

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Гуль Альберт Ігнатович

УДК 62-83-52

**ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ БАГАТОКРАТНО ІНТЕГРУЮЧИХ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З КРИТЕРІЮ МАКСИМАЛЬНОЇ  
ДОБРОТНОСТІ ТА ЗАПАСУ СТІЙКОСТІ**

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 Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

**Науковий консультант** Доктор технічних наук, професор  
**Клепиков Володимир Борисович**,  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем

**Офіційні опоненти:** Доктор технічних наук, професор  
**Коцегуб Павло Харитонович**,  
Донецький Національний технічний університет,  
завідувач кафедри електроприводу та автоматизації  
промислових установок

Доктор технічних наук, професор  
**Зеленов Анатолій Борисович**,  
Донбаський гірничо-металургійний інститут,  
професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем

Доктор технічних наук, професор  
**Садовий Олександр Валентинович**,  
Дніпродзержинський державний технічний університет,  
завідувач кафедри електрообладнання

**Провідна установа** Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
кафедра електроприводу та автоматизації промислових установок  
Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться “07” жовтня 2004 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “15” червня 2004 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Осічев О.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Проблема вдосконалення устаткування і технологій на інноваційній основі з метою підвищення виробництва якісної конкурентоздатної продукції і ресурсозбереження – пріоритетне завдання в технічній політиці України. Її рішення неможливе без подальшого підвищення якості управління електроприводом машин і механізмів. Серед різноманіття електроприводів існує досить широкий клас електроприводів з підлеглим регулюванням (СПР) координат, який відноситься до категорії багатократно інтегруючих електромеханічних систем. Даний клас електроприводів використовується для автоматизації відповідальних машин і механізмів таких, як прокатні стани, папероробні машини, верстати з числовим програмним керуванням, роботи для контурної обробки деталей, високошвидкісні ліфти, об'єкти космічної і оборонної техніки

Достоїнством двократно інтегруючих систем є забезпечення нульових статичної і швидкісної помилок регульованої координати, а трикратно інтегруючих ще і нульової помилки по прискоренню. Однак, досить важливим для даних систем є подальше підвищення динамічної точності відтворення керуючого сигналу і збалансоване поліпшення основних показників якості керування зі зниженням параметричної чутливості за рахунок оптимізації параметрів їхніх пропорційно-інтегральних регуляторів.

Дана робота присвячена обґрунтуванню комплексного критерію якості керування, розробці способів і технічних прийомів настроювання, що забезпечують збалансоване поліпшення конфліктуючих показників якості процесів з урахуванням характерної особливості багатократно інтегруючих систем, що полягає в існуванні мінімуму показника коливальності при варіації пропорційного компонента ПІ-регулятора і при постійному значенні коефіцієнта передачі його інтегрального компонента. При визначенні мети та завдань дослідження дисертаційної роботи автор виходив з багаторічного досвіду досліджень і налагодження комплексних тиристорних електроприводів на металургійних комбінатах Кривого Рогу, Караганди, Маріуполя в період роботи в проектно-експериментальному відділі УДПІ «Важпромелектропроект», з досвіду науково-технічного співробітництва з конструкторським відділом Новосибірського науково-дослідного інституту комплектного електропривода та СКБ «Укрелектромаш» у період роботи в Українському заочному політехнічному інституті, а також з результатів електронного моделювання великої кількості двократно і трикратно інтегруючих систем, отриманих на кафедрі АЕМС НТУ «ХПІ» у період роботи з удосконалювання багатократно інтегруючих електромеханічних систем (ЕМС). При визначенні засобів і методів параметричної оптимізації основний наголос зроблено на широкі можливості, забезпечувані комп'ютерною технікою, повсюдно впроваджуваної у формі мікропроцесорних пристроїв у сучасний електропривод. Вищесказане визначило актуальність проведених досліджень.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Робота виконана за програмою 5.1.6 «Ресурсозберігаючі електромеханічні системи» у рамках держбюджетної теми 5.51.06/037 «Розробка високоточних автоматизованих електроприводів для ресурсозбережних технологій», затвердженої Державним комітетом України з питань науки і технології наказом № 15 від 1 березня 1993 року, а також у рамках держбюджетної теми «Дослідження і поліпшення характеристик електроприводів машин і механізмів з негативним в'язким тертям» наказ № 633 від 05.11. 02 року МОН України № державної реєстрації 010U001509.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розвиток теорії і методів підвищення якості керування багатократно інтегруючих ЕМС оптимізацією параметрів їх астатичних регуляторів швидкості і положення за комплексними критеріями максимальної добротності і запасу стійкості з граничним зменшенням параметричної чутливості і спрощенням настроювання.

Поставлена мета вимагала розв'язання наступних завдань:

- теоретичне обґрунтування оптимального балансу добротності і запасу стійкості багатократно інтегруючих систем і розробка комп'ютерної технології автоматизованої побудови вперше запропонованих діаграм якості керування з областями підвищеної добротності і запасу стійкості (ПДС) і лінією максимальної добротності і запасу стійкості (МДС), яка їх перетинає;

- розробка методики кількісної оцінки резервів підвищення якості керування складних ЕМС, що настроєні не по лінії МДС, із двократно і трикратно інтегруючими контурами за характерними точками їхньої області ПДС на діаграмі якості керування;

- порівняльний аналіз відомих комплексних критеріїв якості керування з урахуванням за знайденими лініями параметричної оптимізації на діаграмах і обґрунтування оптимальності запропонованого мінімаксного критерію мінімуму показника коливальності при заданій добротності в частотній і часовій областях;

- розробка на основі теорії оптимального балансу методик підвищення якості керування і спрощення настроювання багатоконтурних і багатоканальних СПР, розглянутого класу електроприводів;

- розробка методів поліпшення якості керування багатократно інтегруючих СПР при істотному впливі нелінійностей;

- урахування впливу дискретності цифрових регуляторів при настроюванні їхніх параметрів на лінію МДС;

- розробка мінімаксних методів демпфірування коливань у багатомасових електроприводах астатичними регуляторами їх СПР;

- розробка нормованих на основі запропонованого комплексного критерію якості керування передатних функцій і ЛАЧХ для їхнього використання в якості бажаних при синтезі ЕМС із астатизмом другого і третього порядку підвищеної якості керування.

- створення пакетів програм автоматизованого моделювання і параметричної оптимізації за запропонованими комплексними критеріями якості керування безперервних і дискретних ЕМС великої складності в часовій і частотній областях.

*Об'єктом дослідження* є динамічні процеси в замкнутих по відхиленню багатократно інтегруючих умовно стійких електромеханічних системах і зв'язок показників цих процесів з параметрами регуляторів, які оптимізуються.

*Предметом дослідження* є комплексні критерії якості керування, способи і технічні прийоми настроювання, які компромісно вирішують балансування конфліктуючих показників якості процесів у замкнуті по відхиленню багатократно інтегруючих, умовно стійких електромеханічних системах підлеглого регулювання і системах спостережного електропривода зі згорнутою структурною схемою (рис. 1).

На схемі позначені  $n=2$  або  $n=3$  – кратність інтегрування, що визначає порядок астатизму по керуванню;  $m \geq 4$  – порядок характеристичного полінома. Параметрами, що оптимізуються (керуються), є добротність  $k$  і постійна часу  $b$  форсуючої

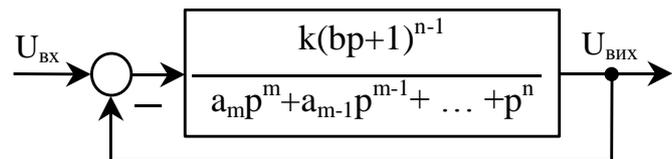


Рис. 1. Згорнута структурна схема досліджуваних систем

ланки ПІ-регуляторів, що визначають значення кратних нулів бажаної передатної функції. У рамках узагальненої структури рис.1 досліджені складні ЕМС з астатичними регуляторами швидкості і положення при звичайному і комбінованому керуванні, включаючи безперервні і дискретні, одномасові і двомасові, одноканальні і багатоканальні, а також багатоз'язані загальним технологічним об'єктом керування або багатоканальною ітераційною структурою.

