ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Булух Мессауд

УДК 62-83-52

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПІДВИЩЕНИМ ПОРЯДКОМ АСТАТИЗМУ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Специальність 05.09.03 - Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2000

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському державному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник **Гуль Альберт Ігнатійович**, Харківський державний політехнічний університет, с.н.с. кафедри автоматизованих електромеханічних систем

Офіційні опоненти - - доктор технічних наук, професор **Кузнєцов Борис Іванович**, Українська інженерно-педагогічна академія, м.Харків, зав. кафедри систем управління та автоматизації промислових установок,

- кандидат технічних наук, доцент **Васильєв Вадим Олексійович**, АТ “ Науково-технічне товариство “Цемент””, м. Харків, ведучий науковий співробітник

Провідна організація - **Донецький державний технічний університет** кафедра електроприводу та автоматизації промислових установок, Міністерства освіти і науки

України, м. Донецьк.

Захист відбудеться "23" листопада 2000 р. о 14 год. 30 хв.
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Харківському державному політехнічному університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий " " жовтня 2000 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема удосконалювання устаткування і технологій з метою підвищення якості продукції і ресурсозбереження є пріоритетною в технічній політиці України. Її рішення неможливе без подальшого підвищення всіх показників якості керування складними електромеханічними системи (ЕМС) виробничих механізмів і їх підтримки на необхідному рівні, що неодноразово (1992-1999 рр.) відзначалося на науково-технічній конференції “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика” та міжнародних конференціях. Значні досягнення минулих десятиліть в елементній базі, у структурному удосконалюванні систем і синтезі оптимальних регуляторів суттєво підвищили загальний рівень якості керування електроприводами (ЕП). Проте існують нетрадиційні шляхи подальшого його підвищення, які не вимагають майже ніякого додаткового переустаткування і потребують незначних витрат, що особливо актуально в даний час для України. До них відносяться наступні два актуальні напрямки, що розвиваються на кафедрі “Автоматизовані електромеханічні системи” ХДПУ:
- удосконалювання структур систем підпорядкованого регулювання (СПР) зі спостерігачами стану (СС), розрахованими на підвищені порядок астатизму і швидкодію;
- мінімаксна оптимізація параметрів пропорційно-інтегральних (ПІ) корегуючих пристроїв складних ЕМС на максимальний запас стійкості і знижену параметричну чутливість.

Об'єднання цих напрямків з вибором найбільш досконалих структур із підвищеним порядком астатизму та їх параметричною оптимізацією по високоефективних мінімаксних критеріях забезпечують додаткове підвищення всіх показників якості керування системами ЕП постійного струму (ПС), а тому є актуальним.
Цим і супутнім їм напрямкам рішення проблеми поліпшення якості керування ЕП ПС і присвячена дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана за держбюджетною темою 5.51.06/037 "Розробка високоточних автоматизованих електроприводів для ресурсозберігаючих технологій" за програмою 5.1.6 “Ресурсозберігаючі електромеханічні системи”, затвердженою Державним комітетом України з питань науки і технологій наказом N 15 від 1 березня 1993 року.

Мета і задачі дослідження.
Робота полягає у поліпшенні методами математичного програмування якості

керування удосконалених СПР ЕП ПС із підвищеним порядком астатизму і СС.
Задачі дослідження відповідно до мети роботи охоплюють наступні аспекти проблеми:
1- розробка з використанням математичних моделей комбінованих СПР швидкості з СС, що мають підвищений порядок астатизму, методик мінімаксної оптимізації параметрів їхніх ПІ корегуючих пристроїв на максимальний запас стійкості і знижену параметричну чутливість;
2- аналіз результатів мінімаксної оптимізації по обраних обєктів показниках якості керування і коефіцієнтах параметричної чутливості;
3- дослідження стійкості у великому, а також підвищення якості керування оптимізованих систем завдяки раціональному вибору структури нелінійного обмеження підпорядкованої координати;
4- розробка інженерних методик синтезу, оптимізуючих систем на максимальний запас стійкості при підвищеній добротності, двократно- і трикратноінтегруючих СПР швидкості з СС;
5- розробка інженерних методик точного настроювання оптимальних значень параметрів ПІ-регуляторів швидкості (ПІ-РШ), СС і диференцюючого зв'язку, комбінованого керування на підвищену якість керування і регулювання безпосередньо на діючому устаткуванні.
Об'єктами дослідження в дисертаційній роботі прийняті удосконалені СПР швидкості одномасового ЕП ПС із підвищеним порядком астатизму і СС.
Предметами дослідження в дисертаційній роботі є сім удосконалених СПР швидкості одномасового ЕП ПС з порядком астатизму від одного до чотирьох і СС від другого до шостого порядку включно.
Методи досліджень. Для рішення задач використана теорія автоматизованого ЕП, теорія автоматичного керування, методи математичного моделювання, математичного програмування та виконано експериментальні дослідження.
Наукова новизна одержаних результатів:
1. Вперше на основі досліджень сімейств перехідних характеристик рівного рівня добротності СПР швидкості ЕП ПС із СС у просторі параметрів їхніх ПІ-корегуючих пристроїв поставлені і вирішені мінімаксні задачі оптимізації на максимальний запас стійкості по крітерію мінімума перерегулювання. Показано перевагу мінімаксного критерію максимального запасу стійкості на прикладі досліджених СПР із ПІ-РШ, $ПІ^2$-РШ і СС у порівнянні з традиційними критеріями екстремальних задач на мінімум інтегральних оцінок.
2. Вперше, базуючись на визначенні лінії максимального запасу стійкості в просторі параметрів ПІ-корегуючих пристроїв СПР швидкості ЕП ПС із СС, поставлена і вирішена задача оптимизації на максимум добротності і знижену параметричну чутливість при заданому запасі стійкості.
3. Вперше поставлена і вирішена методами математичного програмування екстремальна задача оптимізації параметрів диференцюючого зв'язку на мінімум усталеної похибки керування в комбінованій СПР швидкості ЕП ПС із СС.
4. Виявлено неприйнятну якість керування СПР із ПІ-РШ і СС при розгоні з струмообмеженням струму до номінальної швидкості (з обмеженням завдання на підпорядкований контур струму нелінійною ланкою насичення).
5. Виявлено існування нестійкого і стійкого граничних циклів у СПР із $ПІ^2$-РШ, і СС з обмеженням струму і напруги тиристорного перетворювача (ТП) нелінійними ланками типу "насичення" і перехід системи з нестійкого циклу в стійкий при стрибках

