

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

НІКІТІНА ТЕТЯНА БОРИСІВНА



УДК 685.513.685

**БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ СИНТЕЗ НЕЛІНІЙНОГО РОБАСТНОГО
КЕРУВАННЯ БАГАТОМАСОВИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВІ
АНАЛІТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НЕЛІНІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі системного аналізу і управління
Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Харків.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Куценко Олександр Сергійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри системного аналізу
і управління

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Балюта Сергій Миколайович,
Національний університет харчових
технологій, м. Київ, завідувач кафедри
електропостачання промислових підприємств

доктор технічних наук, доцент
Канюк Геннадій Іванович,
Українська Інженерно-педагогічна академія,
м. Харків, завідувач кафедри
теплоенергетичних установок теплових
і атомних електростанцій

доктор технічних наук, професор
Рогачев Олександр Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри автоматизації і керування в
технічних системах

Захист відбудеться « 15 » грудня 2011 р. о 14-30 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д64.050.07 в Національному технічному
університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий « 9 » _____ 11 _____ 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Северин В. П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Центральною проблемою сучасної теорії і практики автоматичного керування є створення систем, здатних забезпечувати високу точність керування при інтенсивних задаючих та збурюючих діях широкого спектру частот. Підвищення точності роботи електромеханічних систем керування стримується недосконалістю механічних передач від виконавчого двигуна до робочого механізму. Це, перш за все, виявляється при підвищенні смуги пропускання системи, коли частоти власних механічних коливань трансмісії спільно з виконавчим двигуном і робочим механізмом потрапляють в область робочих частот систем керування. При цьому доводиться враховувати наявність пружних елементів між валами виконавчого двигуна, редуктора і робочого механізму і замість одномасовій моделі «двигун – робочий механізм» використовувати двох, трьох, а іноді, і багатомасову модель. Умови роботи електромеханічних систем ускладнюються також наявністю нелінійної залежності моменту (сили) тертя від швидкостей виконавчого двигуна, редуктора і робочого механізму, що проявляється при роботі електромеханічних систем при низьких (повзучих) швидкостях руху робочого органу і може приводити до виникнення незгасаючих коливань.

При проектуванні багатомасових систем керування пред'являються різноманітні вимоги при їх роботі в різних режимах. Як правило, накладаються певні обмеження на якість перехідних процесів – задається час першого узгодження, час регулювання, перерегулювання. Також задається максимальна дисперсія помилки стеження або стабілізації при випадкових задаючих та збурюючих діях, і при цьому, природно, повинні задовольнятися обмеження на змінні стану та керування. Ще однією вимогою, що пред'являється до систем керування, є обмеження помилок відробітку задаючих, або компенсації збурюючих дій у вигляді гармонійних сигналів. При цьому вхідний сигнал може бути заданий однією частотою, або декількома характерними робочими частотами, а може бути заданий діапазон робочих частот, у якому необхідно виконати певні умови. І, нарешті, для стежачих систем підвищеної точності характерним режимом роботи є відпрацьовування малих швидкостей або малих переміщень. Для цього режиму, як правило, задається неплавність руху у вигляді відповідних критеріїв. В більшості практичних випадків за допомогою типових ПІД регуляторів не вдається виконати технічні вимоги, які пред'являються до багатомасових систем, що обумовлює застосування більш складних регуляторів і сучасних методів їх синтезу.

Однією із основних вимог до багатомасових систем є також вимога робастності синтезованих систем, тобто здатність систем зберігати технічні вимоги, що пред'являються до них, при зміні в певних межах параметрів об'єкту керування і зовнішніх дій. Проблемою робастного керування є створення систем, здатних ефективно функціонувати в умовах невизначеності параметрів, а можливо і структури моделей об'єкту керування, збурюючих дій і перешкод вимірювань. Одним із підходів до синтезу робастних систем керування, який сьогодні інтенсивно розвивається, є синтез регуляторів, які мінімізують H_∞ норму

вектора мети керування. Основні труднощі практичного застосування сучасних методів робастного керування пов'язані не стільки із розробкою нових методів керування, скільки із неформальним вибором вектора мети робастного керування, тому що при проектуванні реальних систем керування не пред'являються вимоги до H_∞ норми вектора мети робастного керування, та і сам вектор мети робастного керування не заданий.

У зв'язку з цим розробка концепції багатокритеріального синтезу робастного керування багатомасовими системами так, щоб синтезована система задовольняла усім вимогам, які пред'являються до неї, є актуальною науково-прикладною проблемою, яка визначила напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі системного аналізу і управління НТУ «ХПІ» відповідно до плану держбюджетних НДР МОН України «Розвиток теорії і методів параметричного синтезу багаточільових і багатокритеріальних керованих систем з невизначеними параметрами» (ДР № 0105U000585) та при виконанні госпдоговірних тем за замовленням Львівського науково-дослідного радіотехнічного інституту Міністерства промислової політики України «Розробка математичних моделей об'єктів керування систем наведення і стабілізації легкоброньованої техніки на основі мікрогіроскопів» та «Розробка методики синтезу робастних систем наведення і стабілізації легкоброньованої техніки на основі мікрогіроскопів», де здобувач був відповідальним виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є обґрунтування і розробка перспективної концепції багатокритеріального синтезу робастного керування багатомасовими електромеханічними системами на основі теоретичного розвитку і узагальнення математичних моделей та методів векторної оптимізації показників якості синтезованих систем.

Поставлена мета досягається постановкою та вирішенням комплексу наступних взаємопов'язаних задач.

1. Аналіз існуючих методів синтезу багатомасових електромеханічних систем і можливостей концепції багатокритеріального синтезу робастного керування на підставі моделей і методів векторної оптимізації показників якості.

2. Обґрунтування та дослідження ефективності методу багатокритеріального синтезу робастного керування багатомасовими електромеханічними системами на підставі вибору вагових матриць, за допомогою яких формується вектор цілі робастного керування.

3. Обґрунтування та дослідження ефективності методу параметричного багатокритеріального синтезу багатомасових систем, структура регуляторів яких задається апріорі у вигляді регуляторів стану або типових регуляторів на основі розроблених математичних моделей та векторних критеріїв якості.

4. Удосконалення методу обмеження змінних стану та керування при оптимальному та робастному керуванні за вектором стану.

5. Розвиток математичних моделей багатомасових систем із складними кінематичними зв'язками з урахуванням пружних елементів та нелінійних характеристик зовнішнього тертя у об'єктах керування та у виконуючих пристроях.

6. Розвиток методів і алгоритмів рішення задач багатокритеріальної оптимізації на основі нелінійної схеми компромісів та методу послідовного квадратичного програмування.

7. Математичне моделювання синтезованих систем робастного керування багатомасовими електромеханічними системами із складними кінематичними зв'язками для оцінки підвищення точності та швидкодії, зменшення чутливості до варіації параметрів об'єктів керування і зовнішніх збурень.

Об'єктом дослідження є процеси в багатомасових електромеханічних системах автоматичного керування.

Предметом дослідження є моделі і методи багатокритеріальної оптимізації показників якості багатомасових електромеханічних систем.

Методи дослідження. Фундаментальні положення теорії автоматичного керування застосовані при формуванні задач керування багатомасовими системами, методи простору станів – для опису роботи систем керування. Методи багатокритеріального синтезу нелінійних систем керування на підставі концепції функціонально множинної приналежності вектору стану використані для коректного визначення вектору цілі керування. Методи аналізу і синтезу нелінійних систем робастного керування на основі розв'язання рівняння Гамільтона–Якобі–Беллмана–Айзекса – для синтезу алгоритмів робастного керування. Методи багатокритеріальної оптимізації на підставі нелінійної схеми компромісів – для формування задач багатокритеріальної оптимізації, аналітичні та чисельні методи оптимізації на підставі квазіньютонівських методів та послідовного квадратичного програмування – для рішення задач нелінійного програмування. Сучасні системи комп'ютерної математики, аналітичні та чисельні методи оптимізації застосовані для реалізації запропонованих методів та алгоритмів керування. Методи чисельного моделювання та пакет програм MATLAB – для синтезу систем керування та оцінки показників якості синтезованих систем.

Наукова новизна одержаних результатів. Основний науковий результат роботи полягає в розробці й обґрунтуванні перспективної концепції багатокритеріального синтезу робастного керування багатомасовими електромеханічними системами на підставі теоретичного розвитку і узагальнення моделей і методів векторної оптимізації показників якості.

Наукова новизна визначається наступними положеннями.

1. Вперше формалізовано задачу багатокритеріального синтезу нелінійного робастного керування багатомасовими системами, що дозволяє задовольнити різноманітним вимогам у різних режимах. Показана можливість рішення проблеми багатокритеріального синтезу нелінійного робастного керування на підставі концепції функціонально множинної приналежності вектору стану і задачі розв'язання рівняння Гамільтона–Якобі–Беллмана–Айзекса.

2. Вперше обґрунтовано та розроблено метод вибору вектору мети робастного керування шляхом формування і рішення відповідної задачі багатокритеріальної оптимізації, яка зводиться до рішення задачі математичного програмування.

3. Здійснено подальший розвиток математичних моделей багатомасових систем, що дозволило врахувати наявність пружних елементів та нелінійних характеристик зовнішнього тертя у об'єктах керування та у виконуючих пристроях у вигляді ступеневих рядів.

4. Удосконалено метод рішення задачі синтезу нелінійного робастного керування для систем з аналітичними нелінійностями на підставі використання функцій Ляпунова для синтезу наближено оптимального керування у вигляді ітеративної процедури розв'язання рівняння Гамільтона–Якобі–Беллмана–Айзекса. Першим наближенням для лінеаризованого об'єкта є лінійне робастне керування, яке зводиться до розв'язання двох рівнянь Ріккати по керуванню та спостереженню.

5. Удосконалена нелінійна схема компромісів з внутрішньою та зовнішньою точкою багатокритеріального синтезу.

6. Вперше формалізовано задачу та розроблено метод багатокритеріального параметричного синтезу нелінійного робастного керування багатомасовими системами, структура яких задається у вигляді нелінійних зворотних зв'язків за повним вектором стану системи, який встановлюється за допомогою нелінійних спостерігачів, та векторних критеріїв якості.

7. Удосконалено метод обмеження змінних стану при оптимальному та робастному керуванні за повним вектором стану шляхом використання селектора мінімуму при формуванні вектору керування, за допомогою якого вибирається мінімальний рівень з множини керувань, які одержані при рішенні задач синтезу оптимального або робастного керування для основних змінних стану, та змінних стану, які необхідно обмежувати.

Практичне значення одержаних результатів. Створена та практично реалізована методика багатокритеріальної оптимізації показників якості багатомасових систем із складними кінематичними зв'язками, відмінними рисами якої є широкі можливості ефективної формалізації задач оптимізації, формування бажаних значень показників якості, синтез систем високого порядку з багатьма варійованими параметрами.

Математичні моделі з урахуванням нелінійних і пружних елементів і їх динамічні характеристики: головних електроприводів прокатних станів як двомасових і тримасових електромеханічних систем; головних приводів прокатних станів з урахуванням взаємного зв'язку через прокатуваний метал; прокатних клітей і багатоклітьових прокатних станів; обмотувальних машин як багатомасових систем; триопорних керованих платформ; двоканальних систем з розподіленням і сумісним навантаженням; стежачих систем і систем стабілізації; багатоканальних електромеханічних систем при безперервному і дискретному управлінні, а також методики синтезу безперервних і цифрових нелінійних оптимальних і робастних регуляторів багатомасових електромеханічних систем з урахуванням нелінійних і пружних елементів пройшли промислову апробацію і використовуються в науково-виробничій корпорації «Київський інститут автоматики» (м. Київ). Результати досліджень, виконаних в дисертаційній роботі використані при розробці техніко-комерційних пропозицій технічних проектів

для широкосмугових станів гарячого прокату 2500 і 2000 Новолипецького і 2500 Магнітогорського металургійних комбінатів Російської Федерації.

Математичні моделі об'єктів управління, а також методика синтезу робастних систем наведення і стабілізації легкоброньованої техніки на основі мікрогіроскопів впроваджені у Львівському науково-дослідницькому радіотехнічному інституті Міністерства промислової політики.

Методики параметричного синтезу безперервних і цифрових регуляторів, спостерігачів і компенсаторів багатоканальних електромеханічних систем з урахуванням нелінійних і пружних елементів використані при синтезі, розробці і впровадженні систем автоматизованого управління рухомими об'єктами, технологічними процесами і комплексами науково-виробничим підприємством «Хартрон-Аркос» (м. Харків).

Структурні схеми математичних моделей об'єктів управління а також результати параметричного синтезу робастних систем наведення і стабілізації легкоброньованої техніки впроваджені у Державному підприємстві «Харківський бронетанковий ремонтний завод».

