

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Пирожок Андрій Володимирович

УДК 62-83-52

**СИНТЕЗ ПОЛІНОМІАЛЬНИМ МЕТОДОМ
РЕГУЛЯТОРІВ СПРОЩЕНИХ СТРУКТУР
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ
СПІРАЛЬНО-ГВИНТОВОГО ТРАНСПОРТЕРА**

Спеціальність – 05.09.03 - електротехнічні комплекси та системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Запоріжжя.

Науковий керівник – доктор технічних наук , доцент
Труфанов Іван Дмитрович,
Запорізький національний технічний університет,
професор кафедри електропривода та автоматизації
промислових установок

Офіційні опоненти – доктор технічних наук , професор
Коцегуб Павло Харитонович,
Донецький національний технічний університет,
завідувач кафедри електропривода та автоматизації
промислових установок

кандидат технічних наук,
Лимонов Леонід Григорович,
АТЗТ Важпром автоматика (м. Харків)
корпорації Укрмонтажспецбуд,
головний спеціаліст

Провідна установа – **ВАТ “Український науково-дослідний інститут
силової електроніки “Перетворювач”,**
Міністерства промислової політики України,
м. Запоріжжя

Захист відбудеться “ ___ ” _____ 2003 р. о ___ годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному
технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою:
61002, м.Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий “ ___ ” _____ 2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Осічев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Для транспортування сипучих матеріалів у хімічній, будівельній, харчовій і переробній промисловостях, а також у сільському господарстві, широко застосовуються спіральні-гвинтові транспортери (СГТ). Однак до цього часу відсутні дослідження взаємозв'язку електромеханічних процесів в електроприводі (ЕП) і СГТ.

На сьогодні СГТ оснащуються нерегульованим ЕП на базі асинхронного двигуна (АД), що не дозволяє регулювати продуктивність транспортера. Установлено, що у випадку використання регульованого ЕП на базі СГТ можна одержати нескладний дозатор сипких матеріалів для ліній безперервного готування сумішей із заданою концентрацією інгредієнтів.

Застосування регульованого ЕП СГТ викликає ряд труднощів, що підтверджують експериментальні дослідження. На зниженій швидкості в ЕП виникає автоколивальний режим роботи. Цей ефект пов'язаний з нелінійністю механічної характеристики (МХ) навантаження СГТ, що має ділянку з від'ємною жорсткістю. При цьому застосування стандартних налагоджень регуляторів не усуває автоколивальний режим. Дослідження електромеханічної системи СГТ виявили ще одну особливість його механічної частини. Вона, в залежності від режиму роботи, може описуватися як одномасовою, так і двомасовою структурою при широкому варіюванні параметрів.

Відомо, що клас електромеханічних систем з від'ємним в'язким тертям (ЕМС з ВВТ) містить у собі широке різноманіття ЕП машин і механізмів, у яких у нормальних або в аномальних режимах відбувається прослизання, буксування, юз. Вирішенню цієї проблеми присвячено багато робіт, виконаних під керівництвом проф. В.Б. Клепікова. Встановлено умови виникнення автоколивань і динамічної нестійкості ЕП, розроблено методики для аналізу динамічних властивостей і синтезу стійких ЕМС з ВВТ, створено ряд технічних пристроїв для ліквідації цих негативних явищ. Крім цього, було показано, що вирішення проблеми ліквідації автоколивального режиму досягається використанням методу поліноміальних рівнянь (МПР). При цьому встановлено, що статичні й астатичні регулятори швидкості (РШ) повного порядку при незмінному налагодженні внутрішнього контура струму системи підпорядкованого регулювання (СПР) двомасового електромеханічного об'єкта (ДЕМО), коли їх степінь доходить до трьох, є надлишковими, і вони не дають відчутного поліпшення якісних показників ЕП. Більш того, у ряді випадків, особливо в малопотужних ЕП з реактивним навантаженням, традиційна двоконтурна СПР із контурами швидкості й струму є надмірною. Відсутній контур струму і в ЕП змінного струму - тиристорний перетворювач напруги - асинхронний двигун (ТПН-АД).

Тому **актуальним** є пошук простих методів і засобів боротьби з автоколивальними режимами, особливо для ЕП тих машин і механізмів, робота яких на падаючій ділянці МХ навантаження є нормальним робочим режимом, а механічна частина являє собою двомасову систему з пружним зв'язком, до того

ж яка перебудовується, як у ряді режимів роботи СГТ, на одномасову структуру.

У дисертації розглядаються задачі синтезу МПР систем регулювання швидкості й положення ЕП постійного і змінного струмів зі спрощеною структурою. Під останнім розуміється використання в ЕП з ДЕМО тільки одного традиційного зворотного зв'язку за швидкістю чи ЕРС двигуна, застосування для апроксимації більш низьким порядком початково немінімально-фазової передавальної функції (ПФ) об'єкта, запропонованих проф. Долбнею В.Т., ланцюгових дробів, що знижує порядок ПФ регулятора і сприяє спрощенню його реалізації. Усе це підтверджує **актуальність** цієї роботи, спрямованої на створення простих ЕП, які можуть експлуатуватися також у сільському господарстві.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проводилися відповідно до тематичних планів НДР: кафедри «ЕПА» ЗНТУ, кафедри «АЕМС» НТУ «ХП», а також у рамках держзамовлення Інституту механізації тваринництва (ІМТ) УААН (відповідно до договору 1.5417 про творчу співпрацю між ІМТ УААН і ЗНТУ). Зокрема, вони відповідають державній науково-технічній програмі ДКНТ за п.5.1.6 «Ресурсозберігаючі електромеханічні системи» у рамках держбюджетної теми 04.11.05/ 05ДО-95 «Дослідження електромеханічних систем з негативним в'язким тертям і розробка протибуксовочних систем для прокатних станів і електротранспорту» - НТУ «ХП», а також держтемам 01.97 001002 «Удосконалити технологію і розробити нове обладнання для технічного переоснащення діючих ферм і комплексів та реконструкції ферм», 01.97 001003 «Розробити технічні засоби електрифікації технологічних процесів і електробезпеки людей і тварин» і 01.97 001005 «Розробити наукові основи створення ресурсо- і енергозберігаючих механізованих технологій виробництва свинини» - ЗНТУ і ІМТ УААН.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є синтез поліноміальним методом статичних та астатичних регуляторів швидкості і положення зниженого порядку спрощених структур ЕП постійного й змінного струмів з початково нестійким ДЕМО, через вплив падаючої ділянки реактивної нелінійної МХ навантаження, при достатньо широкому варіюванні параметрів механічної частини, які відповідають СГТ, призначеному для приготування і дозування різних сипких матеріалів.

Для досягнення зазначеної мети вирішувалися такі основні задачі.

1. Аналіз роботи системи безперервного дозування сипких інгредієнтів на базі СГТ із регульованим ЕП і дослідження особливостей електромеханічних процесів з урахуванням нелінійного характеру навантаження.

2. Ідентифікація і розрахунок параметрів електромеханічної системи СГТ із ЕП постійного і змінного струмів.

3. Синтез поліноміальним методом систем регулювання швидкості ЕП спрощеної структури постійного струму.

4. Дослідження і порівняльний аналіз динамічних показників і статичних похибок у синтезованих системах з ЕП постійного струму.

5. Аналіз стійкості системи регулювання швидкості ДЕМО з ЕП ТПН-АД і пропорційним регулятором.

6. Синтез поліноміальним методом систем регулювання швидкості ЕП спрощеної структури змінного струму.

