

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Колотило Віталій Іванович

УДК 62-83-52

**СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПІДВИЩЕНОЇ
ТОЧНОСТІ З СПОСТЕРІГАЧАМИ СТАНУ**

Спеціальність - 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 - доктор технічних наук, професор
Акімов Леонід Володимирович,
Харківський державний політехнічний університет,
професор кафедри автоматизованих
електромеханічних систем

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Коцегуб Павло Харитонович,
Донецький державний технічний університет,
професор кафедри електроприводу та
автоматизованих електротехнічних комплексів

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

Провідна установа - **Одеський державний політехнічний університет**
кафедра “Електромеханічні системи з комп’ютерним
управлінням”, Міністерства освіти і науки України,
м. Одеса

Захист відбудеться “ 19 ” жовтня 2000 р. о 16³⁰ год.
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 “ 16 ” вересня 2000 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Осічев О. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Освоєння і розвиток сучасних технологій висувають високі вимоги до автоматизованих електромеханічних систем (АЕМС). При цьому однією з важливих проблем автоматичного керування є створення таких систем, які б забезпечували високу точність роботи в умовах значних статичних навантажень і інтенсивних дій за збуренням, а також високу швидкодію при заданій якості перехідних процесів (ПП). Це відноситься до систем керування виконавчими пристроями клітей прокатних станів, антенними установками, промисловими роботами й маніпуляторами точних технологічних операцій, механізмами подачі важких металообробних верстатів, папіривиробничих машин і агрегатів.

В даний час широко розповсюдженим електроприводом (ЕП) постійного струму є тиристорний перетворювач-двигун (ТП-Д) із системою підлеглого регулювання (СПР) координат. Великий внесок у рішення теоретичних і практичних задач по створенню і впровадженню таких ЕП внесли наукові й виробничі колективи “ВНИИ електропривод”, НПО ХЕМЗ, “Тяжпромэлектротехпроект”, НПО «Перетворювач», “ВНИИМЕТМАШ”, МЕІ, ЛЕТУ, ОДПУ, ХДПУ, УДПУ, ЛДПУ й ін. Однак, поряд із відомими перевагами в даних ЕП існує недолік, виражений у протиріччі між точністю роботи й швидкодією. Тому задача подальшого підвищення точності роботи й швидкодії даного класу ЕП є досить актуальною. Цим улаштовується необхідність пошуку й розробки нових методів і підходів по удосконалюванню ЕП постійного струму зі СПР.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася за держбюджетною темою 5.51.061037 «Розробка високоточних автоматизованих електроприводів для ресурсозберігаючих технологій» по програмі 5.1.6 «Ресурсозберігаючі електромеханічні системи», затвердженій Державним Комітетом України з питань науки й технологій наказом № 5 від 1 березня 1993 року.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є створення автоматизованих електромеханічних систем із структурою підлеглого регулювання, що забезпечують при заданій якості динамічних режимів, які протікають в умовах дії на електропривод основного збурення, підвищену точність і швидкодію, за рахунок використання в них спостерігачів стану (СС).

Задачі дослідження відповідно до мети роботи полягають у наступному:

1. Виявлення можливих шляхів і нових способів збільшення точності роботи ЕП зі СПР при дії основного збурення.
2. Представлення розглянутих СПР швидкості і положення ЕП постійного струму ТП-Д і ТП-Г-Д у просторі станів, синтез для них СС повного й зниженого порядку й обґрунтування збільшення астаtizму систем за збурюючою дією, при введенні СС у ланцюг зворотного зв'язку.
3. Спрощення структур СС і зменшення значень коефіцієнтів коригувального зворотного зв'язку в спостерігачі.
4. Розробка методики синтезу узагальненого СС для СПР із різними регуляторами швидкості (РШ), ЕРС (РЕ) і положення (РП).
5. Знаходження виразів для статичних похибок і визначення параметричного астаtizму по впливі систем, що обурює, зі спостерігачем зниженого порядку.
6. Дослідження динамічних властивостей і похибок розроблювальних систем, що доповнені спостерігачем. Аналіз впливу СС на швидкодію СПР.
7. Розробка принципової схеми спостерігача і його технічного пристрою для використання в складі комплектних тиристорних електроприводів. Проведення фізичних експериментів на спеціально створеному лабораторному устаткуванні.

Об'єктом дослідження є підвищення точності електромеханічних систем постійного струму з системами підлеглого регулювання.

Предметом дослідження є електромеханічні системи постійного струму з системами підлеглого регулювання та СС.

Методи дослідження. Теорія електроприводу, теорія автоматичного керування використовувались для розрахунку СПР та їх аналізу; метод простору стану застосовувався для синтезу СС; математичний апарат лінійної алгебри для роботи з матрицями; топологічний метод аналізу для знаходження передатних функцій; інтегральне та диференціальне числення для розрахунку перехідних функцій.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Уперше запропоновано спосіб підвищення точності роботи СПР швидкості й положення без утрати ними швидкодії за рахунок збільшення порядку астатизму за збурюючою дією, що досягається введенням у системі зворотних зв'язків по струму двигуна і його швидкості від СС повного порядку. У порівнянні з існуючими СПР із П-РШ і П-РЕ, ПІ- і ПІ²-РШ, забезпечена відсутність відповідно статичної, швидкісної похибки й похибки по прискоренню, при довільному характері зміни дії за збуренням.

2. Для всіх розглянутих СПР, представлених у просторі стану, синтезовані СС повного порядку. Знайдено аналітичні вирази для коефіцієнтів коригувального зворотного зв'язку в спостерігачах.

