

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**Полянська Ірина Сергіївна**

УДК 681.5:62-83

**СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ  
З КВАЗІНЕЙРОРЕГУЛЯТОРОМ  
ПРИ ФРИКЦІЙНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Автоматизовані електромеханічні системи” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, Міністерство освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Клепиков Володимир Борисович,**  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
завідувач кафедри автоматизованих  
електромеханічних систем

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор  
**Сінчук Олег Миколайович,**  
Кременчуцький державний політехнічний  
університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук,  
завідувач кафедри систем електроспоживання та  
енергетичного менеджменту

кандидат технічних наук, доцент  
**Худяєв Олександр Андрійович,**  
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків,  
доцент кафедри систем управління  
технологічними процесами і об’єктами

Захист відбудеться “ 18 ” жовтня 2007 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 ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “ 11 ” вересня 2007 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Осичев О.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Для широкого класу електроприводів (ЕП) машин і механізмів навантаження являє собою пару тертя із механічною характеристикою (МХ), що містить падаючу ділянку, на якій збільшення швидкості проковзування супроводжується зниженням коефіцієнта тертя. Це сприяє виникненню автоколивального режиму в електромеханічній системі (ЕМС), названого фрикційними автоколиваннями (АКФ), які викликають такі негативні ефекти, як погіршення якості технологічного процесу, зниження надійності машин і механізмів, збільшення динамічних навантажень на кінематичні ланки ЕП, та їх поломки. В машинах і механізмах залежно від характеру технологічного процесу розрізняють два режими проковзування: нормальний і аномальний. У випадку нормального проковзування необхідно підтримувати задану швидкість проковзування. При цьому робоча точка ЕМС може перебувати на падаючій ділянці характеристики тертя, створюючи умови для виникнення АКФ, тому основною задачею при нормальному проковзуванні є синтез регулятора, що усуває автоколивальні режими при знаходженні робочої точки на падаючій ділянці.

На сьогоднішній день проблема АКФ досить актуальна для ряду ЕП металургійної промисловості та інших механізмів. Відомо, що одним з найбільш загальних і ефективних засобів усунення АКФ є застосування різного роду коригувальних пристроїв. До них відноситься введення гнучких і жорстких зворотних зв'язків (ЗЗ) по тих або інших координатах ЕП, застосування систем підпорядкованого регулювання з нетрадиційним настроюванням, систем модального керування із спостерігачами стану. Кожний з вищевказаних способів має свою область застосування, у рамках якої він досить ефективний. В останнє десятиріччя все більш широке розповсюдження набувають нові інтелектуальні методи керування на базі нейронних мереж та фаззи – регуляторів, які мають широкі можливості апроксимації різноманітних нелінійностей. Нейромережеві регулятори забезпечують пригнічення АКФ та необхідні динамічні показники регулювання, однак їх істотним недоліком є іноді достатньо складна архітектура нейронної мережі, складність навчальних алгоритмів, а також тривалий час навчання нейронної мережі. Тому досить актуальним є створення цифрового регулятора, який забезпечує необхідні динамічні показники регулювання ЕМС, з нейронною архітектурою з аналітичним визначенням коефіцієнтів ваги, що виключає необхідність багатократної ітераційної процедури навчання нейронної мережі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем НТУ “ХП” згідно з планом науково-дослідницьких робіт МОН України за держбюджетними темами “Розробка й дослідження систем пригнічення фрикційних автоколивань і режимів буксування в електроприводах машин і механізмів” (№ДР 0100U001702), “Розвиток методів нейронних мереж, фаззи-логіки й генетичних

алгоритмів для керування електротехнічними системами” (№ДР 0103U001510), “Синтез нелінійних електромеханічних систем на основі методів гібридних нейронних мереж” (№ДР 0106U001487), в яких здобувач була виконавцем протягом 2001-2006 р.

**Мета й задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи – розробка та дослідження цифрового регулятора, що забезпечує необхідні показники якості регулювання у ЕМС із нелінійним фрикційним навантаженням, на основі спрощеної нейромережевої структури, вагові коефіцієнти якої розраховуються згідно із виведеними в даній роботі аналітичними співвідношеннями, а не внаслідок багатократної ітераційної процедури тренування нейронної мережі.

Основні задачі дослідження:

1. Для ЕМС, поданої в узагальнених безрозмірних параметрах, із пружним кінематичним зв'язком та фрикційним навантаженням отримати аналітичні співвідношення для визначення параметрів жорстких ЗЗ по повному вектору станів та різних варіантів сполучень жорстких та гнучких ЗЗ по неповному вектору стану, що забезпечують усунення автоколивального режиму та задані показники якості регулювання при знаходженні точки статичної рівноваги на падаючій ділянці нелінійної характеристики навантаження.

2. Синтезувати цифровий регулятор – квазінейрорегулятор на основі архітектури комп'ютерного нейрону із скороченою кількістю ЗЗ, у тому числі з використанням лише одного ЗЗ по вихідній координаті ЕМС, що забезпечує задані показники якості регулювання, вагові коефіцієнти якого визначалися б за допомогою виведених аналітичних співвідношень.

3. Перевірити достовірність запропонованої методики синтезу квазінейрорегулятора шляхом комп'ютерного моделювання синтезованих ЕМС.

4. Шляхом комп'ютерного моделювання дослідити вплив зміни параметрів ЕМС, інтервалу дискретизації, виду активаційної функції вихідного нейрона квазінейрорегулятора, моменту підключення квазінейрорегулятора на характер перехідних процесів в ЕМС із запропонованим квазінейрорегулятором.

5. На прикладі одномасової ЕМС провести співставлення запропонованого квазінейрорегулятора із цифровими регуляторами, синтезованими іншими методами на предмет складності архітектури та методики синтезу.

6. Виконати експериментальну перевірку достовірності запропонованої методики синтезу квазінейрорегулятора на лабораторному стенді.

*Об'єкт дослідження* – динамічні процеси та властивості одномасової та двомасової ЕМС із фрикційним навантаженням із запропонованим квазінейрорегулятором.

*Предмет дослідження* – одномасова та двомасова ЕМС із фрикційним навантаженням із запропонованим квазінейрорегулятором.