7. Синтез систем регулювання положенням ЕП постійного і змінного струмів СГТ.

Об'єктом дослідження є динамічні властивості спрощених структур ЕП постійного і змінного струмів СГТ, які описуються у вигляді ДЕМО під впливом нелінійної МХ навантаження з падаючою ділянкою і синтезованих МПР регуляторами швидкості (РШ), ЕРС (РЕ) і положення (РП) зниженого порядку.

Предмет дослідження – системи регулювання швидкості і положення ЕП постійного і змінного струмів зі спрощеною структурою, за рахунок використання синтезованих регуляторів і зворотних зв'язків за швидкістю (ЕРС) електродвигуна і за положенням – вагою маси, яку переміщує СГТ.

Методи дослідження. Методи теорії електропривода й автоматичного керування використовувалися для аналізу розроблюваних ЕП. Метод поліноміальних рівнянь і стандартних характеристичних поліномів покладені в основу синтезу регуляторів. Топологічним методом визначалися ПФ замкнених систем. Методом ланцюгових дробів проводилася апроксимація більш низьким порядком ПФ. Здійснювалася перевірка ПФ регуляторів на фізичну реалізованість. Для аналізу меж стійкості використовувалися критерії стійкості. Чисельні методи, структурне моделювання застосовувалися для розрахунку перехідних процесів на ЕОМ за допомогою прикладних програм MATLAB і Mathcad. В експериментах з діючим устаткуванням застосовувалися методи наукових досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Обґрунтовано математичні моделі електромеханічної системи СГТ із ЕП постійного і змінного струмів зі спрощеною структурою і навантаженням, що носить нелінійний характер. Встановлено, що залежно від режиму роботи СГТ електромеханічна система може описуватися як одно- так і двомасовою моделлю зі значною зміною коефіцієнта пружності і моменту інерції другої маси.

2. Обґрунтовано доцільність застосування МПР для синтезу ПФ регуляторів зниженого порядку двомасових ЕП зі спрощеною одноконтурною структурою, які працюють при нелінійному характері реактивного навантаження, що приводить до початково нестійкого об'єкта керування.

3. Синтезовані нові ПФ статичних й астатичних РШ, РЕ і РП зниженого порядку для ЕП постійного струму зі спрощеною структурою і двомасовою кінематикою. Виконано синтез статичного й астатичного РЕ для двоконтурної двомасової системи ЕП зі структурою СПР. Доведено, що при використанні РЕ, синтезованих МПР, швидкодія і точність систем відповідають використанню РШ.

4. Отримано узагальнені залежності для статичних похибок одноконтурного і двоконтурного ЕП постійного струму зі знайденими регуляторами при різній жорсткості окремих ділянок нелінійного навантаження.

5. Вперше обґрунтована можливість роботи синтезованих РШ і РЕ без

зміни своїх параметрів у ЕП із двомасовою і одномасовою кінематикою. При цьому припустимі значні зміни жорсткості пружного зв'язку і моменту інерції другої маси.

6. Проведено аналіз і отримані аналітичні залежності для вибору коефіцієнта підсилення П-РШ початково нестійкого ДЕМО з ЕП ТПН-АД.

7. Уперше МПР синтезовані ПФ статичних і астатичних РШ і РП, які легко реалізуються в ЕП змінного струму ТПН-АД, що має двомасову механічну частину.

8. Запропоновано використовувати ланцюгові дроби для зниження порядку вихідної немінімально-фазової ПФ об'єкта в контурі регулювання швидкості. Обґрунтовано, що в даному випадку апроксимуюча, більш низького порядку, ПФ повинна також відноситися до групи немінімально-фазових. Знайдено спрощені ПФ РШ і РП.

9. Отримано узагальнені залежності для розрахунку статичних похибок в ЕП ТПН-АД для різних ділянок нелінійного навантаження, включаючи випадок її сталості.

Практичне значення одержаних результатів полягає в

- поглибленні теоретичних уявлень про протікання електромеханічних процесів в ЕП СГТ;

- розв'язку методик розрахунку параметрів ЕП СГТ залежно від режиму роботи;

- розробці методики синтезу МПР статичних й астатичних РШ, РЕ і РП зниженого порядку для ЕП постійного струму зі спрощеною структурою, а також статичного й астатичного РЕ для двоконтурної системи ЕП, РП статичної системи ЕП постійного струму і системи з нульовим статизмом за навантаженням, статичних й астатичних РШ і РП для ЕП змінного струму ТПН-АД;

- одержанні узагальнених залежностей для аналізу точності роботи даних ЕП із двомасовою і одномасовою кінематикою;

- визначенні меж стійкості ЕП ТПН-АД при нелінійному навантаженні і використанні тільки одного зворотного зв'язку (ЗЗ) за швидкістю двигуна;

- апробації методу ланцюгових дробів для апроксимації більш низьким порядком немінімально-фазової ПФ ДЕМО.

Крім того, суттєве практичне значення має можливість використання синтезованих регуляторів зі спрощеними структурами ЕП для автоматизації різних механізмів, математичні моделі яких відповідають двомасовій структурі з ускладненим характером реактивного навантаження. Важливим практичним результатом є вперше обґрунтована працездатність синтезованих регуляторів і при одномасовій кінематиці.

Усі запропоновані методики доведені до робочих алгоритмів. Результати роботи передані для впровадження і використання на ВАТ «Перетворювач» і в ІМТ УААН (м. Запорозжя).

Теоретичні положення дисертації використовуються в наукових дослідженнях і в навчальному процесі кафедри ЕПА ЗНТУ. Створено дві лабораторні роботи з дисциплін «Комп'ютерні системи керування ЕП» і «Комп'ютерні системи автоматизації технологічними процесами».

Особистий внесок здобувача

Здобувачем сформульована постановка задач досліджень, проведені експериментальні дослідження ЕП СГТ, здійснена ідентифікація і розрахунок параметрів ДЕМО, що відповідає СГТ у режимі дозування (переміщення) при використанні ЕП постійного і змінного струмів, запропоновано використовувати МПР, за допомогою якого синтезовані регулятори для ДЕМО, виконано синтез ЕП СГТ постійного й змінного струмів з урахуванням особливостей характеристики навантаження, розроблено математичні моделі електромеханічної системи СГТ, складені комп'ютерні аналоги і проведено комп'ютерне моделювання, проведено аналіз динамічних властивостей і виведені формули для похибок цих систем, сформульовані основні результати досліджень.

Апробація результатів дисертації

Основні наукові положення і результати роботи знайшли своє відображення у виступах і повідомленнях на п'ятьох міжнародних науково-технічних конференціях: “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика” (Крим, м. Алушта, 2001, 2002), “Проблеми сучасної електротехніки - 2002” (Київ, 2002), “Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації” (Кременчук, 2002); на міжнародному симпозиумі “Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. SIEMA'2002” (Харків, 2002). У 1997-2002 роках результати роботи були обговорені на наукових семінарах кафедри ЕПА ЗНТУ.