*Методи дослідження.* Використано методи теорії автоматизованого електропривода, теорії автоматичного керування, теорії математичного моделювання, теорії математичного програмування і теорії планування експериментів.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

Створено елементи теорії оптимального балансу добротності і запасу стійкості багатократно інтегруючих систем, а саме:

- установлене існування «яру» на поверхні максимумів амплітудних частотних характеристик (АЧХ) і поверхні перерегулювань у тривимірному просторі параметрів, що оптимізують, і показника коливальності, уздовж плоского «дна», якого з ухилом убік аперіодичних процесів пролягає просторова лінія МДС з низькою параметричною чутливістю запасу стій-

кості;

- показано на перетинах «яру» можливість постановок однопараметричних завдань безумовної оптимізації при зафіксованому значенні одного з двох керованих параметрів;

- запропоновані діаграми якості керування на топографічних картах цих «ярів» з уні-модальними ізолініями запасу стійкості і точками максимуму добротності на проекції лінії МДС, а також комп'ютерна технологія їхньої автоматизованої побудови і визначення апроксимуючих поліномів лінії МДС;

- розроблена методика кількісної оцінки резервів підвищення якості керування настроєних не по лінії МДС складних ЕМС з двократно і трикратно інтегруючими контурами по характерних точках їхньої області ПДС на діаграмі якості керування;

- визначені комплексні критерії якості керування в часовій і частотній області у формі мінімакських завдань на мінімум перерегулювання або частотного показника коливальності при заданій добротності, які ідеально вирішують балансування конфлікуючих показників якості керування умовно стійких систем;

- обґрунтовані методи практичного настроювання на лінію МДС багатократно інтегруючих ЕМС і параметричної оптимізації їхніх електронних моделей у часовій і частотній області;

- розроблені нормовані на основі запропонованого комплексного критерію якості керування передатні функції і ЛАЧХ у якості бажаних для синтезу систем з астатизмом другого і третього порядку підвищеної якості керування, а також комп'ютерна технологія їхнього визначення;

- обґрунтований мінімакський алгоритм максимального демпфірування коливань астатичним регулятором у багатомасових електроприводах.

Наукову новизну містять супровідні структурні методи підвищення якості керування і спрощення настроювання електромеханічних систем:

- структура стійкої у великому і цілому СПР зі змінною кратністю інтегрування в режимі обмеження підлеглої координати;

- оптимальна структура автономних каналів СПР з цифровими ПІ-регуляторами і комбінованим керуванням, зв'язаних по навантаженню загальним механізмом, що володіє мінімальним порядком передатних функцій всіх фізично реалізованих прямих і перехресних компенсуючих зв'язків і незалежності їхніх параметрів від настроювань регуляторів зовнішніх контурів.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розв'язанні комплексу завдань підвищення якості керування і регулювання складних ЕМС з підвищеними порядками астатизму і добротністю ціною незначних витрат на структурно-параметричну оптимізацію

систем керування, що рекомендовані для використання в науково-дослідних інститутах комплексного електропривода, проектно-конструкторських і налагоджувальних організаціях та безпосередньо на промислових підприємствах.

Винесені на захист наукові положення і результати сприяють розв'язанню проблеми підвищення якості керування не тільки перебуваючого в експлуатації великого парку комплексних електроприводів зі СПР, а також на нові розроблювані перспективні серії приводів з сучасною силовою електронікою і самонастроюванням оптимальної якості керування.

Підвищуючі якість керування методики розрахунку і настроювання двократно і трикратно інтегруючих контурів комбінованих СПР зі спостерігачами стану (СС) на базі мікропроцесорних керуючих пристроїв впроваджені в розробках АТ «Важпромелектропроект», АТЗТ «Важпромавтоматика», НВК «КІА» і науково-виробничому підприємстві «Хартрон-аркос».

Розроблений пакет діалогових програм автоматизації проектування високоякісних ЕМС включений у бібліотеку типових програм персональних комп'ютерів для наукових досліджень і навчального процесу на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХПІ» (м. Харків).

Основні положення роботи використовуються в навчальному процесі при читанні лекцій і лабораторних робіт з курсів «Системи керування електроприводами», «Програмне керування механізмами», «Математичні основи ТАУ», «Нові фізичні і математичні методи керування, виміру і контролю електромеханічних систем», «Комп'ютерна графіка» і ввійшли в монографію «Багатократноінтегруючі системи керування», рекомендовану Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів електротехнічних спеціальностей.

**Особистий внесок здобувача** в розробку наукових результатів, які виносяться на захист:

- побудовані поверхні максимумів АЧХ і поверхні перерегулювань у тривимірному просторі керованих параметрів і показника коливальності та установлене існування на них «яру», уздовж «дна» якого з ухилом у бік аперіодичних процесів пролягає просторова лінія МДС з низькою параметричною чутливістю запасу стійкості;

- показана на перетинах «яру» можливість постановок однопараметричних завдань безумовної оптимізації при зафіксованому значенні одного з двох керованих параметрів;

- побудовані діаграми якості керування на топографічних картах цих «ярів» з унімодальними ізолініями запасу стійкості і точками максимуму добротності на проекції лінії МДС за допомогою розробленої комп'ютерної технології автоматизованої побудови і визначення апроксимуючих поліномів лінії МДС;

- розроблена на основі діаграм якості керування методика і зроблена на їх основі кількісна оцінка резервів підвищення якості керування настроєних не за лінією МДС складних ЕМС з двократно і трикратно інтегруючими контурами по характерних точках їхньої області ПДС;

- визначені комплексні критерії якості керування в часовій і частотній області у формі мінімаксних завдань на мінімум перерегулювання або частотного показника коливальності при заданій добротності, ідеально вирішуючи балансування конфлікуючих показників якості керування умовно стійкими системами;

- обґрунтовані методи і зроблене по них практичне настроювання на лінію МДС великого класу багатократно інтегруючих ЕМС і їхніх електронних моделей у часовій і частотній області;

- розроблені нормовані на основі запропонованого комплексного критерію якості керування передатні функції і ЛАЧХ у якості бажаних для синтезу систем з астатизмом другого і третього порядку підвищеної якості керування та зроблений на їх основі синтез СПР вентильного електропривода постійного струму з ПІ-регуляторами струму і швидкості;

- обґрунтований мінімаксний алгоритм максимального демпфірування астатичним регулятором багатомасових електроприводів і зроблене максимальне демпфірування СПР спірального-гвинтового транспортера з асинхронним приводом за схемою ТПН-АД;

- обґрунтована структура і розроблені пристрої керування стійкої у великому і цілому СПР із ПІ<sup>2</sup>-регулятором швидкості змінної кратності інтегрування в режимі обмеження підлеглої координати;

- запропонована оптимальна структура автономних каналів СПР з цифровими ПІ-регуляторами і комбінованим керуванням, зв'язаних по навантаженню загальним механізмом, що має мінімальний порядок передатних функцій всіх фізично реалізованих прямих і перехресних компенсуючих зв'язків і незалежності їхніх параметрів від настроювань регуляторів зовнішніх контурів.

Даний особистий внесок підтверджується також 24 статтями, опублікованими без співавторів.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні результати роботи доповідалися на восьми Українських з міжнародною участю науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (Крим, м. Алушта, 1993 – 2003 рр.), трьох міжнародних науково-технічних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 1997 – 1999 рр.), двох міжнародних науково-технічних конференціях «Силова електроніка і енергоефективність» (Крим, м. Алушта, 1998 – 1999 рр.), а також на семінарах за планом на-

ціональної Академії наук України «Динаміка нелінійних електромеханічних систем» (м. Харків, 1993 – 2003 рр.).

### **Публікації**

Основний зміст дисертації опублікований у монографії і 39 наукових працях, з них 24 статті опубліковані без співавторів, 7 статей опубліковані в наукових журналах, 30 у збірниках наукових праць і 2 у матеріалах конференцій.

### **Структура і обсяг дисертації**

Дисертація складається з вступу, восьми розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації становить 485 сторінок, з них 65 ілюстрацій у тексті, 53 ілюстрації на 39 сторінках; 6 таблиць у тексті, 11 таблиць на 8 сторінках; 3 додатка на 118 сторінках і 215 найменувань списку використаних літературних джерел на 22 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ**

**У вступі** викладено загальну характеристику роботи, її зв'язок з науковими програмами і темами; обґрунтовано актуальність розв'язуваної проблеми, сформульовано наукову новизну отриманих результатів і показано їхню практичну цінність. Сформульовано мету і основні завдання досліджень, а також положення, які виносяться на захист.

**У першому розділі** розглянутий сучасний стан проблеми підвищення якості керування електромеханічних систем. Відзначено внесок вітчизняних і іноземних учених у її вирішення. Розглянуто існуючі настроювання багатократно інтегруючих систем електроприводів. Відзначено недоліки настроювань за комплексним критерієм Екслбі і на мінімум інтегральних оцінок, що не враховують характерну рису умовно стійких систем – існування мінімуму показника коливальності при заданому значенні добротності. Намічено завдання досліджень у перспективному напрямку пошуку більш ефективних комплексних критеріїв якості керування з урахуванням цієї особливості.

**У другому розділі** представлена розроблена теорія оптимального балансу добротності і запасу стійкості багатократно інтегруючих ЕМС.

По узагальненій структурній схемі СПР (рис. 2) побудовані в тривимірному просторі керованих параметрів  $k$ ,  $b$  і запасу стійкості поверхні максимумів АЧХ (частотного показника коливальності  $M$  – критерію запасу стійкості) і перерегулювання (критерію запасу стійкості в часовій області) двократно ( $n=2$ ) і трикратно ( $n=3$ ) інтегруючих контурів. Вони показані на рис. 3.