Матеріали дисертації використовуються в лекційних курсах «Оптимальні та конфліктно-керовані системи» та «Теорія керування» на кафедрі системного аналізу і управління НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Серед них: концепція багатокритеріального синтезу оптимального керування на основі формування критерію якості керування, концепція багатокритеріального синтезу робастного керування, концепція багатокритеріального параметричного синтезу робастного керування, розробка математичних моделей систем та їх ланок, результати багатокритеріального синтезу робастного керування багатомасовими системами індивідуального керування головними електроприводами прокатних станів з урахуванням їх взаємного впливу через прокатуваний метал, триопорними керованими платформами, двоканальними системами з роздільним навантаженням, дискретно-континуальними об'єктами керування.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: XII-XVI Міжнародних конференціях з автоматичного керування «Автоматика» (м. Київ, 2004; м. Харків, 2005; м. Вінниця, 2006; м. Севастополь, 2007; м. Одеса, 2008; м. Чернівці, 2009; м. Харків, 2010); IX-XVII Міжнародних конференціях по автоматизованому електроприводу «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (м. Алушта, 2002-2004; м. Одеса, 2006; Крим, п.г.т. Миколаївка, 2007-2008; м. Алушта, 2009-2010); IX-XVII Міжнародних конференціях по машинобудуванню «Машинобудування та техносфера 21 сторіччя» (м. Донецьк – м. Севастополь, 2002-2010); V- XII Міжнародних конференціях по електромеханіці «Проблеми сучасної електромеханіки» (м. Кременчук, 2003-2010); Міжнародних конференціях по електротехніці «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2004, 2006, 2008, 2010); XII-XVI Міжнародних конференціях по перетворювальній техніці «Силова електроніка та енергоефективність» (м. Алушта, 2006-2010); Міжнародній конференції по інформаційним технологіям «Інфоте-

лекумунікаційні технології в науці, виробництві і освіті» (м. Ставрополь, 2004); Міжнародній конференції по інформаційним технологіям «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2006); Міжнародних конференціях з інформатики та моделювання «Проблеми інформатики і моделювання» (м. Харків, 2006-2010), Міжнародних конференціях з радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії «Modern problems of radio engineering telecommunications and computer science International Conference TCSET» (Lviv – Slavske, 2004, 2006, 2008); VII-X Міжнародних конференціях по застосуванню САПР в мікроелектроніці «The experience of Designing and Application of CAD systems in Microelectronics» (Lviv, 2003, 2005, 2007, 2009).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 47 наукових працях, серед них монографія, підручник, 45 статей у фахових наукових виданнях України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, додатку і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 466 сторінок, 95 рисунків на 95 сторінках, додатку на 16 сторінках, списку з 517 найменувань використаних літературних джерел на 54 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** проведений аналіз сучасного стану методів синтезу динамічних систем керування. Питанням синтезу робастних систем керування присвячені роботи Кунцевича В.М., Кунцевича А.В., Куржанського О.Б., Волосова В.В., Харитонова В.А., Поляка Б.Т., Ципкіна Я.З., Щербаківа П.С., Джури Е.І., Пшенічного Б.М., Черноусько Ф.А., Бутковського А.Г., Краснощеченко В.І., Крищенко А.В., Туніка А.А., Потапенко Є.М., Бакана Г.М., Куцуль Н.М., Куценко О.С., Александрова Є.Є., Любчика Л.М., Северина В.П., Van der Schaft, Isidori, Shawartz, Tarn, Jiang, Hill, Baramova L., Beard R.W., Saridis, G.N., Beeler S.C., Tran H.T., Banks H.T., Doyle J., Glover K., Khargonekar P., Francis B., Malinen J. Moller-Pedersen, Martin Pagh Petersen, Safonov M.G., Chiang R.Y., Flashner H., Sage A.P., White C.C., Wernli A., Cook G., Garrard W. L., Hans P. Geering, Murad Abu-Khalaf, Jie Huang, Frank L. Lewis, Colaneri P., Geromel J.C., Locatelli A., Feng Lin, Shengyuan Xu, James Lam, Kemin Zhou, Doyle J.C., Glover K., Qing-Chang Zhong, Dullerud G.E., Paganini F.G., Gu D.-W., Petkov P.H., Konstantinov M.M, Zelikin M.I., Enns D.F. Snell S.A., Byrnes C.I., Isidori A., Freeman R.A., Kokotovic P.V., Hui S., Zak S.H., Iwai Z., Mizumoto I., Kraus F.J., Narendra K.S., Annaswamy A.M., Ortega R., Qu Z., Yao B., Tomizuka M. та багато інших.

Відзначимо, що зараз цей напрямок є «main stream» – основним потоком, про що свідчить велика кількість монографій, публікацій, конференцій та симпозиумів, які присвячені цим дослідженням в останні декілька років.

Але у цих роботах відсутній метод завдання вектора мети робастного керування таким чином, щоб синтезована система робастного керування задовольняла різноманітним вимогам, які пред'являються до систем у різних режимах їх роботи.

На підставі проведеного аналізу сформульовані мета та задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі розроблені математичні моделі об'єктів керування багатомасових систем з урахуванням невизначеностей. Як приклад багатомасової системи розглянемо математичну модель індивідуальних головних електроприводів прокатних станів, схема якої показана на рис. 1. Модель для короткої лінії головного приводу прийнята у вигляді двомасової електромеханічної системи, а для довгої лінії – у вигляді тримасової електромеханічної системи і з урахуванням взаємного впливу прокатних валків через прокатуваний метал. У зв'язку з тим, що переважна більшість головних приводів нових та реконструйованих прокатних станів комплектуються синхронними двигунами СД₁ та СД₂ з перетворювачами частоти ПЧ₁ та ПЧ₂ і прямим керуванням моменту двигуна, розглянута саме така система.

На рис. 2 представлені експериментальні осцилограми змінних стану при здвоєній прокатці, з яких видно виникнення власних механічних коливань у трансмісіях прокатного стану, які обумовлені наявністю пружних елементів і суттєвого взаємного впливу прокатних валків. При обертанні верхнього і нижнього валків із різними швидкостями за рахунок наявності зв'язку через прокатуваний метал виникає перерозподіл навантажень так, що валок, який обертається з більшою швидкістю, бере на себе більшу частку моменту прокатки.

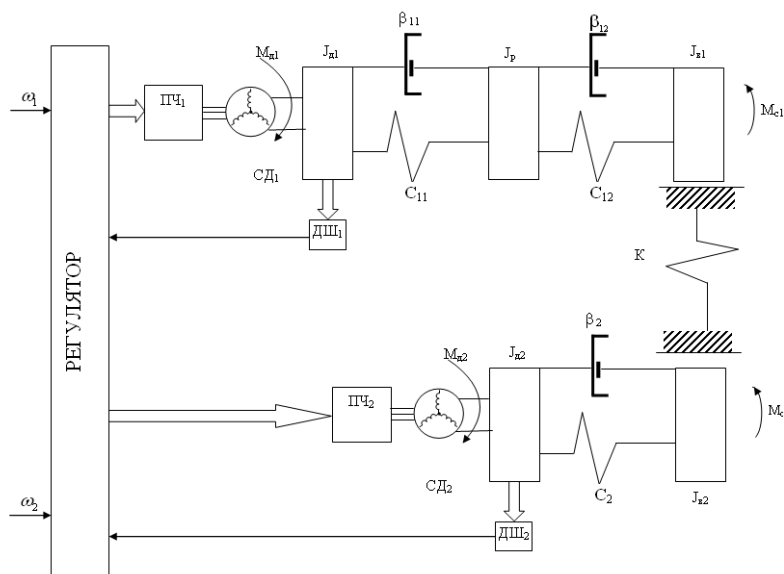


Рис. 1. Схема індивідуальних головних електроприводів прокатного стану з урахуванням їх взаємного впливу через прокатуваний метал

$$B^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{m1}}{T_{m1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{m2}}{T_{m2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\alpha} \end{bmatrix},$$

де позначено: $J_{\delta 1}$, J_{p1} , $J_{\delta 1}$ – моменти інерції валка, муфти і двигуна довгої лінії; $J_{\delta 2}$, $J_{\delta 2}$ – момент інерції валка і двигуна короткої лінії; C_1 , C_2 і β_1 , β_2 – жорсткості і коефіцієнти внутрішнього в'язкого тертя в швидкохідному і тихохідному валах на скручування довгої лінії; C , β – жорсткість і коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя пружного валу на скручування короткої лінії; $T_{\mu 1}$, $T_{\mu 2}$ – постійні часу частотних перетворювачів, такі, що характеризують час наростання моментів двигунів $M_{\delta 1}$, $M_{\delta 2}$ систем прямого керування моментами асинхронних двигунів; α – постійна часу моделі зміни моменту опору.

Залежності моментів зовнішнього тертя від швидкостей обертання мають нелінійний вигляд. На рис. 3 показана експериментальна залежність моменту тертя на валу електричного двигуна від швидкості його обертання. Аналогічні залежності мають моменти тертя прокатних валків, гідравлічних двигунів, редукторів та інших виконавчих пристроїв.

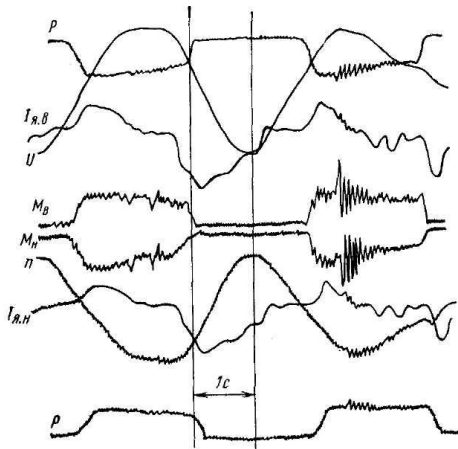


Рис. 2. Експериментальні осцилограми змінних стану прокатного стану при здвоєній прокатці

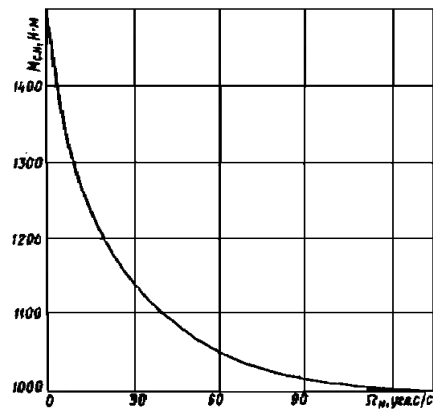


Рис. 3. Експериментальна залежність моменту тертя від швидкості обертання двигуна

Взагалі нелінійні залежності моментів (сил, коефіцієнтів) тертя M_c від швидкостей обертання ω_{ck} апроксимуються ступеневими поліномами

$$M_c(\omega_{ck}) = \sum_{i=0}^n \beta_{ci} \omega_{ck}^i, \quad (2)$$

ступінь яких n зазвичай не перевищує три.

В лінеаризованій моделі (1) враховано наявність падаючих ділянок з коефіцієнтами нахилу β_{c1} , β_{c2} в залежностях моментів зовнішнього тертя прокатних

валків від швидкостей їх обертання. З урахуванням нелінійних залежностей зовнішнього тертя на валах редукторів та виконавчих двигунів у вигляді (2) математична модель системи (1) стає нелінійною з аналітичними моделями нелінійних навантажень, а її рівняння стану може бути представлено у вигляді

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \sum_{i=2}^n f_i(x(t), u(t)), \quad (3)$$

де індекс i вказує порядок форми від векторів стану $x(t)$ і керування $u(t)$.

Основними невизначеностями у цій моделі є коефіцієнти β_{ci} моментів тертя (2), які залежать від багатьох технологічних факторів і в значній мірі визначають моменти тертя.

Крім цієї математичної моделі багатомасової системи розглянуті також математичні моделі двоканальних систем з розподіленим навантаженням, у яких кожен канал представлений у вигляді двомасової або тримасової електромеханічної системи, систем наведення і стабілізації, трьохпорних керованих платформ, обмотувальних машин та об'єктів керування із розподіленими параметрами механічної частини як багатомасових електромеханічних систем.

У третьому розділі виконаний багатокритеріальний синтез оптимального керування багатомасовими системами. Застосування оптимального керування багатомасовими системами у вигляді керування за повним вектором стану у ряду випадків дозволяє одержати бажані показники якості. Рівняння стану багатомасової системи (3) має загальний вигляд

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)). \quad (4)$$

Розглянемо задачу синтезу оптимального керування $u(t)$, що мінімізує функціонал

$$J = \int_0^T f_0(x(t), u(t)) dt. \quad (5)$$

Для вирішення цієї задачі методом динамічного програмування вводиться функція $S(x(t), t)$, що задовольняє функціональному рівнянню Беллмана

$$S(x(t), t) = \min_{u \in U} \int_0^t f_0(x(\tau), u(\tau), \tau) d\tau. \quad (6)$$

Оптимальне керування початковою системою (3) задовольняє диференціальному рівнянню Гамільтона–Якобі–Беллмана

$$-\frac{\partial S(x(t), t)}{\partial t} = \min_{u \in U} \left\{ \nabla_x^T S(x(t), t) f(x(t), u(t), t) + f_0(x(t), u(t), t) \right\}. \quad (7)$$

Аналітичне вирішення рівняння Гамільтона–Якобі–Беллмана (6) для нелінійних систем (3) і нелінійного функціоналу (4) в загальному випадку отримати неможливо. Математичні моделі багатомасових систем, що розглядаються у роботі, є нелінійними системами із аналітичними нелінійностями (3). Передбачається, що підінтегральна функція $f_0(x(t), u(t))$ у критерії (5) також є аналітичною і розкладається в ступеневий ряд

$$f_0(x(t), u(t)) = x^T(t) R_1(t) x(t) + u^T(t) R_2 u(t) + \sum_{i=3}^{n+1} f_{0i}(x(t), u(t)). \quad (8)$$

У цьому випадку оптимальне керування $u(t)$ може бути знайдене у формі зворотних зв'язків по повному вектору стану у наступному виді

$$u(t) = -F(t)x(t) + \sum_{i=2}^n u_i(x(t)). \quad (9)$$

Тоді наближене чисельне розв'язання рівняння Гамільтона–Якобі–Беллмана (7) знаходиться у вигляді ступеневого ряду, коефіцієнти якого визначаються ітераційною процедурою. При цьому регулятор представляє нелінійні зворотні зв'язки за повним вектором стану (9), відновленого за допомогою нелінійного спостерігача. У якості першого наближення використовується лінійний квадратичний гаусовий регулятор, при якому лінійні зворотні зв'язки знаходяться в результаті розв'язання рівняння Ріккати, а як лінійний спостерігач використовується фільтр Калмана–Бьюси, для обчислення параметрів якого також необхідно розв'язати рівняння Ріккати. Для обчислення квадратичного, кубічного і подальших наближень використовуються допоміжні координати, обчислені у формі відхилень початкової нелінійної системи від попереднього наближення. Знаходження квадратичних, кубічних і так далі членів зводиться до розв'язання систем алгебраїчних рівнянь.

