

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**Балюта Сергій Миколайович**



УДК 625.52.011.56:621.771.061-581

**СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ДВОРІВНЕВОГО КЕРУВАННЯ  
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ПРОКАТКИ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електропостачання промислових підприємств Національного університету харчових технологій Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

**Науковий консультант** доктор технічних наук, професор  
**Кузнецов Борис Іванович,**  
Науково-технічний центр магнетизму технічних  
об'єктів, м. Харків, завідувач відділу проблем  
керування магнітним полем

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Міхальов Олександр Ілліч,**  
Національна металургійна академія України,  
м. Дніпропетровськ, завідувач кафедри  
інформаційних технологій і систем  
доктор технічних наук, професор  
**Рогачев Олександр Іванович,**  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», м. Харків,  
професор кафедри автоматизації і керування  
в технічних системах  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Суздаль Віктор Семенович,**  
Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України,  
м. Харків, провідний науковий співробітник відділу  
технології вирощування монокристалів

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д64.050.07 в Національному технічному університеті «Харківський  
політехнічний інститут» за адресою:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Северин В. П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Близько 90% прокатних станів України експлуатуються довше встановленого терміну, що обумовлює невисоку якість і значну енергоємність готового прокату. Тому магістральним напрямом розвитку прокатного виробництва України в умовах обмежених інвестицій є реконструкція прокатних цехів і агрегатів з метою виробництва продукції, яка відповідає світовим вимогам автомобільної, електротехнічної, електронної та інших галузей промисловості.

При модернізації існуючих і проектуванні нових поколінь прокатних станів особливу увагу приділяють підвищенню точності і якості прокату, що випускається. Автоматизація прокатного виробництва є найважливішим засобом підвищення якості та отримання готового прокату, який задовольняє жорстким вимогам щодо геометричних параметрів – товщини, форми, планшетності. До основних функцій системи керування процесом прокатки в чистовій групі клітей ширококутових станів гарячої прокатки відносяться: раціональний розподіл загальних обтиснень підкату по клітях чистової групи, визначення швидкостей головних приводів валків відповідних прокатних клітей і прискорення всіх клітей чистової групи з метою отримання готової смуги із заданою товщиною і планшетністю, а також із заданою температурою її змотування і фізико-механічними властивостями. При цьому параметри процесу прокатки не повинні перевищувати заданих граничних значень.

На основі огляду існуючих автоматизованих систем керування технологічними процесами ширококутових станів гарячої прокатки встановлено: на сьогоднішній день відсутнє рішення складної проблеми синтезу багатовимірних багатозв'язних динамічних систем керування високого порядку, що обумовлюється наявністю багатьох прокатних клітей з виконавчими механізмами, зв'язаними через смугу, що прокатується. Ця проблема вирішена приблизно для сталих режимів шляхом початкової настройки стану на основі розроблених напівемпіричних моделей. У зв'язку з цим для покращення динамічних характеристик автоматизованих систем керування технологічними процесами прокатки і якості готової продукції розробка концепції синтезу автоматизованих багатозв'язних систем дворівневого керування технологічними процесами прокатки в динамічних режимах є актуальною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана: в Національному університеті харчових технологій на кафедрі електропостачання промислових підприємств відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України: «Розробити основи ресурсозберігаючого інтелектуального керування біотехнологічними процесами з використанням багатоагентних сценарно-когнітивних моделей»

(ДР №0107U000223), «Розробити ефективні структури керування біотехнологічними комплексами в класі організаційно-технологічних систем» (ДР №0109U008311); на замовлення Державної Науково-виробничої корпорації «Київський інститут автоматики» відповідно до плану науково-дослідних робіт Міністерства промислової політики України в рамках роботи «Автоматизована енерго- і ресурсозберігаюча система керування технологіями з асинхронним електроприводом» (ДР №0105U008635); на замовлення Державного науково-виробничого підприємства «Індустріальні системи автоматичного регулювання» при виконанні госпдогвірних тем «Розробка систем автоматичного регулювання товщини смуги широкосмугового стана гарячої прокатки», «Розробка системи автоматичного регулювання натягу смуги», «Розробка системи автоматичного регулювання температури кінця прокатки гарячекатаної смуги»; в яких здобувач був виконавцем і керівником окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є обґрунтування і розробка перспективної концепції синтезу систем автоматизованого керування технологічними процесами прокатки на основі удосконалених математичних моделей багатоклітьових прокатних станів і розвинутих методів дворівневого оптимального керування.

Для досягнення зазначеної мети поставлені основні задачі.

1. Аналіз методів синтезу систем автоматизованого керування технологічними процесами прокатки широкосмугових прокатних станів і можливостей розробки концепції синтезу автоматизованого керування технологічними процесами прокатки на основі методів дворівневого керування.

2. Обґрунтування методу синтезу систем автоматизованого керування технологічними процесами широкосмугових прокатних станів з урахуванням їх особливостей на основі алгоритмів дворівневого керування як методу декомпозиції складної задачі синтезу багатовимірної системи високого порядку на ряд підзадач синтезу регуляторів локальних підсистем керування механізмами окремих клітей багатоклітьового прокатного стану на нижньому рівні і задачі оптимізації глобального критерію якості багатозв'язної системи керування на верхньому рівні.

3. Удосконалення математичної моделі багатоклітьового прокатного стана як об'єкта керування системи автоматичного регулювання товщини, натягу і петлі смуги прокатного стана з метою її адаптації до вирішення задач синтезу систем керування.

4. Формулювання і рішення задачі синтезу багатозв'язних систем оптимального керування геометричними параметрами прокату багатоклітьових прокатних станів на основі математичної моделі багатоклітьового стана гарячої прокатки як об'єкта керування.

5. Обґрунтування і дослідження ефективності методів синтезу нелінійних систем керування положенням натискних гвинтів і петлетримачів шляхом перетворення на основі лінеа-

ризації зворотним зв'язком за допомогою алгебри Лі нелінійної системи в лінійну систему, для якої може бути виконаний синтез оптимальних лінійних регуляторів стану.

6. Математичне моделювання синтезованих нелінійних систем керування положенням натискних гвинтів з люфтами та нелінійним тертям і петлетримачів з нелінійним навантаженням для оцінки ефективності систем та чутливості при зміні параметрів об'єктів керування.

7. Розвиток методів синтезу оптимального керування багатомасовими електромеханічними системами головних електроприводів прокатних станів з реалізацією оптимального керування за повним вектором стану за допомогою оптимальних спостерігачів і дослідження ефективності та чутливості систем при зміні параметрів об'єктів керування.

8. Розвиток методів і алгоритмів керування електромеханічними системами багатоклітьових прокатних станів з частотно-регульованими двигунами змінного струму.

9. Розробка методів енергозбереження засобами електроприводу при управлінні електромеханічними системами багатоклітьових прокатних станів з частотно-регульованими двигунами змінного струму.

*Об'єктом дослідження* є процеси в системах автоматизованого керування технологічними параметрами багатоклітьових прокатних станів.

*Предметом дослідження* є моделі та методи дворівневого керування технологічними параметрами багатоклітьових прокатних станів.

*Методи дослідження.* Фундаментальні положення теорії автоматичного керування використані при формуванні задач керування локальними підсистемами. Методи простору станів для опису роботи систем керування. Методи теорії фільтрації, зокрема, спостерігачів для оцінки векторів стану, методи модального та оптимального керування для синтезу спостерігачів та регуляторів. Методи теорії пластичної деформації при формуванні математичних моделей деформації металу, що прокатується, методи теорії прокатки при формуванні моделей енергосилових залежностей прокатних клітей. Геометричні методи аналізу і синтезу систем керування на основі тензорно-групового підходу і безперервних груп перетворень – перетворень алгебри Лі застосовані для лінеаризації нелінійних математичних моделей об'єктів керування. Сучасні системи комп'ютерної математики, аналітичні і чисельні методи оптимізації застосовані для реалізації запропонованих методів та алгоритмів керування. Методи чисельного моделювання та пакет програм MATLAB для синтезу систем керування та оцінки показників якості синтезованих систем.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основний науковий результат роботи полягає в розробці і обґрунтуванні перспективної концепції синтезу автоматизованого керування

технологічними процесами прокатки на основі розвитку і узагальнення математичних моделей і розробці методів дворівневого керування технологічними параметрами прокатки.

Наукова новизна визначається такими положеннями.

1. Вперше запропоновано метод синтезу систем автоматизованого керування технологічними процесами прокатних станів на основі концепції дворівневого оптимального керування і декомпозиції рішення складної задачі синтезу багатовимірної системи високого порядку на вирішення на нижньому рівні ряду підзадач синтезу регуляторів локальних підсистем керування механізмами окремих клітей багатоклітьового прокатного стану і вирішення на верхньому рівні задачі синтезу багатозв'язного керування локальними підсистемами з метою оптимізації глобального критерію.

2. Отримала подальший розвиток математична модель багатоклітьового прокатного стану як дворівневої динамічної системи автоматичного регулювання товщини, натягу і петлі смуги, що дозволило використати сучасні методи синтезу керування динамічними системами.

3. Вперше сформульована і вирішена задача синтезу дворівневих систем керування геометричними параметрами прокату багатоклітьових прокатних станів на основі розробленої математичної моделі, що дозволило покращити показники якості готового прокату.

4. Вперше виконано синтез нелінійної системи керування положенням натискних гвинтів на основі лінеаризації зворотним зв'язком. При цьому нелінійна система за допомогою алгебри Лі перетворена в лінійну систему, що дозволило виконати синтез лінійного регулятора стану на основі лінійної теорії.

5. Вперше для відновлення безпосередньо невимірюваних змінних стану початкової нелінійної системи керування положенням натискних гвинтів на основі нелінійного перетворення за допомогою алгебри Лі синтезовано нелінійний спостерігач стану.

6. Вперше синтезовано нелінійні регулятори положення петлетримача на основі лінеаризації зворотним зв'язком шляхом перетворення динаміки початкової нелінійної системи за допомогою перетворень алгебри Лі в лінійну систему, для якої використані розроблені методи синтезу лінійних систем.

7. Вперше запропонований метод початкової настройки прокатного стану, заснований на заміні статичних рівнянь зв'язків між технологічними параметрами еквівалентною системою диференціальних рівнянь, що дозволило звести задачу вибору допустимих значень технологічних параметрів до задачі оптимального керування, яка розв'язується класичними методами варіаційного обчислення.

8. Удосконалені закони керування електромеханічними системами з частотно-регульованими двигунами змінного струму шляхом ослаблення потоку двигуна, що дозволило підвищити коефіцієнт корисної дії системи за споживанням енергії.

**Практичне значення одержаних результатів.** Побудовані математичні моделі в просторі стану багатоклітьових прокатних станів з урахуванням взаємного впливу прокатних клітей через пружно-пластичну прокатувану смугу як об'єктів регулювання геометричних параметрів прокатуваної смуги. Створено і практично реалізовано метод дворівневого оптимального синтезу регуляторів багатозв'язної системи керування геометричними параметрами прокатуваної смуги. Запропоновані моделі та методи реалізовані у вигляді системи дворівневого оптимального синтезу регуляторів багатозв'язної системи керування геометричними параметрами прокатуваної смуги. Розроблені системи керування електроприводами з частотно-керованими двигунами змінного струму, які дозволяють забезпечити максимальний коефіцієнт корисної дії при їх частковому навантаженні. Розроблені моделі та методи використовуються підприємствами і організаціями, які займаються розробкою і модернізацією систем керування. Методи синтезу автоматичного керування швидкісними режимами головних електроприводів прокатних клітей з двигунами змінного струму та регуляторами стану і спостерігачами, а також методи синтезу систем автоматичного регулювання товщини прокату із врахуванням люфту та нелінійного тертя в кінематичній схемі впроваджені у Науково-виробничій корпорації Київський інститут автоматики.

Методи синтезу систем керування швидкісними режимами приводів технологічного агрегату на базі частотно-регульованих електромеханічних систем змінного струму та алгоритми енергозберігаючого керування частотно-регульованими асинхронними електроприводами впроваджені на ЗАТ «Чернігівський автозавод».

Розроблені моделі і методи ідентифікації параметрів частотно-регульованих асинхронних електроприводів, а також методи синтезу систем керування швидкістю привода прокатного модуля системи автоматичного керування технологічним процесом каландрового цеху впроваджені на ВАТ «Чернігівське Хімволокно».

Запропоновані методи енергозберігаючого керування режимами роботи технологічного обладнання насосної станції з використанням частотно-регульованого електропривода з векторним керуванням впроваджені у виробництво на КІТ «Чернігівводоканал».

