

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**Марков Владислав Сергійович**

УДК 62-83-52

**ПОЛІПШЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОМАСОВИХ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ІЗ ВІД’ЄМНИМ В’ЯЗКИМ ТЕРТЯМ ПРИ  
ПІДПОРЯДКОВАНОМУ РЕГУЛЮВАННІ**

Спеціальність – 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2001

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут”, Міністерство освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент

**Осічев Олександр Васильович,**  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
доцент кафедри автоматизованих  
електромеханічних систем

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор

**Коцегуб Павло Харитонович,**  
Донецький державний технічний університет,  
завідувач кафедри електропривода та  
автоматизованих електротехнічних комплексів

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник, доцент

**Васильєв Вадим Олексійович,**  
АТ “Науково-технічний комплекс “Цемент””,  
м.Харків, ведучий науковий співробітник

Провідна установа – **Одеський державний політехнічний університет**

кафедра “Електромеханічні системи з комп’ютерним управлінням”,  
Міністерство освіти і науки України, м.Одеса

Захист відбудеться “27” 06 2001 р. о 14<sup>30</sup> год.

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 “ 26” 05 2001р.

В. о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради

Акімов Л.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На роботу електроприводів (ЕП) постійного струму широкого класу промислових механізмів істотно негативно впливають фрикційні автоколювання (АКФ), викликані наявністю падаючої ділянки в механічній характеристиці навантаження. При деяких сполученнях параметрів ЕП і його фрикційного навантаження із характеристикою, що містить таку ділянку, у системі виникають автоколивальні динамічні процеси, які знижують якість продукції, що випускається, і викликають поломки устаткування.

Виникнення АКФ при наявності прослизання можливе в ЕП механізмів листових прокатних станів, в обтискних клітках блюмінгів і слябінгів, механізмів подач металорізальних верстатів, кранових механізмів, що пересуваються по рейковому шляху, рудникових електровозів, кульових млинів, правильних машин і т. ін.

Слід зазначити, що для деяких з перерахованих вище механізмів режим прослизання є нормальним технологічним режимом, наприклад, при обробці деталей на шліфувальних металообробних верстатах, а для інших аномальним – буксування валків прокатних станів або коліс електровоза. З іншого боку, на динаміку ЕП, що працюють на фрикційне навантаження, впливають пружні колювання, обумовлені пружністю кінематичних ланок. Для таких електромеханічних систем, названих двомасовими (ДЕМС), наявність пружних колювань та АКФ значно ускладнює проблему пошуку прийнятних налаштувань традиційних систем підпорядкованого регулювання (СПР), як найбільш розповсюджених останнім часом.

Дослідженню динаміки електромеханічних систем із від'ємним в'язким тертям (ВВТ) присвячений науковий напрямок, що заснований та розвивається на кафедрі “Автоматизовані електромеханічні системи” Національного технічного університету “ХПІ” під керівництвом професора В.Б. Клепікова.

У рамках даного напрямку встановлені основні умови виникнення АКФ, розроблені математичні моделі для аналізу динамічних властивостей електромеханічних систем із фрикційним навантаженням, визначені способи і розроблені інженерні методики для синтезу стійких електромеханічних систем, створені технічні пристрої, що усувають АКФ у промислових ЕП. При цьому досліджувалися одномасові та двомасові ЕП, розімкнені і замкнені різними зворотними зв'язками, а також досліджені ДЕМС із ВВТ зі структурою СПР при стандартних налаштуваннях контурів регулювання. Під керівництвом доц. Осічева О.В. досліджені одномасові системи із ВВТ зі структурою СПР при використанні кореневого методу налаштування її ПІ-регуляторів. Однак залишається актуальною проблема пошуку нетрадиційних налаштувань

статичних та астатичних регуляторів швидкості (РШ) у рамках СПР, що забезпечували б не тільки розширення області стійкості ДЕМС із ВВТ, але і необхідні показники якості перехідних процесів вихідної координати ЕП.

Таким чином, задача аналізу та синтезу стійких двомасових ЕП із пружністю і фрикційним навантаженням залишається важливою й актуальною.

**Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проводилися відповідно до державної науково-технічної програми ДКНТ по п.5.1.6 “Ресурсозберігаючі електромеханічні системи” у рамках держбюджетної теми 04.11.05/05К-95 “Дослідження електромеханічних систем із від’ємним в’язким тертям і розробка протибуксовочних систем для прокатних станів та електротранспорту”.

**Мета і задачі дослідження.** *Мета дисертаційної роботи* полягає у поліпшенні динамічних характеристик СПР електроприводів постійного струму, що мають двомасову пружну кінематичну схему і початкову нестійкість у силу впливу ВВТ на характер їхнього навантаження, за рахунок використання нетрадиційних методик настроювання регуляторів, тобто таких, які відрізняються від настроювань на модульний та симетричний оптимуми, а також застосування синтезованих поліноміальним методом різних статичних і астатичних регуляторів швидкості повного та зниженого порядку.

Для досягнення зазначеної мети вирішувалися наступні *основні задачі*.

1. Аналіз нетрадиційних методик настроювання регуляторів СПР, що сприяють зростанню демпфуючої здатності системи і тим самим запобігають автоколивальним режимам, обумовленим нелінійним реактивним навантаженням.

2. Розробка інженерної методики розрахунку границі області стійкості ДЕМС із ВВТ при підпорядкованому регулюванні координат і різних настроюваннях регуляторів, а також методики розрахунку їхніх параметрів для максимально можливого розширення області стійкості при варіації коефіцієнтів регуляторів СПР.

3. Використання методу поліноміальних рівнянь для синтезу статичних і астатичних РШ повного й зниженого порядку при замиканні зовнішнього контуру зворотним зв'язком за швидкістю двигуна.

4. Синтез методом поліноміальних рівнянь статичного РШ повного й зниженого порядку та астатичного РШ зниженого порядку при замиканні зовнішнього контуру зворотним зв'язком за швидкістю механізму.

5. Дослідження динамічних показників перехідних процесів і статичних похибок, розроблених СПР із нетрадиційними РШ. Аналіз впливу зміни параметрів ЕП на його динамічні властивості.

6. Розробка схемних реалізацій запропонованих регуляторів швидкості і перевірка їхньої працездатності на математичних моделях.

*Об'єктом дослідження* є динамічні властивості ДЕМС із ВВТ при підпорядкованому регулюванні координат із традиційними і синтезованими РШ.

*Предмет дослідження* – СПР ЕП постійного струму із початково нестійкою двомасовою механічною частиною у силу впливу на характер його навантаження ВВТ, настроюючи або синтезуючи яку, можна домогтися усунення АКФ і забезпечити стійкий динамічний процес.

