

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Толочко Ольга Іванівна

УДК 681.5:62-83

**АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ
ЗІ СПОСТЕРІГАЧАМИ СТАНУ**

Спеціальність **05.09.03** – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків-2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донецькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Донецьк.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Коцегуб Павло Харитонович,
Донецький національний технічний університет,
завідувач кафедри «Електропривод і автоматизація промислових установок»

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Чермалих Валентин Михайлович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматизації управління електротехнічними комплексами Інституту енергозбереження та енергоменеджменту

доктор технічних наук, професор
Акімов Леонід Володимирович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем

доктор технічних наук, професор
Садовой Олександр Валентинович,
Дніпродзержинський державний
технічний університет,
завідувач кафедри електрообладнання

Провідна установа:

Інститут електродинаміки
Національної Академії наук України

Захист відбудеться “17” лютого 2005 р. в 14-30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.04 Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», за адресою: 61002, г. Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий “22” грудня 2004 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В останній час, у зв'язку з розвитком елементної бази та появою програмних засобів, що полегшують аналіз і синтез складних систем, значно виріс інтерес до систем автоматичного керування (САК) зі спостерігачами стану (СС). Необхідність використання СС зумовлено їхньою здібністю оцінювати значення координат, які неможливо або складно вимірювати безпосередньо за допомогою відповідних датчиків. Наявність додаткової інформації про координати об'єкта регулювання (ОР) дозволяє поліпшити якість керування та пов'язані з нею продуктивність і надійність виробництва, а також поширити можливість автоматизації технологічних процесів.

В електромеханічних системах пристрої спостереження доцільно застосовувати для відновлення таких сигналів як статичний, динамічний, електромагнітний та пружний моменти, електромагнітні потоки і потокозчеплення, швидкість двигуна або виконавчого органа механізму, тощо.

Системи керування електроприводами зі СС охоплюють такі поширені САК як системи одноступінчового та двоступінчового регулювання швидкості та положення одномасових і багатомасових електромеханічних об'єктів з високими вимогами до якості перехідних процесів і точності регулювання або стабілізації їхніх координат.

Для САК зі спостерігачами характерні складна структура з великою кількістю перехресних зв'язків і високий порядок диференціальних або різницевих рівнянь, що описують їх поведінку в динамічних режимах. Тому аналіз таких систем, особливо за збуренням, є складною задачею, яка потребує для свого спрощення розробки нових підходів та вмілого використання сучасних програмних засобів.

Теоретичні аспекти синтезу ідентифікуючих пристроїв спостереження розглянуто в науковій літературі більшою частиною з точки зору забезпечення бажаних динамічних властивостей систем при їх власних рухах, що виникають при відхиленні якої-небудь координати САК від рівноважного стану. До того ж, теорія синтезу СС виникла та значний час розвивалася у припущенні використання цих пристроїв у системах модального керування (СМК). Розширення сфери використання спостерігачів стану на САК довільної структури зробило можливим заведення сигналів зворотних зв'язків (ЗЗ) за відновленими координатами в середину тієї частини ОР, модель якої покладена в основу СС. Такий варіант підключення спостерігачів в систему регулювання потребує додаткових досліджень з точки зору як аналізу, так і синтезу.

Недостатньо уваги в літературі приділено і методиці синтезу редукованих СС, які, в силу пониженого порядку характеристичного полінома (ХП), в меншій мірі втручаються у поведінку системи, але втрачають схожість зі структурою ідентифікованої частини об'єкта, що ускладнює їх структурний синтез.

Одним з важливих етапів синтезу систем зі спостерігачами стану є вибір бажаного розта-

шування їх полюсів та нулів. У цьому питанні також існує багато невирішених проблем, що стосуються критеріїв вибору існуючих стандартних поліномів (СП) і розробки нових канонічних розподілів полюсів і нулів, а також вибору середньгеометричних коренів поліномів системи та спостерігача стану. Застосування цифрових СС потребує розв'язання питань формування дискретних СП, а також узгодження частот пропускання системи і спостерігача з частотою квантування.

Більшість проблем аналізу, синтезу та наладки систем високого порядку зі СС може бути суттєво спрощено та прискорено при використанні сучасних ЕОМ і відповідного програмного забезпечення. Поява удосконалених операційних систем і програмних продуктів реального часу дозволяють просунутися і в напрямку більш якісної та швидкої розробки і налаштування цифрових СС та регуляторів, що входять до складу цифро-аналогових САК і систем із прямим цифровим керуванням.

Отже, проблема створення систем електропривода зі спостерігачами стану є актуальною. Її розв'язанню сприятиме розробка нових методів аналізу та синтезу таких систем, а також автоматизації цих процесів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» (план робіт затверджено Бюро відділення фізико-технічних проблем НАН України 16.09.85 г., протокол №8, розділ 1.9.2.5.2.4.12 «Розробка теорії синтезу та оптимізації мікропроцесорних систем автоматичного керування вентилями електроприводами постійного та змінного струму з поліпшеними статичними та динамічними характеристиками»), держбюджетних науково-дослідних робіт Д10-01 «Розвиток теорії аналізу та синтезу систем автоматичного керування зі спостерігачами стану» (2001-2004г.г.), Д4-04 «Розвиток теорії поліноміального синтезу на прикладі систем автоматичного керування електромеханічними об'єктами» (з 2004 р.), фінансованих Міністерством освіти і науки України по розділу «Фундаментальні дослідження наукових установ», в яких здобувач приймала участь як відповідальний виконавець. Упровадження результатів роботи здійснено за планами Мінчормету та Мінмонтажспецбуду України.

Весь комплекс досліджень виконано в Донецькому національному технічному університеті згідно з науковим напрямком «Розробка та освоєння швидкодіючих приводів» у рамках госпдоговірних і держбюджетних робіт Х81-320 (№ДР 81101326), Х82-320 (№ДР 01823025591), Х82-321 (№ДР 01828007172), Х86-316 (№ДР 01860003014), Х86-316 (№ДР 01860003014), Д-10-01 (№ДР 0101U001193), Д4-04 впродовж 1981-2004 р.р. з участю здобувача як відповідного виконавця, а також у рамках міжвузівського співробітництва з Магдебурзьким технічним університетом ім. Отто фон Геріке за темою «Використання мікроелектроніки для автоматизації систем електропривода».

Мета та задачі досліджень. Метою роботи є розвиток теорії аналізу та синтезу електромеханічних систем зі спостерігачами стану, спрямований на урахування особливостей включення пристроїв спостереження в систему регулювання, урахування впливу на електромеханічну систему, замкнену за оцінками сигналів, невимірних збурень, а також на розробку нових канонічних розподілів полюсів і нулів для поліпшення динамічних і статичних властивостей електроприводів з керуванням за відхиленням, модальним керуванням і з комбінованим керуванням за задавальною дією і за збуренням.

Для досягнення поставленої мети розв'язувались наступні задачі:

- теоретичне обґрунтування, розробка та узагальнення методик аналізу СМК і САК довільної структури з еквівалентними та редукованими спостерігачами стану в умовах дії на ідентифіковану частину об'єкта регулювання невимірного збурення;
- виявлення особливостей систем, у яких зворотні зв'язки за сигналами, відновленими за допомогою СС, заведені в середину ідентифікованої частини об'єкта регулювання, і розробка з їх урахуванням методики аналізу та синтезу таких САК;
- теоретичне обґрунтування та розробка методики конструювання передавальних функцій за модульним оптимумом та з умов забезпечення бажаного перерегулювання перехідної функції з урахуванням характеру її загасання для синтезу систем довільного порядку;
- теоретичне обґрунтування та розробка методики синтезу систем підпорядкованого регулювання (СПР) методом стандартних поліномів, а також використання цієї методики при розробці СПР швидкості та положення електромеханічних систем з метою поліпшення їхніх динамічних властивостей;
- розробка методики автоматизованого синтезу аналогових і дискретних систем зі спостерігачами стану в чисельному вигляді та в аналітичній формі;
- теоретичне обґрунтування та синтез СС, що відновлюють статичний і динамічний моменти для аналогових та цифрових систем керування швидкістю і положенням одномасових електромеханічних об'єктів;
- теоретичне обґрунтування та синтез СС для однозонних і двозонних систем непрямого регулювання швидкості;
- удосконалення методів аналізу та синтезу систем керування двомасовими електромеханічними об'єктами (ДЕМО) із пристроями спостереження пружно-в'язкого моменту і швидкості механізму;
- розробка методики програмної реалізації цифрових СС та узагальнення досвіду експериментальних досліджень запропонованих систем регульованого електропривода і впровадження їх у промисловість.

Об'єктом дослідження є динамічні процеси в електромеханічних системах з неповною інформацією про об'єкт регулювання.

Предметом дослідження є детерміновані системи керування електромеханічними об'єктами довільного порядку та довільної структури зі спостерігачами стану в умовах дії на САК невимірних збурень.