3. Розглянуто вплив на швидкодію традиційних СПР швидкості СС, обґрунтовані рекомендації з вибору його середнє геометричного кореня. Доведено можливість ідентифікації системи зі спостерігачем нормованою передатною функцією вихідної СПР, але з новим еквівалентним значенням некомпенсованої сталої часу.

4. Для електроприводів із П-РШ і П-РЕ синтезовані скорочені спостерігачі і доведено, що їхнє використання в складі системи сприяє значному зменшенню статичних похибок, а при знайдених значеннях середнє геометричного кореня спостерігача приводить до параметричного астатизму за збурюючою дією. Виведено формули для статичних похибок.

5. Уперше доведено, що включення до складу дво - і трьохкратноінтегруючих СПР скороченого спостерігача другого порядку приводить до втрати їхнього астатизму по збуренню.

6. Обґрунтовано методику синтезу СС повного порядку з нецілком керованими полюсами, що має спрощену структуру і малі коефіцієнти корекції. За рахунок уведення в ланцюг зворотного зв'язку існуючих СПР швидкості й положення, спостерігач дозволяє збільшити на одиницю порядок їхнього астатизму за збурюючою дією.

7. Уперше показана можливість використання в СПР швидкості й положення зворотного зв'язку по динамічному струму, значення якого відновлюється СС другого порядку. Це сприяє підвищенню астатизму по збуренню систем із будь-яким типом РШ без утрати швидкодії.

8. Доведено, що при заданій точності роботи ЕП можлива заміна СПР із ПІ²-РШ на СПР із ПІ-РШ і СС, у свою чергу СПР із ПІ-РШ на СПР із П-РШ і СС, що приводить до збільшення швидкодії.

9. Розроблені СС повного і зниженого порядку, а також СС із нецілком керованими полюсами, застосовні для СПР положення при відпрацьовуванні малих, середніх і великих переміщень.

10. Запропоновано використання СС повного і зниженого порядків для одержання сигналу, пропорційного моменту навантаження, у ЕП постійного струму з одно -, дво - і трьохкратноінтегруючій СПР швидкості і положення.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність полягає в тому, що отримані результати цілком можуть застосовуватися для підвищення точності ЕП зі СПР різних промислових установок і агрегатів. Зокрема, вони в однаковій мірі можуть бути використані при створенні нових і модернізації діючих головних і допоміжних ЕП прокатних станів, антенних пристроїв, роботів і маніпуляторів, металообробних верстатів і ін. Запропоновані пристрої СС дозволяють підвищити точність роботи ЕП з СПР із мінімальними витратами. Вони реалізуються на сучасних стандартних електронних елементах і мають конструкцію, згоджену з комплектними тиристорними ЕП серії КТЕУ і ЕКТ, що випускаються НПО ХЕМЗ і НПО «Перетворювач».

Крім того, запропоновані СС у даних структурах використовуються для створення датчика статичного струму.

Результати досліджень випробувані на іспитовому стенді тиристорних ЕП з СПР у НПО «Преобразовательная техника» м. Запоріжжя і передані для впровадження і використання в проектно-конструкторській організації: НПО ХЕМЗ, НПО «Перетворювач».

Теоретичні положення, викладені в дисертації, використовуються в наукових дослідженнях і навчальному процесі в Харківському державному політехнічному університеті. Вони ввійшли спеціальним розділом у курс «Системи керування електроприводами», а також стали невід'ємною частиною бакалаврського і дипломного проектування спеціальності 7.092203 «Електромеханічні системи автоматизації й електропривод».

Особистий внесок здобувача. У роботах [1, 2] здобувач розробив математичні моделі СПР із СС, провів експериментальні дослідження. У роботі [3] проаналізував вплив СС на швидкодію розглянутих систем. У роботах [6,14] синтезовані СС. У роботі [4] здобувачем отримана умова досягнення параметричного астатизму другого порядку для однократноінтегруючих СПР із СС. У роботі [5] синтезовані рі-

зні СС повного і зниженого порядку, а в [7-9, 16] зроблене теоретичне обґрунтування використання СС у структурах СПР для збільшення астатизму за збурюючою дією, і виконана постановка задач досліджень, проведені математичні дослідження. У роботах [12, 17] знайдені формули статичних похибок, отримана умова досягнення параметричного астатизму по збуренню для СПР із пропорційними регуляторами швидкості і ЕРС, доповненими СС зниженого порядку. У роботі [10, 18] розроблена методика синтезу і технічний пристрій СС для електроприводів постійного струму зі СПР. У роботі [19] для СПР і систем модального керування зі скороченими спостерігачами отримані вирази для співвідношення похибок і побудовані їхні залежності. У роботах [13, 21] знайдені передатні функції замкнених систем і проведені математичні дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи повідомлені й обговорені на 7-ми науково-технічних конференціях: «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (м. Алушта, 1998-2000 р.); «Силовая электроника и энергоэффективность» (м. Алушта, 1998 р.); II Міжнародної (XIII всеросійської) конференції «Проблеми автоматизованого електропривода» (м. Ульяновск, 1998 р.); «mikroCAD. Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье» (м. Харків, 1998 р.); «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2000 р.). Крім того, зроблені чотири доповіді на наукових семінарах НАН України «Динаміка нелінійних електромеханічних систем» (м. Харків, 1997-1999 р.). Для студентів старших курсів спеціальності 7.092203. прочитано цикл лекцій по використанню СС у складі СПР ЕП постійного струму.

