjściowej zmiennej obiektu, którą w ogólnym przypadku jest wektor, charakteryzujący wzajemne odchylenie w przestrzeni organów wykonawczych układu dynamicznego. W dalszym ciągu w przypadku wyjściowej zmiennej obiektu stosuje się ogólne oznaczenie –  $x_0$ .

W układach sterowania odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego obrabiarki jako wielkość  $x_0$  przyjmuje się mierzalną odchyłkę wielkości części od danego wymiaru, albo przyrost odkształceń sprężystych układu dynamicznego w kierunku promieniowym, ponieważ ten ostatni określa głównie dokładność obróbki części.

W ogólnym przypadku celem sterowania jest zmniejszenie wartości  $x_0$ . W celu konkretnego rozwiązania zadania sterowania należy uwzględnić fakt, że warunki funkcjonowania rozpatrywanych układów dynamicznych charakteryzują się znaczną różnorodnością i mają szereg istotnych cech charakterystycznych, wpływających na wybór kryterium optymalizacji. Dlatego też aby uzasadnić wybór kryterium optymalizacji i metody syntezy układu sterowania adaptacyjnego celowe jest rozdzielić na oddzielne grupy rozpatrywane układy dynamiczne uwzględniając osobliwości ich funkcjonowania i działających na nie zakłóceń.

Do pierwszej grupy rozpatrywanych układów dynamicznych zalicza się układy dynamiczne obrabiarek, w których obserwuje się skokową zmianę zakłócenia. Taka postać zakłócenia jest charakterystyczna w przypadku tokarek i szlifierek, na których realizowana jest obróbka wałów stopniowych, tulei itp. Oprócz tego, skokowa zmiana zakłócenia powstaje na początku cyklu obróbki każdego przedmiotu lub realizacji przejścia technologicznego przy toczeniu i szlifowaniu, kiedy zachodzi wcinanie ostrza w półfabrykat. W związku z tym, można uważać, że rozważane układy dynamiczne są pod wpływem oddziaływań deterministycznych. Jest to najbardziej niekorzystna postać zakłócenia.

Do drugiej grupy rozpatrywanych układów dynamicznych zalicza się układy, poddane działaniu zakłóceń losowych o znanych rozkładach prawdopodobieństwa lub uzyskanych dzięki dodatkowym badaniom eksperymentalnym.

Istotnie różny charakter funkcjonowania obiektów wyróżnionych grup i działających na nie zakłóceń powoduje konieczność zastosowania metod optymalizacyjnych przy projektowaniu układów sterowania adaptacyjnego. W związku z tym, rozpatrzono zagadnienia syntezy układów sterowania adaptacyjnego obiektami pierwszej wyróżnionej grupy.



### 5.1. Modele matematyczne zakłóceń. Kryteria optymalizacji

Do pierwszej grupy obiektów sterowania, ze wskazanymi charakterystycznymi cechami, należy zaliczyć cykliczne systemy technologiczne, wyróżniające się tym, że charakterystyki zakłóceń o charakterze losowym, mogą zmieniać się znacznie w każdym cyklu pracy.

Charakterystycznymi przykładami układów dynamicznych tego typu są układy technologiczne tokarek i szlifierek, które wykorzystywane są w produkcji jednostkowej i małoseryjnej. W ich przypadku charakterystyczna jest częsta zmiana typu obrabianych przedmiotów, co utrudnia uzyskanie danych statystycznych o charakterystykach zakłóceń, działających na podobne układy dynamiczne. Innymi słowy, układy dynamiczne tej grupy pracują w warunkach zakłóceń niestacjonarnych, których charakterystyki statyczne nie są znane.

Oprócz tego, układy dynamiczne tego typu charakteryzują się "krótkim" okresem działania. Na tokarkach i szlifierekach czas realizacji procesu technologicznego może wynosić od kilku do dziesięciu sekund, co tylko o rząd lub dwa rzędy przewyższa czas procesów przejściowych w układach sterowania automatycznego. W związku z tym, można mówić o "krótkim" czasie działania rozpatrywanych układów dynamicznych.

"Krótki" okres działania układu nawet przy znanych charakterystykach statystycznych utrudnia zastosowanie w tych układach metod optymalizacji, opierających się np. na kryteriach średniokwadratowych i zakładających dostatecznie długi czas działania. Wspomniane warunki powodują potrzebę wprowadzenia syntezy tych układów z żądaniem zapewnienia założonych wymagań w zakresie dokładności w warunkach działania najbardziej niekorzystnych zakłóceń.

W dalszej części, układy dynamiczne pierwszej grupy nazwano układami dynamicznymi z deterministycznym modelem zakłóceń.

Należy uwzględnić, że odchyłka wielkości regulowanej  $x_0$  w układach dynamicznych obrabiarek precyzyjnych charakteryzuje odchyłkę wymiaru obrabianej części w przekroju wzdłużnym. Zmniejszenie wartości  $x_0$  prowadzi do proporcjonalnego zmniejszenia zakresu zmian wymiarów przedmiotów obrabianych spowodowanych zmianami odkształceń sprężystych. W obrabiarkach produkcyjnych stabilizacja sił skrawania, na poziomie granicznym lub związanych z nimi odkształceń sprężystych, pozwala na zwiększenie intensywności warunków technologicznych obróbki, tzn. na zwiększenie wydajności maszyn.

Przy obróbce przedmiotów na obrabiarkach nie wyposażonych w AC, warunki obróbki ustala się tak, aby w przypadku najbardziej niekorzystnym wartość odkształceń sprężystych układu dynamicznego nie przekroczyła dopuszczalnej wartości. W wyniku tego, maszyny przez znaczną część czasu działają w warunkach mniej intensywnych, co obniża efektywność ich wykorzystania.

Efektywność zastosowania sterowania adaptacyjnego odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego obrabiarki, z punktu widzenia możliwości zwiększenia wydajności procesów technologicznych toczenia, można ocenić

według stosunku czasu jednostkowego  $t_{j1}$  wykonania przedmiotu na obrabiarce nie wyposażonej w układ automatycznej regulacji do czasu jednostkowego  $t_{j2}$  obróbki przedmiotu z wykorzystaniem AC [11]:

$$\gamma_j = \frac{t_{j1}}{t_{j2}}. \quad (5.1)$$

Uwzględniając, że zarówno w pierwszym jak i w drugim przypadku, objętość materiału skrawanego w okresie trwałości ostrza, pozostaje stała, składową czasu jednostkowego  $t_n$  niezależną od warunków skrawania, można przyjąć jako stałą i zapisać w postaci:

$$t_{j1} = t_{g1} + t_n, \quad t_{j2} = t_{g2} + t_n, \quad (5.2)$$

gdzie:  $t_{g1}$  i  $t_{g2}$  - czasy główne pracy odpowiednio bez wykorzystania AC i z jego uwzględnieniem.

Mając na uwadze (5.2), zależność (5.1) przyjmuje postać:

$$\gamma_j = \frac{1 + K_n}{K_n + 1/\lambda_g}, \quad (5.3)$$

gdzie:

$$K_n = t_n / t_{g1}, \quad \lambda_g = t_{g1} / t_{g2}. \quad (5.4)$$

Wartość czasu głównego jest zależna od długości  $L_p$  obrabianego przedmiotu i prędkości posuwu wzdłużnego.

Zmiana naddatku na obróbkę w partii przedmiotów jest ograniczona przez wartość maksymalną  $b_{\max}$  i minimalną  $b_{\min}$ , a rozkład naddatku, jako ciągłej wielkości przypadkowej, jest zgodny z rozkładem równomiernym. Wtedy, w przypadku pracy bez AC wartość posuwu wzdłużnego powinna być wybrana tak, aby odkształcenia sprężyste przy obróbce przedmiotu z maksymalnym naddatkiem nie przekroczyły nałożonego ograniczenia, czyli:

$$g_y = x_0 < x_{\max} = g_{y\max}.$$

Biorąc pod uwagę, że wielkość odkształceń sprężystych jest zależna zgodnie z (3.8), (3.10) od warunków skrawania i charakterystyk układu MDS:

$$g_y = h_{yy} F_p = h_{yy} q \tau b_1 v_f,$$

wtedy prędkość posuwu wzdłużnego jest następująca:

$$v_{f1} = \frac{g_{y\max}}{h_{yy} q \tau b_1},$$

a czas główny obróbki bez układu sterowania adaptacyjnego wynosi:

$$t_{g1} = \frac{L_p}{v_{f1}} = \frac{L_p h_{yy} q \tau b_{\max}}{g_{y\max}}. \quad (5.5)$$

Średnią wartość prędkości posuwu przy pracy z AC określono na podstawie wartości oczekiwanej nadadtku na obróbkę i będzie mieć ona postać:

$$v_{f2} = \frac{g_{y\max}}{h_{yy} q \tau 0,5(b_{\max} + b_{\min})}.$$

Wobec tego, czas główny wyznacza się z zależności:

$$t_{g2} = \frac{L_p}{v_{f2}} = \frac{L_p h_{yy} q \tau 0,5(b_{\max} + b_{\min})}{g_{y\max}}. \quad (5.6)$$

Uwzględniając zależności (5.5) i (5.6), w rozpatrywanym przypadku:

$$\lambda_g = 1/0,5(1 + D_b),$$

gdzie:

$$D_b = \frac{b_{\min}}{b_{\max}}.$$

Z otrzymanych zależności wynika, że w przypadku przyjętego rozkładu nadadtku, w partii przedmiotów, wydajność procesu można zwiększyć maksymalnie dwa razy (gdy  $K_n \Rightarrow 0$ ,  $D_b \Rightarrow 0$ ). Efektywność zastosowania AC zmniejsza się przy zmniejszeniu zakresu  $D_b$  zmian nadadtku i zwiększaniu strat czasu na operacje pomocnicze.

Podobnie, można określić efektywność zastosowania sterowania adaptacyjnego z punktu widzenia podwyższenia wydajności, przy innych rozkładach nadadtku w funkcji długości przedmiotu lub w ich partii.

Przedstawione wywody są słuszne dla idealizowanego układu sterowania adaptacyjnego, zapewniającego stabilizację odkształceń sprężystych, z zerowym błędem w stanie ustalonym i w procesach przejściowych. Możliwe statyczne i dynamiczne błędy czynią koniecznym przyjmowanie obniżonych wartości odkształceń sprężystych, tak aby w najgorszym przypadku wartość rzeczywista odkształceń sprężystych nie była większa od wartości dopuszczalnej:

$$g_y = x_0 < g_{y\max} - \Delta g_m - \Delta g_{st},$$

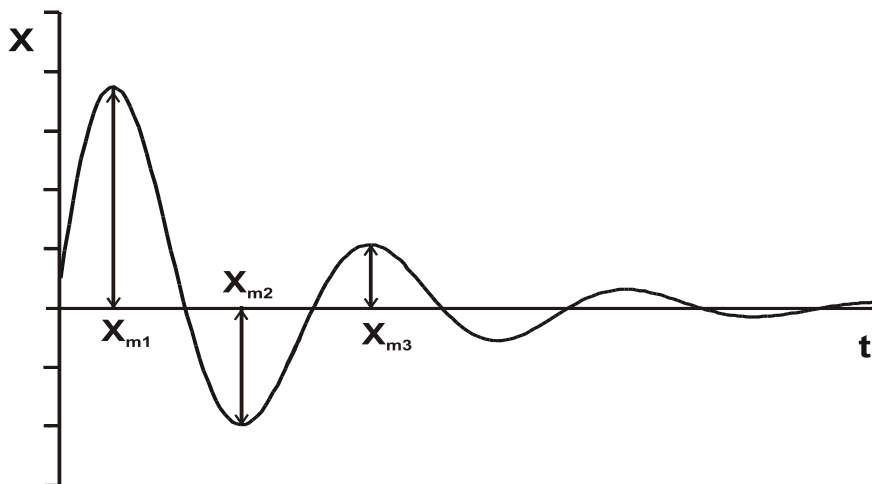
gdzie:  $\Delta g_{st}$  – uchyb statyczny regulacji,  $\Delta g_m$  – maksymalna odchyłka wielkości regulowanej w najbardziej niekorzystnym procesie przejściowym.

Sprowadzenie do zera uchybu statycznego regulacji nie przedstawia problemów technicznych i dlatego, przy formułowaniu kryterium optymalizacji, w przypadku sterowania układem dynamicznym obrabiarki w warunkach działania zakłóceń deterministycznych, a także przy braku pewnej informacji o postaci zakłóceń, należy przede wszystkim brać pod uwagę wielkość maksymalnej odchyłki dynamicznej wielkości stabilizowanej, w najbardziej niekorzystnych warunkach. Charakterystyczną w układach dynamicznych tokarek jest skokowa zmiana nadadtku na obróbkę, powodująca odpowiednie zmiany odkształceń sprężystych UD i powstawanie błędów kształtu części.

Statyczne i dynamiczne błędy w stabilizacji odkształceń sprężystych układów dynamicznych powodują nie tylko obniżenie wydajności lecz także bezpośrednio wpływają na dokładność obróbki części. W szczególności, przy procesie przejściowym, spowodowanym zakłóceniem (rys. 5.1), krzywa odchyłki odkształceń sprężystych w kierunku promieniowym jest "kopiowana" na powierzchni przedmiotu. Zmiana odkształceń sprężystych prowadzi do błędów kształtu przedmiotu. Na jego powierzchni obserwuje się wypukłości i wgłębienia, odwzorowujące krzywą procesu przejściowego.

Ekstremalne wartości odchyłek sprężystych i wymiarów przedmiotu zależą także od takich istotnych wskaźników powierzchni obrobionej jak chropowatość i falistość. Z pozycji technologicznych, równocześnie, z maksymalną i minimalną odchyłką średnicy części, proporcjonalnymi do wartości ekstremalnych  $x_{mi}$  krzywej procesu przejściowego, ważnym wskaźnikiem jest wielkość opisana scałkowaną odchyłką kształtu części od wymaganego, przy której zależność można zapisać w postaci:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x_0(t)| dt \text{ lub } \int_{-\infty}^{+\infty} x_0^2(t) dt. \quad (5.7)$$



**Rys. 5.1. Charakterystyka przejściowa procesu przy zakłóceniu**

Konieczność uwzględnienia w kryterium optymalizacji funkcji typu (5.7) uzasadnia się następująco. W przypadku obróbki wielozabiegowej błąd kształtu przedmiotu, powstający w czasie bieżącego cyklu, powinien być zmniejszony w czasie kolejnego cyklu. Przy czym, w kolejnym cyklu istniejący błąd będzie działał na układ jako zakłócenie, a wielkość tego zakłócenia określa wartość wskaźnika całkowego typu (5.7). Jeśli rozpatrywany cykl obróbki jest końcowy, to całkowita wartość odchyłki błędu kształtu przedmiotu od wymaganego w znacznym stopniu jest charakterystyką określającą jej niezawodność

eksploatacyjną. Oznacza to, że błędy kształtu w miejscach połączenia części ruchomych, obniżają ich własności eksploatacyjne oraz niezawodność maszyn i mechanizmów, w których części te są wykorzystywane. W związku z tym przy sterowaniu UD, rozpatrywanej grupy w charakterze uogólnionego kryterium optymalizacji, celowe jest rozpatrywać funkcjonal w postaci [53, 92, 102]:

$$J_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} x_0^2(t)dt + \sum_{i=1}^n |x_{mi}|. \quad (5.8)$$

W ten sposób, układy dynamiczne pierwszej grupy charakteryzują się tym, że w ich przypadku jest znana najbardziej niekorzystna postać zakłóceń. Brak pewnej informacji o charakterystykach zakłóceń wymusza przyjęcie, przy projektowaniu, w charakterze modelu zakłócenia, najbardziej niekorzystnego oddziaływania. W charakterze kryterium optymalizacji w rozpatrywanych układach dynamicznych należy przyjąć uogólniony funkcjonal w postaci (5.8), uwzględniający ekstremalne i całkowite wartości odchyłki wielkości regulowanej, charakteryzujące odchyłkę kształtu przedmiotu od idealnego żadanego, przy zakłóceniu skokowym.

## 5.2. Koncepcja budowy układu sterowania adaptacyjnego dla układu dynamicznego obrabiarki. Uzasadnienie wstępnego doboru układu sterowania adaptacyjnego

Przy sterowaniu układem dynamicznym obrabiarki w obwodzie prędkości posuwu wzdłużnego, parametry obiektu mogą zmieniać się w szerokich granicach, co warunkuje konieczność zastosowania sterowania adaptacyjnego. Zagadnienia syntezy sterowania adaptacyjnego układami dynamicznymi rozpatruje się przy sterowaniu odkształceniami sprężystymi tychże układów w obwodzie prędkości posuwu wzdłużnego. Otrzymane przy tym wyniki, dzięki analogii modeli matematycznych mogą być rozszerzone na przypadek sterownia układem dynamicznym w obwodzie prędkości obrotowej wrzeciona, a także na układy z wielkościami wyjściowymi w postaci składowych sił skrawania.

Model matematyczny obiektu sterowania, w przypadku kiedy jako wielkość wyjściową przyjmuje się składowe  $g_i$  odkształceń sprężystych, a jako wejściową – prędkość posuwu wzdłużnego  $v_f$ , może być w praktycznie uzasadnionych przypadkach reprezentowana przez transmitancję operatorową (3.24) członu aperiodycznego drugiego rzędu, czyli:

$$G_o(s) = \frac{\Delta g_i(s)}{\Delta v_f(s)} = \frac{K_o}{(T_{o1}s+1)(T_{o2}s+1)}.$$

Współczynnik wzmocnienia  $K_o$  i stałe czasowe  $T_o$  obiektu, w transmitancji operatorowej (3.24), oblicza się z zależności (3.11), (3.19), (3.20) i jest zależna od prędkości obrotowej przedmiotu  $n_p$ , współczynników wzmocnień  $m_i$ ,  $n_i$  procesu skrawania, a także od współczynników wzmocnień  $h_{ij}$  układu MDS w przypadku poszczególnych współrzędnych.

W związku ze zmianami parametrów obiektu sterowania, w celu osiągnięcia wysokiej jakości sterowania, konieczne jest zapewnienie przestrojenia parametrów układu sterowania automatycznego.

Przestrojenie może być wykonane za pomocą zmiany współczynników wzmocnienia regulatora w układzie sterowania. Taka techniczna realizacja sterowania adaptacyjnego układem dynamicznym obrabiarki konwencjonalnej jest uzasadniona w warunkach produkcji wielkoseryjnej, kiedy konieczność przestrojenia występuje bardzo rzadko.

W warunkach produkcji małoseryjnej, z częstą zmianą typu obrabianych przedmiotów, konieczne jest strojenie automatyczne układu.

Z powodu krótkiego okresu działania obrabiarki i dużej szybkości zmian parametrów obiektu, współmierną z szybkością zmian jego współrzędnych, wydaje się celowe przeanalizowanie możliwości wykorzystania układów samonastrajających się zapewniających szybszą adaptację.

Z punktu widzenia realizacji technicznej, wiele zalet [43,79] spośród innych klas analitycznych samonastrajających się układów, mają układy z modelem wzorcowym, które zostały dostatecznie przebadane teoretycznie. W pracy [3] przedstawiono wyniki eksperymentalnego badania sterowania adaptacyjnego z modelem w zastosowaniu do układu dynamicznego tokarki. Nie należy traktować je jako zachęcające, bowiem przy krótkim czasie cyklu działania sterowania adaptacyjnego, czas trwania procesów przejściowych w obwodzie adaptacji, jest współmierny z czasem cyklu. Odpowiednio, jakość regulacji w obwodzie podstawowym w wielu przypadkach okazuje się być niezadowalająca. Bardziej celowe, w przypadku znajdujących się w eksploatacji obrabiarek konwencjonalnych, jest wykorzystanie zasady wieloobwodowej struktury układu sterowania adaptacyjnego (AC), przedstawionej w [47] i zapewniającej dostatecznie małą wrażliwość układu na zmiany parametrów obiektu.

Drugim sposobem osiągnięcia poprawności układu sterowania adaptacyjnego, w rozpatrywanych warunkach, jest wykorzystanie w niej nieliniowych elementów, zapewniających częściową kompensację zmian współczynników wzmocnienia obiektu. Wyniki badania eksperymentalnego takiego układu przedstawiono niżej.

Układy dynamiczne obrabiarek, jako obiekty sterowania, mają cały ciąg specyficznych cech, powodujących celowość wykorzystania w ich budowie nietradycyjnych sposobów.

Cechy te są następujące:

- 1) Obiekt sterowania charakteryzuje się krótkim okresem działania, co stwarza trudne do zrealizowania wymagania dotyczące szybkości procesów adaptacji w obwodzie adaptacji: częściowo problemy te mogą być rozwiązane dzięki "zapamiętaniu" zestrojonych parametrów AC, otrzymanych w poprzednim cyklu działania, jednakże takie rozwiązanie jest nieefektywne przy częstej zmianie typu obrabianych przedmiotów.

- 2) Parametry obiektu zmieniają się w szerokim zakresie tylko w przypadku pracy obrabiarki w całym zakresie technologicznym; przy realizacji cyklu obróbki przedmiotu zmiany parametrów nie są większe od 20 do 30%.
- 3) W kartach technologicznych obróbki przedmiotu zawarta jest niezbędna informacja, na podstawie której w układzie CNC lub w układzie mikroprocesorowym mogą być obliczone spodziewane wartości parametrów obiektu i obliczone odpowiednio wymagane parametry regulatorów.

Zdefiniowanie cech obiektu a także, w oparciu o opracowany model matematyczny, możliwości analitycznego obliczania parametrów obiektu sterowania, na podstawie informacji technologicznej, pozwoliły przedstawić koncepcję zastosowania sterowania adaptacyjnego układem dynamicznym obrabiarki, przed rozpoczęciem cyklu obróbki. Polega ona na strojeniu parametrów AC z uwzględnieniem informacji technologicznej dostępnej przed wykonaniem cyklu obróbki przedmiotu.

Największy wpływ na zmiany parametrów obiektu sterowania ma zmiana prędkości obrotowej części i związana z tym zmiana czasu  $\tau$ . Dlatego strojenie parametrów układu sterowania adaptacyjnego należy przede wszystkim realizować w funkcji wartości  $\tau$ . Celowe jest także wykorzystywanie przy strojeniu parametrów układu informacje o średniej oczekiwanej wartości posuwu i nadadtku na obróbkę oraz sztywności układu dynamicznego. W oparciu o tę informację, w układzie CNC lub układzie mikroprocesorowym można, zgodnie z zależnościami (3.11), (3.19), (3.20), obliczyć średnie wartości oczekiwane współczynnika wzmocnienia  $K_o$  i stałych czasowych  $T_o$  obiektu sterowania. Przy tym, informację o oczekiwanych parametrach obiektu sterowania można wprowadzić do układu przed rozpoczęciem skrawania. Dzięki temu procesy przejściowe, związane z przestrajaniem AC nie mają szkodliwego wpływu na pracę układu w czasie procesu skrawania. Taka adaptacja programowa parametrów AC, na etapie strojenia przed rozpoczęciem skrawania, pozwala za pomocą dostatecznie prostych środków technicznych uzyskać własność odporności układu, czyli wg innej terminologii "krzepkości" [20, 96], i zapewnić akceptowalną jakość sterowania, w warunkach zmienności parametrów obiektu. Dodatkowymi czynnikami utrudniającym syntezę AC układem dynamicznym obrabiarki, są przeciwstawne wymagania dotyczące ich właściwości dynamicznych.

Z jednej strony po to, aby układ efektywnie tłumił zakłócenia w postaci gwałtownych zmian nadadtku wzdłuż osi przedmiotu, pasmo przenoszenia układu względem wielkości sterującej powinno być dostatecznie szerokie. Równocześnie pasmo przenoszenia należy ograniczyć tak, aby układ sterowania adaptacyjnego był mało wrażliwy na zakłócenia okresowe, związane z dokładnością kształtu części w przekroju poprzecznym [34, 56, 77].

To ostatnie wymaganie rozpatrzono bardziej szczegółowo. Obrabiany przedmiot ma mimośrodowość i w czasie jego obrotu nadadek na obróbkę (tutaj i dalej mamy na uwadze przyrosty zmiennych) zmienia się harmonicznym z amplitudą  $b_m$  i częstotliwością kątową  $\omega_p$

$$\Delta b(t) = b_m \sin \omega_p t, \quad \omega_p = \frac{2\pi p}{60} = \frac{2\pi}{\tau}. \quad (5.9)$$

Wykorzystując linearyzowany model procesu skrawania (3.5), w przypadku składowych siły skrawania można zapisać:

$$\Delta F_i(t) = m_i \Delta a(t) + n_i \Delta b(t). \quad (5.10)$$

W hipotetycznym, zamkniętym układzie UAS z nieskończonym pasmem przenoszenia, przyrost siły skrawania i spowodowane nim odkształcenie sprężyste będzie całkowicie kompensowane oddziaływaniem sprzężenia zwrotnego czyli gdy:  $\Delta F_i(t) = 0$ . Zależność zmiany grubości warstwy skrawanej będzie mieć natomiast postać:

$$\Delta a(t) = -\frac{n_i}{m_i} b_m \sin \omega_p t = a_m \sin(\omega_p t - \pi), \quad a_m = \frac{n_i}{m_i} b_m. \quad (5.11)$$

Przyrost grubości warstwy skrawanej określa się według (3.17), przyrostem położenia krawędzi skrawającej ostrza wzdłuż osi przedmiotu, w bieżącej chwili czasu  $\Delta x(t)$  i w chwili poprzedniego obrotu części  $\Delta x(t - \tau)$ :

$$\Delta a(t) = \Delta x(t) - \Delta x(t - \tau). \quad (5.12)$$

W czasie poprzedniego obrotu części przyrost współrzędnej  $\Delta x(t - \tau)$  opisuje funkcja harmoniczna o amplitudzie  $x_1$ :

$$\Delta x(t - \tau) = x_1 \sin(\omega_p t - \pi). \quad (5.13)$$

Wtedy, w czasie bieżącego obrotu przyrost współrzędnej  $\Delta x(t)$ , z uwzględnieniem (5.11) do (5.13), będzie opisany zależnością:

$$\Delta x(t) = \Delta a(t) + \Delta x(t - \tau) = (a_m + x_1) \sin(\omega_p t - \pi). \quad (5.14)$$

Następnie, w czasie bieżącego obrotu współrzędna  $\Delta x(t)$  będzie zmieniać się zgodnie z funkcją harmoniczną o amplitudzie równej  $(a_m + x_1)$ . Kontynuując analizę w przypadku kolejnych obrotów przedmiotu, można się przekonać, że w każdym obrocie amplituda zmiany współrzędnej  $x(t)$  otrzymuje dodatkowy przyrost, tzn. z powodu narastania amplitudy zakłócenia zwiększa się również amplituda wielkości sterującej. Przedstawione uzasadnienie jest także słuszne w układach rzeczywistych z dostatecznie szerokim pasmem przenoszenia.

Aby wykluczyć występowanie podobnych procesów, konieczne jest ograniczenie pasma przenoszenia w taki sposób, aby układ sterowania adaptacyjnego był niewrażliwy na oddziaływania periodyczne, z częstotliwościami równymi i większymi od pierwszej wartości "krytycznej"



$\omega_k = \frac{2\pi}{\tau}$ . Przy tym, w celu osiągnięcia możliwie efektywnych charakterystyk dynamicznych, należy przestrajać pasmo przenoszenia układu w funkcji wartości  $n_p$ , zmieniającej się w szerokim zakresie.

W trakcie syntezy powstaje zagadnienie wyboru pewnego wyjściowego zestrojenia AC, który może być wykonany w procesie adaptacji przed rozpoczęciem cyklu obróbki. Wiadomo [39, 75, 76], że w klasie układów liniowych, przy ograniczeniach na pasmo przenoszenia układów, optymalne sterowanie uzyskuje się dzięki zastosowaniu szeroko wykorzystywanych typowych strojeń w sterowaniu modalnym. Takie strojenie osiąga się dzięki uzyskaniu wymaganego położenia pierwiastków wielomianu układu zamkniętego a także poprzez parametry mianownika transmitancji operatorowej, przy założeniu równości jedności wielomianu licznika.

Standardowe zależności wielomianu  $A(s)$  mianownika, przy różnych typowych strojeniach układów drugiego rzędu, mogą być przedstawione w postaci [51]:

Postać podstawowa

$$A(s) = T^2s + 2Ts + 1.$$

Postać Butterworth'a

$$A(s) = T^2s + 1,4Ts + 1.$$

Postać odpowiadająca minimum całki

$$\int_0^{\infty} (1 - x_0(t))^2 dt, \quad (5.15)$$

$$A(s) = T^2s + Ts + 1.$$

Postać minimum całki, pokrywająca się z postacią Butterworth'a

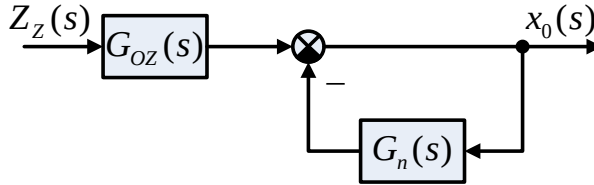
$$\int_0^{\infty} t |1 - x_0(t)| dt \quad (5.16)$$

W przedstawionych zależnościach stała czasowa  $T$  może być traktowana jako "mała" stała, ograniczająca pasmo przenoszenia układu. Całka przy standardowej postaci pozwala optymalizować proces przejściowy przy wielkości sterującej, przy czym w rozpatrywanych układach najważniejsza jest jakość sterowania przy oddziaływaniu zakłóceń. W dalszym ciągu porównano wskaźniki jakości w układach ze standardowymi nastawami przy działaniu zakłóceń.

Na podstawie przedstawionych powyżej zależności nie jest trudno wyznaczyć odpowiadające im TO  $G_n(s)$  układu otwartego, przyjmując TO obiektu zakłóceń w postaci członu aperiodycznego:

$$G_{oz}(s) = \frac{1}{T_{oz}s + 1},$$

z uwzględnieniem schematu strukturalnego układu (rys. 5.2), a także otrzymać zależności TO układu otwartego  $G_n(s)$  i zamkniętego  $G_{zz}(s)$ .



Rys. 5.2. Schemat strukturalny układu

1. Postać podstawowa

$$G_n(s) = \frac{1}{2Ts \left( \frac{T}{2}s + 1 \right)},$$

$$G_{zz}(s) = \frac{x_0(s)}{Z_z(s)} = \frac{2Ts \left( \frac{T}{2}s + 1 \right)}{(T^2s + 2Ts + 1)(T_{oz}s + 1)}.$$

2. Postać Butterworth'a

$$G_n(s) = \frac{1}{1,41Ts \left( \frac{T}{1,41}s + 1 \right)}, \quad (5.17)$$

$$G_{zz}(s) = \frac{x_0(s)}{Z_z(s)} = \frac{1,41Ts \left( \frac{T}{1,41}s + 1 \right)}{(T^2s + 1,41Ts + 1)(T_{oz}s + 1)}.$$

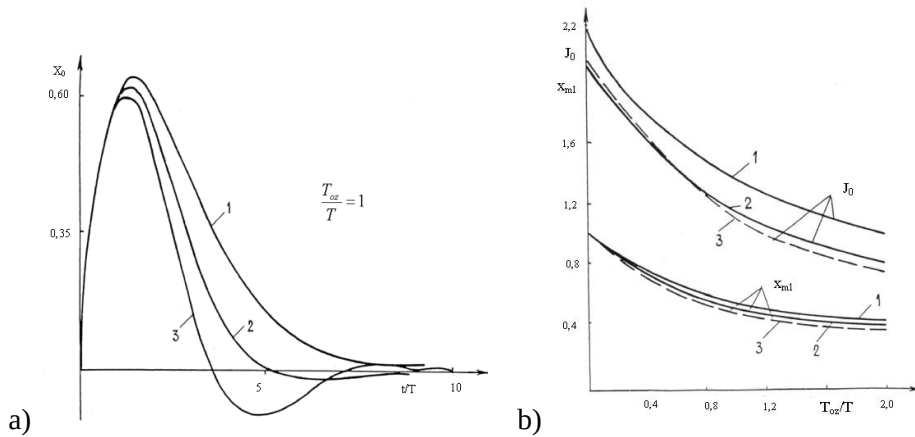
3. Postać odpowiadająca minimum całki (5.15)

$$G_n(s) = \frac{1}{Ts(Ts + 1)},$$

$$G_{zz}(s) = \frac{x_0(s)}{Z_z(s)} = \frac{Ts(Ts + 1)}{(T^2s + Ts + 1)(T_{oz}s + 1)}.$$

Na podstawie przedstawionych zależności, z wykorzystaniem przekształcenia Laplace'a, otrzymano zależności analityczne transmitancji operatorowych układów, przy różnych standardowych strojeniach. Numerycznie wyznaczono krzywe procesów przejściowych przy różnych wartościach stałej względnej  $T^* = \frac{T_{oz}}{T}$  obiektu przy zakłóceniu i obliczono wskaźniki jakości. Przykładowo, na rys. 5.3a

przedstawiono funkcję przejścia, gdy  $T^* = 1$ , numery krzywych na rys. 5.3a odpowiadają numerom strojów. Na rys. 5.3b przedstawiono zależności wartości przyjętego kryterium optymalizacji  $J_0$  i pierwszej maksymalnej odchyłki  $x_{m1}$ , w funkcji względnej stałej czasowej obiektu  $\frac{T_{oz}}{T}$  w przypadku zakłócenia jednostkowego, numery krzywych odpowiadają numerom strojów.