Матеріали дисертації використовуються на кафедрі електропостачання промислових підприємств Національного університету харчових технологій в лекційних курсах «Автоматизовані системи з комп'ютерним керуванням», «Частотне і векторне керування машинами змінного струму», «Автоматизований електропривод», і при дипломному проектуванні студентів спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно: концепція синтезу багатозв'язних систем автоматичного керування на основі дворівневого оптимального керування і декомпозиції рішення задачі синтезу багатовимірної системи високого порядку на вирішення на нижньому рівні ряду підзадач синтезу оптимальних регуляторів локальних підсистем керування і вирішення на верхньому рівні задачі синтезу багатозв'язного керування локальними підсистемами; розробка математичної моделі багатоклітьових прокатних станів як об'єкта керування геометричними параметрами прокатки; розробка методів синтезу оптимальних систем керування геометричними параметрами прокату багатоклітьових прокатних станів; концепція синтезу оптимального лінійного регулятора стану і нелінійного спостерігача стану нелінійної системи керування положенням натискних гвинтів на основі лінеаризації зворотним зв'язком; вдосконалена структура системи регулювання питомого натягу і петлі смуги на основі принципу прямого регулювання координат; синтезовані нелінійні регулятори положення петлетримача.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на: I-V Міжнародних науково-практичних конференціях «Комп'ютерні системи в автоматизації виробничих процесів» (м. Хмельницький 2003-2007); XI і XVI Міжнародних конференціях з автоматичного керування (м. Київ, 2004; м. Чернівці, 2009); Міжнародній практичній конференції «Інтелектуальні системи ухвалення рішення і інформаційні технології» (м. Чернівці, 2004); Міжнародній науково-технічній конференції «Розробка і впровадження прогресивних ресурсозберігаючих технологій і устаткування в харчову і переробну промисловість» (м. Київ, 1997); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми і перспективи створення і впровадження нових ресурсо- і енергозберіжних технологій (м. Київ, 2000); Міжнародній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Алушта, 2009); XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Машинобудування і техносфера XXI століття» (м. Донецьк, 2009); Міжнародній конференції «Проблеми інформатики і моделювання» (м. Харків, 2009); Міжнародній конференції «Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів» (м. Харків, 2009).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані у 40 наукових працях, серед них: одна монографія, 34 статті у наукових фахових виданнях ВАК України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 415 сторінок, включаючи 99 рисунків по тексту, 5 рисунків на 5 окремих сторінках, 9 додатків на 89 сторінках, 214 найменувань використаних літературних джерел на 22 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ



**У вступі** розкрита актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, викладені наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача в розробку теми дисертаційної роботи.

**У першому розділі** проведений аналіз сучасного стану автоматизованих систем керування технологічними процесами прокатки. Значний прогрес в розвитку систем керування прокатними станами досягнуто завдяки дослідженням Дружиніна М. М., Целікова А. І., Полухіна П. І., Полухіна В. П., Коцаря С. Л., Іванченко Ф. К., Кузнецова Б. І., Саф'яна М. М., Богаєнка І. Н., Олефіра П. П., Грабовського Г. Г., Архангельського В. І., Рюмшина М. І., Беляєва Ю. Б., Васічкіна В. І., Лисенкова М. Г., Коновалова Ю. В., Тимошенка Е. В., Леонідова-Каневського Е. В., Брайтона Д., Едвардса І. та інших фахівців. Теоретичними і прикладними завданнями у цій галузі займаються наукові школи: ВНДІМЕТМАШ, ВНДІЧЕРМЕТ, ВНДІЦВЕТМЕТ, МІСіС, ДОННДІЧЕРМЕТ, Тяжпромелектропроект, Тяжпромавтоматика, Київського інституту автоматики, Національної гірничої академії.

Забезпечення заданої точності прокатки смуг за товщиною в чистовій групі клітей стану здійснюється за допомогою систем автоматичного регулювання товщини (САРТ). Коливання товщини вздовж смуги (різнотовщинність) в загальному випадку обумовлюються такими причинами: неоднорідністю фізико-механічних властивостей металу в різних перерізах по довжині смуги; охолодженням непрокатаної частини прокату, що надходить до чистової групи клітей; коливаннями натягу в процесі прокатки при прокатці переднього і заднього кінців смуги; різнотовщинністю підкату; зміною зазору між робочими валками і ін. Стійкий і безаварійний процес прокатки смуги високої якості в чистовій групі клітей без участі оператора можливий лише за умови чіткої взаємодії локальних систем авторегулювання товщини, натягнення і швидкості смуги. Розглянуті принципи побудови автоматизованих систем керування технологічними процесами прокатки.

Як приклад на рис. 1 наведена структура САРТ смуги для чистової групи, яка складається з підсистем регулювання, що забезпечують підтримку постійності товщини смуги, що виходить з клітей, двох систем стеження, що забезпечують установку положення натискних гвинтів першої і останньої кліті за допомогою синхронних двигунів (СД) відповідне програмі прокатки, пристроїв корекції за температурою підкату і показниками рентгенівського товщиноміра, встановленого за останньою чистовою кліттю, пульта керування (ПК).

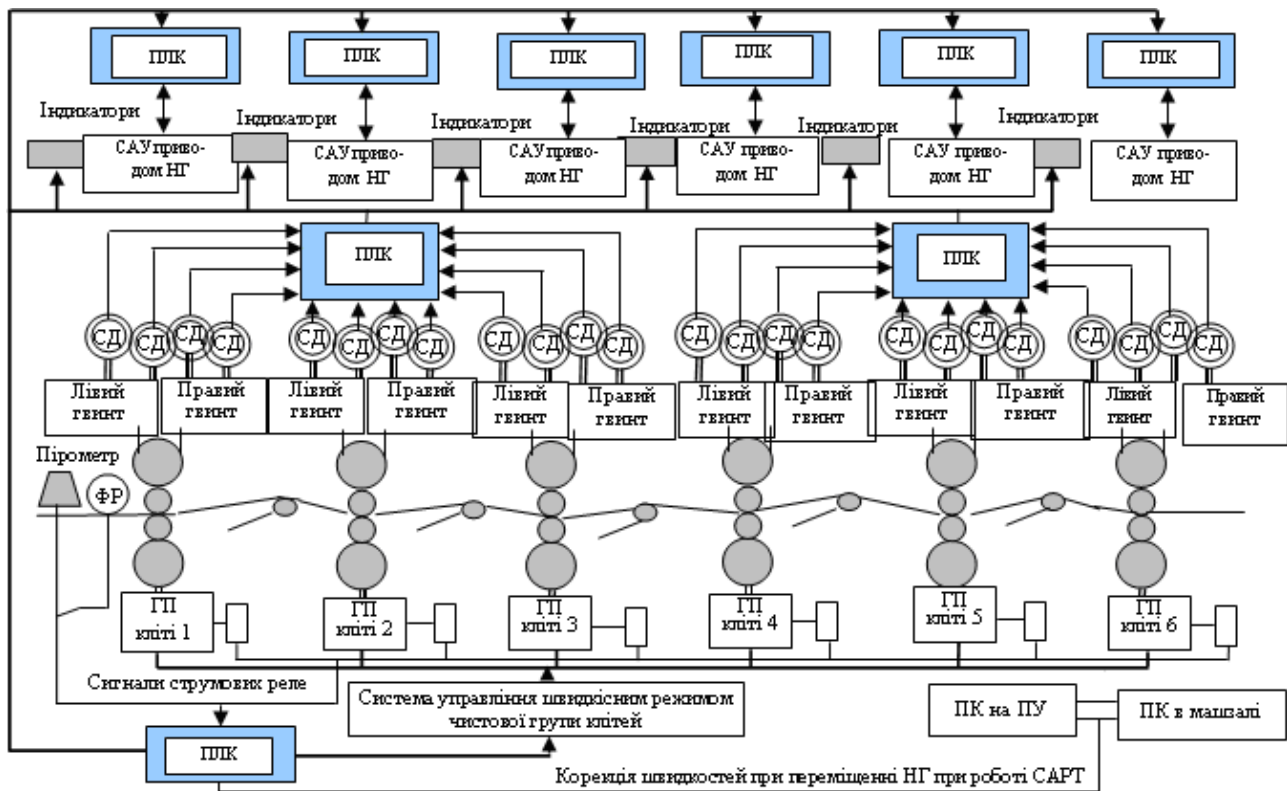


Рис. 1. Схема системи автоматичного регулювання товщини смуги

Система побудована із застосуванням програмованих логічних контролерів (ПЛК), об'єднаних у комп'ютерну мережу з персональними комп'ютерами (ПК) і передбачає корекцію швидкостей головних приводів (ГП) клітей при переміщенні натискних гвинтів (НГ) при роботі САРТ, корекцію розхилів валків при електричній синхронізації ходу натискних гвинтів і роботи САРТ. У системі реалізується цифрове позиційне керування електромеханічними натискними пристроями і ситуаційне керування системами чистової групи клітей.

Проведений аналіз існуючих математичних моделей чистової групи клітей прокатних станів. Проаналізовані сучасні математичні моделі пластичної деформації прокатуваної смуги. На підставі проведеного аналізу сформульовані цілі і завдання дослідження.

**У другому розділі сформульована** концепція побудови автоматизованого керування технологічними процесами прокатки на основі синтезу дворівневого оптимального керування. Основне завдання системи сумісного керування головними електроприводами і петлетримачами широкосмугового стану гарячої прокатки полягає в підтримці заданого співвідношення між частотами обертання робочих валків клітей, що забезпечує постійність натягнення смуги між клітями і сприяє зменшенню відхилення товщини прокатуваної смуги від заданої. Причому при синтезі такої системи автоматичного керування швидкістю прокатних двигунів і петлетримачів чистових клітей безперервного тонколистового стану гарячої прокатки

потрібно розглядати багаторухові електромеханічні системи клітей, зв'язаних прокатуваною смугою, як єдину електромеханічну систему.

Для проектування локальних підсистем автоматичного регулювання товщини, натягнення і петлі смуги необхідна математична модель прокатного стану як об'єкту керування. Основні залежності зв'язують енергосилові параметри однієї прокатної кліті для лінеаризованої моделі та малих відхилень величин від їх номінальних значень кількісний приріст кінцевої товщини  $\Delta h_1$ , повного зусилля  $\Delta P$  і моменту  $\Delta M$  прокатки, а також приріст величини випередження  $\Delta S$  наступні:

$$\Delta h_1 = \frac{\partial h_1}{\partial h_0} \Delta h_0 + \frac{\partial h_1}{\partial T_0} \Delta T_0 + \frac{\partial h_1}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial h_1}{\partial z_0} \Delta z_0 + \frac{\partial h_1}{\partial \sigma_T} \Delta \sigma_T + \frac{\partial h_1}{\partial f} \Delta f, \quad (1)$$

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial h_0} \Delta h_0 + \frac{\partial P}{\partial h_1} \Delta h_1 + \frac{\partial P}{\partial T_0} \Delta T_0 + \frac{\partial P}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial P}{\partial \sigma_T} \Delta \sigma_T + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f, \quad (2)$$

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial h_0} \Delta h_0 + \frac{\partial M}{\partial h_1} \Delta h_1 + \frac{\partial M}{\partial T_0} \Delta T_0 + \frac{\partial M}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial M}{\partial \sigma_T} \Delta \sigma_T + \frac{\partial M}{\partial f} \Delta f, \quad (3)$$

$$\Delta S = \frac{\partial S}{\partial h_0} \Delta h_0 + \frac{\partial S}{\partial h_1} \Delta h_1 + \frac{\partial S}{\partial T_0} \Delta T_0 + \frac{\partial S}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial S}{\partial \sigma_T} \Delta \sigma_T + \frac{\partial S}{\partial f} \Delta f, \quad (4)$$

де  $\Delta h_0$ ,  $\Delta T_0$ ,  $\Delta T_1$ ,  $\Delta z_0$ ,  $\Delta \sigma_T$ ,  $\Delta f$  – абсолютні прирости, відповідно, початкової товщини, заднього і переднього натягнення смуги, величини міжвалкового зазору, механічних властивостей металу, що прокатується, і величини коефіцієнта зовнішнього тертя у осередку деформації. Часткові похідні обчислюються на підставі напівемпіричних нелінійних залежностей.

На підставі залежностей (1)-(4) отримана математична модель широкосмугового багатоклітьового стану гарячої прокатки, що складається з  $k$  клітей, розташованих на відстані  $L_{j,j+1}$  одна від одної, і які взаємодіють через пружно напружену смугу. Після введення векторів вхідної  $H_i^*$  і вихідної  $H_i$  товщини, вхідного  $T_i^*$  і вихідного  $T_i$  натягнення і положення натискних пристроїв  $B_i$  компонентами яких є відповідні величини для кожної кліті  $j = \overline{1, k}$  у дискретний час  $i$ , одержимо:

$$H = H_H \otimes H^* + H_T^* \otimes T^* + H_T \otimes T + H_B \otimes (B + \eta \sin \omega t), \quad (5)$$

де  $H_H$ ,  $H_T^*$ ,  $H_T$ ,  $H_B$  – вектори відповідних коефіцієнтів передачі;  $\eta$  – вектор ексцентриситетів валків,  $\omega$  – вектор швидкостей обертання валків;  $\otimes$  – Кронекерівське (поелементне) перемноження векторів. Змінна дискретного часу  $i$  тут і надалі, де це не потрібно, не вводитьься.

Аналогічні співвідношення також отримані для векторів моментів головних приводів і випередження швидкості руху смуги:

$$M = M_H^* \otimes H^* + M_H \otimes H + M_T^* \otimes T^* + M_T \otimes T, \quad (6)$$

$$S = S_H^* \otimes H^* + S_H \otimes H + S_T^* \otimes T^* + S_T \otimes T. \quad (7)$$

В залежностях (6)-(7) використані відповідно вектори коефіцієнтів передачі за моментом  $M_H^*$ ,  $M_H$ ,  $M_T^*$ ,  $M_T$  і випередженням  $S_H^*$ ,  $S_H$ ,  $S_T^*$ ,  $S_T$  за відповідними змінними.

Вектор вихідних швидкостей смуги  $V$  визначається співвідношенням

$$V = V_\omega \otimes \omega + V_S \otimes S, \quad (8)$$

де  $V_\omega$  – вектор коефіцієнтів передачі вихідних швидкостей смуги  $V$  при зміні вектору швидкостей обертання приводних валків;  $V_S$  – вектор коефіцієнтів передачі зміни вихідної швидкості смуги  $V$  при зміні випередження  $S$ .