завдання швидкості, менших номінального значення, а також знайдені параметри автоколивань на стійкому граничному циклі, які не піддаються усуненню як сигналами керування, так і аварійним захистом типових ТП.
6. Запропоновані і досліджені структурні схеми з перемінною кратністю інтегрування для всіх СПР із ПІ-РШ, ПІ^2-РШ і СС при струмообмеженні, стійкі у великому і з якістю керування, що наближається до оптимального по швидкодії з обмеженням координат.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено методику структурного моделювання з одночасним автоматизованим пошуком оптимальних параметрів ПІ-РШ і ПІ^2-РШ СПР ЕП ПС із СС мінімізацією перерегулювання за допомогою ПЕОМ і пакету програм СИАМ.
2. Розроблено методику пошуку за допомогою пакету програм СИАМ коефіцієнта передачі компенсуючого зв'язку по похідній від керування в комбінованій СПР швидкості ЕП ПС із СС шляхом мінімізації усталеної похибки.
3. Знайдено кількісні оцінки одночасного підвищення всіх показників якості керування (перерегулювання - на 6-10%, максимум динамічної похибки при накиді навантаження - на 7-10% і інтегральні квадратичні оцінки - на 10-25%) і зменшення коефіцієнтів їхньої чутливості по більшості параметричних збурювань (по деяких- у два-п'ять разів) в усіх розглянутих у дисертації оптимізованих на максимальний запас стійкості астатичних ЕМС із підвищеними порядками астатизму.
4. Запропоновано спосіб і розроблені принципові схеми обмеження струму як підпорядкованої координати СПР ЕП ПС із СС, ПІ-РШ і ПІ^2-РШ, що забезпечують абсолютну жорсткість його обмеження при стійкості і підвищеній якості керування у великому.
5. Розроблено діаграми якості керування каналами СПР із ПІ-РШ, ПІ^2-РШ і СС і запропонована методика високоточного настроювання каналів на діючому устаткуванні по лінії максимального запасу стійкості.
6. Розроблено пакет діалогових програм автоматизованого моделювання і мінімаксної оптимізації комбінованих СПР із П-РШ, ПІ-РШ, ПІ^2-РШ і СС, що включено у бібліотеку типових програм персональних комп'ютерів для наукових досліджень і навчального процесу на кафедрі “Автоматизовані електромеханічні системи” ХДПУ (м. Харків).

Винесені на захист наукові положення і результати можуть бути використані для підвищення якості керування СПР швидкості ЕП ПС, діючих та тих, що модернізуються. Це дасть підвищення якості продукції підприємствам України, які обладнані безперервними прокатними станами, машинами, що виробляють папір, верстатами з числовим програмним керуванням, роботами і т.ін.

Особистий внесок здобувача. Роботи [5, 6, 8] написані автором самостійно. У статтях [2, 4 і 8] автору належить розробка методик, комп'ютерне моделювання, аналіз результатів і висновки. Результати робіт [1, 3] належать авторам рівною мірою.
У винесених на захист наукових положеннях не містяться результати, що належать співавтору.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (Харків, 1999 р.), а також на семінарах за планом національної Академії наук України “Динаміка нелінійних

електромеханічних систем" (м. Харків, 1999-2000 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертації опублікований у восьми статтях, з яких три опубліковані автором самостійно.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків та додатка. Повний обсяг дисертації 186 сторінок, 30 ілюстрацій на 21 сторінок та 31 ілюстрація по тексту; 10 таблиць на 11 сторінок 1 додаток на 16 сторінок, 164 використано літературних джерел на 18 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність і наукова новизна роботи, а також сформульована мета дослідження.

