

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Щолоков Олександр Геннадійович

УДК 681.5 : 62-83

**СИНТЕЗ РЕЛЕЙНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО
СТРУМУ З ВІД'ЄМНИМ В'ЯЗКИМ ТЕРТЯМ
У НАВАНТАЖЕННІ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донбаському гірничо-металургійному інституті Міністерства освіти і науки України м. Алчевськ.

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент
Мотченко Олександр Іванович,
Донбаський гірничо-металургійний інститут,
професор, завідувач кафедри
“Автоматизовані електромеханічні системи”

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Акімов Леонід Володимирович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри “Автоматизовані
електромеханічні системи”

кандидат технічних наук
Лимонов Леонід Григорович,
АТЗТ “Важпроматоматика”,
головний спеціаліст

Провідна установа - **Національна гірнича академія України**,
кафедра електроприводу
Міністерства освіти і науки України, м.
Дніпропетровськ

Захист відбудеться “ 27 ” лютого 2003 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м.Харків, вул.Фрунзе, 21

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

Автореферат розісланий “ 18 ” січня 2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Осічев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

У різних галузях промисловості існують машини й механізми, які в нормальних або аномальних режимах працюють із фрикційним навантаженням (ФН). Цей тип навантаження передбачає наявність пари тертя, один із складників якої прослизає відносно іншого. Прикладом таких промислових механізмів, при дослідженні режимів роботи яких повинні враховуватися особливості ФН, є валки прокатних станів у режимі пробуксовки, колісно-рейковий транспорт під час буксування і юза, виконавчі органи різних металообробних верстатів та ін.

Відомо, що за певного співвідношення параметрів електроприводу (ЕП) наявність спадної ділянки механічної характеристики (МХ) пари тертя може привести до виникнення фрикційних автоколивань (АКФ) як в одномасових, так й у двомасових електромеханічних системах (ЕМС). Наслідком АКФ є аварійне руйнування кінематичних ланок механізмів, зниження продуктивності праці, погіршення якості продукції, що виробляється, та інші негативні явища.

Дана проблема, уперше сформульована на кафедрі “Автоматизовані електромеханічні системи” НТУ “Харківський політехнічний інститут” проф. Клепиковим В.Б. у 1984 році, оформилася в самостійний науковий напрямок, вирішенню різних задач у якому були присвячені численні дисертаційні роботи, захищені протягом останніх 15 років.

Існують різні способи усунення АКФ. До найбільш ефективних належать: застосування систем підпорядкованого регулювання (СПР) з нетрадиційними настроюваннями, використання модального і нейросіткового керування й ін. Кожен із відомих способів усунення АКФ має певні переваги й вади і має свою область практичного застосування, у межах якої він дуже ефективний. Але їх усіх об'єднує одна вада - чутливість ЕМС до суттєвих координатних і параметричних збурень.

У низці випадків АКФ і нестационарність параметрів об'єкта керування (ОК) можуть існувати одночасно, завдаючи тим ще більшу шкоду. Тому комплексна задача усунення АКФ і забезпечення малої чутливості системи керування до параметричних і координатних збурень при одержанні потрібних статичних і динамічних показників якості є дуже актуальною.

У дисертаційній роботі запропоновано вирішення цієї комплексної проблеми шляхом застосування релейних систем керування (РСК), які працюють у ковзному режимі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана згідно з науковим напрямом (07) "Перспективні інформаційні тех-

нології, пристрої комплексної автоматизації, системи зв'язку" за загальним планом комплексної проблеми "Наукові основи електроенергетики", затвердженим НАН України (протокол № 8 від 16.09.85р., розділ 1.9.2.5.2.4.12 "Розробка теорії синтезу та оптимізації мікропроцесорних систем автоматичного керування вентильними електроприводами постійного та змінного струму з поліпшеними динамічними та статичними характеристиками"). Запропоновані автором алгоритми й структури РСК, технічні рішення використовувалися під час виконання держбюджетної НДР № 105 "Наукові засади побудування релейних систем керування для нелінійних електромеханічних об'єктів" (№ 0101U003564, 2001-2002 р.).

Мета і задачі дослідження

Мета дисертації - розроблення релейних систем керування з ковзними режимами, які забезпечують усунення фрикційних автоколивань в одномасових і двомасових ЕП постійного струму з від'ємним в'язким тертям (ВВТ), а також квазіінваріантність до параметричних і координатних збурень.

Основні задачі досліджень:

1. Для одномасового ЕП постійного струму синтезувати РСК методами аналітичного конструювання регуляторів (АКР) та зворотної задачі динаміки (ЗЗД) в різних фазових просторах з метою доведення можливості їх застосування як засобу усунення АКФ.
2. Синтезувати аналогічні РСК для двомасового ЕП постійного струму, що працює з ФН.
3. Синтезувати РСК з урахуванням в алгоритмах керування ВВТ.
4. Розглянути можливість застосування нелінійного пропорційно-інтегрального зв'язку (НПІ-зв'язку) в РСК за наявності ВВТ у навантаженні.
5. Дослідити можливість використання спостерігачів стану під час роботи РСК двомасових ЕП постійного струму в умовах дії ФН.
6. Зробити аналіз роботи синтезованих РСК за допомогою цифрового моделювання на математичних моделях.
7. Виконати на фізичній моделі об'єкта експериментальну перевірку основних теоретичних висновків і результатів математичного моделювання з метою підтвердження їх адекватності.

Об'єктом дослідження є динамічні властивості релейних систем керування одномасових і двомасових ЕП із ВВТ у навантаженні.

Предметом дослідження є релейна система керування ЕП постійного струму, що працює з ВВТ у навантаженні за наявності параметричних і координатних збурень.