Методи досліджень. В основу досліджень покладені методи сучасної теорії автоматичного керування, лінійної алгебри та теорії матриць, методи диференційного та інтегрального обчислень, методи поліноміального синтезу, математичне і фізичне моделювання, методи обчислювальної математики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Уперше розроблено загальні підходи до рішення проблеми синтезу електромеханічних систем зі спостерігачами стану в умовах дії на об'єкт регулювання невимірних збурень, які дозволяють здійснити синтез систем підпорядкованого і модального керування з єдиних позицій на підставі запропонованих методів і використання розроблених в дисертації канонічних розподілів полюсів та нулів.

2. Уперше в загальному вигляді визначено матричні передавальні функції систем, замкнених через СС, за невимірним збуренням, прикладеним до частини об'єкта, сигнали якої відновлюються спостерігачем, та виконано перетворення матричних структурних схем з СС у зворотному зв'язку до послідовно-паралельних структур, що дозволяє суттєво спростити аналіз систем такого типу.

3. Уперше доведено, що реакція помилок оцінювання змінних стану на невимірне збурення, прикладене до об'єкта регулювання за точкою знімання сигналу, що керує спостерігачем, аналогічна реакції відповідних координат СС, працюючого в автономному режимі, на збурення, прикладене до спостерігача.

4. Уточнено теорему розподілу між полюсами системи та СС для випадку, коли зворотні зв'язки за сигналами, відновленими за допомогою пристрою спостереження, заведено в середину тієї частини об'єкта регулювання, модель якої покладено в основу СС. Уточнення полягає в тому, що при описаному способі включення СС він доповнює систему не власними полюсами, а полюсами пристрою, отриманого з реального спостерігача після відкидання в ньому зворотних зв'язків, прикладених до ідентифікованої частини об'єкта.

5. Науково обґрунтовано нові канонічні розподіли полюсів і нулів, які поширюють можливості досягнення заданої якості перехідних процесів замкнених систем.

6. Теоретично обґрунтовано структурний синтез СС з асимптотичним відновлюванням статичного і динамічного моментів одномасових електромеханічних систем, які відрізняються від відомих спостерігачів відсутністю додаткового інтегратора та переносом точки знімання оцінки динамічного моменту з виходу аперіодичної ланки на вихід усталеного за нею суматора.

7. Для систем автоматичного керування двомасовими електромеханічними системами знайдено аналітичні залежності, використання яких при синтезу дозволяє зменшити коливальність перехідних процесів і запобігти стрибків електромагнітного моменту та додатних динамічних стрибків швидкості двигуна при накиді навантаження, а саме:

- встановлено взаємозв'язок між величиною першого кидка струму і характеристичною частотою системи модального керування;
- знайдено аналітичний вираз для характеристичної частоти, що забезпечує незалежність статичного падіння швидкості при накиді навантаження від коефіцієнта співвідношення мас;
- виведено рівняння для параметрів систем підпорядкованого керування з корегувальними зв'язками за пружним моментом або за різницею швидкостей першої та другої мас із умов модального оптимуму (МО).

8. Теоретично обґрунтовано дискретну модель ДЕМО, що відрізняється від існуючих моделей схожістю структури з реальним аналоговим об'єктом і дозволяє спростити синтез цифрових модальних регуляторів та цифрових спостерігачів стану.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розв'язанні комплексу задач з поліпшення статичних та динамічних властивостей систем регулювання швидкості та положення електромеханічних об'єктів, а також скорочення термінів і підвищення якості їх проектування, дослідження та налаштування, а саме:

1. Розроблено методику синтезу СС, що діють безпосередньо на ідентифіковану частину об'єкта регулювання, яка дозволяє забезпечити бажане розташування полюсів систем з такими спостерігачами.

2. Запропоновано методику структурного синтезу редукованих СС, яка не потребує математичного опису об'єкта регулювання у просторі стану та його перетворення.

3. Розроблено методику і програмне забезпечення для автоматизованого конструювання відомих та запропонованих в дисертації канонічних поліномів, а також їхньої дискретизації.

4. Розроблено методику і програмне забезпечення для автоматизованого синтезу в чисельному вигляді та в аналітичній формі систем модального керування і спостерігачів стану, що дозволяють полегшити та прискорити виконання перелічених операцій.

5. Синтезовано аналогові та цифрові системи автоматичного керування одномасовими та двухмасовими електромеханічними об'єктами з поліпшеними динамічними властивостями, що досягнуто за рахунок використання запропонованих у роботі спостерігачів стану, пристроїв задання, які реалізують принцип комбінованого керування, а також методів конструювання передавальних функцій замкнених систем з умов забезпечення бажаних показників якості перехідних процесів.

6. Розроблено методику наладки та програмної реалізації цифрових елементів систем керування, у тому числі і цифрових спостерігачів стану.

Практична цінність та ефективність дисертаційної роботи підтверджується впровадженням її результатів у промисловість. Розроблені в дисертації методики синтезу і налаштування систем електропривода використовуються ДПНУ №414 і ВТП ВО «Укрчорметавтоматика» при модернізації електроприводів діючих промислових установок (1981-1985, 2003-2004 р.р.); на Єнакіївському металургійному заводі впроваджено двозонну систему непрямого регулювання швидкості з комбінованим керуванням за задавальною дією, на Донецькому металургійному заводі – систему комбінованого керування електроприводом натискних гвинтів клітини 950 обтискного прокатного стана 950/900 (1981-1984 р.р.). У 2004 р. на блюмінгу «І300» ВАТ «Криворіжсталь» впроваджено систему двозонного регулювання швидкості з використанням СС, що відновлює потік збудження двигуна, а на натискних гвинтах вертикальної клітини слябінга 1150 ВАТ «Запоріжсталь» – цифро-аналогову систему регулювання положення з комбінованим керуванням за задавальною дією та за збуренням, у якій статичний момент відновлюється за допомогою цифрового СС.

Основні положення дисертації використовуються в навчальному процесі при викладанні лекцій з дисциплін «Теорія автоматичного керування», «Системи керування електроприводами», «Автоматизація наукових досліджень та проектування», «Цифрові системи керування та автоматизації», а також в лабораторному практикумі, курсовому і дипломному проектуванні студентами спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації і електропривод». За результатами роботи випущена монографія, що рекомендована Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вузів. Програмно-апаратний комплекс для дослідження систем керування електроприводами постійного струму, створений з участю здобувача, використовується при виконанні лабораторних, дипломних і магістерських робіт.

Особистий внесок здобувача. Основні ідеї та розробки, які виносяться на захист, належать здобувачу. Творча участь здобувача в наукових працях, опублікованих у співавторстві, полягає в наступному: при виведенні матричних передавальних функцій САК, замкнених через СС, запропоновано ідею використання математичних методів, розроблених для клітинних матриць; виконано структурні перетворення вищеназваних систем до послідовно-паралельного вигляду; запропоновано структури СС першого порядку для відновлення статичного моменту, СС для систем непрямого однозонного та двозонного регулювання швидкості; виведено формули для розрахунку помилок оцінювання координат синтезованими спостерігачами і запропоновано способи їх компенсації; висунуто ідеї розробки нових канонічних розподілів полюсів та нулів замкнених САК; запропоновано ідею використання пакета MATLAB для автоматизації процесів, пов'язаних з аналізом, синтезом і програмною реалізацією модальних регуляторів і спостерігачів стану; прийнято безпосередню участь у розробці переліченого програмного забезпечення, виведенні аналогових і

дискретних передавальних функцій, формул для розрахунку коефіцієнтів корегувальних зв'язків САК і СС та їхніх статичних параметрів, в отриманні наведених у роботі графічних залежностей та т. і.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на всесоюзних науково-технічних конференціях «Автоматизированный электропривод прокатных станов» (м. Свердловськ, 1985 р.), «Современный металлургический электропривод, автоматизация и САПР промышленных установок» (м. Харків, 1986 р.), на Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (м. Алушта, 1998-2003 р. р.), «Проблеми створення нових машин і технологій» (м. Кременчук, 1999-2000 р. р.), «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», (м. Кременчук, 2001-2004 р. р.), «Контроль і управління в складних системах» КУСС-99 (м. Вінниця, 1999 р.), «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці» (м. Львів, 1999 р.), «Оптимізація виробничих процесів» (м. Севастополь, 2000 р.), «Інформаційна техніка та електромеханіка» (м. Луганськ, 2001, 2003 р. р.), на всеросійській з міжнародною участю конференції «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB» (м. Москва, 2002 р.), на науковому семінарі інституту електродинаміки Національної Академії наук України «Дискретне регулювання в електромеханічних системах» в рамках комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики», (м. Донецьк, 2004 р.), на науково-технічних конференціях Донецького національного технічного університету (1999-2004 р. р.), на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (2004 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 61 наукову працю. Серед них 1 одноосібна монографія, 57 статей у журналах, збірках наукових праць і в матеріалах науково-технічних конференцій, а також 3 авторських свідоцтва СРСР на винаходи. У фахових збірниках наукових праць, визнаних ВАК провідними, опубліковано 45 статей, 6 із яких підготовлені без співавторів.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації становить 540 сторінок, з них 39 ілюстрацій і 7 таблиць у тексті, 177 ілюстрацій і 19 таблиць на 134 сторінках, 7 додатків на 83 сторінках і 260 найменувань списку використаних літературних джерел на 26 сторінках. Додатки отримують 16 таблиць, 6 рисунків, тексти 24 програмних модулів та 18 документів, що підтверджують упровадження, промислові випробування, економічні ефекти.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, наведено данні про зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну та

практичне значення одержаних результатів, наведено данні про їх апробацію, публікацію та упровадження.