У першому розділі на основі огляду літературних джерел подано аналіз сучасного стану проблеми підвищення якості керування системами ЕП ПС із підвищеним порядком астатизму, обрані сім удосконалених СПР і поставлені задачі дослідження.

В другому розділі на основі структурних схем обраних семи удосконалених СПР швидкості з СС і підвищеними порядками астатизму розроблені моделі і методики їхнього дослідження в середовищі стандартного пакету програм автоматизованого моделювання і параметричної оптимізації СИАМ, а також по розробленій спеціалізованій програмі. Краща з цих СПР (рис.1 і рис.2) реалізується на сучасній елементній базі УБСР-АІ, має зменшену кількість корегуючих зв'язків між каналами, досконаліть у виборі і настроюванні типового регулятора (П-РШ, ПІ-РШ і ПІ^2-РШ) і незалежність настроювань параметрів РШ і компенсуючого зв'язку комбінованого керування.

У верхній частині рис.1 з урахуванням пунктиру показана з загальноприйнятими позначеннями структурна схема трикратноінтегруючої СПР ЕП постійного струму з ПІ^2-РШ, ланкою компенсації впливу ЕДС двигуна і фільтром у каналі зворотного зв'язку по швидкості. Без СС система має по каналу збурення другий порядок астатизму, що спричиняє похибку третьоїпохідної.

У нижній частині рис.1 подано структурну схему СС і вказано зворотні зв'язки по струму двигуна і його швидкості, заведені через спостерігач в основний канал системи. Структурна схема СС повторює структурну схему традиційної СПР із ПІ^2-РШ у верхній частині схеми і з'єднана з нею трьома корегуючими зв'язками з коефіцієнтами передачі l_1^*, l_2^*, l_3^*. Внаслідок дії ітераційного алгоритму для випадку функціонування каналу традиційної частини системи разом з каналом спостерігача синтезована система здобуває астатизм третього порядку по збуренню, завдяки чому в ній відсутня похибка третій похідній при дії навантаження M_c.

У дисертації з метою підвищення порядку астатизму і по керуванню на вхід регулятора струму в обхід регулятора швидкості введено компенсуючий зв'язок по першій похідній від сигналу завдання швидкості $U_{зс}$ у формі реальної диференціюючої ланки K_y p/(T_m p+1) (рис.1). Аналітичне визначення її коефіцієнта передачі K_y в такій складній системі є досить важким, і тому були використані чисельні методи математичного програмування зі зведенням рішення до задачі мінімізації усталеної похибки на персональному комп'ютері за методикою [7]:

$$\varepsilon^2(K_y, t_к) \rightarrow \min_{K_y \in (K_{y1}, K_{y2})}, \qquad (1)$$

де $e^2(K_y, t_к)$ – квадрат усталеної похибки при степеневому керуючому сигналі з показником ступеня, рівним вихідному порядку астатизму;
$t_к$ - час досягнення усталеного значення похибки з заданою точністю;
K_{y2} - значення коефіцієнта зв'язку, що диференціює, при перекомпенсації похибки.

Розроблена модель комбінованої СПР із ПІ^2-РШ і СС (рис.2) повторює в основному структуру схеми рис.1, але в умовних позначках, прийнятих у СИАМі, й у такому вигляді виводиться на екран монітора комп'ютера. Для параметричної оптимізації і дослідження її результатів на вхід системи подається степеневий сигнал

$$U_{зс}=K_q\, t_q\, \mathbf{1}(t) \quad \text{при} \quad q \in [0:4], \tag{2}$$

зформований у блоках 1-3, а виходами системи є похибка керування e (блок 4), її максимальне значення (блок 64), а також її модульна (блоки 67, 68) і квадратична (блоки 65, 66) інтегральні оцінки. Дослідження результатів оптимізації при збуренні від навантаження ЕП здійснено подачею на блок 24 типового сигналу $M_c=K_q t_q \mathbf{1}(t)$ (блоки 27-29) при $q \in [0:3]$ і шляхом аналізу похибки керування на виході блоків 4, 64, 65, 66 і 68.

Наведена на рис.2 модель надає можливість постановки мінімаксної задачі безумовної оптимізації на максимальний запас стійкості по мінімуму перерегулювання (МП) при варіації безінерційної компоненти і сталості інтегральної компоненти в ізодромних ланках ПІ^2-РШ. Модель містить чотири корегуючих ізодромних ланки в контурах швидкості (два в першому і ще два в другому каналах). Послідовно з їх безінерційними компонентами введені блоки добутку 8, 12, 34 і 38, керовані єдиним сигналом варіації параметрів від блоку 13, чим і забезпечується при заданому вихідному значенні добротності рішення задач безумовної оптимізації в СИАМі за наступними критеріями [1]:
максимальний запас стійкості МП

$$\max_{t\in[0,t_k]} \varepsilon(K,t) \to \min_{K\in[K_1,K_2]}; \tag{3}$$

мінімум модульної інтегральної оцінки (МІО) похибки керування

$$\int_0^{t_k} |\varepsilon(K,t)|\,dt \to \min_{K\in[K_1,K_2]}; \tag{4}$$

мінімум квадратичної інтегральної оцінки (КІО) похибки керування

$$\int_0^{t_k} \varepsilon^2(K,t)\,dt \to \min_{K\in[K_1,K_2]}, \tag{5}$$

де K, K_1 і K_2 - коефіцієнт передачі блоку 13 і межі його варіації;
$t_к$ - час регулювання.