**Rys. 5.3. Charakterystyki przejściowe i wskaźniki jakości sterowania typowych nastaw**

Na podstawie analizy otrzymanych wyników można sformułować następujące wnioski.

Strojenia 3 zapewniają minimalną wartość pierwszego pikę  $x_{m1}$  na krzywej procesu przejściowego, jednak przy małych wartościach  $T^*$ , krzywa ma znaczne odchylenie  $x_{m2}$ ; strojenia 1 dają największą wartość  $x_{m1}$ , przy tym  $x_{m2} = 0$ , wskaźniki jakości 2 przyjmują wartości pośrednie.

Wartości przyjętego kryterium (5.8) zależą od względnej stałej czasowej  $T^*$ , przy  $T^* < 0,75$  lepsze wskaźniki jakości zapewniają strojenia 2, przy dużych wartościach  $T^*$  - strojenia 3. Różnice wartości kryterium  $J_0$  dla stosowanych strojów 2 i 3, w zakresie  $0,1 < T^* < 2,0$  nie przekraczają 13%.

Uwzględniając mniejsze oscylacje charakterystyki przejściowej, w przypadku wykorzystywania formy Butterworth'a, wybrane strojenia przyjęto dalej w charakterze - wyjściowych.

### 5.3. Warianty strojeń adaptacyjnego sterowania układem dynamicznym obrabiarki

Na podstawie przedstawionych w rozdz. 5.2 rozważań, dla każdej ustalonej prędkości obrotowej wrzeczona układ powinien być strojony w ten sposób, aby otrzymać rozkład pierwiastków mianownika w postaci Butterworth'a. Takie strojenie nazywano dalej strojeniem na optimum modułowe lub techniczne. Odpowiada mu TO układu otwartego strojenia wyjściowego wg zależności (5.17), którą wygodnie jest przedstawić w postaci:

$$G_{nB}(s) = \frac{1}{2T_{ek}(T_{ek}s + 1)}, \quad (5.18)$$

gdzie: ekwiwalentna stała czasowa  $T_{ek} = 1.41T$ .

W zależności od poziomu ograniczenia pasma przepuszczania sterowania adaptacyjnego i liczby strojonych parametrów, można wyróżnić pewną liczbę wariantów strojenia [12].

#### 5.3.1. Strojenie AC wg wariantu 1

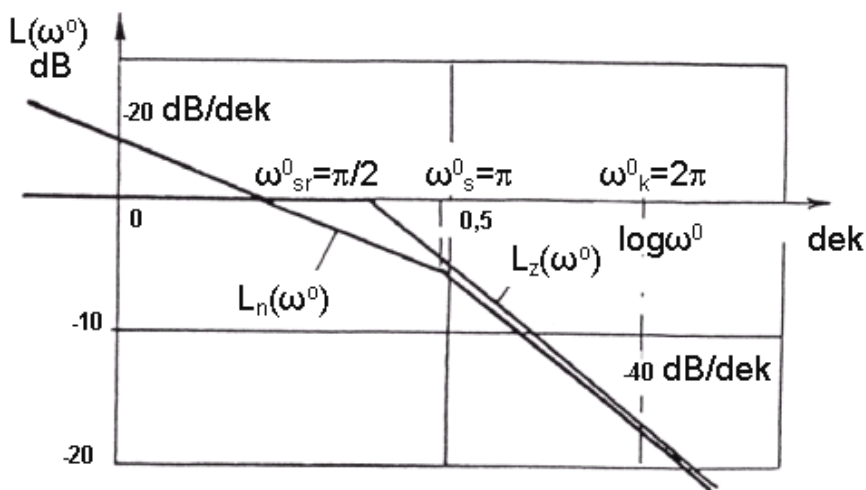
Logarytmiczną amplitudowo-fazową charakterystykę układu, nastrojonego na optimum modułowe  $L_n(\omega^0)$  pokazano na rys. 5.4. Zaleca się przyjęcie stałej czasowej układu  $T_{ek} = \tau/\pi$ . W tym przypadku przy częstotliwości „krytycznej”  $\omega_k$ , wartości współrzędnych LACH układu otwartego  $L_n(\omega^0)$  i zamkniętego względem wielkości sterującej  $L_z(\omega^0)$  wynoszą około -20 dB, co świadczy o małej wrażliwości zamkniętego układu sterowania adaptacyjnego na periodyczne oddziaływania o częstotliwości  $\omega_k$ .

Otrzymywane wyniki badań w dalszej analizie wykorzystano względne wartości stałych czasowych i częstotliwości. Jako wyjściowe wartości przyjęto czas opóźnienia  $\tau$ . Stała czasowa układu wynosi:

$$T_{ek}^0 = T_{ek} / \tau = 1/\pi, \quad (5.19)$$

a częstotliwość sprzężona  $\omega_s^0$ , cięcia  $\omega_{sr}^0$  i wartość krytyczna częstotliwości  $\omega_k^0$  (rys. 5.4) są odpowiednio równe:

$$\omega_s^0 = \frac{1}{T_{ek}^0} = \pi; \quad \omega_{sr}^0 = \frac{1}{2T_{ek}^0} = \frac{\pi}{2}; \quad \omega_k^0 = 2\pi.$$



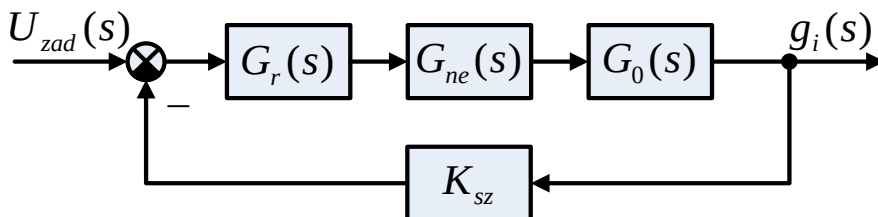
Rys. 5.4. Charakterystyki częstotliwościowe AC strojów wyjściowych

Po przejściu do wartości bezwymiarowych zależność (5.18) opisująca transmitancję operatorową układu przyjmuje postać:

$$G_{nB}(s) = \frac{1}{\frac{2}{\pi} s \left( \frac{1}{\pi} s + 1 \right)}. \quad (5.20)$$

Schemat strukturalny rozpatrywanego układu sterowania adaptacyjnego przedstawiono na rys. 5.5. Schemat ten, razem z obiektem sterowania, zawiera regulator z TO  $G_r(s)$ , którego strukturę i parametry należy określić. Należy także określić człon w obwodzie sprzężenia zwrotnego ze współczynnikiem wzmocnienia  $K_{sz}$  oraz napęd posuwu wzdłużnego, którego własności dynamiczne można przedstawić w postaci członu aperiodycznego ze współczynnikiem wzmocnienia  $K_{ne}$  i stałą czasową  $T_{ne}$  jako:

$$G_{ne}(s) = \frac{K_{ne}}{T_{ne}s + 1}.$$



Rys. 5.5. Schemat strukturalny AC

Następnie, dokonano syntezy regulatora, zaniedbując mniejszą stałą czasową  $T_{o2}$ . Przyrównując zależność TO układu otwartego, przedstawionego na rys. 5.5 do TO (5.18), po przekształceniach otrzymano transmitancję operatorową regulatora:

$$G_{r1}(s) = \frac{(T_{F1}^o s + 1)(T_{F2}^o s + 1)}{T_{cal}^o s (T_{ek}^o s + 1)}. \quad (5.21)$$

W zależności (5.21) stałe czasowe  $T_{F1}^o$  i  $T_{F2}^o$  oraz stała całkowania  $T_{cal}^o$  powinny być równe odpowiednio:

$$T_{F1}^o = T_{oln}^o; T_{F2}^o = T_{ne}^o; T_{cal}^o = \frac{2}{\pi} K_{ne} K_{or} K_{sz}. \quad (5.22)$$

$T_{oln}^o$  i  $K_{or}$  są to średnie wartości większej stałej i współczynnika wzmocnienia obiektu sterowania, przyjmowane przy obliczaniu parametrów regulatora. Regulator z TO (5.21) można zrealizować programowo lub sprzętowo w postaci typowego członu proporcjonalno-całkująco-różniczkującego i członu aperiodycznego.

Rzeczywiste wartości parametrów regulatora oblicza się z zależności:

$$T_{F1} = T_{F1}^o \tau; T_{F2} = T_{ne}^o; T_{cal} = T_{cal}^o \tau; T_{ek} = T_{ek}^o \tau.$$

Stałe  $T_{ek}$ ,  $T_{cal}$ ,  $T_{F1}$  regulatora są parametrami strojonymi wg informacji technologicznej z uwzględnieniem zależności (3.11), (3.19), (3.20) przy określonych: współczynnika wzmocnienia i stałych czasowych obiektu. W szczególności, jak wynika z wymienionych zależności, stała czasowa przetwornika całkującego i stała czasowa członu forsującego mnożącego, są przestrajane z uwzględnieniem parametrów procesu skrawania (współczynników wzmocnienia procesu skrawania, zależnych od głębokości skrawania, posuwu, fizyko-mechanicznych własności obrabianych przedmiotów i prędkości obrotowej wrzeciona) oraz zastępczych podatności układu MDS, stałą czasową członu aperiodycznego przestrajają się w funkcji prędkości obrotowej wrzeciona.

Przy wykorzystywaniu jako napędu posuwu nowoczesnych napędów regulowanych, z szerokim pasmem przenoszenia częstotliwość sprzężona, zależna od stałej czasowej  $T_{ne}$ , leży w obszarze pomijalnych częstotliwości układu, co pozwala usunąć z transmitancji operatorowej regulatora (5.21) człon forsujący ze stałą  $T_{F2}^o = T_{ne}^o$  i uprościć jego strukturę.

W wyniku wprowadzenia zaprojektowanego regulatora TO otwartego układu, z uwzględnieniem mniejszej stałej czasowej  $T_{o2}$ , obiektu przyjmuje postać:

$$G_{n1}(s) = \frac{(T_{F1}^o s + 1)}{\frac{2}{\pi} s \left( \frac{1}{\pi} s + 1 \right) (T_{ol}^o s + 1) (T_{o2}^o s + 1)}. \quad (5.23)$$

W szczególnym przypadku, gdy rzeczywista wartość większej stałej czasowej obiektu sterowania  $T_{o1}$  jest równa stałej czasowej  $T_{F1}$  członu forsującego, wówczas TO układu otwartego ma postać:

$$G_{n1}(s) = \frac{1}{\frac{2}{\pi} s \left( \frac{1}{\pi} s + 1 \right) (T_{o1}^o s + 1)},$$

a TO zamkniętego AC wielkości zadanej wynosi:

$$G_{zs1}(s) = \frac{1/K_{sz}}{\frac{2}{\pi} s \left( \frac{1}{\pi} s + 1 \right) (T_{o2}^o s + 1) + 1}.$$

Jeśli pominąć przy tym stałą czasową  $T_{o2}^o$ , to:

$$G_{zs1}(s) = \frac{1/K_{sz}}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}, \quad T = \frac{\sqrt{2}}{\pi}, \quad \xi = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

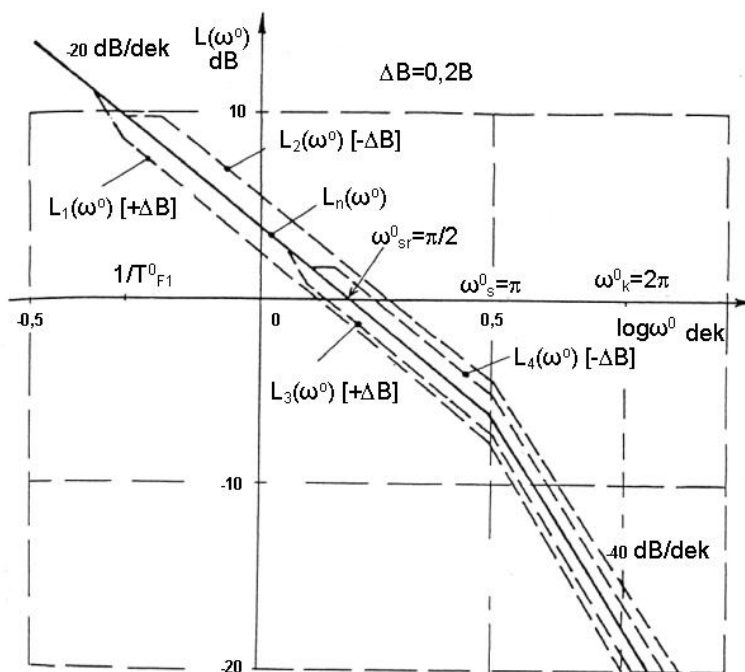
A to oznacza, że parametry układu, w tym przypadku, odpowiadają dokładnemu strojeniu ze względu na optimum modułowe.

W ogólnym przypadku z powodu niedokładnego określenia parametrów obiektu sterowania i zmian jego parametrów, własności dynamiczne AC różnią się od optymalnych i pojawia się konieczność oceny tych odchyleń.

Jako uogólniony zmienny parametr przy dalszych obliczeniach przyjmuje się współczynnik  $B$ , charakteryzujący sztywność układu technologicznego. Takie podejście jest uzasadnione, ponieważ przy obróbce przedmiotów o małej sztywności, zmiana ich podatności w zależności od punktu przyłożenia siły skrawania na długości przedmiotu, prowadzi do zmian współczynnika  $B$ . Powoduje to odchyłkę parametrów OS i układu od wartości optymalnych. Ustalono także, że rozpatrywana sytuacja jest najbardziej niekorzystna z punktu widzenia odchylek wskaźników jakości układu - wrażliwość wskaźników jakości regulacji na zmiany parametrów OS z powodu zmiany naddatku na obróbkę jest dużo mniejsza niż w analizowanym przypadku.

Wpływ zmian współczynnika  $B$  na LACH układu otwartego wielkości zakłócającej pokazano na rys. 5.6. Przy zgodności parametrów OS z wartościami modelowymi, LACH ma postać  $L_n(\omega^o)$ . W przypadku wartości parametru  $B$ , wykorzystanej do strojenia, równej np. 0,4, parametry AC będą następujące:

$$\begin{aligned} T_{F1}^o &= T_{o1}^o = 1,957; & T_{o2}^o &= 0,043; & \omega_{sr}^o &= \pi/2; & \omega_s^o &= \pi; \\ \log \frac{1}{T_{F1}^o} &= -0,292dek; & \log \frac{1}{T_{o2}^o} &= 1,366dek; \\ \log \omega_{sr}^o &= 0,196dek; & \log \omega_s^o &= 0,496dek. \end{aligned}$$



Rys. 5.6. LACH układu w I wariacie strojeń

Odchyłka współczynnika  $B$  o  $+20\%$  prowadzi do tego, że stałe czasowe OS przyjmują wartości:

$$T_{o1}^0 = 2,263; \quad T_{o2}^0 = 0,037;$$

$$\log \frac{1}{T_{o1}^0} = -0,335dek; \quad \log \frac{1}{T_{o2}^0} = 1,432dek.$$

Przy tym LACH upraszcza się do postaci  $L_1(\omega^0)$ . Zmiana współczynnika  $B$  o  $-20\%$  prowadzi do przekształcenia LACH do postaci  $L_2(\omega^0)$ . Jeśli przyjąć do strojenia wartość  $B=1,5$ , to przy zwiększeniu współczynnika  $B$  o  $+20\%$  LACH przyjmie postać  $L_3(\omega^0)$ , a przy odchyłce  $B$  o  $-20\%$  - postać  $L_4(\omega^0)$ .

W celu uzyskania wskaźników jakości procesów przejściowych wielkości sterującej, z uwzględnieniem mniejszej stałej czasowej  $T_{o2}$  obiektu i możliwych zmian współczynnika,  $B$  otrzymano transmitancję operatorową układu zamkniętego w przypadku wielkości zadanej w postaci, która po przekształceniach stanowi się równą:



$$G_{zs1}(s) = \frac{1}{K_{sz}} \frac{T_{F1}^o s + 1}{A_1(s)}, \quad (5.24)$$

gdzie:

$$\left. \begin{aligned} A_1(s) &= a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4; \\ a_0 &= \frac{2}{\pi^2} T_{o1}^o T_{o2}^o = \frac{1}{6\pi^2}; \\ a_1 &= \frac{2}{\pi^2} (T_{o1}^o + T_{o2}^o + \pi T_{o1}^o T_{o2}^o) = \frac{2(0,5+B)}{\pi^2} + \frac{1}{6\pi}; \\ a_2 &= \frac{2}{\pi} \left( \frac{1}{\pi} + T_{o1}^o + T_{o2}^o \right) = \frac{2}{\pi^2} + \frac{2(0,5+B)}{\pi}; \\ a_3 &= \frac{2}{\pi} + T_{F1}^o; a_4 = 1. \end{aligned} \right\} \quad (5.26)$$

W przekształceniach uwzględniono zależności:

$$T_{o1}^o T_{o2}^o = \frac{1}{12}; \quad T_{o1}^o + T_{o2}^o = 0,5 + B,$$

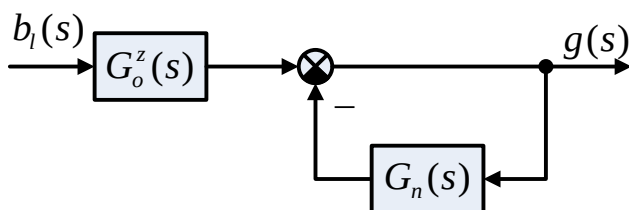
wynikające z zależności (3.20) odnoszących się do stałych czasowych OS. Przy obliczaniu współczynnika  $a_3$  w zależności (5.26) stałą czasową  $T_{F1}$  przyjmuje się równą  $T_{o1}^o$ .

Przy skokowej zmianie podanej wartości, wyrażenie na wielkość wyjściową przyjmuje postać:

$$\Delta g(s) = \frac{\Delta U_{zad}}{s} G_{zs1}(s).$$

Po uwzględnieniu zależności na  $G_{zs1}(s)$ , na podstawie odwrotnego przekształcenia Laplace'a, po rozkładzie wielomianu mianownika na czynniki proste, znaleziono zależność opisującą oryginał  $\Delta g(t)$  i wykonano obliczenia numeryczne, wykorzystując opracowany program, procesów przejściowych w układzie dla wielkości sterującej.

Przy obliczaniu procesów przejściowych wielkości zakłócającej, którą przyjęto jako skok nadadtku wzdłuż osi części  $b_b$ , schemat strukturalny sprowadzono do postaci pokazanej na rys. 5.7.



**Rys. 5.7. Schemat strukturalny AC przy zakłóceniach**

Zgodnie z tym schematem transmitancja operatorowa wielkości zakłócającej:

$$G_{ztl}(s) = \frac{G_o^z(s)}{1 + G_n(s)},$$

po przekształceniach przyjmuje postać:

$$G_{ztl}(s) = K_{oz} \frac{\frac{2}{\pi} s \left( \frac{1}{\pi} + 1 \right)}{A_1(s)},$$

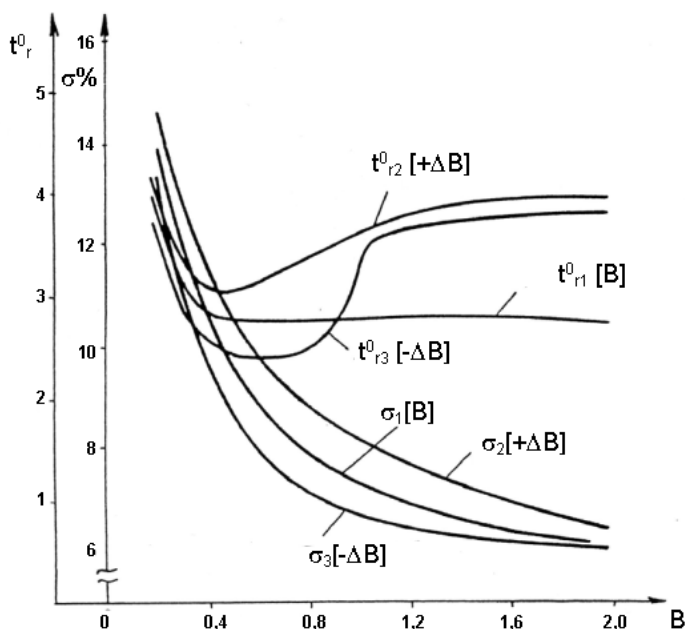
gdzie:  $G_o^z(s)$  - uogólniona TO obiektu sterowania wielkości zakłócającej, aproksymowana aperiodycznym członem drugiego rzędu, zgodnie z zależnościami (3.41) ÷ (3.44).

W postaci znormalizowanej ( $K_{oz} = 1$ ) wielkości wyjściowej  $i$ , przy skokowej zmianie naddatku na obróbkę  $\Delta b_l = 1$ , można zapisać:

$$\Delta g(s) = \frac{\Delta b_l}{s} G_{ztl}(s).$$

Analogicznie jak w poprzednim przypadku znaleziono oryginał  $\Delta g(t)$  w stanie nieustalonym (dynamicznym) i obliczono numerycznie charakterystyki przejściowe oraz ustalono wskaźniki jakości dla procesów przejściowych wywoływanych przez zakłócenia.

Wyniki obliczeń wskaźników jakości procesów przejściowych w przypadku 1-go wariantu zestrojenia ZC pokazano na rys. 5.8 ÷ 5.10. Na rys. 5.8 pokazano rozkład wskaźników jakości procesów przejściowych wielkości sterującej ( $\sigma$  - przeregulowanie,  $t_r^0 = \frac{t_r}{\tau}$  - względny czas regulacji dla 2% przy wartości strefy dopuszczalnych odchyłeń, równej 2%).



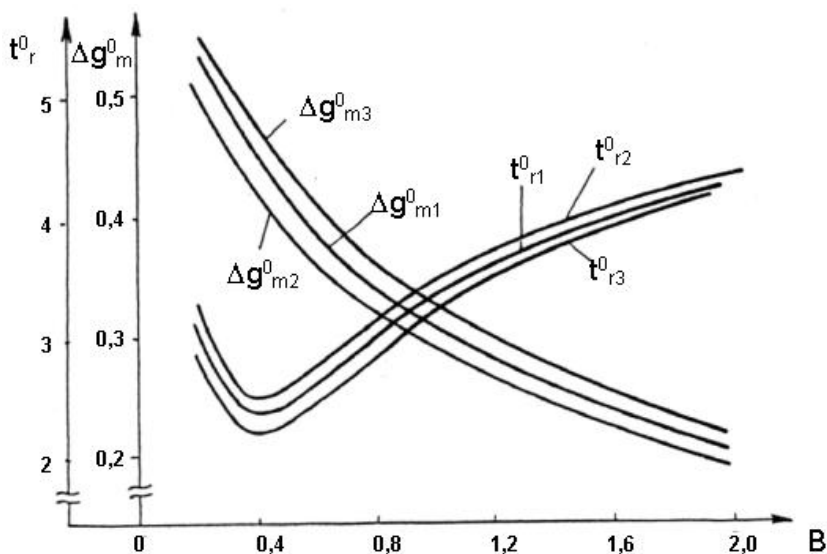
Rys.5.8. Wskaźniki jakości dla wielkości sterującej. Wariant strojenia 1

Pogorszenie wskaźników jakości przy małych wartościach współczynnika  $B$  można wyjaśnić następująco. Dokonano syntezy regulatora bez uwzględnienia mniejszej stałej czasowej obiektu. Przy większych wartościach współczynnika  $B$  stała czasowa obiektu  $T_{02}$  jest znacznie mniejsza od stałej czasowej  $T_{01}$  i nie wykazuje istotnego wpływu na wskaźniki jakości regulacji. Świadczy to o tym, że zbliżają się one do wskaźników, osiągniętych w układzie, zestrojonym na optimum techniczne. Przy zmniejszeniu współczynnika  $B$  stała czasowa  $T_{02}$  zwiększa się, przy tym wykazując znaczny wpływ na właściwości dynamiczne układu doprowadza do ich pogorszenia.

Ważnym momentem jest ocena wrażliwości syntetyzowanego układu na zmiany parametrów obiektu. Najbardziej reprezentatywną jest ilościowa ocena zmian standardowych wskaźników jakości procesów przejściowych wielkości sterujących i zakłócających.

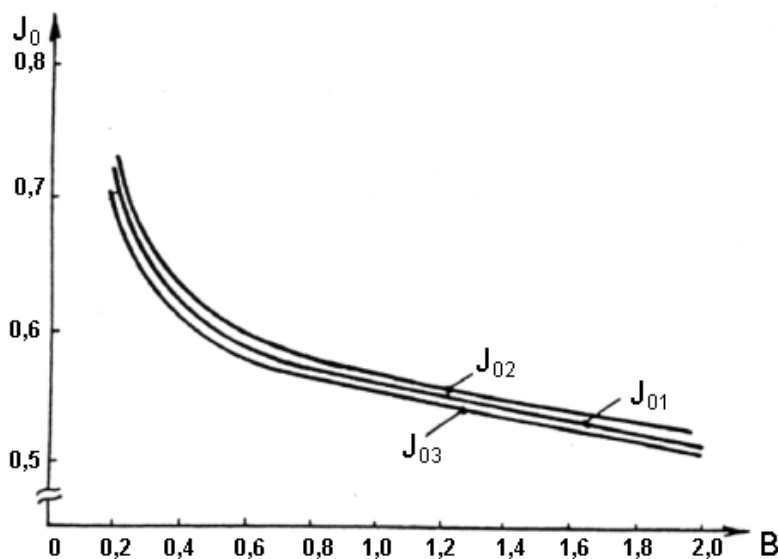
Krzywe z indeksem 1 na rys. 5.8 otrzymano przy założeniu, że przy strojeniu układu znana jest dokładna wartość współczynnika  $B$ , co pozwala przyjąć, że  $T_{F1} = T_{01}$ . W zależności (3.12) są parametry, których wartości mogą się zmieniać lub są znane tylko w przybliżeniu. W związku z tym przy analizie wrażliwości AC rozpatruje się także wskaźniki jakości, osiągnięte przy odchyleniu współczynnika  $B$  od wartości wymaganej. Krzywe z indeksem 2 na rys. 5.9 odpowiadają odchyleniu  $B$ , o +20% od nastrojonej wartości, natomiast z indeksem 3, o -20%.

Na rys. 5.9 przedstawiono zależności względnych wartości maksymalnej odchyłki dynamicznej  $\Delta g_m^0$  wielkości regulowanej i czasu regulacji  $t_r^0 = \frac{t_r}{\tau}$ , w procesie przejściowym, wywołanym skokową zmianą nadadtku na obróbkę. W przypadku odchyłki dynamicznej jako wartość wyjściową przyjęto odchyłkę wielkości regulowanej, w stanie ustalonym w układzie otwartym. Krzywe z indeksem „1” odpowiadają przypadkowi, gdy rzeczywista wartość współczynnika  $B$  jest równa wartości przyjętej w obliczeniach i odpowiednio  $T_{os1} = T_{F1}$ , krzywe z indeksem 2 - odchyłce współczynnika  $B$  o +20% od wartości założonej; krzywe z indeksem 3 - odchyłce współczynnika  $B$  o -20%.



**Rys.5.9. Wskaźniki jakości dla wielkości zakłócającej. Wariant strojenia 1**

Ocenę wskaźników jakości wykonano także dla przypadku całkowego kryterium jakości (5.8) metodą numerycznego całkowania krzywej procesu przejściowego.



Rys.5.10. Zależność całkowego kryterium  $J_0$  od wskaźnika  $B$

Obliczone krzywe przedstawiono na rys. 5.10. Tutaj, jak poprzednio, wskaźniki jakości oblicza się w przypadku równości modelowego i rzeczywistego współczynnika  $B$  (krzywe z indeksem 1), odchyłki  $B$  o +20% (krzywe z indeksem 2) i odchyłki  $B$  o -20% (krzywe z indeksem 3).

Otrzymane wyniki świadczą o tym, że rozpatrywane wyjściowe strojenie parametrów algorytm adaptacji AC pozwala zapewnić wysoką jakość sterowania, w warunkach niestacjonarności parametrów obiektu sterowania.

### 5.3.2. Strojenie AC wg wariantu 2

W rozpatrzonym wariantcie strojenia AC dokonano doboru stałej czasowej członu forsującego  $T_{F1}$ , stałej czasowej całkowania  $T_{cal}$  i stałej czasowej  $T_{ek}$ . Przy doborze stałej  $T_{F1}$  konieczna jest informacja zarówno o parametrach procesu skrawania jak i o parametrach układu dynamicznego.

Interesujące są takie wskaźniki jakości sterowania, które mogą być osiągnięte przy uproszczonym doborze stałej  $T_{F1}$  w funkcji tylko czasu opóźnienia zgodnie z wyrażeniem:

$$T_{F1} = T_{F1}^0 \tau,$$

Gdzie:  $T_{F1}^0$  - ustalona (dobrana) względna wartość stałej czynnika całkującego.

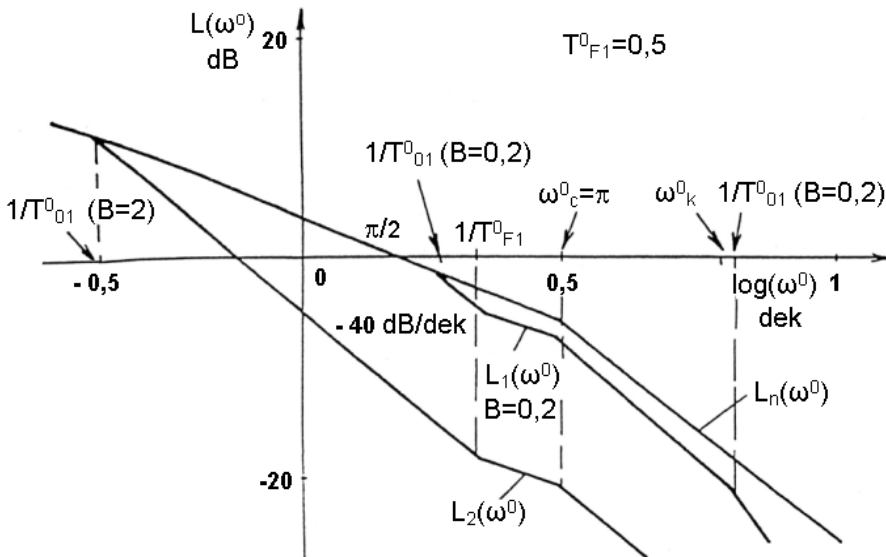
W tym przypadku funkcja transmitancji operatorowej regulatora ma postać:

$$G_{r2}(s) = \frac{T_{F1}^o s + 1}{T_{cal}^o s (T_{ek}^o s + 1)},$$

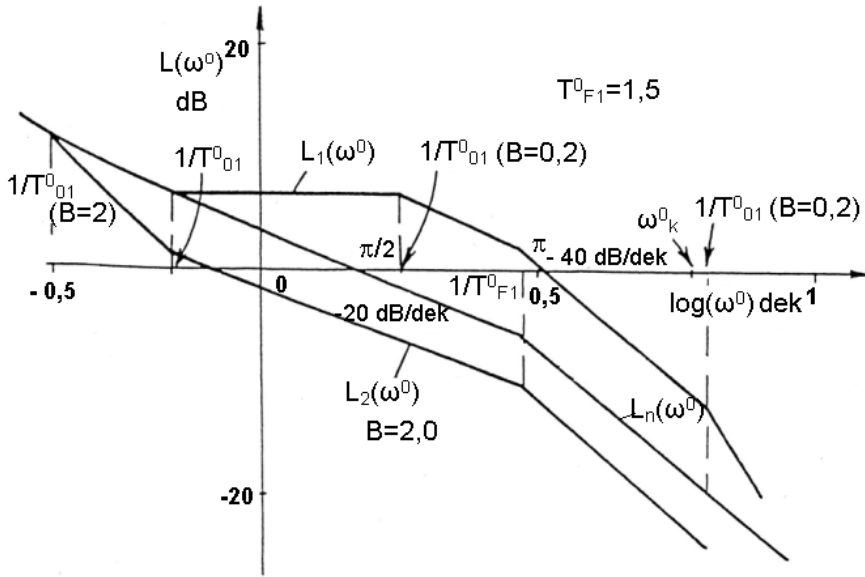
a funkcja przejścia układu otwartego i zamkniętego sprowadza się do zależności (5.23) i (5.24). Natomiast w zależności (5.26) w przypadku współczynnika  $a_3$  równania charakterystycznego wchodzi ustalone (wybrane w czasie strojenia)  $T_{F1}^o$ . Pojawia się również zagadnienie wyboru racjonalnej wartości stałej czasowej  $T_{F1}^o$ :

$$T_{F1}^o = 0,5$$

Na rys. 5.11 i 5.12 pokazano LACH układu otwartego przy dobranych wartościach  $T_{F1}^o = 0.5$  i  $T_{F1}^o = 1.5$  oraz wartościach granicznych  $B=0.2$  LACH  $L_1(\omega^o)$  i  $B=2$  wówczas LACH  $L_2(\omega^o)$ .