Методи дослідження. Під час розв'язування поставлених задач застосовувалися такі методи: аналітичне конструювання оптимальних систем, методи ЗЗД і Ляпунова-Барбашина - при синтезі релейних алгоритмів керування, методи теорії лінійного оцінювання з мінімаль-

ною похибкою - при синтезі спостерігача стану, а також матричне й операційне обчислення, методи математичного моделювання й чисельного розв'язування систем диференціальних рівнянь. Математичне моделювання виконувалося на ЕОМ у пакеті MATLAB / Simulink.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Уперше доведено можливість застосування РСК, що працюють у ковзному режимі, для одночасного усунення АКФ, одержання потрібних статичних і динамічних показників якості при забезпеченні малої чутливості ЕМС до параметричних і координатних збурень.

2. Показано, що використання РСК дозволяє з однаковим успіхом усунути АКФ як у одномасових, так й у двомасових ЕП постійного струму з ВВТ у навантаженні.

3. Установлено, що для усунення АКФ можливе застосування релейних алгоритмів керування, синтезованих у різних фазових просторах як методом АКР, так і методом ЗЗД.

4. Удосконалено нелінійну інтегральну складову в релейних алгоритмах керування, що дозволяє покращити динаміку роботи РСК за наявності ФН.

5. Доведено, що під час роботи РСК наявність ВВТ у навантаженні звужує область допустимої зміни параметрів ЕП у порівнянні з постійним статичним навантаженням.

6. Установлено, що врахування ВВТ за допомогою лінеаризованої залежності під час синтезу релейних алгоритмів керування методами АКР і ЗЗД на 5 - 10 % збільшує область допустимої зміни параметрів ЕП. Більш точне врахування ВВТ за допомогою полінома третього степеня дозволяє суттєвіше (у 1.5 - 2 рази) розширити межі граничної зміни параметрів ЕП. Це дає можливість зменшити запас щодо напруги перетворювача.

Практичне значення одержаних результатів

Синтезовані алгоритми й структури РСК, рекомендації щодо їхнього вибору, технічні рішення можуть бути використані під час проектування ЕП постійного струму, які працюють з ВВТ у навантаженні за наявності параметричних і координатних збурень.

Результати дисертаційної роботи передано для використання на ВАТ "Алчевський металургійний комбінат", а також упроваджено в навчальний процес Донбаського гірничо-металургійного інституту в курсовому та дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача

В розробку наукових результатів, що винесені на захист, зроблено:

- запропоновано використання РСК для одночасного усунення АКФ, одержання необхідних статичних і динамічних показників якості і забезпечення малої чутливості ЕМС до параметричних і координатних збурень;

- синтезовано всі РСК одномасових і двомасових ЕП постійного струму з ФН;

- синтезовано НПІ-зв'язок і спостерігач стану, отримано аналітичні вирази для всіх коефіцієнтів зворотних зв'язків релейних регуляторів швидкості;

- проведено математичне моделювання на ЕОМ і експериментальні дослідження на лабораторному стенді.

Апробація результатів дисертації

Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідались на міжнародних науково-технічних конференціях “Проблеми створення нових машин і технологій” (м. Кременчук, 2000 р.), “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика” (м. Алушта, 2001 - 2002 р.), міжнародній науково-методичній конференції “Комп’ютерне моделювання” (м. Дніпродзержинськ, 2000 р.), міжнародній конференції з керування “Автоматика-2001” (Одеса, 2001 р.), науково-технічної конференції “Автоматизація виробничих процесів” (м. Алчевськ, 2002 р.).

Публікації

Основні результати дисертації відображені та опубліковані в 13 наукових працях, з них 4 - у наукових журналах, 8 - у збірниках наукових праць, 1 - у тезах конференцій; 5 наукових праць опубліковано особисто.

Структура й обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків та 7 додатків. Повний обсяг дисертації складається з 243 сторінок, з них 62 ілюстрації на 57 сторінках, 28 ілюстрацій по тексту; 6 таблиць на 7 сторінках, 6 таблиць по тексту; 7 додатків на 21 сторінках, 159 найменувань використаних літературних джерел на 18 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В **першому розділі** зроблено аналіз літератури по проблемі АКФ і нестационарності параметрів у промислових ЕП. Розглянуто положення теорії динаміки ЕМС із ВВТ, сформульовані проф. Клепиковим В.Б., проаналізовано існуючі методи усунення АКФ. Описано теорію й методи синтезу РСК з ковзними режимами, розроблені проф. Зеленовим А.Б., проф. Мотченко О.І., проф. Садовим О.В. Визначено мета і задачі досліджень.

У **другому розділі** для усунення АКФ в одномасових ЕМС були синтезовані РСК методами АКР і ЗЗД в різних фазових просторах [2, 4, 5, 7]. Для зменшення статичної похибки синтезованих РСК запропоновано введення нелінійного пропорційно-інтегрального зв'язку в релейні алгоритми керування [2, 8].

Як ОК було взято традиційний одномасовий ЕП, що складався із двигуна постійного струму з незалежним збудженням і керованого перетворювача. Математичний опис цього ОК у векторній формі у відносних одиницях має наступний вигляд:

$$p\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}U, \quad (1)$$

де

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \end{bmatrix}; x_1 = \frac{\omega}{\omega_M}; x_2 = \frac{I}{I_M}; x_3 = \frac{E_{\Pi}}{E_{\Pi M}}; U = \frac{U_K}{U_M};$$

$$a_{12} = \frac{c\Phi I_M}{J_{\Sigma} \omega_M}; a_{21} = -\frac{c\Phi \omega_M}{R_{Я} T_{Я} I_M}; a_{22} = -\frac{1}{T_{Я}}; a_{23} = \frac{E_{\Pi M}}{R_{Я} T_{Я} I_M}; a_{33} = -\frac{1}{T_{\Pi}}; b_3 = \frac{k_{КП} U_M}{T_{\Pi} E_{\Pi M}}.$$

Було прийнято, що ОК знаходиться під впливом нелінійного статичного навантаження такого вигляду (рис. 1):

$$M_C = \begin{cases} \alpha \omega, & 0 \leq \omega \leq \omega_{\Pi 1}; \\ M_{C0} + \beta_C \omega, & \omega_{\Pi 1} \leq \omega \leq \omega_{\Pi 2}; \\ M_{C\text{MIN}}, & \omega \geq \omega_{\Pi 2}, \end{cases} \quad (2)$$

де α, β_C - жорсткості висхідної та падаючої ділянок (АВ, ВС) МХ пари тертя ($\beta_C < 0$); $\omega_{\Pi 1}, \omega_{\Pi 2}$ - значення швидкості двигуна, які відповідають початковій і кінцевій точкам падаючої ділянки.