*Методи дослідження.* При вирішенні поставлених задач застосовувалися методи теорії

електроприводу, теорії автоматичного керування (при створенні математичних моделей ЕМС та визначенні показників регулювання), апарат зворотних кінцевих різниць (при переході від гнучких ЗЗ до цифрових регуляторів), векторно-матричний апарат лінійної алгебри (для синтезу ЕМС із ЗЗ по вихідній координаті та її похідних на основі подання об'єкта регулювання в канонічній формі фазової змінної), апарат дискретного  $Z$ -перетворення Лапласа (для отримання дискретної передавальної функції (ДПФ) об'єкту регулювання та бажаної ДПФ), методи математичного моделювання (для розрахунку перехідних процесів у програмному пакеті MATLAB). Деякі розрахунки по  $Z$ -перетворенню були проведені в пакеті СС.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Виведено аналітичні співвідношення в узагальнених безрозмірних параметрах для двомасової початково нестійкої ЕМС із від'ємним в'язким тертям (ВВТ) для визначення параметрів жорстких і гнучких ЗЗ по повному та неповному векторові стану, що забезпечують задані показники регулювання.

2. Науково обґрунтовано побудову цифрового регулятора – квазінейрорегулятора, який, використовуючи інформацію тільки по вихідній координаті електроприводу, забезпечує задані показники регулювання в ЕМС та відповідає архітектурі комп'ютерного нейрону, методика синтезу якого не потребує довгострокового навчання нейронної мережі, бо коефіцієнти ваги визначаються аналітично по виведених співвідношеннях.

3. Оцінено вплив зміни основних параметрів ЕМС з квазінейрорегулятором на розташування коренів характеристичного поліному системи. Показано, що збільшення активного опору якірного ланцюга в робочому діапазоні зміни температур при нагріванні не робить істотного впливу на динаміку ЕМС із квазінейрорегулятором, а зменшення моменту інерції другої маси (робочого органу) істотно позначається на стійкості системи.

4. Співставленням квазінейрорегулятора із цифровими регуляторами, синтезованими іншими методами, показано, що запропонований квазінейрорегулятор має найбільш просту структуру та забезпечує задані динамічні та статичні властивості при роботі ЕМС із нелінійним фрикційним навантаженням.

5. Виведено аналітичні залежності для визначення критичного значення періоду дискретизації, при якому система із квазінейрорегулятором втрачає стійкість.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено цифровий регулятор – квазінейрорегулятор, з простою архітектурою комп'ютерного нейрону із ЗЗ тільки по вихідній координаті електроприводу, що забезпечує задані показники регулювання в ЕМС і не потребує багатократної ітераційної процедури навчання нейронної мережі. На запропонований квазінейрорегулятор отримано патент України.

Запропоновано методику аналітичного розрахунку вагових коефіцієнтів квазінейрорегуля-

тора, яка дозволяє виключити ітераційну процедуру навчання нейронної мережі.

Запропонований алгоритм розрахунку коефіцієнтів ваги квазінейрорегулятора для ЕМС із 33 по вихідній координаті і її похідних на основі подання об'єкта регулювання в канонічній формі фазової змінної для лінійної в межах падаючої ділянки механічної характеристики навантаження повністю керованої ЕМС, поданої в просторі станів, або заданої в структурній формі, дозволяє автоматизувати та комп'ютеризувати процедуру синтезу квазінейрорегулятора. Для ЕМС четвертого порядку наведено відповідний текст програми на мові програмування пакету MATLAB.

Синтезовані структури нейромережових систем керування, рекомендації з їхнього вибору можуть бути використані при проектуванні та модернізації мікропроцесорних ЕП.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри АЕМС НТУ "ХП" при викладанні лекційного матеріалу, керівництві дипломним проектуванням та проведенні лабораторних робіт в рамках курсу "Електропривод з мікропроцесорним керуванням".

**Особистий внесок здобувача.** У розробку наукових результатів, винесених на захист, здобувачем особисто зроблено:

- виведено аналітичні співвідношення в узагальнених безрозмірних параметрах для двомасової початково нестійкої ЕМС із ВВТ для визначення параметрів жорстких і гнучких 33 по повному та неповному векторові стану, що забезпечують задані показники регулювання;
- виведено аналітичні співвідношення для розрахунку коефіцієнтів ваги запропонованих структур квазінейрорегуляторів;
- синтезовано ряд цифрових регуляторів і зроблено співставлення складності їхніх структур із запропонованим квазінейрорегулятором;
- виведено співвідношення для визначення критичного значення періоду дискретизації, при якому система втрачає стійкість;
- зроблено комп'ютерне моделювання одномасової та двомасової ЕМС із синтезованим квазінейрорегулятором і проведено фізичний експеримент на лабораторній установці для одномасової ЕМС із квазінейрорегулятором з метою перевірки правильності запропонованої методики синтезу та працездатності квазінейрорегулятора.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наступних конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" (м. Алушта, 2002 р.), XI-XIV Міжнародні науково-практичні конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м. Харків, 2003-2006 р.), Міжнародна науково-технічна конференція "Електромеханічні системи, методи моделювання й оптимізації" (м. Кременчук, 2003 р.), Міжнародна конференція "Проблеми сучасної електротехніки" (м. Київ, 2006 р.) та на щорічних семінарах НАН України "Динаміка нелінійних електромеханічних систем" (м. Харків, 2001-2006 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи відображено в 10 надрукованих працях, з них 9 – у фахових виданнях ВАК України та 1 деклараційний патент на корисну модель.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків та додатку. Повний обсяг дисертації становить 184 сторінки, з них 16 ілюстрацій на 14 сторінках, 44 ілюстрації по тексту; 1 таблиця на 1 сторінці, 3 таблиці по тексту; 1 додаток на 3 сторінках та 169 найменувань використаних літературних джерел на 17 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульована мета і задачі досліджень, приводиться наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

**В першому розділі** проведено загальний огляд робіт, присвячених причинам виникнення АКФ та вирішенню проблеми їх усунення шляхом застосування механічних і технологічних засобів, а також шляхом застосування систем автоматичного керування (САК). Проведено аналіз існуючих методів усунення режиму АКФ засобами ЕП: створення САК із модальним регулятором, із спостерігачем стану, систем підпорядкованого регулювання, САК з нейронними мережами та фаззі-регулятором. Розглянуто декілька різновидів архітектури штучних нейронних мереж (ШНМ), що застосовуються в САК, описано способи їх тренування, виконано огляд досліджень ЕМС з нейронними мережами типу перцептрон та гібридними нейронними мережами. Розділ завершується постановкою задач дослідження.

