

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Канюк Геннадій Іванович

УДК 681.527.34

**МОДЕЛІ І МЕТОДИ СТРУКТУРНОГО І ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ
ПРЕЦИЗІЙНИХ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИПРОБУВАЛЬНИХ СТЕНДІВ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теплоенергетичних установок теплових і атомних електростанцій Української інженерно-педагогічної академії Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Артюх Станіслав Федорович,
Українська інженерно-педагогічна академія,
м.Харків, завідувач кафедри електроенергетики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тодорцев Юрій Костянтинович,
Одеський національний політехнічний
університет, м. Одеса, завідувач кафедри
автоматизації теплоенергетичних процесів

доктор технічних наук, професор
Струтинський Василь Борисович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м.Київ,
завідувач кафедри конструювання верстатів та
машин

доктор технічних наук, професор
Ястребенецький Михайло Онисимович,
Державне підприємство «Державний науково-
технічний центр з ядерної та радіаційної
безпеки Державного комітету ядерного
регулювання України», м. Харків, начальник
відділу

Захист відбудеться «28» січня 2010 року о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий «17» грудня 2009р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради

Северин В.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Основу створення перспективних енерго- і ресурсозберігаючих технологій складають швидкодіючі прецизійні автоматизовані пристрої і системи, здатні з максимальною швидкістю і точністю виконувати задані, деколи досить складні, послідовності технологічних операцій.

Особливий науковий і практичний інтерес представляють мехатронні системи із слідкуючими електрогідравлічними виконавчими механізмами (ЕГВМ). Такі системи, поєднуючи в собі високі питомі енергетичні характеристики електрогідравлічних механізмів з інтелектуальними і інформаційними можливостями керуючої мікропроцесорної електроніки, дозволяють з високою точністю і швидкістю відтворювати керуючі завдання, що змінюються за довільними і заздалегідь невідомими законами.

Основна наукова проблема створення швидкодіючих прецизійних ЕГСС полягає в ефективному синтезі наукових методів і теорій, що відносяться до об'єктів і процесів різної фізичної природи, – механічних, гідравлічних, електричних, електронних, інформаційних. Ця проблема призводить до необхідності розробки на основі існуючих методів і теорій узагальненої концепції та її спеціальної системної і конкретизованої теоретичної бази, що дозволило б з мінімальними витратами часу і коштів створювати ЕГСС з високими показниками точності і швидкодії. Саме це визначає актуальність і основний напрямок дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у рамках наукового напрямку кафедри теплоенергетичних установок ТЕС і АЕС Української інженерно-педагогічної академії. Здобувач як науковий керівник очолював виконання держбюджетної теми МОН України «Підвищення точності і швидкодії систем автоматичного регулювання частоти і потужності парових турбін теплових і атомних електростанцій» (ДР № 0196U002269), був відповідальним виконавцем держбюджетної теми МОН України «Розробка швидкодіючих прецизійних електрогідравлічних приводів регулюючих органів енергетичних установок» (ДР № 0198U005601), а також виконавцем держбюджетної теми МОН України «Розробка наукових принципів енергозбереження в тепловій і атомній енергетиці» (ДР № 0101U005234). Вказані теми виконувалися за рахунок фінансування МОН України в рамках державних науково-технічних програм «Екологічно чиста енергетика» і «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі», затверджених Постановами Кабінету Міністрів України.

Мета роботи і завдання досліджень. Метою роботи є розробка і обґрунтування перспективної концепції створення швидкодіючих прецизійних електрогідравлічних слідкуючих систем автоматичного керування, зокрема – ЕГСС автоматизованих випробувальних стендів.

Для досягнення поставленої мети у роботі поставлені завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи створення і дослідження ЕГСС і визначити основні напрями їх розвитку і удосконалення.

2. Розробити деталізовану структуру і послідовність концептуальної розробки швидкодіючих прецизійних ЕГСС, принципи вибору їх схемних рішень і елементної бази.

3. Розробити методики попередніх оціночних розрахунків ЕГСС, що дозволяють виконувати оцінки граничних можливостей систем і впливу окремих фізичних процесів і конструктивних елементів на інтегральні показники точності і швидкодії.

4. Розробити ієрархічний ряд математичних моделей робочих процесів і елементів ЕГСС, що відповідають конкретним завданням і етапам процесів їх створення і дослідження.

5. Розробити прикладні інженерні методики синтезу і оптимізації ефективних законів керування ЕГСС.

6. Дослідити вплив різних чинників і параметрів на точність і швидкодію ЕГСС.

7. Удосконалити методики випробувань ЕГСС для автономного відлагодження регуляторів.

8. Розробити практичні рекомендації щодо створення прецизійних швидкодіючих ЕГСС.

9. Провести дослідницьку перевірку розроблених наукових і практичних принципів при створенні і дослідженні ряду швидкодіючих прецизійних ЕГСС автоматизованих випробувальних стендів.

Об'єктом досліджень є процеси функціонування електрогідравлічних систем автоматичного керування.

Предмет досліджень складають методи забезпечення високих показників точності і швидкодії ЕГСС.

Методи досліджень. Аналітичні і чисельні методи інтегрування систем диференціальних рівнянь застосовувалися для обчислювання характеристик ЕГСС і впливу різних чинників на їх граничні можливості. Фундаментальні положення теорії автоматичного керування, методи простору станів, передавальних функцій і зворотних задач динаміки – під час розробки прикладних інженерних методик синтезу і оптимізації ефективних законів керування ЕГСС і практичних рекомендацій щодо підвищення їх точності і швидкодії. Методи планування і обробки результатів експерименту використовувались під час удосконалення методик випробування і автономного відлагодження регуляторів, а також для експериментальної перевірки розроблених наукових і практичних принципів створення швидкодіючих прецизійних ЕГСС.

Наукова новизна отриманих результатів. Основний науковий результат роботи полягає у розробці і обґрунтуванні перспективної концепції створення швидкодіючих прецизійних ЕГСС, що включає деталізовану раціональну структуру і послідовність їх концептуальної розробки, принципи вибору схемних рішень і елементної бази, уточнені і конкретизовані математичні моделі, прикладні інженерні методики структурного і параметричного синтезу і оптимізації регуляторів.

Наукова новизна визначається наступними положеннями.

1. Вперше запропоновано системну методику статичних і динамічних розрахунків ЕГСС, яка дозволяє послідовно виконувати оцінку граничних показників точності і швидкодії, а також впливу окремих фізичних процесів і

конструктивних елементів на загальні вихідні характеристики, і обґрунтовано будувати на цій основі математичні моделі різних рівней, що необхідні для аналізу і синтезу систем.

2. Вперше отримано ряд нових і уточнених оціночних співвідношень для визначення граничних можливостей і параметрів (жорсткості опір гідродвигунів і їх зв'язків з навантаженням, конструктивні параметри і постійні часу гідродвигунів, сервоклапанів, гідропневмоакумуляторів і гідроліній, періоди квантування), що необхідні для забезпечення заданих показників точності і швидкодії ЕГСС.

3. Вперше запропоновано принцип мультиплікативного керування ЕГСС за трьома автономними уніфікованими контурами керування: положенням гідродвигуна, положенням сервоклапана і тиском джерела живлення. Використання запропонованого принципу дозволяє суттєво спростити практичне вирішення задачі ефективного керування ЕГСС за рахунок уніфікації і зниження динамічних порядків регуляторів.

4. Отримали подальший розвиток методи математичного моделювання динаміки електрогідравлічних систем: у рамках запропонованої класифікації за принципом «фізичний процес – відповідна група конструктивних елементів» розроблено ряд уточнених, конкретизованих і підтверджених експериментально математичних моделей ЕГСС різних рівней, необхідних для всіх основних етапів їх концептуальної розробки і досліджень.

5. Отримали подальший розвиток методи синтезу законів керування ЕГСС: на основі загальних методів модального керування і зворотніх задач динаміки розроблено прикладні інженерні методики структурного і параметричного синтезу ефективних регуляторів, що, на відміну від відомих, включають конкретні математичні моделі виділених уніфікованих контурів керування і враховують при параметричній оптимізації регуляторів суттєво нелінійні характеристики обмеження потужності керуючих сигналів з метою визначення реальних значень оптимальних параметрів регуляторів і виключення автоколивальних режимів.