У першому розділі викладено історію розвитку теорії аналізу та синтезу електромеханічних систем зі спостерігачами стану і виконано аналіз сучасного становища цієї проблеми. Відзначено внесок вітчизняних та іноземних науковців у її розв'язання. Виявлено недоліки існуючих електромеханічних систем із пристроями спостереження, методів їх аналізу, синтезу, налаштування та методик автоматизації цих процесів. Намічено напрямки подальшого розвитку та удосконалення теорії аналізу і синтезу систем зі СС, обґрунтовано задачі досліджень, спрямовані на створення високоефективних систем автоматизованого електроприводу в умовах впливу на систему невимірних збурень та неповної інформації про ОР.

У другому розділі виконано дослідження детермінованих лінійних СМК та систем керування довільного вигляду з еквівалентними та редукованими СС в каналі ЗЗ, в умовах дії на ідентифіковану частину ОР невимірного збурення.

Для прикладу на рис. 1 зображено матричну структурну схему СМК зі спостерігачем стану частини ОР.

У роботі доведено, що у випадку, коли параметри розімкненого СС цілком збігаються з відповідними параметрами першої частини ОР, матричні передавальні функції (ПФ) системи рис. 1 мають вигляд.

На підставі ПФ (1) структурну схему рис. 1 зі спостерігачем стану у каналі зворотного зв'язку можна перетворити до схеми з послідовно-паралельним з'єднанням СМК, замкненої за власними змінними стану, та автономного СС, до якого прикладено невимірне збурення (див. рис. 2).

Із ПФ (1) та структурної схеми рис. 2 видно, що передавальна функція СМК зі СС від керуючого впливу до змінних стану об'єкта регулювання збігається з відповідною передавальною функцією СМК без СС, а помилки оцінювання спостерігачем змінних стану частини об'єкта регулювання, яка ідентифікується, при відпрацюванні керуючої дії тотожно дорівнюють нулеві. Зіставляючи ці данні з відомим виразом для характеристичного полінома, з якого випливає теорема розділення, дійдемо висновку, що передавальні функції СМК зі СС повного порядку за керуючою дією містять у чисельнику характеристичний поліном спостерігача, що скорочується з таким же поліномом у знаменнику.

При відпрацюванні збурення, поведінки вектора помилок оцінювання визначається передавальною функцією замкненого СС, до якого прикладений вплив, що збурює, а поведінка координат об'єкта визначається сумою передавальної функції за збуренням системи, замкненої за власними координатами, та добутку передавальної функції спостерігача стану від збурення, діючого на СС, до сумарного сигналу зворотного зв'язку спостерігача і передавальної функції СМК за ке-

руючою дією.

Виведену формулу (3) можна вважати поширенням теореми розділення з характеристичних поліномів на передавальні функції у тому сенсі, що не тільки ХП, але й передавальні функції СМК, замкненої через СС, можна визначати через ПФ її складових частин.

Аналогічні перетворення виконано для СМК з редукованим спостерігачем стану та для системи автоматичного керування загального вигляду.

Застосування СС в класичній формі припускає, що сигнали зворотних зв'язків за координатами, відновленими спостерігачем, впливають на САК через елементи, розташовані поза ідентифікованою частиною ОР (див. схему рис. 1). Однак іноді виникає необхідність заміни деяких зворотних зв'язків частини ОР, яка ідентифікується, зворотними зв'язками за відповідними координатами СС.

На рис. 3 зображено структурні схеми об'єкта регулювання ОР1, замкненого за власними координатами, і його спостерігача стану повного порядку СС1, а на рис. 4 – структурна схема системи, у якій частина зворотних зв'язків об'єкта ОР1 замінено зворотними зв'язками за подібними координатами спостерігача СС1, унаслідок чого сам об'єкт регулювання ОР1 трансформується в ОР2.

Система зі структурною схемою, зображеною на рис. 4, відрізняється від типових САК зі СС тим, що точка *b* додавання зворотних зв'язків за координатами спостерігача розташована у середині тієї частини об'єкта регулювання, яка ідентифікується (тобто праворуч від точки *a* знімання керуючого сигналу спостерігача). З цієї причини матриці стану об'єкта регулювання ОР2 і розімкненого спостерігача СС1 стають неоднаковими.

У роботі доведено, що спостерігач СС1, ввімкнений у систему за схемою рис. 4, доповнює її не власними полюсами, а полюсами деякого фіктивного спостерігача, у якому модель об'єкта регулювання не містить зв'язків за сигналами, які оцінює СС.

Знайдене уточнення теореми розділення необхідно враховувати під час синтезу спостерігачів, що впливають безпосередньо на ідентифіковану частину об'єкта регулювання.

У цьому ж розділі виконано структурне перетворення редукованого СС до вигляду рис. 5.

На основі виконаного перетворення запропоновано наступну методику структурного синтезу редукованого СС:

- 1) побудувати деталізовану структурну модель об'єкта регулювання;
- 2) визначити змінні стану, які необхідно відновити;
- 3) позначити вхідні сигнали інтеграторів, що формують вимірні змінні, як оцінки похідних від цих змінних, а самі інтегратори викинути;
- 4) зв'язки структурної схеми, що розірвалися при відкиданні інтеграторів, замінити зв'язками за відповідними сигналами об'єкта;

- 5) додати на входи залишившихся інтеграторів від'ємні сигнали корегування за оцінкою похідних вимірюваних змінних, а на виходи інтеграторів – додатні сигнали за виміряними змінними із тими же коефіцієнтами;
- 6) вихідні сигнали суматорів, установлених після залишившихся інтеграторів позначити як відновлені змінні стану.

Третій розділ присвячено конструюванню нових канонічних розподілів полюсів та нулів замкнених систем з ПФ загального вигляду з умов модульного оптимуму та з умов забезпечення бажаного перерегулювання перехідної функції з урахуванням характеру її загасання.

У розділі показано, що вимоги до максимально-плоскої АЧХ у смузі пропускання низькочастотного фільтра за Баттервортом і вимоги до сталості АЧХ у можливо більшому діапазоні частот за Кесслером, на яких ґрунтується МО, при $m=0$ дають однакові результати для будь-якого порядку характеристичного полінома n , а саме.

Для зменшення перерегулювання і коливальності перехідної функції при зростанні порядку ХП запропоновано для його формування використовувати не точні, а спрощені умови МО, які добре зарекомендували себе при синтезу систем підпорядкованого регулювання (СПР) методом подвійних пропорцій.

Знайдено формули для нормування полінома (9) за його характеристичною частотою та розраховано таблиці для коефіцієнтів і полюсів поліномів другого-восьмого порядків. Перехідні функції, що відповідають використанню полінома (9) у якості ХП при $m=0$ та $\Omega_0=1$ наведені на рис. 6, а.

Для систем з комбінованим керуванням, коли існує можливість незалежного розташування нулів та полюсів, запропоновано методику синтезу, згідно з якою коефіцієнти полінома у знаменнику передавальної функції обираються методом подвійних пропорцій, а у чисельнику – з умов МО. Це дозволяє збільшити швидкодію систем при відпрацюванні керуючого впливу без підвищення перерегулювання (див. рис. 6, б).

Знайдено також розташування нулів, що задовольняє вимогам МО, для випадків, коли характеристичними поліномами є відомі СП.

Одним з найважливіших показників якості перехідних процесів є перерегулювання. Величина цього показника, а також коливальність перехідних процесів залежать від кута μ (показника коливальності), який утворюють між собою радіуси-вектори найближчої до уявної осі пари комплексно-спряжених полюсів, називаної домінуючою. Регулюючи величину цього кута, можна безпосередньо впливати на перерегулювання. Такий принцип синтезу можна застосувати для багатьох канонічних способів розташування нулів та полюсів. Простіше за все розміщувати полюси та нулі системи на колі одного радіуса, рівного значенню характеристичної частоти (середньогомеотричного кореня).

У роботі запропоновано 3 варіанти розташування коренів поліноміальних рівнянь на комплексній площині:

- а) на однаковій кутовій відстані друг від друга;
- б) усі комплексно-спряжені пари коренів є кратними;
- в) лінійні відстані між проекціями коренів на уявну вісь однакові.

Перелічені способи розташування полюсів на прикладі САК з ХП п'ятого порядку зображено на рис. 7, а відповідні перехідні функції – на рис. 8.

З аналізу рис. 7 випливає, що при однаковому перерегулюванні розподілення «а» відрізняється найменшим, а розподілення «в» – найбільшим показниками коливальності μ . Це визначає поведінку перехідних функцій на стадії їх загасання. Оскільки зі зниженням заданого перерегулювання зменшується і кут μ , то і характер загасання перехідних процесів при цьому стає менш коливальним. В результаті аналізу перехідних функцій рекомендовано для забезпечення перерегулювання, більшого, ніж 8%, використовувати розподілення «а», для перерегулювання (4-8)% – розподілення «б» та для перерегулювання (1-4)% – розподілення «в».