Рис. 2. Схема моделювання трикратно інтегруючого контуру СПР

Особливість представлених поверхонь складається в існуванні характерних «ярів», уздовж плоского «дна» якого з ухилом убік аперіодичних процесів пролягає просторова лінія максимальної добротності і запасу стійкості з низькою параметричною чутливістю.

Рис. 3. Поверхні максимумів АЧХ ( показника коливальності М) і перерегулювання  $\sigma$

Очевидно, на таких цільових функціях двопараметричне завдання безумовної оптимізації на мінімум показника коливальності не може бути поставлене. Однак, по їхніх перетинах можуть бути поставлені однопараметричні завдання безумовної оптимізації, рішення яких складуть геометричне місце точок ліній оптимальних настроювань параметрів  $b$  і  $k$  регуляторів за відповідними критеріями.

На знайдених топографічних картах «ярів» побудовані діаграми якості керування двократно і трикратно інтегруючих систем у частотній і часовій області, наведені на рис. 4. Дугоподібні лінії однакового рівня показника коливальності  $M$  і перерегулювання  $\sigma$  з точками максимуму добротності надалі для стислості називаються ізолініями запасу стійкості. Знайдена і доведена лінія МДС, позначена на діаграмах штрих–пунктиром, розташована точно уздовж дна «яру» між лініями критерію Екслбі і мінімуму квадратичної інтегральної оцінки ( $\min KIO$ ).

Рис. 4. Діаграми якості керування в частотній і часовій області

Визначено формули лівої  $k=b^{-n}$  і правої  $k=b^{-(n-1)}$  меж стійкості, а також середньгеометричне значення  $k=b^{-n+0,5}$  як орієнтири країв і дна яру. Знайдено формули меж варіювання параметра  $b$ :

$$b_1 = \sqrt[n]{k^{-1}}, \quad b_2 = \sqrt[n-1]{k^{-1}}$$

для постановки і розв'язання мінімаксних завдань безумовної оптимізації на лінію МДС в частотній області

$$\max_{\omega \in (\omega_1, \omega_2)} A(k, b, \omega) \rightarrow \min_{b \in (b_1, b_2)} \text{ при } k = const; \quad (1)$$

і в часовій області

$$\max_{t \in (t_1, t_2)} h(k, b, t) \rightarrow \min_{b \in (b_1, b_2)} \text{ при } k = const, \quad (2)$$

де  $A(k, b, \omega)$  – амплітудні частотні і  $h(k, b, t)$  – перехідні характеристики при заданому значенні добротності  $k$  і варіації параметра  $b$ .

Доведено, що при торканні ізолінії заданого рівня добротності до ізолінії заданого рі-

вня запасу стійкості (див. рис. 4) існує точка лінії МДС, а при їхньому перетинанні існує область ПДС сегментообразної форми, позначена затемненням.

На діаграмі трикратно інтегруючої системи рис. 5,а показано, що при кожній точці ліворуч або праворуч від лінії МДС існує замкнута область множини настроювань на більшу добротність і запас стійкості з перетинаючим її відрізком лінії МДС. У верхній точці 3 ( $k_{\max}$ ,  $\sigma_{\max}$ ) відрізка перебуває максимум добротності. У нижній точці відрізка 4 ( $k_{\min}$ ,  $\sigma_{\min}$ ) максимум запасу стійкості. Мінімальні значення запасу стійкості і добротності ( $k_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$ ) належать лівій 2 і правій 1 крайнім точкам області ПДС. Відповідні цим екстремальним точкам перехідні характеристики показані на рис. 5,б.

Рис. 5. Аналіз комплексних критеріїв якості керування

Порівняльний аналіз цих характеристик показує, що відхилення від лінії МДС принципово веде до збільшення перерегулювання, часу регулювання і числа коливань, тобто до погіршення основних показників якості керування. Найгірші значення цих показників відповідають лівій 2 і правій 1 крайнім точкам області. Найкращі, ідеально збалансовані значення належать відрізку МДС. При цьому точка 3 відповідає максимуму добротності  $k_{\max}=12,5 \cdot 10^{-3}$  при значенні перерегулювання  $\sigma = 72\%$  похідного настроювання в точці 1 або 2, а точка 4 – мінімуму перерегулювання  $\sigma = 58\%$  при значенні добротності  $k=7,25 \cdot 10^{-3}$  вихідного настроювання.

Аналіз динамічних помилок по ривку показує, що настроювання на максимум добротності зменшує сталі значення помилки і коливальність перехідного процесу і тим більше, чим далі від лінії МДС перебуває похідна точка.

Сутність оптимального балансу добротності і запасу стійкості наочно розкривається на множині вкладених областей ПДУ (рис. 5,а). Доведено, що мірою розбалансу настроювання є площа цієї області і різниця екстремальних значень добротності і запасу стійкості області, що прагнуть до нуля, по мірі наближення точки настроювання до лінії МДС.

Порівняльний аналіз трьох комплексних критеріїв якості керування по їхніх лініях настроювання

$$\text{МДС} - \max_{t \in (0, 20)} h(k, b, t) \rightarrow \min_{b \in (b_1, b_2)} \text{ при } k = \text{const}; \quad (3)$$

$$\text{Екслбі} - \max_{t \in (0, 20)} h(k, b, t) \rightarrow \min_{k \in (k_1, k_2)} \text{ при } b = \text{const}; \quad (4)$$

$$\min \text{ КІО} - \int_0^{\infty} (1 - h(k, b, t))^2 dt \rightarrow \min_{b \in (b_1, b_2)} \text{ при } k = \text{const} \quad (5)$$

показав (див.рис.5,а), що лінія критерію Екслбі і лінія  $\min$  КІО розташовані на протилежних крутих схилах «яру» з великими відхиленнями від дна «яру» у бік границь стійкості. Їм від-

повідають практично рівні, найгірші значення основних показників якості керування крайніх точок їхніх областей ПДУ.

Дослідженням методом діаграм якості керування стандартних передатних функцій систем з астатизмом другого і третього порядку виявлено значне відхилення їхніх коефіцієнтів від лінії МДС. Розроблено нормовані значення коефіцієнтів по запропонованому комплексному критерію якості керування. Добротність всіх нормованих передатних функцій круто наростає по лінії МДС, випереджаючи ріст перерегулювання, що наочно видно з табл. 1 і табл. 2.

Таблиця 1

Результати оптимізації передатних функцій систем з  $v=2$  при  $n=2\div 6$

Досліджені стандартні передатні функції систем у розімкнутому стані представлені в загальному вигляді формулою в умовних позначках, прийнятих у теорії автоматичного регулювання

$$W(p_*) = \frac{\xi(ap + 1)^{v-1}}{p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_v p^v}, \quad (6)$$

де  $v$  – порядок астатизму 2 або 3;

$n$  – порядок характеристичного полінома зі змінним аргументом  $p$  на  $p_*=p/\Omega_0$  (надалі зірочка при  $p$  опущена);

$\Omega_0$  – середньгеометричний корінь і безрозмірний час, що вводиться у розгляд,  $\tau = t \cdot \Omega_0$ ;

$\xi$  – параметр, що варіюється, який визначає збільшення добротності;

$a$  – параметр, що варіюється, який задає значення коефіцієнтів

$$a_1 = a \text{ при } v=2; \quad a_1 = 2a \text{ і } a_2 = a^2 \text{ при } v=3.$$

У таблицях також наведені значення наступних величин:

$K_\varepsilon$  і  $K_\rho$  – добротність по прискоренню і ривку;

$\sigma$  % – перерегулювання перехідної характеристики;

$\tau_{01}$  і  $\tau_{m1}$  – час досягнення першого узгодження і першого максимуму перехідної характеристики.

Таблиця 2

Результати оптимізації передатних функцій систем з  $v=3$  при  $n=3\div 6$

Результати оптимізації на мінімум перерегулювання при похідному значенні добротності наведені в рядках таблиць, позначених нарядковим індексом  $\sigma$ . Результати оптимізації

на максимум добротності при похідному значенні перерегулювання наведені в рядках, позначених надрядковим індексом  $\xi$ . Надрядковим цифровим індексом 20 або 25, позначені результати оптимізації по лінії МДС із заданим перерегулюванням 20 % або 25 %. Вихідні значення коефіцієнтів наведені в рядках, що починаються зі значення  $n$  без надрядкового індексу.

При  $n=v$  поверхня перерегулювань у просторі параметрів, які варіюються,  $\xi$  і  $a$  не має яру і тому оптимізаційне завдання безумовної оптимізації не може бути поставлене.

Як впливає з таблиць використання оптимізованих по лінії МДС нормованих передатних функцій з астатизмом другого і третього порядку в якості бажаних у синтезі систем може значно підвищити показники якості керування. За узагальненою формулою (6) методом діаграм якості керування проектувальник може знайти для синтезу більше складних систем апроксимуючу лінію МДС поліномом, а також нормовані передатні функції максимальної добротності на будь-яке задане перерегулювання.