6. На основі принципів модального керування і зворотніх задач динаміки удосконалено структури і співвідношення параметрів нових ефективних і простих у практичній реалізації регуляторів для швидкодіючих прецизійних ЕГСС: модальні регулятори третього порядку для дросельного і об'ємно-дросельного керування гідродвигунами зі універсальними спостерігачами стану гідродвигунів, регулятори, що забезпечують лінеарізуючу корекцію нелінійних характеристик ЕГСС і об'єктів керування та компенсацію системних похибок датчиків.

7. Отримали подальший розвиток теоретичні і експериментальні залежності про вплив різних чинників (конструктивні і режимні параметри, властивості робочої рідини, види і характеристики тертя, витоки і перетікання, закони керування і параметри регуляторів, періоди квантування) на точність і швидкодію ЕГСС імітаційних динамічних стендів.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи призначені для використання в практичних інженерних розробках ЕГСС із високими показниками точності і швидкодії для автоматизованих технологічних систем у різних галузях техніки – машинобудуванні, металургії, енергетиці, авіації.

З використанням основних наукових і практичних результатів роботи створено ряд оригінальних швидкодіючих прецизійних ЕГСС для імітаційних динамічних стендів, що пройшли апробацію у випробувальних комплексах машинобудівних і оборонних підприємств. Розроблені у роботі математичні моделі ЕГСС, методики аналізу і синтезу регуляторів, ефективні закони керування, структури, параметри і методики відлагодження регуляторів упроваджені у Харківському комплексному інженерному центрі АН України (м. Харків).

Запропоновані методи підвищення точності і швидкодії електрогідравлічних систем регулювання використовуються у перспективних проектах ВАТ Державна енергетика компанія «Центренерго» (м. Київ) і НАЕК «Енергоатом» (ВП «Рівненська АЕС», м. Рівне).

Схемні і конструктивні рішення, структури і методики автономного відлагодження автоматичних регуляторів використовуються в проектах і розробках МДП «Інститут проблем управління НАН України» (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові розробки, які виносяться на захист, виконані здобувачем самостійно, серед них – перспективна концепція створення швидкодіючих прецизійних ЕГСС; ієрархічний ряд уточнених, конкретизованих і підтверджених експериментально математичних моделей різних рівней; системна методика оціночних розрахунків ЕГСС і співвідношення для визначення їх граничних можливостей і параметрів; прикладні інженерні методики структурного і параметричного синтезу ефективних регуляторів; теоретичні і експериментальні залежності про вплив різних факторів на точність і швидкодію ЕГСС.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи докладалися і обговорювалися на: 1-й і 2-й Всесоюзних науково-технічних конференціях Асоціації фахівців промислової гідравліки і пневматики (Київ, 1991 р., 1992 р.); науково-технічній конференції «Повышение технического уровня и надежности машин» (Мінськ, 1993 р.); науково-практичній конференції «Наукомісткі технології подвійного призначення» (Київ, 1994 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Вдосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (Харків, 2000 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ' 2002» (Харків, 2002 р.); міжнародній науково-практичній конференції з проблем атомної енергетики «Надійність, безпека, ефективність теплоенергетичного устаткування АЕС» (Севастополь, 2003 р.); 12-й міжнародній конференції з автоматичного керування, присвяченій 120-річчю Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (Харків, 2005 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Вдосконалення турбоустановок методами математичного моделювання» (Харків, 2006 р.); IV-й міжнародній науково-технічній конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних систем» (Донецьк, 2008 р.).

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 41 науковій роботі, серед яких 1 монографія, 25 статей у фахових наукових виданнях ВАК України, 3 патенти, 1 авторське свідоцтво.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг основної частини дисертації – 444 сторінки (том 1), включаючи: 102 ілюстрації, з них 99 – на 102 окремих сторінках; 31 таблицю, з них 21 – на 35 окремих сторінках; том 2 (161 сторінка) – 6 додатків на 139 сторінках і 209 найменувань використаних літературних джерел на 22 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** проаналізовано сучасний стан досліджуваної проблеми на основі вітчизняних і зарубіжних джерел інформації, сформульовані основні завдання досліджень.

У зв'язку з важливістю і актуальністю проблеми, розробкам і дослідженням ЕГСП і ЕГСС присвячена значна кількість робіт ряду наукових шкіл і колективів. Початковою науковою базою для створення і дослідження ЕГСС слід вважати фундаментальні, універсального плану роботи в області гідравлічних приводів, теорії автоматичного керування і технічної кібернетики. До таких робіт відносяться праці Т.М. Башти, М.С. Гаминіна, В.О.Хохлова, В.С.Немірова, В.М. Прокоф'єва, Ю.І. Чупракова, В.А. Федорця, Д.М. Попова, В.Ф. Казміренко в області теорії гідравлічних приводів; роботи В.В. Солодовникова, М.М. Іващенко, Ю.І. Топчєєва, А.А. Воронова, М.Т. Кузовкова, П.Д. Крутько в області технічної кібернетики і теорії автоматичного керування. В даний час різноплановими теоретичними і прикладними завданнями в цій галузі займаються наукові школи МГТУ ім. Н.Е. Баумана (Д.М. Попов, В.Ф. Казміренко), НТУУ «КПІ» (В.А.Федорець, В.В. Чкалов, В.Б. Струтинській, О.М. Яхно), Національного авіаційного університету (В.П. Бочаров, Г.Й. Зайончковський), НТУ «ХПІ» (Є.Є. Александров, Б.І. Кузнєцов, П.М. Гладкий, В.П. Северин,), Запорізького і Вінницького національних технічних університетів (О.М. Склярєвський, Р.Д. Іскович-Лотоцький), школи С.О. Єрмакова, І.І. Бажіна і інших учених.

Але незважаючи на велику кількість різнопланових, цікавих і корисних робіт у цій галузі, на теперішній час існує наявна потреба в універсальних системних концепціях і конкретизованих прикладних інженерних методиках, які охоплювали б початкові, найбільш наукоємні етапи створення ЕГСС: концептуальне проектування (включаючи постановочні, техніко-економічні і організаційні аспекти), математичне моделювання, структурний синтез, динамічний аналіз і раціональний вибір параметрів складних систем, що включають різні за своєю фізичною природою і виконуваним функціям структурні елементи, – механічні, електричні, електронні, інформаційні і, в той же час, були б максимально адаптовані для вирішення практичних інженерних завдань розробки і промислового впровадження ЕГСС, зокрема – ЕГСС автоматизованих випробувальних стендів.

На вирішення цієї проблеми спрямована дана робота.

У другому розділі викладено загальні вихідні принципи створення ЕГСС на найбільш наукоємних етапах їх концептуального проектування (аванпроект, технічне завдання, технічна пропозиція). Ці принципи засновані і перевірені на особистому досвіді участі здобувача у низці НДР та промислових розробок систем даного класу і містять у собі: універсальну систему технічних вимог до ЕГСС; деталізовану раціональну структуру і послідовність процесу їх створення; принципи вибору типу виконавчого механізму, схемних рішень і елементної бази; оцінку економічної доцільності розробок.

Один з найбільш важливих інструментів створення ЕГСС – цілеспрямована і конкретизована технологічна послідовність процедури їх концептуальної розробки. Без такої послідовності процес розробки може перетворитись на затяжну пошукову НДР, що не має ні чітко визначеного початку, ні результативного завершення.

У загальному традиційному циклі створення нових технічних пристроїв і систем найбільш складними і наукоємними етапами є розробка ТЗ і технічної пропозиції. Основною метою і завданнями цих етапів є обґрунтування на концептуальному (аванпроектному) рівні принципів можливостей забезпечення заданих технічних характеристик. З метою спрощення, прискорення і підвищення ефективності етапів концептуального проектування ЕГСС запропоновано деталізовану раціональну структуру і послідовність їх аванпроектної розробки.

Аналіз існуючих схем і конструкцій ЕГВМ показав, що найбільш ефективними для використання у ЕГСС є одноканальні ЕГВМ роздільного виконання з об'ємно-дросельним регулюванням швидкості. Дросельне регулювання забезпечує максимальну точність і швидкодію під час роботи в найбільш відповідальних режимах, об'ємне регулювання – енергетичну економічність на другорядних режимах. Одночасне використання дросельного та об'ємного каналів регулювання дає можливість ефективного сполучення «грубого» і «точного» регулювання (т.з. «ітераційне керування»). Для забезпечення швидкодії на пікових режимах доцільно використовувати у схемі ЕГВМ гідропневмоакумулятор з керованими процесами зарядження-розрядження (третій, додатковий канал керування).