Rys. 5.11. LACH układu w wariancie strojenia 2



Rys. 5.12. LACH układu w wariancie strojenia 2 przy  $T_{F1}^0 = 1.5$

W przypadku, gdy rzeczywista wartość stałej czasowej  $T_{o1}^0$  OS jest równa  $T_{F1}^0$ , wówczas LACH ma postać  $L_n(\omega^0)$  i charakteryzuje się następującymi parametrami:

$$\omega_{sr}^0 = \pi/2; \quad \omega_s^0 = \pi;$$

$$\log \omega_{sr}^0 = 0,196dek; \quad \log \omega_s^0 = 0,496dek.$$

Częstotliwość sprzężona członu całkującego przy  $T_{F1}^0 = 0.5$  wynosi:

$$\log \frac{1}{T_{Fq}^0} = 0,301dek;$$

a przy  $T_{F1}^0 = 1.5$  wynosi:

$$\log \frac{1}{T_{F1}^0} = -0,180dek.$$

Gdy współczynnik  $B$  wynosi 0,2, układ będzie miał następujące parametry:

$$T_{o1}^0 = 0.542; \quad T_{o2}^0 = 0.152$$

$$\log \frac{1}{T_{o1}^0} = 0.266dek; \quad \log \frac{1}{T_{o2}^0} = 0.820dek.$$

Przy wzroście wartości współczynnika  $B$  do 2, stałe czasowe obiektu sterowania i częstotliwości sprzężone LACH przyjmują wartości:

$$T_{o1}^o = 2.466; \quad T_{o2}^o = 0.034;$$

$$\log \frac{1}{T_{o1}^o} = -0.390 \text{ dek.}; \quad \log \frac{1}{T_{o2}^o} = 1.470 \text{ dek.}$$

Jak wynika z rys. 5.11, gdy  $T_{F1}^o = 0.5$ , wtedy układ będzie zapewniać dobre tłumienie częstotliwości harmoniczných  $\omega_k$ , jednak przy dużych wartościach współczynników  $B$ , LACH  $L_2(\omega^o)$  ma długi średnioczęstotliwościowy odcinek z nachyleniem  $-40$  dB/dek, co prowadzi do zwiększania przeregulowania.

Gdy  $T_{F1}^o = 1.5$  (rys. 5.12) i małych wartościach współczynnika  $B$  pogarsza się tłumienie harmoniczných częstotliwości krytycznych i przy  $B = 0,2$ , w przypadku krytycznej wartości częstotliwości  $\omega_k$ , współrzędne LACH  $L_1(\omega^o) \cong -10$  dB. Dalsze zwiększanie wartości  $T_{F1}^o$  prowadzi do jeszcze większego poszerzenia pasma przenoszenia i odpowiednio do zwiększenia wrażliwości układu na oddziaływania harmoniczných w strefie częstotliwości krytycznej.

Oprócz tego, wskaźniki jakości regulacji mogą być niezadowalające, w przypadku wartości  $T_{F1}^o > 1,5 \div 1,8$  i przy większych wartościach współczynnika  $B$  LACH ma długi średnioczęstotliwościowy odcinek z nachyleniem  $-40$  dB/dek.

Obliczenia wskaźników jakości procesów przejściowych wielkości sterującej przeprowadzono podobnie jak poprzednio na podstawie zależności TO układu zamkniętego:

$$G_{zs2}(s) = \frac{1}{K_{sz}} \frac{T_{F1}^o s + 1}{A_2(s)},$$

gdzie:

$$A_2(s) = a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4.$$

Współczynniki  $a_i$  wielomianu  $A_2(s)$  oblicza się z zależności (5.26). Przy obliczaniu  $a_3$  przyjmuje się ustaloną wartość  $T_{F1}^o$ . Obliczenia numeryczne przeprowadzono przy różnych ustalonych (dobranych) wartościach  $T_{F1}^o$  i zmianach wartości współczynnika  $B$  od 0,2 do 2,0.

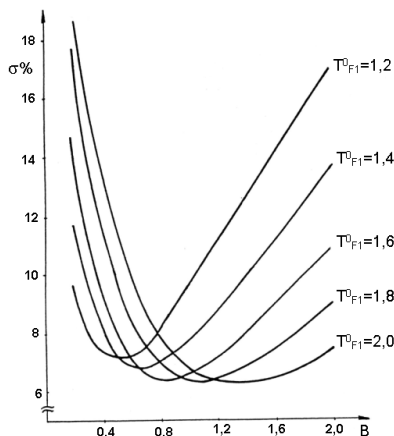


Obliczenia procesów przejściowych wielkości zakłócającej przeprowadzono z zależnością na transmitancję operatorową układu zamkniętego, która po przekształceniach przyjmuje postać:

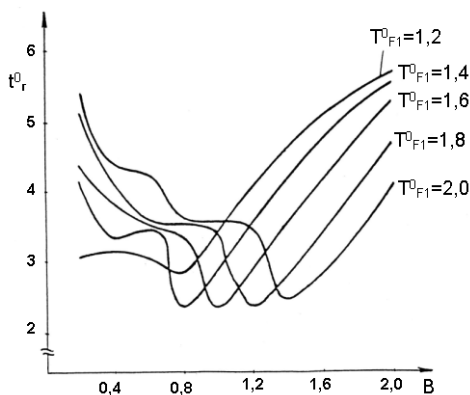
$$G_{ztl}(s) = K_{oz} \frac{\frac{2}{\pi} s \left( \frac{1}{\pi} + 1 \right)}{A_2(s)}.$$

Zależność ta pokrywa się z TO  $G_{ztl}(s)$  w przypadku wariantu strojenia 1, ale przy obliczaniu współczynnika  $a_3$  wielomianu  $A_2(s)$ , przyjęto ustaloną wartość  $T_{F1}^0$ .

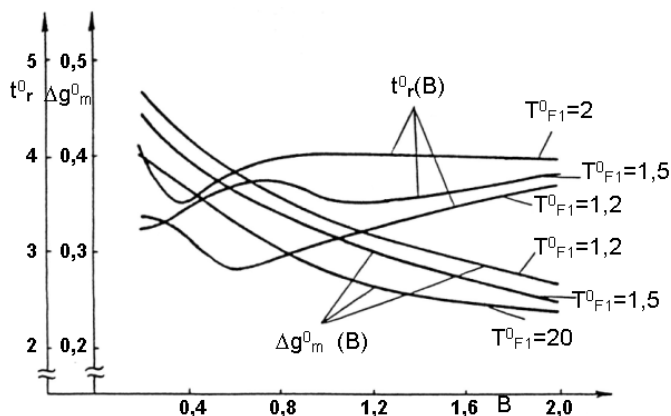
Wyniki obliczeń wskaźników jakości procesów przejściowych sterowania i zakłócenia przedstawiono na rys. 5.13 – 5.15. Zależności całkowych wskaźników jakości od przyjętej nastrojonej wartości stałej  $T_{F1}^0$  i zmian współczynnika  $B$  przedstawiono na rys. 5.16.



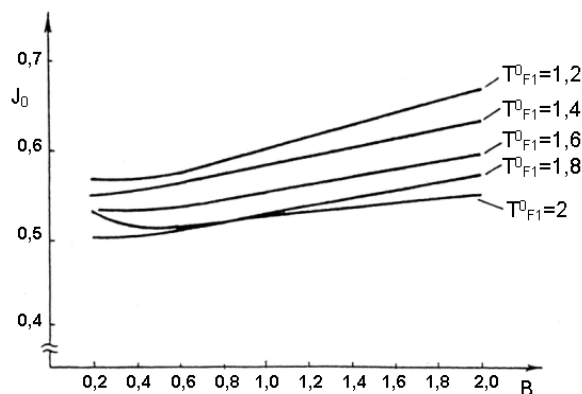
Rys. 5.13. Zależność przeregulowania od współczynnika  $B$ . Wariant strojenia 2



Rys. 5.14. Zależność czasu regulacji od współczynnika  $B$ . Wariant strojenia 2



Rys. 5.15. Wskaźniki jakości procesu przejściowego dla zakłócenia. Wariant strojenia 2



Rys. 5.16. Zależność całkowego kryterium jakości od współczynnika  $B$ . Wariant strojenia 2

Porównując otrzymane krzywe z podobnymi zależnościami wariantu strojenia 1, można przedstawić następujące wnioski:

1. Zależności  $\sigma(B)$  i  $t_r^0(B)$  (rys. 5.13 i 5.14) mają charakter ekstremalny. Najkorzystniejsze wartości wskaźników jakości osiąga się przy  $T_{F1}^0 \cong T_{O1}^0$ , i w związku z tym minimum tych krzywych przemieszcza się w zależności od wartości  $T_{F1}^0$ . Minimum największych wartości przeregulowania  $\sigma$  w całym zakresie możliwych zmian współczynnika  $B$  osiąga się przy  $T_{F1}^0 = 1,4 - 1,6$ , wtedy wartość  $\sigma < 15\%$ .

Minimum największych wartości czasu regulacji odpowiada wartościom  $T_{F1}^0=1,4 \div 1,8$ , wtedy  $t_r^0 < 6$ . Przy tych wartościach  $T_{F1}^0$  najgorsze wskaźników jakości sterowania są o 10%-50% większe od analogicznych wskaźników w przypadku wariantu strojenia 1.

2. Wskaźniki jakości  $T_{F1}^0$  wielkości zakłócającej (rys. 5.15) są mniej wrażliwe na zmiany współczynnika  $B$  i stałej czasu  $T_{F1}^0$ . Wartości przeregulowania dynamicznego wielkości regulowanej wg 2-go wariantu strojenia są nawet, przy dużych wartościach  $T_{F1}^0$ , mniejsze niż w wariancie 1. Należy jednak, mieć na uwadze fakt, że uzyskuje się to dzięki rozszerzeniu pasma przenoszenia AC i, odpowiednio, zwiększenia jego wrażliwości na harmoniczne częstotliwości krytycznej.

3. Wartości całkowitego kryterium jakości (rys. 5.16)  $J_o$  wielkości zakłócającej, gdy  $T_{F1}^0=1,6 \div 1,8$  są bliskie wartościom osiąganym w wariancie strojenia 1.

Podsumowując wyniki przeprowadzonej analizy, można zauważyć, że: przy ograniczeniach podanych na pasmo przenoszenia AC i braku mocy obliczeniowej układu mikroprocesorowego, zadowalające wskaźniki można osiągnąć dzięki wykorzystaniu 2-go prostszego wariantu strojenia układu. Przy tym, w konkretnym procesie technologicznym ze znanym dostatecznie wąskim zakresem zmian współczynnika  $B$ , wariant strojenia 2 zapewnia dostatecznie wysokie wskaźniki jakości sterowania.

Obszar zastosowania wariantu nastrojenia 2 układ sterowania adaptacyjnego jest ograniczony jego względnie wysoką wrażliwością na harmoniczne częstotliwości krytycznej przy małych wartościach współczynnika  $B$ . W związku z tym, takie strojenie jest celowe, gdy wiadomo, że wspomniane zakłócenia mają niski poziom.

### 5.3.3. Strojenie AC wg wariantu 3

Przy możliwie wysokim poziomie składowych harmonicznym zakłócających częstotliwości krytycznej konieczne jest zagwarantowanie małej wrażliwości AC w określonym przedziale częstotliwości. Można to osiągnąć przez obniżenie częstotliwości odcięcia układu, w porównaniu do wariantu strojenia 2. W rozpatrywanym wariancie strojenia 3, oczekiwaną TO układu otwartego AC można przedstawić w postaci:

$$G_{n3}(s) = \frac{(T_{F1}^0 s + 1)}{\frac{4}{\pi} s \left( \frac{1}{\pi} s + 1 \right) (T_{O1}^0 s + 1) (T_{O2}^0 s + 1)},$$

stałą czasową członu całkującego przyjmuje się 2 razy większą niż w wariancie strojenia 2.

Oczekiwane własności dynamiczne AC uzyskuje się poprzez wprowadzenie do układu regulatora z TO, czyli gdy:

$$G_{r3}(s) = \frac{T_{F1}^0 s + 1}{T_{cal}^0 s (T_{ek}^0 s + 1)},$$

a stałą czasową członu całkującego wylicza się z zależności:

$$T_{cal}^0 = \frac{4}{\pi} K_{ne} K_{or} K_{sz}.$$

Względne wartości stałej czasowej czynnika całkującego  $T_{F1}^0$  przyjmuje się, jak i w wariancie strojenia 2, jako wartości stałe. Logarytmiczną charakterystykę częstotliwościową przy wartości  $T_{F1}^0 = 1,5$  pokazano na rys. 5.17, LACH  $L_n(\omega^0)$  odpowiada sytuacji, gdy:

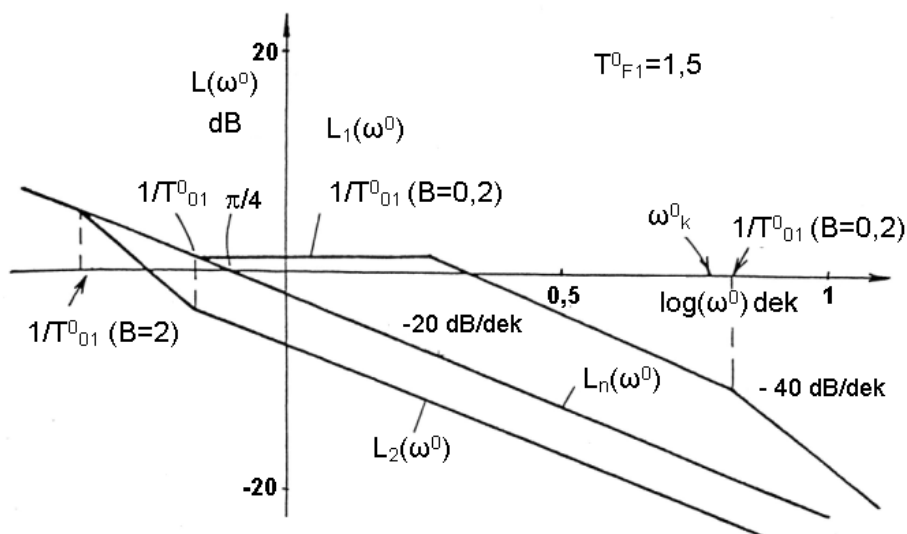
$T_{o1}^0 = T_{F1}^0$ ; LACH  $L_1(\omega^0)$  - wartości  $T_{F1}^0 = 0,2$ , a LACH  $L_2(\omega^0)$  wartości  $T_{F1}^0 = 2$ . LACH  $L_n(\omega^0)$  charakteryzuje się następującymi parametrami:

$$\omega_{sr}^0 = \frac{\pi}{4};$$

$$\omega_s^0 = \pi;$$

$$\log \omega_{sr}^0 = -0,105 \text{dek};$$

$$\log \omega_s^0 = 0,496 \text{dek}.$$



Rys. 5.17. LACH układu w wariancie strojenia 3

Najbardziej niekorzystną, z punktu widzenia wrażliwości układu, na zakłócenia częstotliwości krytycznej, jest sytuacja, gdy współczynnik  $B$  ma wartość minimalną  $B=0,2$ . W tym najgorszym przypadku wartość współrzędnej LACH częstotliwości  $\omega_k$  wynosi  $L_1(\omega_k^o)=-18\text{dB}$ , co jest dalej 2 razy mniejsze niż w wariancie strojenia 2.

Tak więc, rozpatrywany wariant strojenia zapewnia małą wrażliwość układu na niekorzystne zakłócenia harmoniczne. Koniecznie wtedy należy uwzględnić, że zwiększenie stałej  $T_{F1}^o$  do wartości większych od 1,6 – 2,0 prowadzi do znacznego zwiększenia wrażliwości układu na harmoniczne częstotliwości krytycznej. W związku z tym, przy analizie wskaźników jakości AC zakres dobieranych (strojonych) wartości  $T_{F1}^o$  ogranicza się od góry wartością równą 2.

TO układu zamkniętego AC dla wielkości sterującej i zakłócającej rozpatrywanego wariantu strojenia sprowadza się do postaci:

$$G_{zs3}(s) = \frac{1}{K_{sz}} \frac{T_{F1}^o s + 1}{A_3(s)},$$

$$G_{zsl3}(s) = K_{oz} \frac{\frac{4}{\pi} s \left( \frac{1}{\pi} + 1 \right)}{A_3(s)},$$

gdzie:

$$A_3(s) = a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4;$$

$$a_0 = \frac{4}{\pi^2} T_{o1}^o T_{o2}^o = \frac{1}{3\pi^2};$$

$$a_1 = \frac{4}{\pi^2} (T_{o1}^o + T_{o2}^o + \pi T_{o1}^o T_{o2}^o) = \frac{4(0,5+B)}{\pi^2} + \frac{1}{3\pi};$$

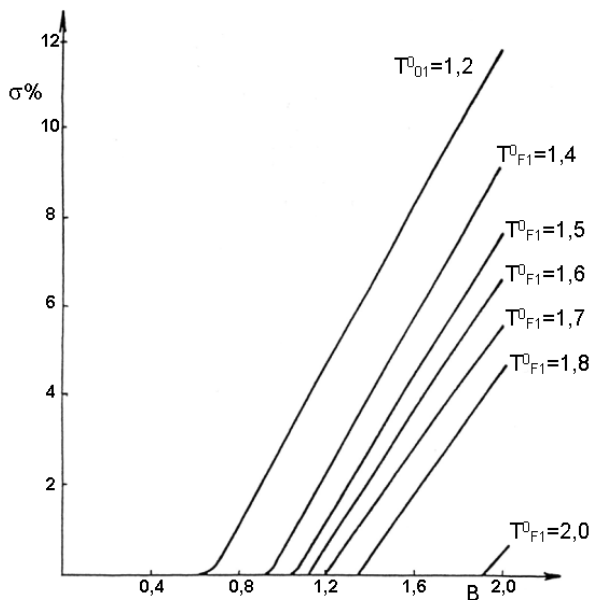
$$a_2 = \frac{4}{\pi} \left( \frac{1}{\pi} + T_{o1}^o + T_{o2}^o \right) = \frac{4}{\pi^2} + \frac{4(0,5+B)}{\pi};$$

$$a_3 = \frac{4}{\pi} + T_{F1}^o; \quad a_4 = 1.$$

Zależności opisujące współczynniki  $a_i$  przekształcono, z uwzględnieniem zależności na stałe czasowe OS. Na podstawie otrzymanych transmitancji operatorowych obliczono wskaźniki przy różnych wartościach  $T_{F1}^o$  i zmianach współczynnika  $B$  w zakresie od 0,2 do 2.

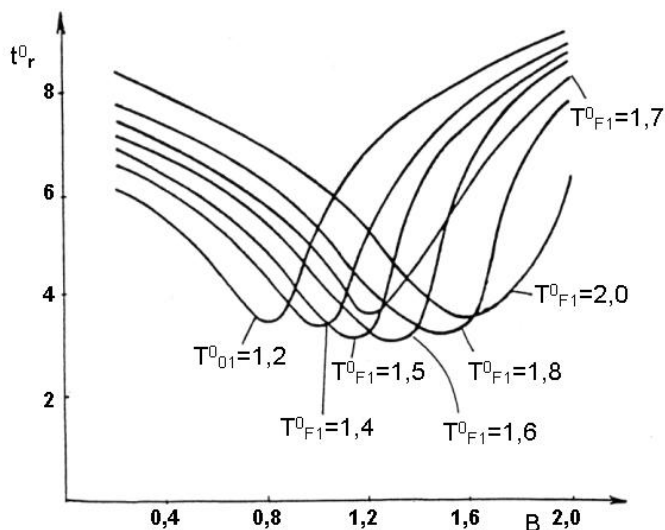
Wyniki obliczeń wskaźników jakości wielkości sterującej pokazano na rys. 5.18 i 5.19. Porównując je ze wskaźnikami układu ze strojeniem wg wariantu 2 można zauważyć, że wariant strojenia 3 zapewnia przy małych wartościach

współczynnika  $B$ , monotoniczny przebieg procesu ( $\sigma=0$ ), przy tym zakres monotoniczny przebiegów procesu wzrasta wraz ze zwiększeniem wartości  $B$ . Jednak, przy tym, czas regulacji wzrasta w porównaniu z wariantem 2 o około dwa razy.



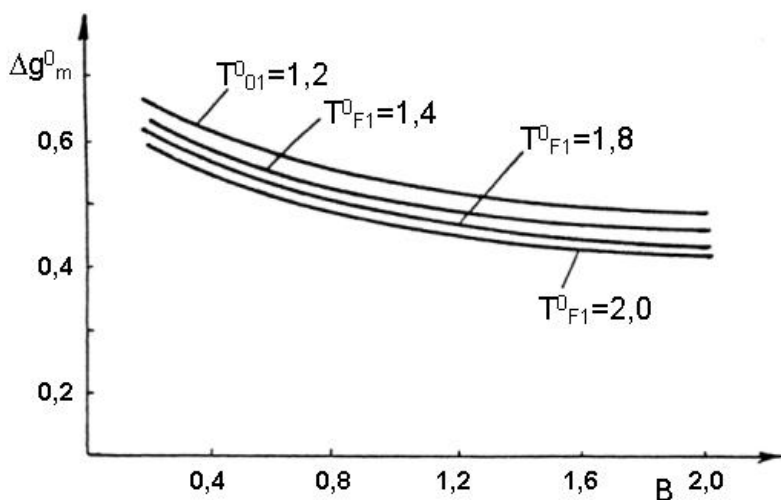
**Rys.5.18. Zależność przeregulowania od współczynnika  $B$ . Wariant strojenia 3**

Krzywe wskaźników jakości wielkości zakłócającej przedstawiono na rys. 5.20 i 5.21. Analizując je, można zauważyć, że wartości maksymalnej odchyłki dynamicznej wielkości regulowanej i czas procesu przejściowego są mało wrażliwe na zmiany współczynnika  $B$  i strojonej wartości  $T^0_{F1}$ . Wartości  $\Delta g_m$  w tym wariantie strojenia, przy pozostałych takich samych warunkach, są o 20÷30% gorsze niż w wariantie strojenia 2. Oznacza to, w takim samym stopniu skraca się czas procesu przejściowego.

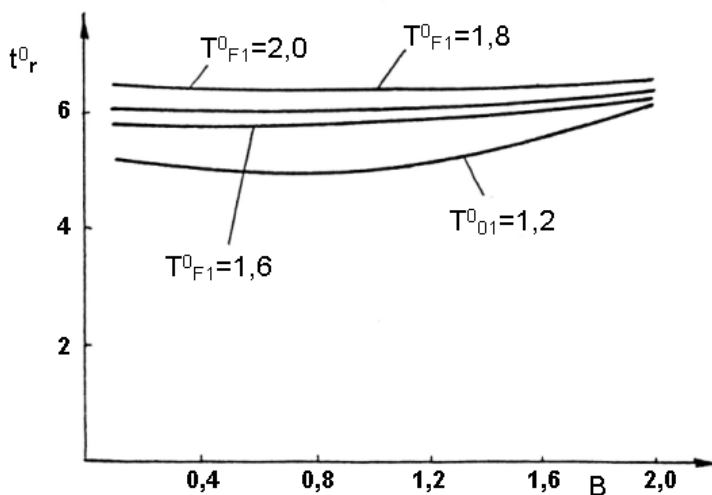


Rys.5.19. Zależność czasu regulacji od współczynnika  $B$

W ten sposób, zmniejszenie pasma przenoszenia AC prowadzi również do zmniejszenia procesów przejściowych w układzie. Innymi słowy, obniżenie wrażliwości układu na oddziaływania harmoniczne częstotliwości krytycznej wiąże się z pogorszeniem wskaźników jego odpowiedzi na oddziaływania sterujące i zakłócające.



Rys. 5.20. Zależność maksymalnej odchyłki dynamicznej w procesie przejściowym od współczynnika  $B$  przy zakłóceniu. Wariant strojenia 3



Rys. 5.21. Zależność czasu regulacji w procesie przejściowym od współczynnika  $B$  przy zakłóceniu. Wariant strojenia 3

Podsumowując, można zalecić strojenie 3 z wartościami  $T_{F1}^0 = 1,5 \div 1,6$  w przypadkach, gdy występuje ograniczenie mocy obliczeniowej układu mikroprocesorowego oraz możliwa jest praca w warunkach wysokiego poziomu zakłóceń harmonicznnych, związanych z dokładnością kształtu w przekroju poprzecznym obrabianych przedmiotów.

#### 5.3.4. Strojenie AC wg wariantu 4

W rozpatrywanych wyżej wariantach strojenia AC ograniczenia pasma przenoszenia osiąga się przez odpowiedni dobór stałej czasowej członu całkującego i dodatkowe wprowadzenie w układ członu aperiodycznego ze stałą czasową  $T_{ek}$ , której wartość przestrajają się w funkcji czasu opóźnienia  $\tau$ . Analizując możliwości dalszego uproszczenia stosowanego w układzie regulatora, celowe jest rozważenie wariantu AC bez wprowadzenia dodatkowej stałej czasowej  $T_{ek}$ . Przesłanką możliwości realizacji takiego wariantu strojenia jest ta okoliczność, że OS zawiera równocześnie z większą stałą czasową  $T_{O1}$  podlegającą kompensacji, stałą czasową  $T_{O2}$ , której wartość zależy od czasu opóźnienia  $\tau$ . Zmiana mniejszej stałej w funkcji  $\tau$  może zapewnić „naturalną” adaptację pasma przenoszenia układu przy zmianie prędkości obrotowej części.

W celu ograniczenia pasma przenoszenia układu, w wymaganym zakresie częstotliwości, zaleca się przyjęcie TO układu otwartego w postaci:

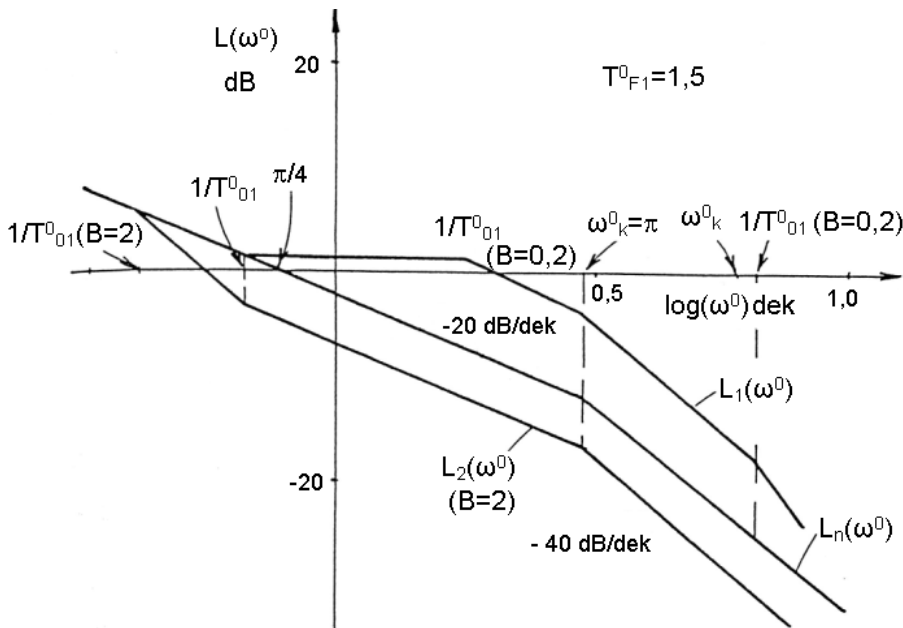


$$G_{n4}(s) = \frac{(T_{F1}^o s + 1)}{\frac{4}{\pi} s (T_{o1}^o s + 1) (T_{o1}^o s + 1)}.$$

W związku z przytoczoną TO, analogicznie jak w wariancie strojenia 3, stałą całkowania przyjęto dwa razy większą, niż w wariantach strojenia 1 i 2. W realizacji wymaganej transmitancji operatorowej  $G_{n4}(s)$  do układu wprowadzono regulator z TO w postaci:

$$G_{r4}(s) = \frac{T_{F1}^o s + 1}{T_{cal}^o s}.$$

Transmitancję operatorową regulatora zapisano bez uwzględnienia stałej czasowej napędu, którą w większości przypadków można zaniedbać. Tutaj również, jak i w wariancie strojenia 3, stałą czasową czynnika całkującego przestrajają się tylko w funkcji czasu opóźnienia  $T_{F1} = T_{F1}^o \tau$ , w czasie strojenia przyjmuje się stałą względną wartość  $T_{F1}^o$ . Stałą czasowa całkowania przyjmuje się i stroi analogicznie jak w wariancie strojenia 3.



Rys.5.22. LACH układu w wariancie strojenia 4

Na rys. 5.22. pokazano LACH układu przy nastrojonej wartości  $T_{F1}^0=1,5$  i przy zmianach współczynnika  $B$  od 0,2 do 2. LACH  $L_n(\omega^0)$  odpowiada sytuacji, gdy stała czasowa OS  $T_{o1}^0=1,5$ . Przy czym, wartość mniejszej stałej czasowej  $T_{o2}^0=0,055$  i LACH  $L_n(\omega^0)$  ma następujące parametry:

$$\begin{aligned}\omega_{sr}^0 &= \pi/4; \log \omega_{sr}^0 = -0,105dek; \\ \log \frac{1}{T_{F1}^0} &= -0,176dek; \quad \log \frac{1}{T_{o2}^0} = 1,230dek.\end{aligned}$$

Obniżenie wartości współczynnika  $B$  do wartości 0,2 prowadzi do tego, że parametry obiektu sterowania przyjmują wartości  $T_{o1}^0=0,542$ ,  $T_{o2}^0=0,152$ , a LACH przekształca się do postaci  $L_1(\omega^0)$ . Zwiększenie współczynnika  $B$  do wartości 2 prowadzi do zmian stałych obiektu sterowania  $T_{o1}^0=2,466$ ,  $T_{o2}^0=0,034$ , a logarytmiczna amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa (LACH) przyjmuje postać  $L_2(\omega^0)$ . Jak wynika z rys. 5.22 gdy  $B=0,2$  przy wartości częstotliwości  $\omega_k$ , współrzędna LACH  $L_1(\omega_k) = -10dB$ , to znaczy w rozpatrywanym wariancie tłumienie zakłóceń o częstotliwości  $\omega_k$  będzie mniej efektywne niż w wariancie strojenia 3.