З рівняння постійності секундного об'єму при гарячому плющенні металу

$$V^* \otimes H^* = V \otimes H, \quad (9)$$

може бути визначений вектор вхідної швидкості  $V^*$ . Нехтуючи масою смуги і припускаючи миттєве розповсюдження натягу по довжині смуги, отримаємо

$$T(j) = T^*(j+1), \quad j = \overline{1, k-1}. \quad (10)$$

Натяг змотування смуги

$$T(j) = T_L(j)[V^*(j+1) - V(j)]\Delta t, \quad j = \overline{1, k-1}, \quad (11)$$

де  $T_L$  – вектор питомих жорсткостей смуги на розтягування в проміжку між  $j$ -ю і  $(j+1)$ -ю клітями, що має розмірність  $(k-1)$ .

Товщина  $H^*(j+1)$  смуги на вході  $(j+1)$  кліті дорівнює товщині  $H(j)$  смуги на виході з  $j$ -ї кліті з урахуванням часу транспортного запізнювання

$$H_i^*(j+1) = H_{i-p}(j), \quad j = \overline{1, k-1}, \quad (12)$$

де  $p = INT(L_{j,(j+1)}/L_{\sigma j})$  – ціла частина числа, яке дорівнює довжині проміжку  $L_{j,(j+1)}$  між  $j$ -ю і  $(j+1)$ -ю клітями, поділеному на базову довжину  $L_{\sigma j}$  смуги в цьому проміжку.

Математичні моделі головних електроприводів, приводів змотувачів, приводів петлетримачів, електро і гідроприводів натискних пристроїв описуються у формі простору стану у вигляді рівнянь стану, або у вигляді передавальних функцій. Математичні моделі типових П, ПД, ПІ і ПІД регуляторів, або інших регуляторів на відміну від типових, також задаються у вигляді рівнянь стану. Таким чином моделюється наявність будь-яких регуляторів, що описуються в просторі стану, рівнянням

$$\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p U_p(t), \quad (13)$$

у якому управляючою дією  $U_p(t)$  є будь-яка змінна системи  $y(t)$ , яка виміряна з випадковою перешкодою  $f(t)$  заданої інтенсивності  $U_p(t) = y(t) + f(t)$ , а виходом регулятора  $y_p(t) = C_p x_p(t)$  може бути напруга керування головним приводом петлетримачем або натискним пристроєм  $U_n(t)$  будь-якої кліті.

Для формування керування можуть використовуватися значення товщини смуг в будь-якій точці стану, а також значення натягів смуги у всіх проміжках між клітями, що фактично відповідає керуванню за повним вектором стану, враховуючи, що в АСУ ТП прокатного стану фактично здійснюється супровід смуги по лінії стану. Проте вирішити таку задачу практично неможливо у зв'язку з високою розмірністю системи (5)-(13).

В роботі сформована структура багатозв'язаної системи автоматичного регулювання товщини, натягнення і петлі смуги на основі типових схем широкосмугового стану. Введено вектор шуканих параметрів  $\chi$ , компонентами якого є коефіцієнти посилення регуляторів (П, ПІ, ПІД і так далі) відповідних каналів регулювання, які необхідно визначити у ході синтезу системи.

Зміни товщини і натягнення смуги є випадковими процесами. Основне призначення системи регулювання товщини, натягу і петлі широкосмугового стану гарячої прокатки полягає в підтриманні заданих значень товщини смуги за прокатними клітями, натягів смуги між клітями, а також кутів повороту петлетримачів на заданих рівнях. Тому критерієм якості  $J$  прийнята сума дисперсій відхилень товщини смуги на виході  $i$ -тих клітей  $\Delta \bar{H}_i^2$  і дисперсій відхилень натягів між клітями  $\Delta \bar{T}_i^2$  у проміжках між  $i$ -тою і  $(i+1)$ -ою клітями, взятих з відповідними ваговими коефіцієнтами

$$J(\chi) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta \bar{H}_i^2(\chi) + \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i \Delta \bar{T}_i^2(\chi). \quad (14)$$

У виразі (14)  $\lambda_i$ ,  $\gamma_i$  – вагові коефіцієнти, які враховують різну «вагу» складових дисперсій разнотовщиностей і дисперсій коливань межклітьових натягів, відносно їх заданих значень, а самі відхилення  $\Delta H_i$  товщини полоси на виході  $i$ -тої кліті  $H_i$  від заданого значення  $H_i^3$  і відхилення натягів  $\Delta T_i$  у проміжках між  $i$ -тою і  $(i+1)$ -ою клітями  $T_{i,i+1}$  від заданих значень  $T_{i,i+1}^3$  є випадковими процесами і виражаються виразами

$$\Delta H_i = H_i - H_i^3, \Delta T_i = T_{i,i+1} - T_{i,i+1}^3.$$

Тоді задачу синтезу системи (1)-(13) по критерію (14) можна сформулювати у вигляді наступної задачі нелінійного програмування

$$\chi^* = \arg \min_{\chi} J(\chi).$$

При цьому необхідно враховувати обмеження на змінні стану і керування окремих каналів регулювання.

Як приклад на рис. 2 показані випадкові зміни подовжньої різнотовщинності та міжклітьових натягів у синтезованій системі для трьох клітей широкопосмугового стану гарячої прокатки. Відмітимо, що до критерію якості явно не входять кутові положення петлетримачів, проте мінімізація дисперсій міжклітьових натягнень фактично приводить і до мінімізації дисперсій відхилень кутів положення петлетримачів від їх заданих значень.

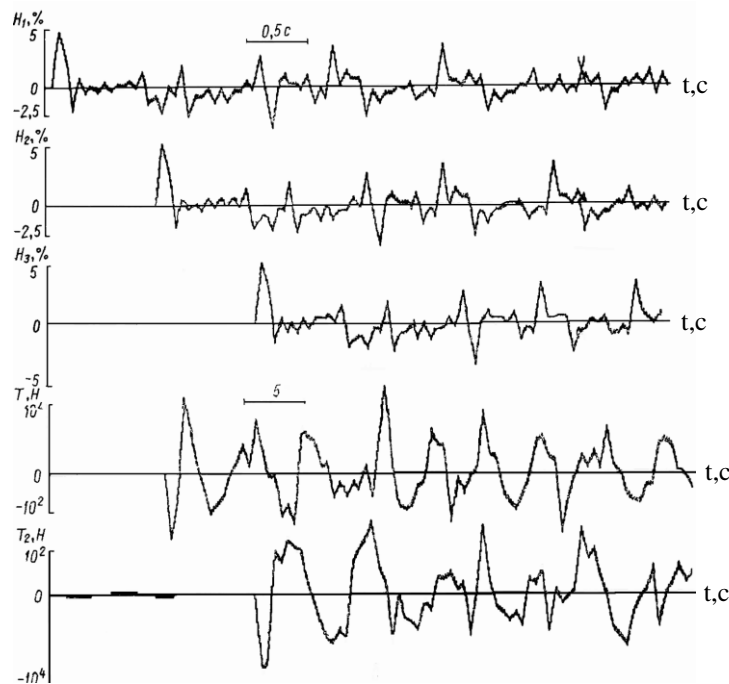


Рис. 2. Реалізації змін подовжньої різнотовщинності та міжклітьових натягів

У **третьому розділі** розглянуті питання синтезу нелінійних систем регулювання товщини смуги на основі лінеаризації зворотним зв'язком. При синтезі системи автоматичного регулювання положення натискних гвинтів використовується двомасова модель електромеханічної системи з урахуванням люфту і сухого тертя. Ця система керування є нелінійною системою через наявність люфту. Останнім часом у зв'язку із застосуванням цифрових систем керування широкого поширення набули методи керування із зворотним зв'язком за

змінними стану – оптимальні або модальні регулятори, які дозволяють істотно покращити якість керування і понизити динамічні навантаження на елементи механічної підсистеми. Синтез систем керування без урахування нелінійних елементів не дозволяє досягти необхідної точності позиціонування, що вимагає розробки нелінійних регуляторів. Одним з перспективних методів синтезу нелінійних систем керування є лінеаризація за допомогою зворотного зв'язку. Під задачею лінеаризації мається на увазі знаходження такого нелінійного перетворення керування за допомогою алгебри Лі, що система описується еквівалентною лінійною моделлю. В результаті корекції нелінійностей за допомогою відповідних керувань нелінійна система отримує лінійну характеристику вхід/вихід. Бажана динаміка регулювання еквівалентної лінійної системи забезпечується регулюванням за змінними стану. Наявність статичних зворотних зв'язків регулятора не підвищує порядок системи.

Лінеаризація зворотним зв'язком застосовна для керування електроприводом натискних гвинтів. При використанні методу лінеаризації вхід/вихід зворотним зв'язком за допомогою перетворення груп Лі двомасова електромеханічна система описується за допомогою рівнянь стану і виходу системи:

$$\dot{x} = A(x) + Bu, \quad (15)$$

$$y = C(x). \quad (16)$$

Вектор змінних стану системи

$$x^T = [\omega_1, \theta_1, \omega_2, \theta_2],$$

де  $\omega_1$  і  $\omega_2$  – відповідно швидкості обертання двигуна і вихідного валу редуктора,  $\theta_1$  і  $\theta_2$  – відповідно кути повороту роторів двигуна і вихідного валу редуктора. Вектори  $A(x)$  і  $B$  мають вигляд:

$$A(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_1} C_{12} \cdot f_L(\theta_1 - \theta_2) \\ \omega_1 \\ -\frac{1}{J_2} C_{12} \cdot f_L(\theta_1 - \theta_2) - f_F(\omega_2) \\ \omega_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Функція люфту позначається як  $f_L(\theta_1 - \theta_2)$ , а сила тертя позначається як  $f_F(\omega_2)$ . На першому етапі синтезу регулятора тертя в системі не враховується, оскільки вважається, що дія лінійної частини системи тертя буде впливати позитивно внаслідок його пом'якшувальної характеристики.

Система (15) містить одну нелінійність у вигляді характеристики люфту, яка приблизно описується за допомогою функції

$$\Delta\theta^* = f_L(\Delta\theta) = \Delta\theta - \theta_L \cdot \text{th}\left(\frac{\Delta\theta}{\theta_H}\right).$$

Завдання лінеаризації нелінійної системи вхід-вихід зворотним зв'язком за допомогою перетворення груп Лі полягає в наступному: необхідно знайти таке нелінійне перетворення керування

$$u = V(x) + L(x) \cdot w,$$

при якому на множині векторів стану система лінійна або еквівалентна лінійній моделі. Тут  $w$  – нове керуюче діяння;  $V$  і  $L$  – відповідно функції регулювання і фільтрації. При використанні методу лінеаризації зворотним зв'язком (методу точної лінеаризації системи сигнал керування визначають за допомогою наступного виразу

$$u = \frac{1}{L_B L_A^{\rho-1} C(x)} \left( w - \sum_{i=0}^{\rho} k_i L_A^i C(x) \right), \quad (17)$$

де  $L_B L_A^{\rho-1}$  і  $L_A^i$  – складні похідні Лі відповідно векторів  $B$ ,  $A(x)$ ,  $\rho$  – відносний ступінь системи для гладкої функції  $\varphi(x)$  і гладкого векторного поля  $f(x)$  на множині  $\chi \subset R^n$  похідних Лі від скалярної функції  $\varphi(x)$  уздовж векторного поля  $f(x)$  є скалярна функція, ви-

значена як  $L_f \varphi(x) = \frac{\partial \varphi}{\partial x} f(x)$ , а для гладких векторних полів  $f(x)$  і  $g(x)$  на множині  $\chi$

похідних Лі від вектора  $g(x)$  уздовж векторного поля  $f(x)$  є векторне поле, визначене як

$L_f g(x) = \frac{\partial g}{\partial x} f(x) - \frac{\partial f}{\partial x} g(x)$ , а складною похідною Лі є функція, визначена як

$L_g L_f = L_g(L_f)$ ,  $L_f^k = L_f(L_f^{k-1})$ ,  $k = 2, 3, \dots$ . Вектор  $C(x)$  задається рівнянням стану (16).

Підставляючи (17) в рівняння системи (15), отримаємо рівняння стану і виходу системи

$$\begin{aligned} \dot{x} &= R(x) + F(x)w, \\ y &= C(x), \end{aligned}$$

де  $R(x) = A(x) + Bu(x) = R_S(x) + R_N(x)$ ,  $F(x) = BL(x)$ .

Таким чином, завдання синтезу регулятора зводиться до визначення параметрів нелінійного регулятора  $R_N(x)$ , регулятора стану  $R_S(x)$  і фільтру  $F(x)$ .

Відповідно до алгоритму точної лінеаризації вхід/вихід за допомогою фільтру  $F(x)$  проводяться перетворення сигналу керування. Функції нелінійного регулятора  $R(x)$  полягають у компенсації нелінійностей за допомогою нелінійного регулятора  $R_N(x)$  і регулю-



ванні системи по змінним стану за допомогою регулятора стану  $R_s(x)$ . Загальна структура системи регулювання представлена на рис. 3.

Визначення параметрів фільтру лінеаризованої системи  $F(x)$  і регулятора  $R(x)$  проводиться з використанням відносного ступеня системи  $\rho$ . Можна говорити, що відносний ступінь  $\rho$  системи відповідає мінімальній кількості інтеграторів, які повинен пройти вхідний сигнал до виходу.