Публікації

За матеріалами дисертації опубліковано 18 друкованих праць. Серед них монографія, 10 статей у центральних науково-технічних журналах України і Росії, 7 статей у збірниках наукових праць чотирьох ВЗО України. Три статті опубліковані без співавторів.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, 4 додатків. Загальний обсяг дисертації містить 233 сторінки, з них 10 ілюстрацій на 7 сторінках, 42 ілюстрації по тексту; 1 таблиця на 1 сторінці, 4 таблиці по тексту; 4 додатки на 30 сторінках та списку використаних джерел з 144 джерелами на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проведений огляд і аналіз літератури з проблеми удосконалення машин, устаткування і технологічного процесу приготування сумішей із заданою точністю концентрації сипких компонентів. Для її підвищення при застосуванні СГТ запропоновано використовувати регульований ЕП або постійного, або змінного струму. Це дозволяє спростити конструкцію дозуючих пристроїв в бункері технологічної машини БСК-10. Розглянуто особливості кінематики СГТ, сформульовані *вимоги* до регульованого ЕП, обґрунтовані *режими його функціонування* з урахуванням

особливостей нелінійної МХ навантаження. Визначено мету і задачі досліджень.

У другому розділі здійснена ідентифікація параметрів ДЕМО, що відповідає СГТ у режимі дозування (переміщення) при використанні ЕП постійного і змінного струмів. Наведено результати експериментальних досліджень ЕП СГТ, що проводилися в ІМТ УААН на експериментальній установці дозатора-живильника БСК-10 і в дослідному господарстві «Світанок» ІМТ УААН Запорізького району на прифермському живильнику. Була підтверджена працездатність СГТ при дозуванні різних сипучих матеріалів: комбікормів, крейди, піску й інших. Однак при використанні регульованого ЕП СГТ встановлено, що на швидкості спіралі 20-30 % від номінальної в системі виникає автоколивальний режим роботи [1]. Цей ефект пов'язаний з нелінійною МХ навантаження СГТ. Вона має ділянку з від'ємною жорсткістю ($\beta_3 < 0$). При цьому використання стандартних налагоджень РШ не вирішує задачу усунення автоколивального режиму.

Установлено, що найбільш бажаним є ЕП СГТ за системою ТПН-АД із внутрішнім контуром швидкості і зовнішнім технологічним контуром із ЗЗ за продуктивністю Q СГТ [3] або вагою G сипкого матеріалу. Як варіант ЕП СГТ може бути прийнятий ЕП постійного струму ТП-Д [4] зі спрощеною структурою при використанні в контурі швидкості ЗЗ або за швидкістю двигуна, або, що ще простіше, за його ЕРС [2]. Завдання обмеження якірного струму вирішується шляхом застосування випереджувального струмообмеження. Доведено [5, 6], що залежно від режимів роботи СГТ кінематична схема механічної частини ЕП СГТ описується як одномасовою, так і двомасовою системами. При цьому жорсткість C_{12} і момент інерції другої маси J_2 змінюються в широкому діапазоні. Структурні схеми цих ЕП наведені на рис.1 у загальноприйнятих позначеннях. Показано нелінійний характер навантаження, що залежить від швидкості.

Індексми $C_{12}(\cdot)$, $J_2(\cdot)$ позначені змінність жорсткості спіралі та інерції другої маси. Коефіцієнт β відповідає жорсткості МХ АД у точці лінеаризації, β_3 – визначає жорсткість падаючої ділянки МХ навантаження. Коефіцієнти K_α , $K_{ТП}$, K_M - характеризують електромеханічне перетворення в ТПН і статорних ланцюгах АД. Подані схеми легко перетворюються в одномасові структури ЕП СГТ.

Для досліджуваних ЕП СГТ прийнята нелінійна МХ навантаження рис.2, яка при $M_{C0} = 3H \cdot m$ має такі параметри:

$$M_C = \begin{cases} M_{C0} + \beta_{C1}\omega_2; & \beta_{C1} = 0,4 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}; & 0 \leq \omega_2 \leq 30 \text{ с}^{-1}; \\ -\beta_C\omega_2; & |\beta_C| = 0,34 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}; & 30 \leq \omega_2 \leq 44,7 \text{ с}^{-1}; \\ +\beta_{C2}\omega_2; & \beta_{C2} = 0,045 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}; & 44,7 \leq \omega_2 \leq 157 \text{ с}^{-1}. \end{cases} \quad (1)$$

Обґрунтовано, що жорсткість падаючої ділянки відповідає значенню $\beta_c = -0,34 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{рад}$ і, враховуючи випадковий характеру, може зменшуватися в 2 рази. Ідентифіковано конструктивні параметри СГТ у всіх режимах роботи. Встановлено, що жорсткість пружного зв'язку змінюється в межах $2,9 \leq C_{12} \leq 72,6$

$H \cdot m / \text{рад}$, а момент інерції другої маси - $0,0023 \leq J_2 \leq 0,021 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. При цьому момент інерції J_1 , при використанні різних за потужністю ЕП постійного струму, змінюється в межах $0,018 \leq J_1 \leq 0,039$, а для змінного струму - $0,0056 \leq J_1 \leq 0,0142$. Відповідно змінюється коефіцієнт співвідношення мас $1,1 \leq \gamma_{\text{ДПТ}} \leq 2,7$; $1,34 \leq \gamma_{\text{Ад}} \leq 4,75$.

У третьому розділі на основі МПР зроблено синтез статичних й астатичних РШ і РЕ зниженого порядку для ЕП постійного струму рис.1, а.

При роботі системи на швидкості, що відповідає падаючій ділянці МХ навантаження з $\beta_C < 0$, що характерно для СГТ у режимі дозування сипких матеріалів, при неврахуванні впливу ЕРС двигуна ($T_{M1}/T_E > 4$), знайдена немінімально-фазова ПФ об'єкта контура швидкості, що має вигляд [6, 9]

$$W_{\text{ОБ}}(p) = \frac{U_{\text{ЗШ}}(p)}{U_{\text{РШ}}(p)} = \frac{K_{\text{ТП}} C_{\Phi} \cdot K_{\text{ДШ}} \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_C|}{C_{12}} p + 1 \right)}{R_E \cdot |\beta_C| \cdot \left[(T_E + T_{\mu}) p + 1 \right] \cdot \left(\frac{T_C}{\Omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma - 1)\Omega_{12}^2} p^2 + T_C p - 1 \right)}, \quad (2)$$

де $\Omega_{12} = \sqrt{C_{12}\gamma/J_2}$ - частота пружних коливань; $T_C = (J_1 + J_2)/|\beta_C|$ - механічна стала часу, с.

Для забезпечення заданої якості перехідного процесу за вихідною координатою - швидкістю другої маси ω_2 у нестійкому ДЕМО СГТ і для синтезу регуляторів використаний МПР. Згідно з ним передавальна функція (2) подана у виді:

$$W_{\text{ОБ}}(p) = \frac{P(p)}{Q(p)} = \frac{K_0 \cdot P_{\kappa+}(p) \cdot P_{n+}(p) \cdot P_{-}(p)}{Q_{\kappa+}(p) \cdot Q_{n+}(p) \cdot Q_{-}(p) \cdot p^s}, \quad (3)$$

де $P_{\kappa+}(p)$, $Q_{\kappa+}(p)$ - поліноми, які мають у якості своїх нулів тільки ліві нулі та полюси об'єкта, що компенсуються за допомогою регулятора; $P_{n+}(p)$, $Q_{n+}(p)$ - поліноми, що містять тільки ті ліві нулі і полюси об'єкта, у компенсації яких немає необхідності; $P_{-}(p)$, $Q_{-}(p)$ - поліноми, що містять праві і нейтральні нулі й полюси об'єкта, за винятком розташованих у точці $p=0$, компенсація яких неприйнятна через порушення умови грубості; $s=0,1,2$ - кількість полюсів об'єкта в точці $p=0$.