*Методи дослідження.* Методи теорії електроприводу та автоматичного керування використовувалися для аналізу традиційних СПР. Метод поліноміальних рівнянь й стандартні нормовані розподіли коренів застосовувалися для синтезу запропонованих РШ. Топологічним методом визначалися передавальні функції замкнених систем. Чисельні методи, структурне моделювання використовувалися для розрахунку перехідних процесів на ЕОМ за допомогою програми MATLAB та Electronic Workbench.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Зроблений порівняльний аналіз традиційних та використаних у роботі нетрадиційних настроювань П- і ПП- РШ та ПП-регуляторів струму (РС), що поліпшують динамічні властивості ДЕМС із ВВТ без зміни структури СПР за рахунок розширення області стійкості.

2. Запропоновано методику вибору параметрів регуляторів СПР для максимально можливого розширення області стійкості ДЕМС із ВВТ. За допомогою цієї методики встановлена наявність екстремуму в залежності між коефіцієнтом підсилення РШ і РС та параметром, що характеризує ВВТ. Це дозволяє вибором даного коефіцієнта забезпечити максимально можливе розширення області стійкості ДЕМС із ВВТ без зміни структури регуляторів і самої СПР.

3. Уперше для синтезу СПР електроприводів із двомасовою механічною частиною і впливом ВВТ у характері навантаження запропоновано використовувати метод поліноміальних рівнянь (МПР).

4. За допомогою МПР синтезовані статичні та астатичні РШ повного і зниженого порядку при незмінному стандартному настроюванні РС і використанні зворотного зв'язку за швидкістю двигуна або зворотного зв'язку за швидкістю механізму.

5. Установлено, що синтезовані регулятори забезпечують не тільки поліпшення динамічних властивостей двомасового ЕП на падаючій ділянці характеристики навантаження, але й успішно працюють при її нелінійному характері із висхідною й падаючою ділянками, а також при постійному моменті опору.

6. Установлено, що при деяких співвідношеннях параметрів запропоновані регулятори забезпечують, без перерахування власних параметрів, усталену роботу ЕП при змінах моменту

інерції другої маси приблизно у 2 рази в більший та менший бік від початкового значення і параметра ВВТ не менш ніж у сто разів.

7. Знайдені вирази для статичних похибок за керуючою та дією збурення для СПР ДЕМС із ВВТ при використанні РШ, синтезованих МПР.

8. Установлено, що використання РШ повного порядку не приводить до поліпшення динамічних показників системи у порівнянні з системою, постаченою РШ зниженого порядку. Крім того, зроблений висновок про доцільність використання зворотного зв'язку за швидкістю електродвигуна, а не за швидкістю механізму.

9. Установлено, що складність синтезу РШ методом поліноміальних рівнянь зростає в міру віддалення нестійких (правих) коренів від мнимної осі в площині коренів. У цьому випадку пропонується використовувати розроблені нові розподіли коренів.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що розроблені методики синтезу статичних й астатичних РШ повного і зниженого порядків у складі СПР двомасових ЕП при їхньому замиканні зворотним зв'язком за швидкістю електродвигуна або за швидкістю механізму, призначені для поліпшення динамічних властивостей СПР різних механізмів, у характеристиці реактивного навантаження яких є ділянки із впливом ВВТ. Зокрема, вони можуть бути рекомендовані при створенні і реконструкції головних і допоміжних ЕП прокатних станів, для ЕП повздовжньо-стругальних і шліфувальних верстатів, волочильних машин та інших механізмів.

Використовуваний у роботі поліноміальний метод синтезу регуляторів доведений до інженерної методики, що істотно спрощує проектування ЕП як зі стандартними налаштуваннями, так і з запропонованими розподілами коренів замкненої системи. Розроблені за допомогою МПР регулятори можуть уводитися до складу СПР без будь-якої суттєвої переробки їхніх принципових схем.

Результати дисертаційної роботи і розроблений пакет програм використовуються на обчислювальному центрі кафедри “Автоматизовані електромеханічні системи” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Теоретичні положення, викладені у дисертації, використовуються в наукових дослідженнях і в навчальному процесі. Вони ввійшли спеціальним розділом у курс “Системи керування електроприводами”. У дисертації представлені відповідні акти впровадження отриманих результатів.

**Особистий внесок здобувача.** Роботи [2, 9, 15] опубліковані самостійно. У роботах [4, 11, 13] автором виконаний синтез поліноміальним методом РШ і проведені дослідження СПР із даними регуляторами. У роботі [3] визначені області стійкості ДЕМС на основі запропонованої методики пошуку коефіцієнтів підсилення традиційних РШ. У роботі [8] запропоновано використовувати МПР для синтезу астатичної СПР швидкості і проведений аналіз динамічних

властивостей розробленої СПР. У роботі [14] знайдені коефіцієнти видозмінених нормованих розподілів. У роботах [5, 6, 7, 12] визначені передавальні функції СПР за керуванням та збуренням і проведений аналіз статичних і динамічних похибок. У роботі [10] розроблені схемні реалізації регуляторів і виконане їхнє дослідження на математичних моделях.

У монографії [1] узагальнені всі основні результати й висновки, отримані в опублікованих роботах. Тут автору належить 33 % обсягу монографії.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення й результати роботи доповідалися на конференціях з міжнародною участю “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика” (Крим, м. Алушта, 1998, 1999, 2000), на міжнародній конференції microCAD “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (м. Харків, 1998) і доповідалися на науковому семінарі НАН України “Динаміка нелінійних електромеханічних систем” (м. Харків, 1997, 1999), а також були представлені на 6-й міжнародній конференції “Проблеми сучасної електротехніки” (м.Київ, 2000).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в монографії і 14 статтях. З них 9 у спеціалізованих виданнях і 5 у працях конференцій. Три статті опубліковані без співавторів.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків та 9 додатків. Повний обсяг дисертації становить 200 сторінок, 16 ілюстрацій по тексту та 34 ілюстрації на 31 сторінці, 12 таблиць по тексту та 2 таблиці на 2 сторінках, 9 додатків на 15 сторінках, 142 використаних літературних джерела на 14 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** проведений аналіз літератури за проблемою поліпшення динаміки ДЕМС із ВВТ. Розглянуті нетрадиційні настроювання регуляторів СПР, які запропоновані різними авторами для поліпшення динаміки ДЕМС без ВВТ. Визначена мета та задачі дослідження.

У **другому розділі** для математичної моделі СПР ДЕМС із ВВТ, показаної на рис.1, на вході якої стоять фільтр  $\Phi$  і задавач інтенсивності  $ZI$ , проведений аналіз ефективності нетрадиційних настроювань СПР з РШ та РС для розширення області стійкості та, отже, для поліпшення динамічних характеристик. Дослідження динамічних показників якості системи проведено для трьох нетрадиційних методик з П- і ПІ-РШ, але при її роботі на падаючій ділянці нелінійної характеристики навантаження.