При такому підході динаміка початкової нелінійної системи (3), замкненої нелінійним регулятором (9) за повним вектором стану, визначається функціоналом (5) і, значною мірою, ваговими матрицями R_1, R_2 у виразі (8). Проблема вибору цих функціоналів до теперішнього часу є самостійною проблемою, яка зазвичай розв'язується ітеративно так, щоб отримати бажані з точки зору проектувальника характеристики системи, що синтезується. Тому труднощі проектування оптимальної системи фактично зводяться до формування такого критерію, який би відбивав реальні вимоги, що пред'являються до системи. Суттєва постановка задачі синтезу системи, як правило, є багатокритеріальною задачею з обмеженнями. Природно, що багато методів рішення цієї задачі зводяться до формування однокритеріальної задачі, коли усі критерії та обмеження за допомогою вибраної схеми компромісів згортаються в один показник якості системи. Показано, що одному і тому ж значенню критерію якості в однокритеріальній оптимізації можуть відповідати перехідні процеси, що різко відрізняються по своєму виду – коливальні, аперіодичні, а їх показники якості, такі як час регулювання, перерегулювання відрізняються на порядки. Це відбувається тому, що в одному критерії ураховуються як різні показники якості динамічних характеристик систем, так і енерговитрати на управління і обмеження на змінні стану системи. Більше того, на основі рішення зворотної задачі оптимального керування для будь-якого незадовільного за показниками якості перехідного процесу можна підібрати такий критерій якості системи, за яким вона буде оптимальною.

Показано можливість вибору такого критерію оптимальності, що синтезована за цим критерієм система задовольняла усім вимогам, що пред'являються до системи, на основі концепції функціонально-множинної приналежності на елементах простору станів. При цьому передбачається, що мета керування, обмеження на вектор стану і керування можуть бути приведені до єдиних обме-

жень на вектор стану системи $x(t) \in Q(t)$. Множина $Q(t)$ задається у вигляді $Q(t) = \{x \in R^n : \psi(x, t) \leq 0\}$, де $\psi(x, t)$ – скалярна безперервно-диференційована функція.

Зазвичай частина вимог, що пред'являються до системи, формулюється по відношенню до m -мірного ($m \leq n$) вектора мети керування

$$y(t) = \varphi(x(t), t), \quad (10)$$

де $\varphi(x(t), t)$ – вектор-функція розміру m .

Відповідно до методу фазових обмежень мета керування може бути представлена у вигляді умов приналежності вектора $y(t)$ деякій множині:

$$Q(t) = \{y \in R^m : \Psi_k(y, t) \leq 0, k = \overline{1, s}\}. \quad (11)$$

Таким чином, область допустимих значень $Q(t)$ є замкнутою множиною, межа ΓQ якого складається з точок одного з різноманіть

$$M_{i_1, i_2, \dots, i_l} = \{y \in R^m : \Psi_{i_k}(y, t) = 0, i_k \in \{\overline{1, s}\}, l = \overline{1, s}\}. \quad (12)$$

Тоді для забезпечення умови приналежності вектора мети керування $y(t)$ множині $Q(t)$ достатньо, щоб для кожного $y \in \Gamma Q(t)$, відповідних в силу (12) $x \in M(y, t)$ і хоч би для одного $u \in U(x, t)$ виконувалася система нерівностей

$$\left(\nabla_y^T \Psi_{i_k}, \nabla_x \varphi \cdot f(x, u, t) + \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \leq 0, \quad (13)$$

де множина i_k відповідає структурі різноманіття (12), якому належить конкретна точка межі; $\nabla_y \Psi_{i_k}$ – вектор-градієнт функції $\Psi_{i_k}(y, t)$ $\nabla_x \varphi$.

Умова (13) представляється у наступному вигляді

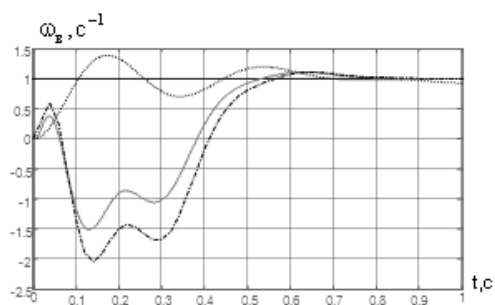
$$\min_{u \in U} \left(\nabla_y^T \Psi_{i_k}, \nabla_x \varphi \cdot f(x, u, t) \right) + \left(\nabla_y^T \Psi_{i_k}, \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) + \frac{\partial \Psi_{i_k}}{\partial t} \leq 0, \quad (14)$$

для кожного $y \in \Gamma Q(t)$ і всіх i_k , відповідних даному значенню y .

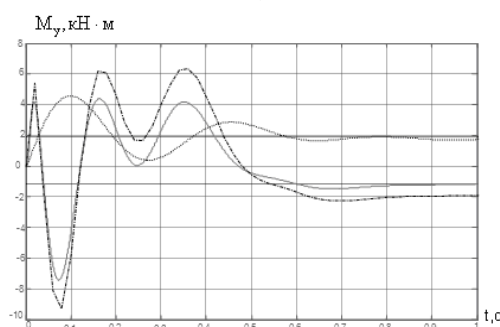
Порівнюючи члени рівняння Гамільтона–Якобі–Беллмана (7), які отримані при оптимальному керуванні, і нерівностей (14), які сформовані на основі концепції функціонально-множинної приналежності на елементах простору станів, прийдемо до наступних аналогій. Роль підінтегральної функції $f_0(x(t), u(t), t)$ інтегрального критерію якості (5) в рівнянні Гамільтона–Якобі–Беллмана (7) грає часткова похідна за часом $\partial \psi / \partial t$ функції $\psi(x, t)$, за допомогою якої задається область $Q(t)$ функціонально-множинної приналежності (11) вектора стану $x(t)$. З цього порівняння виходить, що підінтегральну функцію $f_0(x(t), u(t), t)$ задамо так, щоб за допомогою інтегрального критерію якості (5) можна було задати таку область (11) функціонально-множинної приналежності $Q(t)$ вектора стану системи $x(t)$ визначуваною нерівністю $\psi(x, t) \leq 0$, у якій виконуються всі вимоги, що пред'являються до проектованої системи керування. І, отже, формулювання задачі багатокритеріального синтезу робастної системи керування

зводиться до завдання підінтегральної функції $f_0(x(t), u(t), t)$. Причому вибором цих функцій фактично потрібно задовольнити всі вимоги, що пред'являються до системи. У лінійному випадку необхідно вибрати вагові матриці в інтегральному квадратичному критерії якості.

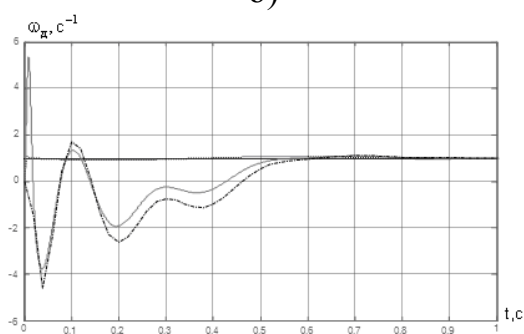
У якості приклада на рис. 4 показані перехідні процеси змінних стану двомасової системи керування головним приводом прокатного стану в режимі валків, що пробуксовують, для трьох значень нахилу характеристики зовнішнього тертя по задаючій дії, а на рис. 5 – перехідні процеси тих же змінних стану по збурюючій дії.



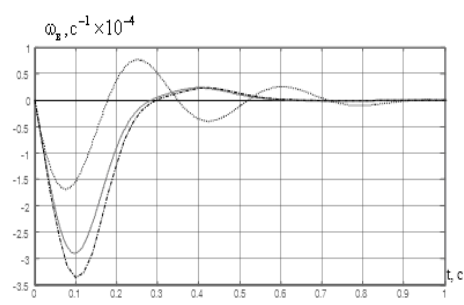
а)



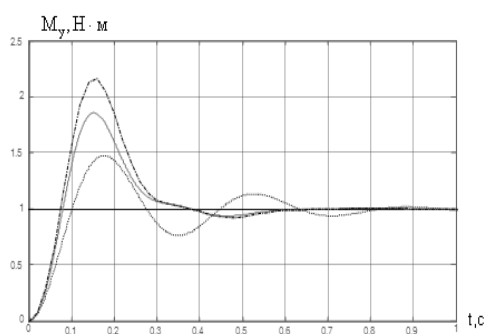
б)



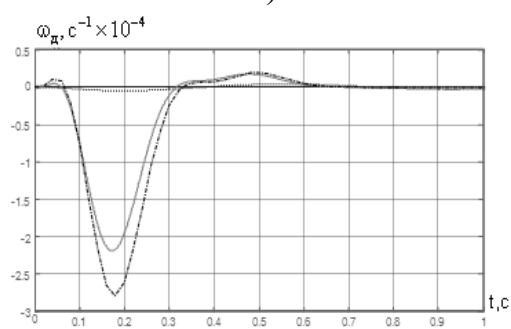
в)



а)



б)



в)

Рис. 4. Перехідні процеси:
а) швидкості обертання прокатних валків; б) моменту пружності;
в) швидкості обертання двигуна в робастній системі керування головним приводом прокатного стану по задаючій дії

Рис. 5. Перехідні процеси:
а) швидкості обертання прокатних валків; б) моменту пружності;
в) швидкості обертання двигуна в робастній системі керування головним приводом прокатного стану по збурюючій дії

Відмітимо, що роль функції Беллмана $S(\bar{x}(t), t)$ (6) у рівнянні Гамільтона–Якобі–Беллмана (7) грає скалярне множення $\nabla_y \psi$ градієнта функції $\psi(y, t)$ на вектор функцію $\varphi(x, t)$, за допомогою якої задається вектор мети робастного керування так, що згортання вектора мети у скалярний критерій якості виконується за допомогою вектора $\nabla_y \psi$ градієнта функції $\psi(y, t)$.

Як показав аналіз синтезованих систем оптимального керування, для отримання прийнятних показників якості робочого органу особливо при наявності пружних елементів, потрібна значна форсировка по струму, моменту і швидкості виконавчого двигуна, напрузі перетворювача, моменту, який передається пружними елементами від виконавчого двигуна до робочого органу, і так далі. Для обмеження змінних стану і керування в нелінійній оптимальній системі вибір сигналу керування здійснюється за допомогою селектора мінімуму з множини сигналів, отриманих за допомогою нелінійних оптимальних регуляторів основної змінної і змінних стану, які необхідно обмежувати, як це показано на рис. 6.