В усіх дослідженнях поліноміальне рівняння синтезу має вигляд:

$$\tilde{M}(p)P_{-}(p)P_{n+}(p) + \tilde{N}(p)Q_{-}(p)Q_{n+}(p)p^{\nu} = G(p) \quad (4)$$

де $G(p)$ - характеристичний поліном замкненої системи, що задається виходячи з умови забезпечення бажаного характеру перехідного процесу і часу їхнього загасання, зокрема, що відповідає одному з відомих стандартних розподілів або запропонованими у роботі їхніми видозмінами; $\tilde{M}(p)$, $\tilde{N}(p)$ - невідомі поліноми виду $\tilde{M}(p) = m_{i-1}p^{i-1} + m_{i-2}p^{i-2} + \dots + m_1p + m_0$, $\tilde{N}(p) = n_{j-1}p^{j-1} + n_{j-2}p^{j-2} + \dots + n_1p + n_0$ зниженої на одиницю степені $i-1$ та $j-1$; $\nu (\nu \geq s)$ - бажаний порядок астатизму замкнутої системи регулювання, прийнятий при синтезі статичних систем $\nu=0$, а для астатичних - $\nu=1$.

Після визначення степені поліномів $\tilde{M}(p)$ і $\tilde{N}(p)$, степінь, що позначається у вигляді $|\cdot|$, також зменшеного на одиницю характеристичного полінома $\tilde{G}(p)$ замкненої системи знаходиться як

$$|\tilde{G}| = |M| + |N|. \quad (5)$$

Розв'язуючи поліноміальне рівняння синтезу (4), визначаються невідомі коефіцієнти поліномів $\tilde{M}(p)$ і $\tilde{N}(p)$. Після цього ПФ зниженого порядку синтезованого РШ або РЕ визначається за виразом:

$$W_P(p) = \frac{Q_{\kappa+}(p)\tilde{M}(p)}{K_0 P_{\kappa+}(p)\tilde{N}(p)p^{v-s}}, \quad (6)$$

де K_0 – коефіцієнт підсилення ДЕМО.

На підставі МПР і (2) виконаний синтез статичного РШ зниженого порядку для ЕП рис.1,а зі спрощеною структурою. Знайдено нелінійні вирази для визначення невідомих коефіцієнтів m_{i-1} і n_{j-1} поліномів $\tilde{M}(p)$ і $\tilde{N}(p)$ [6]:

Процедура синтезу зазначеного РШ не дозволяє довільний вибір еквівалентної малої постійної часу $T_0=1/\omega_0$ замкненої системи. Її середньо-геометричний корінь ω_0 , величина якого в даному випадку залежить від параметрів ДЕМО, повинен насамперед забезпечити позитивність усіх коефіцієнтів m_{i-1} і n_{j-1} поліномів $\tilde{M}(p)$ і $\tilde{N}(p)$. Виконанням цієї умови досягається фізична реалізованість регулятора. Крім того, необхідно домогтися рівності $n_{01}=n_{02}$, тобто однозначності коефіцієнта n_0 . Пошук значень ω_0 здійснений двома запропонованими методиками.

Перша методика базується на побудові залежностей m_{i-1} і n_{j-1} у функції ω_0 при обраному розподілі, а отже, відомих коефіцієнтах $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ і α_4 в (7)÷(10). Подібні залежності наведені на рис.3, звідки знаходиться не тільки кінцеве значення ω_{01} при $n_{01}=n_{02}$, але і можливий діапазон його зміни $\omega_{01} \leq \omega_0 \leq \omega_{02}$ при деякій зміні значень α_i в обраному розподілі.

Друга методика полягає у використанні одного з складових рівняння синтезу (4), наприклад при p^3 . У результаті пошук можливих для реалізації дійсних позитивних значень ω_0 здійснимо за рівнянням

$$\left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} - \frac{A\gamma|\beta_C|}{\Omega_{12}^2 C_{12}} \right) \omega_0^5 - \alpha_1 \frac{A\gamma}{\Omega_{12}^2} \omega_0^4 - \alpha_2 \omega_0^3 + \alpha_3 \left(A - \frac{|\beta_C| \Omega_{12}^2}{\gamma C_{12}} \right) \omega_0^2 + \alpha_4 + \left(\Omega_{12}^2 - \frac{|\beta_C| \Omega_{12}^2}{(\gamma-1) C_{12} T_C} + \frac{A\gamma(2-\gamma)}{T_C(\gamma-1)} \right) \omega_0 + \left(\frac{\Omega_{12}^4 |\beta_C|}{\gamma C_{12}} - \frac{\Omega_{12}^2}{T_C} - A \Omega_{12}^2 + \frac{\Omega_{12}^2 \gamma}{(\gamma-1) T_C} - \frac{|\beta_C| \Omega_{12}^2 \gamma}{(\gamma-1)^2 T_C^2 C_{12}} + \frac{A\gamma^2(2-\gamma)}{(\gamma-1)^2 T_C^2} \right) = 0, \quad (11)$$

де

$$A = \left(C_{12} \gamma - \frac{\gamma C_{12}}{\gamma-1} + \frac{T_C |\beta_C| \Omega_{12}^2}{\gamma} \right) \cdot \left[\gamma |\beta_C| - T_C C_{12} (\gamma-1) \right]^{-1}.$$

Зазначеними методиками вдається не тільки вибрати потрібний розподіл, що забезпечує необхідну якість перехідного процесу, але й варіювати величину ω_0 , яка більшою чи меншою мірою відрізняється від Ω_{12} . В результаті для ПФ РШ отримано [6]:

$$W_{PШ}(p) = \frac{K_{PШ}[(T_{\Sigma} + T_{\mu})p + 1] \cdot (T_1 p + 1)}{T_2^2 p^2 + T_3 p + 1}, K_{PШ} = \frac{m_0 R_E |\beta_C|}{K_{ПШ} K_{ДШ} \cdot C\Phi \cdot n_0}; T_1 = \frac{m_1}{m_0}; T_2^2 = \frac{n_2}{n_0}; T_3 = \frac{n_1}{n_0}. \quad (12)$$

При необхідності застосування астатичних систем регулювання ($\nu=1$) зроблений синтез астатичного РШ зниженого порядку двома різними методами.

В основі першого лежить МПР. При цьому отримана ПФ астатичного РШ вигляду [7]:

$$W_{PШ.1}^A(p) = \frac{[(T_{\mu} + T_E)p + 1](T_2^{*2} p^2 + T_1^* p + 1)}{T_1 p (T_3^{*2} p^2 + T_4^* p + 1)}, \quad (13)$$

де $T_1 = n_0 K_0 / m_0$; $T_1^* = m_1 / m_0$; $T_2^{*2} = m_2 / m_0$; $T_3^{*2} = n_2 / n_0$; $T_4^* = n_1 / n_0$ - постійні інтегрування і часу.