Публікації. Основний зміст дисертації опублікований у 22 друкованих працях. Серед них дві монографії, дванадцять статей, опублікованих у центральних наукових журналах України і Росії, три статті в збірниках наукових праць і п'ять у матеріалах науково-технічних конференцій.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку літературних джерел з 185 найменувань, додатків, містить 44 малюнка. Текст, викладений на 216 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проведено аналіз розвитку і стану питання про збільшення швидкодії і точності роботи АЕМС багатьох виробничих агрегатів сучасних технологій.

Найбільш розповсюдженими ЕП постійного струму є АЕМС із послідовною корекцією. Їхній синтез ґрунтується на модульному і симетричному критеріях оптимального настроювання. Такі АЕМС одержали назву систем підлеглого регулювання (СПР).

Не зупиняючись на широко відомих перевагах СПР, важливо відзначити істотний недолік даних структур, що полягає в їхньому явно вираженому протиріччі між точністю роботи і швидкодією.

Виходячи зі сказаного, в останні роки, зусилля багатьох учених були спрямовані на подолання зазначеного вище протиріччя.

Так у деяких роботах для підвищення швидкодії багатоконтурних СПР запропоновано використовувати комбінований принцип керування за задавальною дією. Однак він не впливає на збільшення точності роботи системи по каналі збурювання.

Реалізувати резерви підвищення швидкодії СПР можна за рахунок використання оптимальних керуючих впливів. Досяжні при цьому результати визначаються підвищенням швидкодії у контурі струму в межах 90-30%, а при регулюванні швидкості складають у залежності від її заданої величини 40-2%.

Розвивається нетрадиційний науковий напрямок по мінімаксовій оптимізації параметрів пропорційно-інтегральних коригувальних пристроїв на максимальний запас стійкості АЕМС при підвищеній добротності, із метою поліпшення показників якості керування і зниження їхньої параметричної чутливості. У цьому випадку, у систем із ПІ-регулятором швидкості або положення в порівнянні з типовим настроюванням на симетричний оптимум квадратична інтегральна похибка керування знижена на 15%, а максимум динамічної похибки швидкості при навантаженні знижений на 7% при тім же часі її відновлення.

Необхідно відзначити, що широкий розвиток в останні роки отримали АЕМС, називані системами модального керування (СМК), у яких швидкодія при відпрацьовуванні сигналів завдання вище, ніж у СПР. Але ЕП із СМК є статичними за збурюючою дією, тобто мають статичну помилку. Крім того, одним із недоліків СМК є необхідність у наявності інформації про повний вектор стану керованих координат. У випадку неможливості одержання цієї інформації застосовують ідентифікатори стану, або як їх ще називають, спостерігачі стану. У розглянутих роботах СС використовуються для відновлення коор-

динат, що не спостерігаються, без яких не можлива побудова СМК. У літературі відсутні приклади використання СС у цілком детермінованих системах для додання їм потрібних динамічних властивостей.

Значному підвищенню точності АЕМС сприяє використання принципу двоканальності. Однак, помилки зв'язані з дією збурюючих сил, і моментів на вихідний точний канал залишаються відповідними порядку його астатизму.

Максимальною швидкодією по каналі керування і граничною точністю у відпрацьовуванні збурювань володіють релейні СПР. Але значно ускладнені структури роблять їх мало придатними для широкого промислового застосування.

Не можна не відзначити перспективність впровадження в АЕМС робастного принципу керування. Однак реалізація робастних алгоритмів керування вимагає великої кількості датчиків, тим самим ускладнюючи систему, і що змушує шукати більш прийнятні для практичного впровадження способи і методи їхнього керування.

Таким чином, усі проаналізовані роботи і використовувані в них методи в тім або іншому ступені вирішують розглянуту проблему і, безумовно, множать успіхи в розробці основ теорії і методів синтезу ЕП, що володіють підвищеною швидкодією і точністю. Однак наявність цих досягнень не виключає необхідності розробки нових методів і підходів для рішення конкретних інженерних задач по поліпшенню точностних характеристик і підвищенню швидкодії.

Аналіз стану питання дозволив сформулювати мету роботи і поставити задачі дослідження.

В другому розділі для ЕП ТП-Д і ТП-Г-Д з П-, ПІ-, ПІ²-РШ, а також з П-РЕ СПР швидкості виконано синтез СС повного порядку [1, 6-9, 14, 16]. Приведено розроблені структурні схеми СПР швидкості, замкнуті через СС повного порядку, що володіють збільшеним на одиницю астатизмом за збурюючою дією.

Насамперед, для побудови таких систем, структурні схеми традиційних СПР представлені у виді, зручному для аналізу методом простору станів. Прийнято вектор перемінних стану X , яким є вектор-стовпець із числом рядків обумовленим порядком n системи, а його елементами є величини виходів відповідних інтеграторів $X_n = [X_1 X_2 \dots X_n]^T$, де n - порядок вихідної системи.