Щодо вибору елементної бази, відзначено, що гідравлічні двигуни поступового і обертового руху (гідроциліндри і гідромотори) мають достатньо розвинену і уніфіковану елементну базу, а двигуни неповноповоротного руху (моментні гідроциліндри) потребують, як правило, індивідуальної розробки. Проблеми створення високодинамічних і надійних неповноповоротних гідродвигунів пов'язані з їх конструктивними і технологічними особливостями (проблеми міцності, точності виготовлення сполучених деталей, надійності опор, ущільнень і т.ін.). З метою знаходження ефективних шляхів розв'язання відзначених проблем у Харківському комплексному інженерному центрі АН України за безпосередньої участі здобувача було проведено цикл НДДКР, за результатами яких було створено декілька типорозмірів неповноповоротних гідродвигунів для прецизійних швидкодіючих ЕГСС.

На базі розроблених двигунів і сервоклапанів з електрогідравлічним керуванням типу УЕГ.С (розробки НВП «Теплоавтомат», м. Харків), що мають високу власну смугу пропускання, створено низку ЕГСС, що призначені для

відпрацювання заданих сигналів довільної форми за кутовим положенням або обертовим моментом.

Третій розділ присвячено побудові узагальнених математичних моделей ЕГСС. З метою спрощення і уніфікації процесу математичного моделювання ЕГСС, у яких мають місце різноманітні за фізичною природою процеси (механічні, гідродинамічні, електричні, електронні, інформаційні), та чисельні конструктивні елементи, а також зменшення кількості необхідних математичних моделей, запропоновано класифікацію робочих процесів і елементів ЕГСС, що побудована за принципом «фізичний процес – відповідна група елементів».

На основі загальних математичних моделей фізичних процесів побудовано універсальні математичні моделі різних рівней для усіх основних конструктивних елементів ЕГСС. При цьому виконано систематизацію і узагальнення відомих моделей, а також конкретизацію, доповнення і уточнення моделей окремих елементів як за змістом, так і за формами представлення.

На основі математичних моделей роботи окремих елементів і підсистем може бути достатньо просто виконано математичний опис функціонування конкретної ЕГСС. Наприклад, для ЕГСС імітаційного динамічного стенду повна математична модель складається з:

– рівняння зміни струму у керуючому електричному ланцюзі електромеханічного перетворювача сервоклапана

$$L_k i'_я + \alpha_{нэ} \dot{\varphi}_я + (R_k + R_y) i_я = U_y, \quad (1)$$

$$i_{я2} = \begin{cases} \operatorname{tg} \beta_2 (i_я - i_{я2}), \text{ при } i_я > \frac{i_{я0}}{\operatorname{tg} \beta_\Gamma} + i_2 \text{ у } i'_я \geq 0, \\ \operatorname{tg} \beta_2 (i_я - i_{я2}), \text{ при } i_я < \frac{i_{я0}}{\operatorname{tg} \beta_\Gamma} - i_2 \text{ у } i'_я < 0, \\ i_{я0}, \text{ при } i_я \leq \frac{i_{я0}}{\operatorname{tg} \beta_\Gamma} + i_2 \text{ у } i'_я \geq 0, \\ i_{я0}, \text{ при } i_я \geq \frac{i_{я0}}{\operatorname{tg} \beta_\Gamma} - i_2 \text{ у } i'_я < 0; \end{cases} \quad |U_y| \leq U_y^{max}; \quad (2)$$

– рівняння руху якоря електромеханічного перетворювача, заслінки і золотника сервоклапана з урахуванням обмеженості кутового переміщення якоря механічними упорами:

$$\begin{aligned} J_я \ddot{\varphi}_я + M_{ст}^я + k_{эст}^я \dot{\varphi}_я + C_{я}^{np} \varphi_я + C_{яp} (\varphi_я - \varphi_p) &= k_{мя} i_{я2}, \\ J_p \ddot{\varphi}_p + C_l \dot{\varphi}_p + C_{plp} (x_3 + l_p \varphi_p) &= C_{яp} (\varphi_я - \varphi_p) + l_c (F_{c1} - F_{c2}), \\ m_3 \ddot{x}_3 + F_{ст}^3 + k_{эст}^3 \dot{x}_3 + C_{plp} (x_3 + l_p \varphi_p) &= f_3 (P_{y1} - P_{y2}) - F_{2\partial}, \\ |\varphi_я| &\leq \varphi_я^{max}; \end{aligned} \quad (3)$$

– рівняння руху рідини в гідравлічних керуючих каналах сервоклапана:

$$\begin{aligned}
\rho \frac{l_y}{S_y} \dot{Q}_y + \xi_y^{np} Q_y^2 = P_n - P_y, \quad \rho \frac{l_{y1}}{S_{y1}} \dot{Q}_{y1} + \xi_{y1}^{np} Q_{y1}^2 = P_n - P_{y1}, \quad \rho \frac{l_{y2}}{S_{y2}} \dot{Q}_{y2} + \xi_{y2}^{np} Q_{y2}^2 = P_n - P_{y2}, \\
\frac{V_{y1}^{np}}{\chi} \dot{P}_{y1} = Q_{y1} - Q_{c1} - S_y^3 \dot{x}_3, \quad \frac{V_{y2}^{np}}{\chi} \dot{P}_{y2} = Q_{y2} - Q_{c2} - S_y^3 \dot{x}_3, \quad \frac{V_y^{np}}{\chi} \dot{P}_y = Q_y - (Q_{y1} + Q_{y2}), \\
\rho \frac{l_{c1}}{S_{c1}} \dot{Q}_{c1} + \xi_{c1}^{np} Q_{c1}^2 = P_{y2} - P_{c1}, \quad \rho \frac{l_{c2}}{S_{c2}} \dot{Q}_{c2} + \xi_{c2}^{np} Q_{c2}^2 = P_{y2} - P_{c2}, \\
\frac{V_{c1}^{np}}{\chi} \dot{P}_{c1} = Q_{y1} - Q_{c1}, \quad \frac{V_{c2}^{np}}{\chi} \dot{P}_{c2} = Q_{y2} - Q_{c2};
\end{aligned} \tag{4}$$

– узагальнені рівняння балансу витрат через робочі вікна золотника:

$$\begin{aligned}
\mu_{01} S_{01}(x_3) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta P_1} \text{sign}\{x_3\} = \frac{V_1^3}{\chi} \dot{P}_1 + K_{y1}^y |P_y - P_{y1}| \text{sign}\{P_y - P_{y1}\} + Q_{y1}^{cl} + Q_{2d1} \text{sign}\{x_3\}, \\
Q_{2d2} \text{sign}\{x_3\} = \frac{V_2^3}{\chi} \dot{P}_2 + K_{y2}^{y2} |P_2 - P_{y2}| \text{sign}\{P_2 - P_{y2}\} + Q_{y2}^{cl} + \mu_{02} S_{02}(x_3) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \sqrt{\Delta P_2}, \\
\Delta P_1 = \begin{cases} P_n - P_1, & \text{при } X_3 > 0, \\ P_1 - P_{c1}, & \text{при } X_3 < 0, \end{cases} \quad \Delta P_2 = \begin{cases} P_2 - P_{c1}, & \text{при } X_3 > 0, \\ P_n - P_2, & \text{при } X_3 < 0, \end{cases} \\
Q_{y1}^{cl} = \begin{cases} K_{y1}^{cl} |P_1 - P_{c1}| \text{sign}\{P_y - P_{y1}\}, & \text{при } X_3 > 0, \\ 0, & \text{при } X_3 < 0, \end{cases} \\
Q_{y2}^{cl} = \begin{cases} 0, & \text{при } X_3 > 0, \\ K_{y2}^{cl} |P_2 - P_{y2}| \text{sign}\{P_2 - P_{y2}\}, & \text{при } X_3 < 0; \end{cases}
\end{aligned} \tag{5}$$