На рис. 2 подано графіки перехідних процесів під час пуску прийнятого одномасового ОК з ФН. На вказаних графіках чітко видно АКФ, зумовлені наявністю падаючої ділянки МХ ФН.

Рис. 2. Графіки перехідних процесів під час пуску одномасового ОК з ВВТ

З метою усунення АКФ було виконано синтез РСК методом АКР у фазовому просторі регульованої координати та її похідних ($\omega, p\omega, p^2\omega$). При цьому специфічний характер ФН не враховувався, тобто було прийнято $M_C = 0$. У цьому випадку збурений рух ОК описується наступним матричним рівнянням:

$$p\eta = \mathbf{A}\eta + \mathbf{B}U, \quad (3)$$

де

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_1^* \\ x_2 - x_2^* \\ x_3 - x_3^* \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \end{bmatrix}; x_1 = \frac{\omega}{\omega_M}; x_2 = \frac{p\omega}{\omega_M}; x_3 = \frac{p^2\omega}{\omega_M};$$

$$a_{31} = -\frac{(c\Phi)^2}{J_{\Sigma} R_{Я} T_{Я} T_{\Pi}}; a_{32} = -\frac{(c\Phi)^2 T_{\Pi} + J_{\Sigma} R_{Я}}{J_{\Sigma} R_{Я} T_{Я} T_{\Pi}}; a_{33} = -\frac{T_{Я} + T_{\Pi}}{T_{Я} T_{\Pi}}; b_3 = \frac{c\Phi k_{КП} U_M}{J_{\Sigma} R_{Я} T_{Я} T_{\Pi} \omega_M};$$

$a_{12} = a_{23} = 1$; $\boldsymbol{\eta} = \mathbf{X} - \mathbf{X}^*$ - вектор похибок координат стану системи; \mathbf{X} - вектор вихідних координат стану системи; \mathbf{X}^* - вектор заданих траєкторій.

Суть методу АКР полягає в тому, щоб серед багатьох керувань, підпорядкованих обмеженню $|U| \leq 1$, знайти таке оптимальне керування, при якому б на траєкторіях руху системи заданий функціонал якості набивав би найменшого значення.

Згідно з методикою АКР одержано наступний алгоритм керування релейного регулятора швидкості (РШ):

$$U_{PШ} = - \text{sign} (\mathbf{L}\eta) = - \text{sign} (l_1 (x_1 - x_1^*) + l_2 (x_2 - x_2^*) + l_3 (x_3 - x_3^*)), \quad (4)$$

де \mathbf{L} - вектор коефіцієнтів зворотних зв'язків, які залежать від параметрів ОК й коефіцієнтів заданого функціонала якості ($w_{11} \dots w_{33}$):

$$l_1 = \frac{w_{11}}{a_{31}}; l_2 = \frac{w_{22}a_{33}a_{31}a_{23}^2 + w_{33}a_{23}a_{12}a_{31}^2 + w_{11}a_{12}a_{23}a_{33}^2}{a_{31}a_{23}^2(a_{12}a_{31} + a_{32}a_{33})}; l_3 = \frac{w_{33}a_{31}a_{32} - w_{22}a_{23}a_{31} - w_{11}a_{12}a_{33}}{a_{31}(a_{12}a_{31} + a_{32}a_{33})}.$$

На рис. 3 подано графіки перехідних процесів, одержані під час пуску синтезованої РСК з ФН. Видно, що застосування РСК дозволяє усунути АКФ в одномасовій ЕМС із ВВТ у навантаженні.

Рис. 3. Графіки перехідних процесів під час пуску з ФН РСК одномасового ЕП, синтезованої методом АКР у фазовому просторі $\omega, p\omega, p^2\omega$

Слід зазначити, що реальні РСК містять внутрішній контур струму, причому при нормального режимі роботи (без зриву ковзного режиму) релейні регулятори струму й швидкості працюють як одне реле. Синтез алгоритму керування релейного регулятора струму заснований на тих же принципах, що і приведенний синтез релейного регулятора швидкості.

Незважаючи на незаперечні переваги РСК, синтезованих у фазовому просторі регульованої координати та її похідних, вони також мають і певні вади, наприклад, порівняно низьку перешкодостійкість. Тому в роботі було зроблено синтез РСК у фазовому просторі початкових координат ОК (ω, I, E_{II}). У цьому випадку рівняння збуреного руху має вигляд (якщо $M_C = 0$):

$$p\eta = \mathbf{A}\eta + \mathbf{B}U, \quad (5)$$

де

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_1^* \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \end{bmatrix}; x_1 = \frac{\omega}{\omega_M}; x_2 = \frac{I}{I_M}; x_3 = \frac{E_{II}}{E_{IIIM}},$$

$a_{12} \dots a_{33}, b_3$ – див. (1).