Записавши остаточні рівняння розглянутих СПР у просторі станів, відповідно до рівняння стану, виду

$$\dot{X} = AX + B_u U_y + B_{M_0} M_0 ; \quad Y = CX , \quad (1)$$

для СПР визначені матриці стану A , керування B_u , збурення B_{M_0} , виходу C .

$$A = \begin{bmatrix} A_{I-I} & A_{I-II} \\ A_{II-I} & A_{II-II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad B_u = \begin{bmatrix} b_{u1} \\ b_{u2} \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_{M_0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ b_{M_0n} \end{bmatrix}, \quad C = [0 \ 0 \dots 1]$$

Для синтезу СС повного порядку введена матриця модального зворотного зв'язку в ньому $L_{1n} = [\ell_{1n} \ell_{2n} \dots \ell_{nn}]^T$ і визначений характеристичний поліном

$$H_n(p) = \det(pI - A + L_{1n}C) . \quad (2)$$

Для додання СС бажаних динамічних властивостей, задана стандартна форма Баттерворта порядку n виду

$$H_{пж} = p^n + \alpha_1 \omega_{0н} p^{n-1} + \alpha_2 \omega_{0н}^2 p^{n-2} + \dots + \alpha_{n-1} \omega_{0н}^{n-1} p + \omega_{0н}^n , \quad (3)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1}$ – коефіцієнти розподілу; $\omega_{0н}$ – значення середнє геометричного кореня в СС, прийнятого рівним

$$1/T_\mu \leq \omega_{0н} \leq K/T_\mu , \quad K \in [2-10].$$

Порівнюючи (2) і (3) знайдені аналітичні вирази для коефіцієнтів ℓ_{in} зворотного зв'язку матриці L_{1n} для всіх розглянутих СПР.

Рівняння створюваного СС повного порядку n відповідає

$$\hat{X} = A\hat{X} + B_u U_y + L_{1n}(Y - \hat{Y}) ; \quad \hat{Y} = C\hat{X} , \quad (4)$$

яке в розгорнутій формі представляється як

$$\begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \\ \dots \\ \hat{X}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} - \ell_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} - \ell_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \ell_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \\ \dots \\ \hat{X}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ell_{1n} \\ \ell_{2n} \\ \dots \\ \ell_{nn} \end{bmatrix} \omega(t) + \begin{bmatrix} b_{u1} \\ b_{u2} \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} U_y(t), \quad (5)$$

Особливість усіх синтезованих СС, що відповідають рівнянню (5), полягає в тому, що в їхню структуру не введені елементи, що уточнюють роботу при дії на об'єкт збурення M_0 .

На підставі доведених властивостей систем, замкнутих через СС повного порядку, з урахуванням рівняння (5) на рис. 1 представлена узагальнена матрична структура СПР разом із СС.

Замикання вихідної системи через спостерігач здійснюється шляхом заміни зворотних зв'язків за дійсним значенням струму і швидкості двигуна їх, відновленими в СС значеннями. Тим самим досягнуте збільшення на одиницю порядку астатизму всіх СПР за збурюючою дією.

Однак СС повного порядку мають складну структуру і високі коефіцієнти коригувального зворотного зв'язку, що значно збільшуються при рості порядку системи і практично не можуть бути реалізовані.

У третьому розділі розроблена методика синтезу [2, 18, 20] узагальненого спостерігача стану з істотно спрощеною структурою і мінімальними коефіцієнтами коригувального зворотного зв'язку в ньому, в однаковій мірі придатного для модернізації всіх СПР.

Запропонована методика спрощення структури й мінімізації коефіцієнтів корекції в СС для системи (1) ґрунтується на двох положеннях.

Перше положення впливає з можливості представлення характеристичного полінома (2) вихідної СПР n -го ступеня у виді добутку двох поліномів

$$H_n(p) = H_m(p)H_j(p), \quad (6)$$

де $H_m(p)$ - поліном, усі полюси якого можуть бути розташовані потрібним чином; $H_n(p)$ - поліном, полюси якого не управляємі, при цьому повинна виконуватися умова $n = m + j$.

Друге положення виходить із матричної формули для перехідної функції системи

$$Y(t) = CA^{-1} e^{At} - I \underline{B}_u 1(t), \quad (7)$$

де e^{At} - перехідна матриця стану, обумовлена з використанням перетворення Лапласа як

$$e^{At} = L^{-1} pI - A^{-1}. \quad (8)$$

Рівняння (7) дозволяє перерозподілити значимість матриць B_u і C в виході системи Y і ввести в розгляд матриці B_u^* і C^* , відповідно з однаково зменшеними і збільшеними в γ раз коефіцієнтами.

Використовуючи висловлені положення, замість повного вектора стану $X_n = [x_{1n} \ x_{2n} \ \dots \ x_{nn}]^T$ і матриці модального зворотного зв'язку в СС $L_n = [\ell_{1n} \ \ell_{2n} \ \dots \ \ell_{nn}]^T$ уведено, що відповідає характеристичному рівнянню $H_m(p)$, спрощені вектор стану $X_m = [x_{1m} \ x_{2m} \ \dots \ x_{mm}]^T$ і матриця зворотного зв'язку $L_m = [\ell_{1m} \ \ell_{2m} \ \dots \ \ell_{mm}]^T$. Визначення елементів матриці L_m підкоримо правилу, в основі якого лежить рівність характеристичного рівняння цілком керованої частини системи (7) одному зі стандартних розподілів. Воно представляється у виді

$$H_m(p) = \det pI - A^* + L_m C^* = H_m^{CT}(p), \quad (9)$$

де A^* - матриця стану цілком керованої частини системи, розмірності $m \times m$, що відповідає вектору стану X_m ; $C^* = \gamma C = [0 \ 0 \ \dots \ \gamma]$ - матриця виходу; $H_m^{CT}(p)$ - поліном, що відповідає обраному при синтезі СС стандартному розподілу.

Рішенням рівняння (9) є параметри коригувального зв'язку L_m у спостерігачі

$$\ell_{km} = \frac{1}{\gamma} f \alpha_\delta, \omega_{0n}^\delta, a_{ij}^*, \quad \forall k \in \{1, m\} \text{ і } \delta = m - k + 1, \quad (10)$$

залежні від коефіцієнтів α_δ обраного стандартного розподілу, що задається величиною середнього геометричного кореня ω_{0n}^δ , зведеного в ступінь δ , параметрів вихідної системи, представлених елементами a_{ij}^* матриці A^* і, головне, від коефіцієнта γ , що сприяє їхньої мінімізації.