– співвідношення для опису перетікання рідини в кільцевому зазорі зони позитивного перекриття золотника має вигляд:

$$Q_{dp} = \begin{cases} \frac{\pi d_{cp} \delta^3}{12\mu (\Delta - x_3)} (1 + 1,5\varepsilon^2) \Delta P, & \text{при } |X_3| < X_3^*, \\ \mu_0 S_0(x_3) \sqrt{\frac{2}{\rho}} \Delta P, & \text{при } |X_3| > X_3^*, \end{cases} \quad X_3^* = \left| -0,25\delta^2 - \left(0,25\delta^2 - \frac{K_Q^\delta}{K_Q} \sqrt{P_n - P_1} \right)^{0,5} \right|; \tag{6}$$

– рівняння руху робочої рідини через канали гідродвигуна:

$$\begin{aligned}
Q_{21} = Q_{dp1} = Q_{n1} - Q_{c11} = \frac{V_{21}^{np}}{\chi} \dot{P}_{21} + q_2 \dot{\gamma}_2 + k_n (P_{21} - P_{22}) + k_{ym} (P_{21} - P_K), \\
Q_{22} = Q_{dp2} = Q_{n2} - Q_{c12} = -\frac{V_{22}^{np}}{\chi} \dot{P}_{22} + q_2 \dot{\gamma}_2 + k_n (P_{21} - P_{22}) - k_{ym} (P_{22} - P_K), \\
\rho \frac{l_{21}}{S_{21}} \dot{Q}_{21} + \xi_{21} Q_{21} |Q_{21}| = P_1 - P_{21}, \quad \rho \frac{l_{22}}{S_{22}} \dot{Q}_{22} + \xi_{22} Q_{22} |Q_{22}| = P_2 - P_{22}.
\end{aligned} \tag{7}$$

– рівняння обертального руху ротора гідродвигуна і об'єкта керування:

$$\begin{aligned} J_2 \ddot{\gamma}_2 + M_{жт}^2 + k_{жт}^2 \dot{\gamma}_2 + C_{св}(\gamma_2 - \gamma_H) &= q_2(P_{21} - P_{22}), \\ (J_H + G_H l_G^2) \ddot{\gamma}_H + M_{см}^H + k_{см}^H \dot{\gamma}_H &= (\gamma_2 - \gamma_H) C_{св} - G_H l_g \sin \gamma_H, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\gamma_2 = \begin{cases} \gamma_2, & \text{при } |\gamma_2| \leq \gamma_2^{max}, \\ \gamma_2^{max}, & \text{при } |\gamma_2| > \gamma_2^{max}. \end{cases}$$

Апроксимація характеристик сухого тертя в рухомих елементах гармонійною функцією з насиченням

$$M_{см} = \begin{cases} |M_{см}| \sin \frac{\pi}{2} \frac{\dot{X}_p}{\dot{X}}, & \text{при } |\dot{X}| \leq \dot{X}_p, \\ +|M_{см}|, & \text{при } \dot{X} > \dot{X}_p, \\ -|M_{см}|, & \text{при } \dot{X} < -\dot{X}_p; \end{cases} \quad (9)$$

– рівняння балансу витрат в насосі:

$$Q_{H1} = W_H \omega_H e_H - \frac{V_{H1}}{\chi} \dot{P}_{H1} - C_{Hy} P_{H1} - C_{HH}(P_1 - P_2) - Q_{HH}^0, \quad (10)$$

$$Q_{H2} = W_H \omega_H e_H - \frac{V_{H2}}{\chi} \dot{P}_{H2} - C_{Hy} P_{H2} - C_{HH}(P_1 - P_2) - Q_{HH}^0;$$

– рівняння динаміки пневмогідравлічного акумулятора:

$$\begin{aligned} m_M \ddot{X}_M + k_{mp}^M \dot{X}_M + |F_{см}^M| \text{sign}\{\dot{X}_M\} + C_{np}^M (X_M^0 - X_M) &= (P_{жс} - P_2) S_M^{\text{эф}} - G_M, \\ Q_a = S_M^{\text{эф}} \dot{X}_M + \frac{V_a}{\chi_{np}} \dot{P}_{жс}, \quad P - P_{жс} &= \left(\lambda_{\kappa}^a \frac{l_{\kappa}^a}{d_{\kappa}^a} + \xi_{\kappa}^a \right) \frac{\rho Q_a^2}{2(S_{\kappa}^a)^2}, \quad P_2 = P_2^0 \left(1 - \frac{S_M^{\text{эф}}}{V_2^0} X_M \right)^{-n}; \end{aligned} \quad (11)$$

– характеристика електронного підсилювача потужності

$$U_y = \begin{cases} 0, & \text{при } |U_{yp}| \leq U_H, \\ U_{yp}, & \text{при } U_H < |U_{yp}| < U_{max}, \\ U_{max}, & \text{при } |U_{yp}| \geq U_{max}; \end{cases} \quad (12)$$

Система диференціальних рівнянь (1) – (12) чисельно розв'язувалась на ЕОМ за допомогою пакета прикладних програм ПРАНС, розроблених співробітниками НТУУ «КПІ», при нульових початкових умовах (нульові значення зміщень якоря електромеханічного перетворювача, золотника і гідродвигуна при нульовому значенні керуючої напруги). При цьому максимальна розбіжність розрахункових і експериментальних динамічних характеристик не перевершувала одного відсотка.

У четвертому розділі викладено системну методику оціночних статичних і динамічних розрахунків ЕГСС з метою побудови спрощених математичних моделей, необхідних для попереднього аналізу граничних можливостей систем, впливу тих чи інших процесів, елементів і параметрів на її характеристики, а також для синтезу регуляторів.

гідроаккумулятора і золотника сервоклапану; $P_n, P_a, P_{zd1}, P_{zd2}, \Delta P$ – тиски на виході з насосу, у лінії гідроаккумулятора, у робочих порожнинах гідродвигуна та їх різниця; $Q_{zл1}, Q_{zл2}$ – витрати робочої рідини у напорній та зливній гідролініях; a_3 – прискорення золотника.

Отримано розрахункові формули для визначення усіх параметрів диференціально-матричних рівнянь і відповідних їм структурних схем.

Отримано також низку нових і уточнених співвідношень для оцінки впливу окремих параметрів і елементів на загальні статичні і динамічні характеристики системи, а також для обґрунтованого вибору (або побудови) спрощених математичних моделей.

П'ятий розділ присвячено методам синтезу ефективних регуляторів для швидкодіючих прецизійних ЕГСС.

На основі загальних методів сучасної теорії оптимального керування (методи модального управління та зворотних задач динаміки) розроблено прикладні інженерні методики синтезу та ефективні закони керування, що забезпечують граничні за енергетичними можливостями виконавчих механізмів показники швидкодії, а також компенсацію всіх основних видів статичних і динамічних помилок.

З метою забезпечення функціональної та практичної ефективності регуляторів запропоновано принцип мультиплікативного керування ЕГСС, за котрим у ЕГВМ виділяються три автономні повністю керовані і повністю спостерігаємі контури: навантажений гідродвигун, сервоклапан та джерело живлення. При цьому доведено, що динамічні процеси у виділених контурах для більшості практичних задач можуть бути описані однотипними за структурою диференціально-матричними моделями третього порядку (14).

З метою забезпечення синтезу систем з реальними параметрами законів керування і, відповідно, з реальними характеристиками точності та швидкодії, запропоновано враховувати у лінеаризованих математичних моделях суттєво нелінійну характеристику обмеження потужності керуючого сигналу за допомогою методів гармонійної лінеаризації. При цьому використовується ітераційна процедура розрахунків АЧХ замкнутої системи за вихідним (керованим) параметром.

З урахуванням цього моменту розроблено прикладні інженерні методики синтезу алгоритмів керування за параметрами стану і на основі розв'язання зворотної задачі динаміки ЕГСС. Розроблені методики враховують структуру і параметри конкретних математичних моделей ЕГВМ; представлені в узагальнених і компактних формах, що об'єднують різноманітні особисті випадки, і викладені у вигляді послідовних формальних процедур, що допускають просту реалізацію на ЕОМ і можуть бути безпосередньо використані у САПР ЕГСС. При цьому паралельно застосовується зручний для практичного інженерного аналізу апарат передавальних функцій та структурних схем.