Другий метод запозичений із систем підпорядкованого регулювання (СПР). У цьому випадку синтез астатичної системи ґрунтується на використанні ПФ статичного РШ (12). Після визначення величини $T_0^* = 1 / \omega_0^*$ до складу $W_{PШ}(p)$ (12) вводиться інтегральна частина з постійною часу $4T_0^*$. Тоді для ПФ астатичного РШ маємо:

$$W_{PШ.2}^A(p) = \frac{[(T_{\mu} + T_E)p + 1](T_2^{**2} p^2 + T_1^{**} p + 1)}{T_1^* p (T_3^{*2} p^2 + T_4^* p + 1)}, T_1^* = 4T_0^* / K_{PШ}^*, T_2^{**2} = 4T_0^* T_1^*, T_1^{**} = T_1^* + 4T_0^*. \quad (14)$$

З метою подальшого спрощення структури ЕП (відмовлення від використання тахогенератора) запропоновано замінити ЗЗ за швидкістю двигуна ω_1 зв'язком за його ЕРС E (див. рис.1, а) з відомою інерційністю T_a . При цьому якщо прийняти $U_{ЗШ} = U_{З.Э.МАКС}$, то $K_H C\Phi = K_{ДШ}$ й коефіцієнт підсилення об'єкта K_0 залишаються незмінними. Допустимо й ускладнення ПФ ЗЗ за ЕРС виглядом:

$$W_{ЗЗ}(p) = \frac{K_H (\tau p + 1)}{T_a p + 1}, \quad \tau < T_a. \quad (15)$$

У результаті проведеного синтезу МПР статичного й а-статичного РЕ [1, 9], також зниженого порядку, отримані їх ПФ, які збігаються за виглядом з (12)-(14). Уперше встановлено, що МПР забезпечує такі параметри РШ і РЕ, за яких швидкодія і точність роботи синтезованих систем виявляються однаковими. Це стало підставою для перевірки встановленого факту і для ЕП зі структурою СПР, виконаної в [15].

У даному розділі отримані узагальнені вирази для коефіцієнта підсилення і статичних похибок за керуванням і збуренням в розглянутих ЕП з жорсткою і пружною кінематикою при спрощеній одноконтурній структурі і нелінійному навантаженні. Вони мають вигляд [8]:

$$K_3 = \frac{K_{PШ} K_{ПШ} C\Phi \sqrt{R_{Ш}}}{K_{ДШ} K_{PШ} K_{ПШ} C\Phi \sqrt{R_{Ш}} + (C\Phi)^2 / R_{Ш} \mp \beta_C}, 1/B \cdot c; \quad (16)$$

$$\Delta\omega_{CT} = -\frac{M_{C0}}{K_{ДШ}K_{РШ}K_{ТП}C\Phi \sqrt{R_E} + (C\Phi)^2 / R_E \mp \beta_C}, c^{-1}; \quad (17)$$

$$\varepsilon = \frac{(C\Phi)^2 \sqrt{R_{Ш}} \mp \beta_C}{K_{ДШ}K_{РШ}K_{ТП}C\Phi \sqrt{R_{Ш}} + (C\Phi)^2 / R_{Ш} \mp \beta_C}, B, \quad (18)$$

де знаки \mp відносяться відповідно до падаючої або висхідної ділянки лінеаризованої МХ навантаження рис.2.

Аналогічні (16)-(18), узагальнені вирази знайдені і для ЕП зі структурою СПР [10]. Доведено, що зі знайдених виразів, як окремий випадок, впливають відомі залежності для похибок в одномасових одноконтурних ЕП, що працюють при постійному навантаженні.

Було встановлено, що синтезовані МПР РШ і РЕ зниженого порядку забезпечують працездатність ЕП і в тому випадку, коли при зміні режиму роботи СГТ відбувається перебудова двомасової системи на одномасову.

Четвертий розділ роботи присвячений дослідженням системи регулювання швидкості СГТ на основі ЕП змінного струму ТПН-АД (див.рис.1,б). Відзначимо, що в точці лінеаризації механічної характеристики АД залежно від його типу жорсткість β може мати як позитивний, так і від'ємний знак. Тому на схемі позитивний знак ЗЗ з коефіцієнтом β відповідає її позитивній величині, а від'ємний - значенню $\beta < 0$.

Спочатку виконаний аналіз стійкості ДЕМО з урахуванням падаючої ділянки ($\beta_C < 0$) нелінійного реактивного навантаження (рис.2) при використанні в ЕП ТПН-АД традиційного пропорційного П- РШ і ЗЗ за швидкістю двигуна. У результаті знайдені вирази для визначення величини коефіцієнта підсилення ($K_{РШ}$), коли система знаходиться на межі аперіодичної (А) і коливальної (К) стійкості [18]:

$$K_{РШ.А} \geq \frac{\beta}{K_{ТП}K_M K_{ДШ}} \left(\frac{|\beta_C|}{\beta} \mp 1 \right), \quad (19)$$

$$K_{РШ.К} \leq \frac{\beta}{K_{ТП}K_M K_{ДШ}} \left(\frac{J_1|\beta_C|^2 + J_2^2 C_{12}}{2\beta|\beta_C|J_2} + \sqrt{\frac{(J_1|\beta_C|^2 + J_2^2 C_{12})^2}{4\beta^2|\beta_C|^2 J_2^2} - \frac{J_1^2 C_{12}}{\beta^2 J_2}} \mp 1 \right). \quad (20)$$

Крім того, отримані вирази для розрахунку мінімальних значень параметрів механічної частини ДЕМО СГТ J_{2min} і C_{12min} , а також формули для визначення величин середньгеометричного кореня ω_0 і статичної похибки за швидкістю цієї ЕМС при будь-яких знаках β_C и β .

Дослідженнями встановлено, що використання П-РШ не може забезпечити стійку роботу системи при зміні, у зазначених раніше границях, параметрів ДЕМО і жорсткості β_C . На підставі цього проведений синтез МПР статичної системи регулювання швидкості ЕП ТПН-АД. У результаті отримані ПФ РШ зниженого порядку [13]:

$$W_{РШ}(p) = \frac{K_{РШ}(T_{\mu}p+1)(T_1p+1)}{T_2^2 p^2 + T_3 p + 1} \text{ або } W_{РШ}(p) = \frac{K_{РШ}(T_{\mu}p+1)(T_1p+1)}{(T_2^*p+1)(T_3^*p+1)}, \quad (21)$$

де $K_{PШ} = \frac{m_0|\beta|}{n_0K_{ТП}K_MK_{ДШ}}$; $T_1 = \frac{m_1}{m_0}$; $T_2^2 = \frac{n_2}{n_0}$; $T_3 = \frac{n_1}{n_0}$; $T_{2,3}^* = \frac{T_3}{2} \pm \sqrt{\frac{T_3^2}{4} - T_2^2}$.

З метою подальшого спрощення ПФ РШ запропоновано використовувати метод ланцюгових дробів для апроксимації більш низьким порядком вихідної немінімально-фазової ПФ ДЕМО, рис.1,б:

$$W_{OB}(p) = \frac{U_{ЗШ}(p)}{U_{PШ}(p)} = \frac{\frac{K_{ТП}K_MK_{ДШ}}{\beta} \left(\frac{J_2}{C_{12}} p^2 - \frac{|\beta_C|}{C_{12}} p + 1 \right)}{(T_\mu p + 1) \left(\frac{J_1 J_2}{C_{12} |\beta|} p^3 + \frac{1}{C_{12}} \left(J_2 - J_1 \frac{|\beta_C|}{|\beta|} \right) p^2 + \left(\frac{J_1 + J_2}{|\beta|} - \frac{|\beta_C|}{C_{12}} \right) p + \left(1 - \frac{|\beta_C|}{|\beta|} \right) \right)}. \quad (22)$$

Це дало можливість описати об'єкт у вигляді ПФ другого порядку, яка також має свої нулі і полюси [14].

З урахуванням результатів апроксимації на основі МПР проведений синтез і отриманий ПФ першого порядку статичного РШ:

$$W_{PШ}(p) = \frac{K_{PШ}^* (T_1^* p + 1)}{T_2^* p + 1}, \quad K_{PШ}^* = \frac{m_0^*}{n_0^* K_0}; \quad T_1^* = \frac{m_1^*}{m_0^*}; \quad T_2^* = \frac{n_1^*}{n_0^*}. \quad (23)$$

У даному випадку особливістю синтезу є простота вибору середньо-геометричного кореня системи ω_0 . Таким чином, застосування ланцюгових дробів дозволило не тільки суттєво спростити використання МПР, але й одержати досить просту в реалізації ПФ РШ (23).