Синтез структури СС виконується по повному вектору стану X_n , складовою частиною якого є введений у розгляд вектор X_m . Ця умова обумовлена рівністю (6). Рівняння синтезу має вигляд

$$\dot{\hat{X}}_n = A\hat{X}_n + L_n \Psi_n - C^* \hat{X}_n + B_u^* U, \quad (11)$$

де, у відповідності з другим положенням, матриця входу

$$B_u^* = B_u / \gamma, \quad (12)$$

а елементи L_n не входять у L_m і дорівнюють нулю.

На рис.2 приведена структурна схема узагальненого $CC_{n-j}=CC_m$ повного порядку n із нецілком керованими полюсами j , використання якого в СПР, шляхом формування зворотних зв'язків струму і швидкості двигуна по відновленим у ньому значенням, як показано на рис.1, приводить до збільшення на одиницю астатизму за збурюючою дією.

Крім цього, у даному розділі для СПР із П-РШ і ССЗ, знайдена умова досягнення параметричного астатизму другого порядку по збуренню [4]. Іншими словами для даної системи відповідним вибором середнього геометричного кореня ω_{0n} , що розраховується відповідно до отриманого в цьому розділі формулою

$$\omega_{0n} = \sqrt[3]{\delta / (8T_\mu^2 T_\gamma (1 + \delta))}, \quad \delta = T_\phi / 2T_\mu \quad (13)$$

може бути забезпечена відсутність похибки $\Delta\omega_v$, викликана навантаженням, що лінійно змінюється.

У четвертому розділі розглянуте застосування СС повного порядку й узагальненого СС у системах підлеглого регулювання положення.

Для СПР із П-РШ і П-РП був визначений вектор стану $X=[U_{IC} U_d I \omega S]$, де U_{IC} – штучно введена координата виходу інтегруючої частини регулятора струму. Записавши диференціальні рівняння, що представляють СПР положення в просторі станів і відповідно до рівняння (1), визначені матриці стану, керування, збурення й виходу.

З метою збільшення астатизму за збурюючою дією, синтезовано СС повного порядку і уведений до складу системи положення [2, 21] відповідно до рис.1 для формування зворотних зв'язків за відновленим значенням $\hat{I}, \hat{\omega}$ і \hat{S} . Установлено, що використання СС повного порядку приводить до значного ускладнення структури і високих коефіцієнтів коригувального зворотного зв'язку в ньому. Для СПР із П-РШ і П-РП спостерігач має п'ятий порядок. Отже для СПР П-РП і ПІ- або ПІ²-РШ його порядок ще зросте.

Тому запропоновано інший спосіб використання СС у системах положення [2, 15], також викладений у даному розділі.

Структурна схема СПР положення з любим РШ приведена узагальненою структурною схемою рис.3, де $W_{u,i}^\omega \Phi$, $W_{Mo}^\omega \Phi$ - передаточні функції контуру швидкості за керуючою і збурюючою дією. На рис.3, традиційний оптимізований контур швидкості доповнений узагальненим СС повного порядку з нецілком керованими полюсами, методика синтезу і спосіб використання якого розглянуто у третьому розділі. При цьому зовнішній контур положення залишається без зміни.

Таким чином, також як і для СПР швидкості введення до складу СПР положення оптимізованого контуру регулювання швидкості з П-, ПІ-, ПІ²-РШ, замкнутого через узагальнений СС, приводить до збільшення порядку астатизму по збуренню систем позиціонування, що приймає значення від $v_{Mo}=1$ при П-РШ до $v_{Mo}=3$ при ПІ²-РШ. Цим досягнуте збільшення точності позиціонування у випадку складного характеру моменту навантаження ЕП.

П'ятий розділ присвячений використанню скорочених СС у СПР швидкості і положення [1, 2, 8, 9, 11, 12, 17,].

Для синтезу скороченого спостерігача або, як його ще називають спостерігача зниженого порядку, повний вектор стану X розглянутих систем розділимо на вектори X_I і X_{II} . Під вектором X_I розуміється вектор, компонентами якого є координати об'єкта не підлягають відновленню, а під X_{II} вектор, компоненти якого повинні бути відновлені. Для систем із РШ $X_{II}=[I \omega]$, для систем із РЕ $X_{II}=[I \omega U_{дэ}]$.

Модель, покладена в основу скороченого спостерігача, відповідає рівнянню

$$\dot{X}_{II} = A_H X_{II} + B_H Y_I.$$

Таким чином, СС зниженого порядку можуть бути представлені у виді

$$\dot{\hat{X}}_{II} = A_H \hat{X}_{II} + L_{2n} (C_{II} X_{II} - C \hat{X}_{II}) + B_H C_I X_I.$$

Структурна схема СПР разом із скороченим спостерігачем приведена на рис.1. Тут, також як і для випадку використання СС повного порядку, замикання системи зворотними зв'язками здійснюється не за дійсним значенням струму й швидкості двигуна, а по їхніх відновлених значеннях. У даному випадку

таке використання скорочених СС в однократноінтегруючих СПР не змінює астатизм системи по збуренню, але в кілька десятків разів зменшує статичну помилку в порівнянні з помилкою, що має місце в традиційних СПР. Астатизм за збурюючою дією, дво - і трьохкратноінтегруючих систем, замкнених через скорочений СС, стає рівним нулю. Дані системи перетворюються в статичні по навантаженню, але величина статичної похибки зменшується в 10^2 10^3 разів.