Для коректної постановки екстремальних задач (1) необхідне знання вихідного порядку астатизму системи. Для експериментального визначення порядку астатизму розроблено методику на підставі аналізу сигналу похибки в усталеному динамічному режимі при типовому впливі за законом степеневої функції (2) [7]. Результати таких експериментів найкраще уявити, якщо накласти графіки трьох процесів зміни похибки: при показнику ступеневого сигналу, що дорівнює порядку астатизму, на одиницю меншому і на одиницю більшому, позначивши їх відповідними цифрами. Методика кількісної оцінки підвищення грубості оптимізованих систем до

параметричних збурень містить в собі у визначенні коефіцієнтів чутливості, що розраховуються чисельними методами диференціювання таблично заданих функцій за результатами структурного моделювання. Найпростіша методика їхнього визначення в СИАМі заключається в одночасному моделюванні двох моделей системи з рівними різнополярними відхиленнями деякого параметра і обчисленні наприкінці процесу відповідного коефіцієнта чутливості по формулі

$$S_{A_i}^{Q_j} = \frac{Q_{j1} - Q_{j2}}{2\Delta A_i}, \qquad (6)$$

де Q_{j1} і Q_{j2} - значення показника якості керування в моделях з параметрами $A_i \pm DA_i$.

Величина DA_i підбирається експериментально по необхідній точності визначення коефіцієнтів чутливості.

У третьому розділі приведені результати досліджень по розроблених методиках семи удосконалених СПР із СС і комбінованим керуванням. Система рис.1 досліджувалася з електродвигуном типу П24/160-6,8, $P_н$=6800 квт, $U_н$=850 В, $I_н$ =8460 А, $w_Н$ =6,28 $с^{-1}$, $M_н$ =1,08Ч10^6 Нм і тиристорним перетворювачем типу ТПП1, $U_{dн}$ =1050 В, $I_{dн}$ =10-12.5 кА.

Параметри моделі рис.1 відповідають параметрам системи: $K_{ТП}$ =100, T_m =0,007 с, $R_э$ =6,076Ч10^{-3} Ом, $L_э$ =4,97Ч10^{-4} Гн, $T_э$ =0,0816 с, $T_м$ =0,034 с,

$m_{дв} = T_м / T_э$=0,417, $(СФ)$=130 ВЧс, J=9,5Ч10^4 кгЧ$м^2$, $\Omega^2_{одв}$=360,4 $с^{-2}$, $U_{зс}$ =10 В,

$K_{ДТ}$ =5,81Ч10^{-4} В/А, $K_{дс}$ =1,59 В/с, $K_{рт}$ =0.61, $U_{огр.U} = U_{d.\ макс}$ =±1050 В, $U_{огр.\ I}$ =±10,32 В, $K_{рс}$ =7,83, $2gT_m$ =0,2 при g =10, K_0=0,588, T_0=0,134 с, $T_ф$=0,003 с.

На рис.3а наведені унімодальні залежності перерегулювання (крива 1) і інтегральних оцінок (2 - модульна, 3 - квадратична) при стрибку керування ($K2$=0 і $K3$=-10) від коефіцієнтів передачі пропорційної складової ПІ$^{2-}$регуляторів швидкості в межах 0,85<$K13$<1,6, що надає можливість вирішення задач безумовної оптимізації чисельними методами математичного програмування [1]. Рішенням мінімаксной задачі (3) знайдене значення $K13$=1,077, одержане з точністю 0,001 за 55 секунд на комп'ютері Pentium 133 МГц. Рішенням екстремальних задач (4) і (5) є значення $K13$=1,24 і $K13$=1,28 з точністю 0,001 (за 60 секунд). Приведений на рис.3б параметричний ряд динамічних похибок в залежності від стрибка керування в оптимізованій за критеріями (3), (4), (5) системі (процеси 1, 2 і 3) і при типовому настроюванні (процес 4) ілюструє переваги використання мінімаксного критерію на максимальний запас стійкості по перерегулюванню і часу регулювання.

Всі основні показники якості керування (максимум динамічного осідання швидкості при накиді навантаження $Dw_{ДИН}$, МІО, КІО, час досягнення першого максимуму t_{m1} і регулювання $t_{рег}$) при стрибку навантаження і кубічно зростаючому сигналі керування, а також коефіцієнти параметричної чутливості поліпшені шляхом мінімаксної оптимізації на максимальний запас стійкості по МП (3) і приведені в табл.1 і табл.2.

