

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Рогачов Олександр Іванович

УДК 681.5.015.24:67.05

**ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ УПРАВЛІННЯ НЕСТАЦІОНАРНИМИ
РЕЖИМАМИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Харків - 2005

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч вищої школи України,
Воронов Віктор Георгійович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Ладанюк Анатолій Петрович,
Національний університет харчових технологій МОН України,
м. Київ, завідувач кафедри автоматизації та комп’ютерно-
інтегрованих технологій;
доктор технічних наук, професор
Дуель Михайло Олександрович,
Харківський науково-дослідний інститут комплексної автоматизації
Мінпаливенерго України, м. Харків, вчений секретар;
доктор технічних наук, професор
Дмитрієнко Валерій Дмитрович,
Національний технічний університет “Харківський політехнічний
інститут” МОН України, м. Харків, професор кафедри
обчислювальної техніки та програмування.

Провідна установа: Науково-виробнича корпорація “Київський інститут автоматики”,
Міністерство промислової політики України, м. Київ.

Захист відбудеться “ 26 ” квітня 2005 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків - 2, вул. Фрунзе 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, 61002, м. Харків – 2, вул. Фрунзе 21.

Автореферат розісланий “ 24 ” березня 2005 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Є. Голоскоков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У зв'язку з поступовим виснаженням енергоресурсів на нашій планеті проблема створення енергозберігаючих технологій стає з кожним роком усе більш актуальною. Питання енергозбереження дуже гостро постає і в Україні, оскільки близько 80% таких енергоносіїв як нафта і газ наша країна імпортує з інших країн. Тим часом споживання енергії на одиницю валового продукту в Україні в 3-4 рази вище, ніж у країнах Західної Європи. Для виходу країни на самозабезпечення енергоресурсами необхідно знизити енергоємність нашої продукції принаймні на 40%.

Багато промислових механізмів і комплексів в складі АСУ ТП велику частину свого робочого часу знаходяться в нестационарному режимі, тобто в режимі частих пусків, гальмувань і реверсів. До числа таких об'єктів відносяться, зокрема, багато електроприводів реверсивних станів гарячої прокатки, шахтні підйомники, транспортні засоби, сушильні камери періодичної дії в режимі пропарювання і багато інших. Організація управління, яке мінімізує втрати енергії при збереженні заданої продуктивності роботи механізму, дозволяє знизити енергоємність промислової продукції до можливого за даних умов мінімуму.

Незважаючи на велику кількість досліджень, проведених для рішення подібних задач, питання пошуку й реалізації енергозберігаючих управлінь для подібних об'єктів ще далекі від завершення, що зв'язано як із складністю таких задач, так і з великим різноманіттям об'єктів і умов їхньої роботи, що не дають можливості розробити загальні методи синтезу таких управлінь для різних типів об'єктів і технологічних процесів. Тому актуальність обраного напрямку дисертаційної роботи обумовлена необхідністю пошуку енергозберігаючих управлінь для широкого класу вищевказаних промислових механізмів і установок у складі АСУ ТП і доведення отриманих теоретичних результатів до практичного впровадження. Поставлена задача і визначила напрямок і ціль ряду теоретичних і експериментальних досліджень, зв'язаних із необхідністю розв'язку комплексу прикладних задач для можливості реалізації енергозберігаючих систем управління.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, проведені в дисертаційній роботі, здійснювалися відповідно до госпдоговірних і держбюджетних тем, що виконувалися на кафедрі “Автоматика і управління в технічних системах” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” у 1975-2002 р. по науковому напрямку, зв'язаному з розробкою й впровадженням оптимальних систем керування різними технологічними процесами (номера тем госпреєстрації ГР 75052632, ГР 78003232, ГР 01.85.0001190, 0188.0065300, 0100U001691), а також у рамках координаційних планів науководослідних робіт із проблеми “Теоретична електротехніка й електроніка”, затверджених відділенням фізико-технічних проблем енергетики і відділенням математики, механіки і кібернетики АН УРСР на 1976 – 1990 р. В останні роки тематика дисертаційної роботи визначалася “Націо-

нальною енергетичною програмою України до 2010 року”, затвердженою Верховною Радою України 15.05.1996 р.

Роботи виконувалися як під науковим керівництвом здобувача, так і при його особистій участі.

Мета й задачі роботи. Метою роботи є розробка автоматизованих систем, що реалізують енергозберігаючі управління різними технологічними процесами, механізми яких велику частину робочого циклу знаходяться в нестационарному режимі.

Відповідно до поставленої мети дисертаційна робота містить постановку й розв’язок наступних основних задач:

– побудова й обґрунтування математичних моделей – механізмів технологічного процесу гарячої прокатки металів, процесу перемотування й розрізування паперової полотна, процесу розрізування водорозчинних монокристалів, процесу пропарювання при сушінні капілярно-пористих матеріалів – відповідно до особливостей кожного з них;

– вибір і обґрунтування критеріїв оптимальності енергозберігаючих управлінь з урахуванням обмежень на управляючі дії і фазові координати;

– розв’язок комплексу задач по відшукуванню оптимальних управлінь, які мінімізують втрати енергії для розглянутих процесів;

– удосконалення чисельних методів розв’язку задач розрахунку параметрів енергозберігаючих управлінь;

– розробка методів синтезу структур автоматизованих систем, що реалізують енергозберігаючі управління;

– розробка алгоритмів, програм і пристроїв, що реалізують енергозберігаючі управління.

Об’єкти дослідження: механізми технологічного процесу гарячої прокатки металів, технологічний процес сушіння капілярно-пористих матеріалів, технологічний процес перемотування й розрізування паперової й картонної полотна, технологічний процес розрізування водорозчинних монокристалів.

Предмет дослідження: автоматизовані енергозберігаючі системи управління нестационарними режимами технологічних процесів.

Методи дослідження: при розв’язуванні поставлених задач використовувалися методи теорії оптимального управління, методи розв’язку задач математичної фізики, чисельні методи розв’язку нелінійних і диференціальних рівнянь. У процесі експериментальних досліджень використовувалися методи цифрового моделювання систем управління технологічними процесами і об’єктами.

Наукова новизна одержаних результатів: винесені на захист наукові результати є теоретичною основою для рішення проблеми створення енергозберігаючих пристроїв управління нестационарними режимами технологічних процесів.

1. Вперше встановлено, що при мінімізації квадратичного функціонала від якої-небудь з фазових координат лінійного об'єкта управління особливе оптимальне управління, якщо воно існує, має вигляд многочлена у функції часу. Це дозволило розробити алгоритм і структуру оптимального енергозберігаючого управління.

2. Вперше обґрунтована можливість одержання одноінтервального квазіоптимального енергозберігаючого управління в електроприводі шляхом введення під інтеграл функціонала, що визначає середньоквадратичні токові втрати, додаткового доданка, пропорційного квадрату в управляючої дії. Це дозволило розробити методику вибору величини вагового коефіцієнта на підставі необхідної близькості двох розв'язків і заданого обмеження по управляючій дії, а також структуру квазіоптимального регулятора.

3. Для класу не повністю управляємих теплоенергетичних технологічних процесів з однією обмеженням по управлінню вперше встановлена еквівалентність розв'язків задачі оптимальної швидкодії і задачі мінімізації витрати теплоносія, що дозволило замінити двукритеріальну задачу однокритеріальною.

4. Дістала подальшого розвитку методика чисельного розв'язку рівнянь, які виникають при розрахунку параметрів оптимальних процесів, що дозволило розробити комплекс алгоритмів і програм.

5. Вперше встановлений екстремальний характер залежності величини теплових втрат в електроприводі від тривалості перехідного процесу і величини моменту навантаження, що дозволило обґрунтувати вибір діапазону пошуку енергозберігаючих управлінь.

Вірогідність наукових результатів підтверджується коректністю прийнятих допущень, строгістю теоретичних доказів, підтверджених експериментальними результатами, отриманими як у лабораторних, так і у виробничих умовах.

Практичне значення роботи полягає в тому, що на основі проведених досліджень перевірені і реалізовані на промислових установках знайдені енергозберігаючі закони управління різними об'єктами.

Алгоритми і програми розрахунку параметрів оптимальних управлінь використані для оптимізації роботи електроприводів крокового механізму ШЭМ-М системи управління й захисту реакторної установки. Ефективність використаної програми підтверджена її експериментальною перевіркою на діючій установці в складі виконавчого автомата (акт від 18.01.1999р.).

Знайдені закони оптимального керування процесом пропарювання капілярно-пористих матеріалів використовувалися на різних підприємствах, у тому числі на Улешовському деревообробному комбінаті Привольської залізниці, на Брестському заводі ЗБК і СД і ін. Отриманий

економічний ефект підтвердив практичну корисність проведених наукових досліджень (акт від 15.09.2004р.).