У роботі показано, що таким же способом можна розташовувати не тільки полюси, але й нулі замкнених систем. Розроблено методику синтезу запропонованих поліномів та розраховано коефіцієнти і корені поліномів чисельника і знаменника передавальної функції, що забезпечують перерегулювання 10%, 5% та 1%. Для прикладу на рис. 9 показано перехідні функції, отримані при використанні розподілення полюсів і нулів за схемою «в» при бажаному перерегулюванні 1%.

У роботі показано, що коефіцієнти поліномів чисельника передавальної функції, обрані з умов забезпечення заданого перерегулювання, практично не залежать від порядку характеристичного полінома, а кратні нулі поліномів чисельника парного порядку при розподіленні нулів та полюсів за схемою «а» розташовуються в одних и тих же точках незалежно від порядку поліномів ПФ.

У третьому розділі приділено увагу і дискретизації канонічних поліномів методом відповідності нулів аналогових поліномів p_i та їх дискретних апроксимацій, знайдено аналітичні вирази для коефіцієнтів дискретних поліномів (12) другого-п'ятого порядків, з різноманітним складом нулів аналогових прототипів.

Для деяких коефіцієнтів знайдено узагальнені формули, справедливі для довільного порядку поліномів, зокрема, одержано вирази для коефіцієнтів дискретної апроксимації полінома з біноміальними коефіцієнтами та для коефіцієнтів полінома (12) загального вигляду.

Крім того, у даному розділі запропоновано методику синтезу СПР методом стандартних поліномів, яка відрізняється від існуючих методик тим, що внутрішні контури регулювання в режимах обмеження координат мають налаштування, що забезпечують бажану поведінку перехідних функцій цих контурів, а при роботі в лінійному режимі – налаштування, що забезпечують ба-

жану поведінку зовнішнього контуру. Це досягається за рахунок додаткового зворотного зв'язку за регульованою координатою внутрішнього контуру, заведеною на вхід регулятора зовнішнього контуру.

У четвертому розділі розроблено методики і програмне забезпечення для автоматизації конструювання стандартних і запропонованих у дисертації канонічних розподілень полюсів та нулів, пошуку дискретних апроксимацій аналогових поліномів у аналітичній формі, синтезу аналогових та цифрових МР і СС в чисельному та символьному виглядах, виведено формули, що дозволяють використовувати програми і методики, розроблені для синтезу статичних СМК, також і для синтезу астатичних систем з інтегральним регулятором у контурі, що охоплює модальний регулятор. Програмні модулі написано на алгоритмічній мові пакета *MATLAB*. Слід відзначити, що стандартні функції цієї системи програмування призначені тільки для чисельного синтезу модальних регуляторів повного порядку, а з канонічних поліномів, що найчастіше використовуються при синтезові систем керування електромеханічними об'єктами, вони здатні визначити тільки параметри поліномів Баттерворта та Бесселя. Доповнення пакета *MATLAB* новими програмними модулями і методиками їх використання, поширює можливості автоматизованого синтезу аналогових та цифрових систем за заданим розташуванням їх полюсів та нулів.

У п'ятому розділі розроблено аналогові та цифрові СС, що відновлюють статичний та динамічний моменти двигуна постійного струму та запропоновано засоби використання цих пристроїв у системах електропривода для поліпшення їх статичних та динамічних властивостей.

Спостерігачі, структурні схеми яких зображено на рис. 10 та рис. 11, можуть бути використаними для підвищення порядку астатизму систем регулювання швидкості та положення за моментом статичного опору. Це досягається застосуванням принципу комбінованого керування за збуренням, відновленим за допомогою СС, тобто доповненням існуючої системи додатним зв'язком за ідентифікованим статичним струмом (моментом). У системах підпорядкованого регулювання цієї ж мети можна досягнути заміною зворотного зв'язку за струмом якоря у внутрішньому контурі зворотним зв'язком за оцінкою його динамічної складової.

Особливістю наведених пристроїв спостереження є те, що невимірне збурення відновлюється без допомоги додаткового інтегратора, отже, без підвищення порядку характеристичного полінома спостерігача. В роботі доведено, що при зніманні в схемі рис. 10, *а* сигналу оцінки динамічного струму з виходу інтегратора (точка *с*) він відновлюється зі статичною помилкою за збуренням, а при зніманні його з виходу суматора (точка *d*) ця помилка зникає. Заміна оцінки $\hat{I}_{j1}$ сигналом $\hat{I}_{j2}$, дозволяє при накиді навантаження знизити перерегулювання за струмом у СПР зі зворотним зв'язком за відновленим динамічним струмом на 6%, а динамічне падіння швидкості – на 20%. Особливістю цифрового СС, зображеного на рис. 10, *б*, призначеного для використання в

СПР з прямим цифровим керуванням, є відновлення випередженого на 1 такт сигналу середнього за період дискретності динамічного струму. При замиканні контура струму КРТ за цим сигналом зникає необхідність в імпульсному корегуванні запізнювання у контурі струму.

У роботі показано, що використання СС, наведених на рис. 10, у СПР приводять до структур, які в загальному вигляді відповідають схемі рис. 4. Цю обставину необхідно урахувати при їх синтезу, використовуючи сформульоване у розділі 2 уточнення теореми розділення. Інакше при деяких параметрах стійка система, замкнена за власними координатами, та стійкий спостерігач утворюють у сукупності нестійку систему, що найбільш характерно для швидкодіючих систем з прямим цифровим керуванням.

Спостерігачі, зображені на рис. 11, мають мінімально можливий порядок, що спрощує їх реалізацію і сприяє підвищенню якості перехідних процесів у системах, де вони використовуються. У роботі запропоновано також цифрові СС для приводів, у яких замість датчиків миттєвого значення швидкості використовуються датчики середнього за період дискретності значення цієї координати.

Для однозонних та двозонних систем непрямого регулювання швидкості розроблені СС, які відновлюють не тільки статичний та динамічний струми (або моменти) двигуна, а і його швидкість, а для двозонних систем ще й потік збудження та ЕРС двигуна (див. рис. 12-14).

Особливістю наведених СС є можливість корегувати помилку оцінювання швидкості, що виникає при нахилі навантаження, за допомогою сигналу відновленого статичного моменту, як це показано на рис. 14.

Для СС зі входом за струмом якоря та контролем за вихідним сигналом датчика ЕРС, зображених на рис. 12 і рис. 14, доведено, що помилка оцінювання швидкості та ЕРС двигуна зменшується при переносі точок знімання відновлених сигналів з виходів відповідних ланок моделі ОР (точки е, g) на виходи суматорів (точки f, h).

У роботі виконано аналіз електромеханічних систем регулювання швидкості та положення із запропонованими СС та показано їх переваги у порівнянні з традиційними астатичними СПР з ПІ-регулятором швидкості. Деякі з них можна побачити з графіків, приведених на рис. 15-17.

Показано, що при використанні у системах з прямим цифровим керуванням і швидкодіючим контуром струму цифрових СС, налаштованих на скінченну тривалість перехідних процесів, перерегулювання за струмом при нахилі навантаження перевищує 100%. Для його зменшення рекомендовано знижувати середньгеометричний корінь аналогових прототипів ХП дискретних СС. Отримано графіки, що допомагають обрати величину цього кореня з умов забезпечення заданого перерегулювання за струмом або заданого динамічного падіння швидкості двигуна.

У цьому розділі показано також, що застосування додаткового інерційного зворотного зв'язку за оцінкою динамічного струму (спостерігачем рис. 10), заведеного на вхід регулятора

швидкості, дозволяє суттєво зменшити амплітуду пульсацій струму якоря, зумовлених наявністю пульсацій у напрузі тахогенератора без погіршення якості перехідних процесів за керуючим впливом і без зростання статичного падіння швидкості при накиді навантаження (див. графіки рис. 18).

У шостому розділі розроблені методики синтезу систем керування швидкістю двомасових електромеханічних об'єктів і спостерігачів стану, необхідних для їхньої реалізації.

Для системи, зображеної на рис. 19, виконано параметричний синтез з умов модульного оптимуму.

Показано його перевагу над загальноприйнятим методом з використанням діаграми Вишнеградського, справедливого тільки для систем не вище третього порядку, що вимагає нехтувати інерційністю контуру струму.

Так, наприклад, у системі з додатковим зворотним зв'язком за пружним моментом суттєво зменшується коливальність перехідних процесів при $\gamma < 2$ (γ – коефіцієнт співвідношення мас), у системі з додатковим зворотним зв'язком за різницею швидкостей зосереджених мас час наростання перехідної функції за керуючим впливом зменшується в 1,8 раза, а при $\gamma > 1,5$ статичне падіння швидкості при накиді навантаження знижується на 30 %.