Таблиця 1

Показники якості керування

Показники якості керування	Типові збурення і настроювання			
	$U_{зс}$ =-10t^3 **1**(t)		M_C =1,08Ч10^{6}Ч**1**(t)	
	база МП		База МП	
DwДИН	-1,36Ч10^{-3}	-1,29Ч10^{-3}	25,71Ч10^{-2}	25,61Ч10^{-2}
МІО	2,53Ч10^{-4}	2,30Ч10^{-4}	29,32Ч10^{-3}	21,69Ч10^{-3}
КІО	1,71Ч10^{-7}	1,38Ч10^{-7}	42,53Ч10^{-4}	32,14Ч10^{-4}
t_{m1} , с	0,111 0,111	0,0202	0,0202	
$t_{рег}$, с	0,707 0,626	0,424	0,242	

Таблиця 2

Коефіцієнти параметричної чутливості

Настрою-вання	Чутливість КІО при M_C =1,08Ч10^{6}Ч**1**(t) по					
	?????????? ??????	моменту інерції	опору якоря	індуктив-ності якоря	малій постійній часу	посиленню перетворю-вача
База	1,13Ч10^{-4}	-44,97Ч10^{-5}	26,76Ч10^{-3}	25,67	34,03Ч10^{-2}	11,09Ч10^{-5}
МП	0,72Ч10^{-4}	-20,46Ч10^{-5}	10,55Ч10^{-3}	17,12	28,65Ч10^{-2}	07,47Ч10^{-5}
МП в.о.	0,64	0,45	0,39	0,66	0,84	0,67

За розробленою у другому розділі методикою експериментально визначені порядки астатизму по керуванню і збуренню в СПР рис.2 без комбінованого керування [4, 7]. На рис.4а процес 3 має відмінну від нуля усталену похибку, і це є свідченням астатизму третього порядку по керуванню. Процеси при збурюванні по навантаженню приведені на рис.4б, з яких 3 має відмінну від нуля усталену похибку і, отже, система і по збуренню має астатизм третього порядку.

Збільшенням коефіцієнта передачі диференіюючого зв'язку комбінованого керування $K15$ (рис.2) при сигналі завдання з показником ступеня 3 визначене значення $K15$=1, при якому має місце перекомпенсація усталеної похибки зі зміною її знака (рис.4в). Рішенням екстремальної задачі мінімізації квадрата її значення (цільова функція на виході блоку 65, рис.2) при варіації коефіцієнта диференціюючого зв'язку у межах 0<K15<1 визначене його оптимальне значення $K15$=0,264. На рис.4г подані результати рішення цієї задачі. Процес 4 має відмінне від нуля усталене значення похибки, що свідчить про підвищення порядку астатизму по керуванню до чотирьох. Час рішення з точністю 0,001 методом Гаусса-Зейделя складає приблизно 40 секунд. Аналогічні результати одержані для всіх семи обраних систем [2, 5, 6].

У четвертому розділі приведені результати досліджень стійкості систем у великому при нелінійному обмеженні підпорядкованої координати струму. У розробленій моделі уніфікованої СПР швидкості підвищеного порядку астатизму зі змінною кратністю інтегрування (рис.5) обмеження струму здійснюється нелінійною ланкою насичення (блок 16), включеною на вході підпорядкованого контуру струму. Систему обладнано логічним зворотним зв'язком від ланки насичення (блоки 17, 18 і 19) до ключа (блок 6) на вході інтегратора (блок 7) першої ПІ-корегуючої ланки і до іншого ключа (блок 10) на вході інтегратора (блок 11) другої ПІ-корегуючої ланки, що відключає вхідні сигнали інтеграторів при перевищенні вхідним сигналом ланки насичення рівня обмеження і включає вхідні сигнали інтеграторів при зниженні

вхідного сигналу ланки насичення нижче рівня обмеження. При K=0 у блоці 18 зворотний зв'язок не діє, ключ закритий і моделюється традиційне нерегульоване нелінійне обмеження.

Стрибок надання швидкості реалізується в блоці 1. Реверс з "відсіченням струму" задається блоком 3 (генерація меандру одиничної амплітуди з заданою частотою) і блоком 4 (завдання амплітуди). Ланка насичення у блоці 25 моделює рівень цілком відкритого ТП.

Перехідний процес швидкості при стрибку завдання $U_{зс}$=2,3 В, наведений на рис.6а, характеризують довго не загасаючі коливання трикутної форми з реверсом швидкості, який супроводжується відсіченням струму. При стрибку завдання $U_{зс}$=2,318 В система знаходиться на нестійкому граничному циклі рис.6б, генеруючи трикутної форми реверсивні коливання швидкості під відсічення струму з частотою $f_{нпц}$=2,05 Гц. При $U_{зс}$>2,318 В рис.6в мають місце розбіжні коливання з реверсом швидкості трикутної форми під відсічення струму зі зменшенням частоти коливань $f<f_{нпц}$ до моменту насичення ТП. Таким чином, система нестійка у великому і розбіжні коливання виникають вже при стрибку завдання в 25% від номінального значення. У режимі розбіжних коливань з нелінійним обмеженням струму настає момент насичення ТП, і нестійкі коливання трикутної форми переходять в стійкі автоколивання що мають форму трапеції з амплитудою, яка на 10% вища ниж номінальна в іншому стійкому граничному циклі системи на частоті $f_{упц}<f_{нпц}$.