Зокрема, для виділених у структурі ЕГВМ автономних контурів керування отримано конкретні структурні схеми і формули для розрахунку оптимальних параметрів модальних регуляторів з одним і двома керованими входами, а також – для регуляторів, побудованих на розв'язанні зворотної задачі динаміки.

З метою зменшення кількості параметрів, що потрібно вимірювати для побудови ефективних регуляторів, на основі відомих загальних принципів синтезу спостерігаючих пристроїв ідентифікації (фільтрів Калмана) для виділених контурів керування отримано універсальну структурну схему спостерігача стану (еталонної моделі), і отримано конкретизовані формули для визначення оптимальних значень його вагових коефіцієнтів.

ЕГСС з модальним регулятором стану третього порядку і відповідною еталонною моделлю – спостерігачем захищено патентом (патент Російської Федерації, № 1779808).

Якщо не вдається забезпечити потрібні характеристики системи за допомогою лінійних законів керування (коли суттєве значення у структурі системи мають нелінійні фактори), то доводиться використовувати нелінійні алгоритми та коректуючі пристрої.

Для практичної реалізації відомих загальних принципів побудови лінеаризуючих законів керування здобувачем запропоновано достатньо просте рішення. Складні нелінійні функції f_0 , f_1 , f_u , що являють собою окремі похідні від правої частини нелінійної моделі об'єкту (від функції прискорення) за зміщенням, швидкістю та керуючою функцією, можуть бути замінені чисельними значеннями похідних, які можуть розраховуватись у мікропроцесорному пристрої системи керування у реальному часі за допомогою простих формул «диференціювання назад». Тоді структура лінеаризуючого алгоритму керування здобуває простого і, головне, універсального вигляду, що не залежить від структури об'єкту. А додаткове введення до цієї структури спостерігача стану (еталонної моделі) з метою обчислення швидкості та прискорення, дає можливість отримати універсальний лінеаризуючий регулятор, який максимально наближує вихідні параметри реальної нелінійної системи до параметрів лінійного закону еталонного руху.

Дослідження довели, що суттєвий негативний вплив на статичну точність ЕГСС дає наявність позитивного перекриття вікон управляючого золотника. З метою усунення цього впливу запропоновано засіб нелінійної (лінеаризуючої) корекції витратної характеристики золотника (див. рівняння (5), (6)), який засновано на використанні у контурі керування коректуючої ланки зі змінним коефіцієнтом підсилення (у вигляді функції, що є зворотньою до реальної нелінійної витратної характеристики).

З метою спрощення технічної реалізації запропоновано використання спрощеного варіанту характеристики коректуючої ланки. При цьому неоднозначні нелінійні (параболічні) функції витрати у зоні позитивних перекриттів замінюються шматково-лінійною апроксимацією в усереднених діапазонах. Це, з одного боку, підвищує статичну точність за рахунок компенсації позитивних перекриттів великими значеннями коефіцієнту підсилення у зоні малих зміщень золотника, а з другого боку, наявність у характеристиці горизонтальної ділянки стабілізації («полички») обмежує зростання коефіцієнту підсилення і забезпечує плавний перехід до номінальних значень коефіцієнтів зі збереженням запасів стійкості системи.

З метою підвищення статичної точності ЕГСС запропоновано структуру коректуючого пристрою, що компенсує систематичні похибки датчиків зворотнього

зв'язку шляхом порівняння їх поточних показників з параметрами знятих з високою точністю градуувальник характеристик, що утримуються в пам'яті ЕОМ. ЕГСС з таким керуючим пристроєм захищено патентами (патент України, № 5700, патент Російської Федерації, № 2020298).

Для максимальної компенсації усіх основних різновидів статичних і динамічних похибок ЕГСС запропоновано узагальнену універсальну структуру регулятора.

Виявлено, що регулятори, побудовані на принципах модального керування, і, особливо, на методах зворотніх задач динаміки забезпечують значно більшу смугу пропускання, ніж традиційні регулятори і наближаються до граничних за енергетичними можливостями показників швидкодії.

У шостому розділі наведено приклади використання розроблених теоретичних положень і методик під час створення швидкодіючих прецизійних ЕГСС імітаційних динамічних стендів.

У стенді для випробувань систем наведення мобільних об'єктів (побудований за принципом трьохступеневого гіроскопу) використовувались ЕГСС з неповноповоротними двигунами.

Для забезпечення високих статичних і динамічних характеристик ЕГСС використовувались модальний регулятор за трьома параметрами стану двигуна (кут повороту, кутова швидкість і перепад тиску), а також корекція систематичних похибок датчика кутового положення та підвищення коефіцієнту підсилення у зоні малих керуючих сигналів.

Випробування ЕГСС відбувались на спеціальному навантажувальному стенді, що включає силову частину та інформаційно-керуючий комплекс на базі персональної ЕОМ.

Основні експериментальні характеристики ЕГСС підтвердили їх відповідність теоретичним розрахункам і вимогам ТЗ.

За замовленням науково-технічного центру АТ «КамАЗ» було розроблено, виготовлено і введено до експлуатації модульний стенд для випробувань автомобільних трансмісій. Основу стенду складають два змінних навантажувальних модулі на базі неповноповоротних ЕГСС з обертовими моментами 14 і 40 кНм, керованих мікропроцесорною системою на базі персональної ЕОМ та аналогового пульта керування (паралельний режим).

Розрахункові АЧХ ЕГСС на основних експлуатаційних режимах і результати випробувань комплектного стенду на підприємстві-замовнику підтвердили досягнення заданих показників точності та швидкодії (смуга пропускання до 10 Гц, залежно від жорсткості об'єкту випробувань, точність відпрацювання завданих кутів повороту і обертових моментів – $\pm 1\%$ від їх максимальних діапазонів).

Перспектива широкого використання імітаційних динамічних стендів на базі швидкодіючих прецизійних ЕГСС призвела до ідеї створення універсального базового програмно-технічного комплексу (БПТК) для керування електрогідравлічними слідкуючими системами випробувального обладнання, який був виготовлений та випробуваний на НВП «Теплоавтомат» (м. Харків). Блок швидкодіючих аналогових регуляторів побудовано з використанням принципу мультиплікативного керування (автономні контури керування положенням

золотника сервоклапана і гідродвигуна) і законів керування за параметрами стану і на основі зворотніх задач динаміки.

Розробка і відлагодження експериментального зразку БПТК виконувались з використанням математичної і відповідної їй електронної моделі (електронного імітатора) ЕГСС стенду для випробувань корінних підшипників двигунів внутрішнього згоряння автомобілів «КамАЗ» з діапазоном відтворених навантажень до 50 т і смугою пропускання навантажувального пристрою до 100 Гц.

Підвищення власної смуги пропускання сервоклапану у автономному контурі керування надало можливості забезпечення необхідної загальної смуги пропускання системи. Результати лабораторних випробувань БПТК на НВП «Теплоавтомат» з використанням електронної моделі-імітатора ЕГП підтвердили розрахункові характеристики з точністю до 1%.

ВИСНОВКИ

Дисертацію присвячено обґрунтуванню систематизованої теоретичної бази і практичних принципів створення швидкодіючих прецизійних електрогідравлічних слідкуючих систем як підкласу мехатронних систем, зокрема – ЕГСС автоматизованих випробувальних стендів. Розроблені наукові положення і практичні рекомендації дозволяють цілеспрямовано, системно і ефективно, з мінімальними витратами часу і засобів створювати автоматизовані електрогідравлічні слідкуючі системи з високими показниками точності і швидкодії. Отримані в процесі роботи наукові і практичні результати дозволяють зробити наступні основні висновки.

1. Виконано аналіз можливих областей застосування, проблем і перспектив розвитку швидкодіючих прецизійних ЕГСС, їх конкурентоспроможності в порівнянні з іншими видами приводних систем і галузей переважного використання, існуючої науково-теоретичної бази, яка може використовуватися при створенні систем даного класу, а також виявлено тенденції їх розвитку і удосконалення.

2. Розроблено універсальні вихідні принципи створення швидкодіючих прецизійних ЕГСС, у тому числі - структура і послідовність отримання і реалізації основних технічних рішень, що забезпечують задані показники точності і швидкодії, рекомендації щодо вибору схемних рішень і елементної бази, оцінки економічної ефективності створення і впровадження ЕГСС.

