

NADZOROWANIE PROCESÓW DYNAMICZNYCH W UKŁADACH MECHANICZNYCH

KRZYSZTOF J. KALIŃSKI



WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikieliewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

RECENZENCI

Andrzej Buchacz

Edmund Wittbrodt

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI

Katarzyna Olszonowicz

Wydanie I – 2012

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem <https://sklep.pg.edu.pl>.

Publikacja dostępna na licencji [CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2026

ISBN 978-83-7348-955-4

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie II (poprawione). Ark. wyd. 14,5, ark. druku 15,5, 126/714

Spis treści

1. Wstęp	7
2. Ogólna charakterystyka procesów dynamicznych	9
I. PODSTAWY TEORETYCZNE	
3. Metoda elementów skończonych w nadzorowaniu procesów dynamicznych	14
3.1. Koncepcja elementu skończonego	15
3.2. Modelowanie układów mechanicznych metodą sztywnych elementów skończonych	18
3.3. Modelowanie układów mechanicznych metodą odkształcalnych elementów skończonych	22
3.3.1. Element skończony izoparametryczny 8-węzłowy	22
3.3.2. Element skończony typu pręt Eulera-Bernoulliego	29
3.3.3. Element skończony w ruchu obrotowym	34
3.3.4. Wybrane programy metody elementów skończonych	37
3.4. Modelowanie sterowanych układów mechanicznych mieszaną metodą sztywnych i odkształcalnych elementów skończonych	40
3.4.1. Układy stacjonarne	40
3.4.2. Układy o zmiennej w czasie konfiguracji	48
3.4.2.1. Układy zależne związane równaniami więzów	50
3.4.2.2. Układy o zmiennym oddziaływaniu elementów sprzęgających, wywołanym zmianą położenia podukładów	56
3.4.3. Układy nieliniowe	57
3.5. Równania dynamiki układu sterowanego we współrzędnych stanu	59
3.6. Podsumowanie	59
4. Sterowanie optymalne przy energetycznym wskaźniku jakości	61
4.1. Sterowanie w liniowym układzie niestacjonarnym	61
4.1.1. Sterowanie we współrzędnych uogólnionych	61
4.1.1.1. Sterowanie w układzie zredukowanym	64
4.1.2. Sterowanie we współrzędnych stanu	67
4.1.2.1. Sterowanie w układzie o działaniu ciągłym	67
4.1.2.2. Sterowanie w układzie o działaniu dyskretnym	69
4.1.3. Sterowanie w układzie z opóźniającym sprzężeniem zwrotnym	73
4.2. Sterowanie w układzie nieliniowym	74
4.3. Podsumowanie	76
5. Analiza modalna w nadzorowaniu procesów dynamicznych	77
5.1. Pojęcia podstawowe	77
5.2. Wybrane metody identyfikacji parametrów modelu obliczeniowego	79
5.2.1. Metoda LSCE	79
5.2.2. Metoda Ibrahima	83
5.2.3. Metoda ERA	89
5.2.4. Metoda p-LSCFD	95
5.2.5. Przykłady zastosowania metody ERA i p-LSCFD	96
5.3. Kryteria oceny zgodności parametrów modeli obliczeniowych	109
5.4. Sterowanie modalne jako metoda nadzorowania drgań	110
5.4.1. Sterowanie w dziedzinie czasu	110
5.4.2. Sterowanie w układzie zredukowanym	114