Перехідні процеси при тих же стрибках завдання, але з включеним логічним зв'язком, наведені на рис.6г,д,е і ілюструють стійкість системи та прийнятну якість керування в нелінійній ситемі при великому сигналі завдання, причому при зростанні стрибка завдання якість керування зростає аж до квазиоптимального по швидкодії з обмеженням координат.

Принципову електричну схему керуючих пристроїв обмеження завдання струму з перемінною кратністю інтегрування системи наведено на рис.7. Для реалізації струмообмеження типова схема на базі УБСР-АІ доповнена суматором (А7) сигналів регулятора швидкості (А1, А2, А3, А4, А5 і А6) і диференціюючого зв'язку (А8 і А19) перед вузлом насичення (А9). Входи інтеграторів (А3 і А6) ПІ^2-РС переключаються нормально закритими контактами герконових реле, керованими компаратором (А10) зі зворотним логічним зв'язком від вузла насичення (А9).

Ковзаючі контакти резисторів, здійснюючих підстройку, у ланцюгах пропорційних складових ПІ-корегуючих пристроїв механічно зв'язані і використовуються при високоточному мінімаксному настроюванні системи на максимальний запас стійкості без ідентифікації її параметрів [5]. Перемінний резистор у ланцюзі диференціюючого зв'язку комбінованого керування використовується при настроюванні її коефіцієнта передачі на мінімум усталеної похибки при типовому степеному керуючому сигналі з показником, рівним вихідному порядку астатизму системи. Аналогічні результати досліджень одержані при дослідженні всіх обраних систем [1-8].

У п'ятому розділі розроблені нові інженерні методики розрахунку і настроювання астатичних РШ каналів СПР із СС на максимальний запас стійкості [1, 3]. На основі бажаної нормованої ЛАЧХ двократно- і трикратноінтегруючого каналів з настроєним на типовий модульний оптимум підпорядкованим контуром струму побудовані діаграми якості керування в площині параметрів частот зрізу і низькочастотного сполучення з областю стійкості лініями однакого рівня добротності і перерегулювання і лінією максимального запасу стійкості (рис.8).

Крапки лінії максимального запасу стійкості визначені у мінімаксних процедурах за методикою, поданою у другому розділі, формульний вираз якої визначено за допомогою регресійного аналізу

при n=2 a=-0,05b^2 +0,76b-0,86 (7)

при n=3 a=-0,011b^2+0,33b-0,15 (8)

де n - кратність інтегрування;

a - параметр частоти зрізу;

b – параметр частоти низькочастотного сполучення ЛАЧХ.

Параметри бажаної нормованої ЛАЧХ при заданому перерегулюванні s визначаться однозначно за формулами:

при n=2 b=17,25Чехр(-0,04Чs)+2,65, (9)

при n=3 b=31,76Чехр(-0,034Чs)+4,03. (10)

Значення коефіцієнта підсилення розімкнутого контура при цьому є максимальним

$$k = (a.b^{n-1})^{-1}. \quad (11)$$

Відзначені на діаграмах рис.8 зірочками вихідні типові настроювання каналів досліджених систем розташовані незалежно від лінії максимального запасу стійкості. Це вказує на існування резервів підвищення їхньої якості керування за методиками, що захищаються.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено математичні моделі семи комбінованих СПР швидкості ЕП постійного струму з П-, ПІ- і ПІ^2-регуляторами, замкнуті через СС, а також методики їхньої параметричної оптимізації за критеріями мінімуму модульної і квадратичної інтегральних оцінок похибки за допомогою персонального комп'ютера з використанням системи автоматизованого моделювання і параметричної оптимізації СИАМ.
2. Розроблено методики оптимізації на ПЕОМ параметрів диференціюючого зв'язку досліджуваних комбінованих систем на мінімум усталеної похибки при керуючому впливі у вигляді степеневої функції з показником, рівним вихідному порядку астатизму.
3. Розроблено методики мінімаксної оптимізації параметрів регуляторів досліджуваних систем у часовій області шляхом мінімізації перерегулювання з повним перебором розрахункових величин перехідної характеристики на персональному комп'ютері за допомогою системи автоматизованого моделювання і параметричної оптимізації СИАМ.
4. Розроблено методики аналізу оптимизованих систем по показниках якості керування і коефіцієнтах параметричної чутливості на персональному комп'ютері по програмі СИАМ.
5. Визначено кількісну оцінку поліпшення всіх показників якості керування при настроюванні на максимальний запас стійкості по МП при заданому значенні добротності досліджених систем, а також їхніх коефіцієнтів чутливості для більшості параметрів.
6. Створено спеціалізований пакет програм автоматизованого моделювання і параметричної оптимізації досліджуваних СПР із СС за розробленими методиками.
7. Експериментально підтверджено факт підвищення на порядок астатизму по керуванню при умовах комбінованого керування і по збурюванню від навантаження в досліджених СПР із СС у порівнянні з традиційними структурами.