На рис. 2 показана нелінійна характеристика навантаження, обумовлена в'язким тертям, та її лінійна апроксимація. Жорсткість  $\beta_c$  ділянки ВС має від'ємне значення. З урахуванням даної характеристики момент статичного опору поданий як

$$M_c = M_{c0} + \beta_c \omega_2, \quad M_{c0} = \text{const.} \quad (1)$$

З метою отримання більш загальних закономірностей при аналізі стійкості системи з нетрадиційними настроюваннями СПР у роботі використані узагальнені параметри:

$$T_{m1}^* = \frac{J_1}{\beta} \Omega_{12}; \quad v = T_{m1} T_{я} \Omega_{12}^2; \quad \gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1}; \quad b = \beta_c / |\beta|; \quad T_{\mu}^* = T_{\mu} \Omega_{12}, \quad \text{де} \quad T_{m1} = \frac{J_1 R_{я}}{(C\Phi)^2};$$

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{C_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}}; \quad T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}}; \quad \beta - \text{ жорсткість механічної характеристики ЕП.}$$

Проведено дослідження нетрадиційних настроювань РШ та РС [2] для зниження коливальності у двомасових ЕП. Дані настроювання в узагальнених параметрах показані в табл.1.

Таблиця 1

Нетрадиційні настроювання СПР за трьома методиками

Методика та тип РШ	настроювання РШ	настроювання РС
1-П	$\kappa_{рш}^* = T_{m1}^* \gamma^{1/4}$	$\kappa_{рс}^* = v / (2T_{m1}^* T_{\mu}^*); \tau_{рс}^* = v / T_{m1}^*$
2-П	$\kappa_{рш}^* = T_{m1}^* / \sqrt{2}$	$\kappa_{рс}^* = v \sqrt{2} / T_{m1}^*; \tau_{рс}^* = v / T_{m1}^*$
3-П	$\kappa_{рш}^* = T_{m1}^* \gamma / (2\sqrt{\gamma-1})$	$\kappa_{рс}^* = v / (2T_{m1}^* T_{\mu}^*); \tau_{рс}^* = v / T_{m1}^*$
1-ПІІ	$\kappa_{рш}^* = T_{m1}^* \gamma^{1/4}; \tau_{рш}^* = 2\gamma^{3/4}$	$\kappa_{рс}^* = v / (2T_{m1}^* T_{\mu}^*); \tau_{рс}^* = v / T_{m1}^*$
2-ПІІ	$\kappa_{рш}^* = T_{m1}^* / \sqrt{\gamma}; \tau_{рш}^* = 2\sqrt{\gamma}$	$\kappa_{рс}^* = 2v / (T_{m1}^* \sqrt{\gamma}); \tau_{рс}^* = v / T_{m1}^*$
3-ПІІ	$\kappa_{рш}^* = \frac{2T_{m1}^* (2\gamma-1)}{5\sqrt{\gamma-1}}; \tau_{рш}^* = \frac{2\sqrt{\gamma}}{\sqrt{\gamma-1}};$	$\kappa_{рс}^* = v / (2T_{m1}^* T_{\mu}^*); \tau_{рс}^* = v / T_{m1}^*$

Для наданих у табл.1 настроювань отримані області стійкості у площині двох узагальнених параметрів  $b$  та  $T_{m1}^*$  і проведено їх порівняння із областями стійкості СПР у випадку її традиційних настроювань за модульним (МО) та симетричним (СО) оптимумами. Розширення області стійкості оцінювалося за відносним зміщенням її межі по параметру ВВТ –  $b$  при



довільному значенні параметра  $T_{M1}^*$ . Рис.3, як приклад, ілюструє розширення області стійкості при використанні нетрадиційної методики 1-П у порівнянні з МО при  $\gamma=1,3$  для більшості різноманітних співвідношень параметрів  $T_{\mu}^*/v$ . Штриховка направлена у бік стійких динамічних процесів.

Запропоновані рекомендації по застосуванню різних настроювань для розширення області стійкості для різноманітних співвідношень узагальнених параметрів.

З метою отримання максимального розширення області стійкості по параметру ВВТ за рахунок варіювання коефіцієнтів регуляторів СПР у другому розділі запропонована методика вибору значень даних коефіцієнтів, яка полягає у побудові області стійкості, де вздовж однієї осі відкладено коефіцієнт підсилення регулятора, а по іншій – значення параметру ВВТ [3]. Наявність екстремуму у залежності на рис.4 між коефіцієнтом підсилення РШ та параметром ВВТ дозволяє вибирати цей коефіцієнт найкращим з точки зору забезпечення стійкості у системі. Це приводить до зниження пружних коливань та усунення автоколивань і, таким чином, покращує динаміку системи. Але проведені дослідження показують, що нетрадиційні настроювання не забезпечують бажаної якості перехідних процесів.

У **третьому розділі** для забезпечення заданої якості перехідного процесу за вихідною координатою – швидкістю другої маси у нестійкому двомасовому електромеханічному об'єкті (ДЕМО), виділеному пунктиром на рис.1, запропоновано використовувати метод поліноміальних рівнянь (МПР) [1, 4, 15].

ДЕМО – об'єкт управління синтезуємої СПР, яка містить двомасову механічну частину ЕП та оптимізований на МО контур регулювання струму (КРС).

Відповідно з рис.1, при зневаженні впливом ЕРС двигуна і представленні КРС у вигляді ланки першого порядку зі сталою часу  $2T_{\mu}$ , згідно МПР передавальна функція об'єкту  $U_{zz}(p)/U_{rsh}(p)$  подається як:

$$W_{об}(p) = \frac{K_0 P_{к+} \bar{P}_{n+} \bar{P}_{-} \bar{P}_{-}^{-}}{Q_{к+} \bar{Q}_{n+} \bar{Q}_{-} \bar{P}_{-}^{-}} = \frac{\frac{(СФ)K_{ш}}{K_i \beta_c} \left( \frac{J_1 + J_2}{J_1 \Omega_{12}^2} p^2 + \frac{\beta_c}{C_{12}} p + 1 \right)}{T_{\mu} p + 1 \left( \frac{J_1 + J_2}{\beta_c \Omega_{12}^2} p^3 + \frac{J_1 + J_2}{J_2 \Omega_{12}^2} p^2 + \frac{J_1 + J_2}{\beta_c} p + 1 \right)}, \quad (2)$$

де  $K_0 = (СФ)K_{ш} / (K_i \beta_c)$  - коефіцієнт передачі об'єкту;  $P_{к+}(p)$ ,  $Q_{к+}(p)$  – поліноми, які мають у якості своїх нулів та полюсів тільки ліві нулі та полюси об'єкту, які компенсуються за допомогою РШ;  $P_{n+}(p)$ ,  $Q_{n+}(p)$  – поліноми, які мають тільки ліві нулі та полюси об'єкту, у компенсуванні яких нема необхідності;  $P_{-}(p), Q_{-}(p)$  – поліноми, які мають праві та нейтральні нулі та полюси, за

виключенням розташованих у точці  $p=0$ , компенсація яких неприйнятна через порушення умови грубості;  $s=0, 1, 2$  – кількість полюсів об'єкту у точці  $p=0$ .