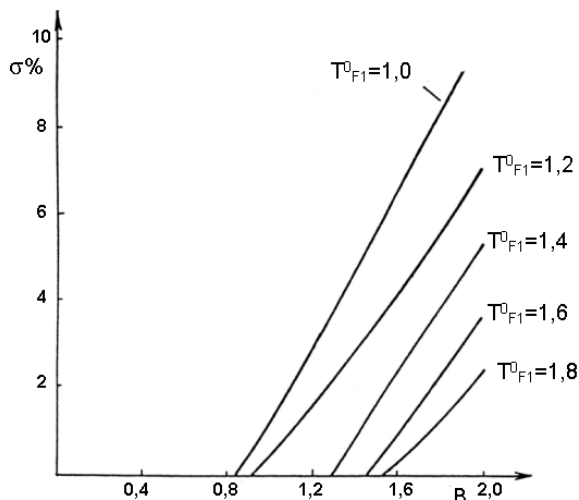
Transmitancje operatorowe układu zamkniętego dla sygnału wejściowego sterującego i zakłócającego w przyjętym wariancie nastrojenia będą wynosiły:

$$\begin{aligned}G_{zs4}(s) &= \frac{1}{K_{sz}} \frac{T_{F1}^0 s + 1}{A_4(s)}, \\ G_{zzl4}(s) &= K_{oz} \frac{\frac{4}{\pi} s}{A_4(s)},\end{aligned}$$

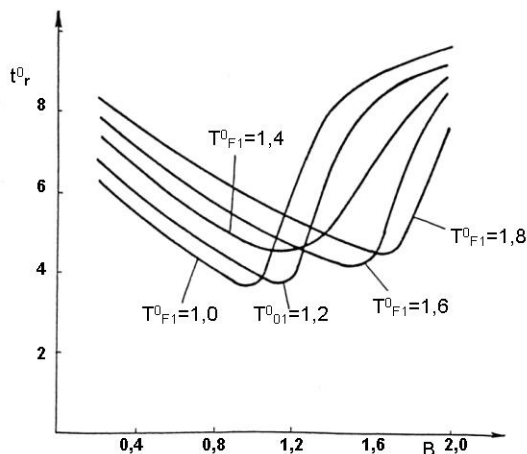
gdzie:

$$\begin{aligned}A_4(s) &= a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3; \\ a_0 &= \frac{4}{\pi} T_{o1}^0 T_{o2}^0 = \frac{1}{3\pi}; \\ a_1 &= \frac{4}{\pi} (T_{o1}^0 + T_{o2}^0) = \frac{4(0,5+B)}{\pi}; \\ a_2 &= \frac{4}{\pi} + T_{F1}^0; \quad a_3 = 1.\end{aligned}$$

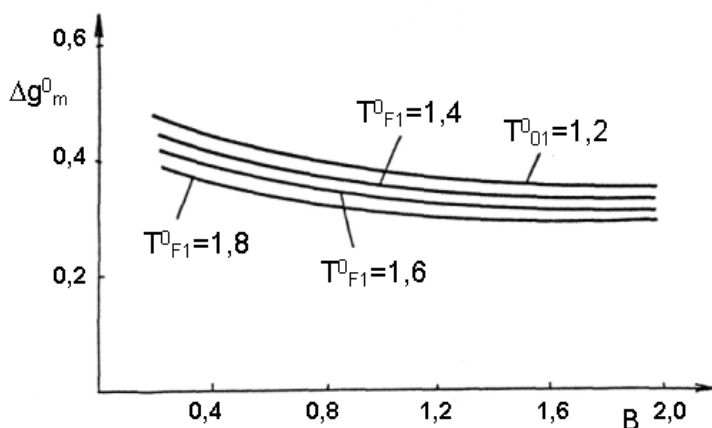
Obliczenia wskaźników jakości sterowania przeprowadzono analogicznie jak w wariancie strojenia 3. Analiza wskaźników jakości wielkości sterującej (rys.5.23 i 5.24) osiągalnych w rozpatrywanym układzie, świadczy o tym, że przy najbardziej racjonalnych nastrojonych wartościach  $T_{F1}^0=1,4 \div 1,5$  wartości przeregulowania i czasu regulacji są o 20%-30% mniejsze niż w wariancie strojenia 3. Przykładowo, w takim samym stopniu zmniejsza się wartość odchyłki dynamicznej (rys. 5.25 i 5.26) w procesie przejściowym w przypadku wielkości zakłócającej.



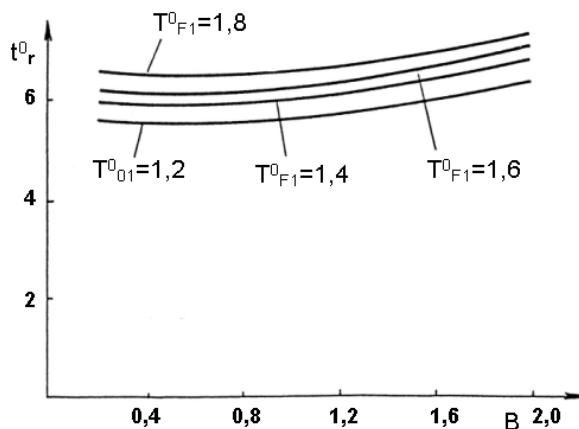
**Rys. 5.23. Zależność przeregulowania od współczynnika  $B$ .  
Wariant strojenia 4**



**Rys. 5.24. Zależność czasu regulacji od współczynnika  $B$ .  
Wariant strojenia 4**



Rys. 5.25. Zależność maksymalnej odchyłki dynamicznej w procesie przejściowym od współczynnika  $B$  przy zakłóceniu. Wariant strojenia 4



Rys. 5.26. Zależność czasu regulacji w procesie przejściowym od współczynnika  $B$  przy zakłóceniu. Wariant strojenia 4

Ceną za wspomniane polepszenie wskaźników jakości regulacji jest zwiększenie wrażliwości układu sterowania adaptacyjnego na zakłócające oddziaływanie częstotliwości krytycznej.

Warto jest zestawzić wyniki obliczeń procesów przejściowych wariantów strojenia 2 i 4, ponieważ warianty te są równoważne co do wrażliwości AC na zakłócenia częstotliwości krytycznej. Zestawienie to świadczy o tym, że najważniejsze w układzie stabilizacji wskaźniki jakości przy zakłóceniu w wariantcie 4 są gorsze. W przypadku najbardziej racjonalnie dobranych wartości  $T_{F1}^0 = 1.4 \div 1.6$  czas procesu przejściowego w przypadku wariantu strojenia 4 jest o 20% ÷ 30% dłuższy przy takich samych wartościach odchyłki maksymalnej wielkości regulowanej.

#### 5.4. Badanie jakości sterowania przy „dużych” zakłóceniach

Uzyskane z wykorzystaniem linearyzowanych modeli wyniki dla układów ze sterowaniem w postaci prędkości posuwu wzdłużnego dotyczą „małych” zakłóceń. Na początku cyklu obróbki każdego przedmiotu - w procesie wcinania - wartość zakłócenia może być bardzo duża z powodu znacznej prędkości podejścia narzędzia skrawającego do przedmiotu. W związku z tym pojawia się problem oceny jakości sterowania przy działaniu „dużych” zakłóceń. W celu zwiększenia jakości sterowania przy wcinaniu należy więc zapewnić na tym etapie sterowanie dwupołożeniowe, z wykorzystaniem różnych czujników ustalających moment wcinania [56, 57]. Dwupołożeniowy algorytm sterowania wskazane jest także wykorzystywać także w celu polepszenia jakości procesów przejściowych w układach automatycznego sterowania obrabiarkami konwencjonalnymi oraz znajdujących się w eksploatacji obrabiarek CNC, w przypadku których ograniczone moce obliczeniowe nie pozwalają na realizację rozpatrywanych algorytmów adaptacyjnych.

W tym celu wyznaczono osiągalną, w przypadku kryterium minimalizacji maksymalnej odchyłki dynamicznej, jakość sterowania przy uwzględnieniu jednostkowego ograniczenia nałożonego na moduł wielkości sterującej  $U$ . Wiadomo [94, 95], że w tych warunkach sterowanie optymalne jest dwupołożeniową funkcją czasu. W dalszym ciągu rozpatruje się w charakterze wielkości regulowanej, siłę skrawania  $F_c$ . Gwałtowne dynamiczne zmiany  $F_c$  mogą prowadzić do uszkodzenia ostrza skrawającego. W czasie analizy uwzględniono podstawową nieliniowość modelu OS w postaci iloczynu parametrów przekroju WS.

Przy skokowej zmianie nadatku na obróbkę można uznać, że głębokość skrawania po wystąpieniu zakłócenia, pozostaje stałą i, w konsekwencji, przyrost siły skrawania, z uwzględnieniem (3.5), jest proporcjonalny do zmian grubości warstwy skrawanej. Grubość warstwy skrawanej w czasie pierwszego obrotu przedmiotu jest określona por. (3.20) przez zmianę prędkości posuwu i przyrost odkształceń sprężystych. Uwzględniając fakt, że w momencie pojawienia się wielkości zakłócającej  $t = 0$  w związku z dwupołożeniowym działaniem regulatora rozpoczyna się zmiana prędkości posuwu, można zapisać następujące równanie siły skrawania w przedziale  $(0, \tau)$  [7]:

$$F_c = F_{co} + qK_z \left[ \Delta b_l v_f t + (b_{l0} + \Delta b_l) \int_0^t \Delta v_f dt - (b_{l0} + \Delta b_l) (\Delta g_x + K_{\kappa_r} \Delta g_y) \right], \quad (5.27)$$

gdzie:  $F_{co}$  - początkowa wartość siły przy prędkości posuwu  $v_f$  i początkowej wartości nadatku  $b_{l0}$ ;  $\Delta v_f$ ,  $\Delta b_l$ ,  $\Delta g_x$ ,  $\Delta g_y$  - odpowiednio przyrost prędkości posuwu, nadatku i odkształceń sprężystych.

Po przekształceniach (5.27) przyrost siły skrawania jest następujący:

$$\Delta F_c = \frac{qK_z}{E} \left[ \Delta b_l v_f t + (b_{lo} + \Delta b_l) \int_0^t \Delta v_f dt \right], \quad (5.28)$$

gdzie:

$$E = 1 + qK_z(b_{lo} + \Delta b_l)(m_x h_x + K_{\kappa_r} m_y h_y) \quad (5.29)$$

Przyjęto, że regulator jest opisany równaniem pierwszego rzędu:

$$T_r \frac{dv_f}{dt} + v_f = K_r U,$$

i w chwili  $t = 0$  na regulator dwupołożeniowy podawany jest przyrost wielkości sterującej  $-\Delta U$ . Wtedy, rozwiązanie równania odchyłki siły można przekształcić do postaci:

$$\Delta F_c = \frac{qK_z K_r}{E} \left[ \Delta b_l U_0 t - (b_{lo} + \Delta b_l) \Delta U t + (b_{lo} + \Delta b_l) U T_r \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_r}\right) \right] \right] \quad (5.30)$$

Wprowadzono względne jednostki, przyjmując wyjściowe oznaczenia: początkowa wartość siły  $F_{co}$ , początkowa wartość nadatku  $b_{lo}$  i przyrost wielkości sterującej, które zapewniają zerową wartość odchyłki wielkości regulowanej, po zakończeniu procesu przejściowego:

$$U_B = \frac{\Delta b_l}{b_{lo} + \Delta b_l} U_0, \quad (5.31)$$

gdzie początkowa wartość sterowania wynosi:

$$U_0 = \frac{F_{co}}{qK_z b_{lo} K_r \tau}.$$

Przekształcając równanie (5.30), otrzymuje się w jednostkach względnych:

$$\Delta F_c^o = \frac{b^o}{E \tau} \left[ t - U^0 t + U^0 T_r \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_r}\right) \right] \right]. \quad (5.32)$$

Krzywa  $F_c^o$  osiąga ekstremum przy:

$$t = t_m = -T_r \ln \frac{|U^0| - 1}{|U^0|}. \quad (5.33)$$

Wyrażenie (5.33) jest określone gdy  $|U^0| > 1$  i dodatkowo zażąda się spełnienia warunku  $t_m \leq \tau$ , z uwzględnieniem którego (5.33) można zapisać w postaci:

$$|U^0| \geq \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T_r}\right)}. \quad (5.34)$$

Ponadto przyjęto, że sterowanie jest realizowane w taki sposób, aby wielkość wyjściowa osiągała ekstremum przy  $t = \tau$ . Wtedy podstawiając w równaniu (5.32) wartość  $U^0$ , określoną w tym przypadku równaniem (5.34), otrzymuje się zależność na maksymalną wartość odchyłki dynamicznej jako:

$$\Delta F_c^o = \frac{b^o}{E} \left[ 1 - \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T_r}\right)} + \frac{T_r}{\tau} \right]. \quad (5.35)$$

W ten sposób, aby zapewnić osiągnięcie maksymalnej wartości odchyłki dynamicznej wewnątrz lub na granicy przedziału  $(0, \tau)$ , należy wybrać sterowanie zgodnie z równaniem (5.34). Wartość  $F_c^o$  można wyznaczyć przez podstawienie w (5.32) wartości  $t = t_m$ , określonej zależnością (5.33). W przypadku, gdy  $t_m = \tau$ , wartość maksymalnej odchyłki jest określona wyrażeniem (5.35).

W przypadku procesu przejściowego wcinania początkowa wartość naddatku na obróbkę  $b_{l0} = 0$  i równanie (5.30) przekształca się do postaci:

$$\Delta F_c = \frac{qK_z K_r b_l}{E} \left[ U_0 t - \Delta U t + U T_r \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_r}\right) \right] \right]. \quad (5.36)$$

Jako wyjściową wartość siły, w rozpatrywanym przypadku, celowym jest przyjąć jej wartość wymaganą  $F_{co}$ , wtedy wyjściowa wartość sterowania wyniesie:

$$U_B = \frac{F_{co}}{qK_z b_l K_r \tau},$$

a równanie sił skrawania we jednostkach względnych przyjmie postać:

$$F_c^o = \frac{1}{E\tau} \left[ U_0^0 t - U^0 t + U^0 T_r \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_r}\right) \right] \right]. \quad (5.37)$$

Na podstawie analizy, krzywa  $F_c(t)$  może osiągnąć ekstremum przy  $t < \tau$  jeśli:

$$|U^0| > U_0^0,$$

tzn. gdy, przyrost sterowania jest większy od jego wartości początkowej, odpowiadającej prędkości posuwu wcinania.

We współczesnych napędach posuwu, których bezwładność jest o rząd mniejsza od bezwładności OS, można przeprowadzić wcinanie z odchyłką dynamiczną wielkości regulowanej bliską zeru przy prędkościach posuwu 2-3 krotnie większych od jego wartości ustalonej.

W związku z wielością warunków funkcjonowania rozpatrywanych układów dynamicznych, przy wyborze kryterium ich optymalizacji, celowe jest podzielić je wstępnie na dwie grupy.

Do grupy pierwszej zalicza się układy dynamiczne z zakłóceniami deterministycznymi, a także układy dynamiczne, w przypadku których, z powodu braku pewnej informacji o charakterystykach zakłóceń, jako model zakłóceń także przyjmuje się najbardziej niekorzystne zakłócenia deterministyczne. W tej grupie w charakterze kryterium optymalizacji przyjęto uogólnione kryterium, sformułowane w postaci sumy całkowitej wartości odchyłki wielkości wyjściowej i ekstremalnych wartości absolutnych krzywej procesu przejściowego przy najbardziej niekorzystnych zakłóceniach.

W przypadku wykorzystania, w charakterze wielkości sterujących w układzie dynamicznym, prędkości posuwu konieczne jest w celu eliminacji niekorzystnych procesów przejściowych ograniczenie pasma przepuszczania obiektu sterowania.

Ustalono, że w klasie układów liniowych z typowym doбором parametrów i ograniczeniem na pasmo przenoszenia, najlepszą jakość sterowania dla przyjętego kryterium, zapewnia dobór parametrów, z rozkładem Butterworth'a, pierwiastków wielomianu charakterystycznego.

W związku z szerokim zakresem zmian parametrów OS należy zapewnić przestrzeganie parametrów układu sterowania UD obrabiarki, przy zmianie warunków skrawania. Uzasadniono możliwość i celowość strojenia parametrów przed rozpoczęciem cyklu obróbki na podstawie informacji technologicznej i otrzymanych modeli OS. Zaproponowano także wiele wariantów wyjściowego strojenia AC, różniących się liczbą parametrów strojonych i poziomem ograniczenia pasma przenoszenia OS.

W pierwszym wariantcie strojenia AC regulator zawiera 3 strojone stałe czasowe, przy czym stała czasowa członu forsującego i stała czasowa członu całkującego są strojone w oparciu o informację o parametrach procesu skrawania i podatności ekwiwalentnego układu sprężystego, a stała czasowa członu aperiodycznego jest strojona w funkcji prędkości obrotowej wrzeciona. Pierwszy wariant strojenia AC zapewnia małą wrażliwość układu na zakłócenia harmoniczne, spowodowane błędami kształtu w przekroju poprzecznym przedmiotu i stabilne wysokie wskaźniki jakości procesów przejściowych, w całym zakresie zmian parametrów OS. W związku ze względną złożonością struktury regulatora, celowa jest jego realizacja programowa z wykorzystaniem układów mikroprocesorowych. Ten wariant strojenia należy wykorzystywać przede wszystkim w obrabiarkach działających w warunkach znacznych zmian asortymentu obrabianych przedmiotów.

W drugim wariantcie strojenia, w odróżnieniu od pierwszego, stała czasowa członu całkującego strojona jest tylko w funkcji prędkości obrotowej wrzeciona. Optymalne wartości wielkości strojonych stałej czasowej członu całkującego wynoszą w jednostkach względnych  $1,4 \div 1,6$ . Przy takim strojeniu wskaźniki jakości regulacji są bliskie wskaźnikom osiąganym w wariantcie strojenia 1. Ale układ jest bardziej wrażliwy na zakłócenia harmoniczne, co umożliwia stosowanie tego wariantu w warunkach gwarantowanego niskiego poziomu tych zakłóceń.



W trzecim wariancie zestrojenia AC, strojenie parametrów regulatora realizuje się podobnie jak w wariancie 2, ale pasmo przenoszenia AC jest obniżone dzięki wyborowi większej stałej czasowej członu forsującego. Obniżenie wrażliwości układu na zakłócenia harmoniczne osiąga się kosztem pogorszenia o 20%÷30% wskaźników jakości regulacji w porównaniu z wariantem 2. Stosowanie tego strojenia jest celowe w warunkach wysokiego poziomu zakłóceń harmonicznych.

W czwartym wariancie strojenia regulator zawiera dwa strojone parametry: stałą czasową członu forsującego, której strojenie odbywa się podobnie jak w wariantach poprzednich, i stałą czasową członu całkowitego, strojonego w funkcji prędkości obrotowej wrzeciona. Racjonalne względne wartości stałej czasowej członu całkowitego w tym wariancie wynoszą 1,4÷1,6. Wskaźniki jakości procesów przejściowych przy zakłóceniach w postaci zmiany naddatku wzdłuż osi części są mniejsze, niż w wariancie 2, przy takiej samej wrażliwości na zakłócenia harmoniczne.

Obliczenia charakterystyk dynamicznych AC wykonano w szerokim zakresie zmian parametrów OS. Przy znanym, bardziej wąskim zakresie zmian parametrów OS, na podstawie otrzymanych wyników można wybrać wariant i parametry strojenia, zapewniające osiągnięcie technicznie optymalnych charakterystyk AC. W szczególności, w warunkach produkcji seryjnej przy znanych statystycznych parametrach obrabianych części i parametrów procesu skrawania można, w oparciu o uzyskane krzywe wskaźników jakości, wybrać stałe strojone parametry regulatora, zapewniające osiągnięcie wysokich wskaźników jakości procesu regulacji.

## 6. Realizacja optymalnych i adaptacyjnych algorytmów sterowania odkształceniami sprężystymi układów dynamicznych

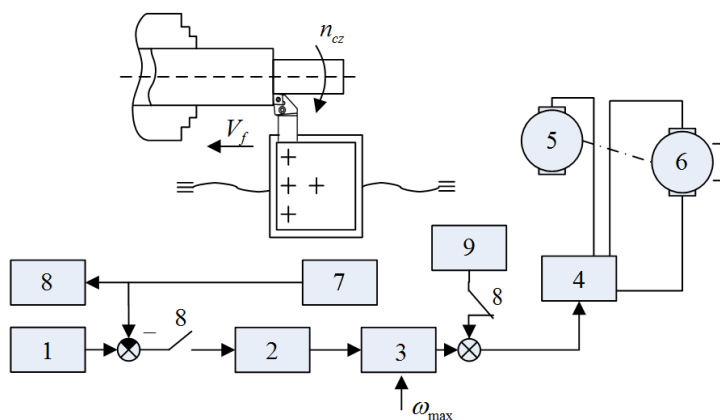
Przedstawione wyżej algorytmy sterowania odkształceniami sprężystymi układów dynamicznych w urządzeniach mechanicznych i zasady budowy UAS zrealizowane zostały w postaci konkretnych urządzeń. Znalazło to swoje odzwierciedlenie:

- w układach sterowania odkształceniami zmiennych siłowych parametrów skrawania tokarek i szlifierek przy zastosowaniu jako oddziaływania sterującego prędkości posuwu wzdłużnego;
- w UAS stanem sprężystości-odkształcalnym części za pomocą dodatkowych oddziaływań siłowych;
- w układzie aktywnej wibroizolacji precyzyjnego kompleksu optyczno-mechanicznego.

### 6.1. Układ automatycznego sterowania odkształceniami sprężystymi układów dynamicznych obrabiarek w kanale posuwu

Uzyskane wyżej algorytmy sterowania odkształceniami sprężystymi układów dynamicznych obrabiarek z zastosowaniem jako oddziaływania sterującego prędkości posuwu wzdłużnego były zrealizowane w kilku wariantach układu automatycznego sterowania dla tokarek uniwersalnych i szlifierek oraz obrabiarek NC [120 - 125].

Uogólniony schemat funkcjonalny sterowania zmiennymi siłowymi procesu technologicznego pokazano na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Funkcjonalny schemat UAS układu dynamicznego tokarki

Zawiera on nastawnik wartości stabilizowanej odkształceń sprężystych lub siły skrawania 1, regulator 2, urządzenie ograniczenia prędkości posuwu wzdłużnego 3, regulowany napęd elektryczny posuwu wzdłużnego zawierający

sterowany przetwornik 4, silnik posuwu 5, prądnicę tachometryczną 6. Napęd elektryczny posuwu przez parę „śruba-nakrętka” tworzy oddziaływanie sterujące na układ dynamiczny obrabiarki. Pomiar wielkości regulowanej dokonywany jest przez czujnik 7. Sygnał z czujnika podawany jest w postaci sygnału sprzężenia zwrotnego na wejście układu, a także na element przekątnikowy 8, za pomocą którego dobierane są parametry wcinania. Prędkość posuwu wcinania określana jest w nastawniku 9.

W kanale sprzężenia zwrotnego w różnych wariantach układu stosowane są czujniki odkształceń sprężystych, czujniki pośredniego pomiaru siły skrawania, czujniki optoelektroniczne kontroli wymiaru obrobionych części [125].

Układ automatycznego sterowania odkształceniami sprężystymi układu dynamicznego dla współrzędnej  $Z$  zostały wykonane i eksperymentalnie przebadane na tokarce o podwyższonej dokładności 16B16P.

Wielkość regulowana - odkształcenia sprężyste wzdłuż współrzędnej  $Z$ , są proporcjonalne do składowej siły skrawania  $F_c$ , były mierzone za pomocą czujnika przemieszczeń liniowych.

Charakterystyczną cechą pracy układu na tokarkach i szlifierkach jest występowanie wcinania, w czasie którego wielkość posuwu w istotny sposób przewyższa ustaloną quasi wartość. Przy dosunięciu narzędzia skrawającego do przedmiotu układ jest otwarty przez kontakt elementu przekątnikowego 8, a posuw wcinania ustalany przez nastawnik posuwu wcinania 9. Przy styku krawędzi skrawającej ostrza z przedmiotem pojawia się sygnał na wyjściu czujnika siły 7 i przez element przekątnikowy 8 tworzona jest przekątnikowa zmiana sygnału na wyjściu tyrystorowego napędu elektrycznego, co gwarantuje intensywne obniżenie prędkości posuwu wzdłużnego, a także podawana jest komenda zamknięcia układu i odłączenie sygnału posuwu wcinania.

W trybie stabilizacji współrzędnej wyjściowej na wielkość oddziaływania sterującego nakłada się dodatkowe ograniczenie, uwarunkowane wymaganiami dotyczącymi chropowatości obrobionej powierzchni. Prędkość graniczna posuwu wzdłużnego w układzie automatycznego sterowania ograniczana jest za pomocą elementu nieliniowego o regulowanym poziomie nasycenia.

W celu eksperymentalnego sprawdzenia wskaźników jakości regulacji osiąganych w układach automatycznego sterowania, toczono specjalnie wykonane przedmioty ze skokowo zmieniającym się naddatkiem. Do badań użyto przedmioty o różnej maksymalnej średnicy, co umożliwiło w szerokich granicach zmieniać prędkość obrotową napędu wrzeciennika. Występowanie na przedmiotach odcinków z równomiernym naddatkiem umożliwiło w prosty sposób określenie ustalonych odchyłek odkształceń sprężystych, a zmiana naddatku przy przejściu od jednego odcinka do drugiego symulowała stopniowe oddziaływanie zakłócające w UAS i umożliwiała ocenę jakości dynamicznej regulacji.

W procesie eksperymentów parametry regulatora zrealizowanego na bazie regulatorów operacyjnych wybierano zgodnie z metodyką strojenia przedstawioną w rozdziale 5. Procesy przejściowe w układzie automatycznego sterowania rejestrowano za pomocą oscylatora wielokanałowego, na wejścia którego podawano

sygnały z czujnika odkształceń sprężystych 7 i z generatora 6 napędu elektrycznego posuwu wzdłużnego. W celu uszczegółowienia wskaźników jakości przy działaniu „dużych” zakłóceń wykonywano oscylogramy procesów przejściowych toczenia przedmiotów przy stopniowanej dwukrotnie zmianie naddatku na obróbkę, co gwarantowało najbardziej niesprzyjający charakter zakłóceń. Typowe oscylogramy procesów przejściowych dla pokazanych sił przedstawione zostały na rys. 6.2a,b. Pierwszy z nich został otrzymany przy stopniowanym wzroście naddatku, natomiast drugi przy zmniejszeniu.

Wyniki opracowania szeregu podobnych oscylogramów świadczą, że dla pokazanego oddziaływania zakłócającego wielkość przeregulowania znajduje się w przedziale 20% – 25%. Wskaźniki jakości regulowania procesów przejściowych w UAS oceniano według oscylogramów charakterystyk przejściowych (jedna z nich pokazana jest na rys. 6.2c). Wyniki opracowania charakterystyk przejściowych, uzyskanych przy różnych parametrach skrawania, umożliwiają sformułowanie wniosku, że procesy przejściowe według oddziaływania sterującego są przeregulowane nie więcej niż 5% – 10%, a czas regulacji dla 10% - ej strefy dopuszczalnych odchyłek nie przekracza 0,3 – 0,4s.

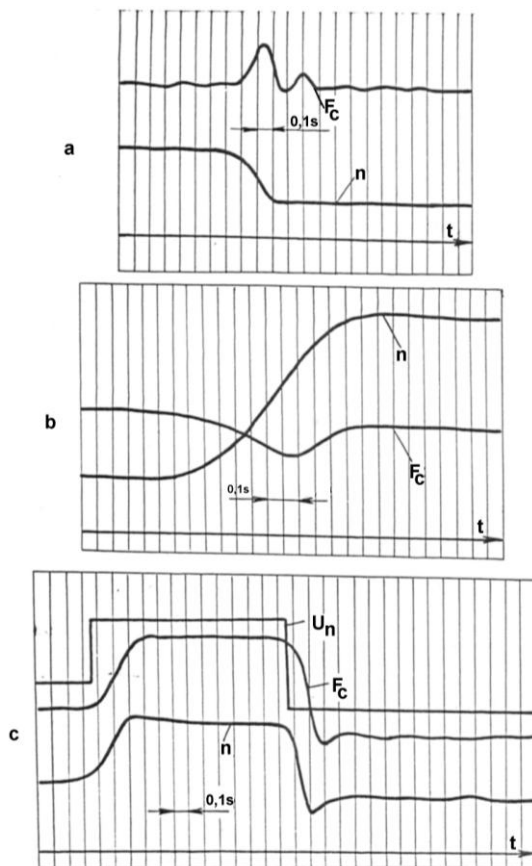
Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych wskaźników jakości procesu regulacji dość dobrze odpowiadają danym analizy teoretycznej i potwierdzają wniosek, że w syntezywanym UAS uzyskiwane są zadawalające wskaźniki jakości w całym zakresie parametrów pracy obrabiarki.

Charakterystyki dokładności obrabiarek, wyposażonych w układ automatycznego sterowania odkształceniami sprężystymi, mogą być znacznie zwiększone poprzez zamykanie UAS bezpośrednio według wymiaru obrabianej części. Badania eksperymentalne UAS w warunkach laboratoryjnych przy zastosowaniu do tych celów czujników optoelektronicznych potwierdzają potencjalną możliwość ich wykorzystania [125]. Jednak zastosowanie podobnych czujników w urządzeniach produkcyjnych jest utrudnione w związku z trudnymi warunkami ich eksploatacji. W związku z tym wydaje się, że najbardziej perspektywiczne jest zastosowanie czujników odkształceń sprężystych z czułymi elementami tensometrycznymi, w szczególności opracowanymi w Baldwin Hottinger i MGM Vishay.

W związku z wadami konstrukcyjnymi posiadanych czujników odkształceń sprężystych ich ustawienie na obrabiarce obniża jej możliwości technologiczne. Przy budowie układów automatycznego sterowania układami dynamicznymi szeroko stosowane są metody pomiaru pośredniego współrzędnych regulowanych na podstawie prądu i mocy silnika wrzeciennika.

Bazując na powyższym, wykonano i eksperymentalnie przebadano układ stabilizacji z pośrednim pomiarem siły skrawania i odkształceń sprężystych układu dynamicznego. Jako element wykonawczy został zastosowany regulator wykonany na bazie wzmacniaczy operacyjnych. Sygnałem sterującym była moc silnika napędu wrzeciennika. Regulator ten zaimplementowano do obrabiarek 16B16P i 16M16 (obrabiarzka ta posiada hydrauliczny suport kopiujący). Badania wykonano zgodnie z przedstawioną uprzednio metodyką, dodatkowo za pomocą hydraulicznego

suportu kopiującego realizowano toczenie wałków stopniowanych z przedmiotów walcowych. Zastosowanie układu automa-tycznego sterowania przy obróbce takich przedmiotów w wielu przypadkach umożliwia zastąpienie obróbki dwuprzejściowej jednoprzejściową. W szczególności, eksperymenty dotyczące wykonania partii części wymienionego wyżej typu pokazały, że zmniejszenie czasu jednostkowego w wyniku zastosowania UAS jest równe 25% – 30%.



**Rys. 6.2. Oscylogramy procesów przejściowych w UAS: a) przy stopniowanym wzroście naddatku; b) przy stopniowanym zmniejszeniu naddatku; c) proces przejściowy według oddziaływania sterującego**

W trakcie badań urządzenie pomiarowe umożliwiło obserwację sygnałów pochodzących z czujnika mocy silnika napędu wrzeciennika oraz czujnika przemieszczeń sprężystych. Jak pokazuje analiza wyników badań eksperymentalnych, wskaźniki dynamiczne procesu regulacji w układzie o pośrednim pomiarze parametrów siłowych układu dynamicznego obrabiarki są o 10÷15% gorsze niż w układach automatycznego sterowania z czujnikiem dynamometrycznym. Spowodowane jest to inercyjnością czujnika współrzędnej stabilizowanej.

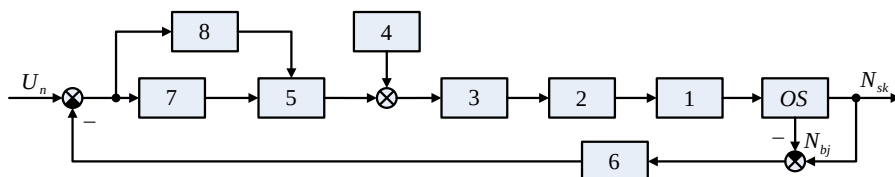
Zastosowanie rozpatrzonych wariantów budowy UAS układu dynamicznego celowe jest dla tokarek i szlifierek bez NC i pracujących w warunkach produkcji wielkoseryjnej, kiedy nie trzeba często przezbrajać obrabiarki i odpowiednio układy automatycznego sterowania.