3. Розроблено ієрархію робочих процесів і елементів ЕГСС (за принципом «фізичний процес - відповідна група елементів») з метою зменшення кількості необхідних математичних моделей і спрощення процедури математичного моделювання окремих елементів.

4. Виконано систематизацію і узагальнення відомих математичних моделей елементів і підсистем ЕГСС, а також доповнення і уточнення моделей окремих елементів як за змістом, так і за формами представлення, в т.ч. – з урахуванням суттєвих нелінійних характеристик окремих елементів, що дало можливість побудови загальної універсальної моделі для систем даного класу.

5. Розроблено системну методику оціночних розрахунків і побудови ієрархічного ряду математичних моделей ЕГСС, необхідних для попередньої оцінки

межових статичних і динамічних характеристик і синтезу регуляторів. Отримано ряд векторно-матричних оціночих моделей ЕГСС різних рівнів, в т.ч. - співвідношення для визначення всіх параметрів векторно-матричних рівнянь.

6. Отримано ряд нових і уточнених співвідношень для визначення граничних значень параметрів ЕГСС (жорсткості опор гідродвигунів і їхніх зв'язків з навантаженням, конструктивні параметри і постійні часу гідродвигунів, сервоклапанів, гідропневмоакумуляторів і гідроліній, періоди квантування цифрових систем керування), що необхідні для забезпечення заданих показників точності і швидкодії.

7. На основі відомих загальних принципів сучасної теорії оптимального керування запропоновано практичні інженерні методики синтезу ефективних законів керування ЕГСС, а також ряд ефективних регуляторів, що забезпечують високі (наближені до граничних енергетичних можливостей) характеристики точності і швидкодії.

8. Удосконалено методику автономних випробувань і відлагодження системи керування ЕГСС з використанням електронного імітатора ЕГВМ, що дозволяє істотно скоротити витрати часу і засобів на створення і доведення комплексної системи.

9. Експериментальними дослідженнями і низкою практичних інженерних розробок доведено, що розроблені наукові положення і результати роботи в цілому дають ефективні практичні результати, що полягають в істотному зниженні витрат часу і засобів на створення і доведення нових об'єктів за рахунок систематизації і уніфікації найбільш відповідальних і наукоємних етапів проектування ЕГСС (аванпроекта, технічного завдання і технічної пропозиції).

10. Результати роботи використовувалися при виконанні ряду фундаментальних і прикладних НДР і НДДКР зі створення швидкодіючих прецизійних ЕГСС імітаційних динамічних стендів для підприємств оборонної і машинобудівної промисловості:

- розроблено ряд типорозмірів швидкодіючих прецизійних ЕГСС на базі неповноповоротних гідродвигунів, з діапазоном обертових моментів до 40 кНм, що забезпечують відтворення в слідкуючому режимі заданих вхідних сигналів зі смугою пропускання до 20 Гц, точністю позиціонування до однієї кутової хвилини і діапазоном регулювання до 10^4 ;

- на базі розроблених ЕГСС створено і доведено до практичного використання автоматизовані імітаційні динамічні стенди для випробування систем наведення мобільних об'єктів (ЦНДІХМ, м. Москва) і для випробування напівосей трансмісій (АТ «КАМАЗ», м. Набережні Човни);

- створено базовий програмно-технічний комплекс для випробувального устаткування підприємств сільськогосподарського, автомобільного і інших галузей промисловості (НВП «Теплоавтомат», м. Харків);

- за результатами циклу теоретичних і експериментальних досліджень, проведених в рамках держбюджетних НДР, на основі рішення зворотної задачі динаміки синтезовано швидкодіючий прецизійний регулятор контура керування положенням регулюючих клапанів парової турбіни, що забезпечує компенсацію всіх основних видів статичних і динамічних похибок і більш ніж двократне підвищення

швидкодії в порівнянні з базовим варіантом при збереженні припустимих запасів стійкості. Результати робіт використовуються в перспективних проектах Державної енергетичної компанії «Центренерго», НАЕК «Енергоатом», МДП «Інститут проблем керування НАН України».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Г.И. Канюк. Быстродействующие прецизионные электрогидравлические следящие системы (ЭГСС). Основы теории. Разработки. Исследования / Монографія / Канюк Г.И. – Харьков: Издательство НТМТ, 2008. – 109 с.;

2. Канюк Г.И. Математическая модель электрогидравлического привода имитационного динамического стенда / Г.И. Канюк // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков, 1999. – № 43 – С.25 – 37.

3. Канюк Г.И. Перспективы использования электронно-гидравлических устройств в современных энерго- и ресурсосберегающих технологических системах / Г.И. Канюк // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков, 1999 – №44. – С.39 – 40.

4. Канюк Г.И. Модульный стенд для испытаний элементов трансмиссий автомобилей / Г.И. Канюк, А.Н. Шуванов, А.Г. Топчий, Е.Н. Близниченко, Б.Г. Луполовер, М.В. Логвинов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков, 1999 – № 45 – С.52 – 54.

Здобувачем розроблено принципову схему стенду, сформульовано технічні вимоги до електрогидравлических слідкуючих систем та розроблено технічні пропозиції щодо забезпечення заданих вимог.

5. Канюк Г.И. Создание электронно-гидравлических следящих систем имитационного динамического стенда / Г.И. Канюк // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков, 1999 – № 46 – С.42 – 46.

6. Канюк Г.И. К выбору типа исполнительного механизма для мехатронных систем / Г.И. Канюк, А.Н. Шуванов, Е.Н. Близниченко, М.В. Логвинов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002 – т.2, №7. – С.120 –125.

Здобувач розробив загальний алгоритм вибору виконавчого механізму.

7. Канюк Г.И. Технические требования к прецизионным быстродействующим электронно-гидравлическим следящим системам / Г.И. Канюк, А.Н. Шуванов, А.Г. Топчий, Е.Н. Близниченко, М.В. Логвинов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002 – №20. – С.105 – 112.

Здобувач сформулював основні технічні вимоги до ЕГСС з точності та швидкодії.

8. Канюк Г.И. Повышение качества технических характеристик системы автоматического регулирования частоты и мощности (САР Ч и М) паровых турбин / Г.И. Канюк // Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання. – Харків, 2003 – т.1. – С. 55 – 58

9. Канюк Г.И. Математическое моделирование электрогидравлических усилителей / Г.И. Канюк, А.Н. Шуванов, Е.Н. Близниченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004 – №42. – С.62 – 72.

Здобувач розробив нелінійну математичну модель течії рідини через робочі вікна розподільного золотника.

10. Канюк Г.И. Математическое моделирование электронных управляющих устройств, используемых в электронно-гидравлических следящих системах / Г.И. Канюк, А.Н. Шуванов, Е.Н. Близниченко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004 – Вип.4. – С.42 – 45.

Здобувач запропонував загальні принципи моделювання електронних керуючих пристроїв, які засновані на використанні ланок чистого запізнювання.

11. Канюк Г.И. Синтез модальных алгоритмов управления быстродействующими прецизионными электронно-гидравлическими следящими системами (ЭГСС) // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2004 – Вип.5(11). – С.97 – 101.

12. Канюк Г.И. Технико-экономические аспекты разработки и внедрения быстродействующих прецизионных электронно-гидравлических следящих систем // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2004 – Вип.6(12). – С.216 – 217.

13. Канюк Г.И. Гидравлические исполнительные механизмы для быстродействующих прецизионных электронно-гидравлических следящих систем (ЭГСС) / Г.И. Канюк, А.Н. Шуванов, Е.Н. Близниченко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005 – Вип.1. – С.44 – 46.

Здобувач сформулював технічні вимоги до гідравлічних виконавчих механізмів, які необхідні для забезпечення необхідних показників точності та швидкодії ЕГСС, запропонував схему та параметри системи гідростатичного розвантажування опір гідродвигунів.

14. Канюк Г.И. Результаты исследований динамических характеристик электронно-гидравлической системы управления модульным стендом для испытаний элементов трансмиссий / Г.И. Канюк, Б.П. Калинин, Е.Н. Близниченко// Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2005 – Вип.1/2(13). – С.83 – 85.