Відомо, що РСК, синтезовані у фазовому просторі початкових координат, мають статичну похибку. Раніше для усунення статичної похибки в релейні алгоритми керування вводилась додаткова інтегральна складова (І-зв'язок). Однак, незважаючи на суттєві переваги застосування додаткового І-зв'язку, було виявлено його вади як під час роботи з постійним навантаженням (рис. 4 а)), так і з ФН (рис. 5 (від нуля до t_1)). Для покращення якості перехідних процесів було запропоновано доповнити існуючий І-зв'язок нелінійною пропорційною частиною (П-частиною). Одержаний НПП-зв'язок має наступний математичний опис:

$$\Theta_{III} = \begin{cases} \frac{k_I}{p} \eta_1 + \left(1 - \frac{\eta_1}{\eta_{III}}\right) k_{II} \eta_1, & \text{при } |\eta_1| < |\eta_{III}|, |\Theta_{III}| < |\Theta_{IM}|; \\ \frac{k_I}{p} \eta_1, & \text{при } |\eta_{III}| \leq |\eta_1| < |\eta_{1M\Sigma}^{ycm}|, |\Theta_{III}| < |\Theta_{IM}|; \\ \frac{k_I}{p} \eta_{1M\Sigma}^{ycm}, & \text{при } |\eta_1| \geq |\eta_{1M\Sigma}^{ycm}|, |\Theta_{III}| < |\Theta_{IM}|; \\ \pm \Theta_{IM}, & \text{при } |\Theta_{III}| \geq |\Theta_{IM}|, \end{cases} \quad (6)$$

де k_{II} - коефіцієнт підсилення П-частини; k_I - коефіцієнт підсилення І-частини; η_{III} - величина похибки регулювання, котра визначає момент підключення П-частини НПП-зв'язку; Θ_{IM} - граничне значення вихідної величини НПП-зв'язку; $\eta_{1M\Sigma}^{ycm}$ - максимально можлива похибка регулювання в сталому режимі.

Алгоритм керування релейного РШ, синтезованого у фазовому просторі початкових координат з НПП-зв'язком, має вигляд:

$$U_{PШ} = - \text{sign} (\Theta_{III} + \mathbf{L}\boldsymbol{\eta}) = - \text{sign} (\Theta_{III} + l_1 (x_1 - x_1^*) + l_2 x_2 + l_3 x_3), \quad (7)$$

$$l_1 = \frac{a_{12}^2 a_{21} a_{23} a_{33} + a_{12} a_{22}^2 a_{23} a_{33} + a_{12} a_{22} a_{23} a_{33}^2}{a_{12} a_{21} a_{22} a_{33} (a_{12} a_{21} - a_{22} a_{33} - a_{33}^2)};$$

$$l_2 = \frac{a_{12} a_{23} (a_{22} + a_{33})}{a_{21} a_{22} (a_{22} a_{33} - a_{12} a_{21} + a_{33}^2)}; \quad l_3 = - \frac{a_{12} a_{23}^2}{a_{21} a_{22} a_{33} (a_{22} a_{33} - a_{12} a_{21} + a_{33}^2)}.$$

На рис. 4 б) подано графіки перехідних процесів, одержані під час пуску РСК з використанням НПП-зв'язку при постійному статичному навантаженні з різними коефіцієнтами підсилення І-частини. Як видно з поданих графіків, наявність НПП-зв'язку дозволяє значно покращити якість перехідних процесів. Ще більш наочно перевага НПП-зв'язку перед І-зв'язком показана на рис. 5, де в момент часу $t = t_1$ відбувається підключення нелінійної П-частини, що відразу веде до ліквідації автоколивань.

Таким чином, доведено доцільність використання запропонованого НПП-зв'язку під час синтезу РСК.

Рис. 5. Графіки перехідних процесів під час пуску РСК (АКР; ω, I, E_{II})
одномасового ЕП з ФН при підключенні П-частини в момент часу $t = t_1$

Окрім методу АКР існує й інший спосіб синтезу РСК – це метод ЗЗД. Суть методу ЗЗД полягає в наступному: необхідно знайти таке керування, яке б забезпечувало відпрацювання заданих траєкторій руху системи. Згідно з методикою ЗЗД було синтезовано алгоритми керування релейного РШ як у фазовому просторі регульованої координати та її похідних:

$$U_{PШ} = -\text{sign}(\mathbf{D}\boldsymbol{\sigma}) = -\text{sign}(d_0(z_1 - z_1^*) + d_1(z_2 - z_2^*) + (z_3 - z_3^*)), \quad (8)$$

$$\text{де } \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{Z} - \mathbf{Z}^* = \begin{bmatrix} z_1 - z_1^* \\ z_2 - z_2^* \\ z_3 - z_3^* \end{bmatrix}; \quad z_1 = \frac{\omega}{\omega_M}; \quad z_2 = \frac{p\omega}{\omega_M}; \quad z_3 = \frac{p^2\omega}{\omega_M};$$

так й у фазовому просторі початкових координат:

$$U_{PШ} = -\text{sign}(\Theta_{III} + \mathbf{L}\boldsymbol{\eta}) = -\text{sign}(\Theta_{III} + l_1(x_1 - x_1^*) + l_2 x_2 + l_3 x_3), \quad (9)$$

$$l_1 = d_0 - d_1(a_{12}a_{21}a_{33} + a_{22} + a_{33}) + (a_{12}a_{21}a_{33}^3 + a_{22}a_{33} + a_{33}^2 + 1);$$

$$l_2 = d_1 a_{12} - a_{12}a_{33}(a_{12}a_{21} + 1); \quad l_3 = a_{12}a_{23},$$

де $\mathbf{L} = \mathbf{D}\mathbf{K}^{-1}$; $\mathbf{D} = [d_0 \quad d_1 \quad 1]^T$ – вектор бажаних коефіцієнтів характеристичного полінома замкненого контуру; \mathbf{K} – модифікована матриця канонічного перетворення; $\boldsymbol{\eta}$ – див. (5).

При математичному моделюванні пуску синтезованих РСК з ФН було отримано графіки перехідних процесів такого ж виду, як і на рис. 3, 5. Таким чином доведено, що застосування РСК, синтезованих методами АКР та ЗЗД в різних фазових просторах, дозволяє усунути АКФ в одномасових ЕП постійного струму, забезпечуючи при цьому потрібні статичні і динамічні показники якості.

У **третьому розділі** синтезовано РСК методами АКР і ЗЗД з урахуванням в алгоритмах керування ВВТ, що дозволяє розширити область допустимої зміни параметрів ЕП [5, 7, 9, 13]. Також подано рекомендації щодо вибору РСК залежно від умов роботи й вимог, які пред'являють до ЕП з ФН.