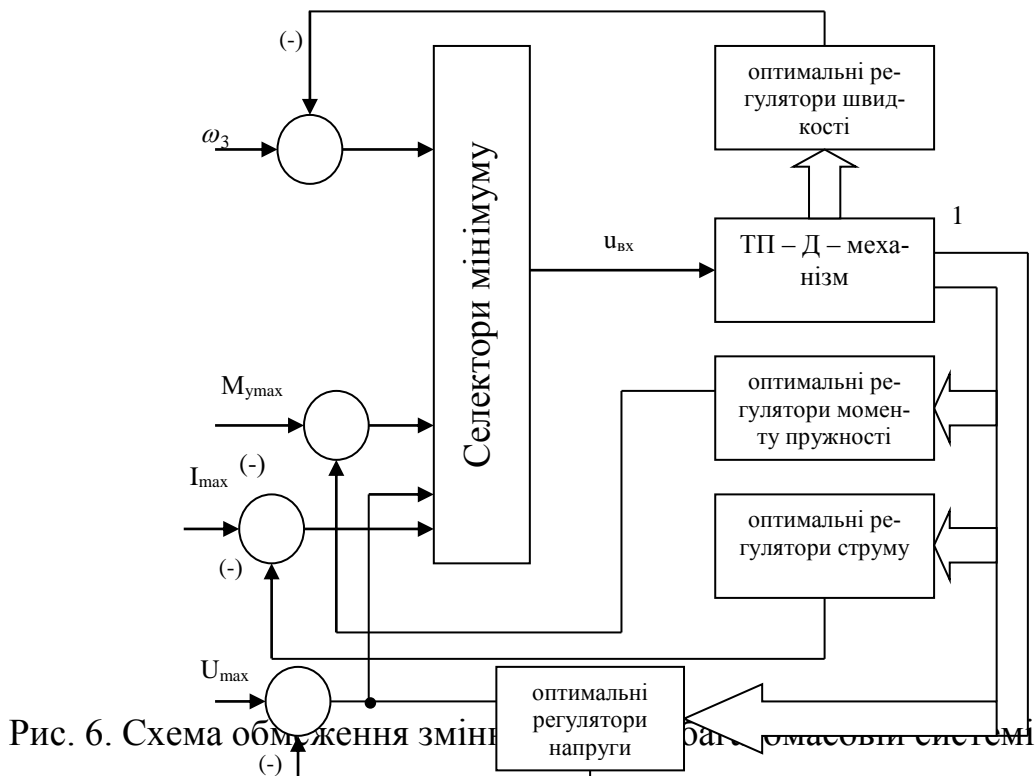


Рис. 6. Схема обмеження змінних стану і керування в нелінійній оптимальній системі

Як приклад на рис. 7 показані перехідні процеси системи управління головним електроприводом прокатного стану з обмеженням вихідного значення струму якірного ланцюга двигуна і напруги на виході тиристорного перетворювача. Видно характерні ділянки постійних значень струму і напруги, що утримуються регуляторами струму і напруги на рівні гранично-допустимих значень.

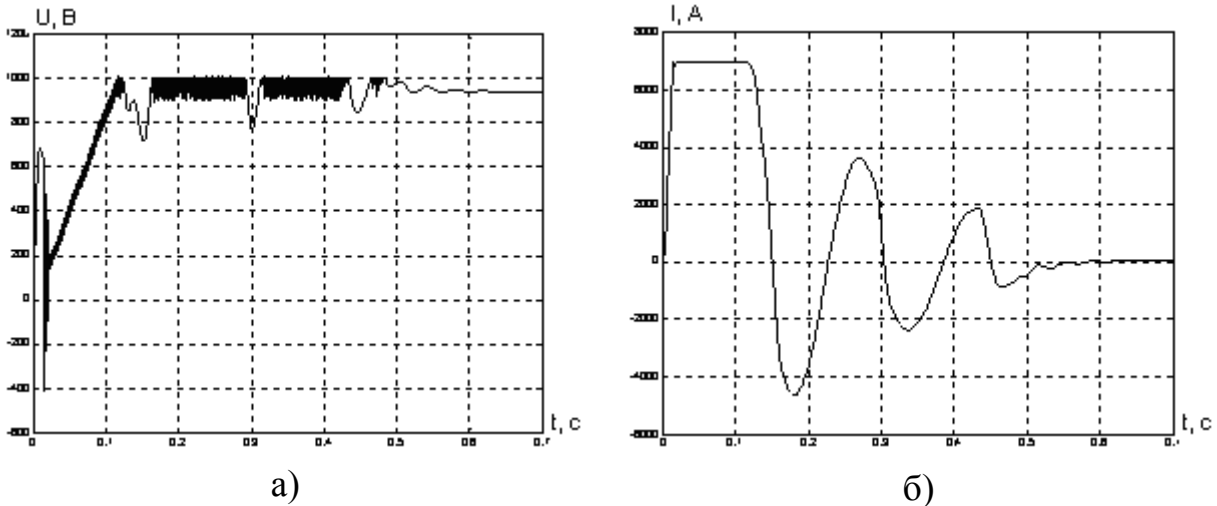


Рис. 7. Перехідні процеси системи управління головним електроприводом прокатного стану з обмеженнями вихідних значень: а) – напруги тиристорного перетворювача і б) – струму якірного ланцюга двигуна

У четвертому розділі виконаний багатокритеріальний синтез робастних систем керування. Розглянемо синтез робастної системи керування початковою нелінійною системою (3), записаною в формі

$$\dot{x} = f(x, \omega, u), \quad (15)$$

де додатково введений вектор зовнішніх дій ω .

Вектор мети робастного керування має вигляд

$$z = Z(x, u). \quad (16)$$

При мінімізації норми вектора мети робастного керування нерівність Гамільтона–Якобі–Беллмана–Айзекса для цієї нелінійної системи приймає вигляд

$$H(x, \nabla_x^T V(x)) = \nabla_x^T V(x) f(x, \omega, u) + \frac{1}{2} \|Z(x, u)\|^2 - \frac{1}{2} \gamma^2 \|\omega\|^2 \leq 0, \quad (17)$$

де $\nabla_x V(x)$ – вектор-стовпець градієнта функції Ляпунова $V(x)$.

Отримані необхідні умовами екстремуму функції Гамільтона (17) як по вектору керування u , так і по вектору зовнішніх обурень ω . Причому, знайдемо мінімум норми вектора мети по вектору керування і максимум цієї норми по вектору зовнішніх обурень, тобто вирішимо максимінне екстремальне завдання. Ці умови є необхідними умовами оптимізації динамічної гри, у якій перший гравець – регулятор – мінімізує норму вектора мети, а другий гравець – зовнішні збурення – максимізує цю норму.

На відміну від оптимального керування при робастному керуванні роль підінтегральної функції $f_0(x, u)$ грає норма вектора мети $\|z(x, u)\|^2$. Крім того, у функцію Гамільтона (17) введена норма вектора зовнішніх дій $\|\omega\|^2$ і ця зовнішня дія в ході синтезу системи вважається незалежною та може бути визначена з умови максимальної «шкідливості» (worst – case disturbance) – максимальної норми вектора мети. Природно, що динаміка робастної системи, що синтезується

ся, в значній мірі визначається функцією мети $z(x, u)$ і всі вимоги, що пред'являються до системи, повинні бути задоволені відповідним вибором цієї функції мети. Завдання функціонально-множинній приналежності вектора стану у вигляді множини Q у формі нерівності $\psi(x, t) \leq 0$ (11) спільно із завданням вектора мети керування $y(t) = \varphi(x, t)$ (12) еквівалентно завданню функції вектора мети $z(x, \omega, t)$ (16) при робастному керуванні. Причому вибором цієї функції фактично потрібно задовольнити всі вимоги, що пред'являються до системи. У лінійному випадку необхідно вибрати відповідні матриці, за допомогою яких формується вектор мети робастного керування (16).

Аналітичне рішення нерівності Гамільтона–Якобі–Беллмана–Айзекса (17) для нелінійних систем загального виду отримати неможливо. Математичні моделі багатомасових систем (1) із аналітичними нелінійностями (2), що розглядаються у роботі, можуть бути представлені рівнянням стану

$$\dot{x} = f(x) + g_{\omega}(x)\omega + g_u(x)u \quad (18)$$

і рівнянням вектора мети

$$z = h_z(x) + k_{\omega z}(x)\omega + k_{uz}(x)u. \quad (19)$$

Для нелінійної системи (18)-(19) запишемо збурене рівняння Гамільтона–Якобі–Беллмана–Айзекса (17) у вигляді

$$\nabla_x^T V(x) f(x) + \frac{1}{2} \nabla_x^T V(x) \left(\frac{1}{\gamma^2} g_{\omega}(x) g_{\omega}^T(x) - g_u(x) g_u^T(x) \right) \nabla_x V(x) + \frac{1}{2} h_z^T(x) h_z(x) + \phi(x) = 0. \quad (20)$$

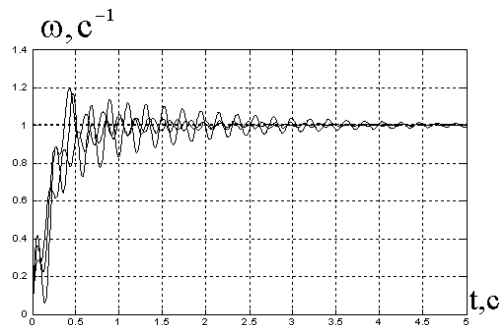
Тоді керування у замкненій формі за повним вектором стану може бути знайдено у вигляді

$$u = -g_u^T(x) \nabla_x V(x). \quad (21)$$

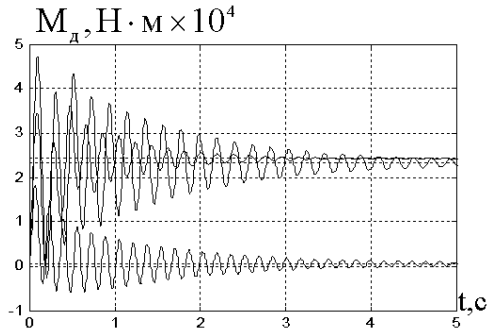
Це робастне керування в замкненій формі (21) для математичних моделей багатомасових систем з аналітичними нелінійностями у вигляді ступеневих рядів (2), отримано у вигляді нелінійних зворотних зв'язків за повним вектором стану аналогічно (9).

Така процедура для початкової нелінійної системи (18)-(19) з аналітичними нелінійностями (2) дозволила виконати параметризацію нелінійних функцій $h_z(x)$ і $k_{uz}(x)$ у (19) таким чином, що при багатокритеріальному синтезі робастного керування замість завдання цих, в загальному вигляді, нелінійних функцій необхідно задати числові значення матриць розкладання цих функцій у ступеневі ряди.

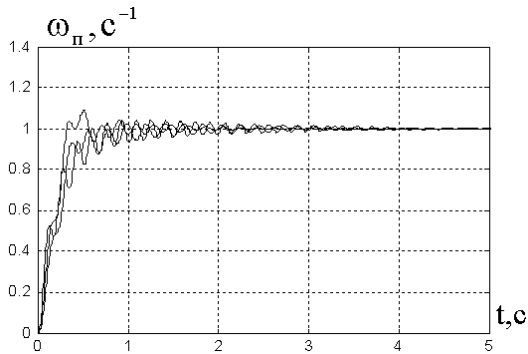
Як приклад на рис. 8 представлені перехідні процеси а) швидкості обертання двигуна; б) моменту пружності; в) швидкості обертання приводного механізму; г) натягу обмотувальної стрічки робастної системи керування за завданням на регулятор швидкості, а на рис. 9 – перехідні процеси тих же змінних стану за завданням на регулятор натягу обмотувальної машини для трьох радіусів розмотування.



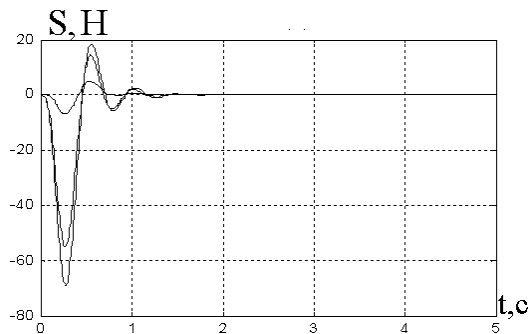
а)



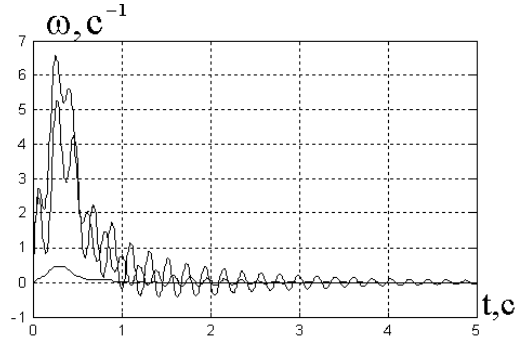
б)



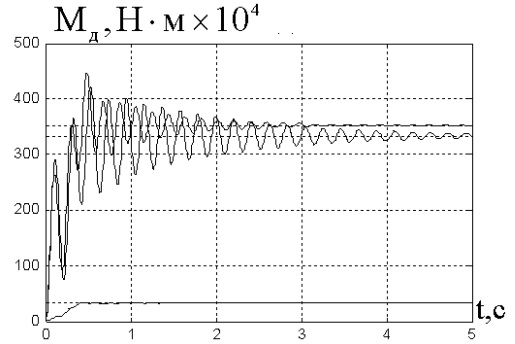
в)



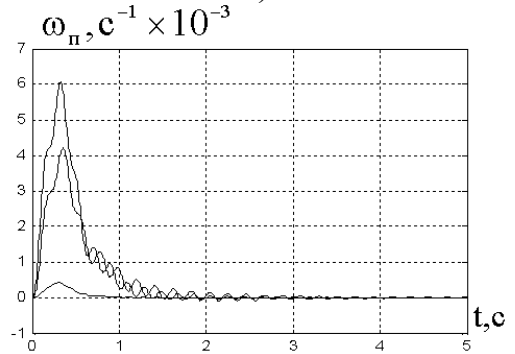
г)



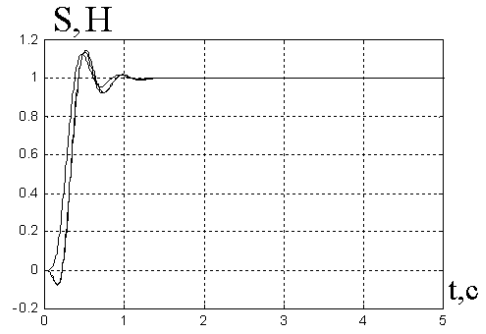
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Перехідні процеси робастної системи керування обмотувальною машиною для трьох радіусів розмотування за завданням на регулятор швидкості

Рис. 9. Перехідні процеси робастної системи керування обмотувальною машиною для трьох радіусів розмотування за завданням на регулятор натягу

Застосування робастних регуляторів дозволило отримати показники якості, які задовольняють технічним вимогам, що пред'являються до системи керування, за допомогою одного робастного регулятора для трьох радіусів розмотуван-

ня, тоді як спроба застосування оптимальних регуляторів, синтезованих для одного радіусу розмотування приводила до втрати стійкості системи для початкового і кінцевого радіусів розмотувань.