**У другому розділі** наведено структурну схему двомасової ЕМС (рис.1) з пружним кінематичним зв'язком з ВВТ, яке характерно для системи із фрикційним навантаженням, МХ якого наведена на рис.2. З метою мінімізації кількості параметрів, що однозначно визначають динамічні властивості системи, було використано структурну схему двомасової ЕМС з ВВТ, представлену в узагальнених безрозмірних параметрах  $\gamma$ ,  $T_{M1}^*$ ,  $\nu$ ,  $\mathbf{b}$  з безрозмірними нормованими координатами, ..

Рис. 1. Структурна схема двомасової ЕМС з ВВТ в узагальнених безрозмірних параметрах

Рис.2. МХ фрикційного навантаження

На рис.1  $\omega_0^* = \omega_{зад} / \omega_0$ ;  $p_* = p / \Omega_{12}$  - безрозмірний оператор диференціювання. При моделюванні перехідних процесів у схемі, зображеній на рис.1, всі координати ЕМС виходять у функції безрозмірного часу  $t^*$ , що пов'язаний з дійсним часом співвідношенням  $t^* = t \cdot \Omega_{12}$ .

$\gamma = \frac{J_2}{J_1 + J_2} \sqrt{\frac{J_1}{J_2}}$  - коефіцієнт співвідношення мас;  $J_1$  - момент інерції якоря двигуна та жорстко зв'язаних з ним мас, що рухаються;  $J_2$  - момент інерції другої маси (робочого органу);  $T_{m1}^* = T_{m1} \cdot \Omega_{12}$  - відносна електромеханічна постійна часу;  $\Omega_{12} = \sqrt{C_{\pi}(J_1 + J_2) / \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2}}$  - частота недемпфованих пружних коливань двомасової механічної системи;  $C_{\pi}$  - коефіцієнт жорсткості пружного елемента;  $T_{m1} = J_1 / \beta$  - електромеханічна постійна часу ЕД;  $\nu = \Omega_{12}^2 / \Omega_{em}^2$ ;  $\Omega_{em} = 1 / \sqrt{T_e \cdot T_{m1}}$  - частота електромеханічних коливань у системі;  $\omega_0$  - швидкість холостого ходу;  $M_{c0}$  - постійна складова моменту опору;  $\beta$  - модуль жорсткості МХ ЕП;  $\beta_c$  - жорсткість МХ навантаження;  $b = \beta_c / \beta$ .

З використанням кореневого методу синтезу синтезовано модальний регулятор для початково нестійкої двомасової ЕМС з ВВТ із забезпеченням необхідної якості регулювання відповідно до бажаного ХП

$$\dots, \quad (1)$$

нормованого по частоті пружних коливань  $\Omega_{12}$ .

Досліджено можливість використання скороченої кількості жорстких ЗЗ, зокрема був виключений ЗЗ з пружного моменту, як найбільш важко вимірюваний. Вирази для параметрів ЗЗ були визначені з системи рівнянь, отриманої з умови мінімуму суми квадратів відхилень коефіцієнтів ХП замкненої системи від коефіцієнтів бажаного поліному (1). Комп'ютерне моделювання довело, що показники регулювання суттєво відрізняються від бажаних, а у деяких випадках можливий навіть нестійкий процес.

Розглянуто наступні варіанти сполучень жорстких та гнучких ЗЗ, що забезпечують в ЕМС заданий розподіл коренів ХП та отримано аналітичні співвідношення для визначення коефіцієнтів ЗЗ:

1) система із ЗЗ по струму, швидкості двигуна і РО. Передавальні функції (ПФ) ланцюгів ЗЗ мають вигляд:

$$W_c = K_1; \quad W_{ш1} = K_2; \quad W_{\pi} = 0; \quad W_{ш2} = K_4 \cdot (T_4^* p^* + 1).$$

, , , ,

де

,

2) система із ЗЗ по швидкості двигуна і РО з ПФ ланцюгів ЗЗ

$$W_c = 0; \quad W_{\pi} = 0; \quad W_{ш1} = K_2(T_2^* p^* + 1); \quad W_{ш2} = K_4(T_4^* p^* + 1). \quad (2)$$

; ;



3) система із ЗЗ по швидкості РО з ПФ ланцюга ЗЗ

$$W_{ш2} p^* = K_4 p^3 + K_3 p^2 + K_2 p + K_1 p + K_0 \quad (3)$$

Перевага даного способу замикання ЗЗ полягає в тім, що при цьому САК потребує лише одного датчика швидкості.

Запропоновано алгоритм розрахунку коефіцієнтів ЗЗ по вихідній координаті і її похідних із ПФ  $W_{ш2} p^* = K_3 p^3 + K_2 p^2 + K_1 p + K_0$  шляхом перетворення об'єкта регулювання у канонічну форму фазової змінної (КФФЗ) (канонічну форму керованості) з матрицею системи  $A^*$  і матрицею вхідних впливів  $B^*$

яке здійснюється шляхом перетворення подоби, де  $P$  – неособлива матриця розміру  $n \times n$ ,  $n$  – порядок об'єкту,  $\dots$ . Компоненти вектора ЗЗ по вихідній координаті і її похідних

де  $\dots$  – компоненти вектора модального ЗЗ,  $a_i$  – коефіцієнти бажаного ХП (1),  $a_{ik}$  – компоненти останнього рядку матриці системи  $A^*$ ,  $P_1(1)$  і  $C(1)$  – перші елементи матриці-рядка  $P_1$  і матриці виходу  $C$ .

Для автоматизації визначення коефіцієнтів ЗЗ  $K_0, K_1, K_2, K_3$  двомасової ЕМС із ВВТ, що є динамічною системою четвертого порядку, запропоновано відповідний текст програми (сценарію), написаної внутрішньою мовою програмування MATLAB.