Здобувач запропонував структуру електронно-гідравлічної системи керування, зробив оцінку її основних технічних характеристик та запропонував структуру алгоритму керування.

15. Канюк Г.И. Повышение точности электрогидравлического следящего привода путем нелинейной коррекции статической характеристики гидрораспределителя / Г.И. Канюк, Е.Н. Близниченко// Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2005 – Вип.2/2(14). – С.52 – 55.

Здобувач запропонував загальну структурну схему корекції характеристик сервоклапану та її спрощені модифікації.

16. Канюк Г.И. Моделирование и анализ технических характеристик электрогидравлической системы автоматического регулирования частоты и мощности (САР Ч и М) паровых турбин / Г.И. Канюк, В.А. Кострыкин, Е.Н.

Близниченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005 – №6. – С.113 – 123.

Здобувач розробив математичну модель електрогідравлічної системи керування положенням стопорно-регулюючих клапанів турбіни.

17. Канюк Г.И. Общие принципы математического моделирования рабочих процессов и элементов электронно-гидравлических следящих систем / Г.И. Канюк, А.Н. Шуванов, Е.Н. Близниченко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005 – Вип.2. – С.19 – 22.

Здобувач запропонував новий підхід до розробки математичних моделей ЕГСС за принципом: «фізичний процес- відповідна група конструктивних елементів».

18. Канюк Г.И. Эффективные алгоритмы управления быстродействующими прецизионными электронно-гидравлическими следящими системами (ЭГСС) / Г.И. Канюк, Е.Н. Близниченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005 – № 55. – С.172 – 177.

Здобувач запропонував принцип мультиплікативного керування ЕГСС за трьома автономними контурами, виконав структурний і параметричний синтез алгоритмів керування за параметрами стану і на основі зворотніх задач динаміки.

19. Канюк Г.И. Синтез прецизионного быстродействующего регулятора электронно-гидравлического контура управления положением регулирующих клапанов паровых турбин / Г.И. Канюк, Е.Н. Близниченко // Энергетика и электрификация. – Київ, 2005 – № 8. – С.52 – 55.

Здобувач розробив математичну модель контуру управління та структуру регулятора на основі рішення зворотньої задачі динаміки об'єкта керування.

20. Канюк Г.И. Результаты экспериментальных исследований электрогидравлической системы автоматического регулирования частоты и мощности (САР Ч и М) паровых турбин атомных электростанций / Г.И. Канюк, Е.Н. Близниченко, В.А. Кострыкин // Энергетика и электрификация. – Київ, 2005 – № 12. – С.16 – 18.

Здобувач склав перелік експериментальних характеристик, необхідних для ідентифікації математичної моделі електрогідравлічної системи регулювання.

21. Канюк Г.И. Роль показателей точности и быстродействия систем автоматического регулирования в энерго- и ресурсосберегающих технологиях / Г.И. Канюк, Е.Н. Близниченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006 – № 5. – С.82 – 87.

Здобувач встановив зв'язок показників точності та швидкодії з загальними техніко-економічними характеристиками енерго- і ресурсозберігаючих технологічних систем.

22. Канюк Г.И. Об увеличении эксплуатационной надежности и безопасности главных паропроводов при повышении качества электрогидравлических систем автоматического регулирования паровых турбин / Г.И. Канюк, Е.Н. Близниченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2007 – Вип.3/2(27). – С.40 – 41.

Здобувач виконав аналіз впливу показників точності та швидкодії системи автоматичного керування положенням стопорно-регулюючих клапанів парових турбін на експлуатаційну надійність та безпеку головних паропроводів.

23. Канюк Г.И. Универсальный линеаризующий алгоритм управления быстродействующими прецизионными электрогидравлическими следящими системами (ЭГСС) / Г.И. Канюк // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2008 – Вип.3/3 (33). – С.43 – 46.

24. Канюк Г.И. Синтез эталонных моделей (наблюдателей состояния) для быстродействующих прецизионных электронно-гидравлических следящих систем (ЭГСС) / Г.И. Канюк // Энергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – Харків, 2008 – №7(53). – С.19 – 25.

25. Канюк Г.И. Влияние качества системы автоматического регулирования частоты и мощности паровых турбин на эксплуатационную надежность и безопасность энергоблоков АЭС / С.Ф.Артюх, Г.И. Канюк // Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія „Електротехніка і енергетика”. – Донецьк, 2008 – №8(140). – С.90 – 91.

Здобувачем запропоновано структуру ефективного алгоритму керування положенням стопорно-регулюючих клапанів парових турбін, що компенсує практично всі види статичних і динамічних помилок.

26. Канюк Г.И. Векторно-матричные модели быстродействующих прецизионных электрогидравлических следящих систем (ЭГСС) / С.Ф.Артюх, Г.И. Канюк // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2008 – № 11. – С.88 – 93.

Здобувачем розроблено ієрархічний ряд оціночних векторно-матричних моделей електрогидравлічних систем, необхідних для синтезу алгоритмів керування.

27. А.с. 1779808 СССР, МКИ³ F15B 9/03 Электрогидравлический следящий привод / Гапон А.В., Калинин Б.П., Канюк Г.И., Пакулов К.Н.; Заявитель: Харьковский комплексный инженерный центр АН УССР. – № 4874651/29: заявл. 16.10.90; опубл. 07.12.92, Бюл. № 45.

Здобувачем запропоновано структурну схему та методику визначення параметрів спостерігаючого пристрою ідентифікації (спостерігача стану);

28. Пат. 2020298 Российская Федерация, МПК⁷ F 15B 9/03. Электрогидравлический следящий привод / Гапон А.В., Калинин Б.П., Канюк Г.И., Пакулов К.Н.; заявитель Харьковский комплексный инженерный центр АН Украины; патентообладатель Канюк Г.И. – № 4874593/29: заявл. 15.10.90; опубл. 30.09.94, Бюл.№ 18.

Здобувач запропонував застосувати у регуляторі електрогидравлічного приводу засіб корекції систематичних похибок датчиків.

29. Пат. 5700 Україна МПК⁷ F 15B 9/03 Электрогидравлический следящий привод / Гапон А.В., Калинин Б.П., Канюк Г.И., Пакулов К.М.; заявник Харківський комплексний інженерний центр АН УРСР; патентовласник Канюк Г.И. – № 94260801: заявл.18.06.93; опубл.28.12.94; Бюл.№ 7 – 1.

Здобувач запропонував ввести у систему керування електрогидравлічним приводом блок корекції показників датчика зворотнього зв'язку у відповідності з його реальною градуальною характеристикою.

30. Канюк Г.И. Разработка высокодинамичных прецизионных электрогидравлических следящих приводов / Г.И. Канюк, А.В Гапон, К.Н. Пакулов,

Б.П. Калинин // Тезисы докл. I Всесоюзн. науч.-техн. конференции Асоц. спец. пром. гидравлики и пневматики, Киев. – 1991. – С. 5.

Здобувач виконав структурний і параметричний синтез алгоритмів керування електрогідравлічними слідкуючими приводами.

31. Канюк Г.И. Разработка модульной концепции построения испытательных комплексов на базе электрогидравлических приводов с микропроцессорным управлением / Г.И. Канюк, А.В. Гапон, Л.М. Корнейчук, К.Н. Пакулов // Тезисы докл. 2 Всесоюзн. науч.-техн. конференции Асоц. спец. пром. гидравлики и пневматики, Киев. – 1992. – С. 10 – 12.

Здобувач розробив структуру і основні положення модульної концепції побудови випробувальних комплексів на базі електрогідравлічних приводів.

32. Канюк Г.И. Структурно-методологическое построение испытательного комплекса трансмиссий автомобилей / Г.И. Канюк, В.А.Дзюнь, Б.П. Калинин, А.С.Назарян, В.Я. Павловский // Тезисы докл. науч.-техн. конференции «Повышение технического уровня и надежности машин». – Минск, 1993. – С. 30 – 31.

Здобувач запропонував модульну концепцію побудови випробувального комплексу на базі електрогідравлічних слідкуючих систем.

33. Канюк Г.И. Методика синтеза электрогидравлических приводов (ЕГП), що мають високі характеристики з точності і швидкодії / Г.И. Канюк, О.В. Андреев, А.Г. Топчий // Наукомісткі технології подвійного призначення. Тези доповідей науково-практичної конференції. – Київ, 1994. – С.46 – 47.