НПО “Монокристалхімреактив”(м.Харків) використав запропоновані здобувачем математичну модель і методи зниження впливу паразитних коливань нитки на якість поверхні зрізу кристала, що дозволило зменшити витрату матеріалів і підвищити ефективність роботи всієї установки (акт від 15.01.1990р.).

Отримані в роботі розрахункові оцінки можливості повної або часткової нейтралізації паразитних коливань нитки при розрізуванні кристала і рекомендації з реалізації енергозберігаючого закону управління, що мінімізує кількість дефектів кристала в процесі його розрізування, використані інститутом монокристалів для збільшення відсотка виходу придатних заготовель (акт від 22.12.2000 р.)

Розроблені в роботі методи мінімізації тривалості перехідних режимів з урахуванням обмежень втрат енергії і методи розрахунку тривалості інтервалів управління використані ВАТ “Хартрон” для підвищення к.к.д. паралельно працюючих мікроГЕС (акт від 5.01.2004 р.).

Окремі положення дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі в лекційних курсах “Теорія автоматичного управління”, “Системи автоматичного управління електроприводами” і “Оптимальні й адаптивні системи управління”, у курсовому і дипломному проектуванні при підготовці бакалаврів і магістрів за фахом “Системи управління і автоматика”, а також знайшли своє відображення у двох навчальних посібниках (довідка від 14.06.2004 р.).

Особистий внесок здобувача в дисертаційну роботу, її наукові результати, у практичну спрямованість і впровадження результатів на підприємствах визначається таким:

- отримані нові результати в області особливих оптимальних управлінь;
- знайдені закони управління, які мінімізують витрати енергії в електроприводах постійного струму і в сушильних камерах періодичної дії;
- розроблені алгоритми і комплекс програм для чисельних розрахунків параметрів оптимальних управлінь і траєкторій;
- запропонований критерій якості для реалізації квазиоптимального керування;
- розроблена математична модель технологічного процесу перемотування і розрізування паперової або картонної
- полотна на продольно-різальному верстаті і запропонований метод розв’язку задачі мінімізації витрат електроенергії для цього процесу;
- наукові результати багаторічних досліджень по темі дисертації відображені в статтях, доповідях на конференціях і симпозіумах, двох навчальних посібниках;
- під науковим керівництвом і особистою участю здобувача наукові результати впроваджені на ряді підприємств різних галузей народного господарства України.

Апробація роботи. Основні результати роботи повідомлені й обговорені на:

3-му Всесоюзному симпозіумі “Теорія інформаційних систем і систем управління з розподіленими параметрами” (м. Уфа, 1976); Республіканській науково-технічній конференції “Прогресивні технологічні процеси в приладобудуванні” (м. Київ, 1977); Республіканській науково-технічній нараді “Розробка і впровадження вискоєфективних сушільних установок” (м. Київ, 1978); Всесоюзній науково-технічній конференції “Актуальні напрямки розвитку сушіння деревини” (м. Архангельськ, 1980); 13-ій науково-технічній конференції “Науково-технічний прогрес у лісовій і деревообробній промисловості” (м. Київ, 1980); Всесоюзному науково-технічному семінарі “Оптимізація процесів сушіння” (м. Харків, 1983); Всесоюзній науково-технічній конференції “Удосконалювання техніки, технології сушіння сільськогосподарських і харчових продуктів”, (м. Полтава, 1984); Всесоюзній науково-технічній конференції “Актуальні проблеми моделювання і управління системами з розподіленими параметрами” (м. Одеса, 1987); 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 Міжнародних конференціях з автоматичного управління “Автоматика” (м. Севастополь, 1996, м. Черкаси, 1997, м. Київ, 1998, м. Харків, 1999, м. Львів, 2000, м. Донецьк, 2002, м. Севастополь, 2003); Міжнародних науково-технічних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (м. Харків: 1995, 1997, 1998, 1999); 5-ій науково-технічній конференції “Пристрої перетворення інформації для контролю і управління в енергетиці” (м. Харків, 1996); Науково-технічній конференції “Проблеми автоматизованого електропривода” (м. Алушта, 1997); 5-ій Міжнародній конференції “Контроль і управління в складних системах” (м. Вінниця, 1999 р.); Науково-технічній конференції “Теорія і практика розробки колісних і гусеничних машин спеціального призначення” (м. Алушта, 2000); 2 Міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційна техніка та електромеханіка” (Луганськ, 2003), а також на науково-технічних конференціях Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” і на семінарах у межах Наукової ради АН УРСР по напрямку “Теоретична електротехніка та електроніка” у 1975-2004 роках.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 47 робіт, у тому числі 1 монографія, 10 статей у наукових журналах і 22 статті в наукових збірниках, включених у Перелік спеціальних видань ВАК, 1 авторське посвідчення, 13 публікацій у журналах, працях, матеріалах і тезах наукових конференцій і симпозіумів.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновку і додатків і викладена на 299 сторінках основного тексту, містить 50 рисунків і 15 таблиць на 64 сторінках, список використаних джерел з 235 найменувань на 23 сторінках і два додатки на 109 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність розв'язуваної проблеми і дана приведена вище характеристика роботи.

У першому розділі проведений аналіз стану розв'язуваної проблеми. Відзначається, що теорія оптимального управління, початок якої було покладено наприкінці 40-х років 20-го століття, до дійсного моменту сформувалася як самостійний розділ теорії автоматичного управління з добре розвитими математичними методами, до числа яких відносяться класичне варіаційне обчислення, принцип максимуму Л.Понтрягіна, метод динамічного програмування Р.Беллмана, метод моментів і ін. Однак окремі питання цього розділу ТАУ дотепер залишаються не вирішеними. До їхнього числа відноситься задача про існування й оптимальність так званих особливих або вироджених управлінь. Незважаючи на велику кількість публікацій, серед яких насамперед слід зазначити праці Р.Габасова і Ф.Кирилової, теорія особливих управлінь не довершена і по дійсний час. Про це свідчать публікації останніх років як по цій темі, так і по темі подальшого розвитку й уточнення принципу максимуму при наявності вироджених і аномальних рішень. Особливе місце серед цих праць займають роботи А.Арутюнова, у яких докладним образом досліджуються вироджені екстремальні задачі і, у тому числі, задачі оптимального управління.

Незважаючи на наявність розвинутого математичного апарата, його практичне застосування в області розробки оптимальних, і зокрема, енергозберігаючих систем управління залишається досить обмеженим, що пов'язано, в основному, з двома причинами. По-перше, ці методи через свою складність мало доступні для цілей безпосереднього інженерного проектування. По-друге, специфіка і різноманіття об'єктів управління не дозволяють одержати розв'язок оптимізаційної задачі тільки на основі перерахованих вище методів, а вимагають додаткових досліджень. Тому поряд з роботами, присвяченими розвитку математичного апарата, з'являються численні праці, у яких тими або іншими методами визначаються енергозберігаючі закони управління реальними промисловими об'єктами. Особливо багато таких досліджень проведено в області пошуку і реалізації оптимальних законів управління об'єктами і технологічними процесами, що велику частину робочого циклу знаходяться в нестационарному режимі. Серед перших робіт, присвячених мінімізації втрат енергії в таких об'єктах, зокрема в електроприводах, слід зазначити праці К.І.Кожевнікова, Л.В.Карнюшина, Є.А.Розенмана, В.Г.Созонова, Ю.П.Петрова, П.Х.Коцегуба, Ш.Ш.Хамітова, О.В.Слежановського і багатьох інших. Надалі цей напрямок розвивався в роботах В.П.Чистова, В.Д.Пишкало, Л.В.Акімова, А.Б.Зеленова, В.И.Жилякова, А.В.Садового, А.И.Мотченко, Б.И.Кузнєцова, Н.Г.Поповича, В.М.Чермалих, С.К.Козирєва, А.А.Никольського, В.И.Панасюка, И.Я.Браславського, В.Г.Букрєєва, И.Д.Труфанова, Н.Ф.Льїнського, а також у працях закордонних учених, таких як М.Атанс, Р.Кокотович, П.Фалб, Сун-Цзянь, П.Дорато й ін.

Розв'язок задач оптимізації нерозривно зв'язан з необхідністю розрахунку параметрів оптимального управління і оптимальної траєкторії, що вимагає, як правило, розв'язку систем нелінійних рівнянь. Тому в цьому розділі проведений також короткий огляд робіт Э.Полака,

Б.Н.Пшеничного, Ф.П.Васильєва, В.В.Іванова, Д. Ортега, Л.Дієсі, А.Лауба, Н.Н.Моїсєєва, Р.П.Федоренко і багатьох інших, присвячених чисельним методам розв'язку таких систем і чисельним методам розв'язку задач оптимального управління.