8. Зроблено безумовну оптимізацію на ПЕОМ усіх досліджуваних СПР із ПІ-РШ і $ПІ^2$-РШ і заданим вихідним настроюванням значень добротності по трьох критеріях (максимальний запас стійкості по МП, мінімум МІО і мінімум КІО) і показано перевагу використання мінімаксного критерію оптимізації по запасу стійкості і часу регулювання у всіх досліджених системах.
9. Виявлено неприйнятну якість керування СПР із ПІ-РШ і СС при розгоні під відсічення струму до номінальної швидкості з обмеженням завдання на підпорядкований контур струму нелінійною ланкою насичення, а також існування нестійкого граничного циклу в СПР із $ПІ^2$-РШ і СС із нелінійною ланкою обмеження завдання на підпорядкований контур струму типу насичення і виникнення розбіжних коливань при стрибках завдання швидкості, значно менших від номінального значення.

10. Знайдено параметри автоколиваннь на стійкому граничному циклі СПР із $ПІ^2$-РШ, СС і обмеженням струму і напруги ТП при використанні нелінійних ланок типу насичення, що характеризуються реверсом швидкості до значень, які на 10% вище номінальної, із граничним прискоренням під відсічення струму, а також автоколевання, що не можна усунути сигналами керування й аварійним захистом ТП.
11. Досягнуті стійкість у великому і якість керування, що наближається до оптимального з обмеженням координат, у всіх СПР із СС, ПІ-РШ, $ПІ^2$-РШ і перемінною кратністю інтегрування.
12. Розроблено принципові схеми пристроїв, що реалізують перемінну кратність інтегрування СПР швидкості ЕП ПС із СС при нелінійному обмеженні завдання підпорядкованому контуру струму.
13. Розроблено діаграми якості керування двократно- і трикратноінтегруючих каналів СПР із СС на площині параметрів їх нормованих бажаних ЛАЧХ.
14. Розроблено методики синтезу і настроювання двократно- і трикратноінтегруючих каналів СПР із СС по лінії максимального запасу стійкості і запропоновано пошукову методику точного настроювання диференціюючого зв'язку комбінованого керування СПР і на підвищений порядок астатизму по керуванню без ідентифікації параметрів.

СПИСОК ОСНОВНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гуль А.И., Булух Мессауд. Выбор принципа и критериев оптимизации параметров ПИ- регулятора электромеханической системы // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ, 1998. - Выпуск 21. - С. 104-108.
2. Гуль А.И., Булух Мессауд. Оптимизация параметров системы подчиненного регулирования с ПИ-регулятором скорости и наблюдателем состояния на максимальный запас устойчивости // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ, 1998. - Выпуск 27. - С. 17-21.
3. Гуль А.И., Булух Мессауд. Метод поиска стационарных точек функции двух переменных по интерполирующей поверхности второго порядка // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ, 1998. - Выпуск 27. - С.22-25.
4. Гуль А.И., Булух Мессауд. Настройка комбинированной системы следящего электропривода с ПИ-регулятором на максимальный запас астатизма системы // Вестник ХГПУ. -Харьков: ХГПУ, 1999. - Выпуск 30. - С. 75-77.
5. Булух Мессауд. Повышение качества управления трехкратноинтегрирующей системы подчиненного регулирования с наблюдателем состояния при ограничении

координат // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ, 1999. - Выпуск 55. - С.84-86.
6. Булух Мессауд. Повышение качества управления комбинированной СПР с наблюдателем состояния методами математического программирования // Вестник ХГПУ. -Харьков: ХГПУ, 1999. - Выпуск 66. - С. 152-157.
7. Гуль А.И., Булух Мессауд. Методика настройки комбинированной двухканальной СПР на повышенный порядок астатизма // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ, 2000. - Выпуск 77. - С. 62-64.
8. Булух Мессауд. Улучшение качества управления трехкратноинтегрирующей системы подчиненного регулирования с наблюдателем состояния минимаксной оптимизацией параметров // Сборник научных трудов ХГПУ. - Харьков: ХГПУ, 1999. - Выпуск 7. Ч. 3. -С. 127-131.

АНОТАЦІЇ

Булух Мессауд. "Оптимізація електроприводів постійного струму з підвищеним порядком астатизму методами математичного програмування".

Рукопис. Дисертація на здобуття ученого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 "Електротехнічні комплекси і системи". Харківський державний політехнічний університет, Харків, 2000.