Знайдені залежності статичних та динамічних показників якості системи рис. 19 і одержана межева крива, що визначає знак корегувальних зворотних зв'язків, дозволяють рекомендувати систему з додатковим зворотним зв'язком за пружним моментом для використання тільки при $(2 \div 2,5) < \gamma < \gamma_{\text{гр}}$. В інших випадках перевагу має система з додатковим зворотним зв'язком за різницею швидкостей.

Для підвищення порядку астатизму системи підпорядкованого регулювання швидкості ДЕМО з корегувальним зв'язком за різницею швидкостей зосереджених мас запропоновано доповнити її інтегральним регулятором швидкості другої маси та задатчиком інтенсивності (ЗІ), що реалізує принцип комбінованого керування за задавальною дією. Наведено методику розрахунку параметрів цієї системи, згідно з якою спочатку визначаються параметри T_c і τ_2 з рівнянь модульного оптимуму, складених без урахування інтегрального регулятора; потім методом подвійних пропорцій визначається стала часу інтегратора і, нарешті, при відомих параметрах характеристичного полінома, з умов модульного оптимуму розраховуються корегувальні зв'язки задатчика інтенсивності. Запропонована система при $\gamma > 2$ забезпечує високу якість перехідних процесів (у пуско-гальмувальних режимах вона не поступається системі з П-РС, при накиді навантаження перерегулювання за пружним моментом складає (36-45)%, а за струмом якоря – (49-58)%), що дозволяє рекомендувати її для практичного використання.

У роботі запропоновано також триконтурну СПР з компенсацією сталої часу пружних коливань ДЕМО, що відрізняється підвищеною швидкодією в пуско-гальмувальних режимах.

Для статичної та астатичної систем модального керування ДЕМО розглянуто питання вибору характеристичного полінома та його середньгеометричного кореня (СГК). При цьому враховувалась поведінка не тільки пружного моменту, а і поведінка електромагнітного моменту двигуна як при відпрацюванні керуючого впливу, так і при накиді навантаження.

Показано, що при розгоні СМК від ЗІ в момент часу, що приблизно дорівнює часу досягнення другою похідною від бажаної перехідної функції максимального значення, можуть спостерігатися значні стрибки електромагнітного моменту. Доведено, що з умов обмеження цих стрибків на заданому рівні, СГК бажаного ХП, унормований за частотою пружних коливань двомасової системи, слід розраховувати за формулою

$$\Omega_{0\max} T_{12} \approx \sqrt{[M_{\max 1} / M_{j0} - h_{\text{ж}}(t_{2m} \Omega_0)] / h_{\text{жт}}''} \approx \sqrt{[M_{\max 1} / M_{j0}] / h_{\text{жт}}''}, \quad (16)$$

де M_{j0} – усталене значення динамічного моменту.

Досліджено зв'язок між величиною СГК та статизмом системи за навантаженням. Виведено формули для СГК, що забезпечують параметричний астатизм системи та незалежність статизму від коефіцієнта співвідношення мас.

Показано, що формулу (17) слід застосовувати тільки зі знаком "+" під коренем. Значення СГК, розраховані за формулою (18), рекомендовано використовувати у якості першого наближення цього параметру при реалізації системи модального керування ДЕМО. В такому разі здебільш вдається запобігти стрибків струму якоря та додатних стрибків швидкості першої та другої мас при накиді навантаження.

Виконано синтез астатичної системи модального керування ДЕМО з комбінованим керуванням за задавальною дією із застосуванням методики параметричного синтезу астатичних СМК, розробленої в розділі 4.

Проаналізовано еквівалентні та редуковані статичні та астатичні СС, зображені на рис. 20. У зв'язку з низькою швидкодією запропонованих систем заміна в них ЗЗ за вимірними сигналами зворотними зв'язками за сигналами, відновленими за допомогою СС, практично не впливає на якість перехідних процесів.

Для синтезу цифрової СМК та цифрових СС в дисертації теоретично обґрунтовано спрощену дискретну модель ДЕМО, що за структурою мало відрізняється від відповідної аналогової моделі. Її вхідним сигналом є середнє за період квантування значення електромагнітного двигуна. Дискретні СМК та СС, синтезовані на основі цієї моделі, подані на рис. 21. Ці структури рекомендовано використовувати в системах постійного та змінного струмів при прямому цифровому керуванні тиристорним перетворювачем у контурі моменту.

Наведені СМК і СС відрізняються від класичних структур тим, що не всі сигнали МР є змінними стану, а деякі корегувальні сигнали СС мають прямий зв'язок не з однією, а з декілько-

ма ланками запізнювання. В роботі наведено методику автоматизованого синтезу таких пристроїв та отримано вирази для їхніх коефіцієнтів зворотних зв'язків (коефіцієнти спостерігача відповідають його налаштуванню на скінченну тривалість, сталі часу унормовані за періодом дискретності).

У цьому розділі узагальнено результати експериментальних досліджень та упровадження у промислову експлуатацію запропонованих у дисертації систем та методик. На експериментальній установці тиристорного електроприводу виконано порівняння астатичних систем підпорядкованого регулювання швидкості з ПІ-регулятором швидкості та систем із ПІ-регулятором швидкості та комбінованим керуванням за ідентифікованим статичним моментом. Підтверджено зменшення динамічного падіння швидкості при накиді навантаження в комбінованих системах майже удвічі без погіршення швидкодії при відпрацюванні керуючої дії.

Експериментально доведено можливість зменшення рівня пульсацій струму якоря у системі зі зворотним зв'язком за швидкістю тахогенератора без підвищення перерегулювання та без зниження швидкодії за рахунок включення фільтра на виході датчика швидкості та доповнення системи інерційним від'ємним зворотним зв'язком за динамічним струмом, який можна відновити за допомогою СС рис. 12.

Відображено результати експериментальних досліджень мікропроцесорної системи регулювання положення натискних гвинтів обтискного стану 950/900 Донецького металургійного заводу з комбінованим керуванням за задавальною дією, упровадження якої дозволило підняти максимальну швидкість переміщення, зменшити час наростання струму до сталого значення удвічі, динамічну похибку за положенням – у 2,5 разів, розрахунковий час циклу прокатки однієї заготовки – на 10%, та підвищити продуктивність стану на 1,52%.

Розроблено методику програмної реалізації цифрових СС в середовищі пакета *MATLAB* з використанням його поширень *Simulink* і *Real Time Workshop*, розробленої платформи реального часу *QNX Target* та компілятора *C++* під керуванням операційної системи реального часу *QNX*. Подано результати експериментальних досліджень СМК ДЕМО на лабораторному програмно-апаратному комплексі.

Приведено результати модернізації натискних гвинтів вертикальної клітини слябінга 1150 ВАТ «Запоріжсталь», де у січні 2004 р. упроваджено в дослідну експлуатацію цифро-аналогову систему регулювання положення з комбінованим керуванням за задавальною дією та за збуренням, у якій статичний момент відновлюється за допомогою цифрового СС. Упровадження допомогло підвищити точність відпрацювання бажаних переміщень та швидкодію приводу у пускогальмувальних режимах і запобігти уточнюючих переміщень. За перші 3 місяці експлуатації годинна продуктивність стану зросла на 3%.

Приведено результати модернізації головних приводів блюмінгів 1100 Єнаківського металургійного заводу та 1300 ВАТ «Криворіжсталь», де упроваджено двозонні системи непрямого

регулювання швидкості для схеми Г-Д зі зворотними зв'язками за напругою генератора та за струмом якоря, що перемикаються в залежності від режиму роботи електропривода. На ЄМЗ аналоговий контур напруги доповнено комбінованим керуванням за задавальною дією. На ВАТ «Криворіжсталь» систему керування реалізовано у цифровому вигляді з використанням запропонованої методики програмної реалізації цифрових пристроїв і доповнено спостерігачем стану, що відновлює потік збудження двигуна. На блюмінгу 1100 ЄМЗ вдалося утричі зменшити час формування струму якоря у другій зоні та підвищити продуктивність стану на 1%. На блюмінгу 1300 ВАТ «Криворіжсталь» підвищено максимальну швидкість прокатки та точність регулювання швидкості у другій зоні.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі дано теоретичне узагальнення та новий розв'язок актуальної наукової проблеми підвищення якості керування електромеханічними системами в умовах неповної інформації про ОР. Вирішення проблеми, що одержано шляхом розвитку теоретичних положень аналізу та синтезу систем електропривода зі СС з урахуванням дії на ідентифіковану частину ОР невимірних збурень, дозволило розробити і використати на практиці високоефективні електромеханічні системи з керуванням за відхиленням, з модальним керуванням та з комбінованим керуванням, які відрізняються підвищеними швидкодією та точністю регулювання.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають в наступному:

1. Установлено, що полюси САК зі спостерігачами стану, що діють на ідентифіковану частину ОР, складаються із полюсів системи, замкненої за власними координатами, і полюсів деякого фіктивного пристрою спостереження, який можна одержати із дійсного СС після відкидання в його моделі тих зв'язків, які в об'єкті замінюються зв'язками за оцінками відповідних сигналів. Це положення, що є уточненням теореми розділення для описаного способу включення СС в систему керування, дозволяє забезпечити бажане розташування полюсів у таких САК.