При зростанні швидкодії системи a , отже, і її точності, потрібно і більш ефективне керування, що приводить до зростання як самого керування, так і змінних стану системи. Тому зростання керування і змінних стану системи є стримуючим чинником підвищення точності системи. Як приклад на рис. 10 показана залежність часу першого узгодження t_{uc} від логарифма відношення N норм вагових матриць критерію якості системи керування об'єктом із розподіленими параметрами механічної частини. На цьому рисунку також показана залежність максимального значення моменту стабілізації, необхідного для відробітку заданого початкового розузгодження кутового положення об'єкту керування. Чим більше швидкодія системи, тим більше потрібне значення стабілізуючого моменту для приведення системи в узгоджене положення. Таким чином, за підвищення швидкодії доводиться «платити» енергійнішим керуванням.

За цією характеристикою, зокрема, визначається час перехідного процесу відробітку заданого розузгодження для існуючих і перспективних приводів дискретно-континуальних об'єктів керування.

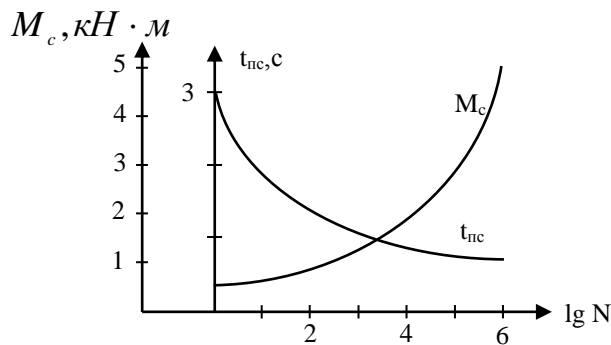


Рис. 10. Залежність часу першого узгодження t_{uc} і максимального значення стабілізуючого моменту M_c від логарифма відношення N норм вагових матриць критерію якості системи керування об'єктом із розподіленими параметрами механічної частини

Зовнішні збурення часто носять стохастичний характер, а їх характеристики є добре дослідженими. В цьому випадку при синтезі робастної системи доцільно використовувати інформацію про характеристики випадкових зовнішніх збурень. Виконаний багатокритеріальний синтез робастного регулятора, який мінімізує анізотропійну норму. Рішення задачі стохастичної робастної оптимізації зводиться до обчислення трьох алгебраїчних рівнянь Ріккати. Динамічні характеристики синтезованої системи, замкнутої анізотропійним робастним регулятором, визначаються вектором мети, який обирається таким чином, що синтезована система, замкнена анізотропійним регулятором, задовольняє усім вимогам, що пред'являються до синтезованої системи.

Для робастної системи керування об'єктом із розподіленими параметрами механічної частини на рис. 11 показані графіки змінних стану при випадкових зовнішніх збуреннях дискретно-континуального об'єкту керування. За допомогою синтезованих стохастичних робастних регуляторів вдалося підвищити точність керування електромеханічною системою із розподіленими параметрами механічної частини і зменшити дисперсію похибки у 1,3 рази порівняно із типовими регуляторами, які використовуються у існуючих системах.

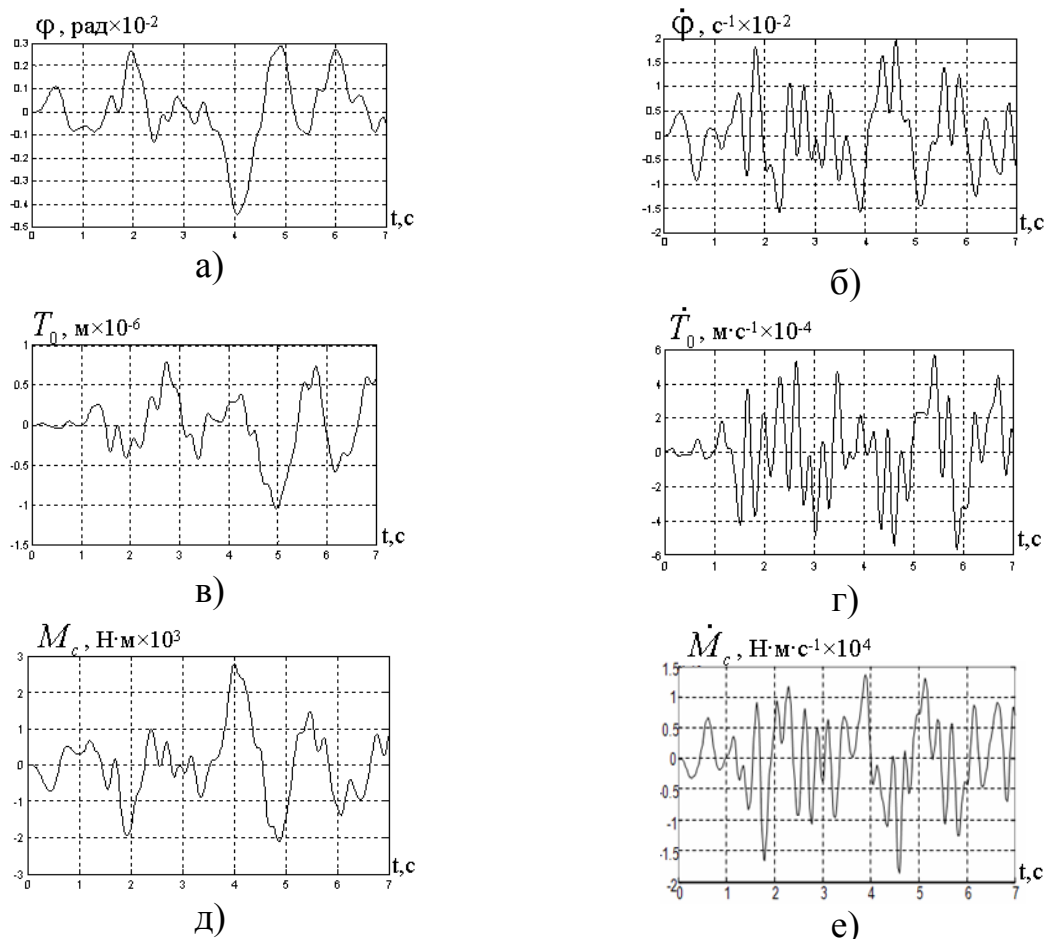


Рис. 11. Графіки зміни: а) кутового розузгодження $\varphi(t)$ і б) його похідної $\dot{\varphi}(t)$, в) значення функції $T_0(t)$ що характеризує відхилення точок осі об'єкту керування від його стану, що не деформується, і г) її похідної $\dot{T}_0(t)$, д) моменту стабілізації $M_c(t)$ об'єкту керування і е) його похідної $\dot{M}_c(t)$ при випадкових зовнішніх діях на об'єкт керування із розподіленими параметрами механічної частини

П'ятий розділ присвячений багатокритеріальному параметричному синтезу робастного керування багатомасовими системами. У попередніх розділах виконаний багатокритеріальний синтез оптимального і робастного керування багатомасовими системами, в яких мінімізується прийнята норма вектору мети робастного керування з урахуванням обмежень на керування та змінні стану, жорстко орієнтовані на точне знання структури і області зміни параметрів моделей об'єкту керування і вхідних сигналів. Причому структура моделей визна-

чає і структуру синтезованих регуляторів.

У реальних задачах неможливо заздалегідь вказати порядок диференціального рівняння об'єкту керування або вхідного сигналу, що точно описує динаміку. Всі моделі наближені і їх адекватність реальному процесу визначається при певних допущеннях і в певних умовах, наприклад, в заданому діапазоні робочих частот системи. Подальше уточнення моделі, наприклад, при урахуванні якої-небудь малої постійної часу, пов'язано з необхідністю заново вирішувати задачу оптимізації. Структура оптимального регулятора при цьому буде іншою. Аналогічна ситуація відбувається і при зміні моделей вхідних сигналів.

З інженерної точки зору істотний практичний сенс має задача параметричної оптимізації регуляторів, коли основна структура системи керування залишається постійною, а змінюється лише частина параметрів регулятора. При цьому можна істотно спростити технічну реалізацію системи.

Один з підходів до задачі параметричного синтезу полягає в оптимізації матриць коефіцієнтів підсилення регулятора стану та спостерігача стану. Останнім часом при синтезі систем керування набув широкого поширення ігровий підхід, що дозволяє сформулювати задачу синтезу системи робастного керування у вигляді динамічної гри. При цьому область варіюваних параметрів розбивається на дві множини: своїх R і противника p . У вектор R включимо параметри регуляторів і спостерігачів, а у вектор p – параметри моделей об'єкту керування і зовнішніх дій і сформульована задача пошуку значень векторів R і p як мінімаксна задача

$$(R^*, p^*) = \arg \min_R \max_p J(R, p).$$

При параметричній оптимізації враховуються обмеження на керування і змінні стану об'єкту у вигляді

$$G(R, p) \leq G_{\max},$$

а можливо і на самі значення параметрів $R \in \mathbf{R}$, $p \in \mathbf{P}$.

Таким чином, замість розв'язання рівняння Гамільтона–Якобі–Беллмана–Айзекса вирішується задача параметричної оптимізації матриць коефіцієнтів підсилення регулятора стану і спостерігача стану.

Як приклад рішення задачі багатокритеріального параметричного синтезу робастного керування дискретно-континуальним об'єктом на рис. 12 показані графіки змінних стану при відробітку системою заданого кутового розузгодження $\Delta\phi=0,1$. Перехідний процес в синтезованій системі практично закінчується за 0,5 с, що приблизно в два рази швидше в порівнянні з штатною системою при тих же максимальних величинах керуючих дій і змінних стану. Відмітимо, що при синтезі цієї системи напруженим частним критерієм була нерівномірність руху об'єкту керування при русі з мінімальною швидкістю. Скорочення часу регулювання приводить до підвищення швидкодії системи і, отже, до розширення її смуги пропускання, що дозволяє також зменшити нерівномірність стеження на низьких швидкостях руху. Проте при цьому, не дивлячись на зниження помилок системи, обумовлених випадковою зміною задаючих і збу-

рюючих дій, сумарна дисперсія помилки зростає за рахунок посилення системою шумів вимірювальних пристроїв. Крім того, підвищення швидкодії системи і розширення її смуги пропускання потребує збільшення значень керування та змінних стану системи.

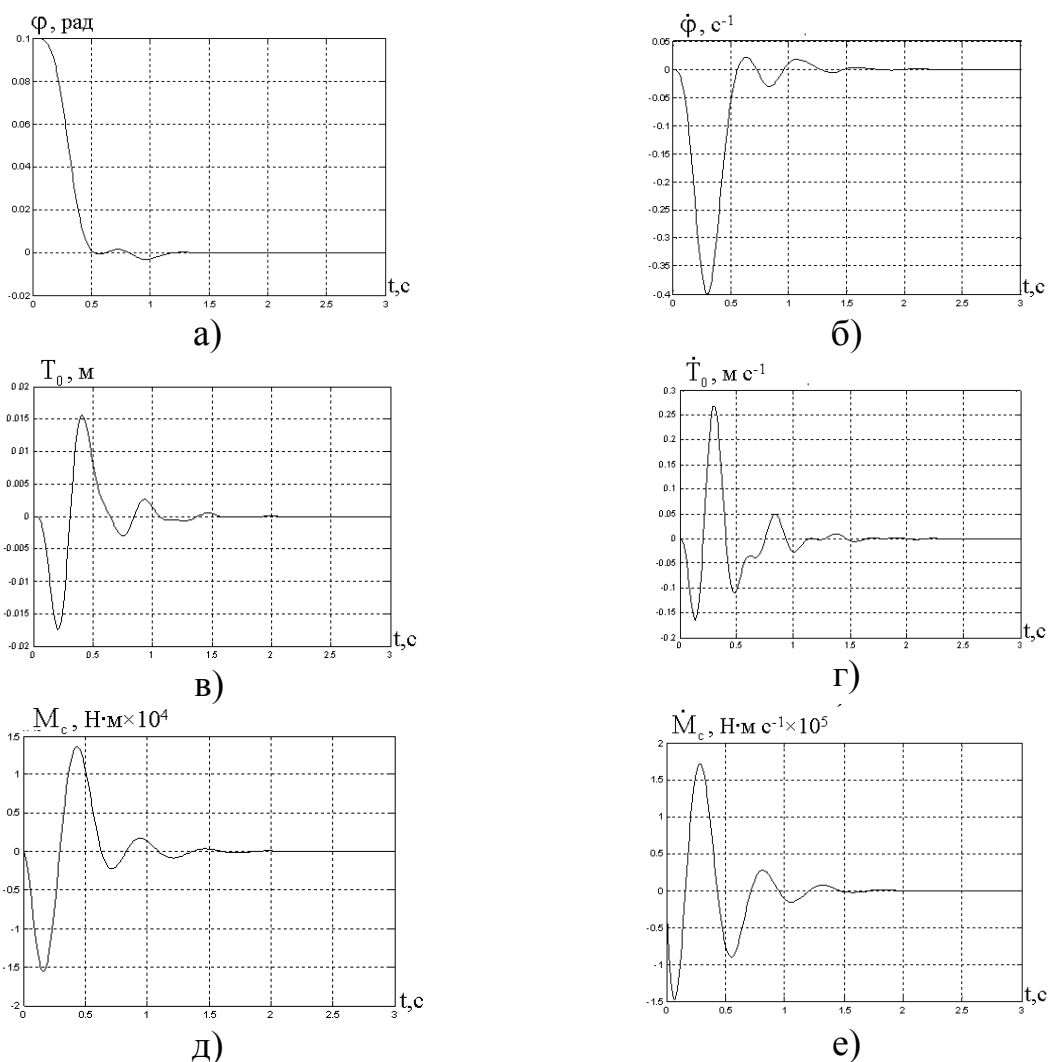


Рис. 12. Перехідні процеси компонент вектора стану замкнутої системи: а) – кута розузгодження $\varphi(t)$ і б) – його похідної $\dot{\varphi}(t)$, в) – значення функції $T_0(t)$ що характеризує відхилення точок осі об'єкту керування від його стану, що не деформується, і її похідної $\dot{T}_0(t)$, д) – моменту стабілізації $M_c(t)$ об'єкту керування і е) його похідної $\dot{M}_c(t)$ при відробки системою заданого розузгодження $\Delta\varphi=0,1$ об'єктом керування із розподіленими параметрами механічної частини