Проведений аналіз досліджень у зазначених областях показує, що в більшості перерахованих робіт розглядаються або спрощені математичні моделі, або вирішуються якісь приватні задачі мінімізації втрат енергії, що не завжди дозволяє використовувати отримані результати для реальних промислових систем. Практично відсутні роботи з мінімізації енерговитрат у не повністю управляємих об'єктах, до яких, зокрема, відносяться досить енергоємні сушильні камери періодичної дії. У більшості публікацій параметри об'єктів вважаються постійними, а їхня динаміка описується рівняннями в звичайних похідних, що не дозволяє поширити отримані результати на великий клас об'єктів, де подібні допущення не виконуються. Більшість пропонованих авторами чисельних методів обґрунтовані лише теоретично і не доведені до практичного застосування, у зв'язку з чим відсутня інформація про похибки знайдених алгоритмів і області збіжності ітераційних процесів.

На основі проведеного аналізу сформульовані задачі, розв'язувані в дисертаційній роботі. Тому що мінімізація втрат енергії зв'язана з мінімізацією інтегральних функціоналів від квадратів фазових координат об'єкта, то в числі перших необхідно розв'язати задачу про існування і форму особливих управлінь, як можливої складової частини оптимального управління, а також розробити методи їхнього визначення.

Для механізмів технологічного процесу гарячої прокатки металів, що працюють велику частину робочого циклу в нестационарному режимі, потрібно запропонувати математичну модель, вибрати й обґрунтувати критерії оптимальності, розв'язати задачу мінімізації втрат енергії для режимів відпрацьовування швидкості і відпрацьовування кута повороту при постійному моменті навантаження.

Для процесу перемотування і розрізування паперової полотнища потрібно розробити метод складання математичної моделі і запропонувати способи розв'язку задачі мінімізації втрат енергії при нелінійному рівнянні динаміки процесу.

Для технологічного процесу розрізування водорозчинних монокристалів необхідно скласти математичну модель і знайти розв'язок задачі мінімізації часу погашення паразитних коливань нитки з одночасною мінімізацією втрат на управління.

Для процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів потрібно знайти розв'язок задачі мінімізації витрати теплоносія при заданих обмеженнях на управління і швидкість зміни температури матеріалу, що висушується. Дана задача ускладнюється неповною управляемістю об'єкта, що вимагає розв'язку додаткової задачі по визначенню границь кінцевої області і утримання об'єкта в цій області.

Для розрахунку параметрів оптимальних управлінь і оптимальних траєкторій руху розглянутих об'єктів необхідно розробити алгоритми і програми, які б забезпечували абсолютну збіжність обчислювального процесу при будь-яких припустимих параметрах, граничних умовах і обмеженнях об'єктів, а також допускали би можливість розрахунків у реальному часі. Рішення цієї проблеми тісно зв'язано з задачею визначення вимог до точності вихідних даних і до необхідної точності результату, а також із задачею оцінки ефективності знайдених рішень при зміні параметрів об'єктів.

На базі знайдених енергозберігаючих законів управління потрібно розробити структури оптимальних і квазіоптимальних систем і підтвердити можливість їхньої практичної реалізації й ефективності на прикладах створення і впровадження таких систем у народне господарство України.

У розділі 2 розглянуті питання мінімізації втрат енергії в механізмах технологічного процесу гарячої прокатки металів на блюмінгах і слябінгах. Показано, що ці механізми, що приводяться в рух електроприводом постійного струму, основну частину робочого циклу знаходяться в нестационарному режимі, а момент навантаження, створюваний ними, має постійний або дискретно-постійний характер. Обрана й обґрунтована математична модель такого електропривода у виді системи лінійних рівнянь (3 – 4) порядків і система відносних одиниць. В умовах реверса двигуна система рівнянь стає нелінійною при наявності моменту навантаження типу “сухе тертя”. Розв’язок задач оптимізації електропривода знайдено при обліку обмежень, які накладаються на напругу, що прикладається до якірного ланцюга, швидкість обертання двигуна, струм якірного ланцюга і швидкість його зміни. У залежності від співвідношень сталих часу перетворювача і двигуна порядок системи рівнянь може змінюватися убік його зниження, що спрощує розв’язок оптимізаційної задачі. Подібні випадки розглянуті при розв’язуванні конкретних задач і об'єктів.

Проведені в деяких роботах, у тому числі і роботах здобувача, дослідження показали, що в двигунах середньої і великої потужності основну частку втрат (70% – 90%) складають втрати в якорному ланцюзі електропривода, пропорційні квадратові струму цього ланцюга. Додаткове введення в критерій якості механічних і магнітних утрат значно збільшує складність розв’язку задачі оптимізації й у той же час досить незначно впливає на оптимальну токову діаграму. Тому як основний критерій оптимізації обраний критерій

$$J = q = \int_0^{\tau_k} i^2(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де q - втрати в якорному ланцюзі, $i(\tau)$ - струм у цьому ланцюзі, а τ_k - тривалість перехідного процесу. При жорстко заданому часі τ_k система буде неінваріантною стосовно поточного часу. Запропоновано використовувати комбінований критерій

$$J = \int_0^{\tau_k} [k_1 + i^2(\tau)] d\tau, \quad (2)$$

де k_1 - ваговий коефіцієнт, а τ_k не задано. При цьому величина k_1 визначає компромісне рішення між мінімумом втрат і максимальною швидкодією. Якщо коефіцієнт k_1 підібраний заздалегідь, то замкнутий регулятор стає інваріантним відносно часу.

Зазначені критерії приводять до багатоінтервального управління, що утрудняє його реалізацію. Запропоновано використовувати критерій

$$J = \int_0^{\tau_k} [k_2 i^2(\tau) + u^2(\tau)] d\tau, \quad (3)$$

де u – управляюча дія. Це дозволяє одержати квазіоптимальне управління у виді одноінтервальної безперервної функції. Ваговий коефіцієнт k_2 вибирається з умови максимального наближення квазіоптимального й оптимального процесів і з урахуванням заданих обмежень. Той або інший вид критерію використаний у роботі в залежності від конкретної розв'язуваної задачі.

Як основний математичний метод для пошуку енергозберігаючих управлінь використовувався принцип максимуму Л.С.Понтрягіна. Однак для функціоналів виду

$$J = \int_0^{\tau_k} f_0(x_i^2(\tau)) d\tau, \quad (4)$$

де x_i – перемінна стану, а $f_0(x_i^2(\tau))$ – лінійна функція від її квадратів, зазначений метод визначає тільки окремі відрізки екстремалей, але аж ніяк не усі. Управління, що відповідають відрізкам, не охопленим принципом максимуму, називають особливими управліннями. У роботі проведено дослідження таких управлінь з погляду їхнього існування і форми в лінійних одномірних об'єктах, описуваних рівняннями в перемінних стану.

На основі отриманих висновків щодо існування і виду особливих екстремалей знайдені енергозберігаючі закони управління для електроприводів постійного струму в нестационарних режимах роботи. Для режиму управління швидкістю обертання двигуна при наявності постійного моменту навантаження отримано, що при обліку сталої часу управляемого випрямляча й обмеження тільки напруги оптимальне управління, що мінімізує втрати енергії в якорному лан-

цюзі двигуна відповідно до критерію (1), буде складатися з декількох інтервалів, максимальне число яких дорівнює п'яти. При цьому з'являються додаткові в порівнянні з задачею оптимальної швидкодії другий і четвертий інтервали, на яких управління $u(\tau)$ змінюється по параболічному закону. Саме вони і є інтервалами з особливим управлінням. При зменшенні тривалості перехідного процесу τ_k тривалість цих інтервалів поступово зменшується до нуля і задача оптимального енергозбереження вироджується в задачу оптимальної швидкодії.

Світова тенденція витиснення, що намілилася в останні роки, тиристорних перетворювачів силовими інтелектуальними модулями на швидкодіючих транзисторах з ізольованим затвором (IGBT) дозволяє зневажити інерційність сталими управляемого випрямляча в порівнянні з сталими часу двигуна і, тим самим, знизити порядок рівнянь розглянутого об'єкта. З обліком цього отримані розв'язки задач мінімізації втрат енергії в якірному ланцюзі як для режиму управління швидкістю обертання, так і для режиму відпрацьовування кута повороту вала двигуна або лінійного переміщення. Показано, що при відпрацьовуванні переходу від однієї швидкості обертання до іншої струм якірного ланцюга на середньому інтервалі повинний підтримуватися на постійному рівні, а його величина визначається коефіцієнтом відносини електромеханічної сталої часу двигуна до його електромагнітної сталої, заданими значеннями початкової і кінцевої швидкостей, моментом навантаження і тривалістю перехідного процесу. При зменшенні τ_k втрати зростають, а i_n збільшується й у межі досягає величини максимально припустимого значення. При цьому задача мінімізації втрат енергії вироджується в задачу оптимальної швидкодії.