Виходячи з (2), маємо:

$$P_{K+}(p)=1; P_{n+}(p)=1; P_{-} \Phi_{-} = \frac{J_1 + J_2}{J_1 \Omega_{12}^2} p^2 + \frac{\beta_c}{C_{12}} p + 1; Q_{K+} \Phi_{-} = 2T_{\mu} p + 1;$$

$$Q_{n+}(p)=1; Q_{-} \Phi_{-} = \frac{J_1 + J_2}{\beta_c \Omega_{12}^2} p^3 + \frac{J_1 + J_2}{J_2 \Omega_{12}^2} p^2 + \frac{J_1 + J_2}{\beta_c} p + 1; s=0. \quad (3)$$

На підставі МПР передавальна функція РШ приймається в вигляді

$$W_{pc}(p) = \frac{Q_{K+}(p)M(p)}{K_0 P_{K+}(p)N(p)p^{r-s}}, \quad (4)$$

де  $r$  – бажаний порядок астатизму замкненої системи регулювання швидкості;  $M(p)$ ,  $N(p)$  – невідомі поліноми. Вони знаходяться у результаті рішення поліноміального рівняння синтезу

$$M(p)P_{-}(p)P_{n+}(p) + N(p)Q_{-}(p)Q_{n+}(p)p^r = G(p), \quad (5)$$

де  $G(p)$  – характеристичний поліном замкненої СПР швидкості, який задається згідно з вимогою забезпечення бажаного характеру перехідного процесу, зокрема, відповідаючий одному зі стандартних розподілів коренів виду

$$G(p) = p^5 + \alpha_4 \omega_{0i} p^4 + \alpha_3 \omega_{0i}^2 p^3 + \alpha_2 \omega_{0i}^3 p^2 + \alpha_1 \omega_{0i}^4 p + \alpha_0 \omega_{0i}^5,$$

у якому  $\omega_{0i}$  – величина середньгеометричного кореня;  $\alpha_0$ - $\alpha_4$  – коефіцієнти стандартного або іншого [14] розподілу.

Спочатку знаходяться степені поліномів, які позначаються в вигляді  $| \cdot |$  та входять в (5), на підставі передавальної функції об'єкту (2) та її складових (3), а також степені невідомих поліномів  $M(p)$ ,  $N(p)$  і  $G(p)$ , знання яких необхідно для створення статичної за керуванням системи регулювання швидкості, яка має  $r=0$ :

$$|M| = |Q_{-}| + |Q_{n+}| + r - 1 = 2; |N| = |Q_{-}| - |P_{K+}| - 1 = 3; |G| = |M| + |N| + 1 = 6. \quad (6)$$

МПР дозволяє спростувати структуру РШ за рахунок зменшення на одиницю степеня поліномів (6):  $|M| = 1$ ,  $|N| = 2$  і  $|G| = 5$ , що виключає вільний вибір еквівалентної малої сталої часу  $T_{0i} = 1/\omega_{0i}$  замкненої системи.

Знайдені значення коефіцієнтів  $m_i$  і  $n_j$  поліномів  $M(p)$  і  $N(p)$ :

$$n_2 = \frac{\beta_c \Omega_{12}^2}{J_1 + J_2 \omega_{0i}^5}, c^2; \quad (7) \quad n_1 = \frac{\beta_c \Omega_{12}^2}{(J_1 + J_2)} \left[ \frac{\alpha_4}{\omega_{0i}^4} - \frac{\beta_c}{J_2 \omega_{0i}^5} \right], c; \quad (8)$$

$$n_0 = \frac{\beta_c C_{12}}{J_2 C_{12} - \beta_c^2} \left[ \frac{\alpha_1}{\omega_{0i}} - \frac{\beta_c}{C_{12}} - \left(1 - \frac{J_1}{J_2}\right) n_1 - \frac{J_1 \Omega_{12}^2 \alpha_3}{J_1 + J_2 \omega_{0i}^3} - \frac{J_1 \Omega_{12}^2}{\beta_c} n_2 \right]; \quad (9)$$

$$m_1 = \frac{J_1 \Omega_{12}^2}{J_1 + J_2} \left( \frac{\alpha_3}{\omega_{0i}^3} - \frac{J_1 + J_2}{J_2 \Omega_{12}^2} n_1 - \frac{J_1 + J_2}{\beta_c} n_2 - \frac{J_1 + J_2}{\beta_c \Omega_{12}^2} n_0 \right), c; \quad (10) \quad m_0 = \alpha_0 - n_0. \quad (11)$$

Визначення середньогометричного кореня  $\omega_{0i}$  синтезованої статичної СПР, значення якого залежить від параметрів ДЕМО, відбувається після підстановки виразів (7)-(11) у рівняння (5).

Якщо отримане рівняння має одне чи декілька цілих позитивних рішень  $\omega_{0i}$ , тоді на підставі рівняння (4) передавальна функція РШ має вигляд [4, 9]:

$$W_{рш}(p) = \frac{K_{рш} T_{\mu} p + 1}{T_2^2 p^2 + T_3 p + 1} = \frac{9,89(0,008p + 1)(0,0842p + 1)}{(0,00125p^3 + 0,11p^2 + 1)}, \quad (12)$$

де  $K_{рш} = \frac{m_0 K_i \beta_c}{n_0 K_{ш}(СФ)}$  - коефіцієнт підсилення РШ та сталі часу:

$T_1 = m_1 / m_0$ ;  $T_2^2 = n_2 / n_0$ ;  $T_3 = n_1 / n_0$ , розраховані для таких параметрів ДЕМО:  $J_1=J_2=10$  кг·м<sup>2</sup>,  $C_{12}=5000$  Н·м,  $\Omega_{12}=31,62$  с<sup>-1</sup>,  $\beta_c=-100$  Н·м·с,  $СФ=2,68$  В·с.

У роботі запропонована також інша методика пошуку значення середньогометричного кореня, яка побудована на виділенні  $n_0$  при степенях  $p^3$  і  $p^2$  рівняння (5) та їх спільному рішенні відносно  $\omega_{0i}$ , яке знаходиться за умови  $n_{01}=n_{02}$ .

На рис.5 показані залежності коефіцієнтів  $m_i$  і  $n_j$  у поліноміальному рівнянні (5) від значення середньогометричного кореня  $\omega_0$ .

Рішення рівняння для визначення середньогометричного кореня з урахуванням настроювання СПР за Баттервортом для прийнятих параметрів ДЕМО дає наступні значення середньогометричних коренів:

$$\omega_{01}=24,98 \text{ с}^{-1}, \omega_{02}=32,88 \text{ с}^{-1}, \omega_{03}=-7,58 \text{ с}^{-1}, \omega_{04}=-36,36 \text{ с}^{-1}, \omega_{05}=-46,16 \text{ с}^{-1}.$$

Фізичний сенс мають тільки перший та другий корені. Згідно другої методики та рис.5 можна бачити, що  $n_{01}$  дорівнює  $n_{02}$  при  $\omega_{01}$  і  $\omega_{02}$ .