При створенні астатичних систем ЕП ТПН-АД також використано два підходи. Відповідно до першого при відомому середньгеометричному корені ω_0 до ПФ статичного РШ (23) додана інтегральна частина зі сталою $T_I = 4/\omega_0 K_{PШ}^*$. Другий - організований на безпосередньому синтезі МПР астатичного РШ. Тому, використовуючи (21) і (23), отримано декілька ПФ зниженого порядку астатичних РШ, які мають такий вигляд [17]:

$$W_{PШ.2}^A(p) = \frac{(T_\mu p + 1)(T_1 p + 1)(4T_{02} p + 1)}{T_{I2} p (T_2^2 p^2 + T_3 p + 1)}; \quad (24)$$

$$W_{PШ.3}^A(p) = \frac{(T_1^* p + 1)(4T_{03} p + 1)}{T_{I3} p (T_2^* p + 1)}, \quad (25) \quad W_{PШ.4}^A(p) = \frac{(T_2^{**2} p^2 + T_1^{**} p + 1)}{T_{I4} p (T_3^{**} p + 1)}. \quad (26)$$

Знайдені [17] узагальнені вирази для статичних похибок за керуванням та збуренням в ЕП ТПН-АД як при нелінійному реактивному навантаженні, так і при її постійній величині.

У п'ятому розділі вирішувалася задача, пов'язана з синтезом МПР регуляторів для системи дозування на базі СГТ при використанні регульованих ЕП як постійного, так і змінного струмів. За своєю структурою вони віднесені до систем керування положенням. Тому регулятори на рис.1 позначені як РП(РГ), а коефіцієнт зворотного зв'язку $K_{ДП} = K_{ДГ}$.

Використовуючи статичні РШ (12) і РЕ зниженого порядку у внутрішньому контурі швидкості ЕП постійного струму, отримана ПФ об'єкта регулювання контура положення. Зроблений МПР безпосередній синтез ПФ

статичного РП(PG) [11]:

$$W_{РП(PG)1}(p) = \frac{K_{РП(PG)1}(T_1^* p + 1)}{T_2^* p + 1}, \quad (27)$$

де $K_{РП(PG)1}$, T_1^* , T_2^* - відповідають знайденій величині ω_0 контура положення.

Розглянута і друга методика синтезу регуляторів. Вона базується на використанні принципів створення СПР положенням. У результаті отримано, що при відпрацьовуванні малих переміщень коефіцієнт підсилення пропорційного П-РП (PG) визначається як:

$$K_{РП(PG).2}^M = \frac{K_{ДШ}}{m_0 K_G K_{ДГ} a_{П} T_{\mu C}}; \quad T_{\mu C} = \frac{\alpha_1}{\omega_0}, \quad (28)$$

де $a_{П}$ - параметр, прийнятий рівним $2 \div 4$, для виключення перерегулювання за положенням; $T_{\mu C}$ - мала еквівалентна постійна часу, що відповідає середньо-геометричному кореневі контура швидкості і заданим коефіцієнтам α_i обраного розподілу. При відпрацьовуванні великих переміщень коефіцієнт підсилення П-РП (PG) визначається як:

$$K_{РП(PG).3}^B = \frac{K_{ДШ} \cdot 2 \cdot \varepsilon_T}{m_0 K_G K_{ДГ} \omega_{уст}}, \quad (29)$$

де ε_T - прискорення при гальмуванні від усталеної швидкості $\omega_{уст}$; m_0 - параметр, що відповідає РШ(12).

При використанні статичних РП(PG) (27)-(29) зниженого порядку отримані вирази для статичної похибки за положенням [11].

При використанні у внутрішньому контурі швидкості а-статичних РШ (PE) (13) або (14) двома методами проведено синтез регуляторів РП(PG). Отримані ПФ регуляторів, що забезпечують у системі нульовий статизм за навантаженням [12].

Синтез РП(PG) для ЕП змінного струму ТПН-АД виконаний на основі статичного РШ (23), знайденого із застосуванням ланцюгових дробів. Це дозволило значно спростити використання МПР і одержати досить прості в реалізації ПФ [1]:

$$W_{РП.1}(p) = \frac{K_{РП.1}(\tilde{T}_1 p + 1)}{\tilde{T}_2 p + 1}; \quad (30) \quad W_{РП.2}(p) = \frac{\hat{m}_0}{\hat{n}_0 K_{0G}} = \frac{\hat{m}_0 K_{ДШ}}{\hat{n}_0 m_0^* K_G K_{ДП}}. \quad (31)$$

Аналогічно синтезовані різні РП(PG), коли для забезпечення нульового статизму за навантаженням у складі системи рис.1,б використовуються астатичні РШ. Результати цих досліджень опубліковані в [16].

У шостому розділі наведені результати комп'ютерного моделювання всіх синтезованих систем і поданий їх аналіз. Дослідження насамперед підтвердили факт наявності автоколивального режиму при роботі СГТ з регульованим ЕП на падаючій ділянці нелінійної МХ навантаження з жорсткістю $\beta_C < 0$. Крім того, доведена працездатність ЕП постійного і змінного струмів з усіма тут синтезованими регуляторами при двомасовій і одномасовій структурі зі значною зміною, більш ніж у 30 разів, коефіцієнта жорсткості пружного зв'язку і, більш

ніж у 10 разів, моменту інерції другої маси, як при постійній, так і нелінійній з падаючою ділянкою навантаженні; при цьому не потрібна перебудова регуляторів.

Як приклад на рис.4, що відноситься до третього розділу, наведені перехідні процеси в системі рис.1,*a* з ЕП постійного струму при використанні статичного РШ (12) при зміні жорсткості падаючої ділянки МХ навантаження в два рази, моменту інерції другої маси J_2 у 10 разів і коефіцієнта жорсткості пружного зв'язку C_{12} у 25 разів. Це характерно для роботи СГТ при випадковій зміні жорсткості β_C падаючої ділянки МХ навантаження (осц.*a*), при зменшенні питомої ваги переміщуваної маси (осц.*б*), для режиму вивільнення з транспортера сипучого матеріалу (осц.*в*).

На рис.5 показані перехідні характеристики за керувальним(*a*, *б*) і збурювальним (*у*, *з*) впливами в системі рис.1,*a*, що підтверджують однакову швидкодію і точність роботи при використанні ЗЗ за швидкістю і ЕРС двигуна.

На рис.6 наведені, аналогічні рис.4, перехідні процеси в системі регулювання швидкості рис.1,*б* з ЕП ТПН-АД і регулятором (23), синтезованим з застосуванням ланцюгових дробів.

Як приклад на рис.7 показані результати комп'ютерного моделювання системи дозування на основі СГТ у режимах відпрацьовування малих і великих переміщень із синтезованим РП (РГ) (27).

Результати комп'ютерних досліджень підтвердили теоретичні положення дисертаційної роботи. Їхній аналіз для всіх систем проведений в опублікованих роботах [1-18].

ВИСНОВКИ

У результаті виконаної роботи сформульовані такі висновки.

1. Проведені експериментальні дослідження дозатора сипких інгредієнтів на базі СГТ, які довели його працездатність у режимі дозування, що досягається запропонованим використанням регульованих ЕП постійного і змінного струмів. Дослідженнями підтверджена наявність падаючої ділянки в МХ навантаження СГТ, що приводить до виникнення автоколивальних режимів.