Для двох зазначених режимів роботи електропривода виведені рівняння оптимального енергозберігаючого руху й отримані залежності для розрахунку тривалостей інтервалів і параметрів оптимального управління на кожному з них. На базі цих рівнянь розроблені алгоритми і програми обчислень, приведені в додатку.

Отримано рішення задачі мінімізації втрат за узагальненим критерієм (3). При цьому удалося звести граничну задачу до звичайної задачі Коші, тобто вирішити одну з основних задач оптимального управління по визначенню початкового значення векторів-функції $\bar{\psi}$ по заданих граничних значеннях.

Розв'язано задачу мінімізації втрат енергії в електроприводі при одночасному управлінні і по ланцюгу якоря, і по ланцюгу збудження. Доведено, що в цьому випадку енергозберігаючі закони зміни струму в якірному ланцюзі відповідають раніше розглянутим, а струм збудження повинний підтримуватися на постійному максимальному рівні.

У третьому розділі розв'язуються задачі мінімізації втрат енергії для процесів, динаміка яких не може бути описана лінійними диференціальними рівняннями в звичайних похідних. Одним з таких промислових об'єктів є продольно-різальний верстат, у якому здійснюється розрізування паперової полотна на смуги визначеної ширини з одночасним його перемотуван-

ням на спеціальні гільзи. Відмінною рисою такого верстата є значна зміна моменту інерції навантаження і передатного відношення від вала двигуна до намотуваного рулону в межах робочого циклу. У роботі запропонований метод складання математичної моделі, заснований на розбивці всього циклу перемотування на дискретне число n однакових по довжині полотнища інтервалів. У кожній із точок розбивки обчислюється момент інерції намотуваного рулону і передатне відношення від рулону до несущого вала. На основі аналізу розрахункових даних за допомогою методу найменших квадратів отримана лінійна залежність моменту інерції від кута повороту вала, погрішність якої не перевищувала 0,5%, а за допомогою інтерполяційного багаточлена Лагранжа і методу зворотної інтерполяції знайдена нелінійна залежність передатного відношення j від кута повороту φ з погрішністю 0,25%. Знайдені співвідношення лягли в основу отриманого рівняння для динамічного моменту двигуна верстата ПРС у частині намотуваного рулону.

У роботі запропоновані два способи наближеного аналітичного розв'язку знайденого рівняння ПРС.

У цьому ж розділі розв'язується задача оптимізації технологічного процесу розпилювання лужно-галоїдних монокристалів, що полягає в мінімізації дефектів площини реза при одночасній мінімізації витрат енергії на управління. На основі розв'язку знайденого рівняння проведена оцінка впливу збурювань на амплітуду поперечних до площини реза кристала коливань нитки, що дозволило обґрунтовано підійти до вибору конструкції установки і параметрів нитки. Виконано оптимізацію перехідного процесу коливань нитки, що виникають під дією неконтрольованих збурювань. При цьому знайдене управління, яке дає можливість погасити коливання нитки в поперечній площині за мінімальний час і одночасно мінімізувати витрати енергії, пропорційні інтегралові від квадрата керуючої дії.

У четвертому розділі розв'язується задача мінімізації енерговитрат для технологічного процесу пропарювання капілярно-пористих матеріалів у сушильній камері періодичної дії. Математична модель такої камери представлена лінійною двовимірною системою з двома керуючими діями у виді “сухої” і “волоγοї пари”, подаваної в обсяг камери. Їхня величина регулюється кутом відкривання відповідних заслінок. Умова підтримки постійної психрометричної різниці температур “сухого” θ і “волоого” W термометрів дозволила перетворити структурну схему об'єкта до схеми з однією управляючою дією U_1 . При цьому передатна функція об'єкта стала вырожденною, тому що з'явилися дві пари співпадаючих полюсів і нулів, що відповідає не повністю управляемому об'єктові.

$$K(s) = \frac{\theta(s)}{U_1(s)} = \frac{k_c (T_2s + 1)(T_4s + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)(T_4s + 1)(T_{21}s + 1)} = \frac{B(s)}{A(s)}. \quad (7)$$

У формулі (7) θ – температура матеріалу, що висушується; k_c – загальний коефіцієнт передачі; $T_1, T_2, T_3, T_4, T_{21}$ – сталі часу; U_1 – управляюча дія, що визначає кількість тепла в кілокалоріях, подаваного в сушильну камеру за одиницю часу. За час $t = T$ загальна кількість витраченого тепла складе

$$q = \int_0^T U_1(t) dt. \quad (8)$$

Для розв'язку задачі мінімізації витрати тепла q при нагріванні матеріалу від початкової температури θ_0 до кінцевої сталої температури θ_k за час $t = T$ рівняння об'єкта, описуваного передатною функцією (7), були перетворені до канонічної форми.

Знайдено, що при обмеженні тільки керування $U_1 \leq U_{1\max}$ енергозберігаюче управління $U_{1\text{opt}}$ складається з трьох інтервалів, на першому і третьому з яких $U_{1\text{opt}} = U_{1\max}$, а на другому $U_{1\text{opt}} = 0$. При цьому доведено, що для даного об'єкта рішення задачі мінімізації витрати теплоносія збігається з рішенням задачі оптимальної швидкодії.

Уведене перетворення координат дозволило також спростити рішення складної задачі визначення границь області кінцевого стану, у яку трансформується кінцева точка при вырожденій передатній функції. З обліком цього складені рівняння руху для всіх інтервалів і після їхнього стикування отримана система нелінійних рівнянь відносно тривалостей цих інтервалів.

У роботі показано, що в випадку коли швидкість нагріву стає занадто великою енергозберігаюче управління складається з двох інтервалів виведення координати $\dot{\theta}$ на значення $\dot{\theta} = \dot{\theta}_{\max}$, одного (середнього) інтервалу руху з постійною швидкістю зміни температури θ_{\max} , і двох інтервалів виведення координати $\dot{\theta}$ на кінцеве значення $\dot{\theta} = 0$.

Показано, що через наявність у передатній функції об'єкта двох пар співпадаючих нулів і полюсів для його утримання в заданому кінцевому стані необхідно прикласти управління, що змінюється по складному експонентному закону.

У процесі прогріву при деяких параметрах об'єкта величина $U_2(t)$ може вийти за межі максимально припустимої $U_{2\max}$. У роботі показано, що в цих випадках необхідно вводити додаткові інтервали руху з постійним управлінням $U_{2\max}$. Але при цьому управління U_1 на цих інтервалах уже не буде релейною функцією, а буде рішенням диференціального рівняння, отриманого з умови сталості психрометричної різниці температур у процесі прогріву матеріалу.

У п'ятому розділі досліджуються методи розрахунку числових параметрів оптимальних траєкторій руху і управлінь. Як показано в попередніх розділах, ця проблема зводиться до

винаходження таких алгоритмів розв'язків систем нелінійних рівнянь, які б забезпечили абсолютну збіжність обчислювального процесу і його високу швидкодію.

Для завдання фіксованого часу τ_k переходу об'єкта з початкового стану в кінцевий необхідно априорі знати нижню межу цього часу, а цією межею є час, одержуваний при розв'язку задачі оптимальної швидкодії. Тому в даному розділі розглядаються задачі розрахунку параметрів як для оптимальної швидкодії, так і для оптимального енергозбереження.

На першому етапі досліджена задача оптимальної швидкодії для лінійного об'єкта другого порядку, що переводиться з одного сталого стану в інший при обмеженій дії. Для фізичних об'єктів, розглянутих у даній роботі, оптимальне по швидкодії управління складається з двох інтервалів, на кожному з яких управління приймає граничне максимальне значення різних знаків. Тривалості інтервалів при цьому визначаються із системи двох нелінійних рівнянь. Розроблений алгоритм рішення був заснований на методі Ньютонна. Дослідження системи рівнянь і запропоновані перетворення дали змогу знайти метод, який дозволив автоматично знаходити початкове наближення з гарантією абсолютної збіжності обчислювального процесу. При цьому час обчислень значно скоротився, що дало можливість вирішувати задачу визначення тривалості інтервалів і визначати моменти перемикачів у реальному часі. Знайдено умови вибору початкового наближення, що забезпечує абсолютну збіжність і високу швидкість обчислювального процесу. Показано, що кількість ітерацій можна зменшити за рахунок використання модифікованого методу. Точність результату при цьому практично не зменшується.