Здобувач запропонував концептуальні підходи до розробки методики синтезу ефективних алгоритмів керування електрогідравлічними приводами.

34. Канюк Г.И. Повышение точности и быстродействия систем автоматического регулирования частоты и мощности паровых турбин / Г.И. Канюк, Е.Н. Близниченко, Б.Г. Луполовер, А.Н. Шуванов, М.В. Логвинов // Тезисы докл. Международной науч.-техн. конференции «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». – Харьков: Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 2000. – С. 48.

Здобувач запропонував використання алгоритмів керування на основі зворотніх задач динаміки з метою підвищення точності і швидкодії систем регулювання частоти та потужності турбін.

35. Канюк Г.И. Эффективные алгоритмы управления быстродействующими прецизионными электронно-гидравлическими следящими системами (ЭГСС) / Г.И. Канюк, Е.Н. Близниченко // Матеріали 12-ї міжнародної конференції з автоматичного управління, присвяченої 120-річчю Національного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків, 2005. – т.2. – С.61.

Здобувачем виконано структурний і параметричний синтез алгоритмів керування ЕГСС на основі теорій модального керування і розв'язання зворотніх задач динаміки.

АНОТАЦІЇ

Канюк Г.И. Моделі і методи структурного і параметричного синтезу прецизійних електрогідравлічних слідкуючих систем автоматизованих випробувальних стендів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків. – 2009.

Дисертація присвячена розробці наукових і практичних принципів створення швидкодіючих прецизійних електрогідравлічних слідкуючих систем (ЕГСС) як підкласу мехатронних систем (зокрема – ЕГСС автоматизованих випробувальних стендів). Результати роботи дозволяють цілеспрямовано, системно і ефективно, з мінімальними витратами часу і засобів створювати ЕГСС з високими показниками точності і швидкодії. З урахуванням досвіду практичних інженерних розробок сформульовано універсальні вихідні принципи створення швидкодіючих прецизійних ЕГСС (деталізована технологія концептуальної розробки, система технічних вимог, принципи вибору схемних рішень і елементної бази), розроблено ієрархічний ряд математичних моделей для різних етапів і завдань створення і дослідження. На основі відомих загальних принципів сучасної теорії оптимального керування розроблено практичні інженерні методики синтезу ефективних регуляторів ЕГСС, що забезпечують компенсацію практично всіх видів статичних і динамічних похибок (у т.ч. – і обумовлених нелінійними ефектами) і, відповідно, високі (що наближаються до граничних енергетичних рівнів) характеристики точності і швидкодії. Результати роботи використовувалися при виконанні ряду фундаментальних і прикладних НДР і НДДКР, у т.ч. – при створенні автоматизованих випробувальних стендів. В результаті цих робіт розроблено ряд типорозмірів швидкодіючих прецизійних ЕГСС на базі неповноповоротних гідродвигунів оригінальної конструкції, що забезпечують смугу пропускання до 20 Гц, точність позиціонування до однієї кутової хвилини і діапазон регулювання до 10^4 .

Ключові слова: автоматизовані системи керування, електрогідравлічні слідкуючі системи, методи моделювання, ідентифікація, аналіз і синтез складних систем, автоматизовані випробувальні стенди.

Канюк Г.И. Модели и методы структурного и параметрического синтеза прецизионных электрогидравлических следящих систем автоматизированных испытательных стендов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков. – 2009.

Диссертация посвящена разработке научных и практических принципов создания быстродействующих прецизионных электрогидравлических следящих систем (ЭГСС) как подкласса мехатронных систем (в частности – ЭГСС автоматизированных испытательных стендов). Результаты работы позволяют целенаправленно, системно и эффективно, с минимальными затратами времени и средств создавать ЭГСС с высокими показателями точности и быстродействия.

В итоге выполнения работы получены следующие основные результаты.

Разработаны универсальные исходные принципы создания быстродействующих прецизионных ЭГСС, в т.ч. – детальная структура и

последовательность концептуальной разработки, принципы выбора схемных решений и элементной базы.

Предложена классификация рабочих процессов и элементов ЭГСС, построенная по принципу: «физический процесс – соответствующая группа конструктивных элементов». На основе этой классификации получены универсальные математические модели различных уровней для всех основных элементов и подсистем ЭГСС.

Разработана оригинальная системная методика оценочных расчетов и построения иерархического ряда математических моделей ЭГСС. Полученные на основе этой методики математические модели предназначены для различных этапов общего цикла создания ЭГСС и, соответственно, имеют различные уровни сложности и конкретизации, а также различные формы представления (системы дифференциальных и векторно-матричных уравнений, передаточные функции и структурные схемы).

На основе известных общих принципов современной теории оптимального управления (модальное управление, методы обратных задач динамики) разработаны прикладные инженерные методики синтеза эффективных регуляторов ЭГСС, обеспечивающие компенсацию всех основных видов статических и динамических ошибок и, соответственно, высокие (приближающиеся к предельным энергетическим уровням) характеристики точности и быстродействия.

Использование принципов мультипликативного управления обеспечивает универсальность структуры, простоту практической реализации и настройки предложенных регуляторов, а разработанные универсальные структуры эталонных моделей (наблюдателей состояния) – минимальное количество используемых измерительных систем.

Получены структуры и соотношения для определения оптимальных параметров ряда универсальных, эффективных и простых в практической реализации регуляторов ЭГСС: модальные регуляторы (в т.ч. – с наблюдателями состояния); регуляторы на основе решения обратных задач динамики; регуляторы, обеспечивающие коррекцию нелинейных характеристик объекта управления (часть из них защищена патентами Украины и России).

Элементы разработанной теории использовались при выполнении ряда фундаментальных и прикладных НИР и НИОКР. В результате этих работ создан ряд типоразмеров быстродействующих прецизионных ЭГСС на базе неполноповоротных гидродвигателей оригинальной конструкции, обеспечивающих полосу пропускания до 20 Гц, точность позиционирования до одной угловой минуты и диапазон регулирования до 10^4 . Созданы и доведены до практического использования имитационные динамические стенды для испытания мобильных объектов (ЦНИИХМ, г. Москва, АО «КамАЗ», г. Набережные Челны, НПП «Теплоавтомат», г. Харьков).

Предложенные методы повышения точности и быстродействия электрогидравлических систем регулирования, схемные и конструктивные решения, методики автономной отладки автоматических регуляторов используются в перспективных проектах Государственной энергетической компании

«Центрэнерго», НАЭК «Енергоатом», МГП «Институт проблем управления НАН Украины»).

Ключевые слова: автоматизированные системы управления, электрогидравлические следящие системы, методы моделирования, идентификация, анализ и синтез сложных систем, автоматизированные испытательные стенды.

Kanyuk G.I. Models and methods of structural and parametric synthesis of the precision electro-hydraulic watching systems of the automated tent-bed tests.- Manuscript.

The thesis for a Doctor of Science degree on speciality 05.13.07 – Automation of control processes – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». – Kharkiv. – 2008.

The thesis deals with a fundamentally new applied theory of making the high-speed precision electro-hydraulic watching systems (EHWS) as a subclass of the mechatronic systems. The theory allows to make EHWS and efficiently for different branches of engineering with minimum time and costs consumption. These electro-hydraulic watching systems offer high accuracy and speed figures. In this respect the theory can be considered as a new line of investigation and making the given class systems.

Proceeding from the known and common principles of modern theory of optimal control the practical engineering techniques of synthesis of EHWS effective control algorithms have been worked out. These techniques ensure the compensating practically all kinds of static and dynamic errors (including those caused by nonlinear effects) and, respectively, high (approaching to maximum energy levels) accuracy and speed values.

Some elements of the theory that has been worked out were used while performing a number of type and size of high-speed precision EHWS has been worked out on basis of limited slewing hydraulic actuators of ingenious design that provide a bandwidth up to 20 Hz and positional accuracy up to one angular minute.

Keywords: automated control systems, electric-hydraulic watching systems, modelling methods, identification, analysis and synthesis of the complex systems, automated tent-bed tests.

Підписано до друку 21.09.2009 р. Формат 60x90 1/16.

Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0,9

Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення № 592803

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.

Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.

61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16