5.4.3. Sterowanie impulsowe	115
5.4.4. Sterowanie w dziedzinie częstotliwości	116
5.5. Sterowanie optymalne we współrzędnych hybrydowych	118
5.6. Podsumowanie	124
II. ZASTOSOWANIA	
6. Nadzorowanie ruchu dwukołowej platformy mobilnej	125
6.1. Charakterystyka ogólna	125
6.2. Model obliczeniowy	126
6.3. Sterowanie optymalne przy energetycznym wskaźniku jakości	129
6.3.1. Symulacja komputerowa	130
6.3.2. Realizacja procesu nadzorowania platformy docelowej	134
6.3.2.1. Opis stanowiska badawczego	135
6.3.2.2. Wybrane trajektorie ruchu platformy	136
6.4. Podsumowanie	139
7. Nadzorowanie drgań manipulatora robota IRb-6	141
7.1. Charakterystyka ogólna	141
7.2. Model obliczeniowy	143
7.2.1. Modelowanie manipulatora metodą sztywnych elementów skończonych	143
7.2.2. Identyfikacja parametrów modelu modalnego	147
7.2.3. Ocena zgodności modelu obliczeniowego	155
7.3. Sterowanie modalne przy energetycznym wskaźniku jakości	157
7.3.1. Symulacja komputerowa	157
7.3.1.1. Drgania nieustalone	157
7.3.1.2. Ustalone drgania wymuszone	162
7.3.2. Realizacja procesu nadzorowania manipulatora robota	167
7.3.2.1. Aktywny system nadzorowania drgań	167
7.3.2.2. Wybrane konfiguracje manipulatora	170
7.4. Podsumowanie	176
8. Wybrane procesy frezowania szybkościowego smukłymi narzędziami	178
8.1. Charakterystyka ogólna	179
8.2. Dynamiczna charakterystyka procesu skrawania	183
8.2.1. Model proporcjonalny	186
8.2.2. Model Nosyrievej-Molinari	187
8.3. Frezowanie przedmiotów podatnych frezem kulistym	189
8.3.1. Model obliczeniowy	189
8.3.2. Przenośny system nadzorowania drgań	194
8.3.3. Nadzorowanie drgań narzędzie-przedmiot obrabiany za pomocą sterowania optymalnego prędkością obrotową wrzeciona	208
8.3.3.1. Sterowanie w układzie ze sprzężeniem opóźniającym we współrzędnych hybrydowych	208
8.3.3.2. Sterowanie optymalne przy energetycznym wskaźniku jakości	209
8.3.3.3. Sterowanie optymalno-liniowe	210
8.3.4. Nadzorowanie drgań narzędzie-przedmiot obrabiany z dopasowaniem prędkości obrotowej wrzeciona do optymalnego kąta przesunięcia fazowego	215
8.3.4.1. Podejście uogólnione	215
8.3.4.2. Podejście zmodyfikowane	217
8.3.4.3. Procedura nadzorowania drgań	218
8.3.5. Modalna procedura nadzorowania drgań narzędzie-przedmiot obrabiany	218
8.3.6. Eksploatacyjna procedura nadzorowania drgań narzędzie-przedmiot obrabiany	224
8.4. Podsumowanie	232
9. Zakończenie	234
Bibliografia	237

1. Wstęp

Wysokie wymagania stawiane współczesnym systemom, maszynom i procesom technologicznym powodują, że w celu ich prawidłowego funkcjonowania nie wystarcza już nawet gruntowna wiedza na temat towarzyszących zjawisk fizycznych czy też określenia (genezy) przyczyn ich zaistnienia. Coraz istotniejszą rolę odgrywają zaawansowane, profesjonalne umiejętności wcześniejszego rozpoznawania (diagnozy), prognozowania i skutecznego przeciwdziałania negatywnym skutkom tych zjawisk, w świetle konieczności zapewnienia poprawnych warunków użytkowania i eksploatacji. Niniejsza monografia wychodzi naprzeciw tym rosnącym wymaganiom. Jej tematyka dotyczy kształtowania optymalnych własności, zmiennych w czasie procesów obserwowanych w systemach mechanicznych zwanych *procesami dynamicznymi*. Te ostatnie są cechą, a zarazem – integralnym komponentem m.in. maszyn roboczych, środków transportu, urządzeń i instalacji przemysłu spożywczego i chemicznego, a zwłaszcza – na co szczególnie zwrócono uwagę w monografii – robotów stacjonarnych i mobilnych oraz nowoczesnych centrów obróbkowych i realizowanych na nich zazwyczaj złożonych procesów obróbki mechanicznej.

Zbiór czynności, stanowiących efekt świadomego oddziaływania w celu zapewnienia pożądanego przebiegu procesów dynamicznych w rozmaitych układach mechanicznych, zwany *nadzorowaniem*, jest przedmiotem badań naukowych autora, sukcesywnie rozwijanych na bazie opracowanej przez niego oryginalnej metody sterowania optymalnego przy energetycznym wskaźniku jakości. Problem nadzorowania, w odróżnieniu od tematyki dotychczasowych prac, uogólniono jednak na szerszą klasę procesów dynamicznych. Wprowadzie wcześniejsze podejście w zakresie nadzorowania drgań zajmuje poczesne miejsce w monografii, spotyka się również zagadnienia sterowania ruchem zadany układów mechanicznych, np. robotów mobilnych.