**У третьому розділі** запропоновані з урахуванням особливостей цільових функцій у частотній (1) і в часовій (2) області та при впливі різноманітних факторів методи розрахунку і настроювання на лінію максимальної добротності і запасу стійкості. Вони реалізовані в пакетах програм на мовах систем програмування Quick Basic, Turbo Pascal і Matlab і наведені в додатках до дисертації.

У частотній області:

- метод побудови діаграм якості керування за допомогою пакета Matlab;
- метод повного перебору розрахункових точок ізолінії показника коливальності і графопобудова області ПДС;
- метод пошуку стаціонарних точок сідлообразної цільової функції частоти і параметра  $b$  по інтерполюючій поверхні 2-го порядку;
- метод мінімізації функції максимуму АЧХ по сплайну;
- інтерполяційний метод розв'язання зворотного завдання мінімаксної оптимізації по лінії МДС;
- алгоритми точного настроювання параметрів регулятора по лінії МДС.

У часовій області:

- метод побудови діаграм якості керування за допомогою пакета Matlab;
- метод повного перебору розрахункових точок ізоліній перерегулювання і графопобудова області ПДС;
- метод мінімізації перерегулювання з повним перебором розрахункових точок передньої характеристики;
- інтерполяційні методи розв'язання зворотного завдання мінімаксної оптимізації на

максимум добротності при заданому запасі стійкості;

- алгоритми точного настроювання параметрів регулятора по лінії МДС.

У роботі показано, що найбільш універсальним для одномасових систем є метод діаграм якості керування, реалізований у сценаріях повністю автоматизованого дослідження умовно стійких ЕМС у середовищі Simulink-Matlab. Мінімаксний метод максимального демпфування астатичним регулятором багатомасових систем може бути застосований і для систем з розподіленими параметрами.

У четвертому розділі методи, розроблені для одноканальних систем, узагальнені на більш складні умовно стійкі багатоконтурні і багатоканальні СПР зі спостерігачами стану, ПІ- ПІ<sup>2</sup>- ПІД-регуляторами і комбінованим керуванням, зв'язані по навантаженню загальним механізмом або ітераційним алгоритмом функціонування, і розроблені супутні методики, що спрощують їхнє точне настроювання на лінію МДС.

Запропоновано багатомірну структуру (рис. 6) автономних СПР із багатоз'вязаним по навантаженню електроприводом і комбінованим керуванням з мінімальним порядком передатних функцій компенсуючих зв'язків  $C_{ij}(j\omega)$  та  $K_{yi}(j\omega)$  і незалежності їхнього настроювання від параметрів регуляторів  $\mathbf{R}$  і зворотних зв'язків  $\mathbf{H}$ . При однакових комплексних передатних функціях підлеглих контурів каналів  $\Phi_{ni}(j\omega) \equiv \Phi_{nj}(j\omega)$  перехресні зв'язки компенсатора гранично спрощуються до виду

$$C_{ij}(j\omega) = W_j(j\omega)W_{ij}(j\omega), \quad (7)$$

де  $W_j(j\omega)$  – передатна функція прямого каналу об'єкта керування;

$W_{ij}(j\omega)$  – передатна функція перехресного зв'язку об'єкта керування.

Для додаткового підвищення порядку астатизму по керуванню на одиницю без зниження запасів стійкості методом мінімізації сталої помилки від сигналу, що змінюється за законом степеневі функції, запропонований наступний алгоритм настроювання диференціюючих зв'язків  $K_y$  комбінованого керування:

- підвищуючи ступінь типового вхідного сигналу визначити вихідний порядок астатизму, при якому стали значення помилки досліджуваного каналу відмінно від нуля і ще не зростає в часі;

- включити диференціюючий зв'язок у каналі комбінованого керування і варіацією його коефіцієнта передачі  $K_{yi}$  мінімізувати сталі значення помилки.

Алгоритм універсально застосований до всіх розглянутих систем, не вимагаючи їхньої ідентифікації і розрахунків.

Розроблено методику і параметрично оптимізовану методом діаграм якості керування на лінію МДС двоканальну ітераційну систему з ПІ-регулятором точного каналу (Рис. 7).

Рис. 7. Структурна схема ітераційної системи і діаграма якості керування

Її діаграма якості керування в площині параметрів інтегральної  $K_{\text{и}}$  і пропорційної  $K_{\text{п}}$  складових ПІ-регулятора точного каналу візуалізує результати налаштувань ПІ-регулятора у всій області припустимих значень параметрів і найкращих по лінії МДС в межах  $34\% < \sigma < 68\%$ . У дисертації методом дослідження експериментів визначені апроксимуючі поліноми для розрахунку параметрів ПІ-регулятора точного каналу на лінію МДС ітераційної системи. Вони мають вигляд:

$$K_{\text{и}} = + 0,0002\sigma^2 + 0,0061\sigma + 0,0515; \quad (8)$$

$$K_{\text{п}} = +0,0006\sigma^2 - 0,01092\sigma + 3,619. \quad (9)$$

Відзначено, що при налагодженні параметр  $K_{\text{п}}$  уточнюється варіацією на мінімум перерегулювання без ідентифікації такої складної системи.

Розроблено методику і параметрично оптимізован методом діаграм якості керування на лінію МДС спостережний електропривод (СЕП) золотникового розподільника (рис. 8). На відміну від типової триконтурної СПР він має підвищену смугу пропускання та порядок аста-тизму по керуванню і не має потреби в датчику швидкості. Об'єкт регулювання складається з підлеглої контури струму і двох інтегруючих ланок, що перетворюють момент двигуна у швидкість і положення. Результатом синтезу зовнішнього трикратно інтегруючого контуру цієї системи з астатизмом першого порядку по збурюванню є ПІД-регулятор положення (РП), принципова аналогова схема якого наведена на (рис. 8,б).

Рис. 8. Схема моделі комбінованого СЕП (а), його діаграма якості керування (б) і принципова електрична схема ПІД-регулятора положення (в)

За обраними на діаграмі якості керування (рис.8,б) значеннями параметрів у відносних одиницях розраховуються абсолютні значення параметрів ПІД-регулятора конкретного СЕП з урахуванням базового часу. Для параметричного синтезу параметрів по лінії МДС зроблена регресійним аналізом інженерна методика у вигляді апроксимуючих поліномів другого порядку:

$$\sigma = - 0,602k^2 + 8,64k + 17,5; \quad (10)$$

$$k = + 0,0048\sigma^2 - 0,148\sigma + 1,77; \quad (11)$$

$$b = +0,014\sigma^2 - 1,42\sigma + 46,5; \quad (12)$$

$$k = +0,056b^2 - 2,07b + 20,1 \quad (13)$$

При заданому значенні перерегулювання в межах  $26\% < \sigma < 50\%$  по поліному (11) розраховується максимальне значення добротності, а по поліному (12) відповідне оптимальне значення параметра  $b$ . Поліном (13) описує лінію МДС. При заданому в межах діаграми

(рис.8,в) значенні добротності розраховується мінімальне значення перерегулювання по поліному (10).

Таким чином, розглянута різноманітність систем автоматичного керування, настроєних на максимальну добротність і запас стійкості, підтверджує узагальнений характер теоретичних результатів роботи, в основі якої лежить знайдена лінія МДС. Установлено, що важливим достоїнством комплексного критерію настроювання на лінію МДС є простота балансування показників якості керування безпосередньо на діючій системі без її ідентифікації і розрахунків тільки за рахунок варіації опорів у ланцюгах об'язки операційних підсилювачів астатичного регулятора єдиним органом настроювання (наприклад опорів  $R_{21}$  і  $R_{20}$  рис. 8,б). Результати цієї варіації відбиті на рис. 9, де представлена множина перехідних характеристик, на яких чітко проявляється відповідність мінімуму перерегулювання лінії МДС.

**У п'ятому розділі** розглядаються методи поліпшення якості керування СПР при істотному впливі нелінійностей, засновані на використанні запропонованих діаграм.

Рис.10. Схема набору моделі електропривода ТП-Д з урахуванням падаючої ділянки навантаження

Існування в об'єкті керування СПР швидкості нелінійного в'язкого тертя з падаючою ділянкою навантажувальної характеристики погіршує показники якості керування і створює умови виникнення автоколивань. Для одержання діаграм якості керування, що дають наочне подання результатів у всій області припустимих настроювань параметрів ПІ-регулятора швидкості і найкращих по лінії МДС, а також для супровідного визначення апроксимуючих залежностей інженерної методики розрахунку оптимальних значень параметра  $b$ ,  $k_{\max}$  або  $\sigma_{\min}$ , використовуюються сценарії дослідження умовно стійких систем з немінімально фазовими ланками в середовищі Matlab за схемою набору моделі (рис. 10).