Для розрахунку тривалостей інтервалів задачі оптимальної швидкодії для позиційного електропривода необхідно розв'язувати систему з трьох нелінійних рівнянь. Для широкого діапазону зміни коефіцієнта β_m від 0,5 до 8,0 знайдені інтервали зміни початкових наближень, усередині яких ітераційний процес завжди сходиться. При цьому одне з початкових наближень $\tau_1^{(0)}$ або $\tau_3^{(0)}$ приймалося рівним нулеві, а інші автоматично визначалися відповідно до заданих граничних умов, коефіцієнта β_m і величини моменту навантаження m_c . Для значень коефіцієнта $\beta_m < 0,5$ був запропонований алгоритм, заснований на порівнянні максимальної швидкості ω , що досягається, з її заданим α_ω обмеженням. При цьому число ітерацій значно збільшувалося, але процес завжди сходився.

Розв'язок задачі мінімізації витрати теплоносія при сушінні капілярно-пористих матеріалів приводить до багатоінтервального управління. У роботі запропоновано розв'язувати задачу пошуку мінімуму загального часу перехідного процесу методом модифікованого градієнтного спуску, а величину кроку ітерації, що складається в послідовній мінімізації функції однієї перемінної, визначати методом “золотого перетину”.

На основі розроблених алгоритмів складені програми обчислень параметрів оптимальних управлінь і траєкторій руху, використання яких як при моделюванні, так і при практичному

впровадженні підтвердило їхню працездатність і виконання вимог, що задаються, до збіжності і швидкості обчислень.

У шостому розділі розглянуті оцінки погрішності обчислень при точних і наближених розрахунках параметрів енергозберігаючих процесів, а також досліджена чутливість оптимальних рішень.

Оцінка погрішності обчислень тривалостей інтервалів детально розглянута для електропривода, що працює в режимі відпрацьовування переходів по швидкості обертання. Отримані оцінки погрішності обчислень на n – м кроці ітераційного процесу.

Ці співвідношення дозволили обґрунтовано задавати момент закінчення обчислень у програмі і гранично зменшити кількість ітерацій, що особливо важливо при реалізації алгоритму в реальному часі. Знайдені оцінки використовувалися і при розрахунках тривалостей інтервалів у позиційних електроприводах, хоча число ітерацій при цьому могло змінюватися в ту або іншу сторону.

У роботі запропоновані і деякі наближені методи розрахунку параметрів оптимальних управлінь.

Важливим фактором при оцінці ефективності роботи енергозберігаючих пристроїв є їхня чутливість до змін параметрів об'єкта. Здобувачем показано, що в загальному випадку необхідно спільне дослідження чутливості оптимізуемого функціонала і чутливості оптимальної траєкторії руху. При зменшенні чутливості функціонала порушуються граничні умови задачі, а при зменшенні чутливості оптимальної траєкторії втрати енергії починають відрізнятися від оптимальних. Знайдена формула одночасної оцінки чутливості функціонала J і чутливості фазової траєкторії $x(t)$ приводить до дуже складної системи рівнянь, що у більшості випадків не розв'язні в радикалах. Крім того, у переважній більшості випадків основною вимогою до системи є виконання граничних умов, що зв'язано з відповідним технологічним процесом, а мінімізація критерію якості є вторинним чинником. У роботі запропоновано враховувати зміну величини оптимізуемого функціонала при зміні якого-небудь параметра шляхом обчислення втрат, що відповідають новому значенню параметра при збереженні заданих граничних умов. Тому що при багатоінтервальному управлінні подібна задача стає досить громіздкою, то було виконано цифрове моделювання для позиційного електропривода на основі розробленої здобувачем програми. При цьому по заданих параметрах об'єкта і граничним умовам вибиралося число інтервалів, розраховувалася їхня тривалість і визначалися сумарні втрати енергії за весь заданий час перехідного процесу. Як перемінні параметри розглядалися тривалість перехідного процесу τ_k , коефіцієнт β_m і момент навантаження m_c . За результатами моделювання складені таблиці і побудовані залежності.

Їхній аналіз дозволяє зробити висновок, що зі збільшенням β_M чутливість функціонала витрат до зміни параметра β_M зростає, а найбільший відносний вигравш з погляду економії витрат енергії має місце при малих збільшеннях часу перехідного процесу τ_k відносно мінімально можливого для даного об'єкта часу τ_{\min} . Остання обставина є вагомим фактором ефективності введення оптимального енергозберігаючого управління навіть при дуже невеликих ресурсах можливого збільшення тривалості процесу τ_k .

Аналіз залежностей утрат q від тривалості τ_k при варіації моменту навантаження m_c показав наявність граничних значень τ_k , подальше збільшення яких не тільки не зменшує, але збільшує втрати. Проведені в роботі дослідження показали, що цим екстремальним точкам відповідають значення максимального пікового струму якірного ланцюга i_{\max} , приблизно рівні подвоєній величині статичного струму навантаження. Це твердження виконується незалежно від кількості інтервалів енергозберігаючого управління. При збільшенні моменту навантаження інтервал часу, у якому енергозберігаюче управління ефективно, звужується, що вимагає більш точних обчислень параметрів об'єкта і більш точної реалізації такого управління.

У цьому розділі розглянуті принципи технічної реалізації енергозберігаючих управлінь в об'єктах АСУ ТП і дані приклади їхнього практичного впровадження. Запропоновано структуру реалізації квазіоптимального керування двигунами постійного струму. Ця структура може бути використана для різних об'єктів АСУ ТП, динаміка яких описується аналогічними рівняннями.

Приведено результати дослідження системи розрізування водорозчинних монокристалів. По складеній моделі цифрової системи управління і результатам експерименту на діючій установці знайдені умови стійкості процесу коливальних нитки. Для зменшення амплітуди коливань нитки в систему введений додатковий контур регулювання по силі її натягу. Це дозволило поліпшити якість реза на 50% і підвищити продуктивність процесу розрізування на 10–15%. Досліджено можливість мінімізації дефектів площини розрізування шляхом швидкого погашення паразитних коливань і знайдене управління, що здійснює це погашення за мінімальний час при одночасній мінімізації витрат енергії в управляючому пристрої.

Розроблені і впроваджені у виробництво оптимальні регулятори процесу пропарювання при сушінні капілярно-пористих матеріалів, що забезпечують зниження витрати теплоносія на 10-15% при збереженні заданої продуктивності сушильної камери і забезпеченні необхідної якості матеріалу, що висушується. Розроблено спосіб автоматичного управління процесом сушіння, що дозволяє підвищити точність управління за рахунок формування різниці поточної ваги матеріалу і ваги сухого матеріалу. Використання способу дозволило забезпечити високу якість матеріалу, що висушується, при мінімальній витраті теплоносія.

Проведено дослідження і здійснений алгоритмічний синтез оптимальних по швидкодії з обмеженням втрат енергії законів керування механізмом привода крокових електромагнітів на базі тиристорного випрямляча. Реалізація знайдених законів управління на базі мікроконтролера 580C1196KC-20 дозволила максимально наблизити реальні токові циклограми до заданих за умовами роботи. Економічний ефект за рахунок поліпшення цих циклограм і відповідно в продовженні терміну служби крокових електромеханізмів склав 25–50 тис. грн. на один механізм.

У додатках приведені програми розрахунку параметрів оптимальних і квазіоптимальних управлінь для різних об'єктів АСУ ТП, а також документи впровадження результатів роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі дано теоретичне узагальнення і розв'язок актуальної науково-практичної проблеми, що полягає в розробці, науковому обґрунтуванні і реалізації енергозберігаючих законів управління для широкого класу об'єктів АСУ ТП, які працюють велику частину робочого циклу в нестационарних режимах. Упровадження результатів роботи має важливе народногосподарське значення.

Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проведено дослідження особливих оптимальних управлінь у лінійних об'єктах при квадратичних критеріях якості. Доведено, що якщо в якості оптимізуемого функціонала обраний інтеграл від квадрата однієї з фазових координат об'єкта, то в залежності від її номера особливе управління або взагалі не існує, або існує у виді багаточлена у функції часу. При цьому ступінь багаточлена залежить від астатизму об'єкта і далекості цієї координати від виходу системи, і не залежить від її порядку.

2. Знайдено закони енергозберігаючого управління для двох режимів роботи електропривода механізмів процесу гарячої прокатки металів – режиму управління швидкістю обертання вала двигуна і режиму управління кутом повороту цього вала.