Відомо, що в реальних РСК частота ковзного режиму є кінцевою величиною. Тому за надмірних координатних і параметричних збурень можливий зрив ковзного режиму. Наявність ВВТ у навантаженні є дестабілізуючим чинником, що стосовно до РСК може бути причиною зменшення зони існування ковзного режиму у порівнянні з постійним статичним навантаженням. Це наочно показано на рис. 6 а), де подано графіки перехідних процесів,

одержані під час пуску РСК при зменшенні величини T_m у 15 разів, відповідно, при постійному й фрикційному навантаженні.

Рис. 6. Графіки перехідних процесів під час пуску РСК (АКР; ω, I, E_{II}) з різними типами навантаження при зменшенні величини T_m у 15 разів:

а) без урахування ВВТ; б) з урахуванням ВВТ через лінеаризовану залежність

Бачимо, що при наявності ФН відбувається порушення ковзного режиму. Таким чином наявність ВВТ у навантаженні є причиною звуження області допустимого змінювання параметрів ЕП.

Для розширення цієї області був запропонований синтез РСК у фазовому просторі початкових координат з урахуванням ВВТ в алгоритмах керування за допомогою лінеаризованої залежності

$$M_c = M_{c0} + \beta_c \omega. \quad (10)$$

У цьому випадку в рівнянні збуреного руху (5) зміниться матриця \mathbf{A} :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}; \quad a_{11} = -\frac{\beta_c}{J_\Sigma}; \quad a_{12} \dots a_{33} - \text{див. (5)}, \quad (11)$$

і, відповідно, зміняться коефіцієнти зворотних зв'язків у виразах (7), (9).

Як показали результати математичного моделювання (рис. 6 б)), подібне врахування ФН за допомогою лінеаризованої залежності (10) під час синтезу релейних алгоритмів керування дозволяє розширити межі допустимого змінювання параметрів ЕП на 5 – 10 %. При цьому синтезовані РСК можуть з однаковим успіхом працювати з постійним й фрикційним навантаженням.

Слід відзначити, що під час використання лінеаризованої залежності (10) має місце лише часткове урахування ВВТ у навантаженні, тому що враховується тільки падаюча ділянка МХ ФН, а також M_{c0} береться як координатне збурення. Очевидно, що більш точне врахування ВВТ приведе до ще більшого розширення меж можливої зміни параметрів ЕП. Тому було запропоновано синтез РСК одномасового ЕП з урахуванням ФН за допомогою полінома третього степеня:

$$M_c = (m_3 p^3 + m_2 p^2 + m_1 p + m_0) \omega, \quad (12)$$

де $m_0 \dots m_3$ - коефіцієнти полінома третього степеня.

У цьому випадку рівняння збуреного руху має такий вигляд:

$$p\eta = \mathbf{A}\eta + \mathbf{B}U, \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_1^* \\ x_2 - x_2^* \\ x_3 - x_3^* \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_5 \end{bmatrix}; x_1 = \frac{\omega}{\omega_M}; x_2 = \frac{p\omega}{\omega_M};$$

$$x_3 = \frac{p^2\omega}{\omega_M}; x_4 = \frac{I}{I_M}; x_5 = \frac{E_{II}}{E_{IIM}}; a_{12} = a_{23} = 1; a_{31} = -\frac{m_0}{m_3}; a_{32} = -\frac{m_1 + J_{\Sigma}}{m_3}; a_{33} = -\frac{m_2}{m_3};$$

$$a_{34} = \frac{I_M c \Phi}{m_3 \omega_M}; a_{41} = -\frac{c \Phi \omega_M}{R_{\text{Я}} T_{\text{Я}} I_M}; a_{44} = -\frac{1}{T_{\text{Я}}}; a_{45} = \frac{E_{IIM}}{R_{\text{Я}} T_{\text{Я}} I_M}; a_{55} = -\frac{1}{T_{II}}; b_5 = \frac{k_{\text{КП}} U_M}{T_{II} E_{IIM}}.$$

Згідно з методикою ЗЗД було синтезовано алгоритм керування релейного РШ в розширеному фазовому просторі $(\omega, p\omega, p^2\omega, I, E_{II})$:

$$U_{\text{РШ}} = -\text{sign}(\Theta_{\text{II}} + \mathbf{L}\boldsymbol{\eta}) = -\text{sign}(\Theta_{\text{II}} + \tilde{l}_1(x_1 - x_1^*) + \tilde{l}_2(x_2 - x_2^*) + \tilde{l}_3(x_3 - x_3^*) + \tilde{l}_4 x_4 + \tilde{l}_5 x_5). \quad (14)$$

Результати математичного моделювання показали, що більш точне врахування ФН за допомогою полінома третього степеня (12) дозволяє ще більше розширити (у 1.5 - 2 рази) межі допустимої зміни параметрів ЕП.

У **четвертому розділі** для усунення АКФ у двомасових ЕМС було синтезовано РСК методами АКР і ЗЗД в різних фазових просторах [1, 3, 6]. Для оцінювання зворотного зв'язку за пружним моментом був синтезований спостерігач стану [3].

Як ОК було взято традиційний двомасовий ЕП, що складався із двигуна постійного струму незалежного збудження й керованого перетворювача. Математичний опис цього ОК у векторній формі у відносних одиницях має наступний вигляд:

$$p\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}U, \quad (15)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_5 \end{bmatrix}; a_{12} = \frac{M_{12M}}{J_2 \omega_M}; a_{21} = -\frac{c_{12} \omega_M}{M_{12M}};$$

$$a_{23} = \frac{c_{12} \omega_M}{M_{12M}}; a_{32} = -\frac{M_{12M}}{J_1 \omega_M}; a_{34} = \frac{I_M c \Phi}{J_1 \omega_M}; a_{43} = -\frac{\omega_M c \Phi}{R_{Я} T_{Я} I_M}; a_{44} = -\frac{1}{T_{Я}}; a_{45} = \frac{E_{ПМ}}{R_{Я} T_{Я} I_M};$$

$$a_{55} = -\frac{1}{T_{П}}; b_5 = \frac{k_{КП} U_M}{T_{П} E_{ПМ}}; x_1 = \frac{\omega_2}{\omega_M}; x_2 = \frac{M_{12}}{M_{12M}}; x_3 = \frac{\omega_1}{\omega_M}; x_4 = \frac{I}{I_M}; x_5 = \frac{E_{П}}{E_{ПМ}}.$$

Було прийнято, що ОК знаходиться під впливом ФН вигляду (2).