Розроблена статична СПР швидкості ДЕМО із ВВТ має похибки за керуючою та дією збурення [12]:

$$\Delta\omega_u = \frac{n_0}{m_0 + n_0} \cdot \frac{U_{зш}}{K_{ш}}; \quad \Delta\omega_{ст} = -\frac{n_0}{\beta_c (n_0 + n_0)} M_{c0}. \quad (13)$$

При відсутності ВВТ, тобто при навантаженнях ЕП типу  $M_c = M_{co} = \text{const}$ , СПР здобуває астатизм першого порядку за керуванням. Тоді статична похибка від дії збурення має значення:

$$\Delta\omega_{ст.0} = -\frac{n_0}{\beta_c m_0} M_{co}, \quad (14)$$

де присутність коефіцієнту  $\beta_c$  визначається його наявністю у розрахунковому значенні  $K_{рш}$  (12) незалежно від його фактичного значення.

Робота синтезованої СПР при  $\omega_{01}=25 \text{ c}^{-1}$  наведена на рис.6. У загальному випадку прийнято, що даний ЕП знаходиться під впливом нелінійного навантаження, показаного на рис.2, а також може працювати у режимі холостого ходу при  $M_c=0$  та з постійним навантаженням  $M_c=\text{const}$ . На рис.6 а показаний перехідний процес у системі без ЗІ,  $\Phi$  на вході СПР та обмеження на виході РШ. Моделювання проводилось із повним КРС. На рис.6 б наведений той же процес із  $\Phi$  на вході СПР. При цьому процес зміни вихідної координати  $\omega_2$  відповідає вибраному розподілу за Баттервортом. На рис.6 в,г бачимо, що система успішно працює на холостому ході та при постійному навантаженні. Рис.6 д і є характеризують зміну похибки за керуванням  $\epsilon$  та характер зміни осідання швидкості  $\Delta\omega_{ст0}$  при дії на електропривод збурення  $M_{c0}=M_n=1070 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , де  $t_{від}$  – час відновлення. У випадку нелінійного характеру навантаження  $M_c(\beta_c)$  рис.6 ж, з, і, яке містить ділянку із ВВТ при значенні  $\beta_c=-100 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ , перехідні процеси за швидкістю двигуна  $\omega_1$  та механізму  $\omega_2$  суттєво відрізняються один від іншого, що викликається характером нелінійності. Але з рис.6 ж, з, і виходить, що система зберігає стійкість при збільшенні ( $\gamma=3$ ) та зменшенні ( $\gamma=1,6$ ) коефіцієнту співвідношення мас по відношенню до початкового значення  $\gamma=2$ .

У третьому розділі за допомогою МПР виконаний також синтез РШ повного порядку для статичної СПР із зворотним зв'язком за швидкістю двигуна [6] та синтез РШ зниженого та повного порядків для статичної СПР із зворотним зв'язком за швидкістю механізму [13]. У другому випадку передавальна функція РШ зниженого порядку та сталі часу мають вигляд:

$$W_{рш}(p) = \frac{K_{рш} (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1}, \quad T_1 = \frac{m_1}{m_0}, \quad T_2^2 = \frac{m_2}{m_0}, \quad T_3^2 = \frac{n_2}{n_0}, \quad T_4 = \frac{n_1}{n_0}, \quad (15)$$

а передавальна функція РШ повного порядку визначена як:

$$W_{рш}(p) = \frac{K_{рш} (T_\mu p + 1) (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)}{T_3^3 p^3 + T_4^2 p^2 + T_5 p + 1}, \quad (16)$$

$$T_1^2 = \frac{m_2}{m_0}; \quad T_2 = \frac{m_1}{m_0}; \quad T_3^3 = \frac{n_3}{n_0}; \quad T_4^2 = \frac{n_2}{n_0}; \quad T_5 = \frac{n_1}{n_0}.$$

Статичні системи з даними РШ мають похибки за керуванням та за збуренням, які

визначаються залежностями (13), (14).

При синтезі усіх РШ використовувалися різноманітні стандартні розподіли коренів, у тому числі і запропоновані автором [14].

**У четвертому розділі** для підвищення порядку астатизма досліджуваної системи за допомогою МПР здійснений синтез астатичних РШ зниженого порядку як для випадку використання зворотного зв'язку за швидкістю двигуна  $\omega_1$ , так і за швидкістю механізму  $\omega_2$  [5, 7, 8, 11, 13].

Як і для статичної СПР на етапі синтезу астатичних РШ зроблено припущення про зневаження впливом ЕРС двигуна та можливість подання КРС ланкою першого порядку. При цьому коефіцієнти поліномів  $M(p)$  та  $N(p)$  в СПР зі зворотним зв'язком за швидкістю двигуна знаходяться як [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_2 = \frac{\alpha_6 \beta_c \Omega_{12}^2}{(J_1 + J_2) \omega_{0i}^6}, c^2; n_1 = \frac{\beta_c \Omega_{12}^2}{J_1 + J_2} \left( \frac{\alpha_5}{\omega_{0i}^5} - n_2 \frac{J_1 + J_2}{J_2 \Omega_{12}^2} \right), c; m_1 = \frac{\alpha_1}{\omega_{0i}} - m_0 \frac{\beta_c}{C_{12}} - n_0, c; \\ n_0 = \frac{\beta_c}{J_1 + J_2} \left( \frac{\alpha_2}{\omega_{0i}^2} - m_2 - m_1 \frac{\beta_c}{C_{12}} - m_0 \frac{J_1 + J_2}{J_1 \Omega_{12}^2} - n_1 \right); m_0 = \alpha_0; \\ m_{21} = \frac{J_1 \Omega_{12}^2}{J_1 + J_2} \left( \frac{\alpha_4}{\omega_{0i}^4} - n_2 \frac{J_1 + J_2}{\beta_c} - n_1 \frac{J_1 + J_2}{J_2 \Omega_{12}^2} - n_0 \frac{J_1 + J_2}{\beta_c \Omega_{12}^2} \right), c^2; \\ m_{22} = \frac{C_{12}}{\beta_c} \left( \frac{\alpha_4}{\omega_{0i}^4} - m_1 \frac{J_1 + J_2}{J_1 \Omega_{12}^2} - n_2 - n_1 \frac{J_1 + J_2}{\beta_c} - n_0 \frac{J_1 + J_2}{J_2 \Omega_{12}^2} \right), c^2; \end{array} \right. \quad (17)$$

Неоднозначність коефіцієнту  $m_2$  обумовлена тим, що він входить у два доданки поліноміального рівняння, в даному випадку при  $p^3$  та  $p^4$ . Причому, значення коефіцієнту  $m_{22}$  при виборі бажаного розподілу коренів  $G(p)$  обов'язково повинно рівнятися  $m_{21}$ . Виконання рівності  $m_{22}$  та  $m_{21}$  дозволяє визначити не тільки  $m_2$ , але і значення середньгеометричного кореня синтезованої СПР ДЕМО.