2. Доведено, що структурні схеми САК зі спостерігачами стану в каналі зворотного зв'язку в умовах дії на ідентифіковану частину ОР невимірних збурень можна перетворити до структурних схем з послідовно-паралельним з'єднанням цих елементів. Виведені в загальному вигляді вирази для матричних передавальних функцій таких САК дозволяють спростити та прискорити аналіз статичних і динамічних властивостей електромеханічних систем зі СС при накиді навантаження.

3. Розроблена спрощена методика синтезу редукованих спостерігачів стану за структурною схемою об'єкта регулювання не потребує математичного опису об'єкта в матричній формі та відрізняється від існуючих методик схожістю структури спостерігача зі структурою ідентифікованого ОР.

4. Запропонована методика синтезу СПР методом стандартних поліномів відрізняється від існуючих методик тим, що внутрішні контури регулювання в режимах обмеження координат мають параметри, що забезпечують бажану поведінку перехідної функції цього контуру, а при роботі в лінійному режимі – параметри, що забезпечує бажану поведінку зовнішнього контуру.

5. Запропоновані нові канонічні розподілення нулів та полюсів замкнених САУ дозволяють поширити можливості забезпечення бажаної якості перехідних процесів у електромеханічних системах з керуванням за відхиленням, з модальним та комбінованим керуванням.

6. Розроблені спостерігачі стану, які виконують ідентифікацію динамічного і статичного моментів, дозволяють досягти таких результатів:

- ліквідувати або зменшити статичне падіння швидкості та помилки позиціонування в умовах навантаження у системах із П-регулятором швидкості;
- позбутися незручних в експлуатації електромеханічних датчиків швидкості без погіршення якості та точності регулювання швидкості та положення;
- поліпшити якість та точність керування двозонними системами регулювання швидкості у другій зоні за рахунок використання спостерігачів стану, що відновлюють потік збудження, швидкість та ЕРС двигуна;
- знизити амплітуду пульсацій струму якоря без погіршення статичних і динамічних властивостей електропривода в системах з інерційним зворотним зв'язком за напругою тахогенератора.

7. Розроблені методики синтезу систем керування швидкістю ДЕМО і спостерігачів стану, необхідних для їхньої реалізації, відрізняються від існуючих методик урахуванням поведінки не тільки пружного, але й електромагнітного моменту двигуна при відпрацюванні керуючого впливу та при накиді навантаження, а також урахуванням інерційності контуру струму при його наявності. Теоретично обґрунтована спрощена дискретна модель ДЕМО дозволяє синтезувати цифрові МР і СС з урахуванням досвіду проектування відповідних аналогових пристроїв.

8. Розроблена методика програмної реалізації та налаштування цифрових СС в середовищі *ОСРЧ QNX + MATLAB + Simulink + RTW + QNX Target + C* відрізняється простотою, наочністю та наявністю багатьох сервісних функцій.

9. Основні теоретичні положення підтверджено результатами математичного моделювання та експериментальних досліджень. Виконано упровадження розроблених електромеханічних систем у промисловість на натискних гвинтах стану 950/900 Донецького металургійного заводу та слябінга 1500 ВАТ „Запоріжсталь” і на головних приводах блюмінгів 1350 ВАТ „Криворіжсталь” та 1100 Єнакіївського металургійного заводу. методики аналізу та синтезу запропонованих систем використовуються інженерно-технічним персоналом ДПНУ-414 та ВТП ВО „Укрчорметавтоматика” при модернізації систем електроприводу на металургійних підприємствах.

Основні результати роботи відображено в наступних публікаціях:

1. Толочко О.І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану. – Донецьк: НОРД-ПРЕС, 2004. – 298 с.

2. Коцегуб П.Х., Толочко О.І., Федоряк Р.В. Оптимизация двухмассовых систем регулирования скорости с комбинированным управлением по задающему воздействию // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1998.– Спец. выпуск. – С. 40-41.

Здобувачу належить ідея синтезу системи керування ДЕМО, згідно з якою спочатку обираються параметри регулятора швидкості та корегувальних зворотних зв'язків з умов модульного оптимуму, складених для передавальної функції за збуренням, а потім – коефіцієнти паралельних корегувальних зв'язків за похідними від керуючого сигналу з умов МО, складених для передавальної функції за керуванням.

3. Толочко О.І., Федоряк Р.В. Трехконтурная система подчиненного регулирования скорости двухмассового электромеханического объекта // Проблемы створення нових машин і технологій (Кременчуцький державний політехнічний інститут) – Кременчук: КГПИ. – 1998. – №2 – С. 48-50.

Здобувачу належить ідея компенсації сталої часу пружних коливань ДЕМО за рахунок створення контуру регулювання пружно-в'язкого моменту.

4. Толочко О.І., Коцегуб П.Х., Федоряк Р.В. Анализ и синтез модальных систем, замкнутых через наблюдатель состояния полного порядка // Праці Донецького державного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДонДТУ. – 1999. – Вип. 4. – С. 46-51.

Здобувачу належить ідея отримання передавальних функцій СМК зі СС усього ОР в каналі зворотного зв'язку за допомогою математичного апарату клітинних матриць та виконання структурного перетворення досліджуваних систем до послідовно-паралельного з'єднання СС та СМК, замкненої за власними координатами.

5. Коцегуб П.Х., Толочко О.І., Воронцов Д.В., Коломиец С.В. Упрощенный наблюдатель состояния систем подчиненного регулирования постоянного тока // Праці Донецького державного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДонДТУ. – 1999. – Вип. 4. – С. 36-41.

Здобувачу належить ідея переносу точки знімання сигналу оцінки динамічного моменту з виходу коливальної ланки, що моделює замкнений контур струму, на вихід встановленого за ним суматора.

6. Толочко О.І., Коцегуб П.Х., Федоряк Р.В. Анализ систем модального управления с наблюдателем состояния полного порядка общего вида // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 61. – С. 63-67.

Здобувачу належить ідея отримання передавальних функцій СМК зі СС частини ОР в каналі зворотного зв'язку за допомогою математичного апарату клітинних матриць та виконання струк-

турного перетворення досліджуваних систем до послідовно-паралельного з'єднання СС та СМК, замкненої за власними координатами.

7. Толочко О.И., Федоряк Р.В., Тищенко А.А. Практическая реализация цифровых наблюдателей состояния с использованием системы MATLAB // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк: ДонНТУ. – 1999. – Вип. 12. – С. 105-110.

Здобувачу належить ідея використання „майстерні реального часу” пакета MATLAB для програмної реалізації цифрових спостерігачів стану.

8. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Федоряк Р.В. Анализ линейных систем с наблюдателями состояния // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 113. – С. 78-82.

Здобувачу належить ідея отримання передавальних функцій лінійних САК загального вигляду зі СС в каналі зворотного зв'язку за допомогою математичного апарату клітинних матриць та виконання структурного перетворення досліджуваних систем до послідовно-паралельного з'єднання СС та системи керування, замкненої за власними координатами.

9. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Федоряк Р.В. Анализ систем модального управления с редуцированным наблюдателем состояния // Оптимизация производственных процессов (Севастопольский державний технічний університет). – Севастополь: СевДТУ. – 2000. – №3. – С. 63-66.

Здобувачу належить ідея отримання передавальних функцій СМК з редукованими СС в каналі зворотного зв'язку за допомогою математичного апарату клітинних матриць та виконання структурного перетворення досліджуваних систем до послідовно-паралельного з'єднання СС та СМК, замкненої за власними координатами.

10. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Губарь Ю.В., Федоряк Р.В. Конструирование передаточных функций линейных САУ из условий модульного оптимума // Праці Донецького державного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДонДТУ. – 2000. – Вип. 17. – С. 24-30.

Здобувачу належить ідея розповсюдження спрощених умов модульного оптимуму, що приводять до вибору параметрів систем підпорядкованого регулювання методом подвійних пропорцій, на синтез СМК, а також доказ того, що коефіцієнти полінома Баттерворта можна отримати з рівнянь модульного оптимуму, складених для передавальної функції довільного порядку без нулів.

11. Толочко О.И., Максаев П.А., Мариничев В.Ю. Системы двухзонного регулирования скорости с наблюдателями состояния // Проблемы створення нових машин і технологій (Кременчуцький державний політехнічний інститут). – Кременчук: КДПУ. – 2000. – № 1/2000(8). – С. 53-56.

Здобувачем запропонована структурна схема СС для відновлення потоку збудження двигуна постійного струму, з урахуванням нелінійності характеристики намагнічування та впливу вихро-

вих струмів.

12. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Костенко В.И. Обеспечение желаемого распределения полюсов в цифровой САУ с наблюдателями состояния, воздействующими на идентифицируемую часть объекта регулирования // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – Вип. 10 – С.71-73.

Здобувачу належить ідея уточнення теореми розділення у цифрових лінійних системах автоматичного керування загального вигляду зі спостерігачами стану, у яких зворотні зв'язки за деякими з відновлених сигналів заведено в систему праворуч від точки знімання керуючого сигналу СС.

13. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Мариничев В.Ю., Никорюк Н.С., Розкаряка П.И. Система подчиненного регулювання швидкості з обратной зв'язью по оцінці динамічного току // Праці Донецького державного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДонДТУ. – 2001. – Вип. 28. – С. 18-26.

Здобувачу належить ідея переносу точки знімання сигналу оцінки динамічного струму двигуна з виходу аперіодичної ланки, що моделює якірне коло системи ТП-Д, на вихід установленого за нею суматора.

14. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Мариничев В.Ю., Розкаряка П.И. Система подчиненного регулювання швидкості з наблюдателем динамічного и статического токов первого порядка // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2001. – № 1/2001(10). – С. 103-109.

Здобувачем запропоновано структуру спостерігача стану першого порядку та виконано порівняльний аналіз системи підпорядкованого керування, замкненої за оцінкою динамічного струму, та системи, у якій динамічний струм визначається реальним диференціюванням швидкості.

15. Коцегуб П.Х., Губарь Ю.В., Толочко О.И., Мариничев В.Ю. Цифровые наблюдатели состояния для систем с прямым цифровым управлением // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2002. – Вип. 1(12). – С. 18-21.

Здобувачу належить постановка задачі синтезу цифрових спостерігачів стану, що відновлюють динамічну та статичну складові струму якоря, з використанням ідей, покладених в основу синтезу відповідних аналогових пристроїв.

16. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Федоряк Р.В. Практическая реализация цифровых САУ в среде пакета Матлаб с использованием платформы реального времени "QNX TARGET" // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2002. – Т.1, вип. 12. – С. 98-101.

Здобувачу належить ідея використання "майстерні реального часу" системи MATLAB для програмної реалізації цифрових спостерігачів стану та методика налаштування СС.

17. Толочко О.І. Підготовка до автоматизованого синтезу систем модального управління з зовнішнім інтегральним регулятором вихідної координати // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2002. – Т.2, вип. 12, – С. 386-388.

18. Толочко О.І., Коцегуб П.Х., Федоряк Р.В. Дослідження впливу середньогометрічного кореня характеристичного полінома на властивості системи модального керування двомасовим електромеханічним об'єктом // Праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДонНТУ. – 2002. – Вип. 41. – С. 146-155.

Здобувачем виведено формули для розрахунку значень SGK характеристичного полінома, що забезпечують бажану величину першого стрибка електромагнітного моменту в пуско-гальмувальних режимах і незалежність статичного падіння швидкості при накиді навантаження від коефіцієнта співвідношення мас, та розроблені програми для автоматизованого синтезу системи модального керування ДЕМО.

19. Толочко О.І. Формирование стандартных дискретных полиномов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету – Кременчук: КДПУ. – 2003. – Т.1, №2(19). – С. 30-33.

20. Толочко О.І. Применение метода стандартных полиномов при синтезе систем подчиненного регулирования // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ, 2003. – №4 (62). – С. 114-120.

21. Толочко О.І. Конструирование передаточных функций по заданному перерегулированию с учетом характера затухания переходных процессов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2003. – Т.2, вип. 10. – С. 315-319.

22. Толочко О.І., Пісковатська О.В., Кудокоцев С.М. Системи непрямого регулювання швидкості зі спостерігачами стану // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДонНТУ. – 2003. – Вип. 67. – С. 168-173.

Здобувачу належить постановка задачі синтезу спостерігачів стану, що відновлюють швидкість двигуна та ідея компенсації помилок оцінювання швидкості запропонованими пристроями спостереження при накиді навантаження.

23. Костенко В.І., Коцегуб П.Х., Толочко О.І., Федоряк Р.В. Дискретная модель двухмассового электромеханического объекта // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2003. – Т.1, вип. 10. – С. 44-46.

Здобувачем запропонована ідея спрощення дискретної моделі двомасового електромеханічного об'єкта.

24. Толочко О.І., Коцегуб П.Х., Федоряк Р.В. Параметрический синтез цифровой системы модального управления двухмассовым электромеханическим объектом // Вісник Національного тех-

нічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ ХПІ. – 2003. – Т.1, вип. 10. – С. 97-100.

Здобувачем запропоновано методику автоматизованого параметричного синтезу цифрових СС, в яких корегувальні зв'язки за помилкою оцінювання вихідної координати впливають не на один, а на декілька блоків запізнення, та виведені формули розрахунку коефіцієнтів цифрових СС для ДЕМО.

25. Толочко О.І. Синтез поліномів дії з умов модульного оптимуму для систем з деякими стандартними формами характеристичних поліномів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – №1 (52). – С. 135-139.

26. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Розкаряка П.И. Система позиционного электропривода с комбинированным управлением по задающему и возмущающему воздействиям // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2004. – № 3(26). – С. 14-17.

Здобувачу належить ідея застосування у системах позиційного електроприводу комбінованого керування як за задавальною дією, так і за збуренням, ідентифікацію якого виконує спостерігач стану; здобувачем запропоновано також методику параметричного синтезу системи з умов відсутності перерегулювання за струмом у пуско-гальмувальних режимах.

27. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Федоряк Р.В. Синтез цифрового регулятора состояния двухмассового электромеханического объекта // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – Луганськ, 2004. – №2 (72). – С. 111-119.

Здобувачем розв'язано рівняння оптимізації.

28. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Губарь Ю.В., Светличный А.В. Система позиционного электропривода с задатчиком положения // Изв. вузов. Электромеханика. – 1982. – №3. – С. 331-337.

Здобувачем створено та налаштовано аналогову модель запропонованої системи.

29. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Губарь Ю.В. Выбор параметров цифроаналоговой системы позиционного электропривода с задатчиком положения по модульному оптимуму // Изв. вузов. Электромеханика. – 1983. – №7. – С. 102-107.

Здобувачем розроблено методику розрахунку параметрів досліджуваної системи регулювання положення з умов модульного оптимуму.

30. Коцегуб П.Х., Губарь Ю.В., Толочко О.И., Иванченко Ю.В. Реализация и исследование микропроцессорной системы позиционного электропривода с задатчиком положения // Изв. вузов. Электромеханика. – 1988. – №2. С. 88-93.

Здобувач приймав участь у створенні мікропроцесорної системи та у її дослідженні.

31. Коцегуб П.Х., Баринберг В.А., Толочко О.И., Федоряк Р.В. Оптимизация двухмассовых систем регулирования скорости // Известия вузов. Электромеханика. – 1998. – №4. – С. 54-57.

Здобувачем знайдено чисельні розв'язки систем нелінійних рівнянь оптимізації та побудовано узагальнені графіки, рекомендовані для використання при розрахунку параметрів системи керування ДЕМО у разі врахування інерційності контуру струму.

32. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Губарь В.Ю., Мариничев В.Ю. Сравнительный анализ астатических цифровых систем управления приводами постоянного тока с наблюдателями состояния // Электротехника. – Москва, 2003. – № 3. – С. 44-47.

Здобувачем виконано порівняльний аналіз астатичних систем з прямим цифровим керуванням приводами постійного струму при накиді навантаження.

33. Коцегуб П.Х., Толочко О.И. Анализ динамических свойств цифровой системы регулирования скорости с комбинированным управлением по идентифицированному возмущению // Электротехника. – Москва, 2004. – № 6. – С. 20-22.

Здобувачу належить аналіз способів зниження перерегулювання за струмом якоря при накиді навантаження.

34. Коцегуб П.Х., Губарь Ю.В., Толочко О.И., Иванченко Ю.В. Микропроцессорная система позиционного электропривода с комбинированным управлением // Автоматизация электроприводов на базе микропроцессорных средств: Сб. науч. трудов. – Москва: МЭИ, 1986. – №100. – С. 58-64.

Здобувачу належить алгоритм роботи цифрового задавача положення.

35. Устройство для управления электроприводом постоянного тока: А.с. 936320 СССР, МКИ Н 02 Р 5/06 / П.Х. Коцегуб, А.В. Светличный, О.И. Толочко. – №2997672/24-07; Заявлено 29.10.80; Опубл. 15.06.82, Бюл. №22. – 3 с.

Здобувачу належить ідея компенсації впливу інерційності зворотного зв'язку за швидкістю за допомогою додаткового від'ємного зворотного зв'язку за оцінкою динамічного струму.

36. Фильтр для систем автоматического регулирования: А.с. 840789 СССР, МКИ G 05 В 5/01/ П.Х. Коцегуб, О.И. Толочко. – №2826392/18-24; Заявлено 20.09.79; Опубл. 23.06.81, Бюл. №23. – 3 с.

Здобувачем виведено рівняння статичної характеристики нелінійного елемента запропонованого фільтра і виконано порівняння предмету винаходу з аналогами та прототипом.

37. Система управления положением: А.с. 1513415 СССР, МКИ G 05 В 11/01, G 05 В 3/12/ О.И. Толочко, П.Х. Коцегуб, Ю.В. Губарь, В.А. Столба. – №4327001/24-24; Заявлено 27.07.89; Опубл. 07.10.89, Бюл. №37. – 6 с.