3. Розв'язано задачу мінімізації запропонованого узагальненого функціонала якості, що дозволило реалізувати квазіоптимальне управління у виді безперервної функції часу. Знайдено зв'язок отриманого управління з багатоінтервальним управлінням, яке мінімізує середньоквадратичні токові втрати в якірному ланцюзі електропривода.

4. Доведено, що при управлінні електродвигуном одночасно по ланцюгу якоря і по ланцюгу збудження мінімум втрат енергії буде мати місце при сталості потоку збудження.

5. Розроблено метод одержання математичної моделі електропривода продольно-різального верстата як об'єкта з перемінними параметрами, що змінюються усередині кожного робочого циклу. Запропоновано методи розв'язку задачі мінімізації втрат енергії для такого об'єкта.

6. Знайдено розв'язок задачі мінімізації часу гасіння коливань нитки приладу для розрізування монокристалів при мінімальних витратах енергії в пристрої управління. Показано, що в більшості випадків відповідне управління може погасити паразитні коливання до виникнення дефектів площини розрізування кристала.

7. Проведено уточнення математичної моделі сушильної камери періодичної дії. Доведено, що для даного об'єкта розв'язок задачі мінімізації витрати теплоносія збігається з розв'язком задачі оптимальної швидкодії. Розв'язано задачу мінімізації витрати теплоносія для випадку обмеженої швидкості прогріву матеріалу. При цьому запропонований метод, що дозволяє замінити складну задачу влучення в кінцеву область звичайною двухточечною граничною задачею. Знайдено розв'язок задачі оптимізації при одночасному обліку обмежень як першої управляючої дії U_1 (подача "сухої пари"), так і другої дії U_2 (подача "вологої пари").

8. Запропоновано методи і розроблені алгоритми і програми для розв'язку задач пошуку тривалостей інтервалів у задачах оптимальної швидкодії й у задачах мінімізації втрат енергії. Зазначені методи дозволяють автоматично вибирати початкове наближення, що забезпечує абсолютну збіжність обчислювального процесу і мінімізацію часу обчислень параметрів оптимальних управлінь. Розроблено метод пошуку тривалостей інтервалів енергозберігаючого управління для систем високого порядку, що забезпечує абсолютну збіжність обчислювального процесу за умови унімодалності мінімізуємої функції.

9. Знайдено оцінки погрешностей обчислень при розрахунку параметрів енергозберігаючих управлінь, що дозволило скоротити час обчислень.

10. Проведено аналіз чутливості енергозберігаючих процесів до варіації параметрів об'єктів управління і граничних умов. Доведено, що при наявності моменту навантаження електродвигуна існує екстремальне значення тривалості перехідного процесу τ_{konm} , при перевищенні якої втрати енергії починають зростати, а не зменшуватися. Отримано формули для розрахунку τ_{konm} .

11. Виконано аналіз знайдених енергозберігаючих законів управління з погляду їхньої реалізації і запропонована структура квазіоптимального регулятора.

12. Отримані в роботі наукові результати впроваджені в НВО "Монокристалреактив" м. Харків, на Улешовському деревообробному комбінаті Приволзької залізниці, в АТ "Хартрон" м. Харків. При цьому якість поверхні розрізування кристалів поліпшена на 50%, а продуктивність установки збільшена на 15%. На 10-15% зменшена витрата теплоносія в сушильній камері періодичної дії. За рахунок реалізації оптимальних законів управління продовжений термін служби крокових електромеханізмів, що забезпечило економічний ефект 25-50 тис. грн. на один механізм.

13. Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі при підготовці бакалаврів і магістрів з спеціальності “Системи управління і автоматика”, знайшли своє відображення в двох навчальних посібниках здобувача: “Оптимальне керування у прикладах і задачах” і “Методи наближених досліджень систем автоматичного управління на ЕОМ”.

Результати виконаної роботи обґрунтовують доцільність і ефективність розробки і впровадження в народне господарство автоматизованих систем з енергозберігаючими законами управління нестационарними режимами технологічних процесів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рогачов О.І. Оптимальне керування у прикладах та задачах / Навчальний посібник.– К.: Інститут системних досліджень України, 1995.– 272с.

2. Рогачёв А.И. Синтез оптимальной системы управления вентиляльным электроприводом постоянного тока // Вестник Харьковского политехнического института.– Харьков: ХГУ, 1974.– Вып.1.– № 85.– С.88–91.

3. Рогачёв А.И. Об одном методе исследования оптимальных систем автоматического управления. // Вестник Харьковского политехнического института.– Харьков: ХГУ, 1975.– Вып.2.– №103.– С.52–54.

4. Рогачёв А.И. Оптимальные управления в электроприводах постоянного тока при различных критериях оптимальности // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХГУ, 1976.– Вып.3.– №115.– С. 3 – 5.

5. Рогачёв А.И. Оптимизация и моделирование системы 3-го порядка при квадратичном функционале // Локальные автоматизированные системы автоматики и вычислительной техники: Сборник научных трудов – К.: Наукова думка, 1976.– С. 56–63.

6. Рогачёв А.И. Методы приближённого расчёта оптимальных процессов в системах 2-го и 3-го порядков // Локальные автоматизированные системы автоматики: Сборник научных трудов – К.: Наукова думка, 1978.– С.18–26.

7. Качанов П.А., Рогачёв А.И. К вопросу о реализации оптимального управления процессом сушки капиллярнопористых материалов // Вестник Харьковского политехнического института.– Харьков: ХГУ, 1981.– Вып.1.–№179.– С.46–49.

Здобувачем здійснено розв’язок задачі оптимізації роботи сушильної камери при двох керуючих діях.

8. Рогачёв А.И. Сухер А.Н., Качанов П.А. О представлении в пространстве состояний объекта управления, передаточная функция которого содержит полюса и нули // Вестник Харьковского политехнического института.– Харьков: ХГУ, 1982.– Вып.8.– №188.– С. 25–27.

Здобувач запропонував спрощену формулу для обчислення компонентів змінних простору станів у випадку однакової кількості нулів та полюсів передатної функції.

9. Качанов П.А., Пермяков В.И., Рогачёв А.И. К вопросу определения моментов переключения при заданном законе управления // Локальные автоматизированные системы автоматики: Сборник научных трудов – К.: Наукова думка, 1983.– С.41–48.

Здобувачем запропонована методика пошуку мінімуму унімодальної функції, яка базується на використанні методу “золотого перетину” і забезпечує збіжність ітераційного процесу для будь-яких граничних умов.

10. Качанов П.А., Рогачёв А.И., Супрунова С.П. Оптимальное управление процессом сушки при ограничении скорости нагрева // Вестник Харьковского политехнического института.– Харьков: ХГУ, 1984.– Вып.10.– №210.– С.16–18.

Здобувачем визначена кількість інтервалів оптимального по швидкодії процесу пропарювання капілярно-пористих матеріалів при наявності обмеження швидкості нагріву.

11. Воронов В.Г., Качанов П.А., Рогачёв А.И., Прусакова Е.Н. Оптимизация процесса сушки капиллярнопористых материалов по энергетическим критериям // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХГУ, 1985.– Вып.11.– №221.– С. 3 – 5.

Здобувач запропонував новий критерій якості, що дозволило одержати оптимальне управління у вигляді неперервної функції часу.

12. Рогачёв А.И., Андрунишина Е.И., Браилко Е.Я. Вычислительные алгоритмы линейной задачи оптимального быстрогодействия // Вестник Харьковского политехнического института.– Харьков: ХГУ, 1986.– Вып.12.– №235.– С. 8 – 11.

Здобувач розробив алгоритм пошуку тривалості інтервалів оптимального управління в лінійному об'єкті.

13. Рогачёв А.И., Андрунишина Е.И., Браилко Е.Я. Автоматизация проектирования оптимальных линейных систем второго порядка // Вестник Харьковского политехнического института.– Харьков: ХГУ, 1987.– Вып.13.– №249.– С.27– 29.

Здобувач запропонував алгоритм пошуку тривалості інтервалів оптимального по швидкодії управління при наявності обмеження на фазову координату.

14. Беньяминов,Б.Б., Рогачёв А.И., Марченко Е.Г., Чумакова Н.С. Использование ряда Паде для исследования САУ с запаздыванием // Вестник Харьковского политехнического института.– Харьков: ХГУ, 1989.– Вып.15.– №262.– С. 5–8.

Здобувач виконав дослідження точності апроксимації ланки із запізнюванням рядом Паде у частотній області.

15. Рогачёв А.И., Рохман М.Г. Математическая модель электропривода наматываемого рулона ПРС // Вестник Харьковского политехнического института.– Харьков: ХГУ, 1989.– Вып.16.– №264.– С. 60–62.