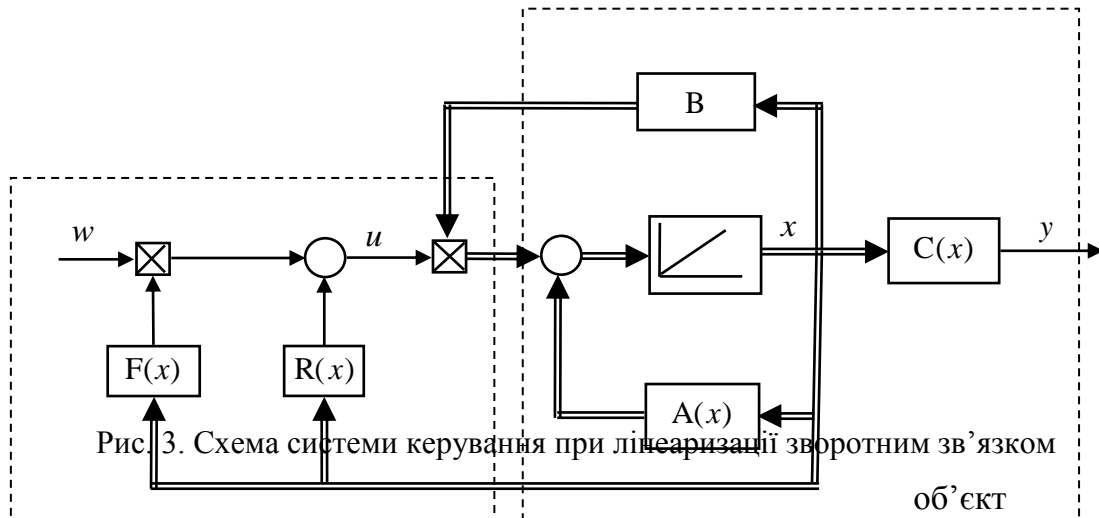


Рис. 3. Схема системи керування при лінеаризації зворотним зв'язком  
Функції фільтру  $F(x)$  і регулятора  $R(x)$  описуються співвідношеннями:

$$F(x) = \alpha_0 / G^*(x),$$

$$R(x) = R_N(x) + R_S(x),$$

$$R_N(x) = \frac{L_A^\rho C(x)}{G^*(x)},$$

$$R_S(x) = \frac{\sum_{i=1}^{\rho} [L_A^{i-1} C(x)] \cdot \alpha_{i-1}}{G^*(x)},$$

$$G^*(x) = L_B L_A^{\rho-1} C(x),$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнти характеристичного рівняння електромеханічної системи  $\delta(s) = \alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + \dots + \alpha_{\rho-1} s^{\rho-1} + s^\rho$ . Значення коефіцієнтів характеристичного полінома  $\alpha_0 \dots \alpha_{\rho-1}$  системи регулювання визначають шляхом порівняння характеристичного рівняння системи і полінома, заданого за допомогою власних значень системи регулювання.

Вихідним сигналом системи позиціонування натискного гвинта є кут навантаження  $\vartheta_2$ . Така система має відносний ступінь  $\rho = 4$ , який відповідає порядку системи  $n = 4$ , і відповідно система не володіє нуль-динамікою. Порядок регулятора дорівнює чотирьом і для завдання бажаної динаміки регулятора використовують чотири коефіцієнти характеристичного рівняння  $(\alpha_0 \dots \alpha_3)$ . Для спрощення бажану динаміку системи четвертого порядку можна задати характеристиками ідентичними двом послідовно сполученим аперіодичним ланкам другого порядку, які задаються за допомогою власних частот і коефіцієнтів загасання  $(\omega_1, d_1$  і  $\omega_2, d_2)$ .

Для вихідної матриці  $C(x)$ , у якій вихідним сигналом є кут повороту навантаження  $\vartheta_2$ , запропоновані функції фільтру і регуляторів:

$$F(x) = \frac{\alpha_0}{C_{J,w}} \cdot \frac{1}{f'_L(\Delta\vartheta)},$$

$$R_N(x) = -J_1 \cdot C_{J,w} \cdot J_\Sigma \cdot f_L(\Delta\vartheta) + J_1 \frac{f''_L(\Delta\vartheta)}{f'_L(\Delta\vartheta)} (\Delta\omega)^2,$$

$$R_S(x) = -J_1 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta\omega + J_1 \cdot \alpha_2 \frac{f_L(\Delta\vartheta)}{f'_L(\Delta\vartheta)} + \frac{\alpha_1}{C_{J,w}} \cdot \frac{\omega_2}{f'_L(\Delta\vartheta)} + \frac{\alpha_0}{C_{J,w}} \cdot \frac{\vartheta_2}{f'_L(\Delta\vartheta)},$$

де  $f'_L(\Delta\vartheta)$  і  $f''_L(\Delta\vartheta)$  відповідно перша і друга похідні функції наближеного опису люфту,

$$\text{ту, } J_{1,2} = J_1 J_2, \quad J_\Sigma = J_1 + J_2, \quad C_{J,w} = \frac{C_{12}}{J_{1,2}}.$$

Загальна структура замкнутої системи з нелінійним регулятором положення і зворотним зв'язком за змінними стану показана на рис. 4, на якому позначено: БВФЛ – блок обчислення функцій люфту; ПВ – стала часу ланки формування керуючого сигналу, ВЗП – час спрацьовування виконавчого органу. Керуючі сигнали визначаються з використанням функції люфту  $f_L(\Delta\vartheta)$ , її похідних  $f'_L(\Delta\vartheta)$  і  $f''_L(\Delta\vartheta)$  та їх комбінацій, які мають вигляд:

$$f'_L(\Delta\vartheta) = \text{th}^2\left(\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_L}\right), \quad (18)$$

$$f''_L(\Delta\vartheta) = \frac{2}{\vartheta_L} \text{th}\left(\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_L}\right) \left(1 - \text{th}^2\left(\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_L}\right)\right), \quad (19)$$

$$\frac{f_L(\Delta\vartheta)}{f'_L} = \frac{\Delta\vartheta - \vartheta_L \operatorname{th}\left(\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_L}\right)}{\operatorname{th}^2\left(\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_L}\right)}, \quad (20)$$

$$\frac{f''_L(\Delta\vartheta)}{f'_L(\Delta\vartheta)} = \frac{2}{\theta_L} \left( 1 - \operatorname{th}^2\left(\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_L}\right) \right), \quad (21)$$

$$\frac{1}{f'_L} = \frac{1}{\operatorname{th}^2\left(\frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_L}\right)}. \quad (22)$$

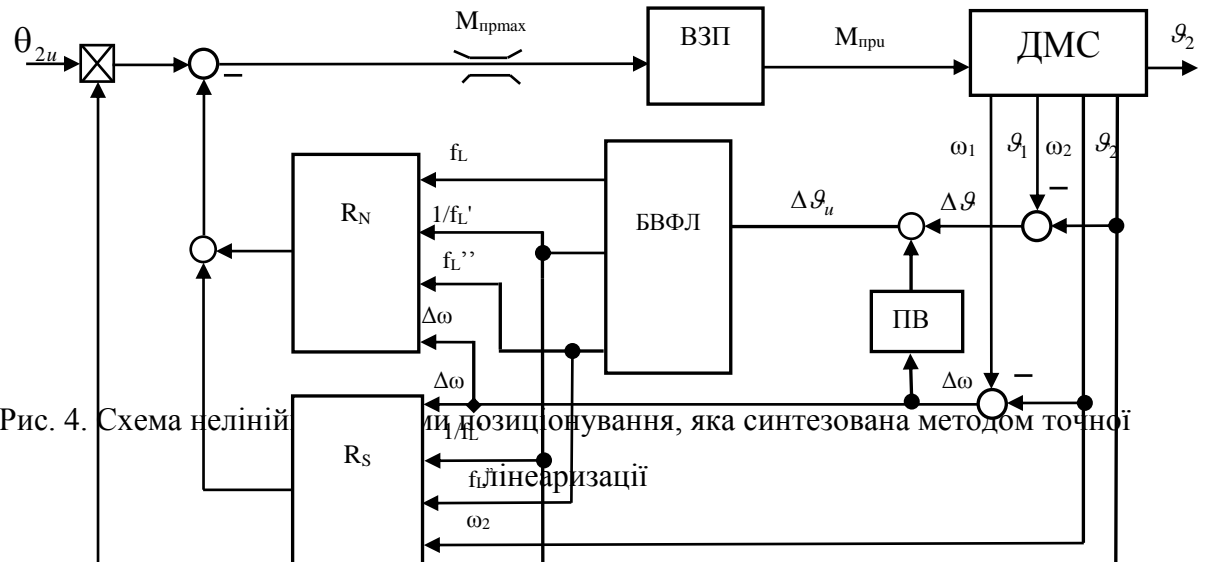


Рис. 4. Схема нелінійної системи позиціонування, яка синтезована методом точної лінійзації

Аналіз формул для синтезування системою (18)-(22) показує, що на формування сигналу керування особливою властивістю функції  $f'_L(\Delta\vartheta)$ . Враховуючи, що при  $\Delta\vartheta = 0$  ця функція також приймає нульове значення, існує небезпека ділення на нуль.

На рис. 5 показана функція люфту та її похідні. Дослідження показали, що: функція люфту  $f_L(\Delta\vartheta)$  монотонно зростає і при  $\Delta\vartheta = 0$  має точку перегину; функція  $f'_L(\Delta\vartheta)$  весь час позитивна, поза зоною люфту сходиться до 1 і лише в точці  $\Delta\vartheta = 0$  має контакт з нулем; функція  $f''_L(\Delta\vartheta)$  перетинає вісь абсцис при  $\Delta\vartheta = 0$ , а поза область люфту знову прагне до нуля.

Істотною особливістю позиціонування нелінійної системи є вплив комбінації функції апроксимації люфту  $f_L(\Delta\vartheta)$  з її похідними  $f'_L(\Delta\vartheta)$  і  $f''_L(\Delta\vartheta)$  (рис. 5, б).

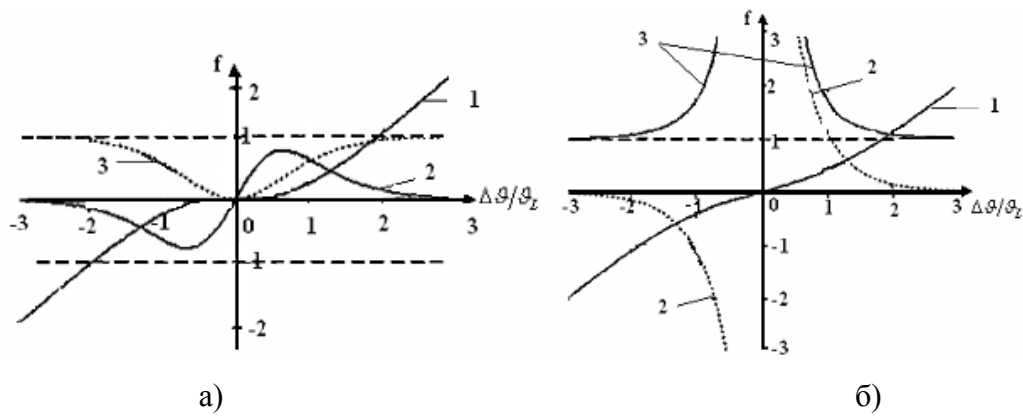


Рис. 5. Функція люфту, її похідні та їх комбінації:

- а)  $f_L(\Delta\theta/\theta_L)$  – крива 1;  $f'_L(\Delta\theta/\theta_L)$  – крива 2;  $f''_L(\Delta\theta/\theta_L)$  – крива 3;  
 б)  $f_L(\Delta\theta)/f'_L(\Delta\theta)$  – крива 1;  $f''_L(\Delta\theta)/f'_L(\Delta\theta)$  – крива 2;  $1/f'_L(\Delta\theta)$  – крива 3

Дослідження функції  $f''_L(\Delta\theta)/f'_L(\Delta\theta)$  показали, що її асимптотою виступає вісь абсцис, а в точці  $\Delta\theta = 0$  функція терпить розрив: зліва від  $\Delta\theta = 0$  функція прагне до  $-\infty$ , а справа до  $+\infty$ . Ця функція входить тільки в компенсаційну складову нелінійного регулятора  $R_N(x)$  і її властивості використовуються для успішного проходження механічною системою некерованої області люфту в точці  $\Delta\theta = 0$ . Для цього система формує керуючі діяння: спочатку максимальне негативне, а потім позитивне. В результаті отримують характеристики синтезованої системи, які близькі до оптимальних за швидкодією.

Для запобігання коливанням при проходженні системою люфту сигнали керування формуються за певним алгоритмом. Результати обчислювальних експериментів показали, що при квазіоптимальному за часом проходженні поблизу верхньої межі люфту система в значній мірі є схильною до збурень. Збурення, з одного боку, обумовлені принципом наближеного регулювання з використанням регулятора стану, а, з іншого боку, квазіоптимальним за часом проходженням люфту, що реалізовано за допомогою часткового компенсатора. Сигнал на проходження люфту виробляється регулятором стану  $R_S$  спрощено. Поблизу верхньої межі люфту керування є майже нульовим і вже малі перешкоди можуть привести до зміни знаку керування і зумовити зрив квазіоптимального за часом проходження люфту. Вказаної проблеми можна уникнути при штучному обмеженні впливу функції  $1/f'_L(\Delta\theta)$  в цій області, яка значною мірою впливає на величину керування, як це показано на рис. 6. При визначенні меж дії вказаної функції враховують, що обмеження повинне діяти тільки поблизу верхньої межі люфту, а регулювання повинне обмежуватися умовами знаходження системи в області люфту. Поза люфтом граничні обмеження не діють.

При синтезі системи для формування законів керування враховано нелінійне тертя. Система керування з вимірюванням кута повороту навантаження  $\vartheta_2$  синтезована тільки з врахуванням нелінійності люфту. Без додаткових заходів вплив тертя в такій системі можна зменшити тільки збільшивши швидкість регулювання.