Перевагою запропонованої послідовності розрахунку коефіцієнтів ЗЗ по вихідній координаті і її похідних є можливість комп'ютерної автоматизації побудови регулятора, що забезпечує задані показники якості для лінійної (в межах падаючої ділянки механічної характеристики навантаження) повністю керованої ЕМС, при чому відсутня необхідність визначення ХП розімкненої системи та доповнень до ХП від замикання ЗЗ по будь-яких координатах. Для синтезу необхідний опис ЕМС в просторі станів (тобто завдання матриць  $A$  і  $B$ ) і дотримання умови повної керованості.

Оскільки застосування гнучких ЗЗ вимагає виконання операції диференціювання, реалізація більшої частини синтезованих у другому розділі регуляторів в аналоговому вигляді, тобто за допомогою операційних підсилювачів, ускладнена або взагалі неможлива.

У **третьому розділі** виконано побудову цифрових регуляторів із застосуванням широко відомого апарату зворотних кінцевих різниць. Реалізація ЗЗ для двомасової ЕМС здійснюється у вигляді схем, наведених на рис.3, які співпадають з відомою моделлю штучного нейрону з лінійною активаційною функцією та одиничним коефіцієнтом підсилення. У зв'язку з цим запропонований цифровий регулятор було названо “квазінейрорегулятор”.

Синтез квазінейрорегулятора полягає в аналітичному визначенні коефіцієнтів ваги за аналітично визначеними співвідношеннями, які є функціями розрахованих вище параметрів ЗЗ. Коефіцієнти ваги для квазінейрорегулятора зі ЗЗ по швидкості двигуна та РО (рис.3.а) із ПФ (2):

$$W_2 = -K_2 \left( \frac{T_2^*}{\Delta t^*} + 1 \right), \quad W_3 = K_2 \frac{T_2^*}{\Delta t^*}, \quad W_4 = -K_4 \left( \frac{T_4^*}{\Delta t^*} + 1 \right), \quad W_5 = K_4 \frac{T_4^*}{\Delta t^*}, \quad (4)$$

де  $\Delta t^* = \Delta t \cdot \Omega_{12}$  - безрозмірний шаг дискретизації.

Коефіцієнти ваги для квазінейрорегулятора зі ЗЗ по вихідній координаті ЕП (рис.3.б) із ПФ (3)

$$\left. \begin{aligned} W_2 &= -K_4 \left( \left( \frac{T_3^*}{\Delta t^*} \right)^3 + \left( \frac{T_2^*}{\Delta t^*} \right)^2 + \frac{T_1^*}{\Delta t^*} + 1 \right); & W_3 &= K_4 \left( 3 \left( \frac{T_3^*}{\Delta t^*} \right)^3 + 2 \left( \frac{T_2^*}{\Delta t^*} \right)^2 + \frac{T_1^*}{\Delta t^*} \right); \\ W_4 &= -K_4 \left( 3 \left( \frac{T_3^*}{\Delta t^*} \right)^3 + \left( \frac{T_2^*}{\Delta t^*} \right)^2 \right); & W_5 &= K_4 \left( \frac{T_3^*}{\Delta t^*} \right)^3. \end{aligned} \right\} (5)$$

Величина коефіцієнта  $W_1$  однакова для САК, представлених на рис.3.а,б:

В узагальненому вигляді для ЕМС n-го порядку з ПФ ЗЗ по вихідній координаті ЕП

$$W_{33} \cdot P_* \equiv \sum_{i=0}^{n-1} K_i \cdot p_*^i \quad \text{коефіцієнти ваги для квазінейрорегулятора} \quad (6)$$

де  $n$  - кількість сполучень з  $m$  елементів по  $k$ .

Рис.3. Система керування з архітектурою комп'ютерного нейрону із ЗЗ

- а) по швидкостях першої та другої маси;
- б) по швидкості другої маси

Розраховані по аналітичних співвідношеннях (4) – (6) значення вагових коефіцієнтів забезпечують в ЕМС необхідний динамічний режим по вільній складовій, що в існуючих нейромережних системах керування досягається шляхом тривалого навчання нейронної мережі (від десяти до ста сотень тисяч розрахунків математичної моделі динамічної системи) з використанням складних математизованих алгоритмів, таких, як генетичні алгоритми, алгоритм зворотного поширення помилки та ін. Відмітними ознаками запропонованого регулятора з архітектурою комп'ютерного нейрону від існуючих нейромережних регуляторів є виключення прихованого шару  $i$ , як слід, функціонального перетворення на ньому та відмежування від класичних методів навчання ШНМ на користь аналітичного розрахунку їхніх коефіцієнтів ваги та зсуву (коефіцієнти зсуву приймаються

рівними нулю).

Активаційна функція вихідного нейрону, відповідно до якої здійснюється функціональне перетворення сигналу керування, обирається лінійною з обмеженням, що накладається вимогами до динаміки ЕМС. Можливо також застосування нелінійних активаційних функцій, таких, як транс-сигмоїдальна, тангенціальна або гіперболічний тангенс. Перевагою вищевказаних нелінійних функцій у порівнянні з лінійною з обмеженням є їхня гладкість, тобто безперервність першої похідної, що приводить до відсутності стрибків у перехідному процесі першої похідної вихідної координати. Необхідною вимогою, пропонованою до виду активаційної функції, є одиничний коефіцієнт підсилення в околиці початку координат, тому що тільки в цьому випадку пропонований регулятор забезпечує необхідні показники якості регулювання.

Для нелінійної системи квазінейрорегулятор будується як сукупність схем, наведених на рис.3, синтезованих для окремих лінійних ділянок лінеаризованої нелінійної характеристики. При цьому структура квазінейрорегулятора набуває вигляд спрощеної нейронної мережі без прихованого шару (рис.4).

Рис.4. Схема квазінейрорегулятора

Принцип дії квазінейрорегулятора полягає в наступному. Сигнали про значення однієї або декількох обраних координат об'єкта регулювання надходять на блок сигналів керування, що містить кілька блоків затримки, кількість яких на одиницю менша, ніж порядок ХП ЕМС (рис.4). Блок сигналів керування здійснює розподіл теперішнього і попередніх (затриманих) значень координат об'єкта регулювання та подає їх, а також сигнал завдання  $U_1$  на відповідні вхідні нейрони ( $1 \dots m$ ). Сигнали вхідних нейронів надходять на блоки множення, коефіцієнти підсилення яких  $W_{ij}$  (коефіцієнти ваги) попередньо розраховано по аналітичних співвідношеннях, а потім передаються на вихідні нейрони ( $1 \dots n$ ), після чого перетворюються відповідно до активаційної функції, реалізованої блоком функціонального перетворення, формуючи у такий спосіб сигнал керування  $U_k$ . Квазінейрорегулятор містить логічний блок, з'єднаний з вихідними нейронами, кількість яких дорівнює кількості лінійних ділянок лінеаризованої нелінійної характеристики. Логічний блок підключає вхід перетворювача до того з вихідних нейронів, що відповідає синтезованим для даної ділянки значенням коефіцієнтів ваги. При цьому досягається забезпечення необхідної динаміки на кожній з ділянок нелінійної характеристики.