Chociaż istotną cechą nadzorowania procesów dynamicznych jest fenomenologia (zjawiskowość), w monografii nie dystansowano się od zamieszczania stosownych rozważań matematycznych. Różne, znane z literatury podejścia służące takim rozważaniom potraktowano jednak jako środek, a nie – cel zasadniczy. Stąd, przedstawione w monografii instrumentarium, prowadzące do uzyskania opisu matematycznego procesów dynamicznych (np. metoda elementów skończonych, metody sterowania optymalnego, analiza modalna), uwzględniono w zakresie niezbędnym potrzebom prezentowanych treści. Co do tych ostatnich, skoncentrowano uwagę, podobnie jak w przypadku pozostałych fragmentów pracy, na współczesnych wówczas osiągnięciach autorskich – własnych bądź przy wydatnym współudziale.

Obszerna problematyka nadzorowania drgań w procesie obróbki mechanicznej metali dotyczy głównie, mimo zamieszczania niektórych treści znanych z poprzednich prac, współczesnych procesów frezowania szybkościowego smukłymi narzędziami przedmiotów podatnych. Tym ostatnim zagadnieniom poświęcono realizowane prace badawcze i rozwojowe autora oraz kierowanego przez niego zespołu.

Jeżeli przedmiotem rozważań jest jakiekolwiek zjawisko dynamiczne (np. drgania mechaniczne), to zbiór czynności będących efektem świadomego oddziaływania, w celu zapewnienia pożądanego przebiegu tego zjawiska, nosi nazwę *nadzorowanie*. W procesie nadzorowania ma miejsce obserwacja wielkości fizycznych, decydujących o jakości procesu technologicznego (np. poziom drgań, amplituda przemieszczeń, siły oddziaływania) oraz kształtowanie określonych własności dynamicznych obiektu, zgodnie z przyjętą zasadą nadzorowania. To ostatnie może być w szczególności zrealizowane poprzez generowanie chwilowych wartości *sygnału sterującego* [39, 67]. Opublikowano znaczną liczbę prac naukowych, których tematyka dotyczy procesów dynamicznych w układach mechanicznych. Są w nich opisywane m.in. zagadnienia modelowania i analizy dynamicznej układów wielomasowych [1, 50, 195] czy dynamiki maszyn roboczych [14]. Jednak, pomimo aktualności, wartości naukowej i użytkowej prezentowanej tematyki badawczej, z uwagi na brak zdefiniowania w postaci jawnej optymalnych sygnałów sterujących, trudno jest zaliczyć te prace do kategorii nadzorowania procesów dynamicznych. Inne prace są natomiast zorientowane na rozwiązywanie odmiennej klasy zagadnień, np. diagnostyki procesów [26] czy diagnostyki pojazdów samochodowych [134].

Niniejsza monografia jest podsumowaniem osiągnięć autora, tak w zakresie badań naukowych, jak również – zastosowań w praktyce. Monografię zredagowano w dużej mierze na bazie prac finansowanych ze środków Projektu Badawczego MNIł nr 5 T07C 037 25, dotacji podmiotowej MNIł (155/E-359/SPB/Współpraca z PR UE/DIE 485/2004), Projektu Badawczego MNIł nr 4 T07D 007 30, Projektu Badawczego MNIł nr N501 052 31/3487 i Projektu Badawczego MNIł nr N N503 147134, realizowanych we współpracy z instytucjami naukowymi i gospodarczymi. Autor składa zatem podziękowania Université Paul Verlaine i Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz (Francja) za udostępnienie frezarki Alcera Gambin 120 CR oraz Zakładowi LONZAPET Sp. z o.o. w Gdańsku za udostępnienie do celów badań eksperymentalnych frezarek Mikron VCP 600, Dec-kel Maho DMU 50 V evolution i Deckel Maho DMU 50 eVo linear. Pragnie także podziękować aktywnie współuczestniczącym w większości realizowanych prac naukowych doktorom, Markowi Galewskiemu i Michałowi Mazurowi.

Nie sposób wymienić wszystkich, którzy służyli swoją radą i doświadczeniem, a także – okazywali życzliwość i zrozumienie. Autor dziękuje prof. Edmundowi Wittbrodtowi, prof. Krzysztofowi Marchelkowi i prof. Tadeuszowi Uhlowi za inspirujące dyskusje w ciągu wielu lat, które w dużym stopniu przyczyniły się do ukształtowania ostatecznego wizerunku monografii.