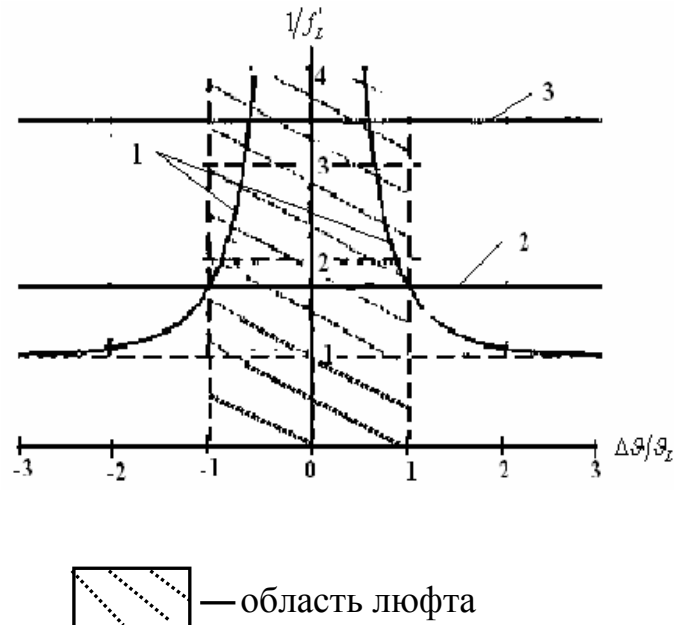


Рис. 6. Обмеження складових регулятора стану:

1 – функції  $1/f'_L$ ; 2 – обмеження для  $c_1$  ( $\omega_2 = 0$ ); 3 – обмеження для  $c_2$  ( $\omega_2 = \omega_{2m}$ )

Для компенсації тертя в систему необхідно ввести додатковий блок керування. При цьому стаціонарну точність регулювання можна забезпечити тільки за допомогою введення в регулятор інтегральної складової. Проте, в системах з нелінійним тертям введення інтегратора приводить до виникнення автоколивань. Щоб уникнути цього явища замість інтегратора використовують керовану аперіодичну ланку першого порядку із змінним зворотним зв'язком, де замість постійного коефіцієнта зворотного зв'язку використовується множення на величину керування. Цей елемент називається керованою аперіодичною ланкою.

На вхід керованої аперіодичної ланки подається сигнал розузгодження заданого і поточного кутів ( $\Delta\vartheta_2 = \vartheta_{2u} - \vartheta_2$ ). Істотною ознакою керованої аперіодичної ланки є формування сигналу зворотнього зв'язку з використанням функції керування  $f_{rap}(\omega_2)$ . На відміну від системи з постійним коефіцієнтом зворотного зв'язку множення на функцію керування дає можливість отримати гнучку характеристику системи і відповідно має широкий спектр за-

стосування. При цьому для забезпечення стійкості керованої аперіодичної ланки використовують позитивні значення функції керування  $f_{rap}(\omega_2)$ .

Для відновлення безпосередньо невимірюваних змінних стану початкової нелінійної системи на основі нелінійного перетворення за допомогою алгебри Лі синтезується нелінійний спостерігач стану.

В результаті проведених досліджень динамічних характеристик синтезованої системи показано, що система має малу чутливість до зміни параметрів люфту, оскільки при варіаціях люфту характеристики системи керування, замкнутої через регулятор і спостерігач, змінюються в незначній мірі. При зміні люфту синтезована система має більше перерегулювання, ніж при номінальному значенні люфту. Зміна кутової швидкості двигуна практично співпадає з квазіоптимальним за часом проходженням люфту.

Показано, що для забезпечення працездатності синтезованої нелінійної системи, що складається з нелінійного регулятора, замкнутого через нелінійний спостерігач, необхідно вводити штучне положення рівноваги. При цьому дещо погіршується якість регулювання, проте в будь-яких режимах роботи система зберігає стійкість характеристик і в сталих режимах має високу точність регулювання. Для підвищення точності керування доцільно використовувати вимірювання положення ротора двигуна, проте це викликає додаткові труднощі при експлуатації системи. Використання змінних стану натискного гвинта (навантаження) для реалізації зворотного зв'язку регулятора стану також дозволяє підвищити точність керування.

Запропонована система нелінійного керування натискними гвинтами з люфтами і нелінійним тертям дозволяє досягти високої швидкодії і точності керування в сталому режимі. Для відновлення усіх змінних стану використовується нелінійний спостерігач. Врахування нелінійного тертя при синтезі спостерігача дозволяє додатково підвищити точність спостереження кутової швидкості приводу.

Показано, що в синтезованій системі керування при зростанні запізнювання визначення кутової швидкості обертання натискних гвинтів погіршується ефективно проходження люфтів за часом, що може привести до істотного погіршення якості регулювання. В цьому випадку доцільно використовувати предикативне регулювання.

**У четвертому розділі** розроблена структура системи регулювання питомого натягу і петлі смуги, в основу якої покладено принцип прямого регулювання параметрів смуги.

Кінематична схема механізму петлетримача показана на рис. 7. Привід столу петлетримача з моментом інерції  $J_2$  здійснюється від двигуна з моментом інерції  $J_1$  через пружний

вал з жорсткістю на скручування  $C$ . Таким чином, ця система є двомасовою електромеханічною системою і може бути описана рівняннями:

$$J_2 \ddot{\varphi}_2 + FL \sin \varphi_2 + C(\varphi_2 - \varphi_1) = 0, \quad (23)$$

$$J_1 \ddot{\varphi}_1 - C(\varphi_2 - \varphi_1) = M_d. \quad (24)$$

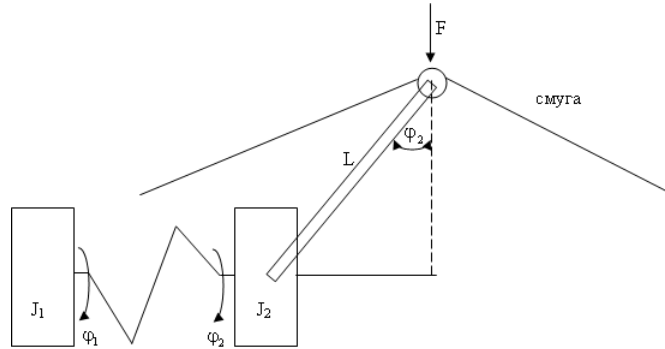


Рис. 7. Кінематична схема механізму петлетримача

Нелінійність даної системи обумовлена нелінійною залежністю прикладеного зусилля  $F$ , що обумовлене натягом смуги до опорного ролика петлетримача. В результаті момент навантаження, прикладений до валу петлетримача, має синусоїдальну залежність від зовнішнього зусилля. Передбачається, що контур регулювання моменту  $M_d$  двигуна має достатньо високу швидкодію в порівнянні з динамікою двомасової електромеханічної системи.

Одним з сучасних підходів до проектування нелінійних систем є лінеаризація зворотним зв'язком за допомогою перетворень алгебри Лі. Центральна ідея цього методу полягає в алгебраїчному перетворенні динаміки початкової нелінійної системи в лінійну систему за допомогою перетворень алгебри Лі, для якої можуть бути використані розроблені методи синтезу лінійних систем.

Вектор стану початкової системи має вигляд

$$x = [\varphi_2 \quad \dot{\varphi}_2 \quad \varphi_1 \quad \dot{\varphi}_1]^T. \quad (25)$$

Тоді вектори полів  $f$  і  $g$  можуть бути записані у вигляді

$$f = \left[ x_2 \quad -\frac{FL}{J_2} \sin x_1 - \frac{C}{J_2} (x_1 - x_3) \quad x_4 \quad \frac{C}{J_1} (x_1 - x_3) \right]^T,$$

$$g = \left[ 0 \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{J_1} \right]^T.$$

Введемо перетворення стану  $z = z(x)$  і перетворення входу  $M_\delta = \alpha(x) + \beta(x)v$ , щоб виконати лінеаризацію системи. Оскільки початкова система є керованою за входом, то перша компонента  $z_1$  нового вектора стану  $z$  задовольняє умовам:

$$\frac{\partial z_1}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial z_1}{\partial x_3} = 0, \quad \frac{\partial z_1}{\partial x_4} = 0, \quad \frac{\partial z_1}{\partial x_1} \neq 0.$$

Змінна стану  $z_1$  повинна бути функцією змінної стану  $x_1$  і в простому випадку може бути прийнята у вигляді

$$z_1 = x_1.$$

Тоді решта змінних стану може бути отримана у вигляді виразів від змінної стану  $z_1$ :

$$z_2 = \nabla_{z_1} f = x_2,$$

$$z_3 = \nabla_{z_2} f = -\frac{FL}{J_2} \sin x_1 - \frac{C}{J_2} (x_1 - x_3),$$

$$z_4 = \nabla_{z_3} f = -\frac{FL}{J_2} x_2 \cos x_1 - \frac{C}{J_2} (x_2 - x_4).$$

Тоді перетворення входу приймемо у вигляді

$$M_\delta = (v - \nabla_{z_4} f) / (\nabla_{z_4} g),$$

що може бути записане як

$$M_\delta = \frac{J_1 J_2}{C} (v - a(x)),$$

де

$$a(x) = \frac{FL}{J_2} \sin x_1 \left( x_2^2 + \frac{FL}{J_2} \cos x_1 + \frac{C}{J_2} \right) + \frac{C}{J_2} (x_1 - x_3) \left( \frac{C}{J_2} + \frac{C}{J_1} + \frac{FL}{J_2} \cos x_1 \right).$$

В результаті виконання такого перетворення отримаємо лінійну систему:

$$\dot{z}_1 = z_2, \quad \dot{z}_2 = z_3, \quad \dot{z}_3 = z_4, \quad \dot{z}_4 = v. \quad (26)$$

Для цієї лінійної системи, отриманої в результаті лінеаризації за входом на підставі дифеоморфізму  $z(x)$ , зворотне перетворення вектора стану лінеаризованої за входом системи в змінні стану початкової системи має вигляд:

$$x_1 = z_1,$$

$$x_2 = z_2,$$

$$x_3 = z_1 + \frac{I}{C} \left( z_3 + \frac{FL}{J_2} \sin z_1 \right),$$



$$x_4 = z_2 + \frac{I}{C} \left( z_4 + \frac{FL}{J_2} z_2 \cos z_1 \right).$$

В результаті такої лінеаризації отримано перетворення початкової нелінійної системи (23)-(24) в лінійну систему (26) таким чином, що змінна стану  $z_1$ , яка дорівнює  $x_1$ , є положенням петлетримача, змінна стану  $z_2$  є швидкістю петлетримача, змінна стану  $z_3$  є прискоренням петлетримача, і, нарешті, змінна стану  $z_4$  є ривком (третьою похідною) положення петлетримача. Природно, що такий вибір змінних стану лінеаризованої за входом системи визначається завданням змінних стану початкової нелінійної системи і перетвореннями вхід-стан.

Основна відмінність лінеаризації зворотним зв'язком від традиційної лінеаризації розкладанням початкових функцій нелінійностей в ряд Тейлора або з використанням матриці Якобі полягає в тому, що лінеаризація зворотним зв'язком дозволяє виконувати синтез нелінійної системи при зміні змінних стану у всьому діапазоні, а при використанні традиційних методів лінеаризації результати синтезу вірні в малому, тобто при достатньо малій зміні змінних стану щодо положення рівноваги системи.

Синтезовані нелінійні регулятори положення петлетримача на основі лінеаризації зворотним зв'язком. Розраховані перехідні процеси в двомасовій системі з оптимальними регуляторами, замкненими через оптимальні спостерігачі при керуванні кутом повороту столу петлетримача широкосмугового стану гарячої прокатки. Дослідження перехідних процесів цієї двомасової системи показали їх практичний збіг з перехідними процесами початкової оптимальної системи, замкнутої за повним вектором стану. Перехідні процеси спостерігача достатньо близькі до перехідних процесів відповідних змінних стану систем.

За допомогою оптимальних регуляторів отримані динамічні характеристики системи, що задовольняють технічним вимогам, що пред'являються до системи керування кутом повороту столу петлетримача широкосмугового стану гарячої прокатки з урахуванням пружних елементів у вигляді двомасової електромеханічної системи.

**У п'ятому розділі** розглядається задача початкової настройки технологічних параметрів прокатного стану на основі квазістатичної математичної моделі. Враховуючи значні швидкості прокатки, основне завдання початкової настройки полягає в тому, щоб на основі інформації про фізико-хімічний і тепловий стан підкату за допомогою системи керування станом на підставі математичної моделі стану сформулювати початкові положення технологічних агрегатів, які забезпечують прокат металу необхідної якості при мінімальних діях керування. З одного боку, перевагою квазістатичної математичної моделі є простота її отримання при збе-

реженні високого ступеня адекватності реальним процесам. З іншого боку, така модель дозволяє застосувати методи сучасної теорії керування.

В основу квазістатичної математичної моделі покладені основні статичні зв'язки між технологічними параметрами процесу прокатки, які наведені у другому розділі.

До складу технологічних параметрів  $k$ -клітьового стану входять  $7k + 3$  параметра, що включають товщину прокату на виході з кожної кліті, натяг смуги, моменти прокатки, швидкість виходу металу, частоту обертання валків, положення натискних гвинтів, напругу керування електроприводом, витрату металу. Параметри, які входять до множини технологічних параметрів, зв'язані  $5k$  алгебраїчними рівняннями, а три параметри вважаються заданими: товщина підкату, товщина прокату на виході і витрата металу.

Таким чином, можна говорити про систему  $5k$  рівнянь зв'язку  $7k$  технологічних параметрів

$$f_1(x) = 0, \quad x \in R^n, \quad (27)$$

де  $x$  –  $n$ -мірний вектор перелічених вище технологічних параметрів ( $n = 7k$ ), а  $f_1(x)$  –  $m$ -мірна вектор-функція ( $m = 5k$ ). Співвідношення (27) задають  $r$ -мірне різноманіття  $M \subset R^n$ , де  $r = n - m$ .