Дисертація присвячена питанням підвищення показників якості керування удосконалених систем підпорядкованого регулювання швидкості одномасових електроприводів постійного струму зі спостерігачами стану. Розроблено методики синтезу і мінімаксної оптимізації систем на максимальний запас стійкості і визначення коефіцієнта передачі по першій похідній від сигналу керування в комбінованих системах із приведенням рішення до екстремальної задачі безумовної оптимізації. Визначено кількісні оцінки поліпшення показників якості керування і коефіцієнтів параметричної чутливості. Запропоновано структурні і принципові схеми нелінійного обмеження сигналу завдання підпорядкованої координати струму, що забезпечують стійкість у великому.

Ключові слова: мінімізація усталеної похибки, мінімаксний критерій, максимальний запас стійкості, стійкість у великому, якість керування, параметрична чутливість.

Булух Мессауд. "Оптимизация электроприводов постоянного тока с повышенным порядком астатизма методами математического программирования".

Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы". Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 2000.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы в количестве 164 наименований и приложения и посвящена вопросам повышения показателей качества управления и понижения параметрической чувствительности систем подчиненного регулирования скорости электроприводов постоянного тока с повышенным порядком астатизма и наблюдателями состояния нетрадиционными методами математического программирования.

Во введении обоснована актуальность и научная новизна работы, а также сформулирована цель исследования.

В первом разделе на основе обзора литературных источников дан анализ современного состояния проблемы повышения качества управления системами электроприводов постоянного тока с повышенным порядком астатизма. Повышенный

порядок астатизма современных систем электроприводов реализуется тремя основными способами: повышением кратности интегрирования замкнутого по отклонению основного контура регулирования одноканальной системы, введением компенсирующей связи по производной от возмущающего воздействия по принципу комбинированного управления и увеличением количества и кратности интегрирования каналов итерационных систем. На кафедре “Автоматизированные электромеханические системы” ХГПУ разработаны усовершенствованные СПР с пропорциональными, пропорционально-интегральными и пропорционально-интегральными в квадрате ($ПИ^2$) регуляторами скорости и наблюдателями состояния, выступающими в роли второго канала и повышающими на порядок астатизм по нагрузке в результате итерационного алгоритма функционирования с первым каналом. При необходимости дополнительного повышения порядка астатизма этих систем и по управлению используются принцип комбинированного управления.

Во втором разделе произведена постановка трех экстремальных задач безусловной оптимизации на минимум интегральных оценок и минимум установившейся ошибки, а также одной минимаксной задачи на максимальный запас устойчивости при значении добротности, заданной традиционной настройкой. Разработаны методики параметрической оптимизации по нетрадиционным эффективным критериям семи усовершенствованных комбинированных СПР с порядком астатизма от одного до четырех с помощью системы автоматизированного моделирования СИАМ и приведенной в приложении специализированной программы.

В третьем разделе приведены результаты компьютерных исследований семи оптимизированных систем в режимах стабилизации и слежения и их развернутый анализ. Все показатели качества управления улучшились (некоторые на 10%-20%), а коэффициенты параметрической чувствительности уменьшились (некоторые многократно) при оптимизации по защищаемым критериям и методикам.

В четвертом разделе приведены результаты исследований устойчивости в большом при нелинейном ограничении подчиненной координаты тока. Предложены структурные и принципиальные схемы нелинейного ограничения сигнала задания подчиненной координаты тока в классе СПР с переменной кратностью интегрирования, обеспечивающие устойчивость в большом и близкое к оптимальному по быстродействию с ограничением координат качество управления.

В пятом разделе разработаны инженерные методики расчета и настройки астатичних регуляторов скорости каналов СПР с наблюдателями состояния: диаграммы качества управления на плоскости параметров желаемой нормированной ЛАЧХ, синтез по линии максимального запаса устойчивости и точная настройка на действующем оборудовании системы без идентификации объекта управления. Приведена методика точной настройки коэффициента передачи по первой производной от сигнала управления в комбинированной системе.

В заключении сделаны выводы по результатам исследований.

Ключевые слова: минимизация установившейся ошибки, минимаксный критерий, максимальный запас устойчивости, устойчивость в большом, качество управления, параметрическая чувствительность.

Boulouh Messaoud. " Optimization of a direct current electric drives with the heightened order of astatism by methods of mathematical programming ".

The manuscript. Thesis is submitted for a Ph.D. degree in engineering science on a speciality

05.09.03 electrotechnical complexes and systems. Kharkov state polytechnic university, Kharkov, 2000.

The thesis is devoted to the problems of increasing the performance indices of improved subordinate control speed systems with state observer of one-mass DC electric drive. The techniques of synthesis and minimax optimization on the maximum stability margin of systems and definition of a transmission factor on the maiden derivative from a command signal in combined systems with reduction of the solution to an extremum problem of unconditional optimization are developed. The quantitative assessments of improvement of performance indices and factors of parametric sensitivity are determined. The structural and principal diagrams of non-linear limitation of a signal of subordinate coordinate current ensuring stability in large are suggested.

Key words: minimization of a steadied error, minimax rule, maximum stability margin, stability in large, quality of control, parametric sensitivity.