Zbyt małe możliwości obliczeniowe eksploatowanych układów NC w końcu ubiegłego wieku w wielu przypadkach wymuszały realizację sprzętową regulatorów UAS. Przykładami takich układów są opracowane przy udziale autorów układy stabilizacji mocy skrawania, zastosowane na obrabiarkach 16B16F i 16K30F3.

Schemat funkcjonalny jednego wariantu takiego układu przedstawiono na rys. 6.3. W skład UAS wchodzi elektryczny napęd krokowy z mechanizmem posuwu (1), interpolator (2), generator posuwu (3), nastawnik parametrów interpolacji (4). Wymagane właściwości dynamiczne układowi zapewnia regulator (5). Wielkość regulowana mierzona jest czujnikiem (6) i oceniana przy zastosowaniu jako napędu wrzeciennika silnika asynchronicznego według jego mocy. W przypadku zastosowania silnika prądu stałego – według prądu twornika z kompensacji mocy  $N_{bj}$  (prądu) ruchu jałowego. Sygnał wyjściowy regulatora określany jest na wyjściu generatora posuwu z sygnału nastawnika trybu interpolacji. Powoduje to zmniejszenie częstotliwości generatora posuwu i odpowiednio wielkości posuwu względem maksymalnej wielkości zapisanej w programie obróbki na danym odcinku interpolacji.

W układzie w wyniku wprowadzenia elementu nieliniowego (7) ze współczynnikiem wzmocnienia zmieniającym się w funkcji sygnału błędu, realizowana jest funkcjonalna zasada sterowania, częściowo kompensująca zmienność współczynnika wzmocnienia OS. Dla polepszenia wskaźników jakości procesu przejściowego przy wcinaniu stosowana jest nieliniowa zasada sterowania, realizowana za pomocą elementu przekaźnikowego (8) i gwarantująca oddziaływanie przekaźnikowe na wejścia układu w celu intensyfikacji obniżenia prędkości posuwu.

Badania eksperymentalne rozpatrywanego wariantu UAS pokazały, że układ gwarantuje zadawalające wskaźniki jakości regulacji w całym zakresie technologicznym pracy obrabiarki – wielkość przeregulowania dynamicznego współrzędnej sterowanej przy wcinaniu narzędzia w półfabrykat i stopniowanej dwukrotnej zmianie naddatku na obróbkę w zasadzie nie przekracza 30% – 35% przy czasie regulacji 0,3 – 0,4s.



Rys. 6.3. Schemat funkcjonalny układu stabilizacji mocy skrawania

Dla obrabiarek ze współczesnymi mikroprocesorowymi układami sterowania według algorytmów przedstawionych wyżej (rozdział 5), może być wykonane automatyczne strojenie parametrów regulatora według informacji apriorycznej. Schemat blokowy regulatora cyfrowego, realizującego otrzymany w rozdziale 5 algorytm sterowania układem dynamicznym obrabiarki skrawającej [12] z korektą strojenia według informacji apriorycznej, dla AC stabilizacji odkształceń sprężystych w kierunku współrzędnej  $Y$  przy strojeniu według pierwszego wariantu pokazany jest na rys. 6.4.

Do obliczenia stałych czasowych i współczynnika wzmocnienia TO regulatora wykorzystywana jest informacja o zmianie parametrów OS i AC:

- współczynników wzmocnienia napędu elektrycznego i obwodu sprzężenia zwrotnego  $K_{ne}$ ,  $K_{sz}$ ;
- obliczeniowych wartości podatności obrabiarki dla poszczególnych współrzędnych  $h_{obx}$ ,  $h_{oby}$ ;
- okresu kwantowania sygnałów  $\Delta t$  oraz zmiennej informacji technologicznej o obliczeniowych wartościach grubości i szerokości warstwy skrawanej  $a, b$ ;
- prędkości obrotowej przedmiotu  $n$  i jej długości  $L$ ;
- modułu sprężystości obrabianego przedmiotu  $E$  i granicy wytrzymałości obrabianego materiału  $\sigma_{Re}$ ;
- współczynnika skrawania  $K_{sk}$  i kącie przystawienia  $\kappa_r$ .

Z uwzględnieniem uzasadnionej w podrozdziale 5.3.1 możliwości uproszczenia transmitancji regulatora można ją przedstawić w postaci:

$$G_{r1}(s) = \frac{(T_{F1}^0 s + 1)}{T_{cal}^0 s (T_{ek}^0 s + 1)}.$$

Parametry regulatora zgodnie z (5.21) w jednostkach względnych opisują zależności:

$$T_{F1}^o = T_{o1n}^o; T_{ek}^o = 1/\pi; T_{cal}^o = \frac{2}{\pi} K_{ne} K_{or} K_{sz},$$

a rzeczywiste wartości parametrów regulatora oblicza się z zależności:

$$T_{F1} = T_{F1}^o \tau; T_{cal} = T_{cal}^o \tau; T_{ek} = T_{ek}^o \tau.$$

Uwzględniono, że dla pierwszego wariantu nastawienia przyjmuje się

$$T_{F1}^0 = T_{01}^0.$$

Wartości obliczeniowe zmienianych parametrów obiektu sterowania obliczane są z przedstawionych wyżej zależności:

- podatności układu MDS  $h_y$  (zależność obliczeniowa przedstawiona została dla przypadku zamocowania przedmiotu w kłach) według (2.15) z uwzględnieniem stosunku dla maksymalnego odkształcenia przedmiotu, współczynnika  $B$  według zależności (3.12);

- współczynnika wzmocnienia procesu skrawania  $m_i, n_i$  według (2.6) z uwzględnieniem stosunku  $q = K_{sk} \cdot \sigma_{Re}$ ;
- współczynnika wzmocnienia obiektu według zależności (3.19), (3.10), które dla rozpatrywanej współrzędnej przekształcane są do postaci:

$$K_{or} = \frac{m_y h_y}{1 + n_y h_y}.$$

W strukturze regulatora można wyodrębnić człon aperiodyczny o stałą czasowej  $T_{ek}$  i regulator proporcjonalno - całkujący (PC). Rozpatrując jako sygnał wejściowy PC regulatora sygnału błędu  $x_\delta$ , a jako wyjściowy  $x_1$ , równanie regulatora można zapisać w postaci:

$$x_1(t) = K_{r0} x_\delta(t) + \frac{1}{T_{cal}} \int_0^t x_\delta(t) dt; \quad K_{r0} = \frac{T_{F1}}{T_{cal}}. \quad (6.1)$$

Dla dyskretnych momentów czasu  $n \cdot \Delta t$ ,  $n = 0, 1, \dots$ , w przybliżeniu można zapisać [119]:

$$\int x_\delta(t) dt \cong \int_0^{t-\Delta t} x_\delta(t) dt + \frac{x_\delta[n \cdot \Delta t] - x_\delta[(n-1)\Delta t]}{2} \Delta t.$$

Po przekształceniu ostatniej zależności z uwzględnieniem (6.1) w dyskretniej postaci otrzymamy

$$x_1[n\Delta t] = K_{r1} \cdot x_\delta[n\Delta t] + K_{r2} \cdot x_\delta[(n-1)\Delta t] + x_1[(n-1)\Delta t], \quad (6.2)$$

gdzie:

$$K_{r1} = K_{r0} + \frac{\Delta t}{2T_{cal}}; \quad K_{r2} = \frac{\Delta t}{2T_{cal}} - K_{r0}.$$

Dla członu aperiodycznego rozpatrując wartość sygnałów wejściowego  $x_1$  i wyjściowego  $x_r$  w dyskretnych momentach czasu i zamieniając pochodną skończona różnicą

$$\frac{dx_r}{dt} \cong \frac{x_r[n\Delta t] - x_r[(n-1)\Delta t]}{\Delta t},$$

otrzymamy

$$x_r[n\Delta t] = K_{r3}[n\Delta t] + K_{r4}[(n-1)\Delta t], \quad (6.3)$$

gdzie:

$$K_{r3} = \frac{1}{\frac{T_{ek}}{\Delta t} + 1}; \quad K_{r4} = \frac{T_{ek} / \Delta t}{\frac{T_{ek}}{\Delta t} + 1}.$$

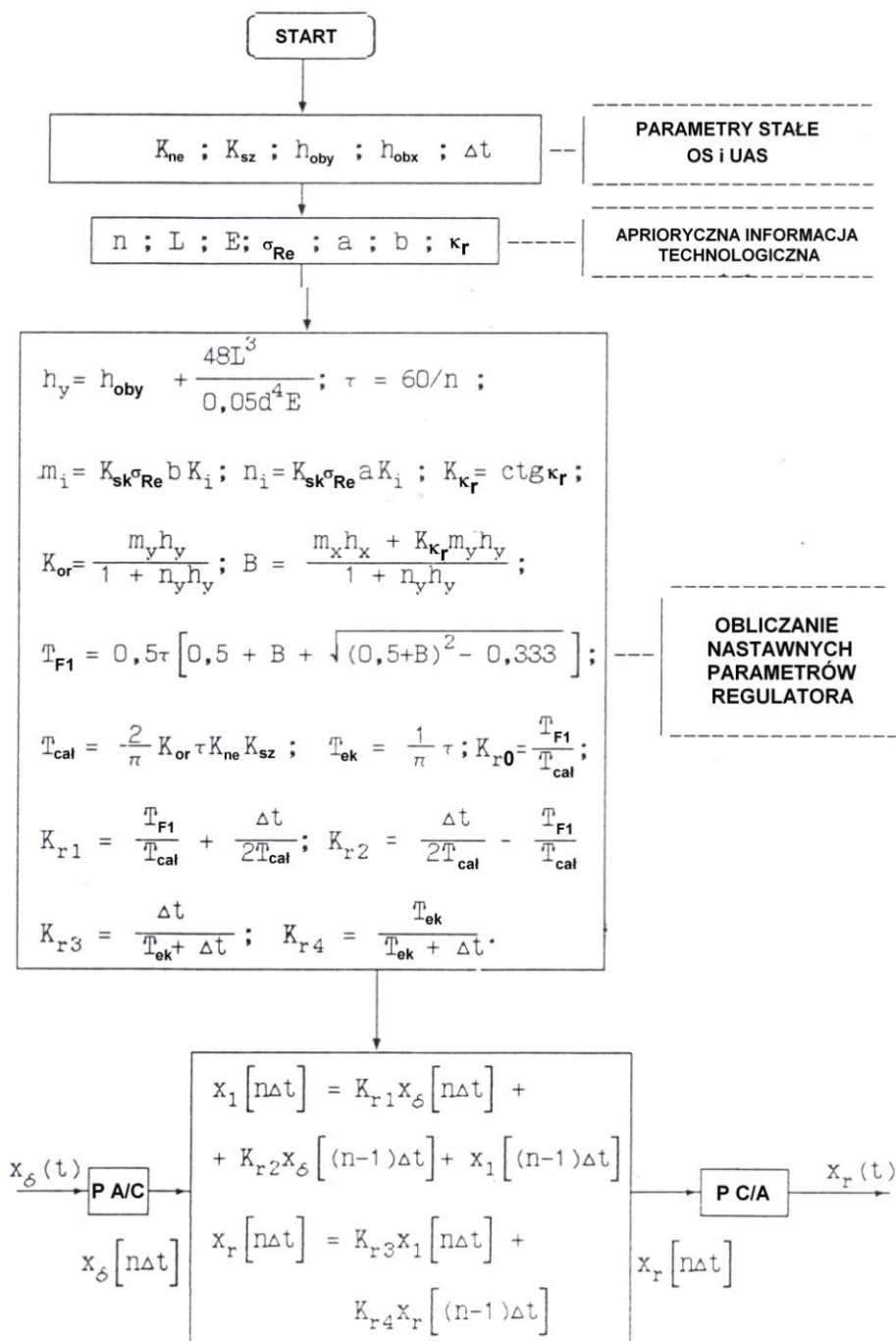
Zgodnie z zależnościami (6.2) i (6.3) realizowany jest programowo regulator adaptacyjny (rys. 6.4).



Na podstawie wyników badań eksperymentalnych opracowanych układów należy stwierdzić, że przy zastosowaniu jako wielkości regulowanej zmiennych bezpośrednio charakteryzujących odkształcenia sprężyste UD lub wymiar obrobionej przedmiotu, można zwiększyć zarówno wydajność, jak i dokładność obróbki przedmiotu.

W układzie z czujnikami pośrednio mierzącymi zmienne siłowe procesu skrawania, przy obróbce przedmiotu ze zmieniającym się naddatkiem od 20% do 30%, zwiększa się wydajność procesu technologicznego bez istotnego polepszania jakościowych wskaźników obróbki. Oprócz tego inercyjność czujników pomiaru pośredniego współrzędnej regulowanej prowadzi do pogorszenia jakości regulacji.

Efektywnym sposobem osiągnięcia wysokich wskaźników jakościowych regulacji przy wystarczająco prostej realizacji technicznej w warunkach szerokiego zakresu zmienności parametrów UD maszyn technologicznych jest, realizowane na bazie mikroprocesorowych układów sterowania, strojenie AC przed rozpoczęciem cyklu, według apriorycznej informacji technologicznej.



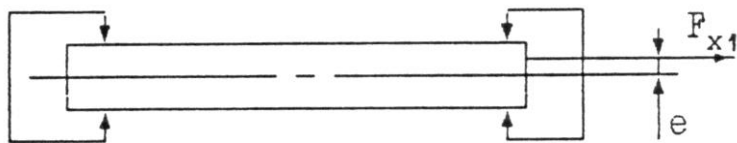
Rys. 6.4. Schemat blokowy realizacji programowej regulatora adaptacyjnego

## 6.2. Układ automatycznego sterowania odkształceniami sprężystymi części o małej sztywności w kanale dodatkowych oddziaływań siłowych

Sterowanie automatyczne odkształceniami sprężystymi przedmiotu w układzie dynamicznym w wyniku realizacji dodatkowych oddziaływań siłowych, zmieniających jej stan sprężysto-odkształcalny, pozwala w istotny sposób podnieść dokładność obróbki przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności procesu technologicznego [91, 92].

Badania eksperymentalne UAS rozpatrywanego typu pokazały, że najprostsze w realizacji technicznej, z punktu widzenia zwiększenia dokładności obróbki części o małej sztywności są UAS, w których jako oddziaływania sterujące wykorzystywana jest siła rozciągająca, działająca wzdłuż osi części oraz siła mimośrodowa.

Siła rozciągająca  $F_{x1}$ , przykładana mimośrodowo  $e$  tworzy dodatkowy moment zginający w kierunku przeciwnym momentom zginającym pochodzącym od siły skrawania (rys.6.5) [91].



Rys. 6.5. Schemat przyłożenia mimośrodowej siły rozciągającej  $F_{x1}$

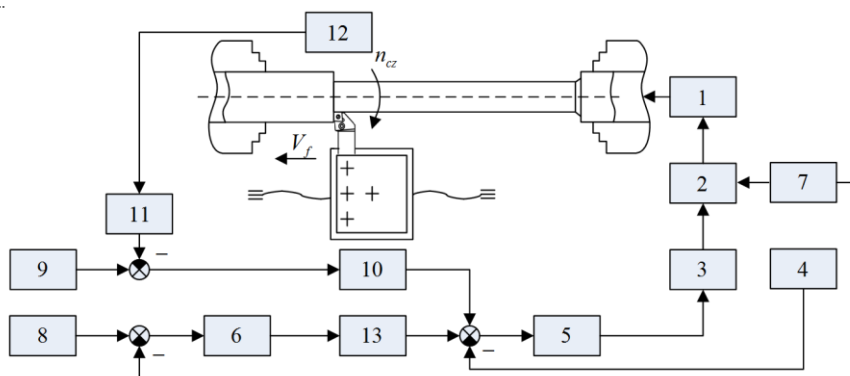
Warianty modernizacji i opracowane nowe konstrukcje koników obrabiarek do zautomatyzowanego toczenia i szlifowania wałów o małej sztywności z przyłożeniem siły rozciągającej są dokładnie przedstawione w [92, 126]. Opracowane sposoby obróbki przedmiotów o małej sztywności mogą być realizowane zarówno przy zastosowaniu układów otwartych z programową zmianą oddziaływań sterujących w funkcji współrzędnej przyłożenia siły skrawania wzdłuż osi przedmiotu jak i w zamkniętych UAS stabilizacji odkształceń sprężystych, gwarantujących bardzo wysoką dokładność obróbki. Realizacja UAS jest możliwa zarówno na obrabiarkach konwencjonalnych, jak i NC.

Przedstawione wyżej zasady budowy układów sterowania automatycznego odkształceniami sprężystymi UD w wyniku dodatkowych oddziaływań siłowych były zrealizowane przy współudziale autorów w wykonanych eksperymentalnie różnych UAS na bazie tokarek modeli 1604P, 1E611, 1K62, wyposażonych w czujniki odkształceń sprężystych i koniki o specjalnej konstrukcji.

Jako oddziaływania sterujące na przedmiot obrabiany zastosowano siły rozciągające przykładane osiowoosymetrycznie i mimośrodowo. Syntezę regulatorów odkształceń sprężystych UAS wykonano na bazie otrzymanych modeli matematycznych OS z uwzględnieniem właściwości dynamicznych elementów wykonawczych.

Podstawowe bloki układu sterowania z zastosowaniem elementów w postaci pneumatycznego cylindra siłowego opisane są w [92]. W drugim wariancie UAS wykonano wg schematu regulowania nadążnego. Schemat funkcjonalny układu z pokazanym elementem wykonawczym przestawiono na rys. 6.6. [68]. Siła rozciągająca część wytwarzana jest przez mechanizm wykonawczy (1) przy pomocy regulowanego napędu elektrycznego z wykorzystaniem silnika (2) prądu stałego obcowzbudnego i sterowanym przetwornikiem [127]. Obwód wewnętrzny układu sterowania napędem elektrycznym zamknięty jest przez czujnik prądu twornika i regulator prądu. Moment na wale silnika jest proporcjonalny do prądu twornika, co umożliwia zastosowanie w rozpatrywanym schemacie czujnika prądu jako czujnika (4) siły rozciągającej. Odpowiednio regulator prądu wypełnia funkcję regulatora (5) siły rozciągającej.

Przy pomocy obwodu zewnętrznego układu sterowania napędem elektrycznym z regulatorem (6) prędkości i czujnikiem (7) prędkości (prądnicą tachometryczną mechanicznie połączoną z wałem silnika 2) uzyskiwana jest stabilizacja wymaganej przez czujnik (8) wartości prędkości silnika (2) na etapie tworzenia początkowej siły rozciągającej.



**Rys. 6.6. Schemat blokowy UAS odkształceniami sprężystymi części o małej sztywności**

W obwód regulacji odkształceń sprężystych wchodzi nastawnik odkształceń sprężystych (9), regulator odkształceń sprężystych (10), blok wyodrębnienia modułu (11) i czujnik odkształceń sprężystych (12).

Przy obróbce mechanicznej osiowosymetrycznych przedmiotów o małej sztywności po zamocowaniu obrabianej części w uchwytach, z których jeden jest połączony z mechanizmem wykonawczym (1), załączane jest urządzenie do zwiększenia dokładności obróbki tych części [68]. W pierwszym etapie urządzenie pracuje w trybie wytworzenia wymaganej początkowej siły rozciągającej. Etap ten przebiega w sposób następujący. W początkowym momencie napięcie na wyjściach czujnika odkształceń sprężystych (12), czujnika prędkości (7) i czujnika siły rozciągającej (4) jest równe zero. Również napięcie

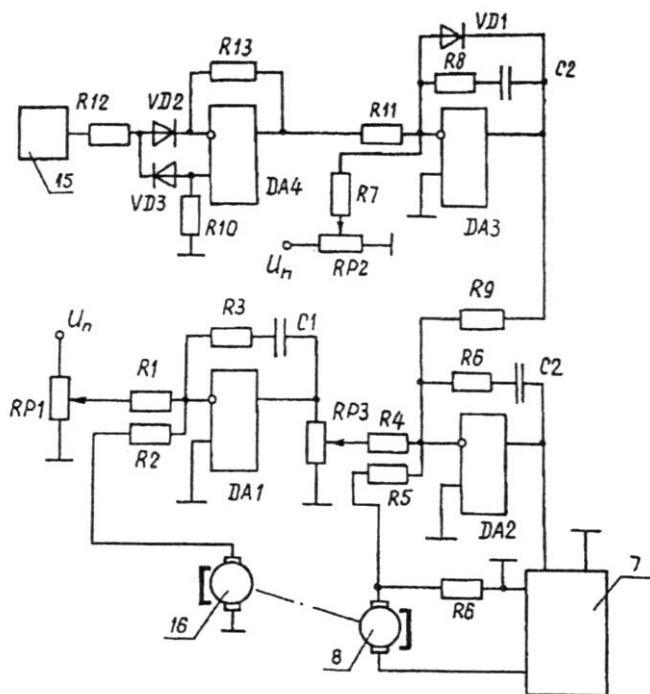
na wyjściu regulatora odkształceń sprężystych (10) jest równe zero. Na regulator prędkości (6) przez zespół porównania podawane jest napięcie z nastawnika prędkości (8) i regulator prędkości (6) znajduje się w stanie nasycenia; napięcie wyjściowe (6) przez nastawnik początkowej siły rozciągającej (13), zespół sumowania, regulator siły rozciągającej, przetwornik sterowany (3) i silnik elektryczny (2), podawane jest na mechanizm wykonawczy (1). Intensywnie wzrasta prędkość silnika elektrycznego (2) i mechanizmu wykonawczego (1). Po osiągnięciu wymaganej prędkości regulator prędkości (6) wychodzi ze stanu nasycenia i następnie realizowany jest tryb stabilizacji wymaganej wartości prędkości. Tak więc przemieszczenie mechanizmu wykonawczego (1) wykonywane jest z określoną prędkością, co wyklucza niedopuszczalne szarpnięcia.

Po wybraniu swobodnego przemieszczenia prędkość silnika (2) zmniejsza się i regulator prędkości (6) znowu osiąga stan nasycenia, a urządzenie pracuje w trybie stabilizacji wymaganej początkowej siły rozciągającej, wartość której jest proporcjonalna do wyjściowego napięcia nastawnika (13) początkowej siły rozciągającej, ustalanego równolegle z regulatorem prędkości (6). Po osiągnięciu początkowej siły rozciągającej włączany jest posuw wzdłużny i rozpoczyna się proces obróbki części.

Na tym etapie urządzenie pracuje w trybie stabilizacji wymaganej wartości odkształceń sprężystych w wyniku zmiany wielkości siły rozciągającej. Wymagana wartość odkształceń sprężystych może, w szczególności, być ustalona jako równa zero. Przy tym dzięki wprowadzeniu bloku (11) wyodrębnienia modułu, UAS zwiększa wartość siły rozciągającej przy zwiększaniu się modułu odkształceń sprężystych niezależnie od ich znaku. Pozwala to kompensować odkształcenia sprężyste jak w przypadku, kiedy ekwiwalentna siła skrawania powoduje przemieszczenie przedmiotu obrabianego w kierunku ostrza, jak i w sytuacji, kiedy ma miejsce odsunięcie części od ostrza.

Regulatory rozpatrywanego urządzenia wykonano z zastosowaniem wzmacniaczy operacyjnych, a ich parametry wybrano zgodnie z metodyką syntezy stosowaną w układach sterowania nadążnego [128].

Na rys. 6.7 przedstawiono poglądowy schemat elektryczny realizacji urządzenia. Nastawnik prędkości (8) i nastawnik odkształceń sprężystych (9) wykonano w postaci potencjometrów, odpowiednio RP1 i RP2, podłączonych do źródła napięcia  $U_n$ . Pierwszy zespół porównania i regulator prędkości (6) zrealizowany jest w oparciu o wzmacniacz operacyjny DA1. Na wejściu przetwornikowym wzmacniacza za pomocą rezystorów RP1 i RP2 algebraicznie sumowany jest sygnał nastawnika prędkości (8) i sygnał czujnika prędkości (7). W łańcuch sprężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego DA1 włączone są R1, pojemność C1, co nadaje schematowi własności regulatora proporcjonalno-całkującego. Zastosowanie takiego regulatora gwarantuje wysoką dokładność sterowania w trybach ustalonym i przejściowym [128].



**Rys. 6.7. Poglądowy schemat elektryczny urządzenia**

Nastawnik początkowej siły napinającej (13) wykonany jest w postaci potencjometru RP3, włączonego w wyjściowy łańcuch wzmacniacza operacyjnego DA1. Jak odnotowano wyżej, po wybraniu swobodnego przemieszczenia mechanizmu wykonawczego (1) prędkość silnika elektrycznego (2) i odpowiednio sygnał czujnika prędkości (7) są równe zero. Przy tym na wejście regulatora prędkości 6 postępuje tylko sygnał nastawnika prędkości (8), w wyniku działania tego sygnału proporcjonalno-całkujący regulator prędkości (6), wykonany w oparciu o wzmacniacz operacyjny DA1, znajduje się w stanie nasycenia – napięcie na potencjometrze RP3 pozostaje stałe, odpowiednio pozostaje niezmiennie napięcie zdejmowane z nastawnika początkowej siły rozciągającej (13).

Regulator siły rozciągającej (5) i drugi węzeł sumowania wykonane są w oparciu o wzmacniacz operacyjny DA2. Na wejście przetwornikowe wzmacniacza za pomocą rezystorów R5, R4, R9 sumowane są sygnały, odpowiednio czujnika siły rozciągającej, nastawnika początkowej siły napinającej (13) i regulatora nieliniowego odkształceń sprężystych (10). W łańcuch sprężenia zwrotnego wzmacniacza włączona jest pojemność C2 i rezystor R6. To gwarantuje schematowi własność regulatora proporcjonalno-całkującego i wysoką dokładność stabilizacji wymaganej wartości siły rozciągającej.

Regulator nieliniowy odkształceń sprężystych (10) i trzeci zespół porównania wykonane są w oparciu o wzmacniacz operacyjny DA3. Sumowanie

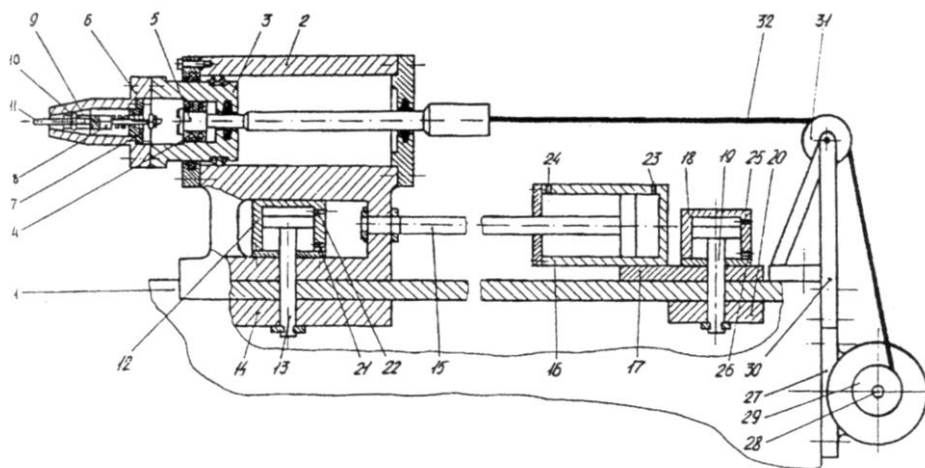
algebraiczne sygnału nastawnika odkształceń sprężystych wykonanego w postaci potencjometru RP2 i sygnał bloku wyodrębnienia modułu (11) realizowane są na wejściu przetwornikowym wzmacniacza DA3 z pomocą rezystora R8 i pojemności C2, co nadaje regulatorowi własności proporcjonalno – całkujące, a dioda VD1 gwarantuje nieliniowość jego charakterystyki.

Blok (11) wyodrębnienia modułu wykonany jest w oparciu o wzmacniacz operacyjny DA4 przez włączenie na wejściach przetwornikowych wzmacniacza diod VD2 i VD3, sygnał wyjściowy wzmacniacza ma znak ujemny, niezależnie od znaku postępującego przez rezystor R8 sygnału z czujnika odkształceń sprężystych (12).

Wyjściowy ujemny sygnał bloku wyodrębnienia modułu (11) i dodatni sygnał nastawnika odkształceń sprężystych (9) (potencjometr RP2) algebraicznie są sumowane za pomocą rezystorów R7, R11 na wyjściu przetwornikowym wzmacniacza operacyjnego. Przy czym sygnał nastawnika (9) odkształceń sprężystych jest większy od modułu sygnału na wyjściu bloku (11) wyodrębnienia modułu. Dioda VD1 bocznikuje łańcuch sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego DA3 i jego sygnał wyjściowy jest równy zero. Jeżeli sygnał na wyjściu bloku wyodrębnienia modułu (11) przewyższa sygnał nastawnika odkształceń sprężystych (9), to sygnał wynikowy na wejściu wzmacniacza operacyjnego DA3 staje się ujemny, dioda VD1 zamyka się. Schemat na wzmacniaczu operacyjnym DA3 działa w trybie regulatora proporcjonalno-całkującego i na jego wyjściu pojawia się napięcie, przekazywane na drugi węzeł sumowania. Jak przedstawiono wyżej, przy przekroczeniu przez odkształcenia sprężyste wymaganej wartości zwiększa się siła rozciągająca osiągana jest stabilizacja odkształceń sprężystych przedmiotu.

Mechanizmem wykonawczym w rozpatrywanym urządzeniu jest konik tokarki [69], konstrukcja którego pokazana jest na rys. 6.8. Na łożu obrabiarki 1 ustawiony jest korpus konika (2), wewnątrz niego umieszczona jest, mająca możliwość obrotu, wydrążona tuleja (3), w której w łożysku oporowym (4) znajduje się naciąg osiowy (5). Tuleja (3) na sztywno jest połączona korpusem (6). W korpusie (6) zamontowany jest kołnierz z rowkiem bagnetowym, w którym przemieszcza się wał posadowiony na sprężynach (8). Na końcu wału (8) w separatorze oporowym (9) znajdują się kulki (10), przy pomocy których uzyskiwane jest wstępne napięcie przedmiotu (11).

W korpusie konika umieszczony jest cylinder zamocowania konika (12), sworzeń tłoka (13), który poprzez łożę połączony jest z zaciskiem (14). Korpus (2) konika sztywno połączony jest ze sworzniem (15) cylindra (16) automatycznego przemieszczenia konika na łożu obrabiarki 1 przy przezbroyeniu na obróbkę części innego typu wymiarowego.



**Rys. 6.8. Konik tokarki**

Korpus cylindra (16) poprzez płytę (17) połączony jest na sztywno z cylindrem (18). Trzpień (19) tłoka cylindra (18) przez łożo (1) jest połączony z dociskiem (20). Kanały 21 – 26 przeznaczone są do doprowadzania czynnika roboczego do komór odpowiednich cylindrów.

Na łożu (1) znajduje się wysokomomentowy silnik elektryczny prądu (27). Na wale wyjściowym (28) silnika elektrycznego (27) na sztywno osadzone jest koło pasowe (29). Na łożu obrabiarki (1) także znajduje się wspornik (30), w którym umieszczony jest z możliwością obrotu wałek oporowy (31). Wyjściowy naciąg osiowy (5) połączony jest z kołem pasowym (29) wału (28) silnika elektrycznego (27) za pomocą elastycznej liny (32), która współpracuje z wałkiem oporowym (31). Konik tokarki pracuje w następujący sposób. Wstępnie, w zależności od długości przedmiotu obrabianego, ustawiany jest konik (2) na łożu (1) w odpowiednim miejscu. W tym celu czynnik roboczy kanałem (22) podawany jest do komory cylindra (12), trzpień przemieszcza się do dołu i razem z tłokiem (13) zwalnia docisk (14). Jednocześnie czynnik roboczy kanałem (26) przechodzi do komory trzpieniowej cylindra ustalania (18), przy tym tłok przesuwa się i przez trzpień (19) docisk (20) ustala płytę (17) z cylindrem (16) przemieszczenia konika (2) i na trzpień (15) przemieszcza konik (2) w wymagane położenie.