Отримані діаграми якості керування (рис. 11,а) є зразком зручної інженерної методики вибору оптимальних значень параметрів пропорційного і інтегрального компонентів ПІ-регулятора по лінії МДС. З рис. 11,а випливає, що в межах  $0 < K_{17} < -1,1$ ;  $2 < K_5 < 6$ ;  $1 < K_3 < 5$  система стійка (навіть при нестійкому об'єкті керування при  $K_{17} = -1,1$ ), всі ізолінії перерегулювання унімодальні, максимум значення коефіцієнта передачі інтегральної складової ПІ-регулятора швидкості відповідає максимальній добротності і мінімальній параметричній чутливості системи. При будь-яких інших значеннях узагальнених параметрів і ускладненні структурної схеми системи, а також при використанні моделей в абсолютних одиницях діаграма якості перераховується в межах декількох хвилин за допомогою розроблених програм як у часовій, так і в частотній області.

Рис.11. Діаграми якості керування системи в часовій області при негативних (а) значеннях і позитивних (б) коефіцієнта в'язкого тертя

Діаграми якості керування (див. рис. 11,б) є прикладом зручної інженерної методики вибору оптимальних значень параметрів пропорційного і інтегрального компонентів ПІ-регулятора по лінії МДС і у випадку позитивного значення коефіцієнтів в'язкого тертя, що має місце в електроприводах гребних гвинтів і будь-яких інших механізмів з вентиляційним навантаженням.

Для системи (рис. 10) встановлено, що в межах  $0 < K_{17} < 1,1$ ;  $2 < K_5 < 6$ ;  $1 < K_3 < 5$  система стійка. Усі її ізолінії перерегулювання також унімодальні, максимум значення інтегральної складової ПІ-регулятора швидкості відповідає максимальній добротності і мінімальній параметричній чутливості системи.

Розроблені обчислювальні процедури і діаграми якості керування з лінією МДС дозволяють синтезувати параметри додаткового ПІ- коригувального пристрою, який вводиться у контур швидкості з коефіцієнтом передачі інтегрального компонента  $K_{20}$ , рівному значенню коефіцієнта в'язкого тертя ( $K_{20} = K_{17}$ ), що сприяє збереженню порядку астатизму системи по керуванню, який зменшується на одиницю при впливі в'язкого тертя в навантаженні.

Діаграма якості системи при  $K_{17} = 1,1$  і додатковому ПІ-компенсуючому пристрою з коефіцієнтом передачі інтегральної компоненти  $K_{20} = 1,1$  (рис. 11,б) ілюструє такі ж показники якості керування, як і при відсутності в'язкого тертя (див. рис. 11,б при  $K_{17} = 0$ ). Знайдено формули (14 – 17) розрахунку оптимальних значень параметрів основного ПІ-регулятора швидкості в такій компенсованій системі:

$$\sigma = -1,075 K_{\text{и}}^2 + 18,3 K_{\text{и}} - 0,207; \quad (14)$$

$$K_{\text{и}} = +0,00067 \sigma^2 + 0,275 \sigma - 0,405; \quad (15)$$

$$K_{\text{п}} = 0,0063 \sigma^2 + 0,33 \sigma + 1,75; \quad (16)$$

$$K_{\text{п}} = a_1 K_{\text{и}} + a_0; \quad a_1 = 0,372; \quad a_0 = 1,7. \quad (17)$$

При високоякісному налагодженні системи (рис. 10) з додатковим ПІ-компенсуючим пристроєм зручним є застосування запропонованого модифікованого ПІ-регулятора швидкості (рис. 12) з постійними коефіцієнтами, рівними згідно з (17)  $a_1 = 0,372$  і  $a_0 = 1,7$ , які уточнюються експериментально на холостому ході системи ( $K_{17} = 0$ ) при  $K_{20} = 0$ .

Рис. 12. Структурна схема системи з ПІ-компенсуючим пристроєм модифікованим ПІ-регулятором швидкості

У цьому випадку варіацією коефіцієнта  $k$  у модифікованому регуляторі швидкості експериментально встановлюється прийнятне значення перерегулювання системи на лінії МДС в межах  $20\% < \sigma < 80\%$ . Далі система навантажується робочим значенням в'язкого тертя і варіацією  $K_{20}$  у ПІ-компенсуючому пристрої експериментально встановлюється перерегулювання системи на обраному рівні  $\sigma_0$ . У результаті система здобуває астатизм другого порядку по керуванню і по навантаженню, максимальну добротність і мінімальну параметричну чутливість при заданому запасі стійкості  $\sigma_0$ . Варто підкреслити, що в процесі вище наведеної методики настроювання не потрібно вимірювати значення коефіцієнта в'язкого тертя  $K_{17}$  та параметричної ідентифікації всього об'єкта керування.

У даному розділі також досліджені способи нелінійного обмеження підлеглої координати в багатократно інтегруючих СПР. Запропонована структурна схема СПР з ПІ<sup>2</sup>-регулятором швидкості і змінною кратністю інтегрування при нелінійному обмеженні завдання на підлеглий контур струму, стійка у великому і цілому (рис. 13).

Рис. 13. Схема моделювання комбінованої СПР електропривода постійного струму з ПІ<sup>2</sup>-регулятором швидкості змінної кратності інтегрування при нелінійному обмеженні підлеглої координати

Дослідження проведені для електропривода з наступними паспортними даними: двигун типу П24/160-6,8:  $P_n=6800$  кВт;  $U_n=850$  В;  $I_n=8460$  А;  $\omega_n=6,28$  с<sup>-1</sup>;  $M_n=1,08 \cdot 10^6$  Нм; тиристорний перетворювач типу ТПП1:  $U_{dн}=1050$  В,  $I_{dн}=10-12.5$  кА. Аналогова СПР спроектована за типовою методикою на мікросхемних операційних підсилювачах з напругою живлення 10 В.

При постійній кратності інтегрування і стрибку завдання  $U_{zc}=2,3$  В система перебуває на нестійкому граничному циклі (рис. 14,б), генеруючи коливання швидкості трикутної форми під відсічення струму з частотою 2,05 Гц. При постійній кратності інтегрування і стрибку завдання більше 2,3 В (рис. 14,в) мають місце розбіжні реверсивні коливання швидкості трикутної форми під відсічення струму зі зменшенням частоти коливань до моменту насичення тиристорного перетворювача.

Таким чином, система нестійка у великому і розбіжних коливаннях виникають уже при стрибку завдання 25 % від номінального значення.

Рис. 14. Перехідні процеси СПР з насиченням вузла завдання струму:

- а), б), в) з постійною кратністю інтегрування;
- г), д), е) зі змінною кратністю інтегрування;
- а) і г)  $U_{zc}=2,3$  В; б) і д)  $U_{zc}=2,32$  В; в) і е)  $U_{zc}=10$  В.

Перехідні процеси при тих же стрибках завдання, але зі змінною кратністю інтегру-

вання, наведені на рис. 14,з,д,е. Вони ілюструють стійкість системи і прийнятну якість керування у великому. При цьому зі зростанням стрибка завдання якість керування зростає і у границі прагне до оптимального по швидкодії з обмеженням координат.

**У шостому розділі** з використанням діаграм якості керування досліджені дискретні одномасові умовно стійкі ЕМС і визначений вплив дискретності цифрового регулятора на лінію МДС. Дискретна передатна функція замкнутої багатократно інтегруючої системи у формі w-перетворення має вигляд

$$|\Phi(jv)| = \left| \left( 1 + \frac{(jv)^n}{kW_m(jv)} \cdot \prod_{i=1}^{n-1} (1 + jb_i v) \right)^{-1} \right|, \quad (18)$$

де  $v = \lambda T_6$  – псевдочастота в в.о.;

$W_m(jv)$  – високочастотна частина АЧХ розімкнутої системи;

$a = 1/(\lambda_{cp} T_6)$  – параметр частоти зрізу ЛАЧХ розімкнутої системи;

$b_i = 1/(\lambda_i T_6)$  – параметри низькочастотних сполучень асимптотичної ЛАЧХ;

$T_6 = \Sigma T_{\mu} + T/2$  – базовий час, рівний сумі малих некомпенсованих постійних часу і напівперіоду дискретності;

$$k = a \cdot \prod_{i=1}^{n-1} b_i \text{ – добротність в в.о.}$$

Для СПР з цифровими регуляторами при всіх  $b_i = b$  і настроєним на модульний оптимум підлеглим контуром побудовані в площині «частотний показник коливальності  $M$  – параметр частоти зрізу  $a$ » лінії однакового рівня добротності  $k$  (рис. 15). Всі ізолінії добротності унімодальні. По їхніх точках мінімуму проходить знайдена лінія МДС.

Рис.15. Ізолінії добротності дискретної СПР у площині показник коливальності  $M$  – параметр частоти зрізу  $a$  і лінія МДС

Чисельні експерименти на дискретних системах з ПІ– і ПІ<sup>2</sup>–регуляторами в часовій області на еквівалентних моделях в z-перетворенні підтвердили існування лінії МДС і інженерну точність діаграм з урахуванням напівперіоду дискретності. У такий спосіб показано, що діаграми якості керування з автоматично певної по розроблених програмах лінією МДС мають загальний характер. Вони рівною мірою успішно можуть використовуватися для параметричної оптимізації як аналогових, так і дискретних регуляторів СПР.