Досліджено вплив зміни узагальнених та фізичних параметрів на розташування коренів ХП замкненої системи із квазінейрорегулятором. Показано, що збільшення  $T_{m1}^*$  і  $\gamma$  не приводить до втрати стійкості, однак їхнє зменшення може порушити стійкість. Встановлено, що збільшення активного опору якірного ланцюга в робочому діапазоні зміни температур при нагріванні не робить

істотного впливу на динаміку ЕМС із квазінейрорегулятором, а зменшення моменту інерції другої маси, а також зменшення потоку збудження ЕД істотно позначаються на стійкості системи (на рис.5 стрілками показаний напрямок зростання змінюваного параметра).

Рис.5. Зміна розташування коренів характеристичного поліному замкненої системи на комплексній площині при зміні одного з фізичних параметрів:

а) при зміні  $R$ ; б) при зміні  $J_2$ ; в) при зміні  $\Phi$ .

Дослідження двомасової ЕМС з фрикційним навантаженням із комбінованим нейро-фаззі-регулятором, складову частину якого – квазінейрорегулятор – синтезовано відповідно до структури, наведеної на рис.3.а, показало що нейро-фаззі-регулятор вирішує як задачу усунення АКФ при знаходженні робочої точки на падаючій ділянці МХ тертя, так і задачу усунення надмірного проковзування, що необхідно у випадку, якщо режим проковзування за умовами технологічного процесу є аномальним.

У четвертому розділі виконано порівняльний аналіз квазінейрорегулятора із цифровими регуляторами, синтезованими різними методами, які забезпечують задані показники регулювання, на прикладі одномасової ЕМС з ВВТ, представленої в узагальнених безрозмірних параметрах  $m$  і  $b$  з безрозмірними нормованими координатами  $\omega^*$  та  $M^*$  (рис.6). На рис.6  $\omega^* = \omega/\omega_0$  - нормована швидкість;  $M^* = M/\omega_0\beta$  - нормований момент;  $m$  – відношення електромеханічної постійної часу електродвигуна (ЕД)  $T_m$  до електромагнітної  $T_e$ ;  $p_* = p \cdot T_e$ ;  $t^* = t/T_e$ .

Рис.6. Структурна схема одномасової ЕМС із ВВТ в узагальнених безрозмірних параметрах  $m$  і  $b$

Для структурної схеми ЕМС, наведеної на рис.6, шляхом заміни неперервних інтеграторів їх дискретним поданням за методами випереджальних та відстаючих прямокутників та методом трапецій, а також шляхом застосування дискретного Z-перетворювання Лапласа до безперервної ПФ об'єкта регулювання було отримано чотири дискретних передавальних функції (ДПФ) об'єкта регулювання, а також чотири бажаних ДПФ (відповідно до бажаного поліному)

які представлені у вигляді відношення поліномів чисельника та знаменника:

Для одномасової ЕМС було синтезовано квазінейрорегулятор, а також ще цілий ряд цифрових регуляторів (рис.7) для зіставлення їх із квазінейрорегулятором на предмет складності пос-

лідовності їхнього синтезу та складності структури, тобто складності програмної реалізації. В результаті отримано ряд структур, поданих в канонічній формі цифрових фільтрів (рис.8).

Рис.7. Структурні схеми замкнених систем автоматичного регулювання

- а) регулятор у прямому каналі;
- б) регулятор у каналі ЗЗ.

Показано, що методика синтезу регулятора шляхом застосування білінійного перетворення (рис.8.а) порівнянна по складності з методикою синтезу квазінейрорегулятора (рис.8.б), при чому обидва вони не потребують попередньої дискретизації об'єкта регулювання та бажаної ПФ, і хоча з погляду складності структури, обидва синтезованих цифрових регулятора є фільтрами першого порядку, структура білінійного регулятора визначається наявністю ЗЗ, тобто має більшу кількість елементів, вимагає більшого обсягу запам'ятовувального пристрою і у цілому є трохи більш складною, ніж структура квазінейрорегулятора.

Рис.8. Структурні схеми синтезованих цифрових регуляторів у канонічній формі цифрових фільтрів

- а) білінійний регулятор;
- б) квазінейрорегулятор;
- в) регулятор у прямому каналі;
- г) регулятор у каналі ЗЗ.

Синтезовані також два типи цифрових регуляторів – для встановлення в прямому каналі  $W_{р.пр.к.}$  та для встановлення в каналі зворотного зв'язку  $W_{р.зз}$  (рис.7.а,б) відповідно до виразу для ПФ замкненої системи:

,

.

Методика їхнього синтезу потребує попередньої дискретизації ПФ об'єкта регулювання і бажаної ПФ та наступний ряд операцій із поліномами чисельника і знаменника вищезгаданих ДПФ, що перевершує по складності методику синтезу квазінейрорегулятора та білінійного регулятора. У результаті синтезу отримано фільтри другого порядку із скінченною імпульсною характеристикою для регулятора в каналі ЗЗ та з нескінченною – для регулятора в прямому каналі (рис.8.в,г). Для двох запропонованих типів цифрових регуляторів – для встановлення в прямому каналі і для встановлення в каналі зворотного зв'язку – була застосована методика їхнього синтезу, що не потребує попередньої дискретизації ПФ об'єкта регулювання і бажаної ПФ, але яка припускає заміну опе-

раторів диференціювання в безперервних ПФ регуляторів відповідними виразами за методами випереджальних прямокутників і за методом трапецій. У результаті синтезу також отримано фільтри другого порядку із ЗЗ.

Виконано синтез цифрового регулятора відповідно до відомого способу синтезу ДКУ шляхом побудови ЛАЧХ безперервної частини системи і бажаної ПФ у функції псевдо частоти л. Отриманий регулятор має третій порядок, отже, є найбільш складним із всіх вищеописаних регуляторів.