Залишаючись в рамках структури нелінійного робастного регулятора, багатокритеріальна задача робастного керування зведена до визначення вектора параметрів χ , компонентами якого є елементи матриць розкладання нелінійних функцій в (19), за допомогою яких формується вектор мети нелінійного робастного керування, або коефіцієнти підсилення лінійних і нелінійних зворотних

зв'язків регуляторів (9) і спостерігачів при параметричному синтезі. Ця задача багатокритеріальної оптимізації зведена до рішення задачі однокритеріальної оптимізації за допомогою наступної нелінійної схеми компромісів.

У технічних вимогах до системи зазвичай задаються максимальні значення частних критеріїв, що дозволяє виконати їх нормування в діапазоні $0 \leq y_i \leq 1$. Наближення нормованого значення такого критерію до одиниці відповідає напруженій ситуації, а його наближення до нуля відповідає спокійній ситуації. Для вирішення цієї задачі багатокритеріальної оптимізації скористаємося нелінійною схемою компромісів, при якій багатокритеріальна задача зводиться до однокритеріальної

$$\chi^* = \arg \min_{\chi} \sum_{i=1}^J \alpha_i [1 - y_i(\chi)]^{-1}, \quad (22)$$

де α_i – вагові коефіцієнти, що характеризують важливість частних критеріїв і визначають перевагу окремим критеріям особою, що ухвалює рішення.

Формалізація рішення задачі багатокритеріальної оптимізації шляхом зведення до однокритеріальної (22) дозволяє обґрунтовано вибрати лише одну точку з області компромісів – області Парето. Проте ця точка надалі може бути піддана випробуванням для подальшого поліпшення схеми компромісів з погляду особи, що ухвалює рішення.

Така нелінійна схема компромісів фактично відповідає методу штрафних функцій з внутрішньою точкою, оскільки при наближенні i -го критерію y_i до одиниці, тобто при напруженій ситуації, скалярна оптимізація фактично виконується тільки по цьому напруженому частному критерію, а решта критеріїв із спокійною ситуацією при оптимізації практично не враховується. Проте на початку оптимізації необхідно переконатися, що всі частні критерії знаходяться в допустимих областях, тобто, що виконуються умови $0 \leq y_i \leq 1$. Ті частні критерії, для яких ці умови не виконуються, переводяться в прями обмеження.

При багатокритеріальному синтезі системи керування крім частних критеріїв необхідно враховувати обмеження на керування і змінні стану, які задані у формі нерівностей. Зазвичай буває ситуація, коли початкова точка за деякими обмеженнями є неприпустимою. Зокрема, це стосується заданих значень часу першого узгодження, перерегулювання, точності відробітку та компенсації випадкових зовнішніх дій і багатьох інших показників якості, що пред'являються до системи. Більш того, обмеження на деякі частні критерії в результаті багатокритеріального синтезу можуть бути взагалі не виконані. Проте, ряд критеріїв, таких як величини керувань і змінних стану є допустимими. Тому, в нелінійній схемі компромісів багатокритеріального синтезу багатомасових систем робастного керування використовується комбінація методу штрафних функцій з внутрішньою точкою для локальних критеріїв і обмежень, що є допустимими, і методу із зовнішньою точкою для локальних критеріїв і обмежень, що є неприпустимими, так що цільова функція задачі (22) приймається у вигляді

$$f(\chi, r, \lambda) = \sum_{i=1}^J \alpha_i [1 - y_i(\chi)]^{-1} + s(r)L(\chi, r) + p(\lambda)T(\chi), \quad (23)$$

де $s(r)$ і $p(\lambda)$ – вагові функції, що враховують вплив функції штрафу $L(\chi, r) = r^2 \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(\chi)}$ для методу внутрішньої точки і функції штрафу $T(\chi) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2r} \{\min[0, g_i(\chi)]\}^2$ для методу зовнішньої точки. Причому для отримання оптимального рішення і виконання обмежень необхідно, щоб $r \rightarrow 0$ і $\lambda \rightarrow \infty$.

Рішення задачі оптимізації на кожному кроці компромісу шляхом згортання векторного критерію оптимізації в скалярний (23), за допомогою прийнятої нелінійної схеми компромісів приводить до необхідності рішення погано обумовленої задачі. Це відбувається у зв'язку з тим, що в один скалярний критерій за допомогою прийнятої схеми компромісів вводяться всі вимоги, що пред'являються до системи і обмеження на керування, змінні стану та інші параметри у вигляді відповідних штрафів, що і породжує погану обумовленість задачі (23).

Тому прямі обмеження на змінні стану, керування і ряд локальних критеріїв виносяться в прямі обмеження задач нелінійного програмування і відразу використовуються методи вирішення задач умовної оптимізації у вигляді проєкційних методів допустимих напрямів. При цьому, в цільову функцію (23) входять лише найбільш важливі локальні критерії. При такому підході отримати достатньо гладку цільову функцію. В роботі рішення задач нелінійного програмування з обмеженнями виконано методом послідовного квадратичного програмування (Sequential quadratic programming – SQP method). Початкова задача нелінійного програмування з обмеженнями перетворюється в задачу квадратичного програмування з обмеженнями шляхом наступної апроксимації

$$\min_{d \in \mathbb{R}^n} \left[\frac{1}{2} d^T H_k d + \nabla^T f(\chi_k) d \right], \quad (24)$$

$$\nabla^T g_i(\chi_k) d + g_i(\chi_k) \leq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m.$$

При цьому використовується апроксимація матриці Гессе

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{H_k^T s_k s_k^T H_k}{s_k^T H_k s_k},$$

де $s_k = \chi_{k+1} - \chi_k$,

$$q_k = \left(\nabla f(\chi_{k+1}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(\chi_{k+1}) \right) - \left(\nabla f(\chi_k) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(\chi_k) \right).$$

Значення напрямку $d_k = -H_k^{-1} \nabla f(\chi_k)$ використовується для визначення руху

$$\chi_{k+1} = \chi_k + a_k d_k,$$

де скалярний множник $0 < a_k \leq 1$.

При багатокритеріальній оптимізації, як правило, не можна отримати опуклу цільову функцію (23), і задача містить множину локальних екстремумів. Для знаходження глобального мінімуму функції (23) з множиною локальних критеріїв використовується комбінація методів пошуку локальних критеріїв з

випадковим, або детермінованим завданням множини початкових значень оптимізуємих параметрів з допустимої множини значень цих параметрів. При вирішенні задач, які розглядаються у роботі, значення локальних критеріїв оптимізації часто виявляється практично однаковими, що виключає формалізацію процесу вибору глобального мінімуму з множини локальних мінімумів. Але, з погляду особи, що ухвалює рішення, ці варіанти локальних мінімумів можуть мати істотні відмінності.

У шостому розділі наведено результати експериментальних досліджень динамічних характеристик синтезованих систем. Для проведення експериментальних досліджень розроблено дослідницький стенд двомасової електромеханічної системи, схема якого показана на рис. 13. Стенд містить два двигуна D_1 і D_2 , вали яких з'єднані пружною передачею із жорсткістю C . Кути повороту валів двигунів φ_1 і φ_2 вимірюються датчиками положення ДП₁ та ДП₂, за допомогою яких вимірюються також і кутові швидкості валів двигунів ω_1 і ω_2 . Якірні кола двигунів живляться від підсилювачів потужностей ПП₁ і ПП₂. Струми якірних кіл вимірюються датчиками струмів ДС₁ та ДС₂. На рис. 14 показане робоче місце оператора цього стенду.

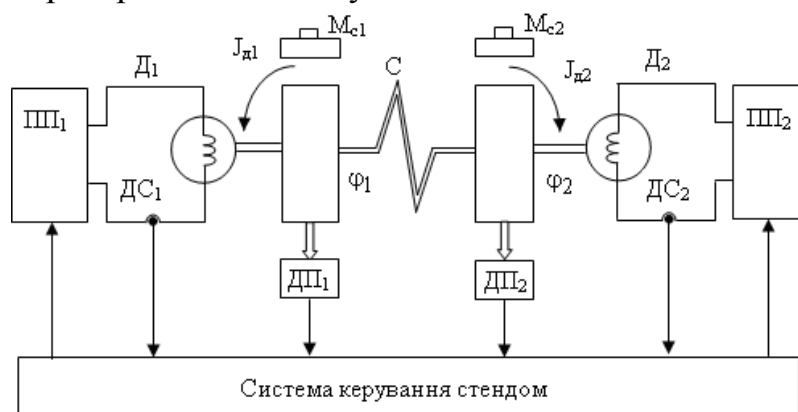


Рис. 13. Схема дослідницького стенду двомасової електромеханічної системи

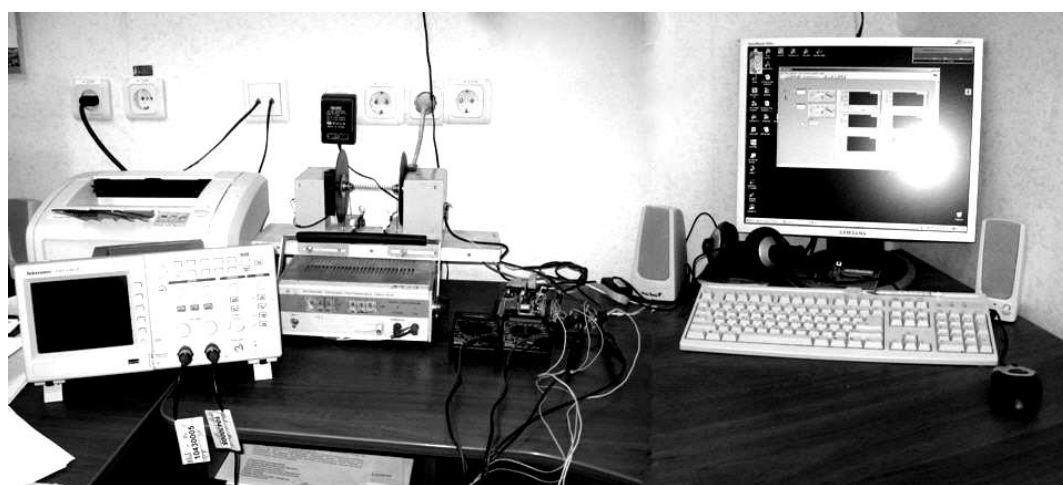


Рис. 14. Робоче місце оператора стенду двомасової електромеханічної системи

На стенді проведені дослідження динамічних характеристик, на підставі яких розроблена математична модель, за якою синтезовані і реалізовані на стенді типові та робастні регулятори. Експериментальні перехідні процеси в системі керування стендом з робастним регулятором стану показані на рис. 15, а з типовим регулятором – на рис. 16.