Czynnik roboczy podawany jest kanałem (21) do komory cylindra (12), trzpień (13) z dociskiem (14) przesuwa się w górę i mocują konik (2) na łożu (1) obrabiarki. Przedmiot obrabiany (11) ustawiany jest we wrzecionie i koniku z zaciskiem kulkowym (2). Dzięki temu w wyniku obrotu przedmiotu (11) i wału (8) uzyskiwane jest wstępne zaciśnięcie przedmiotu obrabianego (11) kulkami (10). Na silnik elektryczny (27) podawane jest napięcie od sterowanego przetwornika tyrystorowego siły UAS, przy tym wał (28) zaczyna się obracać i na koło pasowe (29) nawija się elastyczna lina (32), powiązana na drugim



końcu przez wałek oporowy (31) z naciągiem osiowym (5). Przez elastyczną linę (32) i naciąg osiowy (5) przekazywana jest siła rozciągająca, przy tym ma miejsce ostateczne zaciśnięcie części (11) i jej obciążenie siłą rozciągającą, co zwiększa sztywność układu technologicznego, po czym wykonywana jest obróbka przedmiotu o małej sztywności (11).

W procesie obróbki zmieniane jest napięcie na wejściu silnika elektrycznego (27), jednocześnie regulowana jest i stabilizuje się wielkość siły napinającej, zarówno dla procesu ustalonego, jak i przejściowego.

Po zakończeniu cyklu obróbki zdejmowane jest napięcie z silnika elektrycznego (27) oraz odpowiednio zdejmowana jest siła napinająca i przedmiot jest zwalniana.

Zastosowanie konika umożliwia z wysoką dokładnością regulowanie i stabilizowanie wielkości siły napinającej, w wyniku czego zwiększa się dokładność obróbki przedmiotów o małej sztywności.

Wyniki badań eksperymentalnych dynamicznych charakterystyk układu, w trakcie których badane były procesy przejściowe w UD według oddziaływań sterującego i zakłócającego, dosyć dobrze odpowiadają otrzymanym danym uzyskanym w trakcie obliczeń analitycznych.

W trakcie eksperymentu ustalono, że dla części o średnicy  $d < 6mm$  i stosunku długości do średnicy  $L/d > 20$  odkształcenia sprężyste przy toceniu z zastosowaniem UAS z oddziaływaniami sterującymi w postaci osiowo przykładanej siły napinającej mogą być zmniejszone 20-krotnie. Dla części o średnicy  $d > 6mm$  bardziej racjonalne jest sterowanie stanem sprężysto-odkształcalnym części w wyniku rozciągania mimośrodowego, przy tym odkształcenia można zmniejszyć dwukrotnie w porównaniu do rozciągania osiowego. Przy szlifowaniu oscylacyjnym przedmiotów o małej sztywności ( $d = 6...14mm, L/d > 20$ ) dodatkowe sterowanie momentem zginającym powstającym wyniku mimośrodowego przyłożenia siły napinającej umożliwia zwiększenie dokładności przedmiotu o rząd wielkości [91, 92].

### **6.3. Procedury i operacje osiągania dokładności i jakości typowego zautomatyzowanego procesu projektowania PT obróbki wałków z uwzględnieniem właściwości układów dynamicznych obrabiarek**

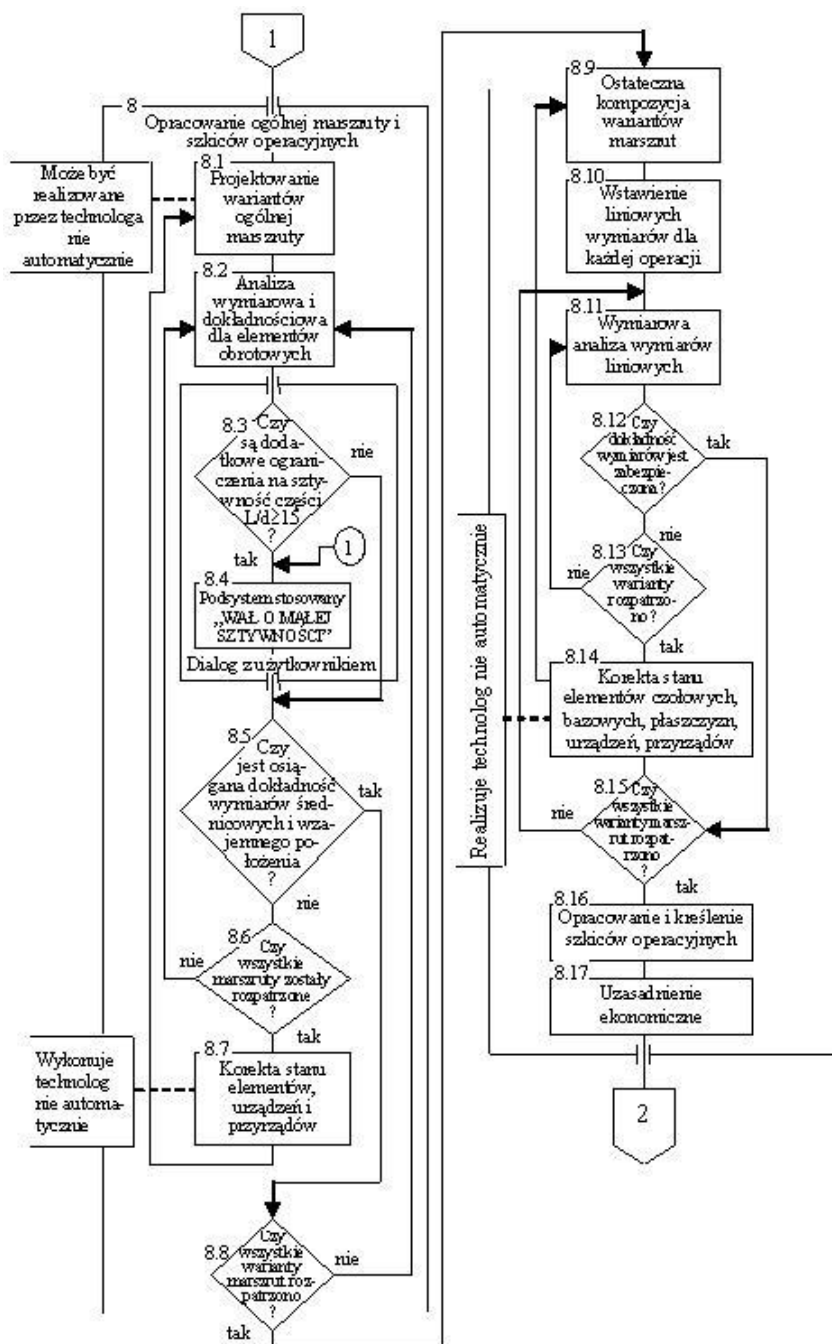
Typowe elementy zautomatyzowanego projektowania procesu technologicznego wykonania części klasy „ciała obrotowe o małej sztywności” opracowano na podstawie modeli matematycznych, czyli modeli poziomów detalizacji przy zastosowaniu znanej struktury zautomatyzowanego projektowania ciał obrotowych [92] oraz podsystemu programów obliczeń dokładnościowych i modelowania parametrów jakości powierzchni [91]. Podsystem programów przeznaczony jest do automatyzacji procedur obliczeniowo-projektowych, niezależnych od obiektu projektowania. Opracowany podsystem umożliwia, na etapie projektowania technologii, uwzględnienie stopnia wpływu na dokładność i jakość obróbki poszczególnych czynników technologicznych, co ostatecznie prowadzi do zwiększenia dokładności rozwiązań projektowych i wydajności pracy projektantów.

Zespół obliczeń dokładnościowych i modelowania parametrów chropowatości, z uwzględnieniem charakterystyk statycznych i dynamicznych układów technologicznych, jest systemem konwersacyjnym. Zawiera komplet poszczególnych modułów programowych o różnorodnym przeznaczeniu funkcjonalnym, których wspólne zastosowanie umożliwia automatyzację procesu wyboru sposobu obróbki przedmiotów typu wałek o małej sztywności. Specyfika podsystemu programowego polega na tym, że jego struktura jest otwarta na przyłączanie nowych modułów oceny dokładności i jakości procesów technologicznych obróbki przedmiotów typu wałek o małej sztywności. Większość modułów systemu może być również stosowana niezależnie przy rozwiązywaniu poszczególnych problemów technologicznych.

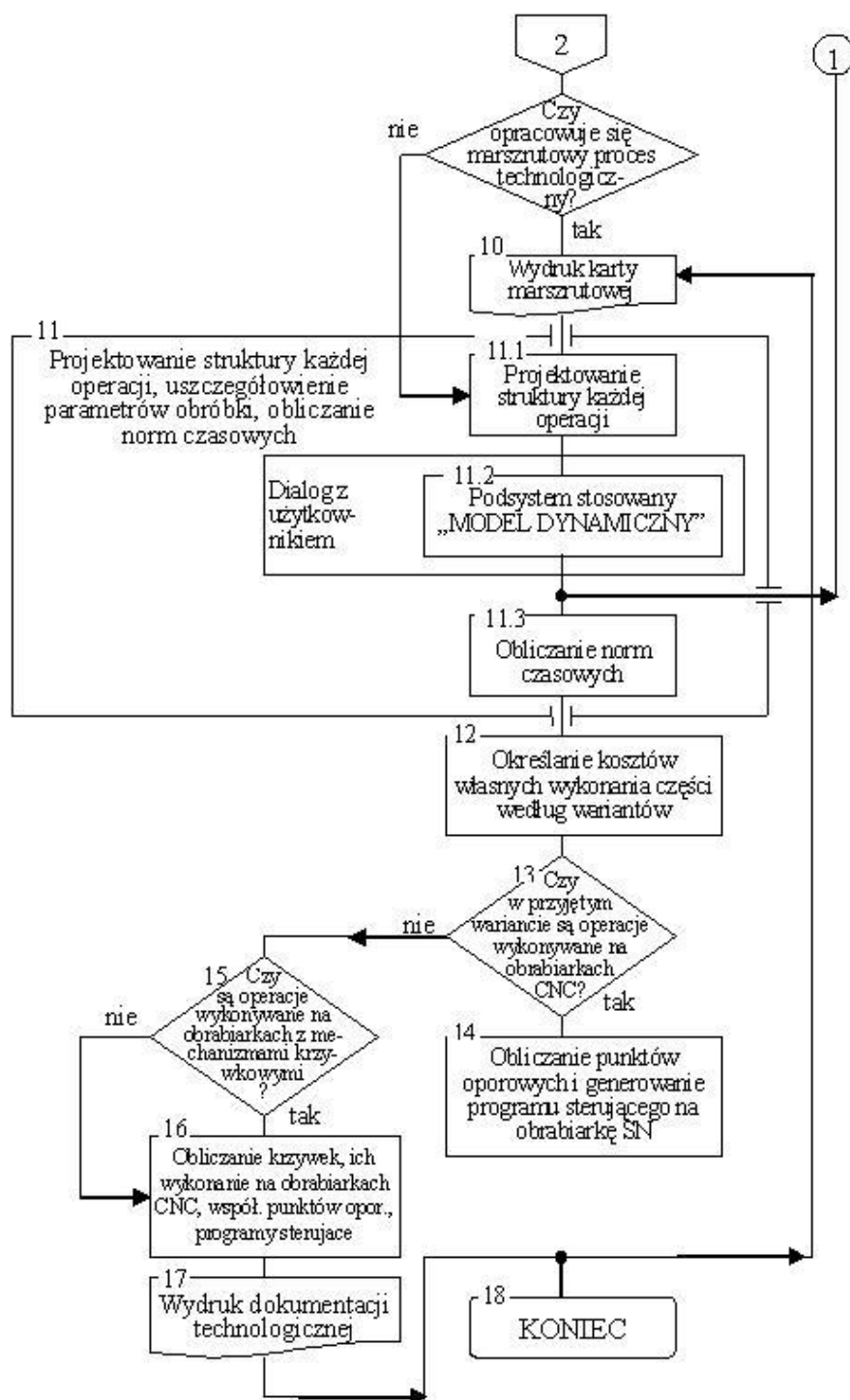
Kolejność operacji projektowych i procedur typowego procesu projektowania przedstawiono na rys. 6.9. Wprowadzenie informacji o przedmiocie jest realizowane w bloku (1) zgodnie z wypełnioną kartą informacji wejściowej (KIW). W celu umożliwienia zautomatyzowanego rozpoznawania powiązań wymiarowych w przedmiotach obrabianych i wyboru baz, szczególnego znaczenia nabiera pierwotna analiza technologiczna, która jest realizowana w bloku (2). Analiza ta polega nie tylko na automatyzacji wprowadzania informacji o przedmiocie (określenie odchyłek lub klas dokładności wymiarów, obliczanie parametrów pod gwint, itd.), lecz także na automatycznym wykonaniu indeksacji elementów, określaniu cech i charakteru powiązań technologicznych, określaniu niezbędnych, w trakcie projektowania, modeli matematycznych (model na pierwszym, drugim itd. poziomach, model warunków technicznych wzajemnego położenia elementów itd.), wyodrębnianiu wymiarów liczbowych, odpowiednio w każdym elemencie czołowym, itd. Algorytmy rozwiązujące zadania tego bloku opisano w pracach [91,92].

Projektowanie schematów ideowych procesu technologicznego, to znaczy przeprowadzenie pierwszego poziomu grupowania przedmiotów obrabianych, jest realizowane w blokach 3÷6. Przy czym w bloku 6.1 do obróbki na każdym etapie procesu technologicznego wyodrębniono zbiór elementów, należących do określonego poziomu TMS-CZ, co gwarantuje, przy przyjętym podziale struktury części na poziomy, najbardziej prosty wybór grupy urządzeń, na których te elementy można obrobić. Przy rozpatrywaniu grupy elementów pierwszego poziomu można zastosować tylko tokarki, wytaczarki, szlifierki lub obrabiarki specjalne (do obróbki uzębienia i gwintów) itd. Jeżeli do obróbki elementów jednego poziomu mogą być potrzebne obrabiarki różnych grup, to blok 6.2 jest realizowany jako przegląd wszystkich możliwych wariantów etapu przy konkretnej konfiguracji systemu elastycznego.





Rys. 6.9. – ciąg dalszy (2)



Rys. 6.9. – ciąg dalszy (3)

Drugi poziom projektowania jest realizowany przez blok 7, do którego kolejno wprowadza się dane o stanie elementów na wejściu i wyjściu każdego etapu procesu technologicznego, a także dane o występowaniu urządzeń, przyrządów i o ich charakterystykach oddzielnie w każdym etapie, co umożliwia minimalizację informacji, niezbędnej przy projektowaniu kolejnych etapów.

Wyniki pracy bloków 6 i 7 są przekazywane do bloku 8.1. Tutaj, automatycznie lub przez użytkownika – technologa, dokonywany jest przegląd wariantów ogólnej marszruty procesu technologicznego z połączeniem operacji według obrabianych elementów i powierzchni obrotowych, przyjętych jako bazy, to znaczy jest realizowane pierwsze stadium trzeciego poziomu projektowania [92]. Drugie stadium tego poziomu jest realizowane w blokach 8.2÷8.8, gdzie przeprowadzana jest analiza wymiarowa i dokładnościowa części obrotowych. W rezultacie, już w stadium projektowania marszruty sprawdzana jest możliwość uzyskania dokładności wszystkich wymiarów średnicowych i wymagań związanych ze wzajemnym położeniem elementów. Jeżeli nie można uzyskać żądanych wymagań według żadnego z wariantów marszruty, to jest dokonywana korekta stanu elementów (zawęża się tolerancje elementów bazowych, wprowadza dodatkowe stany elementów bazowych itd.), wybierane są dokładniejsze urządzenia i przyrządy elementów bazowych w przypadku poszczególnych operacji i znowu opracowuje się uogólnioną marszrutę. Działania te powtarza się aż do chwili realizacji warunków dokładnościowych lub uzyskania informacji, że przy założonym zestawie środków technologicznych nie można uzyskać żądanej dokładności.

Specyfiką danego etapu jest wprowadzenie bloku „Dialog z użytkownikiem”, będącego gotowym modułem podsystemu programowego i zawierającego blok określający dodatkowe warunki dotyczące sztywności przedmiotu oraz podsystem obliczeń dokładnościowych i modelowania parametrów jakości powierzchni „wałek o małej sztywności” (blok 8.4). Blok ten jest realizacją modeli analitycznych obliczeń dokładnościowych w przypadku sposobów obróbki wałków w stanie sprężysto-odkształcalnym [92]. Podsystem składa się z modułów, tworzących samodzielne bloki programów, przeznaczonych do rozwiązania następujących problemów:

- obliczanie macierzy odkształceń sprężystych wałków o małej sztywności przy zwykłym toczeniu i zmienności parametrów skrawania oraz macierzy odkształceń sprężystych przy toczeniu w stanie sprężysto - odkształcalnym;
- obliczanie charakterystyk statycznych możliwych błędów związanych z wykonaniem wymiarów średnicowych;
- obliczanie i modelowanie parametrów chropowatości powierzchni;
- optymalizacja parametrów obciążenia przy sterowaniu stanem sprężysto-odkształcalnym;
- wybór metod bazowania i zamocowania wałków o małej sztywności, przy sterowaniu stanem sprężysto-odkształcalnym.

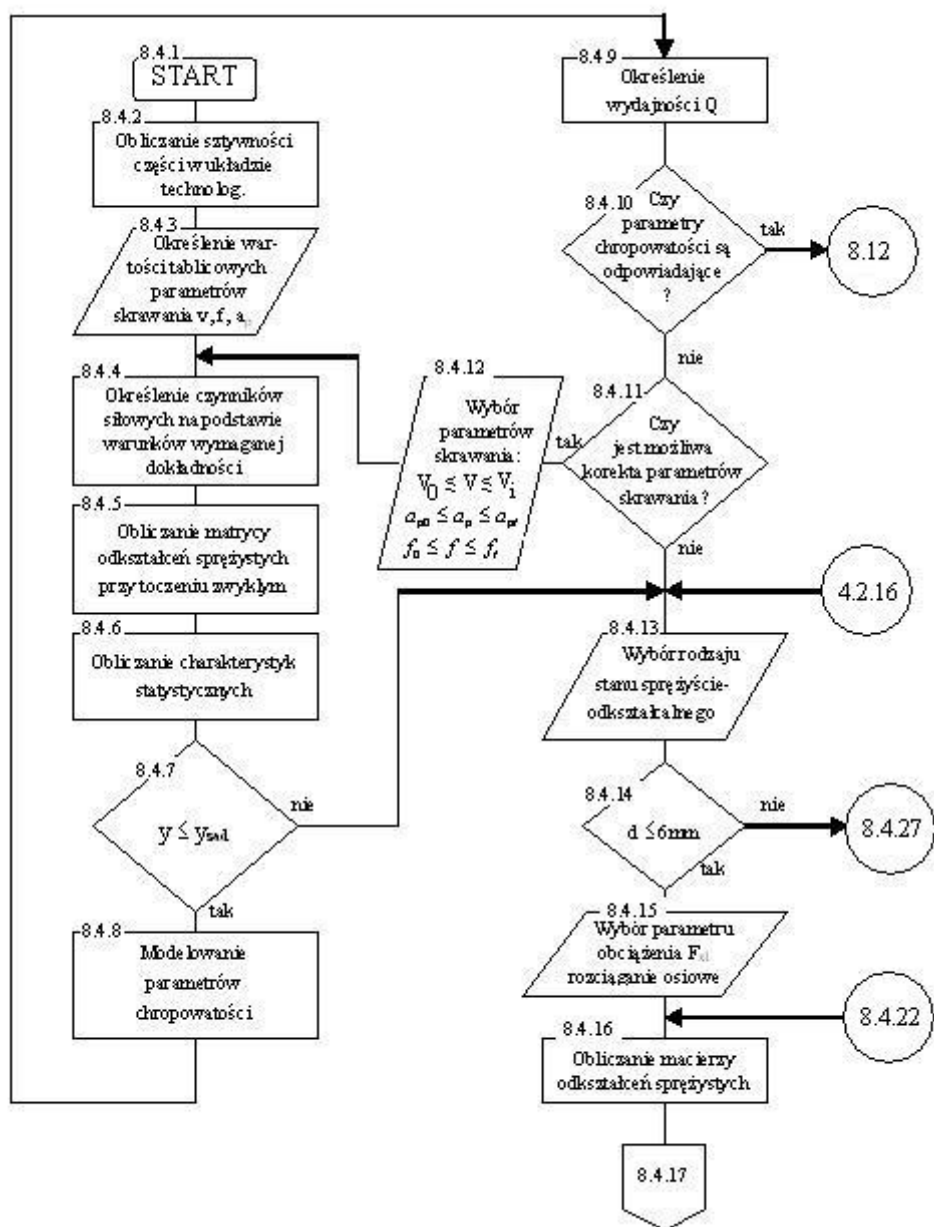
Oprócz tego podsystem zawiera bloki pomocnicze kontrolujące informację wejściową i realizujące wyprowadzanie otrzymanej informacji.

Na rys. 6.10 przedstawiono schemat blokowy algorytmu funkcjonowania bloku 8.4, w którym uwzględniono obecność w macierzy obrabianych przedmiotów – wałków o małej sztywności.

Blok 8.3 określa dodatkowe warunki dotyczące sztywności przedmiotu. Przy występowaniu przedmiotu o małej sztywności w bloku 8.4.2 jest realizowane obliczenie sztywności przedmiotu, w konkretnym układzie technologicznym według metodyki, przedstawionej w [92]. Poprzez blok 8.4.3 realizowane jest zadanie wartości tablicowych parametrów skrawania  $v$ ,  $f$ ,  $a_p$  leżących w określonych zakresach  $v_o \leq v \leq v_b$ ,  $f_o \leq f \leq f_b$ ,  $a_{po} \leq a_p \leq a_{pi}$ . W blokach 8.4.4 i 8.4.5 są określane czynniki siłowe na podstawie warunków obróbki, przeprowadzane jest obliczanie macierzy odkształceń sprężystych przy zwykłym toczeniu, a w bloku 8.4.6 - wyznaczane są charakterystyki statystyczne do określenia konkurencyjności różnych sposobów obróbki. W przypadku, gdy przy wybranych parametrach skrawania jest osiągane odkształcenie  $y \leq y_{zad}$  (blok 8.4.7), na całej długości obróbki wtedy w bloku 8.4.8 wykonywane są obliczenia i modelowanie parametrów chropowatości oraz obliczanie wydajności obróbki w bloku 8.4.9. Jeżeli parametry chropowatości i wydajności odpowiadają zadanym, to informacja jest przekazywana do bloku 8.12 w celu podjęcia przez technologa dalszych decyzji. W przypadku niezgodności otrzymanych parametrów chropowatości z żądanymi (blok 8.4.11), w bloku 8.4.12 realizowana jest korekta parametrów obróbki, zgodnie z odpowiednim zakresem ich zmienności. Jeżeli w wyniku korekty parametrów skrawania nie jest możliwe uzyskanie wymaganych parametrów dokładności (blok 8.4.7) i jakości powierzchni (blok 8.4.10 i 8.4.11) to następuje przejście do bloku 8.4.13. W nim dokonuje się wyboru wariantu dodatkowych oddziaływań na przedmiot i wytworzenia jednego z rodzajów stanu sprężysto-odkształcalnego.

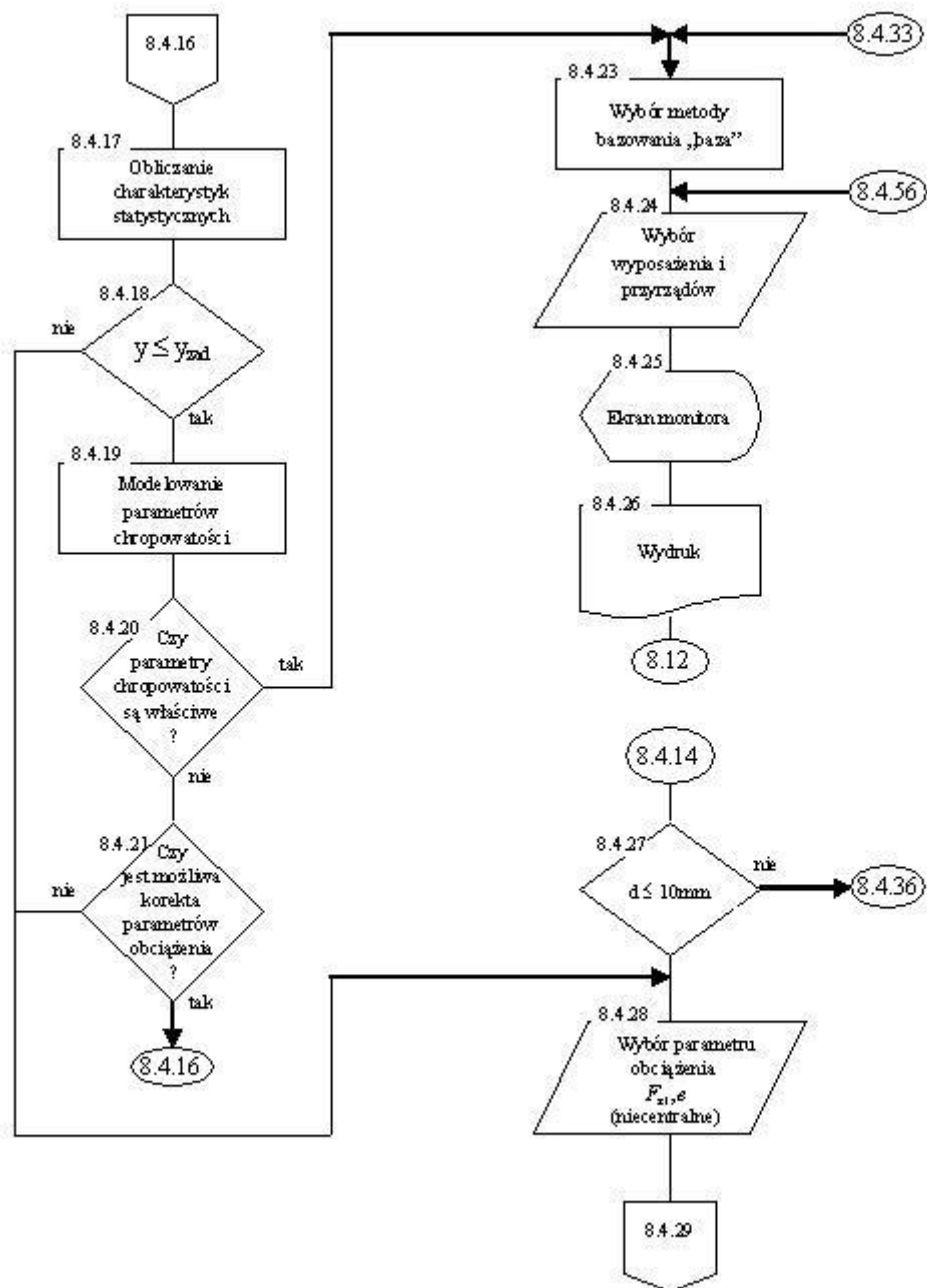
W wałku o  $d \leq 6$  mm w blokach 8.4.15, 8.4.16 i 8.4.17 określane są parametry obciążenia, obliczana macierz odkształceń sprężystych obrabianego wałka w warunkach zginania wzdłużno-poprzecznego przy rozciąganiu osiowym oraz charakterystyki statystyczne możliwych błędów wymiarów średnicowych.

W przypadku, gdy stan sprężysto-odkształcalny przy rozciąganiu osiowym umożliwia osiągnięcie odkształceń  $y \leq y_{zad}$  (blok 8.4.18) na całej długości obróbki, wtedy w bloku 8.4.19 są modelowane parametry chropowatości. Przy zgodności otrzymanych parametrów z żądanymi (blok 8.4.20) następuje przejście do bloku 8.4.23.

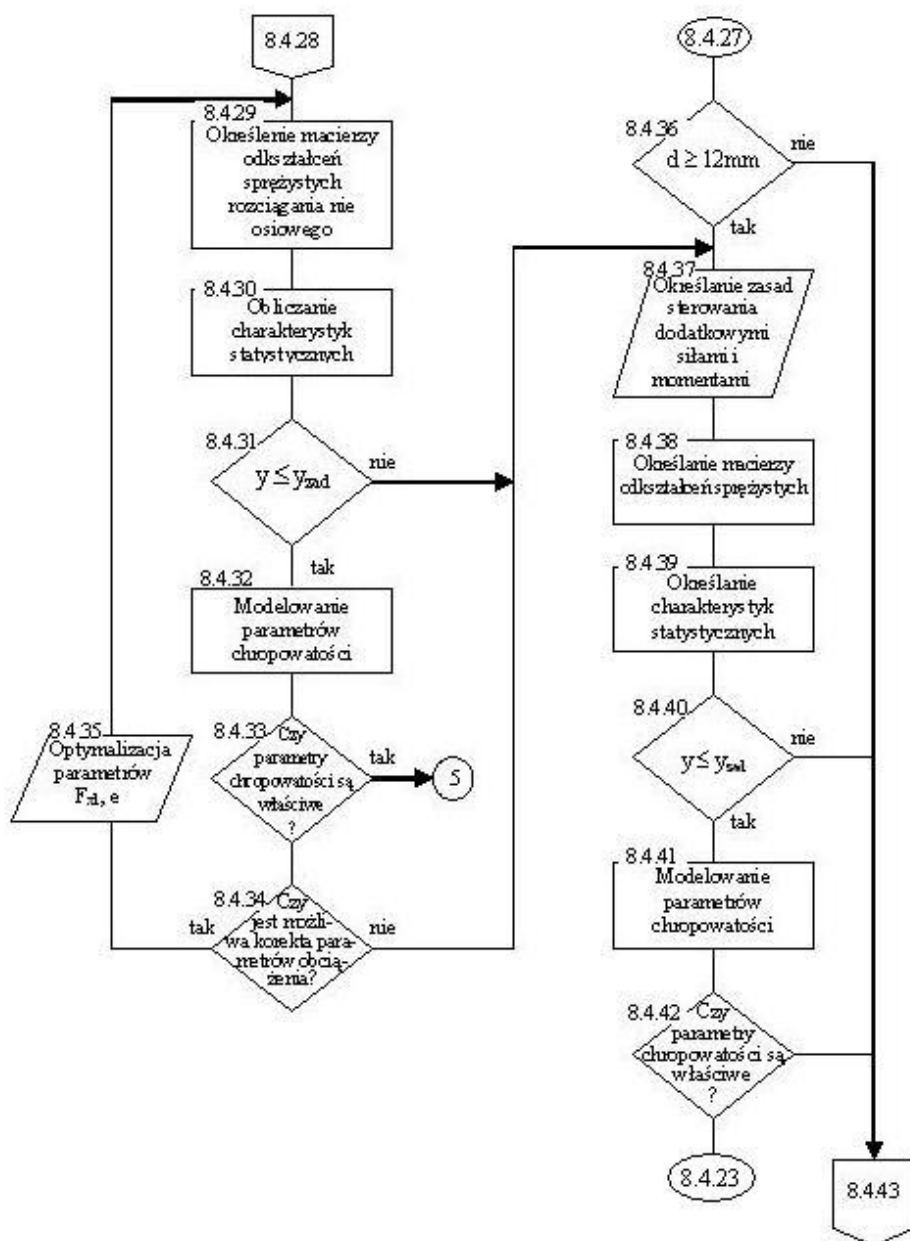


Rys. 6.10. Schemat blokowy algorytmu funkcjonowania konwersacyjnego podsystemu obliczeń dokładnościowych i modelowania parametrów jakości „wałek o małej sztywności”