Можливі три варіанти рішення системи рівнянь (17): коли воно не має позитивного значення для  $\omega_{0i}$ , наприклад, при використанні розподілів за Баттервортом, некратному, ІТАЕ; забезпечує позитивне рішення при біноміальному розподілі, але з таким значенням  $\omega_{0i}$ , при якому коефіцієнт  $n_0$  має позитивне значення, що неприпустимо; а також, має два фіксованих позитивних середньгеометричних кореня  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$  при використанні розподілу з критичним затуханням чи запропонованого розподілу за Баттервортом із зміненим коефіцієнтом  $\alpha_3$ . Якщо в результаті синтезу за запропонованою методикою вибрано розподіл коренів, який задовольняє вимогам до електроприводу, знайдена величина середньгеометричного кореня системи  $\omega_{0i}$  та розраховані

коефіцієнти поліномів  $M(p)$  та  $N(p)$ , тоді передавальна функція астатичного РШ зниженого порядку має вигляд

$$W_{\text{рш.1}}(p) = \frac{T_{\mu}p + 1}{T_1p} \frac{T_2^2 p^2 + T_1p + 1}{T_3^2 p^2 + T_4p + 1}, \quad (18)$$

де  $T_1 = \frac{n_0 \cdot K_0}{m_0}$ ;  $T_2 = \frac{m_1}{m_0}$ ;  $T_3 = \frac{m_2}{m_0}$ ;  $T_4 = \frac{n_1}{n_0}$ ;  $T_5 = \frac{n_2}{n_0}$  - сталі інтегрування та часу.

Друга методика синтезу астатичного РШ заснована на використанні традиційного для СПР розрахунку пропорційно-інтегрального регулятора замість пропорційного [8]. Якщо з використанням МПР синтезований статичний РШ зниженого порядку, який має передавальну функцію (12), то однозначно визначається величина еквівалентної сталої часу системи  $T_{0i} = 1/\omega_{0i}$ . Тоді до складу РШ вводиться інтегральна частина, а його передавальна функція приймає вигляд

$$W_{\text{рш.2}}(p) = \frac{K_{\text{рш}}}{4T_0p} \frac{T_{\mu}p + 1}{T_1p + 1} \frac{T_0p + 1}{T_3^2 p^2 + T_4p + 1}. \quad (19)$$

Таким чином, синтезовані астатичні РШ зниженого порядку забезпечують у розглянутій системі з нестійким ДЕМО астатизм першого порядку. У випадку постійного навантаження електропривода, коли  $\beta_c=0$ , СПР із розробленим РШ стає двократноінтегруючою за керуючою дією [11].

У роботі з використанням запропонованих методик на прикладі вищезгадуваних параметрів ДЕМО із ВВТ здійснений синтез астатичної СПР швидкості. Для вибраного розподілу із критичним згасанням знайдені два значення середньгеометричного кореня  $\omega_{01}=18,75 \text{ с}^{-1}$  і  $\omega_{02}=24,64 \text{ с}^{-1}$ . За залежностями (17) при  $\omega_0=24,64 \text{ с}^{-1}$  розраховані значення коефіцієнтів поліномів  $M(p)$  та  $N(p)$ .

На рис.7 показані динамічні процеси досліджуваної системи з РШ, синтезованим за першою методикою. Перехідні характеристики системи за керуючою дією подані на рис.7а при  $U_{\text{зш}}=10 \text{ В}$  і  $\beta_c=-100 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ . На рис.7б показані тіж самі процеси, але при установці аперіодичного фільтру другого порядку на вході СПР. Відповідно на рис.7 в та г показані процеси у системі на холостому ході та з постійним навантаженням. Рис.7 д характеризує зміну похибки за керуючою дією  $\epsilon$ , а рис.7 е – похибку за дією збурення  $\Delta\omega_{\text{ст0}}$ . Рис. 7 ж, з, і - надані динамічні процеси у системі із

нелінійним навантаженням (1), при варіюванні  $\gamma$  від 1,6 до 3 при його початковому значенні  $\gamma=2$ . Отримані результати підтверджують не тільки бажану якість перехідних процесів, але й досягнутий у системі астатизм за керуючою дією при  $\beta_c=-100$  Н·м·с та за збуренням для випадка роботи ЕП із постійним навантаженням  $M_{c0}=\text{const}$ .

У четвертому розділі за допомогою МПР також синтезований астатичний РШ при використанні зворотного зв'язку за швидкістю механізму  $\omega_2$  [13]. Він має передавальну функцію

$$W_{\text{рш.1}}^{\omega_2}(p) = \frac{T_5^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}{T_1 p^2 + T_3 p^2 + T_4 p + 1}, \quad (20)$$

$$\text{де } T_i = \frac{n_0 K_{\text{ш}} C\Phi}{m_0 K_i \beta_c}; \quad T_1 = \frac{m_1}{m_0}, \quad T_2^2 = \frac{m_2}{m_0}, \quad T_5^3 = \frac{m_3}{m_0}, \quad T_3^2 = \frac{n_2}{n_0}, \quad T_4 = \frac{n_1}{n_0}.$$

Слід відмітити, що при наявності статичного РШ зниженого порядку синтез астатичного РШ здійснюється і за другою методикою. У цьому випадку його передавальна функція має вигляд:

$$W_{\text{рш.2}}^{\omega_1}(p) = \frac{K_{\text{рш}} (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) (T_0 p + 1)}{4T_0 p^2 (T_3^2 p^2 + T_4 p + 1)} = \frac{T_5^{*3} p^3 + T_2^{*2} p^2 + T_1^* p + 1}{T_1^* p^2 (T_3^2 p^2 + T_4 p + 1)}, \quad (21)$$

$$\text{де } T_1^* = 4T_0 / K_{\text{рш}}; \quad T_5^{*3} = 4T_2^2 \cdot T_0; \quad T_2^{*2} = T_2^2 + 4T_0 T_1; \quad T_1^* = T_1 + 4T_0.$$

Проведені дослідження СПР з усіма синтезованими астатичними регуляторами підтверджують досягнутий порядок астатизму та якість перехідних процесів у ЕП згідно з вибраним розподілом коренів.