2. Обґрунтовано доцільність застосування МПР для синтезу ПФ регуляторів двомасових електромеханічних систем зі спрощеною структурою, які працюють при нелінійному характері реактивного навантаження, яка включає падаючу ділянку, що приводить до початково нестійкого об'єкта керування.

3. Запропоновано методику вибору середньгеометричного кореня для синтезованих систем при використанні видозмінених розподілів полюсів, що сприяє спрощенню рішення задач синтезу систем, які мають немінімальнофазові ПФ об'єкта керування.

4. За допомогою МПР синтезовані статичні й астатичні РШ, РЕ і РП зниженого порядку для ЕП постійного струму зі спрощеною структурою, а також виконаний синтез статичного й астатичного РЕ для двоконтурного ЕП зі структурою СПР.

5. Доведено, що при використанні МПР синтезовані РЕ забезпечують системі швидкодію і точність, що відповідають використанню РШ. Це дозволяє відмовитися від застосування тахогенератора в ЕП, що працюють як з нелінійним, так і з постійним навантаженням.

6. Отримано узагальнені залежності для статичних похибок в одноконтурних і двоконтурних ЕП постійного струму з різним знаком і величиною жорсткості окремих ділянок нелінійного навантаження, які можна застосовувати й у випадку сталості навантаження.

7. Уперше проведений аналіз і отримані залежності для вибору коефіцієнта підсилення П-РШ початково нестійкого ДЕМО з ЕП ТПН-АД при використанні одного ЗЗ за швидкістю двигуна.

8. Установлено, що наявність падаючої ділянки в МХ навантаження значно зменшує модуль стійкості системи ТПН-АД з П-РШ і робить її практично непридатною для застосування в СГТ при зазначеному вище діапазоні зміни жорсткості пружного зв'язку і моменту інерції другої маси.

9. Уперше МПР синтезовані статичні й астатичні РШ і РП зниженого порядку для ЕП змінного струму ТПН-АД. При цьому відповідним вибором середньгеометричного кореня забезпечена фізична реалізованість регуляторів і необхідна швидкодія системи.

10. Уперше запропоновано використовувати ланцюгові дроби для зниження порядку вихідної немінімально-фазової ПФ об'єкта в контурі швидкості. Обґрунтовано, що апроксимуюча ПФ повинна також відноситися до групи немінімально-фазових.

11. Обґрунтовано, що синтез статичного РП для стійкого внутрішнього контура швидкості може здійснюватись як МПР, так і методами синтезу СПР. При цьому найкраща якість перехідних процесів досягається, коли в основі синтезу лежить апроксимуюча ПФ об'єкта.

12. Отримано узагальнені залежності для розрахунку статичних похибок у системах регулювання швидкості і положення ЕП ТПН-АД для різних ділянок нелінійного навантаження, включаючи випадок її сталості.

13. Установлено, що синтезовані РШ, РЕ і РП забезпечують працездатність ЕП, коли через особливості технологічного процесу СГТ відбувається перебудова його двомасової структури в одномасову.

14. Знайдені ПФ регуляторів без зміни своїх параметрів забезпечують працездатність ЕП при зменшенні жорсткості падаючої ділянки МХ навантаження не менш ніж у 2 рази, жорсткості пружного зв'язку в 30 разів і моменту інерції другої маси убік зменшення не менш ніж у 10 разів, що відповідає різним режимам роботи СГТ.

15. Проведеними комп'ютерними дослідженнями підтверджена не тільки адекватність прийнятих для дослідження математичних моделей початково нестійкого ДЕМО, основу яких складає СГТ з ЕП постійного і змінного струмів, але й показана досяжна якість перехідних процесів у системах із усіма синтезованими регуляторами. Це переконує в перспективності використання даних регуляторів у малопотужних ЕП зі спрощеною структурою при нелінійному характері їхнього навантаження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой/ Л.В. Акимов, В.Т. Долбня, В.Б. Клепиков, А.В. Пирожок /Под общей ред. В.Б. Клепикова. - Харьков: НТУ «ХПИ», Запорожье: ЗНТУ, 2002. - 160 с. – Здобувачу належить ідея синтезу, розробка математичних моделей, розрахунків параметрів, комп'ютерне моделювання.
2. Пирожок А.В. Разработка и обоснование алгоритма управления винтовым дозатором на базе динамической модели комплектного электропривода //Труды Таврической государственной агротехнической академии. - Мелитополь: ТГАТА. - 1997. - Т.3, Вып.1. - С.23-25.
3. Пирожок А.В. Розробка та реалізація пристрою для виміру витрат сипких матеріалів на базі компенсаційної камери // Труды Таврической государственной агротехнической академии. -Мелитополь: ТГАТА. - 1998. - Т.7, Вып.1. - С.110-116.
4. Пирожок А.В. Имитационное моделирование электропривода спирально-винтового транспортера // Электротехника та електроенергетика. - Запоріжжя: ЗДТУ. – 2000. - №2. - С.21-26.
5. Акимов Л.В., Пирожок А.В. Математическая модель электромеханической системы дозатора со спирально-винтовым транспортером и нелинейной нагрузкой // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». -Харьков: НТУ «ХПИ».-2001. -Вип. 10. -С.43-45.– Постановка задач досліджень і розрахунків параметрів належать здобувачу.
6. Акимов Л.В., Пирожок А.В. Система управления неустойчивым двухмассовым электромеханическим объектом с упрощенной структурой // Технічна електродинаміка. – Київ, - 2002. - Тематичний вип. Проблеми сучасної електротехніки. - Ч.4. - С.27-32. – Здобувач запропонував використовувати поліноміальний метод синтезу для даних ЕМС.
7. Акимов Л.В., Пирожок А.В. Синтез астатического регулятора скорости пониженного порядка для двухмассового электропривода с упрощенной структурой и нелинейной нагрузкой // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. - №3. - С.86-97. - Постановка задач досліджень і розрахунків параметрів.
8. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Пирожок А.В. Обобщенный анализ статических и динамических ошибок в двухмассовых и одномассовых электроприводах с упрощенной структурой при нелинейной нагрузке // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. - 2002. – Вип.. 1(12). - С.27-32.- Постановка задач досліджень і розрахунків параметрів належать здобувачу.
9. Акимов Л.В., Пирожок А.В. Синтез полиномиальным методом упрощенной структуры двухмассового электропривода с регулятором ЭДС пониженного порядка при нелинейной нагрузке//Праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. - Донецьк:ДонНТУ. - 2002. -Вип. 41. - С. 126-133. - Постановка задач досліджень і розрахунків параметрів належать здобувачу.

10. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Пирожок А.В. Оценка точности работы двухконтурных двухмассовых электроприводов с нелинейной реактивной нагрузкой // Технічна електродинаміка. - Київ, - 2002. - Тематичний вип. Силова електроніка та енергоефективність. - Ч.3. - С.41-46. - Здобувачем проведений аналіз динамічних властивостей і виведені формули для знаходження похибок.

11. Акимов Л.В., Пирожок А.В. Синтез регулятора статической системы положения для двухмассового электропривода с нелинейной нагрузкой //Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. - Запоріжжя: ЗНТУ. - 2002. - №1. - С.99-107. - Постановка задач досліджень і розрахунків параметрів належать здобувачу.

12. Акимов Л.В., Пирожок А.В. Система регулирования положения с упрощенной структурой для двухмассового исходно неустойчивого электромеханического объекта // Електромашинобудування та електрообладнання (Одеського національного політехнічного університету). - Київ: "Техніка". - 2002. - Вип.58. - С.27-33. - Здобувачем проведено синтез регуляторів.