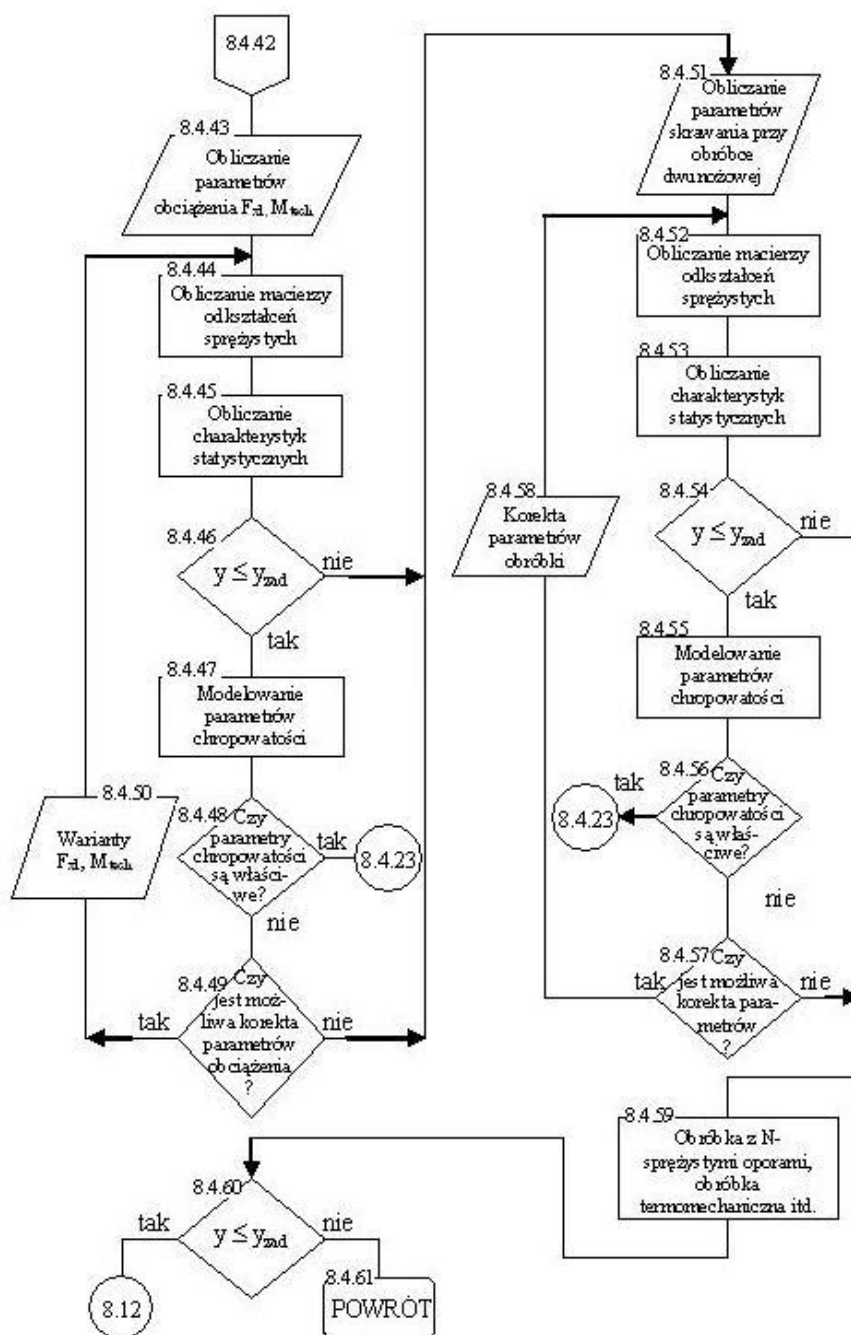




Rys. 6.10. – ciąg dalszy (2)

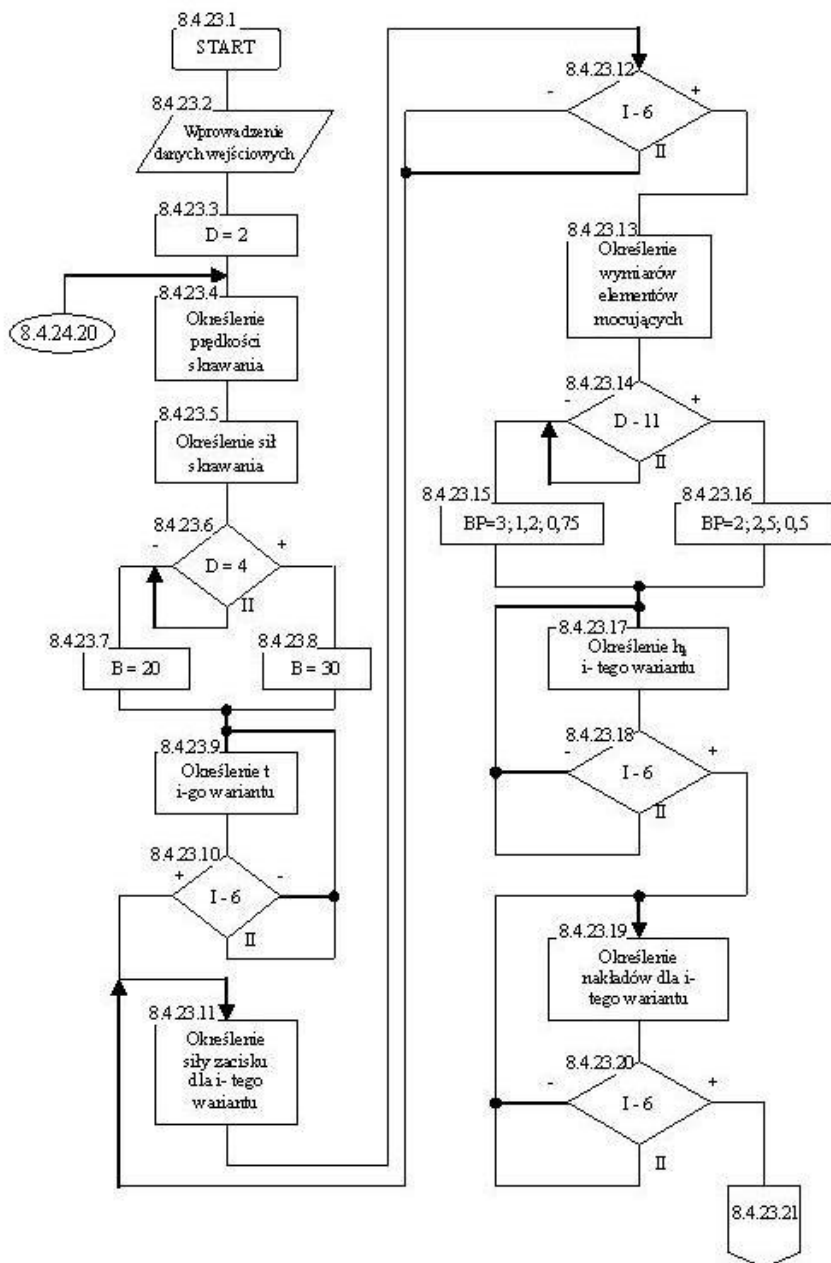


Rys. 6.10. – ciąg dalszy (3)

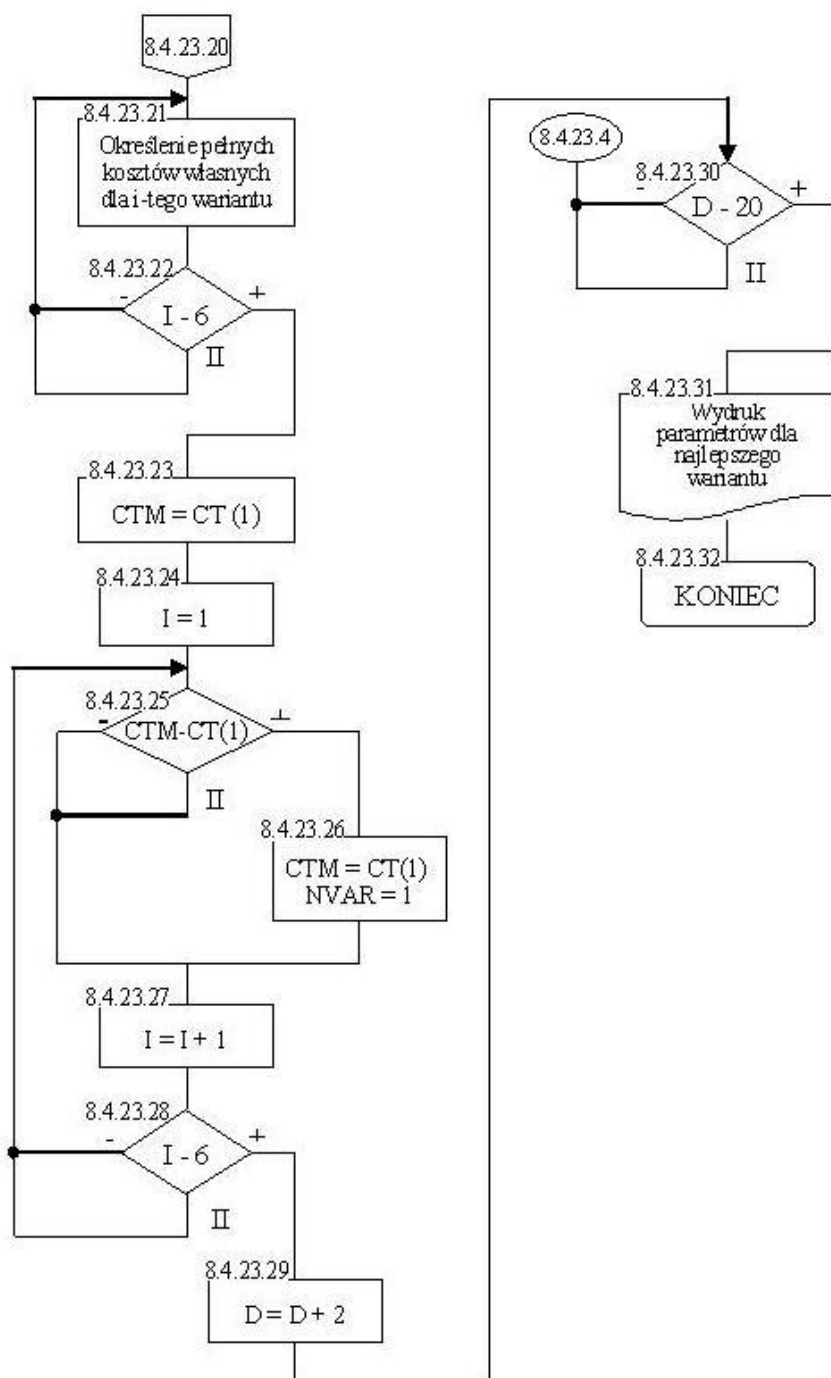


Rys. 6.10. – ciąg dalszy (4)

W bloku 8.4.23 określono metody bazowania i zamocowania przedmiotu w każdej operacji przy obróbce w stanie sprężysto-odkształcalnym. Wybór schematów bazowania i zamocowania przy obróbce w stanie sprężysto-odkształcalnym z uwzględnieniem kosztów własnych przygotowania baz jest rozpatrywany jako zadanie optymalizacji wariantowej [92]. Rozwiązanie zadania optymalizacji wariantowej, przy wyborze najwygodniejszego schematu zamocowania, w przypadku obróbki wałków o małej sztywności, w stanie sprężysto-odkształcalnym, w celu otrzymania żądanej konfiguracji przedmiotu jest realizowane za pomocą odpowiedniego podsystemu. Schemat blokowy algorytmu przedstawiono na rys. 6.11. W blokach 8.4.23.2÷8.4.23.18 realizowane jest wprowadzanie informacji wejściowej do programu obliczania parametrów technologicznych procesu obróbki, wymiarów elementów zaciskowych i wielkości odkształceń kontaktowych. W blokach 8.4.23.19-8.4.23.30 są obliczane i porównane pełne koszty własne *j-go* wariantu zamocowania w porównaniu z wariantem określonym przy analizie poprzednich (*j-1*) wariantów. W początkowej fazie (przy obliczaniu wariantu 1) taka analiza nie jest wykonywana. Przy analizie wariantu 2 są porównywane warianty 1 i 2. Przy wariacie 3 zamocowania porównywane są warianty 3 i najlepszy z dwóch poprzednich. W ten sposób po zakończeniu obliczeń kosztów własnych wszystkich sześciu wariantów są zapisywane parametry technologiczne najlepszego wariantu, według kryterium kosztów własnych. W blokach 8.4.23.31 realizowany jest ich wydruk. Po zakończeniu obliczeń rozwiązanie jest przekazywane do bloku 8.4.24, w celu wyboru wyposażenia i oprzyrządowania oraz jest przekazywana informacja na monitor 8.4.25, niezbędna technologowi do podjęcia odpowiedniej decyzji. Jeżeli stan sprężysto-odkształcalny przy rozciąganiu osiowym w procesie obróbki nie gwarantuje  $y \leq y_{\text{zad}}$  (blok 8.4.18) oraz parametry chropowatości nie odpowiadają zadaniem (blok 8.4.20), to po możliwych zmianach parametrów obciążenia (blok 8.4.22) realizowane jest przejście do bloku 8.4.28 w celu wyboru obciążenia  $F_{x1}$  i  $e$  odpowiadające rozciąganiu mimośrodowemu, przy czym opisane wyżej procedury są powtarzane w blokach 8.4.29÷8.4.35. Proces ten jest kontynuowany aż do momentu wyboru optymalnych  $F_{x1}$  oraz  $e$ . W analogiczny sposób są realizowane procedury w przypadku stanu sprężysto-odkształcalnego w warunkach działania zginania poprzecznego przy zastosowaniu tłumików drgań i momentów sterowniczych (bloki 8.4.36÷8.4.42) oraz przy jednoczesnym działaniu zginania wzdłużno – poprzecznego i skręcania (bloki 8.4.43÷8.4.49). Jeżeli warunek  $y \leq y_{\text{zad}}$  (blok 8.4.46) nie jest spełniony, to w bloku 8.4.51 są określone warunki obróbki wałków o małej sztywności przy toczeniu wielonożowym z równoważeniem składowych sił skrawania. Przy spełnieniu warunku  $y \leq y_{\text{zad}}$  (blok 8.4.54) na całej długości obróbki (blok 8.4.56) informacja jest przekazywana do bloku 8.4.24, w celu wyboru wyposażenia konkretnej obrabiarki. W przeciwnym przypadku, następuje przejście do bloku 8.4.59, w którym określone są warunki obróbki przy *N* oporach sprężystych. Po czym następuje powrót do bloku 8.12.



Rys. 6.11. Schemat blokowy algorytmu określania i wyboru schematów zamocowania przy obróbce z rozciąganiem



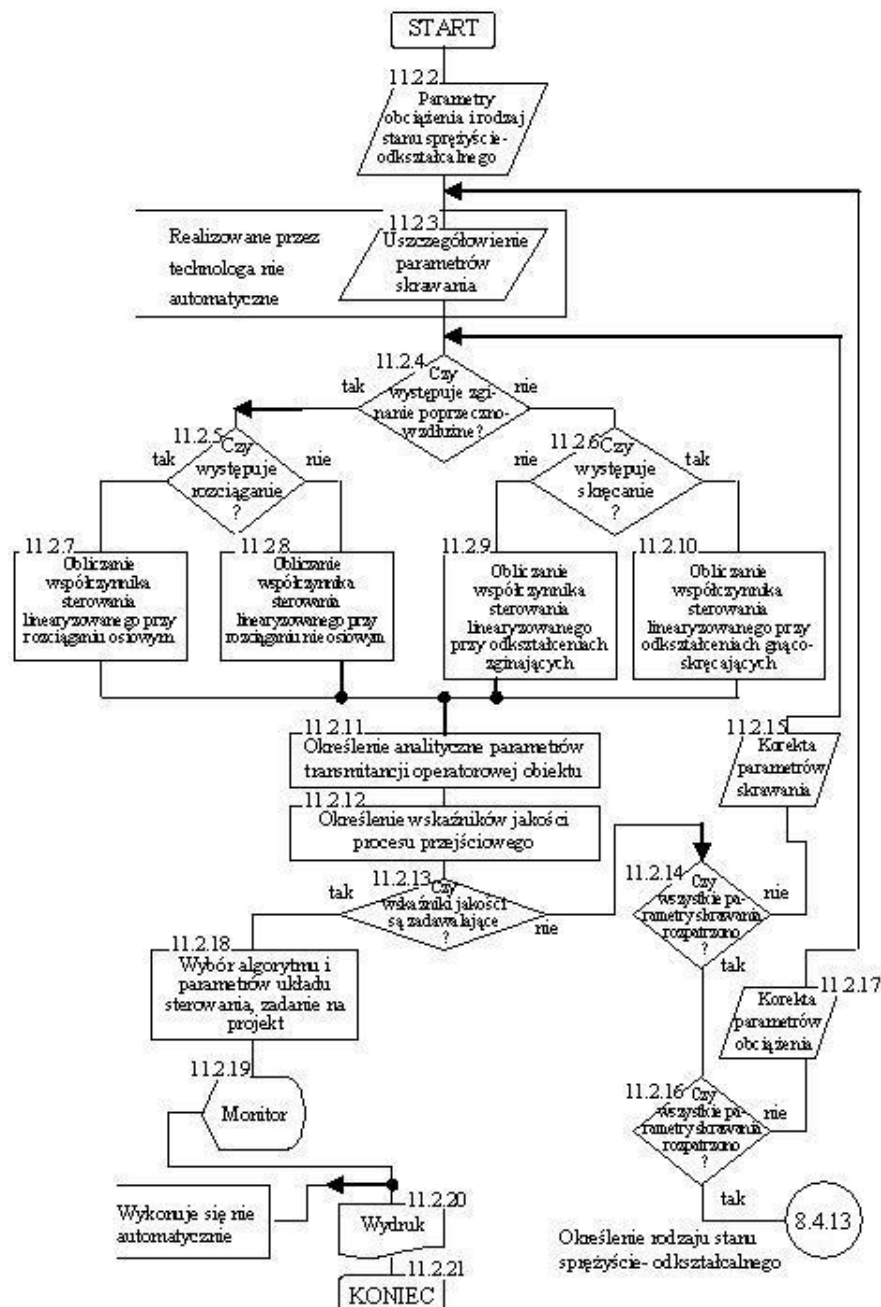
Rys. 6.11. – ciąg dalszy (2)

Do trzeciego etapu poziomu projektowania są przekazywane dane tylko o wariantach gwarantujących żadaną dokładność wymiarów średnicowych i warunków wzajemnego położenia.

Etap ten jest rozwiązywany w blokach 8.9÷8.15, zbudowanych analogicznie do bloków jak w etapie drugim (rys. 6.9). Różnica polega na dodaniu bloku 8.10, za pomocą którego wprowadzane są wymiary liniowe na każdej operacji dla każdej marszruty [121].

Przeprowadzenie w bloku 8.11 analizy wymiarowej zapewnia, na etapie projektowania marszruty, sprawdzenie możliwości otrzymania żadanej dokładności wszystkich wymiarów konstrukcyjnych i technologicznych na wybranych urządzeniach. Po uzyskaniu w bloku 8.17 uzasadnienia ekonomicznego z uwzględnieniem nakładów na przygotowanie baz technologicznych (blok 8.4.23), wybiera się kilka bliskich wariantów marszruty według kryteriów. Na tym projektowanie marszruty kończy się.

W bloku 11 (rys. 6.9) rozwiązywane są zagadnienia czwartego poziomu projektowania, kolejno na każdej operacji procesu technologicznego. Etap ten przewiduje także wprowadzenie bloku 11.2 „Dialog z użytkownikiem”. Mając jako dane wejściowe informacje o własnościach obrabianych materiałów, parametrach skrawania, charakterystykach sprężystych układów technologicznych, na etapie projektowania procesu technologicznego określone są parametry transmitancji operatorowej a także zakresy ich zmienności (rys. 6.12). Odpowiednio do tego, w bloku 11.2.3 określone są dokładne parametry skrawania wybranych przypadków stanu sprężysto-odkształcalnego z uwzględnieniem parametrów i rodzaju obciążenia. Po tym procesie w blokach 11.2.7÷11.2.10 obliczane są współczynniki transmitancji operatorowej linearyzowanych równań odpowiednich przypadków stanu sprężysto-odkształcalnego. W bloku 11.2.11 są określone analitycznie parametry transmitancji operatorowej obiektu i zakresy ich zmienności. W bloku 11.2.12 obliczane są wskaźniki jakości procesów przejściowych: czas procesu przejściowego, przeregulowanie, itd. A zatem w bloku 11.2.13 sprawdzana jest zgodność określonych parametrów jakości z żadanymi. W zależności od otrzymanych wyników, jeżeli nie odpowiadają one żadanym, następuje przejście do bloków 11.2.15, w celu korekty parametrów skrawania lub do bloku 11.2.17 w celu zmiany parametrów obciążenia lub do bloku 8.4.13 aby dokonać zmian rodzaju stanu sprężysto-odkształcalnego.



Rys. 6.12. Kolejność procedur projektowych z uwzględnieniem własności dynamicznych obiektu



Przy zgodności z żądanymi parametrami jakości procesu przejściowego w bloku 11.2.18, wybierany jest algorytm i parametry układu sterowania, typy i parametry sprzężenia zwrotnego i członów korekcyjnych a w niektórych przypadkach formułowane jest zadanie projektowania UAS lub AC. Po zrealizowaniu w bloku 12 końcowego wyboru wariantu procesu technologicznego, w razie konieczności, przechodzi się do poziomu piątego (bloki 13-16) lub do przygotowania dokumentacji technologicznej (blok 17). Badania eksperymentalne UAS i AC układami dynamicznymi obrabiarek ze sterowaniem w postaci prędkości posuwu wzdłużnego pokazują, że największy efekt z punktu widzenia podwyższenia charakterystyk dokładnościowych osiągany jest w przypadku sprzężenia zwrotnego w układzie bezpośrednio według wymiaru obrobionej części lub wielkości odkształceń sprężystych UD wzdłuż współrzędnej Y. Zastosowanie jako zmiennej regulowanej składowej promieniowej siły skrawania, umożliwia przy obróbce przedmiotów ze zmieniającym się nadładkiem o 20%÷30% zwiększenie wydajności procesu technologicznego bez istotnej zmiany wskaźników jakościowych. Analogiczny efekt osiągany jest w przypadku pośredniego pomiaru zmiennych siłowych procesu skrawania według mocy lub prądu silnika elektrycznego napędu głównego. Inercyjność w łańcuchu sprzężenia zwrotnego układu prowadzi do pogorszenia jego własności dynamicznych. W przypadku tokarek i szlifierek pracujących w warunkach stabilnego procesu technologicznego, gwarantowane wskaźniki jakości sterowania odkształceniami sprężystymi UD i zmiennymi siłowymi PT osiągane są przy zastosowaniu zaproponowanych strojów bazowych AC. Zwiększenie wskaźników jakości sterowania w warunkach zmian parametrów UD osiąga się dzięki wykorzystaniu opracowanej metody przedcyklowej adaptacji AC na podstawie apriorycznej informacji technologicznej.

W celu podwyższenia dokładności obróbki przedmiotów o małej sztywności najbardziej efektywne jest zastosowanie układów z oddziaływaniami sterującymi w postaci dodatkowych zmiennych siłowych wpływających na stan sprężysto-odkształcalny UD. W szczególności, zastosowanie układów z oddziaływaniami sterującymi w postaci siły rozciągającej przykładanej osiowosymetrycznie lub mimośrodowo w stosunku do osi części, umożliwia zwiększenie o rząd wielkości dokładności kształtu przedmiotu w przekroju wzdłużnym.

Sformułowano funkcjonalne przeznaczenie elementów zautomatyzowanego układu projektowania procesów technologicznych jako modułu programowego systemu zautomatyzowanego projektowania „Ciała obrotowe”, stosowanego przy projektowaniu procesów technologicznych obróbki wałków o małej sztywności. W celu zwiększenia efektywności pracy podsystemu programowego przy jego budowie wprowadzono bloki, realizujące konwersację z użytkownikiem w procesie realizacji obliczeń, uwzględniające charakterystyki statyczne i dynamiczne UD. Zastosowanie modułów programowych umożliwia wyznaczenie charakterystyk dokładnościowych i jakościowych procesu obróbki wałków o małej sztywności i wybieranie odpowiedniego oprzyrządowania. Zastosowanie opracowanej metodyki i algorytmów zwiększa efektywność projektowania dzięki polepszeniu jakości rozwiązań projektowych oraz zwiększenia wydajności.

## Podsumowanie

W niniejszej pracy sformułowano i sformalizowano metodę analitycznej identyfikacji w celu opracowania modelu matematycznego układu dynamicznego procesu skrawania z racjonalnym wykorzystaniem wiedzy o podstawowych procesach zachodzących w układzie i możliwością uściślenia parametrów modeli metodami identyfikacji eksperymentalnej. Uzyskane w czasie realizacji pracy wyniki potwierdzają efektywność takiej metodologii budowy modelu dynamicznego w rozpatrywanej klasie oprzyrządowania technologicznego, a szczególności obrabiarek.

W celu osiągnięcia wymaganej dokładności obróbki skrawaniem, w warunkach oddziaływania zakłóceń, należy zapewnić wzajemne przestrzenne położenie układów wykonawczych i trajektorii ich ruchu w czasie cyklu obróbki przedmiotu obrabianego. Dominujący wpływ na jakość dynamiczną w rozpatrywanej klasie procesów mają odkształcenia sprężyste układu dynamicznego, charakteryzujące się przestrzennym rozkładem odkształceń sprężystych.

W strukturze dynamicznej badanego obiektu można wyróżnić podukłady w postaci procesu technologicznego i układu technologicznego. W procesach technologicznych z występującymi oddziaływaniami siłowymi, co jest charakterystyczne w przypadku obrabiarek, struktura dynamiczna obiektu sterowania zawiera obwody sprzężeń zwrotnych, których istnienie jest uwarunkowane wzajemnym oddziaływaniem wspomnianych procesów i układów.

W czasie budowy modeli matematycznych dopuszczalna jest linearyzacja równań ruchu, opisujących układ dynamiczny obrabiarki, przy czym tenże należy rozpatrywać jako wielowymiarowy obiekt, którego stan jest określony odpowiednimi zmiennymi wejściowymi (sterującymi lub zakłócającymi) i wyjściowymi.

W obrabiarkach podstawowymi elementami zbioru wielkości wejściowych (zmiennych technologicznych procesu skrawania) są chwilowe wartości grubości i szerokości warstwy skrawanej, a także twardość obrabianego materiału. Elementami wyjściowego zbioru procesu technologicznego są składowe siły skrawania i odkształceń sprężystych. Właściwości dynamiczne procesu skrawania mogą być opisane równaniami różniczkowymi pierwszego rzędu.

W zbiorze zmiennych technologicznych, tworzonym przez układ dynamiczny, można wyróżnić dwie składowe, jedna z nich jest określona grupą oddziaływań wejściowych, a druga – odkształceniami sprężystymi. Wśród wielkości wejściowych wyróżnia się: wielkości sterujące w postaci prędkości posuwu wzdłużnego, prędkości obrotowej części, a także zakłócenia w postaci zmiany twardości obrabianego materiału i naddatku względem długości i średnicy części.

Zbiór odkształceń sprężystych jest określony wektorami sił skrawania, które są wielkościami sterującymi zapewniającymi "wibrostabilność" układu. Właściwości dynamiczne ekwiwalentnego układu sprężystego mogą być w przybliżeniu opisane równaniami różniczkowymi drugiego rzędu.

Na wybór zmiennych technologicznych istotny wpływ ma zjawisko skrawania "po śladzie", przejawiające się w tym, że chwilowe wartości składowych wektora są określone przez wartości wektora wielkości wejściowych i wektora odkształceń sprężystych nie tylko w bieżącym momencie czasu, ale także wartościami z poprzedniego obrotu części. W wyniku tego układ dynamiczny jest opisywany układem równań ze zmiennym opóźnionym argumentem.

W wyniku analizy i modelowania procesów, zachodzących w układzie dynamicznym obrabiarki, otrzymano układ równań i transmitancję operatorową, a także uogólnioną strukturę obiektu sterowania.

W wyniku analizy charakterystyk częstotliwościowych modeli układów dynamicznych obrabiarek dla wielkości wejściowych w postaci prędkości posuwu wzdłużnego, zmiany twardości obrabianego materiału i naddatku wzdłuż osi części ustalono, że ACH i FCH modeli przedstawiają sobą okresowe funkcje częstotliwości z okresem będącym wielokrotnością  $1/\tau$ .

Inercyjność układu sprężystego obrabiarki i procesu powstawania wióra wykazuje istotny wpływ na postać ACH i FCH obiektu tylko w zakresie "wysokich" częstotliwości  $\omega > 1/\tau$ . Pozwala to przy budowie modeli matematycznych obiektu w celu potrzeb sterowania, kiedy zakres istotnych częstotliwości UAS leży na lewo od częstotliwości  $\omega = 1/\tau$  i są spełnione warunki "wibrostabilności" układu dynamicznego, opisywać układ sprężysty i proces skrawania równaniami algebraicznymi.

Opis matematyczny podstawowych modeli układów dynamicznych obrabiarek przy wybranych wielkościach wejściowych jest przedstawiony w postaci równań operatorowych z opóźnionym argumentem. Wartość opóźnienia jest określona prędkością obrotową części, a współczynniki równań zależą od sztywności układu dynamicznego oraz współczynników wzmocnienia procesu skrawania.

W wyniku analizy charakterystyk częstotliwościowych i czasowych podstawowych modeli stwierdzono możliwość ich aproksymacji w zakresie istotnych częstotliwości układu sterowania transmitancja operatorowa typu całkująco-statycznego lub członu aperiodycznego drugiego rzędu. Ustalono, że współczynniki wzmocnienia i stałe czasowe aproksymowanych modeli zmieniają się przede wszystkim z powodu zmiany prędkości obrotowej części i złożonego współczynnika B, charakteryzującego stosunek sztywności układu sprężystego i współczynników skrawania. W przypadku tokarek konwencjonalnych, z powodu zmiany warunków pracy, parametry modeli mogą zmieniać się wiele razy.

Wyniki badań eksperymentalnych charakterystyk częstotliwościowych i czasowych OS przy różnych oddziaływaniach sterujących i zakłócających, potwierdzają adekwatność modeli matematycznych, opracowanych na podstawie metod identyfikacji analitycznej.

Opracowane modele matematyczne procesu mogą, dzięki swojej prostocie i równocześnie dobrej dokładności, stanowić dobrą podstawę do projektowania układów automatycznego sterowania procesem skrawania. W związku z występującym szerokim zakresem zmian parametrów procesu skrawania, opracowane modele mogą być łatwo wykorzystane w układach sterowania adaptacyjnego obrabiarkami.

Sformułowano funkcjonalne przeznaczenie elementów zautomatyzowanego układu projektowania procesów technologicznych jako modułu programowego systemu zautomatyzowanego projektowania „Ciała obrotowe”, stosowanego przy projektowaniu procesów technologicznych obróbki wałków o małej sztywności. W celu zwiększenia efektywności pracy podsystemu programowego do jego składu wprowadzono bloki, realizujące konwersację z użytkownikiem w procesie realizacji obliczeń, uwzględniające charakterystyki statyczne i dynamiczne układu technologicznego. Zastosowanie modułów programowych umożliwia wyznaczenie charakterystyk dokładnościowych i jakościowych procesu obróbki wałów o małej sztywności i wybór odpowiedniego oprzyrządowania. Zastosowanie opracowanej metodyki i algorytmów zwiększa efektywność projektowania, w wyniku polepszenia jakości rozwiązań projektowych oraz zwiększenia wydajności.