**У сьомому розділі** розроблені методики мінімаксного демпфування астатичним регулятором коливань у багатомасових СПР електроприводів постійного і змінного струму із

в'язким тертям.

Універсальність методу діаграм якості керування ілюструє виконаний параметричний синтез СПР спірально-гвинтового транспортера (СГТ) з електроприводом ТПН-АД (рис.16) при спільному впливі таких негативних факторів як багатомасовість і негативне в'язке тертя.

#### ис.16. Модель дослідження СПР СГТ

Отримана за допомогою розробленої автоматизованої комп'ютерної технології діаграма якості керування даним електроприводом у площині параметрів ПІ-регулятора швидкості (рис. 17,*a*) і коефіцієнти апроксимуючих ліній МДС поліномів є зручною інженерною методикою його параметричного синтезу на кращу якість керування.

$$k = -0,0024M^2 + 0,2281M - 3,5183; \quad (19)$$

$$b = +0,0005M^2 - 0,0387M + 0,7699 \quad (20)$$

З діаграми випливає, що при вихідних значеннях добротності  $k=1$  і параметра  $b=0,056$  вихідне значення частотного показника коливальності  $M=50$ , а на лінії МДС при  $k=1$  і  $b=0,112$  у два рази менше  $M=28$ .

Відповідні АЧХ наведені на рис. 17,*б* в області частот до  $200 \text{ с}^{-1}$ . Вони включають резонансні частоти у двомасовій механічній частині, підтверджують очікуване відповідно до діаграми якості керування дворазове зниження резонансного піка системи при настроюванні на ліній МДС регулятора з параметрами  $k=1$  і  $b=0,112$ . При знайдених параметрах настроювання регулятора зменшується амплітуда пружних коливань. Для зниження небажаної коливальності при збудуванні по керуванню до практично прийнятної на вході завдання поставлений фільтр першого порядку  $1/(bs+1)$ . Досягнуті результати з перехідних характеристик наведені на рис. 17,*в*.

Даний розділ включає також дослідження і параметричну оптимізацію по запропонованому комплексному критерію якості керування в частотній області двомасового електропривода постійного струму за допомогою розробленого і програмно реалізованого методу багатополосника.

**У восьмому розділі** представлена додаткова експериментальна перевірка основних наукових положень дисертації і наводяться результати впровадження електроприводів з багатократно інтегруючими контурами керування. Більшість теоретичних результатів роботи, отриманих у попередніх розділах, серед яких знаходження діаграм якості керування, побудова ліній МДС, розробка комп'ютерних методик автоматизованого проектування, параметрична оптимізація відповідних компонентів ПІ-регуляторів, ґрунтувалося на аналізі конкретних промислових електроприводів вітчизняного виробництва. Розглядалася оптимізація парамет-

рів у багатократно інтегруючих контурах СПР головних електроприводів реверсивних (типу блюмінг) і безперервного прокатного станів, двоканальної системи автоматичного регулювання різнотовщинності прокатної смуги металу, слідкуючого електропривода, привода подачі металорізальних верстатів і високошвидкісного ліфта.

У зв'язку із цим у розділі основна увага приділена аналізу подібних імпортних систем. Стендові дослідження проведені на лабораторній установці тиристорного ЕП постійного струму з мікропроцесорним управлінням типу Simoreg фірми Siemens, розробленої для високоякісного регулювання швидкості електродвигунів постійного струму за принципом підлеглого регулювання з повністю цифровим керуванням. Варіацією коефіцієнта підсилення пропорційного компонента при сталості інтегрального компонента цифрового ПІ-регулятора швидкості експериментально встановлене існування лінії МДС і підтверджена вірогідність теорії оптимального балансу добротності і запасу стійкості. При цьому вдалося знизити перерегулювання на 5 %, а при вихідному перерегулюванні збільшити коефіцієнт добротності в 1,2 рази.

Існування лінії МДС експериментально встановлено і у лабораторній установці транзисторного електропривода змінного струму з перетворювачем типу Simovert серії 6SE21 при варіації коефіцієнта пропорційної частини ПІ-регулятора швидкості, що підтвердило універсальність алгоритму настроювання по запропонованому комплексному критерію якості керування багатократно інтегруючих систем. Тут також можливе збільшення запасу стійкості або контурного коефіцієнта підсилення в зазначені вище межах.

У розділі виконаний синтез двократно інтегруючих ЕМС п'ятого порядку з використанням стандартних передатних функцій, нормованих за запропонованим комплексним критерієм якості керування. Обґрунтовано збільшення добротності в 1,083 рази при перерегулюванні 10,2 %, в 2,58 рази при перерегулюванні 20 % і в 6,5 рази при перерегулюванні 40 %. Добротність усіх трикратно інтегруючих систем також різко наростає по лінії МДС, випереджаючи ріст перерегулювання.

Нормовані по запропонованому комплексному критерію якості керування передатні функції використовуються в держбюджетних науково-дослідних роботах кафедри АЕМС НТУ «ХП» і провідними електротехнічними фірмами України для параметричного синтезу високоякісних електромеханічних систем.

Настроювання на лінію МДС використовуються в навчальному процесі кафедри АЕМС НТУ «ХП» з курсів «Системи керування електроприводами», «Програмне керування механізмами», «Математичні основи теорії автоматичного керування», «Нові фізичні і математичні методи керування, виміру і контролю електромеханічних систем».

У додатку до дисертації наведені довідки про використання результатів роботи про-

відними електротехнічними підприємствами АТ «Важпромелектропроект», АТЗТ «Важпромавтоматика», НВК «КІА» і «Хартрон-аркос» у електроприводах постійного і змінного струму промислових установок України і країн СНД, які модернізуються.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі розв'язання мінімакських завдань у частотній і часовій області розвинена теорія оптимального балансу добротності і запасу стійкості багатократно інтегруючих систем і розроблені нові методи їхньої параметричної оптимізації за вперше запропонованому комплексному критерію максимальної добротності і запасу стійкості, гранично поліпшуючий баланс цих конфліктуючих показників і та спрощуючий їхню реалізацію. Методи засновані на комп'ютерній технології автоматизованого моделювання, для чого створено більше десяти пакетів прикладних програм. На їхній основі визначені резерви поліпшення динамічної точності і основних показників якості керування стандартних передатних функцій систем з астатизмом другого і третього порядку, а також традиційно настроєного безперервного і дискретних СПР електропривода з одномасовою і двомасовою кінематикою, з ПІ- ПІ<sup>2</sup>- і ПІД-регуляторами швидкості і положення, спостерігачами стану і комбінованим керуванням, у тому числі і багатозв'язних по навантаженню загальним технологічним об'єктом керування або багатоканальною ітераційною структурою керування.

Отримані в дисертації результати в сукупності становлять істотний внесок у розв'язання проблеми поліпшення динамічних показників багатократно інтегруючих систем підлеглого регулювання електроприводів постійного і змінного струму як з аналоговими, так і дискретними регуляторами.

1. Визначено оптимальний баланс добротності і запасу стійкості багатократно інтегруючих систем і розроблена комп'ютерна технологія повністю автоматизованої побудови їхніх діаграм якості керування з областями ПДС і перетинаючою її лінією МДС.

2. Розроблено методики кількісної оцінки резервів підвищення якості керування настроєних не по лінії МДС складних ЕМС із двократно і трикратно інтегруючими контурами по характерних точках їхньої області ПДС на діаграмі якості керування.

3. Виконано порівняльний аналіз комплексних критеріїв якості керування по відповідних лініях параметричної оптимізації на діаграмах і обґрунтована оптимальність мінімакського критерію мінімуму показника коливальності при заданій добротності в частотній і часовій області.

4. Розроблено на основі оптимального балансу методики підвищення якості керування і спрощення настроювання багатоконтурних і багатоканальних СПР.

5. Розроблено методи поліпшення якості керування багатократно інтегруючих СПР

при істотному впливі нелінійностей.

6. Враховано вплив дискретності цифрових регуляторів на лінію МДС.

7. Розроблено мінімаксні методи демпфірування астатичним регулятором коливань багатомасових СПР.

8. Розроблено нормовані на основі запропонованого комплексного критерію якості керування передатні функції і ЛАЧХ у якості бажаних для синтезу систем СЕП з астатизмом другого і третього порядку підвищеної якості керування.

9. Створено пакет програм автоматизованого моделювання і параметричної оптимізації по розроблених комплексних критеріях якості керування безперервної і дискретних ЕМС великої складності в часовій і частотній області.

Практичне значення отриманих наукових результатів полягає в скороченні термінів проектування і настроювання з підвищеною точністю СПР складних електроприводів, які модернізуються та знов створюються, а також у підвищенні їхньої якості керування ціною незначних затрат. Вони можуть бути використані при створенні і реконструкції ЕМС керування технологічними об'єктами в тому числі систем автоматичного регулювання товщини прокатної металевої смуги, електроприводів подач верстатів із числовим програмним керуванням, роботів і папероробних машин, систем точного позиціювання високошвидкісних ліфтів, багатоканальних систем спостереження і наведення в астрономічних телескопах.