На рис. 7 подано графіки перехідних процесів, одержані під час пуску прийнятого двомасового ОК з ФН. На поданих графіках видно АКФ, зумовлені наявністю падаючої ділянки МХ пари тертя.

Рис. 7. Графіки перехідних процесів під час пуску двомасової ЕМС з ВВТ

Для усунення АКФ у двомасовій ЕМС було виконано синтез РСК методами АКР і ЗЗД. Одержано релейні алгоритми керування як у фазовому просторі початкових координат ОК $(\omega_2, M_{12}, \omega_1, I, E_{П})$, так й у фазовому просторі регульованої координати та її похідних $(\omega, p\omega, p^2\omega, p^3\omega, p^4\omega)$:

$$U_{РШ} = -\text{sign}(\Theta_{П} + \tilde{l}_1(x_1 - x_1^*) + \tilde{l}_2 x_2 + \tilde{l}_3(x_3 - x_3^*) + \tilde{l}_4 x_4 + \tilde{l}_5 x_5), \quad (16)$$

$$U_{РШ} = -\text{sign}(\bar{l}_1(z_1 - z_1^*) + \bar{l}_2 z_2 + \bar{l}_3 z_3 + \bar{l}_4 z_4 + \bar{l}_5 z_5), \quad (17)$$

$$\text{де } z_1 = \frac{\omega_2}{\omega_M}; z_2 = \frac{p\omega_2}{\omega_M}; z_3 = \frac{p^2\omega_2}{\omega_M}; z_4 = \frac{p^3\omega_2}{\omega_M}; z_5 = \frac{p^4\omega_2}{\omega_M}; x_1 \dots x_5 - \text{див. (15)}.$$

Для оцінювання зворотного зв'язку за пружним моментом було синтезовано спостерігач стану повного порядку. На рис. 8 подано графіки перехідних процесів, одержані під час пуску різних РСК двомасового ЕП з ФН. Як видно з поданих графіків, застосування РСК дозволяє усунути АКФ у двомасових ЕМС із ВВТ у навантаженні. Також було синтезовано РСК двомасового ЕП з урахуванням в алгоритмах керування ВВТ за допомогою вираза (10). Як показали результати математичного моделювання, урахування ВВТ під час синтезу релейних алгоритмів керування для двомасових ЕМС також дозволяє розширити межі допустимого змінювання параметрів ЕП.

Рис. 8. Графіки перехідних процесів під час пуску з ФН РСК двомасового ЕП:

а) ЗЗД; $\omega, p\omega, p^2\omega, p^3\omega, p^4\omega$; б) АКР; $\omega_2, M_{12}, \omega_1, I, E_{II}$

Таким чином, під час дослідження роботи РСК двомасових ЕП із ФН були підтвержені висновки, одержані раніше для РСК одномасових ЕП із ФН. Структурна схема однієї з РСК двомасового ЕП з ФН подана на рис. 9.

Окрім поданих результатів у дисертації була доведена можливість роботи синтезованих РСК в різних режимах: під час пуску під навантаженням і під час накиду навантаження; з плавно змінними і зі стрибкоподібними завданнями на швидкість; а також при істотній зміні параметрів ОК ($T_M, T_J, c_{12}, \beta_C$).

У **п'ятому розділі** для підтвердження адекватності раніше одержаних результатів математичного моделювання реальним фізичним процесам була створена лабораторна установка й проведено експериментальні дослідження [10-12].

Було поставлено два основні завдання експерименту:

- одержати АКФ під час роботи двоконтурної СПР одномасового ЕП постійного струму з традиційними налаштуваннями регуляторів;

- усунути одержані АКФ шляхом застосування РСК як при незмінних параметрах ОК, так і за наявності параметричного збурення.

Експериментальна установка складалася із двигуна постійного струму, перетворювача, РСК, СПР, блока обробки інформації, а також пари тертя типу колесо-рейка. Параметри експериментальної установки були вибрані таким чином, щоб за наявності ВВТ в системі могли виникнути АКФ.

Для одержання АКФ був проведений наступний експеримент: під час роботі СПР з ПІ-РШ по чергово з однаковим зусиллям здійснювався накид ФН при різних швидкостях прослизання $\omega_{ПР}$. Це дозволило робочій точці ЕП попасти на падаючу ділянку МХ пари тертя, що привело до виникнення АКФ. Результати експериментальних досліджень подані на рис. 10, де на графіках в) – е) видні АКФ (слід зазначити, що на графіках а), б), ж), з) коливання струму двигуна обумовлені наявністю ексцентриситету).

Рис. 10. Експериментальні графіки перехідних процесів струму двигуна, отримані в результаті накиду ФН за різних швидкостей прослизання

Наступний етап експерименту полягав у спробі усунути АКФ шляхом застосування РСК. З цією метою в момент існування АКФ (при $\omega_{ПР} = 62 \text{ с}^{-1}$) була спочатку підключена

РСК (при $t = t_1$), а потім збільшена величина T_J в 1.5 раза (при $t = t_2$). Однакові умови роботи ЕП в момент переключення з СПР на РСК забезпечувались за рахунок однакового завдання на швидкість двигуна й відсутності статичної похибки (ПІ-РШ у СПР та НПІ-зв'язок у РСК). Результати експерименту подано на рис. 11. На поданому графіку струму двигуна спостерігається суттєве зменшення амплітуди коливань у момент підключення РСК, причому як при незмінних параметрах ЕП, так і при збільшенні величини T_J . Це підтверджує результати, одержані раніше при математичному моделюванні, що свідчить про їхню адекватність реальним фізичним процесам. Зауважимо, що коливання струму під час роботи РСК з ФН зумовлені як ексцентриситетом колеса, так й переключеннями релейного елемента, що працює в ковзному режимі. Також слід відзначити, що під час експериментальних досліджень було підтверджено не тільки наявність АКФ, але й інших видів коливань, наприклад, коливань, викликаних наявністю ексцентриситету. При цьому експериментальні результати майже співпали з результатами математичного моделювання [11].