## Literatura:

- [1] Abakumov A. M., Vidmanov Yu. I., Mihelkevich V. N.: *Algoritmizaciya processa prodolnogo tocheniya*. Stanki i instrument. 1972, N9, ss. 29-31
- [2] Abakumov A. M., Vidmanov Yu. I., Mihelkevich V. N.: *Obobschennaya matematicheskaya model' technologicheskogo processa prodolnogo tocheniya*. Алгоритмизация и автоматизация технологических процессов и промышленных установок: Межвуз. сб. научн. тр. – Kuybyshev, 1973, Vyp. 4. ss. 3-8
- [3] Abakumov A. M., Voronin P.A., Denkievic V. A. i drug.: *Identifikaciya processa prodolnogo tocheniya*. Алгоритмизация и автоматизация технологических процессов и промышленных установок: Межвуз. сб. научн. тр. Kuybyshev, 1973, Vyp. 5. ss. 28-34
- [4] Abakumov A. M., Taranenko V. A.: *Dinamicheskiye svoystva uprugoy sistemy pri upravlenii uprugodeformirovannym sostoyaniem detaley maloy zhestkosti*. Динамика станочных систем и гибких автоматизированных производств: Тезисы докл. 3-ей Всесоюзной науч.-техн. конф. Togliatti, 1988, ss. 334-335
- [5] Abakumov A. M., Taranenko V. A.: *Matematicheskaya model' processa tocheniya detaley maloy zhestkosti*. Идентификация и автоматизация технологических процессов в машиностроении: Сб.науч.тр. Kuybyshev, 1988, ss. 67-69
- [6] Abakumov A. M.: *Aproksimirovannye matematicheskiye modeli tehnologicheskikh processov mehanicheskoy obrabotki*. Оптимизация производственных процессов: Науч.-техн.сб. – Sevastopol,1994, Vyp. 2, s. 156-160
- [7] Abakumov A. M., Vidmanov Yu. I., Tretyak V. E.: *O dostizhimom kačestve upravleniya processom prodolnogo tocheniya*. Алгоритмизация и автоматизация технологических процессов и промышленных установок: Межвуз. сб. научн. тр. Kuybyshev, 1974. Vyp. 5, ss.20 - 24
- [8] Abakumow A.M., Kosatenko N.E., Taranenko W.A.: *Approxymizowane matematyczne modeli technologicznego processa prodolnego toczenia*. Optymizacja proizvodstwennych processow: Wyn. 1. Sb. naucz. Tr. Sewastop. gos. techn. un-t -Sewastopol, 1999 – s.79-81.
- [9] Abakumow A., Taranenko W., Zubrzycki J.: *Moduły programowe dla badania charakterystyk układu dynamicznego procesu skrawaniach*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej NR 230 MECHANIKA, z. 67 – Modułowe Technologie i Konstrukcje w Budowie Maszyn, Rzeszów 2006. – s. 99 - 109
- [10] Abakumov A., Taranenko V., Zubrzycki J.: *Modeling of characteristics of dynamic system of turning process for axialsymetric shafts*. V-th International Congress “Mechanical Engineering Technologies’ 06” (MT

- 06), September 20 –23. 2006, Varna, Bulgaria. PROCEEDINGS. Section III. p.76 – 78
- [11] Abakumov M. A., Taranenko V. A., Czachor G.: *Obosnovaniye priteriya optimizacii adaptivnogo upravleniya metallorezhushchimi stankami pri determinirovannyh vozmushcheniyah*. Materiały Międzynarodowej konferencji naukowo-technicznej «Automatyzacja: problemy, idee, rozwiązania», 20–24.05.2002, Sewastopol, 2002, p.11-16
- [12] Abakumov M. A., Taranenko V. A., Czachor G.: *Nastroyka adaptivnoy SAU dinamicheskoy sistemy tokarnogo stanka*. 8<sup>th</sup> International Conference TECHNOLOGY 2003 (9-10 September 2003), Bratislava, Slovakia
- [13] Abakumov A., Taranenko V., Zubrzycki J. Wolos D.: *Controlling the dynamical system of machine tools by elastic-deformable shafts machining*. Прогрессивные Технологии И Системы Машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2006. Выпуск 32. – С. 272 -278
- [14] Balashkin B. S. red.: *Adaptivnoye upravleniye stankami*. Машиностроение, 1973. 688 s.
- [15] Solomencov Yu. M., Mitrofanov V. G., Protopopov S. P. i drug.: *Adaptivnoye upravleniye tehnologicheskimi processami*. Машиностроение, 1980. – 536 s.
- [16] *Adaptive control calls the shots in aerospace work*. American Machinist. 1971, №22. – 26 p.
- [17] Albrecht P.: Dynamics of the Metal-Cutting Process. Trans. Of ASME, 1965, ser. B, vol. 87, No 4, S. 429 – 446
- [18] Bazrov B. M.: *Tehnologicheskiye osnovy proyektirovaniya samopod-nastraivayushchihsya stankov*. Машиностроение, 1978. – 216s.
- [19] Bessekerskiy V. A., Nebylov A. V.: *Robastye sistemy avtomaticheskogo upravleniya*. Hayka, 1983. – 240 s.
- [20] Bugla M., Taranenko V. A.: *Modelirovanie dinamicheskikh harakteristik processa tocheniya*. Materiały konferencyjne Międzynarodowej studenckiej konferencji naukowo-technicznej, Sewastopol 13–17.05.2002, Sewastopol, 2002, ss. 29-30
- [21] Volosov S. S., Geyler Z. Sh.: *Upravleniye kachestvom produkcii sredstvami aktivnogo kontrolya*. Izd-vo standardov, 1989. 264s.
- [22] Choroszy B.: *Technologia maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. Wrocław. 2000.
- [23] Czachor G., Taranenko W.: *Uproszczone modele matematyczne układu dynamicznego procesu obróbki toczeniem*. Acta Mechanica Slovaca, KOŠICE, 3/2003. ROČNIK 7. pp.201-210. Journal published by Fakulty of Mechanical Engineering, the Technical University in Košice
- [24] Czachor G., Grzesik W., Taranenko W.: *An intelligent multilevel adaptive control algorithm for metal cutting process*. Annals of DAAAM for 2002 Proceedigs of the 13 th International DAAAM Symposium

- «Intelligent Manufacturing & Automation: Learning From Nature» Vienna University of Technology, 23-26 October 2002, Vienna, Austria. pp.123–124.
- [25] Das M. K., Tobias S. A.: *The Relation between the Static and the Dynamic Cutting of Metals*. Int. Journal of Machine Tool Des Res., 1967, nr 2, p. 63–89
- [26] Doi S., Kato S.: *Shatler Vibration of Lathe Tools*. Transaction of ASME, V.73, №5, 1956.
- [27] Drachev O. I., Taranenko V. A.: *Eksperimental'noe issledovaniye struktury modeli uprugoy sistemy stanka*. Vestnim HPI. Ser. Mashinostroyeniye. Har'kov, 1984, Vyp. 14, № 208. pp.18–21
- [28] Druzhinskiy I. A.: *Mechanicheskiye cepi*. Mashinostroyeniye, 1977. 238s.
- [29] Elyasberg M. E.: *K teorii i raschetu ustoychivosti processa rezaniya metallov na stankah*. Stanki i instrument, 1972, №11.ss. 6–11; №12. ss.1–6
- [30] Elyasberg M. E., Savinov I. A.: *Eksperimentalnoye opredeleniye parametrov obrabatyvayemogo materiayla, vliyayushchih na ustoychivost' protiv avtokolebaniy*. Stanki i instrument. 1979, № 12. ss. 23 – 29
- [31] Jemielniak K.: *Budowa analitycznych modeli procesu skrawania*. Prace Naukowe ITBM Politechniki Wroclawskiej, 18 (1977), s. 174.–179
- [32] Jemielniak K.: *Analinychno doświadczalny model dynamicznej charakterystyki procesu skrawania przy toczeniu nieswobodnym*. Prace Naukowe Pol. Warsz., ser. Mechanika, zeszyt 126, Warszawa 1990
- [33] Frer F., Ortenburger F.: *Vvedeniye v elektronnuyu tekhniku regulirovaniya*. Energiya, 1973. 423s.
- [34] Galickov S. Ya.: *Dinamika elektromechanicheskikh sistem precizionnykh stankov i robotov*. Uchebnoye posobie. Kuybyshev, politehn. in-t. 1989. 109s.
- [35] Glushko V. V., Butenko Yu. P., Verhovod A. V.: *Sintez' adaptivnykh sistem upravleniya processami rezaniya na EVM*. Stanki i instrument. 1977. № 10. cc.6 – 7.
- [36] Granovskiy G. I., Granovskiy V. G.: *Rezaniye metallov*. Vysshaya Shkola, 1985, 304s.
- [37] Grasso V., Noto La Diega S., Passannanti A.: *Dynamic Cutting Coefficients in Three Dimensional Cutting*. Int. Journ. of Mach. Tool Des. and Res., 1980, vol. 20, p. 235–249
- [38] Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów metalowych.*, WNT, Warszawa, 1998. 382 s.
- [39] Hahn R. S.: *On Theory of regenerative chatter in precissions griding operations*. Trans. ASME, 76 (1954), s. 593
- [40] Kaminskaja V. V., Kusznir E. F.: *Dinamiczeskaja charakteristika processa rezaniya pri slivnom struzkoobrazovanii*. Stanki i instrument. 1979, №5. ss. 27–34.
- [41] Korytin A. M., Shaparev N. K.: *Optimizaciya upravleniya metallorazhushchimi stankami*. Mashinostroyeniye, 1974, 200s.

- [42] Knight W.A.: *Aplication of the Universal Machinability Chart to the production of Machine Tool Stability*. Int. J. Mach. Tool Des Res., 8 (1968), p. 1–2
- [43] Knight W. A., Tobias S.A.: *Torsional Vibrations and Machine-Tool Stability*. 10<sup>th</sup> Ins. M.T.D.R. Conf. ,MS. 31 (1969).
- [44] Krol' O. C.: *Ispolzovaniye programnoy sredy MATLAB pri modelirovaniy processa prodolnogo tocheniya*. Stanki i Instrument. 1995, №4, ss. 32 – 34
- [45] Kudinov V. K.: *Dinamičeskaja charakteristika processa rezaniya*. Stanki i instrumenty, 1963, nr 10, s. 1 – 7.
- [46] Kudinov V. K.: *Dinamika stankov*. Mashinostroyeniye, 1967. 359s.
- [47] Kupt F. H., Armin W.: *Adaptive Prozesführung beim Annenschleifen mit digitalen Regelungen*. VDA – Zeitschrit. – 1992. – 134, №12. – S. 64, 108.
- [48] Kuzovkov N. T.: *Modalnoe upravleniye i nablyudayshchiye ustroystva*. Mashinostroyeniye, 1976. 184s.
- [49] Lazarev G. S.: *Avtokolebaniya pri rezanii metallov*. Vysshaya Shkola, 1971, 244s.
- [50] Marchelek K.: *Dynamika obrabiarek*. WNT Warszawa, 1995. - 631 s.
- [51] Maslov E. N.: *Teoriya shlifovaniya metallov*. Mashinostroyeniye, 1974. 320 p.
- [52] Meystel' A. M., Naydis V. A., Tankunas R. Yu.: *Vybor sistemy dlya avtomaticheskogo perehoda s bystroy podachi na rabochuyu v shlifoval'nyh stankah*. Stanki i Instrument, 1972, № 10. ss. 12 – 16
- [53] Михелькевич В. Н.: *Автоматическое управление шлифованием*. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
- [54] Муминов Н. А., Митрофанов В. Г.: *Адаптивное управление технологическими процессами в машиностроении*. Ташкент: Фан, 1976. 174 с.
- [55] Nigm M.M., Sadek M.M., Tobias S.A.: *Prediction of Dynamic Cutting Coefficients from steady State Cutting data*. 13-th Int. M.T.D.R. Conf., (1972)
- [56] Nigm M. M., Sadek M. M., Tobias S. A.: *Dimensional Analysis of the Steady. State orthogonal Cutting Process*. Int. J. Mach. Tool Des Res., 17 (1977)
- [57] Nikitin B. B.: *Расчет динамических характеристик металлорежущих станков*. М.: Машгиз, 1962. – 112 с.
- [58] Oczóś E.: *Postęp w obróbce skrawaniem. I. Obróbka z dużymi prędkościami (High Speed Machining)*. Mechanik 3/98. – S.109 – 124
- [59] Oczóś E., Porzycki J.: *Szlifowanie*. WTN, Warszawa, 1986.
- [60] Oleynikob V. A., Zotov N. S., Prishvin A. M.: *Основы оптимального и экстремального управления*. – М.: Высшая школа, 1969. – 296 с.
- [61] Paglagnok G. G.: *Многофункциональная диагностика и управление процессом механической обработки*. Автореферат дисс. докт. техн. наук: 05. 03.01. – Ростов-на-Дону, 1994. – 46 с.



- [62] Palk K. I.: *Системы управления механической обработкой на станках*. – Л.: Машиностроение, 1984. – 215 с.
- [63] Palk K. I., Kardinalova O. K.: *Параметрические колебания в адаптивных системах управления обработкой на станках*. Станки и инструмент. – 1990. - № 12. – С.22 – 23
- [64] Patent RU № 2130360 C1 *Способ механической обработки нежестких осесимметричных деталей и устройство для его реализации* B23B 23/00, B23Q 15/00. Абакумов А. М., Тараненко В.А., Тараненко Г. В. Бюл. № 14, 1999.
- [65] Patent RU № 2162770 C2 *Задняя бабка токарного станка*. МКИ B23B 23/00 /Абакумов А. М., Тараненко В.А., Тараненко Г. В. Бюлл. № 4, 2001.
- [66] Peters J., Vanherck P.: *Machine Tool Stability Test and Incremental Stiffnes*. CIRP Annales, 17 (1969), s. 225.
- [67] Polacek M.: *Stabilitat von erkzeugmaschinen*. Werkstatt und Betrieb, 103 (1970), s. 657.
- [68] Praca zbiorowa: *Poradnik inżyniera. Obróbka skrawaniem. Tom I*. WNT. Warszawa, 1991.
- [69] Raybman N. S., Chadeev V. M.: *Построение моделей процессов производства*. – М.: Энергия, 1975. – 304 с.
- [70] Rappoport N. T.: *Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока*. – Куйбышев: 1985. – 56 с.
- [71] Ratmirov V. A., Churin I. N., Shmuter S. L.: *Повышение точности и производительности станков с программным управлением*. Машиностроение, 1970. – 343 с.
- [72] Rastrigin L. A., Madzharov N. E.: *Введение в идентификацию объектов управления*. Энергия, 1977. – 215 с.
- [73] Rozenvasser E. I., Yusupov R. M.: *Чувствительность систем автоматического управления*. Энергия, 1969. – 208 с.
- [74] Skrodziejewicz J., Marchelek K., Tomkov J.: *Doświadczalne badania i estymacja empirycznych charakterystyk dynamicznych procesu skrawania*. Prace Naukowe ITBM Politechniki Wrocławskiej. 30 (1985), s. 298.
- [75] Solodovnikov V. V., Shramko L. S.: *Расчет и проектирование самонастраивающихся систем с эталонными моделями*. Машиностроение, 1972. – 209 с.
- [76] Solomencev J. M., Mitrofanov V. G., Taranenko V. A.: *Adaptivne riadenie obrabacich strojov*. Bratislava: ALFA, 1983. – 231 s.
- [77] *Справочник технолога-машиностроителя*: В 2-х т. Под ред. Косиловой А. Г. и Мещерякова Р. К.. М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
- [78] Syu D., Meyer A.: *Современная теория автоматического управления и ее применение*. Под ред. Ю. И. Топчиева. М.: Машиностроение, 1972. – 544 с.

- [79] Taranenko V. A., Abakumov A. M.: *Динамические модели для оценки точности технологических систем*. Машиностроительное производство. Сер. Технология и оборудование обработки металлов резанием. ВНИИТЭМР, 1989. – 56 с.
- [80] Taranenko W. A., Czachor G.: *Badania eksperymentalne charakterystyk układu dynamicznego modułu tokarskiego*. Modułowe technologie w konstrukcji maszyn MTK'02 15-18 październik 2002. Rzeszów 2002.
- [81] Taranenko V. A., Taranenko G.: *Modelling of dynamic characteristics turning processing for want of management by a elastic deformed condition*. Acta Mechanica Slovaca. Kosice 3/2001, Ročník 5. P.19-24.
- [82] Taranenko V. A., Czachor G.: *Adaptacyjne sterowanie obróbką skrawaniem jako obiektem o zmiennych parametrach*. Сборник трудов XIII международной научно-технической конференции «Машиностроение И Техносфера На Рубеже XXI Века» 10-16 сентября 2001г. Севастополь; Том 3, Донецк, 2001.- С.242-246.
- [83] Taranenko V. A., Czachor G.: *Experimental identification of dynamic model of turning process*. Материалы X Международной научн.-техн. конф. «Машиностроение И Техносфера XXI Века»– (8–13 сентября 2003 г. в г. Севастополе) –Донецк, 2003.-С.
- [84] Taranenko V. A., Czachor G.: *Identificaion of time-varying structure and parameters of metal turning process for real-time predictive control*. 15–16 September 2003, Barcelona-Spain
- [85] Taranenko V. A., Abakumow A., Czachor G.: *Identification of dynamic discrete model of cutting process*. International Conference TOOLS 2002, 11.04.2002. Kočovce, Slovak Republic.- P. 18. p.4.-CD-ROM.
- [86] Taranenko V. A., Czachor G., Taranenko G.: *Efficiency comparison of applying PID regulator and adaptive predictive controller to control cutting process*. International Conference TOOLS 2002, 11.04.2002. Kočovce, Slovak Republic.-P. 21.p.4.-CD-ROM.
- [87] Taranenko V. A., Świć A.: *Technologia kształtowania części maszyn o małej sztywności*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.- 282 s.
- [88] Taranenko V. A., Świć A.: *Urządzenia sterujące dokładnością obróbki części maszyn o małej sztywności*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006, 186 s.
- [89] Taranenko V. A., Taranenko G. V., Czachor G.: *Model-free adaptive control of turning process*. Материалы международной научно-технической конференции «Автоматизация: Проблемы, Идеи, Решения» 24-27 мая 2004 года, г. Севастополь, 2004. – С.13 – 16
- [90] Tverskoу M.: *Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках*. Машиностроение, 1982. – 208 с.
- [91] *Теория автоматического регулирования*. Машиностроение, 1992. – 207 с.

- [92] *Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования* ред. V. V. Solodovnikov. Машиностроение. Кн.1 Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования. – 1967. – 768 с. Кн.2. Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования. 1967. 679 с. Кн.3. Теория нестационарных, нелинейных и самонастраивающихся систем автоматического регулирования. Ч.1. – 1968. – 607 с. Ч. 2. – 1969. – 367 с.
- [93] Tlustý I.: *Автоколебания в металлорежущих станках*. Машиздат, 1956. – 235 с.
- [94] Tobias S. A., Fishwick W.: *Theory of Regenerative Machine Tool Chatter*. Engineer, 205 (1958), s. 199.
- [95] Tomków J., Marchelek. K., Skrodziewicz J.: *Estymacja empirycznych charakterystyk procesu skrawania*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 3 (1983), s. 3.
- [96] Tomków J.: *Wibrostanbilność obrabiarek*. Komputerowe wspomaganie obliczeń i badań doświadczalnych. WNT, Warszawa 1997. – 205 s.
- [97] Tshabanov Yu. A.: *Идентификация и исследование достижимого качества управления процессом врезного шлифования*. Автореферат дисс.канд техн.наук: 05.09.03. – Ленинград: 1978. – 22 с.
- [98] Tchahor G., Abakumov A., Taranenko V.: *Выбор алгоритмов управления динамической системой металлорежущих станков*. Сборник трудов IX Международной Научно-Технической Конференции «Машиностроение И Техносфера XXI Века» Том 3. 9-15 сентября 2002 г. в г. Севастополе.- Донецк, 2002.- С.151- 157.
- [99] Ueda K., Tsuwa H.: *Applications of Fracture Mechanics in Micro-Cutting of Engineering Ceramics*. CIRP Annales, 32 (1983), s. 83.
- [100] Weck M., Eckstein R.: *Stand und Tendenzen in der Erforschung und Beurteilung dynamischer Eigenschaften von Werkzeugmaschinen*. Prace Naukowe ITBM Politechniki Wrocławskiej. 30 (1985), s. 5.
- [101] Weck M., Teipel K.: *Assessing the Chatter Behaviour of Machine-Tools*. CIRP Annales, 27 (1978), s. 333.
- [102] Wu D. W., Liu C. R.: *An analitical model of Cutting dynamics. Part 1. Model Bulding*. Trans. ASME, 107B (1985), s. 107.
- [103] Wu D. W., Liu C. R.: *An analitical model of Cutting dynamics. Part 2. Verification* Trans. ASME, 107B (1985), s. 112.
- [104] Zars V. V.: *Vlijanie otstavaniya na vzbuzdajuščuju sposobnost sily rezaniya*. Voprosy Dinamiki i Pročnisti. nr 15, Zinatne, Riga 1967, s. 53–68
- [105] Zars V. V.: *Modilerovanie avtokolebanij metallorezhushchih stankov*. Voprosy Dinamiki i Pročnosti. Nr 18, Zinatne, Riga 1969, s. 157-169
- [106] Zorev N. N.: *Raschet proekcji sily rezania*. - Moskwa: Mashinostroenie, 1958. - 58 s.

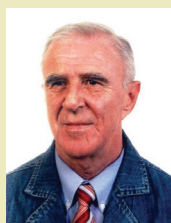
- [107] Taranenko V. A.: *Modelirovanie technologicheskikh sistem formo-obrazovania nezestkikh detalej*: Obzor. Inf. Ser. Technologia i oborudovanie obrabotki metallov rezaniem. VNIITEMR, 1988. – 70 s.
- [108] Konig W., Depiereux W. R.: *Wie lassen sich Vorschub und Schnittgeschwindigkeit optimieren?* Industrie Anzeiger. 1969. № 61. S.34-38.
- [109] Vy D., Ermer V.: *Наибольшая прибыль как критерий определения оптимальных режимов резания*. Теоретические основы инженерных расчетов. Сер. В. – М.: 1966. – Т.88, №4. – С.66 – 74.
- [110] Ermer V.: *Использование байесовой модели при оптимизации экономики механической обработки методами адаптивного управления*. Теоретические основы инженерных расчетов. Сер. В. 1970. - № 3. – С.67 – 70.
- [111] Opitz H., Bernardi F.: *Investigation and calculation of the cater behavior of lathes and milling machines*. Ann. CJRP. – 1970. – 18, №2.
- [112] Opitz H.: *Adaptive control – fundamental principles for numerical optimization of cutting condition*. International conference of manufacturing technology. Michigan, 1967
- [113] Aleksenko A. G., Golicyn A.A., Ivannikov A.D.: *Projektirovanije radioelektronnoj apparatury na mikroprocesorah: Programirovanije, tipovye reshenija, metody otladki*. М.: Radio i svjaz', 1984. – 272 s.
- [114] A. s. nr 335668 SSSR, MKI<sup>3</sup> G05 B 13/02. *Ustrojstvo dlja programnogo upravljenja podachej shlifovalnogo stanka*. Abakumov A., Mihielkievich V., Prjanichnikov V. i dr. Opubl. 11.04.72, Bjul. №13. – 2 s.
- [115] A. s. nr 419847 SSSR, MKI<sup>3</sup> G05 B 13/02, G05 B 19/02. *Samonastraivajushchajasja sistema upravljenja prodolnoj podachej tokarnogo stanka*. A. M. Abakumov, Ju. I. Vidmanov, W.G. Kuperman, V.V. Prjanichnikov i dr. Opubl. 15.03.74, Bjul. Nr 10. – 3 s.
- [116] A. s. nr 406664 SSSR, MKI<sup>3</sup> B23 B 7/00, G05 B 11/01. *Ustrojstvo dlja avtomaticheskogo upravljenja prodolnoj podachej tokarnogo stanka*. Abakumov A. M., Ju. I. Vidmanov, V. I. Pavlov i dr. Opubl. 21.11.73, Bjul. Nr 46. – 2 s.
- [117] A. s. nr 419848 SSSR, MKI<sup>3</sup> G05 B 13/02, G05 B 19/02. *Samonastraivajushchajasja sistema avtomaticheskogo upravljenja uprugimi peremeshchenijami tokarnogo stanka*. Abakumov A. M., Mihielkievich V., Ju. A. Chabanov i dr. Opubl. 15.03.74, Bjul. Nr 10. – 3 s.
- [118] A. s. Nr 475220 SSSR, MKI<sup>3</sup> B23 B 26/06, G23 q 5/00. *Adaptivnaja sistema upravljenja tokarnym stankom*. A. M. Abakumov, Ju. I. Vidmanov, V. A. Denkievic i dr. Opubl. 30.06.75, Bjul. №24. – 2 s.
- [119] A. s. № 1730538 SSSR, MKI<sup>3</sup> G01 B 21/02. *Ustrojstvo dlja izmierenija cmeshchenija kromki neprozrachnogo objekta*. A. M. Abakumov, Bakuljev S. B., V. Ju. Mishin i dr. Opubl.. 30.04.92, №16. – 5 s.
- [120] Wołos D.: *Konstrukcja konika tokarki do obróbki wałów w stanie sprężystości – odkształcalnym*. Przegląd Mechaniczny nr 12S'06 s. 154-156

- [121] Chernov E.A., Kuzmin V. P.: *Kompleknyje elektroprivody stankov ChPU*. Gorkiy, Volgo-Vyatskoye kn. izd. – vo, 1989. – 320 s.
- [122] Frer F., Ortenburger F.: *Vvedeniye v elektronnyu tekhniku regulirovaniya*. – Moskva: Energiya, 1973. – 423 s.
- [123] Zubrzycki J., Abakumov A., Taranenko W.: *Modelowanie układu dynamicznego procesu skrawania*. W: Zagadnienia pęknięcia i skrawania materiałów plastycznych. Monografia, red. Józef Jonak, Wyd. LTN, Lublin 2008.
- [124] Zubrzycki J., Abakumov A., Taranenko W., Taranenko G.: *Badania eksperymentalne charakterystyk układu dynamicznego procesu technologicznego toczenia*. [w]: Zagadnienia pęknięcia i skrawania materiałów plastycznych. Monografia, red. Józef Jonak, Wyd. LTN, Lublin 2008.
- [125] Zubrzycki J., Drachov O., Taranenko V., Taranenko G.: *The device to processing of the deep holes*. Acta Mechanica Slovaca, Journal published by Faculty of Mechanical Engineering, the Technical University in Kosice, Kosice, 2-A/2008, Ročník 12. – pp. 757 – 760
- [126] Zubrzycki J., Draczow O., Taranenko W., Taranenko G.: *Model matematyczny układu dynamicznego procesu wiercenia wibracyjnego*. Modelowanie inżynierskie Tom 4, nr 35. Wyd. Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny. Gliwice 2008, ss. 169-176.
- [127] Zubrzycki J., Opielak M.: *Compiled of mathematical model and processes control system synthesis of hole drilling*. XIX International scientific and technical conference "Machine-Building And Technosphere Of The XXI Century", Ukraina, Sewastopol 17-22 września 2012, Conference proceedings pp. 238-243
- [128] Zubrzycki J., Świć A., Opielak M.: *Modeling of dynamic system characteristics of deep hole drilling with tools of varying stiffness*. Applied Mechanics and Materials Vol. 613 (2014) p 333-339 © (2014) Trans Tech Publications, Switzerland
- [129] Zubrzycki J., Świć A., Taranenko V.: *Mathematical model of the hole drilling process and typical automated process for designing hole drilling operations*. Applied Mechanics and Materials Vol. 282 (2013) pp. 221-229
- [130] Zubrzycki J., Szabelski J., Taranenko W., Taranenko G.: *Using the artificial neural network to controll the low stiffness shafts machining*. Автоматизация: Проблемы, Идеи, Решения: Материалы междунар. научн.-техн. конф., 10-15 сентября 2007 г. - Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С. 93-96.
- [131] Zubrzycki J., Taranenko V., Mazurek L. Typical structure of automated projecting holes drilling process. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Scientific Conference Flexible Technologies - MMA 2006, 15-16 June, 2006, Novi Sad, Serbia and Montenegro, Novi Sad, 2006. – P.133 - 134
- [132] Zubrzycki J., Taranenko V., Mazurek L.: *Typical structure of automated projecting holes drilling process*. 9th International Scientific Conference on Flexible Technologies. MMA 2006. Proceedings. Novi Sad, Serbia and Montenegro, 15-16 June 2006. Pp. 133-134.

- [133] Zubrzycki J., Taranenko W., Świć A., Lewczenko A.: *Sterowanie automatyczne procesem wiercenia głębokich otworów*. Pomiary. Automatyka. Robotyka. Miesięcznik naukowo – techniczny, nr 2/2007, Warszawa 2007, 13 s. (ref. 11)
- [134] Zubrzycki J.: *Automation of shafts machining about low rigidity*. [w]: Computer aided production engineering, [Red.] Lipski J., Świć A., Wyd. Politechnika Lubelska, Lublin 2013, pp. 110-125
- [135] Zubrzycki J.: *Identyfification and automation of shafts machining*. [w] Aspects of fracture and cutting mechanics of materials. Editor: Józef Jonak; wyd. LTN Lublin 2010, pp. 23-39
- [136] Zubrzycki J.: *Principle of building the mathematical models of machining dynamic system*. Автоматизация: Проблемы, Идеи, Решения: Материалы междунар. научн.-техн. конф., 12-17 сентября 2006 г. - Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – С. 88-90.
- [137] Zubrzycki J.: *Structure of the typical automated process of designing hole drilling operations*. XVIII<sup>th</sup> International scientific and technical conference "Machine-Building and Technosphere of the XXI Century", Ukraina, Sewastopol 14-19 sept. 2011
- [138] Zubrzycki J.: *Zasady budowy modeli matematycznych układów dynamicznych obróbki skrawaniem części o małej sztywności*. Przegląd Mechaniczny 12S'06, wyd. IMBiGS, Warszawa, ISSN 0033-2259, ss. 160-162.



**Prof. dr hab. inż. Aleksandr Abakumow** jest profesorem w Katedrze Elektromechaniki i Oprzyrządowania elektrycznego pojazdów Samarskiego Państwowego Uniwersytetu Technicznego w Samarze, (Rosja). W latach 1998–2014 był kierownikiem ww. Katedry. Główny obszar zainteresowań i działalności naukowej to przede wszystkim modelowanie matematyczne i automatyczne sterowanie procesami technologicznymi i instalacjami przemysłowymi. Jest promotorem 7 prac doktorskich i opiekunem naukowym 1 rozprawy habilitacyjnej. Jest długoletnim i zasłużonym pracownikiem wyższego kształcenia zawodowego Federacji Rosyjskiej. Autor ponad 180 prac naukowych i naukowo-technicznych oraz 33 patentów. Wyniki prac wdrożono w przedsiębiorstwach różnych gałęzi przemysłu z wymiernym efektem ekonomicznym. <http://em.samgtu.ru/node/2>



**Prof. dr hab. inż. Wiktor Taranenko** jest Kierownikiem Katedry Zautomatyzowanego Sterowania Procesami Produkcyjnymi w Łuckim Narodowym Uniwersytecie Technicznym, Łuck, (Ukraina). Przez wiele lat był kierownikiem Zakładu Elastycznych Systemów Wytwarzania w Instytucie Technologicznych Systemów Informacyjnych Politechniki Lubelskiej. Promotor ponad 400 prac magisterskich i inżynierskich. Ma ponad 40 wspólnych publikacji ze studentami (18 z nich to patenty). Jest członkiem rzeczywistym Akademii Informatyki Akademii Nauk Ukrainy, członkiem rzeczywistym Wyciągowo-Transportowej Akademii Nauk Ukrainy oraz członkiem International Union of Machine Builders. Zajmuje się głównie automatyzacją i sterowaniem procesów technologicznych obróbki skrawaniem i montażu części maszyn oraz elastycznymi systemami wytwórczymi. W dorobku naukowym ma ponad 570 publikacji

(w tym 110 patentów, 22 książek i monografii) krajowych i zagranicznych. Były one przedstawione na ponad 130 zagranicznych, krajowych i międzynarodowych konferencjach i seminariach. Wiele z tych prac opublikowano w b. Jugosławii, Rosji, Ukrainie i na Słowacji. Wyniki prac wdrożono w przedsiębiorstwach różnych gałęzi przemysłu z wymiernym efektem ekonomicznym. Autor i współautor licznych publikacji dydaktycznych. Ze współautorem książki można skontaktować się za pomocą poczty elektronicznej: [wtaran\\_ark@mail.ru](mailto:wtaran_ark@mail.ru)



**Dr inż. Jarosław Zubrzycki**, adiunkt w Instytucie Technologicznych Systemów Informacyjnych, kierownik Zakładu Systemów Informacyjnych. Jest członkiem International Union of Machine Builders oraz Polskiego Towarzystwa Inżynierii Produkcji o/Lublin. Autor i współautor ponad 110 prac naukowych (w tym 6 książek i monografii), a także 50 opracowań technicznych na potrzeby przemysłu. Publikacje były przedstawione na szeregu krajowych, międzynarodowych i zagranicznych konferencjach naukowych i naukowo-technicznych. Zajmuje się głównie problemami technologii obróbki ubytkowej, informatyki stosowanej, monitoringiem i nadzorowaniem procesów technologicznych i wytwórczych. Autor szeregu programów nauczania na specjalności Informatyka w Inżynierii Produkcji, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji oraz kierunku studiów Inżynieria Biomedyczna. Ze współautorem książki można skontaktować się za pomocą poczty elektronicznej: [j.zubrzycki@pollub.pl](mailto:j.zubrzycki@pollub.pl)



**Doc. dr inż. Georgij Taranenko**, pracownik Sewastopolskiego Narodowego Uniwersytetu Technicznego, prodziekan Wydziału Technologii, Automatyzacji Budowy Maszyn, Przyrządów i Transportu. Zajmował się głównie automatyzacją i sterowaniem procesów technologicznych obróbki skrawaniem. Autor i współautor 106 publikacji naukowych i dydaktycznych (w tym 5 monografii, 6 patentów). Były one przedstawione na licznych konferencjach, sympozjach, kongresach krajowych i zagranicznych.

ISBN 978-83-7947-087-7



9 788379 470877