Комп'ютерне моделювання перехідних процесів в ЕМС із нелінійним фрикційним навантаженням показало, що квазінейрорегулятор та білінійний регулятор забезпечують в ЕМС задані динамічні показники та порівняно невеликий статизм по збуренню, проте регулятори, наведені на рис.8.в,г, хоча і забезпечують у замкненій лінійній системі необхідний розподіл коренів ХП, в нелінійній системі викликають високі коливальність та час регулювання.

Зіставлення структур синтезованих регуляторів дозволяє зробити висновок про те, що, квазінейрорегулятор має значно більш просту структуру в порівнянні з іншими регуляторами (рис.8.а,в,г) з усіма перевагами, що впливають звідси, у відношенні надійності, швидкодії, а також витрат часу на програмування контролера.

Експериментально досліджений вплив періоду дискретизації на якість і стійкість перехідних процесів в одномасовій ЕМС з параметрами  $m=0.5$  і  $b=-0.2$  (що відповідає загасаючому коливальному процесу) із квазінейрорегулятором, налагодженим на фільтр Батерворта другого порядку із величиною середньо геометричного кореня  $\Omega_0^* = 10$ , та отримані номограми залежності показників якості (перерегулювання, часу першого узгодження, часу досягнення першого максимуму та часу регулювання) від величини періоду дискретизації  $T_0^*$ , виконано аналіз цих залежностей. Показано, що із збільшенням частоти дискретизації показники якості регулювання асимптотично наближаються до показників, що відповідають бажаному розподілу коренів, існує критичне значення періоду дискретизації  $T_0^{*кр} = 0.01633 \cdot T_{ем}^*$ , при якому система втрачає стійкість, на інтервалі  $T_0^* \in \left(0, T_0^{*кр}\right)$  існує значення періоду дискретизації, при якому перехідний процес відбувається без перерегулювання.

Отримано аналітичні залежності для визначення  $T_0^{*кр}$  в ЕМС із квазінейрорегулятором шляхом застосування алгебраїчного критерію стійкості Гурвіца для дискретних систем та розкладання трансцендентних функцій (коефіцієнтів чисельника та знаменника ДПФ, отриманої шляхом застосування дискретного Z-перетворювання Лапласа до безперервної ПФ об'єкта регулювання) у ряди Тейлора в околиці точки  $T_0^* = 0$ . Критичне значення  $T_0^{*кр}$  знаходиться як вирішення системи нерівностей, складеної з умови невід'ємності кутових мінорів визначника Гурвіца.

Рішенням першої нерівності системи є інтервал  $T_0^* \in (0; T_{0гр1}^*)$ , де

Друга нерівність системи

Рішенням третьої нерівності системи є вся позитивна піввісь  $T_0^*$ .

Для вищеописаної системи найбільш жорсткою умовою є рішення другої нерівності, тобто критичне значення періоду квантування  $T_0^{*кр} = T_{0гр2}^* = 0.016227 \cdot T_{ем}^*$ . Розраховане по отриманих співвідношеннях критичне значення періоду дискретизації незначно (на 0.63%) відрізняється від отриманого експериментально, що підтверджує адекватність запропонованої методики та правильність отриманих співвідношень.

У **п'ятому розділі** наведено результати експериментальних досліджень ЕП з мікропроцесорною системою керування із квазінейрорегулятором з метою підтвердження основних теоретичних положень дисертаційної роботи. Об'єктом регулювання був обраний широтно-імпульсний перетворювач з двигуном постійного струму ПБСТ-22 з величиною  $T_e = 0.014$  с. Розраховані параметри його математичної моделі:  $m=8.475$ ,  $b=0$ . В якості бажаного поліному був обраний поліном  $H_{баж} = p_*^2 + 1.0506p_* + 1.1209$ , нормований по  $T_e$ , динамічні властивості якого  $\sigma = 16.61\%$ ,  $t_{01} = 0.032$ ,  $t_{m1} = 0.048$ . Вагові коефіцієнти квазінейрорегулятора  $W_1=9.5$ ,  $W_2=-14.5$ ,  $W_3=6$ .

Результати осцилографування (рис.9.а) співпадають із графіками, отриманими шляхом комп'ютерного моделювання (рис.9.б). Сигнал керування  $U_k$  та швидкість двигуна щ наведені у відсотках, а струм  $I$  – в амперах. Співставлення показників регулювання при комп'ютерному моделюванні та осцилографуванні показує, що перерегулювання відрізняється на 7.3 %, а час першого узгодження на 3%.

Виконано комп'ютерне моделювання двомасової ЕМС із фрикційним навантаженням в пакеті MATLAB. Моделювання кусочно–лінійної МХ тертя здійснено за допомогою ланки “Look-Up Table”.

Показано, що квазінейрорегулятор усуває АКФ при розташуванні точки статичної рівноваги на падаючій ділянці МХ навантаження та забезпечує задані показники регулювання. Квазінейрорегулятор також усуває АКФ при його підключенні після встановлення у двомасовій ЕМС автоколивального режиму, при чому кидки струму і швидкості двигуна та час перехідного процесу залежать від моменту часу підключення квазінейрорегулятора. Встановлено, що найбільш сприятливий момент часу підключення квазінейрорегулятора відповідає малим значенням струму двигуна (моменту першої маси), тобто в цьому випадку мають місце менші кидки струму та швидкості

двигуна, а також зменшується час перехідного процесу в порівнянні з випадком підключення квазінейрорегулятора при великих значеннях струму двигуна.

Рис.9. Пуск двигуна з квазінейрорегулятором на знижену напругу  $U_{я}=4.74\% U_{н}$

Досліджено вплив виду активаційної функції вихідного нейрону на характер перехідних процесів в ЕМС, а саме розглянуто функції: лінійна з обмеженням на рівні  $\pm U_{обм}$ , тансигмоїдальна функція, або еквівалентна до неї – гіперболічний тангенс, арктангенс та крива Гомперца з параметрами  $a=b=0.5$ .