ВИСНОВКИ

1. Доведено можливість застосування релейних систем керування, що працюють у ковзному режимі, для одночасного усунення фрикційних автоколивань і одержання потрібних статичних і динамічних показників якості. При цьому забезпечується низька чутливість електромеханічних систем до параметричних і координатних збурень.

2. Показано, що використання релейних систем керування дозволяє з однаковим успіхом усунути фрикційні автоколивання як в одномасових, так й в двомасових електроприводах постійного струму з від'ємним в'язким тертям у навантаженні.

3. Установлено, що для усунення фрикційних автоколивань можливе застосування релейних алгоритмів керування, синтезованих у різних фазових просторах як методом аналітичного конструювання регуляторів, так і методом зворотної задачі динаміки.

4. Розроблено нелінійний пропорційно-інтегральний зв'язок і доведена доцільність його застосування в релейних системах керування, що синтезовані у фазовому просторі початкових координат і працюють за наявності від'ємного в'язкого тертя у навантаженні. Застосування цього зв'язку дозволяє забезпечити астатизм щодо завдання й збурення без втрати якості перехідних процесів.

5. Доведено, що під час роботи релейних систем керування наявність від'ємного в'язкого тертя у навантаженні звужує область допустимої зміни параметрів електроприводу у порівнянні з постійним статичним навантаженням.

6. Установлено, що врахування від'ємного в'язкого тертя за допомогою лінеаризованої залежності під час синтезу релейних алгоритмів керування методами аналітичного конструювання регуляторів і зворотної задачі динаміки на 5 – 10 % розширює область допустимої зміни параметрів електроприводу при одночасному усуненні фрикційних автоколивань. Більш точне врахування від'ємного в'язкого тертя за допомогою полінома третього степеня дозволяє більш суттєво (у 1.5 – 2 рази) розширити межі граничного змінювання параметрів електроприводу. Це дає можливість зменшити запас по напрузі перетворювача.

7. Одержано аналітичні вирази для коефіцієнтів зворотних зв'язків усіх синтезованих релейних регуляторів швидкості.

8. Доведено можливість застосування спостерігачів стану в релейних системах керування двомасових електроприводів в умовах дії фрикційного навантаження.

9. Подано рекомендації щодо вибору релейної системи керування залежно від умов роботи й вимог, які пред'являють до електроприводів із фрикційним навантаженням.

10. Створено експериментальну установку, за допомогою якої підтверджена адекватність основних теоретичних висновків і результатів математичного моделювання реальним фізичним процесам.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мотченко А.И., Щёлоков А.Г. Синтез двухмассовой системы электропривода с фрикционной нагрузкой методом аналитического конструирования регуляторов // Проблемы создания новых машин и технологий.- Кременчуг: КГПИ.- 2000.- Вып.8.- С.17-19.

Автором синтезовано РСК методом АКР у різних фазових просторах для двомасового ЕП з ФН, проведено математичне моделювання.

2. Щёлоков А.Г. Синтез астатической релейной системы управления одномассового электропривода с фрикционной нагрузкой // Проблемы создания новых машин и технологий.- Кременчуг: КГПИ.- 2000.- Вып.9.- С. 23-28.

3. Щёлоков А.Г. Особенности синтеза двухмассовой релейной системы электропривода с фрикционной нагрузкой методом аналитического конструирования регуляторов с использованием наблюдателя состояния // Математичне моделювання.- Дніпродзержинськ: ДДТУ.- 2000.- Вип.5.- С. 51-56.

4. Мотченко А.И., Щёлоков А.Г. Синтез релейной системы электропривода при наличии фрикционной нагрузки // Сборник научных трудов Донбасского горно-металлургического института.- Алчевск: ДГМИ, 2000.- Вып.12.- С. 106-110.

Автором синтезовано алгоритм керування релейного РШ одномасового ЕП з ВВТ у навантаженні, проведено математичне моделювання.

5. Мотченко А.И., Щёлоков А.Г. Выбор оптимальных параметров релейной системы управления электропривода при наличии фрикционной нагрузки // Вестник МАНЭБ.- Алчевск: ДГМИ.- 2001.- Вып.37- С. 68-70.

Автором розглянуто можливість врахування ФН під час синтезу РСК, синтезовано релейні алгоритми керування в різних фазових просторах, проведено математичне моделювання.

6. Мотченко А.И., Щёлоков А.Г. Синтез релейной системы управления двухмассового электропривода методом обратной задачи динамики при наличии фрикционной нагрузки // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.– Харків: НТУ “ХПІ”.– 2001.– Вип. 10.- С. 46-48.

Автором синтезовано РСК методом ЗЗД для двомасового ЕП з ВВТ у навантаженні, синтезовано спостерігач стану й НПІ-зв'язок, проведено математичне моделювання.

7. Мотченко А.И., Щёлоков А.Г. Синтез релейной системы управления одномассового электропривода методом обратной задачи динамики при наличии фрикционной нагрузки // Збірник наукових праць Донецького державного технічного університету. Сер. Електротехніка і енергетика.- Донецьк: ДонНТУ, 2001.- Вип. 28.- С. 36-39.

Автором синтезовано РСК одномасового ЕП з урахуванням ФН в алгоритмах керування, проведено математичне моделювання.

8. Щёлоков А.Г. Особенности синтеза релейных систем управления при наличии фрикционной нагрузки // Електромашинобудування та електрообладнання.– Одеса: Техніка.- 2001.– Вип. 57.- С. 26-30.