Здобувач запропонував ідею одержання рівняння процесу перемотування паперового полотна шляхом розрахунку потрібних параметрів в обраних дискретних точках.

16. Рогачёв А.И., Суздаль В.С., Абрамова Л.С. Исследование процесса возникновения дефектов при разрезании монокристаллов // Вестник Харьковского политехнического института.– Харьков: ХГУ, 1990.– Вып.16.– №278 – С.11–13.

Здобувачем запропонована ідея використання рівняння коливань струни для дослідження дефектів, що виникають під час розрізання монокристалів.

17. Попов Н.Р., Рогачёв А.И., Суздаль В.С., Абрамова Л.С. Математическая модель САУ установки для порезки водорастворимых монокристаллов // Вестник Харьковского политехнического института.– Харьков: ХГУ, 1991.– Вып.17.– №282.– С.6–10.

Здобувач виконав дослідження цифрової моделі для розрізання монокристалів, що дозволило оцінити стійкість системи управління.

18. Рогачёв А.И., Дудник А.В. Оценка чувствительности оптимального по потерям электропривода // Вісник Харківського Державного політехнічного університету. – Вип. 72.– Харків: ХДПУ, 1999.– С.161–164.

Здобувачем запропоновано оцінювати чутливість оптимального управління до зміни параметрів як по чутливості функціонала якості, так і по чутливості оптимальної траєкторії руху.

19. Дудник А.В., Рогачёв А.И. Квазиоптимальная система управления, минимизирующая потери энергии в электроприводе // Вісник Харківського Державного політехнічного університету.– Харків: ХДПУ, 1999.– Вип.71.– С.80 – 82.

Здобувачем виконана оцінка наближення оптимального і квазіоптимального процесів з метою обґрунтування вибору вагового коефіцієнта функціонала якості.

20. Рогачев А.И., Сухер А.Н., Дудник А.В. Выбор начального приближения при численном решении задачи оптимального быстрогодействия // Механіка та машинобудування – Харків: ХДПУ, 1999.– №2.– С. 108 – 112.

Здобувачем запропонована методика перетворення рівнянь задачі оптимальної швидкодії, що дало можливість розробити алгоритм і програму обчислень параметрів оптимального процесу у реальному часі.

21. Рогачев А.И., Сухер А.Н., Дудник А.В. Метод расчета оптимальных переходных процессов электроприводов в реальном времени // Збірник наукових праць Донецького Державного технічного університету. Серія “Електротехніка і енергетика”.– Донецьк: ДонДТУ, 2000.– Вип.17.– С.35–38.

Здобувач розробив алгоритм обчислення тривалості оптимального перехідного процесу на базі аналізу і перетворення систем нелінійних рівнянь.

22. Рогачов О.І., Дуднік О.В. Дослідження вироджених керувань в енергозаощаджувальному електроприводі постійного струму // Вісник Вінницького політехнічного інституту.– Вінниця: “Універсум – Вінниця”, 2000.– №1.– С.46-50.

Здобувачу належить доказ ствердження про залежність характеру вироджених керувань в електроприводі не від розміру системи рівнянь, а від того, яка величина є регульованим виходом.

23. Рогачев А.И. Особые управления в задачах минимизации квадратичных критериев оптимальности // Механіка та машинобудування.– Харків: ХДПУ, 2000.– №1.– С.173–176.

24. Рогачев А.И. Минимизация потерь энергии в позиционном тиристорном электроприводе постоянного тока // Энергетика и электрификация.– К., 2000.– №10 – С. 36–39.

25. Рогачев А.И. Оценка погрешностей вычислений при расчете параметров оптимального энергосберегающего электропривода // Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті.– Харків: ХарДАЗТ, 2000.– №6.– С. 58 – 61.

26. Рогачев А.И., Сухер А.Н. Расчет параметров переходных процессов в быстродействующих электроприводах постоянного тока // Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті.– Харків: ХарДАЗТ, 2001.– №6.– С. 16 – 18.

Здобувачу належить розробка алгоритму пошуку початкового наближення для розв’язку рівнянь задачі оптимальної швидкодії з комплексними полюсами передатної функції.

27. Рогачев А.И. Энергосберегающее управление электроприводом при вариации момента нагрузки // Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті Харків: ХарДАЗТ, 2002.– №6.– С. 3–6.

28. Рогачев А.И. Оптимизация работы установки для порезки водорастворимых монокристаллов // Наукові праці Донецького національного університету. Серія

“Обчислювальна техніка та автоматизація”.– Донецьк: Дон. НТУ, 2002.– Вип.47.– С. 80–87.

29. Рогачев А.И., Евсина Н.А., Денисенко Н.А., Гормакова О.В. Энергосберегающие процессы в электроприводах при двух каналах управления // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.–Харків: НТУ “ХПІ”, 2003.–Т.3.–№7.– С.143–149.

Здобувачем доказано, що при введенні другого каналу по ланцюгу збудження двигуна мінімум витрат енергії має місце при постійному, максимально можливому потоці.

30. Рогачев А.И. Оптимизация работы электропривода с переменным моментом инерции вращающихся масс // Механіка та машинобудування.– Харків: НТУ “ХПІ”, 2003.–Т2.–№1.– С. 164 – 169.

31. Рогачев А.И. Минимизация расхода теплоносителя в объекте с вырожденной передаточной функцией // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – №1. – С. 11–14.

32. Дудник. А.В., Проскурин.А.С., Рогачёв А.И., Денисенко Н.А. Квазиоптимальный энергосберегающий регулятор для позиционного электропривода // Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ: СНУ, 2003. – №6. – С. 55 – 61.

Здобувачем виконано дослідження квазіоптимального управління, що дало можливість запропонувати схему його реалізації на сигнальному процесорі.

33. Евсина Н.А., Рогачёв А.И., Зенькова И.И. Чувствительность оптимальных решений задачи минимизации потерь энергии в электроприводе // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.– Харків: НТУ “ХПІ”, 2004.– №17.– С.79 – 84.

Здобувачу належить вивід рівняння, яке дає змогу одночасно ураховувати як чутливість функціоналу, так і чутливість оптимальної траєкторії.

34. Устройство автоматического управления процессом сушки капиллярнопористых материалов: А.с. 1017895.СССР, МКИ F26B25/22 /В.Г.Воронов, П.А.Качанов, В.И.Нестеренко, А.И.Рогачев, А.Я.Шпильберг, М.В.Гунбин (СССР),–№3329784; Заявлено 14.08.81. Опубл.15.05.83,Бюл.№18.–2с.

Здобувачем запропоновано для підвищення точності управління сформувати сигнал, пропорційний похідній різниці ваги сухого матеріала та поточної ваги.

35. Воронов В.Г., Качанов П.А., Рогачёв А.И. Оптимизация технологических процессов сушки капиллярно-пористых материалов // Сборник докладов научно-технической конференции “Прогрессивные технологические процессы в приборостроении”.– К.: Знание, 1977.– С.5–6.

Здобувачем запропоновано спрощення математичної моделі за рахунок урахування різниці температур “сухого” та “мокрого” термометрів.

36. Воронов В.Г., Качанов П.А., Рогачев А.И. Разработка алгоритма оптимального управления процессом нагрева при сушке капиллярнопористых материалов // Труды Всесоюзной конференции “Актуальные направления развития сушки древесины”.– Архангельск: ЦНИИМОД, 1980.– С. 232–239.

Здобувачем виконано розв’язок задачі мінімізації тривалості прогріву матеріала з урахуванням обмежень двох управляючих дій.

37. Воронов В.Г., Гунбин М.В., Качанов П.А., Рогачёв А.И. Модель схемы замещения и автоматизация прогрева при сушке капиллярно-пористых материалов // Труды Всесоюзной научно-технической конференции “Дальнейшее совершенствование теории, техники и технологии сушки”.– М., 1981.– С. 23 – 25.

Здобувачем запропонована ідея перетворення системи рівнянь, яка дала можливість уникнути розв’язку складної задачі пошуку межі кінцевої області фазового простору.

38. Воронов В.Г., Качанов П.А., Рогачёв А.И. Оптимизация режима прогрева при тепловлажностной обработке капиллярно-пористых материалов // Труды Всесоюзного научно-технического семинара “Оптимизация процессов сушки”.– Харьков, 1983.– С.143–148.

Здобувачем запропонована методика розв’язку задачі оптимізації роботи сушильної камери при наявності обмежень на управління і швидкість зміни температури.

39. Воронов В.Г., Качанов П.А., Рогачёв А.И. Метод расчёта оптимального режима прогрева при сушке капиллярно-пористых материалов // Труды Всесоюзной научно-технической конференции “Совершенствование техники, технологии сушки сельскохозяйственных и пищевых продуктов в соответствии с продовольственной программой”.– М., 1984.– С. 68–70.