## **СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Многократноинтегрирующие системы управления /В.Б. Клепиков, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко, А.И. Гуль, Г.Г. Грабовский, Н.О. Рюмшин, А.А. Самецкий, С.Н. Шавловский. – К.: НВК «КІА», 1998. – 244 с.

Здобувачу належить постановка та розв'язання задач параметричної оптимізації дискретних двократно та трикратно інтегруючих систем підпорядкованого регулювання одно-масового електропривода на мінімум показників коливальності при заданій добротності по комплексним передавальним функціям та оптимальне розв'язання їх багатозв'язних за навантаженням каналів по критерію мінімальної складності фізично реалізованих перехресних компенсуючих зв'язків.

2. Богданова Н.В., Гуль А.И., Зарифа Б.С. Параметрическая оптимизация двукратноинтегрирующей системы подчиненного регулирования электропривода с упругим механическим звеном // Вестник Харьковского политехнического института. Сер. «Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий». – Харьков: ХПИ. – 1992. – Вып. 17. – С. 91–94.

Здобувачу належить постановка задач параметричної оптимізації аналогових систем підпорядкованого регулювання двомасового електропривода з пружною ланкою на максимальне демпфірування в частотній області ПІ-регулятором.

3. Кузнецов Б.И., Гуль А.И., Курцева Л.Б. Математическая модель беспоршневого электрогидравлического исполнительного механизма // Изв. вузов. Электромеханика. – 1994. – № 1-2. – С. 41–47.

Здобувачу належить аналітичне розв'язання задачі вібраційного згладжування та лінеаризації математичної моделі електрогидравлічного виконавчого механізму з істотно нелінійною ланкою золотникового розподільника з позитивним перекриттям.

4. Клепиков В.Б., Гуль А.И. Многомерная оптимизация параметров двукратноинтегрирующих цифро-аналоговых систем электропривода // Электричество. – 1995. – № 11. – С. 42–46.

Здобувачу належить постановка та рішення задач параметричної оптимізації дискретних двократно інтегруючих систем підпорядкованого регулювання одномасового електропривода на максимум добротності при заданому показнику коливальності по комплексній передавальній функції двох перемінних: псевдочастоті та параметру форсуючої частини ПІ-регулятора зовнішнього контуру.

5. Гуль А.И., Абдульмалик Дж.С. Методики высокоточной минимаксной оптимизации одномассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1997. – Вып. 7. – Ч. 1. – С. 21–25.

Здобувачу належить постановка та обґрунтування мінімаксної задачі параметричної оптимізації умовно стійкої електромеханічної системи з ПІ-регулятором на мінімум показника коливальності при заданій добротності з урахуванням впливу від'ємного в'язкого тертя.

6. Гуль А.И. Интерполяционное дополнение частотных методов структурного моделирования сложных электромеханических систем // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып. 14. – С. 38–44.

7. Гуль А.И. Минимакс – нетрадиционный принцип оптимального выбора параметров ПИ-регуляторов электромеханических систем // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – С. 89–92.

8. Гуль А.И. Минимаксные методы повышения показателей качества регулирования и понижения параметрической чувствительности электромеханических систем с пропорционально-интегральными регуляторами // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – С. 93–96.

9. Гуль А.И. Повышение качества регулирования тиристорных электроприводов не-

прерывных прокатных станов минимаксными методами // *Технічна електродинаміка*. – Київ, 1998. – Спец. вип. 2. – Т. 2. – С.105–110.

10. Гуль А.И., Булук Мессауд Выбор принципа и критериев оптимизации ПИ-регулятора электромеханической системы // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып. 21. – С.104–108.

Здобувачу належить постановка та обґрунтування мінімаксної задачі параметричної оптимізації умовно стійкої електромеханічної системи з ПІ-регулятором на мінімум показника коливальності при заданій добротності.

11. Гуль А.И., Мессауд Булук Метод поиска стационарных точек функции двух переменных по интерполирующей поверхности второго порядка // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып. 27. – С.22–25.

Здобувачем розроблено чисельний метод високої збіжності для пошуку мінімуму частотного показника коливальності багатократно інтегруючих систем зі стаціонарною сідловою точкою на цільовій функції двох перемінних.

12. Гуль А.И., Юдина А.А. Метод интерполирующей поверхности для минимаксной оптимизации тиристорного электропривода на максимальный запас устойчивости при повышенной добротности // *Технічна електродинаміка*. – Київ, 1999. – Тематичний випуск. – С. 109–112.

Здобувачем розроблено чисельний метод високої збіжності для пошуку мінімуму частотного показника коливальності багатократно інтегруючих систем зі стаціонарною сідловою точкою на цільовій функції двох перемінних з перевіркою типу цієї стаціонарної точки.

13. Гуль А.И. Некоторые пути повышения качества управления астатических электромеханических систем // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 61. – С. 127–130.

14. Гуль А.И., Булук Мессауд Оптимизация параметров системы подчиненного регулирования с ПИ-регулятором скорости и наблюдателем состояния на максимальный запас устойчивости // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып. 27. – С.17–21.

Здобувачу належить постановка та обґрунтування мінімаксної задачі параметричної оптимізації умовно стійкої електромеханічної системи з другим ПІ-регулятором в каналі спостерігача стану.

15. Гуль А.И. Минимаксная оптимизация параметров ПИ-регуляторов на максимальный запас устойчивости электромеханических систем при повышенной добротности // *Электротехника*. – 1999. – № 5. – С. 25–29.

16. Гуль А.И., Мессауд Булух Настройка комбинированной системы следящего электропривода с ПИ-регулятором на максимальный запас устойчивости и повышенную добротность // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 30. – С. 75–77.

Здобувачу належить налаштування пропорційної складової ПІ-регулятора двократно інтегруючого зовнішнього контуру на мінімум перерегулювання при заданому традиційному значенні добротності та підвищення порядку астатизму по управлінню налаштування коефіцієнту передачі диференціюючого зв'язку комбінованого керування методом мінімізації сталої похибки від статичного сигналу.

17. Гуль А.И. Улучшение минимаксными методами качества управления электромеханических систем с пропорционально-интегральными корректирующими устройствами // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 44. – С. 46–48.

18. Гуль А.И. Настройка параметров ПИ-регулятора точного канала на максимальный запас устойчивости квазиитерационной системы // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 45. – С. 56–59.

19. Гуль А.И. Структурно-параметрическая оптимизация автономной системы многосвязных электроприводов с комбинированным управлением и цифровыми ПИ-регуляторами // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 46. – С. 72–75.

20. Гуль А.И. Повышение качества управления многократноинтегрирующих систем подчиненного регулирования при ограничении координат // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 47. – С. 87–89.

21. Гуль А.И. Методики расчета параметров пропорционально-интегральных регуляторов электромеханических систем с максимальным запасом устойчивости и повышенной добротностью // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 55. – С. 86–88.

22. Гуль А.И. Методы синтеза и настройки астатических систем по линии максимального запаса устойчивости // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 66. – С. 141–145.

23. Гуль А.И., Мессауд Булух Методика настройки комбинированной двухканальной системы подчиненного регулирования на повышенный порядок астатизма // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 77. – С. 62–64.

Здобувачу належить налаштування пропорційної складової ПІ-регулятора основного

каналу та каналу спостерігача стану двократно інтегруючого зовнішнього контуру на мінімум перерегулювання при заданому традиційному значенні добротності та підвищення порядку астатизму по управлінню настроювання коефіцієнту передачі диференціюючого зв'язку комбінованого керування методом мінімізації сталої похибки від статичного сигналу з урахуванням впливу другого каналу спостерігача стану.

24. Гуль А.И., Мессауд Булух Оптимальное соотношение добротности и устойчивости двукратноинтегрирующих электромеханических систем // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 128. – С. 150–158.

Здобувачу належить постановка питання та визначення оптимального відношення добротності та запасу стійкості двократно інтегруючих систем на лінії максимальної добротності та запасу стійкості.

25. Гуль А.И. Диаграммы качества управления многократноинтегрирующих систем // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 113. – С. 119–123.

26. Гуль А.И. Оптимальный баланс добротности и запаса устойчивости астатических систем // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001. – Вып. 10. – С. 329–339.

27. Гуль А.И. Оптимизация соотношения добротности и запаса устойчивости трехкратноинтегрирующих электромеханических систем // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001. – Вып. 14. – С. 329–339.

28. Гуль А.И. Комплексный критерий качества управления многократно интегрирующими систем // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2002. – Вып.12. – Т.1. – С. 152–157.

29. Гуль А.И., Лимонов Л.Г., Мессауд Булух Настройка добротности и запаса устойчивости систем подчиненного регулирования электропривода подачи // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2002. – Вып.12. – Т.2. – С.497–499.