Крім того, у розділі розглядається інший шлях підвищення порядку астатизму СПР по збуренню. Підвищення точності роботи систем при використанні скорочених СС можливо за рахунок використання зворотного зв'язку по динамічному струму двигуна [2], значення якого ідентифікується спостерігачем зниженого порядку СС2. При цьому у всіх розглянутих СПР відбувається збільшення астатизму по збуренню на одиницю без втрати швидкодії.

У шостому розділі виконане математичне дослідження всіх розглянутих у дисертаційній роботі систем.

Для приклада на рис.4, що відноситься до другого розділу, приведені перехідні характеристики похибки при подачі дії за збуренням, у СПР із: а) П-РШ; б) П-РШ і СС повного порядку. Видно, що $\Delta\omega_{ст}=0$, а $\Delta\omega_{дин}$ зменшилася більш ніж у два рази.

На рис.5.а, що відноситься до четвертого розділу, показані перехідні характеристики по збуренню при дії $M_c=const$ у СПР положення з П-РШ при відсутності (крива 1) і наявності (крива 2) у складі системи СС3, а також крива 3, що відповідає інтегралу похибки. На рис.5.б показаний процес відпрацювання ЕП заданого малого переміщення, коли СПР включає П-РП, П-РШ і СС3.

Рис.6 відноситься до п'ятого розділу. Тут показані перехідні характеристики похибки при дії моменту опору в СПР швидкості разом із СС2 при: а) із П-РШ; б) П²-РШ.

У розділі виконана розробка технічного пристрою СС для тиристорних електроприводів постійного струму зі СПР [10]. Крім того, із використанням СС створено пристрій для одержання сигналу, пропорційного моменту опору M_o (I_o) у ЕП з СПР [5]. Це досягається шляхом порівняння дійсного значення струму двигуна I і його відновленого значення \hat{I} .

Для підтвердження отриманих теоретичних положень був створений дослідний зразок осередку СС третього порядку і проведені його лабораторні іспити в складі діючого ЕП. Дано результати експериментальних досліджень, що підтверджують вірогідність теоретичних положень роботи.

ВИСНОВКИ

У підсумку виконаних у даній роботі досліджень отримані наступні наукові і технічні результати.

1. Зроблено аналіз проблеми підвищення швидкодії і точності ЕП постійного струму, на підставі якого сформульована мета і задачі роботи.

2. Уперше запропоновано спосіб збільшення точності роботи без втрати швидкодії ЕП постійного струму ПП-Д і ПП-Г-Д зі СПР швидкості і положення, що мають будь-яку ускладнену структуру і будь-який тип регуляторів, за рахунок використання в ланцюзі зворотного зв'язку СС. Синтезовано різні СС повного і зниженого порядку.

3. Уперше розроблені структури, у яких використані СС повного порядку для одержання в ЕП ПП-Д і ПП-Г-Д зі СПР швидкості і положення, збільшеного на одиницю астатизму за збурюючою дією. Це приводить до збільшення точності їхньої роботи за рахунок ліквідації різних складових похибок, а також сприяє зменшенню від двох до трьох разів динамічних похибок і часу відновлення швидкості після ударного прикладання навантаження. Вперше астатизм СПР швидкості по збуренню доведений до трьох при П²-РШ.

4. Доведено, що використання скороченого СС, для формування зворотних зв'язків по струму і швидкості двигуна, у СПР швидкості і положення при П-РШ і П-РЕ приводить до зменшення в кілька десятків разів (24 рази) статичної й у 2 рази динамічної похибки. Отримано аналітичні залежності для статичних похибок. Виявлено параметричний астатизм по збуренню в СПР із скороченим СС і знайдена відповідна йому величина середнє геометричного кореня.

5. Установлено, що введення до складу СПР швидкості і положення з ПП- і П²-РШ скороченого спостерігача другого порядку робить систему статичною за збурюючою дією. Однак величина статичних похибок на два - три порядки менше, ніж у традиційних однократноінтегруючих СПР швидкості і положення при їхньому настроюванні на модульний оптимум. Крім того, досягається зменшення динамічної похибки більш ніж у 2 рази.

6. Обґрунтовано, що введення до складу різних СПР спостерігачів стану повного і зниженого порядку не впливає на порядок астатизму по керуючому впливі.

7. Розроблено методику синтезу СС повного порядку з нецілком керованими полюсами, що володіє спрощеною структурою і невеликими коефіцієнтами коригувального зворотного зв'язку, придатного для роботи в складі ЕП постійного струму, структура яких має будь-як ускладнену конфігурацію в рамках СПР. Доведено, що включення такого спостерігача в ланцюг зворотного зв'язку СПР сприяє збільшенню на одиницю їхнього астатизму за збурюючою дією.

8. Уперше при без інерційному зворотному зв'язку по швидкості в СПР із П-РШ, замкнутої через спостерігач із нецілком керованими полюсами, знайдена аналітична залежність для похибки $\Delta\omega_v$, викликана навантаженням, що лінійно змінюється. Установлено, що при наявності фільтра в ланцюзі зворотного зв'язку по швидкості в СПР із П-РШ і ССЗ досяжний параметричний астатизм другого порядку за збуренням.

9. Обґрунтовано доцільність використання в СПР положення узагальненого спостерігача в оптимізованому контурі регулювання швидкості з П-, ПІ- і ПІ²-РШ, замість спостерігача повного порядку, що вводиться в контур регулювання положення. При цьому астатизм по збуренню в системі позиціонування приймає значення від $\nu=1$ при П-РШ до $\nu=3$ при ПІ²-РШ.