Математична постановка завдання початкової настройки технологічних параметрів прокатного стану полягає в знаходженні вектора параметрів  $x \in M$ , що належить множині допустимих з погляду технології процесу прокатки значень, і що є випуклим багатогранником  $L$ . Таким чином, завдання початкової настройки технологічних параметрів можна сформулювати як завдання знаходження одного з векторів  $x$ , що задовольняє умові  $x \in M \cap L$ .

Оскільки  $m < n$ , то система (27) допускає безліч рішень, знаходження яких само по собі є достатньо складним обчислювальним завданням, а знаходження рішень, що задовольняють умові  $x \in L$ , у свою чергу істотно її ускладнює.

Для переходу до квазістатичної моделі процесів керування рішення задачі настройки технологічних параметрів вектор  $x$  представимо у вигляді  $x = (x_1, x_2)$  – де  $x_1$  –  $m$ -мірний вектор вихідних координат, а  $x_2$  –  $r$ -мірний вектор параметрів керування, якими можуть бути вибрані положення натискних гвинтів і напруги керування електродвигунами.

Введемо також  $n$ -мірний вектор неузгодженостей

$$y = f_2(x_1, x_2). \quad (28)$$

Приймаючи, що вектори  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y$  є змінними у часі, знайдемо похідну від (28) за часом. В результаті маємо:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \Phi(x)u - \Phi(x)V(x)v, \\ \dot{x}_2 = v, \\ \dot{y} = u, \end{cases} \quad (29)$$

де  $\Phi^{-1}(x) = W(x) = \frac{\partial f}{\partial x_1}$ ,  $V(x) = \frac{\partial f}{\partial x_2}$ .

Система (29) є системою диференціальних рівнянь, що описує процес керування в  $(n + m)$ -мірному фазовому просторі. Кожна точка в просторі стану цього процесу відповідає системі рівнянь (28), що базується на статистиці об'єкта керування. Це і дозволило кваліфікувати такий процес по аналогії з термодинамікою як квазістатичний, тобто такий, що складається з послідовності положень рівноваги.

Таким чином, завдання настройки параметрів технологічного процесу можна звести до завдання керування системою (29): про переведення системи (29) з деякого початкового стану  $(x_0, y_0)$  в кінцевий стан  $(x_L, 0)$ , де  $x_L \in L$ .

Виконання умови кінцевого стану системи (29) досягається вибором сигналу керування  $u(t) = c = -y_0$  за вектором неузгодженостей  $y(1) = 0$ , що дозволяє зменшити розмірність керованої системи із  $n + m$  до  $n$ .

Для остаточної адаптації сформульованого завдання керування до класичного формалізму варіаційного керування введено критерій якості у вигляді

$$J = \frac{1}{2} \int_0^1 v^T v dt, \quad (30)$$

що дозволяє звести початкове завдання керування до завдання синтезу. Крім того, замість умов приналежності  $x(1) \in L$  зручно розглядати еліпсоїдну апроксимацію  $E$  багатогранника  $L$ . Така заміна дозволяє остаточню сформулювати двоточкове крайове завдання мінімуму критерію якості (30) для системи (29) і зв'язаної системи, представлені у вигляді

$$\dot{\lambda}^k = -\lambda_1^T \frac{\partial \Phi}{\partial x_k} c + \lambda_1^T \frac{\partial \Phi}{\partial x_k} V v + \lambda_1^T \frac{\partial V}{\partial x_k} v, \quad k = \overline{1, n}, \quad (31)$$

де  $\lambda^T = (\lambda^1, \lambda^2, \dots, \lambda^n)$  – вектор зв'язаних змінних,  $\lambda_1^T = (\lambda^1, \lambda^2, \dots, \lambda^m)$  – підвектор зв'язаних змінних, які відповідають першим  $m$  компонентам вектора  $\lambda$ .

Краєві умови для зв'язаної системи (31) визначаються з умов ортогональності зв'язаного вектора  $\lambda$  до поверхні еліпсоїда  $E$ , а закон керування формується з умови стаціонарності функції Гамільтона:

$$H = \frac{1}{2} v^T v + \lambda_1^T \Phi c - \lambda_1^T \Phi V v + \lambda_2^T v,$$

з якої виходить

$$v^T = \lambda_1^T \Phi V - \lambda_2^T.$$

Таким чином, сформульовано двоточкове крайове завдання для системи з  $2n$  диференціальних рівнянь (29), (31). Розв'язок цього завдання одним з широко відомих способів дозволяє отримати рішення задачі початкової настройки технологічних параметрів.

Наведені приклади розрахунку початкової настройки прокатного стану для різних сортamentів смуг, що прокочуються.

**У шостому розділі** розглянуті принципи побудови електромеханічних систем з частотно-регульованими двигунами змінного струму у зв'язку з тим, що на сучасних прокатних станах застосовують синхронні або асинхронні машини змінного струму з короткозамкненим ротором із перетворювачами частоти. Розглянуті особливості побудови електромеханічних систем з синхронними і асинхронними частотно-регульованими двигунами змінного струму. Виконано порівняння динамічних характеристик векторного керування частотно-регульованими двигунами змінного струму при прямому управлінні моментом і регулюванні за потокозчепленням ротора.

Виконаний синтез П-регулятора за неповним вектором стану системи регулювання швидкості обертання для двомасової моделі електромеханічної системи з використанням сигналу різниці швидкостей обертання двигуна і робочого механізму. Синтезований спостерігач збурення для відновлення моменту навантаження і тертя з метою компенсації їх впливу на системи регулювання. Досліджені динамічні характеристики синтезованих систем регулювання положення і швидкості для різних режимів роботи.

Виконаний синтез ПІ-регулятора швидкості обертання за повним вектором стану для двомасової моделі електромеханічної системи і наведені динамічні характеристики синтезованої системи. Виконаний синтез систем керування швидкістю обертання і положенням робочого органу з урахуванням нелінійностей люфту і тертя для різних умов роботи системи і проаналізовані динамічні характеристики синтезованих систем для різних режимів роботи.

Як приклад на рис. 8 показано порівняння експериментальних перехідних процесів моменту двигуна та швидкості обертання системи із класичним ПІ-регулятором та із ПІ-регулятором стану. Як видно з рис. 8, застосування ПІ-регулятора стану дозволяє суттєво зменшити перерегулювання швидкості та зменшити момент двигуна.

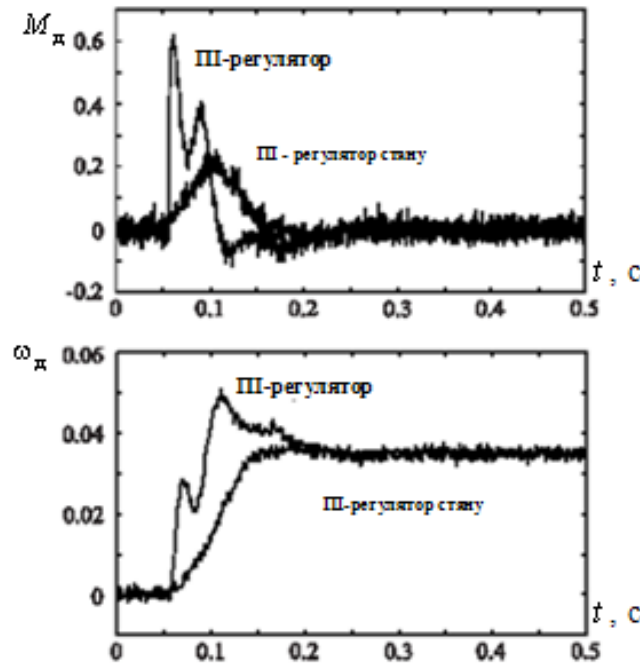


Рис. 8. Експериментальні перехідні процеси моменту двигуна  $M_d$  та швидкості обертання  $\omega_m$  нелінійної системи із ПІ-регулятором та ПІ-регулятором стану

На рис. 9 показані експериментальні перехідні процеси змінних стану нелінійної електромеханічної системи змінного струму при регулюванні швидкості та положення як за завданням, так і за збуренням.

У зв'язку з великою потужністю головних електроприводів прокатних станів (4-6 мВт), важливим питанням є енергозбереження, тому розроблені методи енергозбереження засобами електроприводу. При створенні електромеханічних систем змінного струму важливим питанням є енергетично оптимальний режим. Втрати підвищують потреби в енергії і генерують тепло, яке необхідно утилізувати за допомогою додаткових засобів і конструктивних змін. Сучасні частотно-регульовані двигуни змінного струму в номінальному режимі роботи дозволяють досягти коефіцієнта корисної дії відповідно 98% для двигунів середньої і 95% для двигунів великої потужності.

При частковому завантаженні ефективність використання енергії може істотно знижуватися. У системі векторного керування двигуном є два канали керування: швидкістю або моментом обертання і потокозчепленням ротора. Сигналами завдання виступають вектори струму статора і потокозчеплення ротора, за допомогою яких регулюється частота обертання або кут повороту ротора електропривода. Для досягнення максимального коефіцієнта корисної дії електроприводу сигнали керування для заданого значення кута повороту ротора формуються за оптимальним законом. Розроблені алгоритми оптимального керування електро-

механічними системами з частотно-керованими двигунами змінного струму за критерієм максимуму коефіцієнта корисної дії споживаної енергії шляхом ослаблення потоку двигуна.

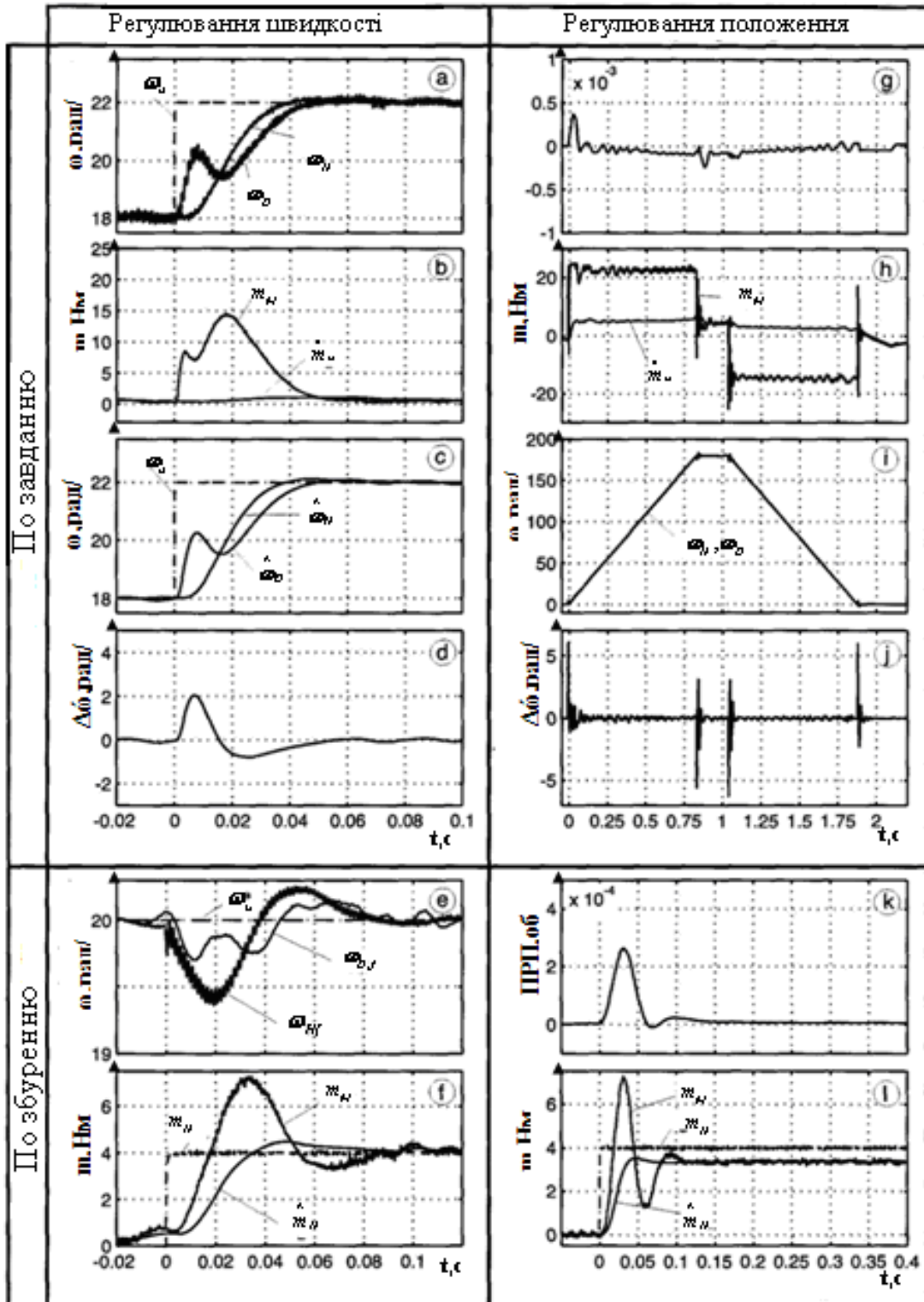


Рис. 9. Експериментальні перехідні процеси змінних стану нелінійної електромеханічної системи змінного струму при регулюванні швидкості та положення як за завданням, так і за збуренням

На рис. 10 показані залежності коефіцієнта корисної дії  $\eta$  від коефіцієнта навантаження  $m$  при різних методах керування потоком: 1 – оптимальне керування коефіцієнтом корисної дії; 2 – оптимальне керування моментом; 3 – квазіоптимальне керування моментом; 4 – постійний потік ротора для двох значень швидкості: а)  $\omega=150$  рад/с; б)  $\omega=50$  рад/с. При використанні такої системи векторного керування в режимах, відмінних від номінальних, вигреш в коефіцієнті корисної дії може сягати 20%.