13. Акимов Л.В., Пирожок А.В. Синтез статического регулятора скорости двухмассового электропривода переменного тока ТРН-АД с нелинейной нагрузкой //Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». - Харьков: НТУ «ХПИ».- 2002. - Вип.12. –Т.1. - С.124-129. - Здобувач провів розрахунків параметрів, створив моделі і здійснив комп'ютерні дослідження.

14. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Пирожок А.В. Использование цепных дробей в задаче синтеза регулятора скорости двухмассового электропривода переменного тока с нелинейной нагрузкой // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». - Харьков: НТУ «ХПИ».- 2002. - Вип.12. - Т.2. - С. 381-385 - Здобувач провів розрахунків параметрів, створив моделі і здійснив комп'ютерні дослідження.

15. Акимов Л.В., Пирожок А.В. Синтез статического и астатического регуляторов ЭДС для двухконтурных двухмассовых и одномассовых электроприводов с нелинейной реактивной нагрузкой// Электротехника. - 2002. - № 9. - С.28-37.- Здобувачем проведено синтез регуляторів.

16. Акимов Л.В., Пирожок А.В. Система регулирования положения электроприводом ТРН-АД с нулевым статизмом по нагрузке // Электротехніка і електромеханіка.- Харків: НТУ «ХПИ» - 2002. - №2. - С. 5-11. - Здобувач провів розрахунків параметрів, створив моделі і здійснив комп'ютерні дослідження.

17. Акимов Л.В., Долбня В.Т., Пирожок А.В. Астатические регуляторы скорости для двухмассового электропривода ТРН-АД с нелинейной характеристикой нагрузки // Электротехника. - 2002. - № 10. - С. 36-44. - Здобувач провів розрахунків параметрів, створив моделі і здійснив комп'ютерні дослідження.

18. Акимов Л.В., Пирожок А.В. Анализ устойчивости двухмассового электропривода ТПН-АД с пропорциональным регулятором скорости при нелинейной нагрузке // Електромашинобудування та електрообладнання

(Одеського національного політехнічного університету). - Київ: "Техніка". - 2002, - Вип. 59. - С.53-59. - Здобувачем проведений аналіз динамічних властивостей і виведені формули для знаходження похибок.

АНОТАЦІЇ

Пирожок А.В. Синтез поліноміальним методом регуляторів спрощених структур електромеханічних систем спірально-гвинтового транспортера. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2003.

Дисертація присвячена синтезу поліноміальним методом статичних і астатичних регуляторів швидкості, ЕРС та положення спрощених структур електромеханічних систем постійного та змінного струмів спірально-гвинтового транспортера, які працюють при нелінійному реактивному навантаженні з падаючою ділянкою, що приводить до початково нестійкого об'єкта керування.

Встановлено, що залежно від режиму роботи СГТ електромеханічна система може описуватися як одно- так і двомасовою моделлю зі значною зміною коефіцієнта пружності й моменту інерції другої маси. Доведено, що при використанні регуляторів ЕРС, синтезованих поліноміальним методом, швидкодія і точність систем відповідають використанню регуляторів швидкості.

Проведено аналіз початково нестійкого електропривода ТПН-АД. Для спрощення синтезу та зменшення порядку регуляторів запропоновано використовувати ланцюгові дроби, завдяки чому знижується порядок початкової нестійкої передавальної функції об'єкта.

Доведена працездатність синтезованих систем без зміни параметрів регуляторів в усіх можливих режимах СГТ, включаючи режим дозування.

Ключові слова: регульований електропривод постійного і змінного струмів, електромеханічна система, системи автоматичного регулювання і керування, синтез, метод поліноміальних рівнянь, спірально-гвинтовий транспортер, спрощена структура, нелінійна механічна характеристика навантаження, регулятор швидкості, ЕРС, система дозування.

Пирожок А.В. Синтез полиномиальным методом регуляторов упрощенных структур электромеханических систем спирально-винтового транспортера. - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический

інститут”, Харків, 2003.

Дисертація посвящена синтезу поліноміальним методом статических і астатических регуляторів швидкості, ЕДС і положення упрощених структур електромеханіческих систем постійного і змінного струму спіральновинтового транспортера, працюючих при нелінійній реактивній навантаженні з падаючим участком, що приводить до вихідно нестійкому об'єкту управління.

Установлено, що в залежності від режиму роботи СВТ електромеханіческа система може описуватися як одно- так і двохмасовою моделлю з суттєвим зміною коефіцієнта пружності і моменту інерції другої маси. Доведено, що при використанні регуляторів ЕДС, синтезованих поліноміальним методом, швидкодія і точність систем відповідають використанню регуляторів швидкості. Отримані узагальнені залежності для розрахунку статических помилок в системах регулювання швидкості і положення для різних участків нелінійної навантаженні, включаючи випадок її постійності.

Проведено аналіз вихідно нестійкого електропривода ТПН-АД. Предложено використовувати ціпні дроби для зниження порядку вихідної нестійкої передаточної функції об'єкта. Обосновано, що застосування ціпних дробів суттєво упрощає синтез і знижує порядок передаточних функцій регуляторів, що сприяє спрощенню їх реалізації.

Доведено можливість роботи синтезованих електроприводів без зміни параметрів регуляторів з двохмасовою і одномасовою кінематикою при суттєвих змінах жорсткості пружної зв'язки і моменту інерції другої маси, що відповідає різним режимам роботи СВТ. Проведеними експериментальними і комп'ютерними дослідженнями показано досягаєме якість перехідних процесів в системах з усіма синтезованими регуляторами, включаючи режим точного дозування СВТ.

Ключові слова: регульований електропривод постійного і змінного струму, електромеханіческа система, системи автоматического регулювання і управління, синтез, метод поліноміальних рівнянь, спіральновинтової транспортер, упрощена структура, нелінійна механіческа характеристика навантаженні, регулятор швидкості, ЕДС, система дозування.

Pirozhok A.V. Synthesis of regulators for simplified structures of electromechanical spiral-screwed transporter systems with the help of polynomial method. - the Manuscript.

The dissertation for a candidate's for degree on a speciality 05.09.03 - electrotechnical complexes and systems. - National technical university "Kharkiv polytechnic institute", Kharkiv, 2003.

Dissertation dedicated to methods of polynomial synthesis for static and astatic speed, EMF and position regulators for simplified structures of electromechanical DC

and AC systems of spiral-screwed transporter (SST), working with nonlinear reactive load that has falling down zone of loading characteristic, resulting in initially unstable behavior of controlled object.

It has been established, that depending on the mode of SST operation, electromechanical system can be described as one- or two-mass model with substantial change of elasticity factor and inertia moment of the second mass. It has been proved, that using of EMF regulators, synthesized by polynomial method, corresponds to using of speed regulator, regarding system's speed of response and accuracy of regulation.

The analysis of initially unstable system - electric drive-TVC-AM has been carried out. It has been proposed to use chain fractions for simplification of synthesis and decreasing of regulators order. The order of initially unstable transfer function of controlled object goes down due to this approach.

Opportunity of synthesized electromechanical systems operation without change of parameters in all possible modes of SST operation has been proved.

Key words: DC and AC electric drive, electromechanical system, automatic control systems, synthesis, polynomial equations method, spiral-screwed conveyor, controlled electric drive, loading nonlinear mechanical characteristics, speed regulator, EMF regulator, dosing systems.