10. Розроблено технічний пристрій СС для СПР, що має конструктивне виконання відповідно комплектним тиристорним електроприводам серії КТЕУ і ЕКТ. Спроектовано принципову схему СС на аналогових елементах.

11. Проведено узагальнені дослідження впливу СС на швидкодію систем. Установлено, що у випадку повного збігу параметрів системи і спостерігача швидкодія по каналі керування залишається незмінна. У випадках параметричної неузгодженості між ними, швидкодія погіршується. Однак вона частково компенсується за рахунок збільшення середнє геометричного кореня СС. Виходячи з вимог швидкодії, дані рекомендації з вибору середнє геометричного кореня СС.

12. Показана можливість використання в СПР швидкості і положення зворотного зв'язку по динамічному струму, значення якого ідентифікується СС зниженого порядку. Це сприяє підвищенню на одиницю астатизму систем по збуренню з будь-яким типом РШ.

СПИСОК ОСНОВНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Системы управления электроприводами постоянно го тока с наблюдателями состояния. - Харьков: ХГПУ, 1998. –117 с.
2. Акимов Л.В. Колотило В.И. Электромеханические системы скорости и положения с наблюдателями состояния. -Харьков: ХГПУ, 1999. –81с.
3. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Обобщенный анализ быстродействия СПР скорости, замкнутых через наблюдатели состояния //Вестник ХГПУ. –1998. –Вып.10. – С.48-57.
4. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Анализ точности работы электроприводов с наблюдателем при линейном изменении нагрузки //Тех. электродинамика. Спец. Выпуск 2. –Том 1. –1998. – С.136-139.
5. Акимов Л.В. Колотило В.И. Формирование сигнала, пропорционального моменту нагрузки, в электроприводах с системами подчиненного регулирования и наблюдателями состояния //Электротехника. –1998. -№2. – С.29-35.
6. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Динамика трехконтурной однократноинтегрирующей с влиянием э.д.с. двигателя СПР скорости электропривода ТП-Г-Д с наблюдателями состояния //Электротехника. –1998. -№10. – С.22-32.
7. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Динамика трехкратноинтегрирующей СПР скорости с наблюдателями состояния полного и пониженного порядков //Техн. электродинамика. –1998. -№4. – С.52-62.
8. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Об астатизме по возмущению в СПР скорости с регулятором э.д.с. и наблюдателем состояния полного порядка //Тех. Электродинамика. –1998. -№6. – С.23-33.
9. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Динамика двукратноинтегрирующей СПР скорости, замкнутой через наблюдатель состояния //Электричество. –1999. -№7. – С.13-19.
10. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Разработка технического устройства обобщенного наблюдателя состояния для СПР скорости тиристорных электроприводов//Техн. Электродинамика.-1999.-

№6.–С.29-33.

11. Колотило В. И. Статические ошибки в однократноинтегрирующей СПР положения с наблюдателем второго порядка в контуре регулирования скорости. // Вестник ХГПУ. –1999. – Вып.61 – С.101-104.

12. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Уменьшение статических ошибок в системе подчиненного регулирования скорости с регулятором э.д.с. и редуцированным наблюдателем состояния //Изв. ВУЗов. Электромеханика. –1999. -№ 4. – С.57-66.

13. Акимов Л.В. Колотило В.И. Динамика однократноинтегрирующей СПР положения с обобщенным наблюдателем состояния контура регулирования скорости в режиме малых перемещений. //Изв. ВУЗов. Электромеханика. –2000. -№ 1 . – С.60-65.

14. Акимов Л.В., Колотило В.И. Особенности динамики двухконтурной системы регулирования скорости электропривода ТП-Г-Д с различными наблюдателями состояния //Респ. межведомственный научно-технич. сб. Электромашиностроение и электрооборудование. Вып.50. –Киев: Техника. –1998. – С.17-26.

15. Колотило В. И. Особенности динамики СПР положения с обобщенным наблюдателем состояния при отработке больших перемещений. //Респ. межведомственный научно-технич. сб. Электромашиностроение и электрооборудование. Вып.52. –Киев: Техника. –1999. – С.20-24.

16. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Об астатических свойствах и ошибках СПР скорости, замкнутой через наблюдатель состояния /Сб. научн. ст. «Автоматизированные электромеханические системы с модальными регуляторами и наблюдателями состояния». - Харьков: ХГПУ, 1997. – С.49-56.

17. Акимов Л.В., Колотило В.И. Анализ астатических свойств и ошибок в СПР скорости с редуцированным наблюдателем. /Сб. научн. ст. «Автоматизированные электромеханические системы с модальными регуляторами и наблюдателями состояния». –Харьков: ХГПУ, 1997. – С.57-60.

18. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Особенности динамики тиристорных электроприводов, замкнутых через обобщенный наблюдатель с неполностью управляемыми полюсами //Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Спец. выпуск Вестник ХГПУ. –Харьков: ХГПУ. –1998. – С.65-72.

19. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Сравнительный анализ точностных характеристик электроприводов с подчиненным и модальным регуляторами, замкнутыми через наблюдатель //Printed scientific works, Information technology: Science, technique, technology, education, health. MicroCAD'98 – Харьков. –1998. – С.196-205.

20. Колотило В.И. Система регулирования скорости по цепи возбуждения двигателя с наблюдателем, имеющим неполностью управляемые полюсы //Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Спец. выпуск Вестник ХГПУ. –Харьков: ХГПУ. –1998. – С.152-156.