Запропоновано використання неперервної неспадаючої функції з одиничним коефіцієнтом підсилення в околиці початку координат (для забезпечення необхідних динамічних властивостей в ЕМС із квазінейрорегулятором). Показано, що вид активаційної функції не має принципового значення, і рівняння, що описує активаційну функцію, варто вибирати якомога більш простим, тому що ускладнення функціональної залежності приводить до необхідності збільшення обсягу запам'ятовувального пристрою мікроконтролера, що програмує роботу квазінейрорегулятора.

Проведено дослідження впливу періоду дискретизації квазінейрорегулятора на характер перехідних процесів у системі. Показано, що на всьому інтервалі частот дискретизації, що відповідають області стійкої роботи системи, істотної зміни швидкодії не відбувається; з ростом періоду дискретизації до деякого значення знижуються перерегулювання і час регулювання, а потім знову починають рости аж до втрати стійкості ЕМС.

У додатку приводяться матеріали, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано створення цифрового регулятора, що забезпечує задані показники регулювання ЕМС із фрикційним навантаженням, на базі архітектури комп'ютерного нейрону для лінійної ЕМС та спрощеної нейронної мережі для нелінійної ЕМС. Перевагою створеного регулятора над існуючими нейромережевими регуляторами є виключення багатократної ітераційної процедури тренування нейронної мережі на користь аналітичного розрахунку її вагових коефіцієнтів.

Основні результати і висновки роботи полягають у наступному:

1. Виведено аналітичні співвідношення для визначення параметрів ЗЗ ЕМС із сполученням жорстких і гнучких ЗЗ по повному та неповному векторові стану, що забезпечують задані показники регулювання початково нестійкої двомасової ЕМС із ВВТ. У числі синтезованих систем ке-



рування запропоновано систему із ЗЗ тільки по вихідній координаті електроприводу – швидкості робочого органу.

2. Розроблено цифровий регулятор – квазінейрорегулятор, що забезпечує задані показники регулювання в ЕМС та відповідає архітектури комп'ютерного нейрону для лінійної ЕМС та спрощеної нейронної мережі для нелінійної ЕМС. Методика синтезу не потребує довгострокового навчання нейронної мережі, бо коефіцієнти ваги визначаються аналітично по виведених співвідношеннях. Надано вказівки та рекомендації щодо вибору активаційної функції вихідного нейрону.

3. Оцінено вплив зміни основних параметрів ЕМС із квазінейрорегулятором на розташування коренів характеристичного поліному, який визначає динамічні показники регулювання. Встановлено, що збільшення активного опору якірного ланцюга в робочому діапазоні зміни температур при нагріванні не робить істотного впливу на динаміку замкнутої ЕМС із квазінейрорегулятором, а зменшення моменту інерції другої маси істотно позначається на стійкості системи.

4. Запропоновано алгоритм розрахунку коефіцієнтів ваги квазінейрорегулятора (для комп'ютерного синтезу квазінейрорегулятора у програмному пакеті MATLAB) для ЕМС із ЗЗ по вихідній координаті і її похідних на основі подання об'єкта регулювання в канонічній формі фазової змінної для лінійної (в межах падаючої ділянки механічної характеристики навантаження) повністю керованої ЕМС, поданої в просторі станів, або заданої в структурній формі.

5. На прикладі одномасової ЕМС виконано порівняльний аналіз цифрових регуляторів, синтезованих різними методами, які забезпечують заданий розподіл коренів в електромеханічній системі та показано, що методика синтезу квазінейрорегулятора дозволяє одержати цифровий фільтр із більш простою структурою та заданими динамічними та статичними показниками регулювання при роботі ЕМС із нелінійним фрикційним навантаженням.

6. Досліджений вплив періоду дискретизації на якість і стійкість перехідних процесів в одномасовій ЕМС із квазінейрорегулятором, отримані номограми залежності показників якості від величини періоду дискретизації та виконано аналіз цих залежностей. Отримано аналітичні залежності для визначення критичного значення періоду дискретизації, при якому система із квазінейрорегулятором втрачає стійкість.

7. Наведено результати експериментальних досліджень ЕП по системі „Широтно – імпульсний перетворювач – двигун постійного струму” з мікропроцесорною системою керування із квазінейрорегулятором, які підтверджують основні теоретичні положення дисертаційної роботи. Для двомасової ЕМС із квазінейрорегулятором шляхом комп'ютерного моделювання підтверджена правильність методики розрахунку коефіцієнтів квазінейрорегулятора. Результатом моделювання підтверджено усування автоколивального режиму та стійкість роботи на падаючій ділянці МХ навантаження.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри АЕМС

НТУ “ХПІ” при викладанні лекційного матеріалу, керівництві дипломним проектуванням, а також створено лабораторний стенд “Електропривод з мікропроцесорним регулюванням із квазінейрорегулятором”.

### ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Клепиков В.Б., Полянская И.С.* Синтез двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением при регулировании по полному и неполному вектору состояния // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.- Харків: НТУ“ХПІ”.- 2001.- вип.10.- С.36-40.

Здобувачем виведено співвідношення для визначення параметрів зворотних зв’язків та зроблено комп’ютерне моделювання.

2. *Клепиков В.Б., Клепиков А.В., Глебов О.Ю., Моисеенко П.Л., Полянская И.С.* Нейро-фаззи регулятор для електроприводов с проскальзыванием // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. - Харків: НТУ“ХПІ”.- 2002.- №9, т.4.- С.47-52.

Здобувачеві належить синтез квазінейрорегулятора – складової частини нейро-фаззи регулятора.

3. *Клепиков В.Б., Полянская И.С.* Аналитический синтез нейрорегулятора для электромеханической системы // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.- Харків: НТУ“ХПІ”.- 2002.- №12, т.1.- С.44-47.

Здобувачем запропоновано застосування переходу від операції диференціювання до зворотних кінцевих різниць при синтезі нейрорегулятора із зворотним зв’язком по швидкості двигуна та робочого органу, виведено співвідношення для розрахунку його вагових коефіцієнтів та зроблено комп’ютерне моделювання.

4. *Клепиков В.Б., Полянская И.С.* Квазинейрорегулирование двухмассовой электромеханической системой с отрицательным вязким трением // Електротехніка.- М., 2003.- № 3.- С.29-33.

Здобувачем запропоновано застосування переходу від операції диференціювання до зворотних кінцевих різниць при синтезі квазінейрорегулятора із зворотним зв’язком по швидкості другої маси та виведено співвідношення для розрахунку його вагових коефіцієнтів.