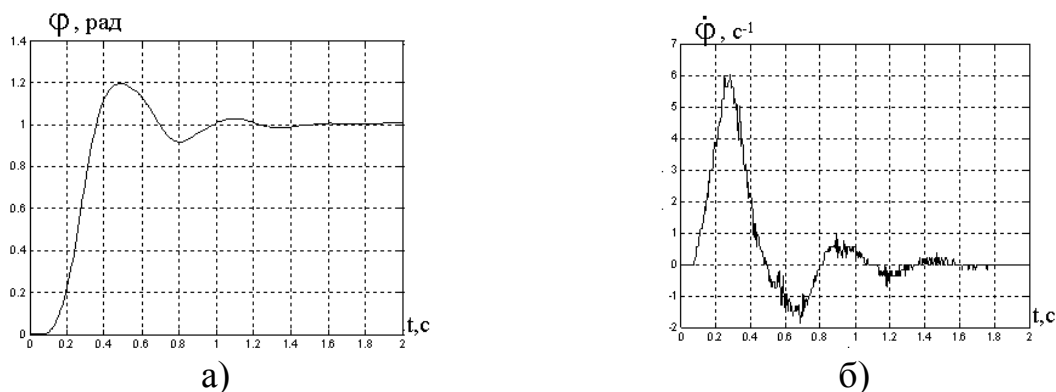


Рис. 15. Експериментальні перехідні процеси положення (а) і швидкості (б) в системі керування стендом з робастним регулятором стану

Порівняння перехідних процесів, експериментально отриманих на стенді двомасової електромеханічної системи з синтезованими нелінійними робастними регуляторами з модельними перехідними процесами, отриманими на ЕОМ, показує їх збіг з точністю до 7%. Зокрема, час першого узгодження відробітку заданого одиничного значення кута повороту другого двигуна складає близько 0,5 с. Причому, система з регулятором стану має істотно менше перерегулювання – близько 20% у порівнянні з 120% для системи з типовим регулятором при практично однаковому часі першого узгодження.

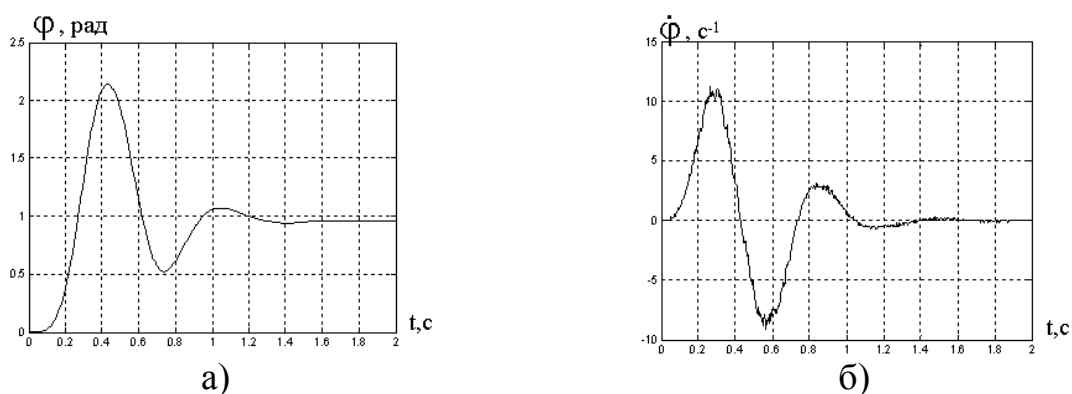


Рис. 16. Експериментальні перехідні процеси положення (а) і швидкості (б) в системі керування стендом з типовим регулятором

Експериментальні перехідні процеси змінних стану швидкостей обертання роторів двигунів і напруги на якірних ланцюгах двигунів, отримані на стенді, містять високочастотні складові, тоді як модельні перехідні процеси цих же змінних стану змінюються плавніше.

У додатках наведені акти про впровадження результатів наукових розробок у практику проектування багатомасових систем.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі дано рішення науково-прикладної проблеми підвищення показників якості робастного керування багатомасовими електромеханічними системами на основі розвитку математичних моделей та методів векторної оптимізації показників якості.

Отримані основні наукові та практичні результати дозволяють сформулювати наступні висновки.

1. Проведений аналіз методів синтезу робастного керування електромеханічними системами і виявлені перспективні можливості концепції багатокритеріального синтезу робастного керування на основі математичних моделей і методів векторної оптимізації показників якості, що дозволяє підвищити ступінь наукової обґрунтованості технічних проектів з удосконаленням систем автоматичного керування та підвищити показники якості синтезованих систем.

2. Сформульовані основні положення концепції багатокритеріального синтезу робастного керування багатомасовими системами автоматичного керування, що дозволяє обґрунтовано вибирати вагові матриці в критеріях якості оптимального керування і матриці, за допомогою яких формується вектор мети робастного керування, шляхом рішення задачі нелінійного програмування так, щоб задовольнити вимогам, які пред'являються до синтезованої системи.

3. Сформульовано задачу багатокритеріального синтезу нелінійного робастного керування багатомасовими системами та обґрунтована можливість задовольнити різноманітним вимогам, які пред'являються до роботи систем у різних режимах, на підставі концепції функціонально множинної приналежності вектора стану. Показана можливість рішення задачі багатокритеріального синтезу нелінійного робастного керування на підставі концепції функціонально множинної приналежності вектору стану і розв'язання рівняння Гамільтона–Якобі–Беллмана–Айзекса. Обґрунтований і розроблений метод вибору вектору мети робастного керування шляхом рішення задачі нелінійного програмування, що дозволяє задовольнити вимогам, які пред'являються до синтезованої системи.

4. Сформульовано задачу та розроблено метод багатокритеріального параметричного синтезу багатомасових систем, структура регуляторів яких задається у вигляді зворотних зв'язків за повним вектором стану системи, який встановлюється за допомогою спостерігачів на основі розроблених математичних моделей в просторі стану і векторних критеріїв якості, що дозволяє замість розв'язання достатньо складного рівняння Гамільтона–Якобі–Беллмана–Айзекса вирішувати задачу нелінійного програмування за визначенням матриць коефіцієнтів підсилення регуляторів і спостерігачів синтезованої системи. За допомогою цього методу також синтезовані типові регулятори, за допомогою яких задовольняються технічні вимоги до системи.

5. Для систем з синтезованими робастними регуляторами проведені всебічні дослідження їх динамічних характеристик. За допомогою синтезованих регуляторів одержані динамічні характеристики системи, які задовольняють технічним вимогам, що пред'являються до сучасних систем. Показано, що засто-

сування концепції багатокритеріального синтезу робастного керування багатомасовими електромеханічними системами, яка заснована на математичних моделях і методах векторної оптимізації показників якості робастного керування, дозволило істотно підвищити швидкодію і точність синтезованих систем керування. Зокрема, для дискретно-континуального об'єкту керування вдалося отримати перехідні процеси, які приблизно в два рази швидше в порівнянні з штатною системою при тих же максимальних величинах керування та змінних стану. В результаті проведених досліджень динамічних характеристик синтезованих систем робастного керування показано, що ці системи мають істотно меншу чутливість до зміни параметрів моделей об'єктів керування і зовнішніх дій у порівнянні з аналогічними системами оптимального керування. Зокрема, застосування оптимальних систем керування обмотувальними машинами привело до втрати стійкості системи при зміні радіусу розмотування кружка з обмотувальною стрічкою. Застосування робастних регуляторів дозволило стійко вести технологічний процес обмотки кабелів з одним робастним центральним регулятором у всьому діапазоні зміни радіусів розмотування кружків з обмотувальними стрічками при виконанні вимог, що пред'являються до системи.

6. Сформульовано задачу та розроблено метод рішення задачі багатокритеріального синтезу анізотропійних регуляторів багатомасових систем шляхом рішення задачі багатокритеріальної оптимізації параметрів вагових матриць, за допомогою яких формується вектор мети при стохастичному робастному керуванні, у зв'язку з тим, що зовнішні збурення носять стохастичний характер, а їх характеристики є добре дослідженими, і при синтезі робастної системи використовується інформація про характеристики випадкових зовнішніх збурень. При такому підході мінімізується анізотропійна норма стохастичної системи, що дозволяє отримати мінімальну чутливість синтезованої стохастичної системи до зміни параметрів моделей об'єктів керування і зовнішніх дій в порівнянні з аналогічними системами оптимального керування, а також задовольнити технічним вимогам, які пред'являються до синтезованої системи.

7. Як показав аналіз синтезованих систем оптимального і робастного керування за повним вектором стану, для отримання заданих показників якості при наявності пружних елементів і нелінійних характеристик тертя в об'єктах керування потрібне значне форсування за струмом, моментом і швидкістю виконавчого двигуна, а також за напругою перетворювача, моментами, які передаються пружними елементами від виконавчого двигуна до робочого органу. Удосконалено метод обмеження керування і змінних стану при оптимальному і робастному керуванні за вектором стану шляхом використання при формуванні вектора керування селектора мінімуму, за допомогою якого вибирається мінімальний рівень із множини керувань, які отримані при вирішенні задач синтезу оптимального або робастного керування для основних змінних стану, і змінних стану, які необхідно обмежувати. Зокрема, як показали експериментальні дослідження на прокатному стані, при динамічних навантаженнях перевищення струму в синтезованій системі може складати 2-4 гранично-допустимих значень струму. При таких перевищеннях запропонована в роботі система обмеження

координат надійно обмежує змінні стану і керування на заданих рівнях їх максимальних значень.

8. Вдосконалено математичні моделі об'єктів керування багатомасових систем із складними кінематичними зв'язками, а саме: головних приводів прокатних станів з урахуванням їх взаємного впливу через прокатуваний метал; систем наведення і стабілізації; триопорних керованих платформ; обмотувальних машин; двоканальних систем з роздільним навантаженням; дискретно-континуальних об'єктів керування, що дозволило врахувати наявність пружних елементів і нелінійних характеристик зовнішнього тертя в об'єктах керування і у виконавчих пристроях та підвищити адекватність математичних моделей реальним процесам, а в результаті – підвищити точність керування.

9. Отримали подальший розвиток: нелінійна схема компромісів, яка побудована на основі комбінованого методу штрафних функцій; методи і алгоритми вирішення задач багатокритеріальної оптимізації на основі квазіньютонівських методів вирішення задач нелінійного програмування без обмежень та методу послідовного квадратичного програмування для вирішення задач нелінійного програмування з обмеженнями.

10. Результати теоретичних досліджень експериментально перевірені на розробленому стенді двомасової електромеханічної системи. Проведено всебічне експериментальне дослідження і виконано порівняння динамічних характеристик синтезованих систем, отриманих на стенді та при моделюванні. Зокрема, порівняння перехідних процесів, експериментально отриманих на стенді двомасової електромеханічної системи з синтезованими нелінійними робастними регуляторами, з модельними перехідними процесами, які отримані на комп'ютері, показало їх збіг з точністю до 7%. Зокрема, час першого узгодження відробки заданого значення кута повороту складає близько 0,5 с. Причому, система з регулятором стану має істотно менше перерегулювання – близько 20% у порівнянні з 120 % для системи з типовими регуляторами при практично однаковому часі першого узгодження. Експериментальні перехідні процеси змінних стану швидкостей обертання роторів двигунів і напруги на якірних ланцюгах двигунів, які отримані на стенді, містять високочастотні складові, тоді як модельні перехідні процеси цих же змінних стану змінюються плавніше. Як показали дослідження синтезованих систем, на якість перехідних процесів істотно впливають характеристики нелінійностей виконавчих двигунів і саме вони визначають потенційну точність системи з синтезованими оптимальними регуляторами.

11. Результати наукових розробок впроваджені в практику проектування складних електромеханічних і електрогідравлічних систем із складними кінематичними зв'язками в науково-виробничій корпорації «Київський інститут автоматики», в Львівському радіотехнічному інституті, на підприємстві «Хартрон-Аркос», і на Харківському бронетанковому ремонтному заводі. Матеріали дисертації використовуються в лекційних курсах «Оптимальні та конфліктно-керовані системи» та «Теорія керування» на кафедрі системного аналізу і управління НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Никитина Т.Б. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. / Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец. – Монография. – Харьков: УПА, 2005. - 512 с.

Здобувачем виконано розвиток математичних моделей багатомасових систем із складними кінематичними зв'язками з урахуванням пружних елементів та нелінійних характеристик зовнішнього тертя у об'єктах керування і виконуючих пристроях та обґрунтовано концепцію синтезу оптимального керування електромеханічними системами із складними кінематичними зв'язками.

2. Никитина Т.Б. Синтез приближенно оптимальных нелинейных систем цифрового управления технологическими процессами с аналитическими нелинейностями / Т.Б. Никитина // Автоматизація виробничих процесів. – 2003. – № 2(17). – С. 47-51.

3. Никитина Т.Б. Приближенно-оптимальное цифровое управление электроприводами с аналитическими нелинейностями / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – № 10. – Т.1. – С. 129-130.

4. Никитина Т.Б. Приближенно-оптимальный синтез цифровых систем управления с аналитическими нелинейностями / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – № 28. – С. 111-123.

5. Никитина Т.Б. Синтез цифровых нелинейных многоканальных систем управления / Т.Б. Никитина // Автоматизація виробничих процесів. – 2005. – №2 (21). – С. 115-121.

6. Никитина Т.Б. Приближенно-оптимальный синтез многоканальных систем с аналитическими нелинейностями / Т.Б. Никитина // Механіка та машинобудування. – 2005. – №1. – С. 222-228.

7. Никитина Т.Б. Синтез нелинейных многоканальных систем повышенной точности / Т.Б. Никитина // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2005. – №4/2005 (33). – С. 39-42.

8. Никитина Т.Б. Синтез многоканальных нелинейных электромеханических систем/ Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 45. – С. 130-131.

9. Никитина Т.Б. Ограничение нагрузок в нелинейных многоканальных системах с оптимальным управлением / Т.Б. Никитина // Технічна електродинаміка. – 2006. – Ч. 4. – С. 90-92.