У додатках наведені схеми моделювання лінійних та нелінійних електромеханічних систем в середовищі SIMULINK, алгоритми приведення в дію систем автоматичного керування швидкістю головного приводу із зворотним зв'язком за змінними стану, результати досліджень технологічних режимів для традиційної і розробленої систем керування петлею і натягом смуги, приклади вирішення завдань початкової настройки прокатних станів, алгоритми керування електромеханічними системами з частотно-регульованими двигунами змінного струму, основні положення аналізу і синтезу електромеханічних систем з двигунами змінного струму, принципи побудови нелінійних спостерігачів, а також акти про впровадження досліджень в практику проектування систем керування та в навчальний процес.

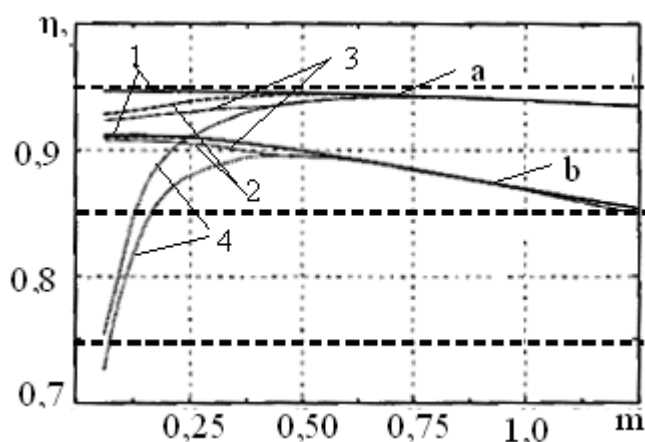


Рис. 10. Залежність коефіцієнта корисної дії  $\eta$  від коефіцієнта навантаження  $m$  при різних методах керування потоком

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі дано рішення науково-практичної проблеми підвищення показників якості автоматизованого керування технологічними процесами прокатки на основі розробленої концепції синтезу автоматизованого керування технологічними процесами прокат-

ки, заснованої на математичних моделях і методах дворівневого оптимального керування. Основні отримані наукові та практичні результати дозволяють сформулювати наступні висновки.

1. Проведено аналіз методів синтезу систем автоматизованого керування технологічними процесами прокатки широкосмугових прокатних станів і виявлено перспективні можливості концепції синтезу автоматизованого керування технологічними процесами прокатки на основі математичних моделей і методів дворівневого оптимального керування, що дозволяють підвищити ступінь наукової обґрунтованості технічних проектів по удосконаленню систем керування технологічними процесами прокатки і на їх основі підвищити показники якості автоматизованого керування технологічними процесами прокатки.

2. Сформульовано основні положення концепції синтезу автоматизованого керування технологічними процесами прокатки на основі синтезу дворівневого оптимального керування, яка на нижньому рівні передбачає виконання синтезу оптимальних регуляторів систем керування положенням натискних гвинтів, положень петлетримачів смуги і швидкостей обертання головних приводів окремих прокатних клітей, а на верхньому рівні виконання синтезу оптимальних регуляторів системи автоматичного регулювання товщини, натягу і петлі смуги багатоклітьових прокатних станів.

3. На основі співвідношень, які зв'язують енергосилові параметри однієї прокатної клітей: початкової та кінцевої товщини смуги, повного зусилля прокатки, моменту прокатки, величини випередження, заднього і переднього натягу смуги, величини міжвалкового зазору, механічних властивостей металу, що прокочується, і величини коефіцієнта зовнішнього тертя у осередку деформації отримала подальший розвиток математична модель багатоклітьового прокатного стану як об'єкта керування системи автоматичного регулювання товщини, натягу і петлі смуги широкосмугового прокатного стану.

4. Сформульовано і розв'язано задачу синтезу оптимальних систем керування геометричними параметрами прокату багатоклітьових прокатних станів як задачу нелінійного програмування. Синтезовані оптимальні регулятори, за допомогою яких мінімізується критерій якості, що включає дисперсії подовжньої різнотовщинності та дисперсії відхилень натягу смуги від їх номінальних значень в міжклітьових проміжках. Показано, що застосування концепції синтезу автоматизованого керування технологічними процесами прокатки на основі математичних моделей і методів дворівневого оптимального керування дозволило зменшити дисперсії різнотовщинності прокату в 1,27 рази, зменшити дисперсію відхилень натягу смуги в міжклітьових проміжках в 1,41 рази. В синтезованій системі в порівнянні з традиційною системою перерегулювання за швидкістю головних приводів зменшене з 30% до 5%, а час регулювання зменшений з 0,3 с до 0,1 с.



5. Виконано синтез нелінійної системи керування положенням натискних гвинтів регулювання товщини на основі лінеаризації системи зворотним зв'язком. При цьому початкова нелінійна система за допомогою алгебри Лі перетворена в еквівалентну лінійну систему, для якої виконаний синтез оптимального лінійного регулятора стану. Для відновлення безпосередньо невимірюваних змінних стану нелінійної системи на основі нелінійного перетворення за допомогою алгебри Лі синтезується нелінійний спостерігач стану. В результаті проведених досліджень динамічних характеристик синтезованих систем показано, що системи мають малу чутливість до зміни параметрів люфту, оскільки варіації люфту призводять до незначних змін характеристик системи, замкненої через регулятор і спостерігач. При зміні люфту синтезована система має більше перерегулювання, ніж при номінальному значенні люфту. Зміна кутової швидкості двигуна практично забезпечує збіг із квазіоптимальним за часом проходженням люфту. Запропонована система нелінійного керування натискними гвинтами з люфтами і нелінійним тертям дозволяє підвищити динамічні показники якості керування з високою точністю в сталому режимі. Для відновлення усіх змінних стану системи використовується нелінійний спостерігач. Врахування нелінійного тертя при синтезі спостерігача дозволяє додатково підвищити точність спостереження кутової швидкості приводу.

6. Синтезовані нелінійні регулятори положення петлетримача на основі лінеаризації зворотним зв'язком за допомогою перетворень алгебри Лі, що є одним з сучасних підходів до проектування нелінійних систем. Розраховані перехідні процеси в двомасовій системі з оптимальними регуляторами, замкненими через оптимальні спостерігачі стосовно керування кутом повороту столу петлетримача широкосмугового прокатного стану. Проведено всебічне моделювання синтезованої системи і виконано порівняння динамічних характеристик синтезованої і традиційної систем. Показано, що величина перерегулювання положення петлетримача зменшилося з 52-63% до 8,9-9,4% і при цьому час регулювання зменшився із 0,5-0,7 с до 0,15-0,2 с залежно від режимів роботи системи. Величина перерегулювання питомого натягу зменшилася з 38% до 19%, час перехідного процесу зменшився з 1,28 с до 0,38 с.

7. Розроблений метод початкової настройки прокатного стану, який базується на заміні статичних рівнянь зв'язку між технологічними параметрами еквівалентною системою диференціальних рівнянь процесу керування, що дозволило звести задачу вибору допустимих значень технологічних параметрів до рішення задачі оптимального керування класичними методами варіаційного обчислення. Наведені приклади розрахунку початкової настройки прокатного стану.

8. Розроблені принципи побудови електромеханічних систем з частотно-регульованими двигунами змінного струму та виконано порівняння динамічних характеристик векторного керування частотно-регульованими двигунами змінного струму з прямим керуванням мо-

ментом і регулюванням за потокозчепленням ротора. Виконаний синтез систем керування швидкості обертання з урахуванням нелінійностей люфту і тертя для різних умов роботи системи і проаналізовані динамічні характеристики синтезованих систем. Показано, що застосування ПІ-регулятора стану у порівнянні із класичним ПІ-регулятором дозволяє зменшити перерегулювання по швидкості з 40% до 5% та одночасно зменшити кидок моменту двигуна більше ніж у два рази при однаковому часі перехідних процесів за швидкістю.

9. У зв'язку з тим, що головні електроприводи прокатних станів мають велику потужність 4-6 мВт і більше, розроблені методи енергозбереження засобами електроприводу змінного струму. Більшу частину часу головні електроприводи працюють при їх частковому завантаженні, тому розроблені алгоритми оптимального керування електромеханічними системами з частотно-керованими двигунами змінного струму за критерієм максимуму коефіцієнта корисної дії споживаної енергії шляхом ослаблення потоку двигуна, які на відміну від традиційних систем, дозволяють забезпечити максимальний коефіцієнт корисної дії та заощадити до 20% електроенергії при частковому завантаженні електромеханічних систем змінного струму.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Балюта С.М. Частотнорегульовані електромеханічні системи з інтелектуальним керуванням в системах автоматизації технологічних процесів / С.М. Балюта. – К.: НУХТ, 2005. – 281 с.

2. Балюта С.М. Схема заміщення для розрахунку імпульсних процесів в асинхронних машинах змінного струму з урахуванням дії вихрових струмів / С.М. Балюта // Наукові праці УДУХТ. – К.: УДУХТ, 1998. – № 5. – С. 24-25.

3. Балюта С.М. Математичне моделювання комутаційних перенапружень у високонапругових асинхронних машинах / С.М. Балюта // Наукові праці УДУХТ. – К.: УДУХТ, 1998. – № 6. – С. 25-29.

4. Балюта С.М. Способи схемної адаптації сталої часу ротора, намагнічування при частотному регулюванні асинхронного електропривода / І.М. Богаєнко, С.М. Балюта, Ю.І. Бурляй // Автоматизація виробничих процесів. – 2002. – № 1. – С. 47-55.

*Здобувач запропонував спосіб адаптації сталої часу ротора намагнічування при частотному регулюванні асинхронного електропривода.*

5. Балюта С.М. Принципи керування частотно-регульованим асинхронним електроприводом / С.М. Балюта, В.І. Васічкін, Ю.І. Бурляй // Автоматизація виробничих процесів. – 2002. – № 2. – С. 39-47.

*Здобувачеві належать основні підходи до формулювання принципів керування частотно-*

*регульованим асинхронним електроприводом.*

6. Балюта С.М. Визначення та корекція орієнтації магнітного потоку асинхронної машини при бездатчиковому векторному керуванні при малих частотах статора / І.М. Богаєнко, С.М. Балюта // Вісник Технологічного університету «Поділля». – Хмельницький: ДТУ «Поділля», 2003. – № 1. – С. 7-13.

*Здобувачеві належить метод визначення вектора магнітного потоку асинхронної машини при бездатчиковому векторному керуванні при малих частотах статора.*

7. Балюта С.М. Визначення та корекція орієнтації ротора в бездатчикових системах векторного керування асинхронною машиною для визначення частот статора / І.М. Богаєнко, С.М. Балюта // Вісник Технологічного університету «Поділля». – Хмельницький: ДТУ, 2003. – № 3. – Т.1. – Ч.1. – С. 34-37.

*Здобувач запропонував метод визначення вектора магнітного потоку в бездатчикових системах векторного керування асинхронною машиною для визначення частот статора.*

8. Балюта С.М. Визначення параметрів асинхронного двигуна в складі частотно-регульованого електроприводу / С.М. Балюта // Механіка та машинобудування. – 2003. – № 1. – Т.1. – С. 62-69.

9. Балюта С.М. Корекція напруги інвертора з широтно-імпульсною модуляцією в схемах векторного керування асинхронним електроприводом / С.М. Балюта // Механіка та машинобудування. – 2003. – №1. – Т. 2. – С. 69-76.

10. Балюта С.М. Основні положення оцінювання надійності бездатчикової системи векторного керування асинхронним електроприводом / С.М. Балюта, К.І. Богаєнко, Ю.І. Бурляй // Автоматизація виробничих процесів. – 2003. – № 1. – С. 14-21.

*Здобувач запропонував метод оцінювання надійності бездатчикової системи векторного керування асинхронним електроприводом.*

11. Балюта С.М. Оптимізація режимів роботи асинхронного електропривода з векторним керуванням / С.М. Балюта // Автоматизація виробничих процесів. – 2003. – № 2. – С. 37-44.

12. Балюта С.М. Методи визначення вектора магнітного потоку та частоти обертання при бездатчиковому векторному керуванні асинхронним електроприводом / С.М. Балюта // Автоматизація виробничих процесів. – 2003. – № 3. – С. 47-54.

13. Балюта С.М. Застосування методів регресійного аналізу для визначення положення вектора магнітного потоку в асинхронному електроприводі з бездатчиковим керуванням при найменших частотах статора / С.М. Балюта, К.І. Богаєнко, Ю.І. Бурляй // Автоматизація виробничих процесів. – 2003. – № 4. – С. 13-17.

*Здобувачем обґрунтовано застосування методу регресійного аналізу для визначення положення вектора магнітного потоку в асинхронному електроприводі.*

14. Балюта С.М. Визначення механічних параметрів частотно-регульованого електропривода змінного струму / С.М. Балюта, І.М. Богаєнко // Автоматизація виробничих процесів. – 2004. – № 1. – С. 33-39.

*Здобувачем обґрунтовано метод визначення механічних параметрів частотно-регульованого електропривода змінного струму.*

15. Балюта С.Н. Автоматическая коррекция толщины полосы / С.Н. Балюта, В.И. Васичкин // Автоматизація виробничих процесів. – 2004. – № 2. – С. 102-107.

*Здобувачеві належить метод корекції товщини смуги широкосмугових станів гарячого прокату.*

16. Балюта С.М. Автоматическое управление установкой ускоренного охлаждения полосы / И.Н. Богаенко, С.Н. Балюта, В.И. Васичкин // Автоматизація виробничих процесів. – 2004. – № 3. – С. 124-128.