Здобувачу належить настройка ПІ-регулятора підпорядкованого двократно інтегруючого внутрішнього контуру швидкості на підвищення значення добротності з мінімальним показником коливальності на лінії МДС та наступної настройки ПІ-регулятора положення зовнішнього контуру на підвищену швидкодію аперіодичного процесу та значне зменшення похибки положення при лінійному зростанні навантаження.

30. Гуль А.И. Балансировка добротности и запаса устойчивости электромеханических систем // Электротехника. – 2003. – №4. – С. 55–62.

31. Gull A.I., Boulouh M., El-Jabali A.K. Improving the performance of multiple integrated

cascade systems under limitation of coordinates // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – Вып.10 – Т.1. – С. 87–89.

Здобувачем запропонована уніфікація блоку керуючих пристроїв з підвищеним порядком астатизму по управлінню та збурюванню СПР швидкості, граничним підвищенням якості управління настройки по лінії МДС та стійкості в великому та цілому при нелінійному обмеженні завдання, підпорядкованого контуру струму в результаті змінної кратності інтегрування.

32. Акимов Л.В., Гуль А.И. Синтез регуляторов подчиненных контуров на основе оптимизированных нормированных передаточных функций систем с астатизмом второго порядка // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – Вып. 10. – Т. 2. – С. 345–350.

Здобувачу належить розробка оптимізованих нормованих передавальних функцій з астатизмом другого порядку на максимум добротності та запасу стійкості.

33. Гуль А.И. Робастная настройка комбинированной системы следящего электропривода с двукратноинтегрирующим контуром // Труды Междунар. научно-техн. конф. «Информационные технологии: наука, техника технология, образование, здоровье. – Ч. 3. – Харьков, Мишкольц, Магдебург: ХГПУ, Мишкольцкий университет, Магдебургский университет. – 1997. – С. 48–52.

34. Гуль А.И. Алгоритм поиска стационарных точек функции двух переменных по интерполирующей поверхности // Труды Междунар. научно-техн. конф. «Информационные технологии: наука, техника технология, образование, здоровье. – Ч. 3. – Харьков, Мишкольц, Магдебург: ХГПУ, Мишкольцкий университет, Магдебургский университет. – 1997. – С. 53–56.

35. Гуль А.И. Метод минимаксной оптимизации параметров изодромных регуляторов электромеханических систем во временной области // Информационные технологии: наука, техника технология, образование, здоровье: Сб. научн. тр. – Харьков: ХГПУ, 1998. – Вып. 6. – Ч. 2. – С. 232–237.

36. Гуль А.И. Метод высокоточной минимаксной оптимизации следящего электропривода без подчиненного контура скорости // Информационные технологии: наука, техника технология, образование, здоровье: Сб. научн. тр. – Харьков: ХГПУ, 1998. – Вып. 6. – Ч. 2. – С. 238–245.

37. Гуль А.И. Частотные методы минимаксной оптимизации параметров изодромных регуляторов сложных электромеханических систем // Информационные технологии: наука, техника технология, образование, здоровье: Сб. научн. тр. – Харьков: ХГПУ, 1998. – Вып. 6. – Ч. 2. – С. 247–256.

38. Гуль А.И., Мессауд Булух Унифицированная система подчиненного регулирования скорости с переменной кратностью интегрирования // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 113. – С. 190–193.

Здобувачу належить уніфікація блоку управляючих пристроїв з підвищеним порядком астатизму по управлінню та збурюванню СПР швидкості, граничним підвищенням якості керування настроювання по лінії МДС та стійкості в великому та цілому при нелінійному обмеженні завдання підпорядкованого контуру струму в результаті змінної кратності інтегрування.

39. Гуль А.И. Частотные методы минимаксной оптимизации тиристорного электропривода блюминга // Технічна електродинаміка. – Київ, 1998. – Спец. вип. 2. – Т. 2. – С.111–114.

40. Гуль А.И. Повышение качества управления комбинированной системой следящего электропривода методами математического программирования // Информационные технологии: наука, техника технология, образование, здоровье: Сб. научн. тр. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 7. – Ч. 3. – С.96–100.

## АНОТАЦІЇ

Гуль А.И. Параметрична оптимізація багатократно інтегруючих електромеханічних систем з критерієм максимальної добротності та запасу стійкості. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

– Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2004.

Розвинено теорію оптимального балансу добротності й запасу стійкості багатократно інтегруючих систем і розроблені нові методи їхньої параметричної оптимізації за комплексним критерієм максимальної добротності й запасу стійкості, гранично поліпшуючий баланс конфліктуючих показників якості керування й спрощуючий їхню реалізацію. Розроблено комп'ютерну технологію повністю автоматизованої побудови діаграм якості керування з областями підвищеної добротності й запасу стійкості і перетинаючою її лінією максимальної добротності й запасу стійкості. Визначено резерви поліпшення динамічної точності й основних показників якості керування стандартних передатних функцій з астатизмом другого й третього порядку, а також традиційно настроєних безперервних і дискретних СПР одномасового й двомасового електропривода з ПІ- ПІ<sup>2</sup>- і ПІД-регуляторами швидкості й положення,

спостерігачами стану й комбінованим керуванням, у тому числі й багатозв'язних по навантаженню загальним технологічним об'єктом керування або багатоканальною ітераційною структурою керування.

**Ключові слова:** тиристорний регульований електропривод, багатократно інтегруюча електромеханічна система, комплексний критерій якості керування, діаграма якості керування, максимальна добротність і запас стійкості, стійкість у великому та в цілому, підвищення точності, спрощення настроювання.

Гуль А.И. Параметрическая оптимизация многократно интегрирующих электромеханических систем по критерию максимальной добротности и запаса устойчивости. – Рукопись.

Диссертация на получение научной степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы.

– Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2004.

Развита теория оптимального баланса добротности и запаса устойчивости замкнутых по отклонению многократно интегрирующих условно устойчивых электромеханических систем и разработаны новые методы их параметрической оптимизации по комплексному критерию максимальной добротности и запаса устойчивости, предельно улучшающему баланс конфликтующих показателей качества управления и упрощающий их реализацию. Разработана компьютерная технология полностью автоматизированного построения диаграмм качества управления с областями повышенной добротности и запаса устойчивости и пересекающей ее линией максимальной добротности и запаса устойчивости. Определены резервы улучшения динамической точности и основных показателей качества управления стандартных передаточных функций с астатизмом второго и третьего порядка, а также традиционно настроенных непрерывных и дискретных СПР одномассового и двухмассового электропривода с ПИ- ПИ<sup>2</sup>- и ПИД-регуляторами скорости и положения, наблюдателями состояния и комбинированным управлением, в том числе и многосвязных по нагрузке общим технологическим объектом управления или многоканальной итерационной структурой управления. Предложена устойчивая в большом и целом структура многократно интегрирующих систем подчиненного регулирования с переменной кратностью интегрирования в режимах нелинейного ограничения сигнала задания подчиненной координаты. Предложена многоканальная структура связанных по нагрузке автономных систем подчиненного регулирования с комби-

нированным управлением, обладающая минимальным порядком всех прямых и перекрестных связей и независимости их настройки от настройки регуляторов внешних контуров.

**Ключевые слова:** тиристорный регулируемый электропривод, многократно интегрирующая электромеханическая система, комплексный критерий качества управления, диаграмма качества управления, максимальная добротность и запас устойчивости, устойчивость в большом и целом, повышение точности, упрощение настройки.

Gull A.I. Parametric optimization of multiple-integrating electromechanical systems over a criterion of maximum Q-factor and stability margin. — 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.

A theory of optimal balance of Q-factor and stability margin in multiple-integrating electromechanical systems has been developed and new methods of the systems optimization over a complex criterion of maximum Q-factor and maximum stability margin have been worked out, the criterion significantly improving the balance of inconsistent control quality parameters and simplifying their adjustment. A computer-aided technology for fully-automated control quality plotting with domains of advanced Q-factor and extended stability margin and a transversal line of maximum Q-factor and maximum stability margin has been elaborated. Reserves of advancement of dynamic precision and the basic control quality indexes for both standard transfer functions with second- and third-order astaticism and conventionally-adjusted continuous and discrete subordinate-regulation systems of single- and double-mass electric drives with PI -  $PI^2$  and PID speed and position regulators, state observers and complex control, including multivariable systems linked by a common technological dynamic object or a multichannel iterative controller, have been revealed.

**Key words:** Thyristor control electric drive, multiple-integrating electromechanical system, complex criterion of control quality, control quality diagram, maximum Q-factor and stability margin, global stability in large, precision advancement, adjustment simplification.

Відповідальний за випуск д.т.н., проф. Акімов Л.В.

Підписано до друку 24.03.2004. Формат 145x215

Формат паперу 60x90/16. Папір офсетний

Друк офсетний. Умовн.друк.арк. 1,9.

Тираж 100 прим. Зам. №\_\_\_\_\_

Надруковано в типографії ПП Ізрайлев Є.М.  
Свідоцтво №04058841Ф0050331 від 21.03.2001 р.  
61024, м. Харків, вул.. Гуданова, 4/10.