У п'ятому розділі проведена розробка принципів схем синтезованих статичних та астатичних РШ [10]. Особливість запропонованих регуляторів полягає у тому, що вони не порушують традиційну структуру СПР і можуть бути використані при її замиканні як зворотним зв'язком за швидкістю двигуна, так і зв'язком за швидкістю механізму. Регулятори повинні виготовлятися у вигляді самостійного приладу та відповідати принципу уніфікації при створенні комплектних промислових тиристорних електроприводів, а також повинні виготовлятися за типом загальної з ними конструкції. В цьому випадку, за необхідністю, розроблені РШ можуть зайняти місце чарунки ЯФУ-0147 традиційного РШ-1АІ у будь-якій промисловій СПР без порушення її структури та зміни яких-небудь параметрів регулятора струму та ланцюга зворотного зв'язку за швидкістю.

## ВИСНОВКИ

У ході виконаних досліджень отримані наступні наукові і технічні результати.

1. Отримані області стійкості ДЕМС із ВВТ у площині двох узагальнених параметрів та показано, що застосування нетрадиційних настроювань регуляторів СПР дозволяє розширювати границі цих областей по параметру ВВТ у порівнянні з настроюваннями на МО й СО, у середньому, у 1,5 – 2 рази.

2. Установлено, що границі області стійкості мають чітко виражений екстремум, на базі цього розроблено інженерну методику розрахунку параметрів регуляторів СПР ДЕМС із ВВТ для одержання максимально можливого розширення області стійкості, і в узагальнених параметрах дана кількісна оцінка впливу коефіцієнтів підсилення регуляторів на границі цієї області.

3. Уперше при створенні СПР ДЕМО із впливом ВВТ запропоновано використовувати метод поліноміальних рівнянь для синтезу РШ та із використанням цього методу синтезовані в рамках СПР при замиканні системи зворотним зв'язком за швидкістю двигуна три типи РШ – статичний зниженого і повного порядку та астатичний зниженого порядку.

4. Синтезовані за допомогою МПР статичні РШ повного і зниженого порядку, а також астатичний РШ зниженого порядку при замиканні системи зворотним зв'язком за швидкістю механізму. Установлено, що дані ЕП мають підвищену коливальність при ступінчастому прикладенні навантаження в порівнянні з системою зі зворотним зв'язком за швидкістю двигуна.

5. Установлено, що при синтезі РШ зниженого і повного порядку, із традиційно настроюваним на модульний оптимум контуром струму, їх практична реалізація не допускає довільний вибір значення середньгеометричного кореня системи. У зв'язку з цим розроблена методика, що дозволяє в кожному конкретному випадку параметрів ЕП визначити можливий діапазон зміни середньгеометричного кореня системи по залежностях, що розраховуються у функції від нього, для невідомих коефіцієнтів поліномів чисельника й знаменника передавальних функцій регуляторів.

6. У ході моделювання показано, що розроблені СПР нестійким ДЕМО, РШ яких синтезовані методом поліноміальних рівнянь, працездатні з бажаною якістю перехідних процесів у лінійній системі із ВВТ, а також мають задовільну динаміку на холостому ході, при постійному моменті статичного опору і при моменті опору, який може зростати та зменшуватися зі збільшенням швидкості.

7. Установлено, що статичний та астатичний РШ зниженого порядку у СПР зі зворотним зв'язком за швидкістю двигуна забезпечують можливість зміни моменту інерції другої маси розглянутих ДЕМО приблизно у два рази в більший та менший бік від початкового значення без втрати стійкості у системі.

8. Установлено, що складність синтезу РШ за допомогою МПР зростає в міру віддалення коренів вправо від мнімої осі через зменшення моменту інерції другої маси і збільшення за



модулем параметра ВВТ. У цьому випадку запропоновано використовувати знайдені коефіцієнтними методами нові розподіли коренів нормованих характеристичних рівнянь.

9. Показано, що використання РШ повного порядку не приводить до поліпшення динамічних показників системи в порівнянні із регуляторами зниженого порядку, яким і варто віддати перевагу при розробці ЕП з нестійкою двомасовою електромеханічною частиною як більш простим у реалізації.

10. Розглянуті варіанти схемної реалізації на сучасній елементній базі статичних і астатичних РШ повного та зниженого порядків і перевірена адекватність їхньої роботи знайденим передавальним функціям, а також розроблений пакет прикладних програм для розрахунку і побудови області стійкості ЕП зі структурою СПР та нестійкою двомасовою механічною частиною.

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния. – Харьков: ХГПУ, 2000.- 93 с.

2. Марков В.С. Исследование устойчивости двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением при нетрадиционных настройках контуров регулирования // Вестник ХГПУ. “Проблемы автоматизированного электропривода”.- Харьков: ХГПУ.- 1998.- С. 107-108.

3. Марков В.С., Осичев А.В. Методика синтеза коэффициентов СПР для повышения устойчивости в ДЭМС с ВВТ // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ. -1999. -№ 43. - С.104-107.

4. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. Синтез в обобщенных параметрах статической СПР скорости двухмассового неустойчивого объекта // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ. –1999. - № 61. - С. 91-95.

5. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С., Астатическая СПР скорости неустойчивого ДЭМО при замыкании через наблюдатель с выделением невязки по скорости двигателя // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ. –1999.- № 61. - С. 96-100.

6. Акимов Л.В., Марков В.С., Сравнительный анализ статических СПР неустойчивым двухмассовым электромеханическим объектом с регуляторами скорости полного и пониженного порядков // Електромашинобудування та електрообладнання. -1999. - № 53. - С.8 – 14.

7. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. Динамика астатической по управлению и возмущению СПР неустойчивым ДЭМО с регуляторами скорости полного порядка и наблюдателями состояния // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ.- №66. – 1999.- С. 120- 124.

8. Акимов Л.В., Марков В.С. Методика синтеза астатической СПР скорости неустойчивого двухмассового электромеханического объекта // Інтегровані технології та енергозбереження. - 2000.- № 1.- С.41 – 52.

9. Марков В.С. Синтез регулятора скорости пониженного порядка в СПР неустойчивого ДЭМО при изменениях коэффициента соотношения масс // Інтегровані технології та енергозбереження. -2000. - № 2. - С. 76 – 83.

10. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. Разработка принципиальных схем регуляторов скорости для СПР тиристорных электроприводов с неустойчивым ДЭМО // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ. - 2000. -№77.- С.76 –78.

11. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. Двухкратноинтегрирующая система подчиненного регулирования неустойчивым двухмассовым электромеханическим объектом с астатическим регулятором и наблюдателем в обратной связи // Технічна електродинаміка. “Проблеми сучасної електротехніки”. - Київ. –2000. -Част.7. - С.17 –22.

12. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. Синтез наблюдателей состояния для статической СПР скорости двухмассового неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, электромеханического объекта // Електротехніка. - 2000. -№6. - С.37 – 44.

13. Акимов Л.В., Марков В.С. Синтез статической и астатической СПР неустойчивым ДЭМО с обратной связью по скорости механизма // Електрообладнання та електромашинобудування.- 2000.- №54. - С.8-15.