10. Никитина Т.Б. Синтез цифровых нелинейных робастных регуляторов каналов многоканальных систем при последовательном синтезе / Т.Б. Никитина // Автоматизація виробничих процесів. – 2006. – №2 (23). – С. 109-114.

11. Никитина Т.Б. Синтез робастных регуляторов многоканальных итерационных систем / Т.Б. Никитина // Радиоэлектроника и информатика. Харків: ХНУРЕ, 2006. – №4(35). – С. 24-30.

12. Никитина Т.Б. Цифровое робастное управление нелинейными многоканальными электроприводами / Т.Б. Никитина // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2006. – №66. – С. 72-73.

13. Никитина Т.Б. Последовательный оптимальный синтез H^2 и H^∞ регуляторов нелинейных многоканальных итерационных систем / Т.Б. Никитина // Технічна електродинаміка. – 2006. – Ч. 5. – С. 107-112.

14. Никитина Т.Б. Ограничение нагрузок в нелинейных многоканальных электромеханических системах при управлении по состоянию / Т.Б. Никитина // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С. 259-264.

15. Никитина Т.Б. Робастное управление многоканальными итерационными электроприводами по H^2 и H^∞ критериям / Т.Б. Никитина // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2006. – №67. – С. 13-17.

16. Никитина Т.Б. Исследование динамических характеристик цифрового робастного управления блонингом в режиме пробуксовки валков / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – №31. – С. 93-101.

17. Никитина Т.Б. Стабилизация динамических характеристик двухканальной системы управления обмоточной машиной с помощью робастного управления / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – №39. – С. 38-45.

18. Никитина Т.Б. Исследование чувствительности робастных регуляторов трехмассовой модели обмоточной машины / Т.Б. Никитина // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2007. – №4/2007 (45). – Ч. 1. – С. 144-148.

19. Никитина Т.Б. Робастная стабилизация танкового вооружения / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №10. – С. 134-144.

20. Никитина Т.Б. Синтез цифровых робастных регуляторов многоканальных электромеханических систем / Т.Б. Никитина // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 391-392.

21. Никитина Т.Б. Робастное управление трехпорной управляемой платформой / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №18. – С. 29-36.

22. Никитина Т.Б. Робастная стабилизация дискретно-континуального объекта / Т.Б. Никитина // Технічна електродинаміка. – 2007. – Ч. 1. – С. 56-61.

23. Никитина Т.Б. Цифровая робастная стабилизация танкового вооружения / Т.Б. Никитина // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2007. – №68. – С. 16-21.

24. Нікітіна Т.Б. Цифрове робастне керування двомасовою обмотувальною машиною / Т.Б. Никитина // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2007. – №587. – С.70-75.

25. Никитина Т.Б. Робастное управление системой наведения и стабилизации вооружения легкобронированной машиной / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №36. – С. 80-88.

26. Никитина Т.Б. Робастное управление двухмассовой электромеханической системой в режиме буксования / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №39. – С. 125-131.

27. Никитина Т.Б. Выбор критерия качества робастного управления как задача многокритериальной оптимизации / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №41. – С. 35-44.

28. Никитина Т.Б. Выбор критерия качества цифровой робастной системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированной машины / Т.Б. Никитина // Механіка та машинобудування. – 2007. – №1. – С. 155-163.

29. Никитина Т.Б. Цифровое робастное управление основным танковым вооружением / Т.Б. Никитина // Механіка та машинобудування. – 2007. – №2. – С. 71-80.

30. Никитина Т.Б. Параметрический синтез нелинейного робастного управления многоканальными системами / Т.Б. Никитина // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2007. – №69. – С. 11-16.

31. Никитина Т.Б. Синтез цифрового нелинейного робастного управления многоканальными системами / Т.Б. Никитина // Радіоелектроніка, інформатика, керування. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2007. – №2(18). – С. 134-143.

32. Никитина Т.Б. Цифровое робастное управление обмоточной машиной как двухмассовой электромеханической системой / Т.Б. Никитина // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – № 7(128). – С. 46-48.

33. Никитина Т.Б. Параметрическая оптимизация многоканальных систем с нелинейными и упругими элементами / Т.Б. Никитина // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2008. – №4/2008 (51). – Ч. 1. – С. 42-47.

34. Никитина Т.Б. Выбор критерия качества робастного управления электроприводами со сложными кинематическими связями / Т.Б. Никитина // Технічна електродинаміка. – 2008. – Ч. 2. – С. 69-74.

35. Никитина Т.Б. Чувствительность цифровой робастной системы управления трехопорной платформой / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №24. – С. 99-106.

36. Никитина Т.Б. Многокритериальная оптимизация системы стабилизации танкового вооружения / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №26. – С. 100-109.

37. Никитина Т.Б. Синтез анизотропных регуляторов многоканальных систем регулирования геометрических параметров проката / Т.Б. Никитина //

Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №30. – С. 230-231.

38. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез робастного управления трехпорной платформой / Т.Б. Никитина // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2008. – №70. – С. 24-29.

39. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированной машины /Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №31. – С. 128-138.

40. Никитина Т.Б. Последовательный параметрический синтез цифрового нелинейного управления каналами многоканальных итерационных систем / Т.Б. Никитина // Технічна електродинаміка. – 2008. – Ч. 1. – С. 60-65.

41. Никитина Т.Б. Робастное управление многоканальными системами регулирования геометрических параметров проката / Т.Б. Никитина // Технічна електродинаміка. – 2008. – Ч. 3. – С. 67-72.

42. Никитина Т.Б. Стохастический синтез цифрового робастного управления многоканальными итерационными системами / Т.Б. Никитина // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2008. – №71. – С. 22-27.

43. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез анизотропийного регулятора стабилизатора в вертикальной плоскости / Т.Б. Никитина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – №13. – С. 94-103.

44. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез анизотропийных регуляторов электропривода горизонтального наведения / Т.Б. Никитина // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2009. – №1/2009 (54). – С. 9-12.

45. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез робастного управления многоканальными системами регулирования геометрических параметров проката / Т.Б. Никитина // Технічна електродинаміка. – 2009. – Ч. 2. – С. 58-63.

46. Никитина Т.Б. Синтез анизотропийного стабилизатора основного вооружения танка в горизонтальной плоскости / Т.Б. Никитина // Механіка та машинобудування. – Харків: 2009. – №2. – С. 135-147.

47. Нікітіна Т.Б. Статистичні методи дослідження електромеханічних систем. / Б.І. Кузнецов, Т.Ю. Василець, Т.Б. Нікітіна. Підручник. – Харків: УПА, 2005. – 435 с.

Здобувачем обґрунтовано концепцію аналізу та синтезу оптимального керування електромеханічними системами із складними кінематичними зв'язками при випадкових зовнішніх діях.

АНОТАЦІЇ

Нікітіна Т. Б. Багатокритеріальний синтез нелінійного робастного керування багатомасовими системами на основі аналітичних моделей нелінійного навантаження. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спе-

ціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2011.

Дисертація присвячена розробці перспективної концепції багатокритеріального синтезу робастного керування багатомасовими системами автоматичного керування на основі математичних моделей і методів векторної оптимізації показників якості.

Розроблений метод дозволяє обґрунтовано вибирати вагові матриці в критеріях якості оптимального керування і матриці, за допомогою яких формується вектор мети робастного керування, шляхом рішення багатокритеріальної задачі нелінійного програмування так, щоб задовольнити вимогам, які пред'являються до синтезованої системи. Показана можливість рішення задачі синтезу нелінійного робастного керування на підставі концепції функціонально множинної приналежності вектору стану розв'язанню рівняння Гамільтона–Якобі–Беллмана–Айзекса.

Розвинуті методи і алгоритми вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації на основі нелінійної схеми компромісів, квазіньютонівських методів і методу послідовного квадратичного програмування для вирішення завдань з обмеженнями. Отримали подальший розвиток математичні моделі об'єктів керування багатомасових систем. За допомогою синтезованих регуляторів отримані динамічні характеристики системи, що задовольняють технічним вимогам, які пред'являються до сучасних систем.

Ключові слова: багатомасові системи, аналітичні моделі нелінійностей, системи автоматизованого керування, аналіз і синтез складних систем, нелінійне робастне керування, багатокритеріальний синтез, моделювання динамічних систем.

Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез нелинейного робастного управления многомассовыми системами на основе аналитических моделей нелинейной нагрузки. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2011.

Диссертация посвящена разработке перспективной концепции многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми системами автоматического управления на основе математических моделей и методов векторной оптимизации показателей качества.

Сформулированы основные положения концепции многокритериального синтеза робастного управления многомассовыми системами автоматического управления, позволяющей обоснованно выбирать весовые матрицы в критериях качества оптимального управления и матрицы, с помощью которых формируется вектор оптимизационных параметров при робастном управлении, путем решения многокритериальной задачи нелинейного программирования таким образом, чтобы удовлетворить требованиям, которые предъявляются к синтезированной системе.

Сформулирована задача многокритериального синтеза нелинейного робастного управления многомассовыми системами и показана возможность ее решения на основе концепции функционально множественной принадлежности вектора состояния, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе многомассовых систем в различных режимах. Показана эквивалентность решения задачи синтеза нелинейного робастного управления на основании концепции функционально множественной принадлежности вектору состояния путем решения уравнения Гамильтона–Якоби–Беллмана–Айзекса. Обоснован и разработан метод выбора весовых матриц в критериях качества оптимального управления и матриц, с помощью которых формируется вектор оптимизируемых параметров при робастном управлении путем решения задачи нелинейного программирования, что позволяет удовлетворить требования, которые предъявляются к синтезированной системе.

Сформулирована задача и разработан метод решения задачи многокритериального синтеза анизотропных регуляторов многомассовых систем путем решения задачи многокритериальной оптимизации параметров весовых матриц, с помощью которых формируется вектор цели стохастического робастного управления, в связи с тем, что внешние возмущения часто носят стохастический характер, а их характеристики хорошо исследованы, при синтезе робастной системы целесообразно использовать информацию о характеристиках случайных внешних воздействий. При таком подходе минимизируется анизотропная норма стохастической системы, что позволяет получить минимальную чувствительность синтезированной стохастической системы к изменению параметров моделей объектов управления и внешних воздействий по сравнению с аналогичными системами оптимального управления и удовлетворить техническим требованиям, которые предъявляются к синтезированной системе.

Разработан метод многокритериального параметрического синтеза многомассовых систем, структура регуляторов которых задается на основе разработанных математических моделей, позволяющий вместо решения сложного уравнения Гамильтона–Якоби–Беллмана–Айзекса решать задачу нелинейного программирования по определению матриц коэффициентов усиления регуляторов и наблюдателей синтезированной системы.

Получили дальнейшее развитие методы и алгоритмы решения задач многокритериальной оптимизации на основе нелинейной схемы компромиссов, квазиньютоновских методов и метода последовательного квадратичного программирования.

Уточнены математические модели объектов управления многомассовых систем, а именно, главных приводов прокатных станов с учетом их взаимного влияния через прокатываемый металл, систем наведения и стабилизации, трехопорных управляемых платформ, обмоточных машин, двухканальных систем с раздельной нагрузкой, дискретно-континуальных объектов управления, что позволило учесть наличие упругих элементов и нелинейных характеристик внешнего трения в объектах управления и в исполнительных устройствах и в результате повысить точность управления.

Результаты диссертации используются в научно-производственной корпорации «Киевский институт автоматики», в Львовском радиотехническом институте, на предприятии «Хартрон-Арко», на Харьковском бронетанковом ремонтном заводе и в учебном процессе кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Ключевые слова: многомассовые системы, аналитические модели нелинейностей, системы автоматизированного управления, анализ и синтез сложных систем, нелинейное робастное управление, многокритериальный синтез, моделирование динамических систем.

Nikitina T. B. Multicriterion synthesis of nonlinear robust control by multimass systems on the basis of analytical models of the nonlinear loading. – Manuscript.

Thesis for scientific degree of doctor of engineering science on speciality 05.13.07 – Automation of control processes. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2011.

The dissertation is devoted development of perspective conception of multicriterion synthesis of nonlinear robust control the multimass systems of automatic control on the basis of mathematical models and methods of vectorial optimization of quality indexes.

A method is developed, allowing grounded to choose weight matrixes in criteria qualities of optimum control and matrix, by which the vector of optimization parameters is formed at a nonlinear robust control, by the decision of multicriterion task of the nonlinear programming so that to suit, which are produced to the synthesized system. The equivalence of decision of task of synthesis of nonlinear robust control is rotined on the basis of conception functionally to plural belonging to the state vector of the decision of Hamilton–Jacobi–Bellman–Isaacs equation.

Methods and algorithms of decision of multicriterion optimization problem got further development on the basis of nonlinear chart of compromises, quasi-Newton methods and method of the sequential quadratic programming. The mathematical models of plant for multimass systems got further development. By the synthesized regulators it was succeeded to get dynamic descriptions systems, satisfying technical requirements, to produced to the modern system.

Key words: multimass systems, analytical models of the nonlinear, automated control systems, analysis and synthesis of complex systems, nonlinear robust control, multicriterion synthesis, modeling of dynamic systems.