Здобувачем запропонована ідея переводу інтеграторів задавача положення з режиму інтегрування вхідних сигналів у режим запам'ятання вихідних сигналів при виникненні ситуації струмообмеження.

38. Толочко О.И., Федорак Р.В. Автоматизация синтеза регуляторов и наблюдателей состояния в среде пакета MATLAB // Труды всероссийской научной конференции “Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB” – М.: ИПУ РАН, 2002. – С. 482-496.

Здобувач виконав постановку задачі автоматизованого синтезу та прийняв безпосередню участь у розробці відповідного програмного забезпечення.

АНОТАЦІЇ

Толочко О.І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси і системи. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2004.

Дисертацію присвячено вирішенню науково-технічної проблеми підвищення якості керування електромеханічними системами в умовах неповної інформації про об'єкт регулювання. Вирішення проблеми одержано шляхом розвитку теоретичних положень аналізу та синтезу систем електропривода зі спостерігачами стану з урахуванням дії на ідентифіковану частину об'єкта регулювання невимірних збурень.

Виконано спрощення структурних схем систем автоматичного керування зі спостерігачами стану в загальному вигляді, уточнено теорему розподілу і методику синтезу СС для випадку, коли зворотний зв'язок за оцінкою деякої координати діє на ідентифіковану частину об'єкту регулювання. Розроблено спрощену методику структурного синтезу редукованих СС, запропоновано нові розподіли полюсів та нулів, удосконалено методику синтезу систем підпорядкованого регулювання методом характеристичних співвідношень, розроблено методику та програмне забезпечення для автоматизації синтезу модальних регуляторів і спостерігачів стану.

Розроблено аналогові та цифрові спостерігачі стану, що відновлюють динамічний та статичний моменти двигуна без додаткового інтегратора, розроблено методики синтезу систем керування двомасовими електромеханічними системами та спостерігачів стану, необхідних для їхньої реалізації. Узагальнено результати експериментальних досліджень і упровадження у промисловість запропонованих систем електроприводу та методик аналізу, синтезу і налаштування цих систем.

Ключові слова: електромеханічні системи, регульований електропривод, системи керування, поліноміальний синтез, спостерігачі стану, ідентифікація, автоматизація.

Толочко О.И. Анализ и синтез электромеханических систем с наблюдателями состояния. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2004.

Диссертация посвящена решению научно-технической проблемы повышения качества управления электромеханическими системами в условиях неполной информации об объекте регулирования (ОР). Решение, полученное путем развития теоретических положений анализа и синтеза САУ с наблюдателями состояния (НС) при учете действия на ОР неизмеряемых возмущений, позволило разработать и применить на практике высокоэффективные электромеханические системы с управлением по отклонению и с комбинированным управлением как по задающему воздействию, так и по идентифицированному при помощи НС статическому моменту, отличающиеся повышенными быстродействием и точностью регулирования.

Выполнены преобразования матричных структурные схемы САУ с НС в канале обратной связи в структурные схемы с последовательно-параллельным соединением этих элементов. Выведены выражения для матричных передаточных функций таких САУ по управляющему и возмущающему воздействиям. Установлено, что полюсы САУ с наблюдателем состояния, воздействующим на идентифицируемую часть объекта регулирования, состоят из полюсов системы, замкнутой по собственным координатам, и полюсов некоторого фиктивного наблюдающего устройства, получаемого из действительного НС после отбрасывания в его модели тех связей, которые в объекте заменяются связями по оценкам соответствующих сигналов. Это положение, являющееся уточнением теоремы разделения для описанного способа включения НС в систему управления, позволяет обеспечить желаемое распределение полюсов в рассматриваемых САУ.

Разработана упрощенная методика синтеза редуцированных НС по структурной схеме объекта регулирования, не требующая математического описания объекта в матричной форме и отличающаяся от известных методик тем, что структура наблюдателя не утрачивает сходства со структурой идентифицируемого ОР.

Усовершенствована методика синтеза систем подчиненного регулирования методом стандартных полиномов, отличающаяся от существующих методик тем, что внутренние контуры регулирования в режимах ограничения координат имеют настройку, обеспечивающую желаемое поведение переходной функции этого контура, а при работе в линейном режиме – настройку, обеспечивающую желаемое поведение внешнего контура.

Предложены новые канонические распределения нулей и полюсов замкнутых САУ, полученные методом двойных пропорций, из условий модульного оптимума и из условия обеспечения желаемого перерегулирования переходной функции с учетом характера ее затухания. Разработаны методические рекомендации и программное обеспечение для конструирования стандартных и

предложенных в диссертации канонических форм характеристических полиномов и полиномов воздействия, а также их дискретных аппроксимаций.

Разработаны методические рекомендации и программное обеспечение для синтеза статических и астатических систем модального управления и наблюдателей состояния в численном виде и в аналитической форме в среде пакета *MATLAB*.

Разработаны аналоговые и цифровые НС, выполняющие идентификацию динамического и статического моментов, отличающиеся от известных наблюдателей отсутствием дополнительного интегратора, изменением точек съема восстанавливаемых сигналов и наличием узлов компенсации ошибок оценивания при набросе нагрузки. Их применение в системах регулирования скорости и положения позволяет добиться следующих результатов:

- ликвидировать или уменьшить статическое падение скорости при набросе нагрузки и ошибки позиционирования без усложнения структуры регулятора скорости за счет замены обратной связи по полному току якоря обратной связью по оценке его динамической составляющей или за счет использования принципа комбинированного управления по идентифицированному возмущению;
- избавиться от узла импульсной коррекции запаздывания в контуре тока системы с прямым цифровым управлением тиристорным преобразователя за счет замыкания этого контура по упрежденной на такт оценке динамического тока;
- повысить надежность систем регулирования скорости и положения за счет замены электро-механических датчиков скорости наблюдателями состояния;
- улучшить качество переходных процессов и точность регулирования скорости в двухзонных системах за счет замыкания контура возбуждения по оценке магнитного потока и компенсации влияния внутренней обратной связи по ЭДС двигателя при помощи положительной обратной связи по оценке ЭДС;
- снизить амплитуду пульсаций тока якоря без ухудшения статических и динамических свойств электропривода в системах с инерционной обратной связью по напряжению тахогенератора при помощи дополнительной обратной связи по идентифицированному динамическому моменту.

Разработаны методики синтеза систем управления скоростью двухмассовых электромеханических объектов (ДЭМО) и наблюдателей, необходимых для их реализации, отличающиеся от известных методик учетом поведения не только упругого, но и электромагнитного момента двигателя при отработке управляющего воздействия и при набросе нагрузки. Теоретически обоснована упрощенная дискретная модель ДЭМО, позволяющая синтезировать цифровые модальные регуляторы и НС с учетом опыта проектирования соответствующих аналоговых устройств.

Разработана методика программной реализации и отладки цифровых наблюдателей состояния в среде пакета *MATLAB* с приложением для структурного моделирования *Simulink* и мастерской реального времени *RTW* под управлением операционной системы реального времени *QNX*.

Основные теоретические положения подтверждены результатами математического моделирования и экспериментальных исследований. Разработанные системы электропривода, методики их анализа и синтеза внедрены в промышленность.

Ключевые слова: электромеханические системы, регулируемый электропривод, системы управления, полиномиальный синтез, наблюдатели состояния, идентификация, автоматизация.

Tolochko O.I. Analysis and synthesis of electromechanical systems with state observers. – Manuscript.

Thesis for a Doctor's degree in Engineering Sciences by specialty 05.09.03 – Electrical Engineering Complexes and Systems. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2004.

This thesis is dedicated to solving the scientific and technical problem of electromechanical systems control quality increasing under conditions of incomplete information about control plant. Problem's solution is acquired by development of theory for electric drives systems with state observers subject to influence of invariable disturbances on control plant's identifiable part.

The structural schemes simplification is fulfilled for automatic control systems with state observers (SO) in general, the theorem of arrangement and SO synthesis method is refined for the case, when estimated output's feedback acts on control plant's identifiable part. Simplified method of structural synthesis of reduced SO is developed, new zeros and poles placements are proposed, method of synthesis of subordinated control systems by characteristic relationships is improved, method and software for automation of state controllers and observers synthesis are developed.

An analogous and discrete state observer, which retrieves dynamic and static torque of the motor without the auxiliary integrator are worked out, methods of synthesis of double mass control systems and state observers, which are required for their realization, are developed. Results of experiments and introduction in industry of proposed electric drives systems and analysis, synthesis and adjusting methods are generalized.

Keywords: electromechanical systems, electric drive, control, polynomial synthesis, state observers, identification, automation.

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Кутовий Ю.М.

Свідоцтво Держкомінформполітики серія ДК, № 1631 від 24.12.2003 р.

Підписано до друку 01.12.2004 р. Формат 60×84¹/₁₆.

Папір PolSpeed. Обсяг 0,9 авт. арк.

Друк RISO. Тираж 100 прим.

Надруковано: РВА, ДонНТУ, 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58,
9-й уч. корп. Тел. (0622) 90-36-31