21. Акимов Л.В., Колотило В.И. Об астатических свойствах, быстродействии и ошибках в однократноинтегрирующей СПР положения, замкнутый через наблюдатель состояния // Труды Донецкого технического университета. Серия. Электротехника и энергетика. Вып.№3. - Донецк, 1999. – С.25 -29.

22. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Колотило В.И. Точностные характеристики электроприводов с системами подчиненного регулирования, замкнутыми через наблюдатели состояния /Тезисы докладов II Всероссийской НТК по проблемам автоматизированного электропривода. –Ульяновск, 1998. –С.29-31.

АНОТАЦІЇ

Колотило В.І. Синтез електромеханічних систем постійного струму підвищеної точності з спостерігачами стану. -Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.03-електротехнічні комплекси та системи. – Харківський державний політехнічний університет, Харків, 2000.

Дисертація присвячена синтезу систем підлеглого регулювання швидкості і положення тиристорних електроприводів постійного струму з підвищеною точністю роботи при дії основного збурення. Обґрунтовано доцільність використання спостерігачів стану повного порядку в СПР, з будь-яким типом регулятора швидкості, для збільшення на одиницю порядку астатизму по збуренню. Синтезовано спостерігачі стану повного і зниженого порядку, спостерігачі повного порядку з нецілком керованими полюсами. Розроблено методику синтезу узагальненого спостерігача стану.

Доведено, що використання скорочених спостерігачів, для формування зворотних зв'язків по струму і швидкості двигуна в однократноінтегруючих систем підлеглого регулювання, приводить до істотних зменшень статичної і динамічної похибок. Знайдено умову досягнення параметричного астатизму.

Установлено, що використання різних спостерігачів у структурах систем підлеглого регулювання не впливає на їх астатизм по керуючому впливу.

У роботі виконаний узагальнений аналіз швидкодії СПР, замкнених через спостерігачі стану.

Для реалізації датчика статичного струму, сигнал якого пропорційний моменту навантаження, запропоновано використовувати спостерігачі стану.

Ключові слова: система підлеглого регулювання, спостерігач стану, скорочений спостерігач, астатизм, ідентифікація, синтез.

Kolotilo V.I. Synthesis of advanced-accuracy direct-current electromechanical systems with state observers. — Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by speciality 05.09.03 — electromechanical complexes and systems. — Kharkiv State Polytechnic University, Kharkiv, 2000.

The dissertation is devoted to synthesizing subordinate speed and location regulation systems of direct-current thyristor electro drives with advanced accuracy of operation under main disturbance. Full-order state observers application in such systems with any speed regulator proves to be expedient for providing one-order increase in the astaticism about the disturbance. Full- and decreased-order state observers have been synthesized with the full-order state observers having partly-controlled poles. A technique for synthesizing a generalized state observer has been worked out. Application of reduced observers to establish feedback over the motor current and speed in a once-integrating subordinate regulation system proves to considerably decrease static and dynamic errors. The condition for parametric astaticism has been determined. Observers of different kind used in the subordinate regulation system units are found not to affect the astaticism about control disturbance. The work also presents generalized analysis of response of subordinate regulation systems linked via a state observer and gives recommendations as for selecting its mean geometric root. To implement a static current sensor with signal proportional to load moment, it is suggested using a state observer.

Key words: subordinate regulation system, state observer, reduced observer, astaticism, identification, synthesis.

Колотило В.И. Синтез электромеханических систем постоянного тока повышенной точности с наблюдателями состояния. –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 посвящена синтезу систем подчиненного регулирования скорости и положения тиристорных электроприводов постоянного тока с повышенной точностью работы при действии основного возмущающего воздействия. Обоснована целесообразность использования наблюдателей состояния полного порядка в системах подчиненного регулирования, с любым типом регулятора скорости, для

увеличения на единицу порядка астатизма по возмущению. Синтезированы наблюдатели полного и пониженного порядка, наблюдатели полного порядка с неполностью управляемыми полюсами.

Доказано, что использование редуцированных наблюдателей, для формирования обратных связей по току и скорости двигателя в однократноинтегрирующих системах подчиненного регулирования, приводит к существенным уменьшениям статической и динамической ошибок. Найдено условие достижения параметрического астатизма. Замыкание дву - и трехкратноинтегрирующих систем подчиненного регулирования обратными связями по восстановленным значениям тока и скорости, взятыми в редуцированном наблюдателе второго порядка, приводит к потери ими астатизма по возмущающему воздействию. Для систем с наблюдателем пониженного порядка получены аналитические выражения статических ошибок.

Разработана методика синтеза наблюдателя состояния полного порядка с неполностью управляемыми полюсами, обеспечивающая упрощенную структуру и легко реализуемые коэффициенты корректирующей модальной обратной связи.

Установлено, что использование различных наблюдателей в структурах систем подчиненного регулирования не влияет на их астатизм по управляющему воздействию.

В работе выполнен обобщенный анализ быстродействия систем подчиненного регулирования, замкнутых через наблюдатели состояния.

Для создания датчика статического тока, предложено использовать наблюдатели полного и пониженного порядка.

Показана возможность использования в системах подчиненного регулирования скорости и положения обратной связи по динамическому току, значение которого идентифицируется наблюдатель пониженного порядка. Это способствует повышению на единицу порядка астатизма по возмущающему воздействию систем подчиненного регулирования с любым типом регулятора скорости без потери быстродействия.

Ключевые слова: система подчиненного регулирования, наблюдатель состояния, редуцированный наблюдатель, астатизм, идентификация, синтез.