*Здобувач запропонував метод синтезу системи керування установкою прискореного охолодження смуги.*

17. Балюта С.М. Адаптивне регулювання частоти обертання ротора частотно-регульованих електроприводів змінного струму / С.М. Балюта // Автоматизація виробничих процесів. – 2004. – № 4. – С. 58-62.

18. Балюта С.М. Система автоматического регулирования прокатного стана / И.Н. Богаенко, С.Н. Балюта, В.И. Васичкин // Вісник технологічного університету Поділля. – Хмельницький: ДТУ «Поділля», 2004. – Т.1. – Ч.1. – С. 7-13.

*Здобувач запропонував метод синтезу системи автоматичного регулювання геометричних параметрів прокату.*

19. Балюта С.М. Оптимізація роботи асинхронного електропривода з векторним керуванням / І.М. Богаєнко, С.М. Балюта // Механіка та машинобудування. – 2004. – № 1. – С. 205-214.

*Здобувачем обґрунтовано метод оптимізації роботи асинхронного електропривода з векторним керуванням.*

20. Балюта С.М. Методи підвищення надійності бездатчикової системи векторного керування асинхронним електроприводом за потокозчепленням ротора / І.М. Богаєнко, С.М. Балюта // Механіка та машинобудування. – 2005. – № 1. – Т.1. – С. 76-85.

*Здобувач обґрунтував принцип підвищення надійності бездатчикової системи векторного керування.*

21. Балюта С.М. Система керування асинхронного електропривода з векторним керу-

ванням за магнітним потоком ротора без застосування датчика частоти обертання / І.М. Богаєнко, С.М. Балюта // Механіка та машинобудування. – 2005. – №1. – Т.2. – С. 85-93.

*Здобувачеві належить структура системи бездатчикового керування асинхронного електропривода з векторним керуванням.*

22. Балюта С.М. Электромеханическая система позиционирования и электрической синхронизации / [И.Н. Богаенко, С.Н. Балюта, В.И. Васичкин, И.А. Опрышко] // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький: ХНУ «Поділля», – 2005. – № 4. – Т. 1. – С. 7-12.

*Здобувачеві належить структура системи позиціонування і синхронізації системи автоматичного регулювання товщини прокатуємої смуги.*

23. Балюта С.М. Регулювання частоти обертання багатомоторних електромеханічних систем змінного струму / І.М. Богаєнко, С.М. Балюта // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький: ХНУ «Поділля», 2005. – №4. – Т.2. – Ч.1. – С. 203-206.

*Здобувач запропонував метод регулювання багатомоторних електромеханічних систем змінного струму.*

24. Балюта С.Н. Синтез системы автоматического регулирования толщины полосы тонколистового стана горячей прокатки на базе интеллектуальной электромеханической системы переменного тока / С.Н. Балюта, И.Н. Богаенко // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2006. – № 5. – С. 44-52.

*Здобувач запропонував метод синтезу системи автоматичного регулювання товщини смуги тонколистового стану гарячого прокату із інтелектуальними електромеханічними системами змінного струму.*

25. Балюта С.Н. Управление скоростным режимом чистовой группы клетей широкополосного стана горячей прокатки / С.Н. Балюта, И.Н. Богаенко, В.И. Васичкин // Автоматизація виробничих процесів. – 2006. – № 1. – С. 108-123.

*Здобувачеві належить метод синтезу системи керування швидкісним режимом чистової групи клітей широкополосного стану гарячого прокату.*

26. Балюта С.Н. Новая структура АСУ ТП и модель чистовой группы клетей стана горячей прокатки / С.Н. Балюта, В.И. Васичкин // Автоматизація виробничих процесів. – 2006. – № 2. – С. 173-181.

*Здобувач запропонував структурну схему автоматизованої системи керування технологічним процесом чистової групи клітей стану гарячого прокату.*

27. Балюта С.М. Системи автоматичного керування геометричними параметрами прокату на широкополосних станах гарячої прокатки з виконавчими механізмами з двигунами

змінного струму / С.М. Балюта, І.М. Богаєнко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький: ХНУ, 2007. – № 3. – Т. 1. – С. 7-10.

*Здобувач запропонував структуру системи керування геометричними параметрами прокату на широкомугових станах із двигунами змінного струму у якості виконавчих механізмів.*

28. Балюта С.Н. Динамические модели прокатки и системы автоматического регулирования межклетевого натяжения полосы / С.Н. Балюта, И.Н. Богаенко, В.И. Васичкин // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2007. – №3. – С. 36-39.

*Здобувачем розроблена динамічна модель прокатки і системи автоматичного регулювання натягу смуги між клітьми.*

29. Балюта С.Н. Система управления петледержателем для широкополосного стана горячей прокатки / С.Н. Балюта, И.Н. Богаенко, В.Д. Йовбак // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2008. – № 5. – С. 21-29.

*Здобувач запропонував метод синтезу системи керування петлетримачем для широкомугового стану гарячого прокату.*

30. Балюта С.Н. Синтез системы управления петледержателем широкополосного стана горячей прокатки / С.Н. Балюта // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 7. – С. 3-14.

31. Балюта С.Н. Синтез систем управления механизмами широкополосных станов горячей прокатки / С.Н. Балюта // «Електроінформ». Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія и практика». – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 188-189.

32. Балюта С.Н. Квазистатическая математическая модель задачи управления технологическими параметрами прокатного стана / С.Н. Балюта, О.Н. Безменова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 9. – С. 3-11.

*Здобувач запропонував принцип побудови квазістатичної математичної моделі задачі початкової настройки технологічних параметрів прокатного стану у вигляді задачі оптимального синтезу.*

33. Балюта С.Н. Синтез системы регулирования толщины, натяжения и петли полосы широкополосного стана горячей прокатки / С.Н. Балюта // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 13. – С. 3-13.

34. Балюта С.Н. Исследование динамических характеристик главного электропривода широкополосного стана горячей прокатки как трехмассовой электромеханической системы / С.Н. Балюта // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – №23. – С. 19 – 28.

35. Балюта С.Н. Синтез нелинейного управления положением нажимных винтов системы автоматического регулирования толщины проката с учетом люфтов / С.Н. Балюта // Віс-

ник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 44. – С. 14-24.

36. Балюта С.Н. Система управління широкополосним станом горячої прокатки / С.Н. Балюта, И.Н. Богаенко, В.Д. Йовбак // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2009. – № 1. – С. 23-29.

*Здобувач запропонував структуру системи автоматизованого керування широкополосним станом гарячого прокату.*

37. Балюта С.Н. Идентификация механических параметров главного привода прокатной клетки широкополосного стана горячий прокатки с использованием генетических алгоритмов / С.Н. Балюта // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2009. – № 4. – С. 37-44.

38. Балюта С.М. Информационная система тонколистового стана горячий прокатки / И.Н. Богаенко, С.Н. Балюта, В.И. Васичкин // Міжнародно-практична конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень та інформаційні технології»: тези доповідей. – Чернівці, 2004. – С. 180-181.

*Здобувачеві належать принципи побудови інформаційної системи тонкосмугового стану гарячого прокату.*

39. Балюта С.М. Синтез электромеханических систем широкополосных станов горячий прокатки / Б.И. Кузнецов, С.Н. Балюта, В.В. Коломиец // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XVI МНТК. – Донецьк: ДНТУ, 2009. – Т. 2. – С. 52-56.

*Здобувачем обґрунтовано концепцію синтезу систем керування електромеханічних систем широкополосних станів гарячого прокату.*

40. Балюта С.Н. Синтез систем регулирования геометрических параметров проката широкополосного стана горячий прокатки / С.Н. Балюта // 16 Міжнародна конференція з автоматичного керування «Автоматика-2009»: тези доповідей. – Чернівці: Книга-XXI, 2009. – С. 114-115.

## АНОТАЦІЇ

**Балюта С. М. Синтез автоматизованих систем дворівневого керування технологічними процесами прокату.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2010.

Дисертація присвячена розробці перспективної концепції синтезу систем автоматизованого керування технологічними процесами широкополосних прокатних станів на основі

математичних моделей і методів дворівневого оптимального керування. Розроблена математична модель багатоклітьового прокатного стану як об'єкта керування системи автоматичного регулювання товщини, натягу і петлі смуги. Сформульована і вирішена задача синтезу оптимальних систем керування геометричними параметрами прокату багатоклітьових прокатних станів на основі розробленої математичної моделі багатоклітьового прокатного стану як об'єкта керування. Синтезовані нелінійні системи керування положенням натискних гвинтів та петлетримача на основі лінеаризації зворотним зв'язком за допомогою алгебри Лі. Для відновлення безпосередньо невимірюваних змінних стану нелінійної системи керування положенням натискних гвинтів на основі нелінійного перетворення за допомогою алгебри Лі синтезований нелінійний спостерігач стану.

Розглянуті принципи побудови електромеханічних систем з частотно-регульованими двигунами змінного струму. Сформульовані загальні принципи аналізу і синтезу електромеханічних систем з частотно-регульованими двигунами змінного струму. Розглянуті питання енергозбереження засобами електроприводу.

**Ключові слова:** прокатний стан, геометричні параметри, системи автоматизованого керування, аналіз і синтез складних систем, дворівневе керування, нелінійне керування, моделювання динамічних систем.

**Балюта С. Н. Синтез автоматизированных систем двухуровневого управления технологическими процессами прокатки.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2010.

Диссертация посвящена разработке перспективной концепции синтеза систем автоматизированного управления технологическими процессами широкополосных прокатных станков на основе математических моделей и методов двухуровневого оптимального управления.

Сформулированы основные положения концепции построения автоматизированного управления технологическими процессами прокатки на основе синтеза двухуровневого оптимального управления, позволяющей на нижнем уровне произвести синтез оптимальных регуляторов систем управления положением нажимных винтов, положением петледержателей и скоростей вращения главных приводов отдельных прокатных клетей, а на верхнем уровне выполнить синтез оптимальных регуляторов системы автоматического регулирования толщины, натяжения и петли полосы многоклетьевого прокатного стана.

Разработана математическая модель многоклетьевого прокатного стана как объекта управления системы автоматического регулирования толщины, натяжения и петли полосы.



Сформулирована и решена задача синтеза оптимальных систем управления геометрическими параметрами проката многоклетьевых прокатных станов на основе разработанной математической модели многоклетьевого стана горячей прокатки как объекта управления.

Выполнен синтез нелинейной системы управления положением нажимных винтов на основе линеаризации обратной связью с помощью алгебры Ли. Для восстановления непосредственно неизмеряемых переменных состояния исходной нелинейной системы управления положением нажимных винтов на основе нелинейного преобразования с помощью алгебры Ли синтезирован нелинейный наблюдатель состояния. В результате проведенных исследований динамических характеристик синтезированной системы показано, что система имеет малую чувствительность к изменению параметров люфта, так как вариации люфта приводят к незначительным изменениям характеристик системы, замкнутой через регулятор и наблюдатель. При изменении люфта синтезированная система имеет большее перерегулирование, чем при номинальном значении люфта. Изменение угловой скорости двигателя практически обеспечивает совпадение с квазиоптимальным по времени прохождением люфта. Предложенная система нелинейного управления нажимными винтами с люфтами и нелинейным трением позволяет достигнуть хорошей динамики управления с высокой точностью в установившемся режиме.

Синтезированы нелинейные регуляторы положения петледержателя на основе линеаризации обратной связью путем алгебраического преобразования динамики исходной нелинейной системы в линейную систему с помощью преобразований алгебры Ли.

Рассмотрены принципы построения электромеханических систем с частотно-регулируемыми двигателями переменного тока. Выполнено сравнение динамических характеристик векторного управления частотно-регулируемыми двигателями переменного тока при прямом управлении моментом и регулированию по потокосцеплению. Сформулированы общие принципы анализа и синтеза электромеханических систем с частотно-регулируемыми двигателями переменного тока. Рассмотрены вопросы энергосбережения средствами электропривода. Разработаны алгоритмы оптимального управления электромеханическими системами с частотно-управляемыми двигателями переменного тока по критерию максимума коэффициента полезного действия потребляемой энергии путем ослабления потока двигателя.

**Ключевые слова:** прокатный стан, геометрические параметры, системы автоматизированного управления, анализ и синтез сложных систем, двухуровневое управление, нелинейное управление, моделирование динамических систем.

**Balyuta S. N. Synthesis of automated control systems of two level controls of rolling mill technological processes.** – Manuscript.

Thesis for a Doctor of sciences degree in Technical Sciences, Speciality 05.13.07 – Automation of processes control. – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkiv, 2010.

The thesis is devoted development of perspective conception of synthesis of the systems of the automated control the technological processes of the rolling mill on the basis of mathematical models and methods of two level optimum control. The mathematical model of the rolling is developed as plant of thickness, pull and loop of bar of automatic control system. Formulated and decided task of synthesis of system optimum control by geometrical parameters of rolling mills on the basis of the developed mathematical model of the rolling mill as plant. The synthesis of nonlinear control system by position of screws is executed on the basis of linearizing by a feed-back by Lee algebra. For renewal of directly immeasurable state of initial nonlinear control the system by position of screws variables on the basis of nonlinear transformation by Lee algebra the nonlinear observer of the state is synthesized. The nonlinear regulators of position are synthesized to the loop of holder on the basis of feed-back linearizing by Lee algebraic transformation of dynamics of the initial nonlinear system to the linear system by Lee algebra transformations.

Construction principles of electromechanics systems with the frequency-control alternating current motor are considered. Analysis and synthesis of the electromechanics systems with frequency-control alternating current motor general principles are formulated. Energy-savings questions of electromechanic systems are considered.

**Key words:** rolling mill, geometrical parameters, automated control systems, analysis and synthesis of complex systems, two levels control, nonlinear control, modeling of dynamic systems.