14. Акимов Л.В., Марков В.С. Об использовании нормированных характеристических уравнений в задачах синтеза СПР неустойчивого двухмассового электромеханического объекта // Праці Донецького державного технічного ун-та. Серія Електротехніка і енергетика.– 2000.- №17.- С.6- 12.

15. Марков В.С. Синтез системы подчиненного регулирования электропривода блуминга, работающего на фрикционную нагрузку с отрицательным вязким трением // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ. - № 113. - 2000. - С.124-125.

#### АНОТАЦІЇ

**Марков В.С. Поліпшення динамічних характеристик двомасових електромеханічних систем із від’ємним в’язким тертям при підпорядкованому регулюванні. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2001.

Дисертація присвячена поліпшенню динамічних характеристик двомасових електроприводів постійного струму із нестійкою під впливом від’ємного в’язкого тертя механічною частиною за допомогою системи підпорядкованого регулювання.

Досліджені нетрадиційні настроювання регуляторів швидкості та струму системи підпорядкованого регулювання та визначений їхній вплив на межі області стійкості розглянутої системи із широкою варіацією узагальнених параметрів, а також досліджений вплив коефіцієнтів регуляторів на її динамічні показники. Зроблений висновок про доцільність використання нетрадиційних настроювань у двомасових системах із від’ємним в’язким тертям.

Запропонована методика вибору параметрів регуляторів з метою максимально можливого розширення меж стійкості.

Уперше для синтезу систем підпорядкованого регулювання із нестійким об’єктом запропоновано використовувати метод поліноміальних рівнянь. За допомогою цього методу синтезовані статичні регулятори швидкості зниженого та повного порядку та астатичні регулятори зниженого порядку із зворотним зв’язком як за швидкістю двигуна, так і за швидкістю механізму. Використання цих регуляторів забезпечує характер перехідного процесу вихідної координати - швидкості механізму згідно із вибраним розподілом коренів.

Проведена розробка схемних реалізацій синтезованих статичних та астатичних регуляторів швидкості зниженого та повного порядку.

Ключові слова: двомасова електромеханічна система, від’ємне в’язке тертя, система підпорядкованого регулювання, метод поліноміальних рівнянь, регулятор швидкості, середньгеометричний корень.

**Марков В.С. Улучшение динамических характеристик двухмассовых электромеханических систем с отрицательным вязким трением при подчиненном регулировании. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2001.

Диссертация посвящена улучшению динамических характеристик двухмассовых электроприводов постоянного тока с неустойчивой в силу влияния отрицательного вязкого трения механической частью с помощью системы подчиненного регулирования.

Исследованы нетрадиционные настройки регуляторов скорости и тока системы подчиненного регулирования и определено их влияние на границы области устойчивости рассматриваемой системы при широкой вариации обобщенных параметров, а также исследовано влияние коэффициентов регуляторов на ее динамические показатели. Сделан вывод о целесообразности использования нетрадиционных настроек в двухмассовых системах с отрицательным вязким трением.

Предложена методика выбора параметров регуляторов, основанная на существовании экстремума в зависимости между коэффициентом усиления и параметром отрицательного вязкого трения, с целью максимально возможного расширения границы области устойчивости.

Впервые для синтеза регулятора скорости исходно неустойчивого объекта с отрицательным вязким трением предложено использовать метод полиномиальных уравнений. На основе этого метода синтезированы статический регулятор скорости пониженного и полного порядка, а также астатический регулятор скорости пониженного порядка с использованием как обратной связи по скорости электродвигателя, так и по скорости механизма. Данные регуляторы обеспечивают переходные процессы по выходной координате – скорости механизма в соответствии с выбранным стандартным распределением полюсов. в линейной системе, где учтен параметр отрицательного вязкого трения. При этом синтезированные системы работоспособны не только с нелинейной нагрузкой, но и на холостом ходу, при постоянном моменте сопротивления, а также при широком варьировании момента инерции второй массы. При синтезе регуляторов полиномиальным методом показана невозможность задания произвольного быстродействия системы, так как ее среднегеометрический корень зависит от параметров объекта. Получены аналитические выражения для статических ошибок. Проанализирована возможность синтеза регуляторов скорости для различных сочетаний параметров неустойчивого двухмассового объекта управления. Показано, что эта возможность определяется в основном двумя параметрами – коэффициентом соотношения масс и параметром отрицательного вязкого трения. В случае, если стандартные распределения корней при использовании метода полиномиальных уравнений не дают удовлетворительного решения, предложено использовать видоизмененные полиномы стандартных распределений. Сделан вывод о том, что СПР с обратной связью по скорости двигателя имеет большой запас устойчивости и, как следствие, меньшую колебательность при ступенчатых внешних воздействиях.

Предложена схемная реализация синтезированных регуляторов скорости, как статических полного и пониженного порядков, так и астатического. Проведено моделирование принципиальных схем регуляторов на ЭВМ и показано соответствие их работы регуляторам скорости в линейной системе.

Ключевые слова: двухмассовая электромеханическая система, отрицательное вязкое трение, система подчиненного регулирования, метод полиномиальных уравнений, регулятор скорости, среднегеометрический корень.

**Markov V.S. Improvement of dynamic behaviour of two-mass electro-mechanical system with negative viscous friction at subordinate control. – Manuscript.**

Thesis for a candidate's degree by speciality 05.09.03. – electromechanical complexes and systems. – National technical university “Kharkiv polytechnic institute”, Kharkiv, 2001.

The thesis is dedicated to improvement of dynamic behaviour of two-mass direct current electric drives with an unstable, under the influence of negative viscous friction, mechanical part by help of subordinate control system.

Non-conventional adjustments of speed and current controllers of subordinate control system and theirs influence to the boundaries of stability regions of the system at wide variation of generalized parameters were investigated, and also the influence of controllers coefficients to its dynamical performance indexes was examined. The conclusion about expediency of using non-conventional adjustments in two-mass system with negative viscous friction has been made.

A method of the parameters controllers choice with the aim of the maximal possible widening of the stability boundaries has been proposed.

At the first time for the synthesis of subordinate control system with an unstable object the polynomial equations method has been proposed. By help of the method the reduced and full order static speed controllers and reduced order astatic speed controllers with feedback by a motor speed and mechanism speed had been synthesised. Using of the controllers provides a transient process of the output coordinate – mechanism speed according to a standard form of roots distribution.

The principal schemes of the reduced and full order static and astatic speed controllers had been elaborated.

Key words: two-mass electromechanical system, negative viscous friction, subordinate control system, polynomial equation method, speed controllers, average geometrical root.

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Кутовий Ю.М.

Підп.до друку 17.05.2001 р. Формат видання 145x215.  
Формат паперу 60x90/16. Папір Сору Рарег. Друк – ризографія.  
Обсяг 0,9 авт.арк. Тираж 100 прим. Зам.№ 158.

---

Видавничий центр НТУ “ХПІ”. Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000р.  
ГРПОД НТУ “ХПІ”, 61002, Харків, вул.Фрунзе, 21

---