Здобувач запропонував загальний алгоритм пошуку тривалості інтервалів оптимального управління для систем n -го порядку.

40. Воронов В.Г., Гунбин М.В., Качанов П.А., Рогачёв А.И. Методика оптимизации одной многомерной, не полностью управляемой системы автоматического управления // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции ”Актуальные проблемы моделирования и управления системами с распределёнными параметрами”.– К., 1987.– С.164.

Здобувачем знайдено розв’язок задач оптимізації для різних критеріїв якості, що дало можливість обґрунтовано підійти до вибору цього критерія.

41. Рогачёв А.И. Устройство минимизации энергозатрат в позиционных электроприводах // Тезисы докладов 5-ой Украинской научно-технической конференции “Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике”.– Харьков: ХГПУ, 1996.– С. 17–18.

42. Рогачёв А.И., Сухер А.Н., Тесля О.В. Оценка погрешностей при расчёте параметров оптимальных переходных процессов // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сборник научных трудов Харьковского Государственного политехнического университета.– Вып.6.– Ч.1.– Харьков: ХГПУ, 1998.– С. 418 – 420.

Здобувач здійснив аналіз нелінійної функції, що дало можливість оцінити похибку розрахунку параметрів оптимальної траєкторії.

43.Рогачев А.И. Синтез регулятора для энергосберегающего позиционного электропривода // Электрический журнал.– Запоріжжя, 1999.– №1.– С. 51–53.

44. Рогачёв А.И. Расчёт параметров оптимальных процессов при наличии вырожденных управлений // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: Збірник наукових праць Харківського Державного політехнічного університету.– Вип.7.– Ч.4.– Харків: ХДПУ, 1999.– С. 308 – 311.

45. Рогачёв А.И., Дудник А.В. Задающее устройство для энергосберегающего электропривода на сигнальном процессоре ADSP– 2181 // Праці Міжнародної конференції з управління “Автоматика -2000”.– Львів: НВМ Поліграфічного технікуму УАД, 2000.– С.114–117.

Здобувач запропонував методику вибору вагового коефіцієнта в функціоналі якості, що дало можливість реалізувати квазіоптимальний регулятор на сигнальному процесорі.

46. Дудник А.В., Рогачёв А.И. Локальная управляющая сеть и сигнальные процессоры при решении задач оптимального энергопотребления // Матеріали Міжнародної конференції з управління “Автоматика-2002”.– Донецьк: ДНТУ, 2002.– С.202.

Здобувачеві належить ідея створення локальної мережі для зниження витрат енергії в складних технологічних комплексах.

47. Рогачёв А.И., Дудник А.В., Евсина Н.А. Оптимальное и квазиоптимальное энергосберегающее управление электроприводом постоянного тока // Матеріали 10-ої Міжнародної конференції по автоматичному управлінню “Автоматика-2003”.– Севастополь: СевНТУ, НМЦ, 2003.– Т.2.– С.31.

Здобувач запропонував ідею вибору вагового коефіцієнта в складному функціоналі.

АНОТАЦІЯ

Рогачов О.І. *Енергозберігаючі управління нестационарними режимами технологічних процесів.* – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за фахом 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2005.

Дисертація присвячена розробці, обґрунтуванню і впровадженню енергозберігаючих методів управління різноманітними технологічними процесами, механізми яких більшу частину свого робочого циклу перебувають у нестационарному режимі, з метою зменшення витрат теплової та електричної енергії.

На підставі запропонованих математичних моделей знайдено енергозберігаючі управління механізмами технологічного процесу гарячої прокатки металів, процесом перемотування паперового полотна, процесом розрізу водорозчиняємих монокристалів, процесом сушіння капілярно-пористих матеріалів. Розроблено алгоритми і програми розрахунку параметрів енергозберігаючих управлінь, одержано оцінки похибок обчислень і чутливості показників якості. Синтезовано оптимальні та квазіоптимальні регулятори.

Енергозберігаючі закони впроваджено на підприємствах деревообробної, хімічної та енергетичної промисловості.

Ключові слова: технологічний процес, енергозберігаючий закон управління, нестационарний режим роботи, алгоритм, оптимальне управління.

АННОТАЦИЯ

Рогачёв А.И. *Энергосберегающие управления нестационарными режимами технологических процессов.* – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация технологических процессов. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2005.

Диссертация посвящена разработке, обоснованию и внедрению энергосберегающих методов управления различными технологическими процессами, механизмы которых основную часть рабочего цикла находятся в нестационарном режиме, с целью уменьшения затрат тепловой или электрической энергии на единицу выпускаемой продукции.

Для механизмов технологического процесса горячей прокатки металлов обоснована математическая модель и найдены энергосберегающие законы управления для двух режимов работы – управление скоростью вращения и управление перемещением рабочего органа. Получены уравнения для расчёта параметров оптимального движения при различных сочетаниях ограничений на управление и фазовые координаты, на основе которых разработаны управляющие алгоритмы и программы.

Доказано, что если в качестве оптимизируемого функционала выбран интеграл от квадрата одной из фазовых координат объекта, то особое оптимальное управление, если оно существует, имеет вид степенного многочлена в функции текущего времени. При этом порядок многочлена зависит от астатизма объекта и от удалённости этой координаты от выхода системы, но не зависит от порядка объекта.

На основе предложенного составного критерия качества разработана структура квазиоптимального регулятора, реализующего энергосберегающее управление электроприводами рабочих механизмов технологического процесса прокатки, и получены условия, при которых обеспечивается близость квазиоптимального и оптимального процессов при ограниченном управляющем воздействии.

Разработан способ составления математической модели процесса перемотки и разрезания бумажного полотна на продольно-резательном станке и метод решения задачи минимизации потерь энергии в механизмах этого процесса.

Найдено решение задачи минимизации времени гашения колебаний режущей нити при разрезании водорастворимых монокристаллов при одновременной минимизации потребления энергии на управление.

На основе предложенной модели технологического процесса прогрева при сушке капиллярно-пористых материалов найдены энергосберегающие законы управления, минимизирующие расход теплоносителя при наличии ограничений на скорость изменения температуры и

величины управляющих воздействий в виде подачи в сушильную камеру “сухого” и “влажного” пара.

Предложены методы и разработаны алгоритмы и программы для расчёта параметров оптимальных управлений и траекторий в задачах оптимального быстрогодействия и в задачах минимизации энергозатрат, которые обеспечили абсолютную сходимость итерационного процесса и сократили время вычислений.

Найдены оценки погрешностей вычислений при решении систем нелинейных уравнений и предложены методы приближённого расчёта параметров энергосберегающих процессов.

Проведен анализ чувствительности энергосберегающих процессов к вариации параметров объектов управления и внешних воздействий и найден экстремальный характер зависимости потерь энергии от длительности переходных процессов и величины возмущающего воздействия.

Разработан и исследован квазиоптимальный энергосберегающий регулятор, реализованный на основе сигнального процессора ADSP-2181, и найдены условия его применимости.

Разработаны энергосберегающие регуляторы для управления процессом пропарки в сушильных камерах периодического действия.

Найденные энергосберегающие законы управления технологическими процессами реализованы на ряде предприятий деревообрабатывающей, химической и энергетической промышленности. Результаты внедрения и эксплуатации свидетельствуют о работоспособности и эффективности созданных автоматизированных систем.

Ключевые слова: технологический процесс, энергосберегающий закон управления, нестационарный режим работы, алгоритм, оптимальное управление.

ABSTRACT

Rogachov A.I. *Economy energy controls of nonstationary behaviors technological processes.- Manuscript.*

Dissertation submitted for a Doctor of Science degree in technical sciences on speciality 05.13.07-Automation of technological processes. National Technical University “Kharkiv Politechnic Institute”, Kharkiv, 2005.

The dissertation is devoted to development, basing and putting into effect of the energy saving methods of control of various technological processes which mechanisms for the most part of their running cycle are in non-stationary mode, in order to reduce the losses of thermal and electric energy.

On the basis of the offered mathematical models energy saving controls of mechanisms of the technology of metal hot rolling process, as well as paper cloth rewinding process, water-soluble monocrystals cutting process, steaming of drying capillary - porous materials process are found.

Algorithms and appropriate software programs for parameters of energy saving controls calculation are developed; estimations of errors of calculations and sensitivity of merit numbers and a trajectory of movement are received.

Optimal and suboptimal regulators are synthesized.

Energy saving laws of controls are put into production process at wood processing, chemical and a power industry enterprises.

Keywords: technological process, , energy saving control, non-stationary mode of operation, algorithm, optimal control.