9. Щёлоков А.Г. Синтез релейной системы управления для одномассового электромеханического объекта с фрикционной нагрузкой // Труды Одесского государственного политехнического университета.- Одесса: ОГПУ.- 2001.- Вып. 15.- С. 78-82.

10. Мотченко А.И., Щёлоков А.Г., Полилов Е.В. Подавление фрикционных автоколебаний в электромеханических системах // Вестник МАНЭБ.- Алчевск: ДГМИ.- 2002.- Вып.51- С. 80-82.

Автором створено лабораторний стенд і проведено експериментальні дослідження.

11. Щёлоков А.Г., Мотченко А.И. Экспериментальные исследования релейного электропривода с фрикционной нагрузкой // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.– Харків: НТУ “ХПІ”.– 2002.– Вип. 12.- Т.2.- С. 398-403.

Автором створено лабораторний стенд, проведено математичне моделювання й експериментальні дослідження, отримано МХ експериментальної пари тертя.

12. Зеленов А.Б., Полилов Е.В., Щёлоков А.Г. Создание универсального лабораторного макета системы прямого цифрового управления электроприводом // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. – Вип. 12. – Т.2. – С. 472-475.

Автором розроблено універсальний лабораторний стенд, проведено експериментальні дослідження з одержання і усунення АКФ.

13. Щёлоков А.Г. Синтез релейной системы управления в расширенном фазовом пространстве для объекта с фрикционной нагрузкой // Праці Міжнар. конф. з управління “Автоматика – 2001”. – Том 1. – Одеса: ОДПУ. – 2001. – С. 58.

АНОТАЦІЇ

Щолоков О.Г. Синтез релейних систем керування електроприводів постійного струму з від’ємним в’язким тертям у навантаженні. – 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, 2002.

Дисертація присвячена розробці релейних систем керування з ковзними режимами, здатних забезпечити як усунення фрикційних автоколивань в одномасових і двомасових електроприводах постійного струму з від’ємним в’язким тертям у навантаженні, так і квазіінваріантність до параметричних і координатних збурень.

Уперше доведена можливість застосування релейних систем керування для одночасного усунення фрикційних автоколивань, одержання потрібних статичних і динамічних показників якості при забезпеченні квазіінваріантності до параметричних і координатних збурень. Одержано аналітичні вирази для коефіцієнтів зворотних зв’язків усіх синтезованих релейних систем керування. Подано рекомендації щодо вибору релейної системи керування залежно від умов роботи й вимог, які пред’являють до електроприводів із фрикційним навантаженням. Створено експериментальну установку, за допомогою якої перевірена адекватність основних теоретичних висновків і результатів математичного моделювання реальним фізичним процесам.

Ключові слова: електропривод постійного струму, релейна система керування, ковзний режим, фрикційні автоколивання, від’ємне в’язке тертя.

Щёлоков А.Г. Синтез релейных систем управления электроприводов постоянного тока с отрицательным вязким трением в нагрузке. – 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, 2002.

Диссертация посвящена разработке релейных систем управления со скользящими режимами, способных обеспечить как подавление фрикционных автоколебаний в одномассовых и двухмассовых электроприводах постоянного тока с отрицательным вязким трением в нагрузке, так и квазиинвариантность к параметрическим и координатным возмущениям.

Впервые доказана возможность применения релейных систем управления, работающих в скользящем режиме, для одновременного подавления фрикционных автоколебаний, получения требуемых статических и динамических показателей качества при обеспечении квазиинвариантности системы управления к параметрическим и координатным возмущениям. Установлено, что для подавления фрикционных автоколебаний возможно применение релейных алгоритмов управления, синтезированных в различных фазовых пространствах как методом аналитического конструирования регуляторов, так и методом обратной задачи динамики. Разработана нелинейная пропорционально-интегральная связь и доказана целесообразность ее применения в релейных системах управления, работающих с фрикционной нагрузкой, что позволяет получить астатизм по заданию и возмущению. Доказано, что при работе релейных систем управления наличие отрицательного вязкого трения в нагрузке сужает область допустимого изменения параметров электропривода по сравнению с постоянной статической нагрузкой. Установлено, что учет отрицательного вязкого трения с помощью линеаризованной зависимости или полинома третьей степени при синтезе релейных алгоритмов управления расширяет область допустимого изменения параметров электропривода. Показано, что использование релейных систем управления позволяет с одинаковым успехом подавить фрикционные автоколебания как в одномассовых, так и в двухмассовых электроприводах постоянного тока с отрицательным вязким трением в нагрузке. Получены аналитические выражения для коэффициентов обратных связей всех синтезированных релейных систем управления. Подтверждена возможность применения наблюдателей состояния при работе релейных систем управления двухмассовых электроприводов в условиях действия фрикционной нагрузки. Даны рекомендации по выбору релейной системы управления в зависимости от условий работы и требований, предъявляемых к электроприводу постоянного тока при наличии фрикционной нагрузки. Создана экспериментальная установка, с помощью которой проверена адекватность основных теоретических выводов и результатов математического моделирования реальным физическим процессам.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, релейная система управления, скользящий режим, фрикционные автоколебания, отрицательное вязкое трение.

Shchelokov A.G. Synthesis of relay control systems of electric drives of a constant current with negative viscous friction in load. - Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the Candidate of engineering science on a speciality 05.09.03 - electrotechnical complexes and systems. - National technical university “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, 2002.

The dissertation is devoted to development of relay control systems with zero-overshoot process for one-mass and two-mass electric drives of a constant current with negative viscous friction in load.

For the first time is proved, that the application of relay control systems with zero-overshoot process make it possible to liquidate friction auto-oscillation, to ensure required static and dynamic parameters of quality and to realize invariance of a control system to parametrical and coordinate disturbances. The analytical formulas for coefficients of feedback of all synthesized relay control systems are received. The results of mathematical modeling and experimental researches are submitted.

Key words: electric drives of a constant current, relay control system, zero-overshoot process, friction auto-oscillation, negative viscous friction.