5. *Клепиков В.Б., Полянская И.С.* Квазинейрорегулятор для двухмассовой электромеханической системы с регулированием по току и скорости двигателя // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчук: КДПУ.- 2003.- вип.2(19), т.1.- С.25-29.

Здобувачем запропоновано застосування переходу від операції диференціювання до зворот-

них кінцевих різниць при синтезі квазінейрорегулятора із зворотними зв'язками по струму та швидкості двигуна та виведено співвідношення для розрахунку його вагових коефіцієнтів.

6. *Полянская И.С.* Взаимосвязь обобщенных параметров двухмассовой ЭМС с отрицательным вязким трением с параметрами квазінейрорегулятора при заданных показателях качества // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ“ХПІ”.- 2003.- № 10, т.2.- С.515-517.

7. *Полянская И.С.* Влияние параметрических возмущений в двухмассовой электромеханической системе с отрицательным вязким трением с квазінейрорегулятором на динамические показатели регулирования // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.- Харків: НТУ“ХПІ”.- 2004.- №43.- С.188-191.

8. *Полянская И.С., Колесникова В.Д.* Синтез цифровых регуляторов для электромеханической системы и их сопоставление // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.- Харків: НТУ“ХПІ”.- 2005.- №45.- С.497-501.

Здобувачеві належить синтез регуляторів для одномасової ЕМС – квазінейрорегулятора, білінійного регулятора, регулятора у прямому каналі та у каналі зворотного зв'язку, а також порівняльний аналіз їх структур.

9. *Полянская И.С.* Определение критического значения периода дискретизации одномассовой электромеханической системы с квазінейрорегулятором // Електромашинобудування та електрообладнання. - Київ: Техніка. - 2006.- Вип.66. - С. 361-364.

10. Квазінейрорегулятор для електромеханічної системи: Деклараційний патент 12362 Україна, G05B 11/01, G01N 25/00, G05B 5/00, C06B 21/00.- *Клепиков В.Б., Полянська І.С., Колотило В.І., Руденко А.В.* - № и 2005 03304. Заявл. 11.04.2005. Опубл. 15.02.2006, Бюл. №2. – 8 с.

Здобувачем запропоновано застосування переходу від операції диференціювання до зворотних кінцевих різниць при синтезі квазінейрорегулятора та виведено співвідношення для розрахунку його вагових коефіцієнтів.

## АНОТАЦІЇ

**Полянська І.С. Синтез електромеханічних систем з квазінейрорегулятором при фрикційному навантаженні.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. - НТУ “ХПІ”, Харків, 2006.

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано створення цифрового регулятора, що забезпечує задані показники регулювання ЕМС із фрикційним навантаженням, на базі архітектури комп'ютерного нейрону або спрощеної нейронної мережі з аналітичним розрахунком її вагових

коефіцієнтів.

Запропоновано послідовність розрахунку коефіцієнтів зворотного зв'язку по вихідній координаті і її похідних, що дозволяє автоматизувати процедуру синтезу квазінейрорегулятора для лінійної повністю керованої ЕМС.

Виконано порівняльний аналіз цифрових регуляторів, синтезованих різними методами, які забезпечують заданий розподіл коренів характеристичного поліному ЕМС, та показано, що методика синтезу квазінейрорегулятора дозволяє одержати цифровий фільтр із більш простою структурою та кращими динамічними та статичними показниками регулювання.

Досліджений вплив періоду дискретизації на якість і стійкість перехідних процесів в ЕМС із квазінейрорегулятором. Отримано аналітичні залежності для визначення критичного значення періоду дискретизації, при якому ЕМС втрачає стійкість.

Наведено результати експериментальних досліджень електроприводу з мікропроцесорним керуванням із квазінейрорегулятором.

**Ключові слова:** електромеханічна система, система автоматичного керування, фрикційні автоколивання, квазінейрорегулятор, цифрові регулятори, передавальна функція.

**Полянская И.С. Синтез электромеханических систем с квазиинейрорегулятором при фрикционной нагрузке.** - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы. - НТУ "ХПИ", Харьков, 2006.

В диссертационной работе научно обосновано создание цифрового регулятора, названного квазиинейрорегулятором, обеспечивающего заданные показатели регулирования ЭМС с фрикционной нагрузкой, на базе архитектуры компьютерного нейрона для линейной ЭМС и упрощенной нейронной сети для нелинейной ЭМС. Преимуществом предложенного квазиинейрорегулятора над известными нейросетевыми регуляторами является исключение многократной итерационной процедуры тренировки нейронной сети в пользу аналитического расчета ее весовых коэффициентов.

Предложены указания и рекомендации относительно выбора активационной функции выходного нейрона. Проведено исследование влияния изменения параметров системы на характер переходных процессов в двухмассовой ЭМС с квазиинейрорегулятором.

Предложена последовательность расчета коэффициентов обратных связей по выходной координате и ее производным, что позволяет формализовать и автоматизировать процедуру синтеза квазиинейрорегулятора для линейной полностью управляемой электромеханической системы, представленной в пространстве состояний, или заданной в структурной форме, с помощью, например, программного пакета MATLAB. Предложено построение квазиинейрорегулятора с логическим блоком и соединенными с ним выходными нейронами, число которых равняется числу

линейных участков линеаризованной МХ трения.

Выполнен сравнительный анализ цифровых регуляторов, синтезированных различными методами, которые обеспечивают заданное распределение корней характеристического полинома ЭМС. Показано, что методика синтеза квазинейрорегулятора приводит к получению цифрового фильтра с наиболее простой структурой (что позволяет сократить затраты времени на программирование микроконтроллеры), а также лучшими динамическими и статическими показателями регулирования.

Экспериментально исследовано влияние периода дискретизации на качество и устойчивость переходных процессов в одномассовой ЭМС с квазинейрорегулятором, получены номограммы зависимости показателей качества от величины периода дискретизации и выполнен анализ этих зависимостей. Получены аналитические зависимости для определения критического значения периода дискретизации, при котором система теряет устойчивость, путем применения алгебраического критерия устойчивости Гурвица для дискретных систем.

Представлены результаты экспериментальных исследований электропривода с микропроцессорным управлением с квазинейрорегулятором, которые подтверждают основные теоретические положения диссертационной работы. Для двухмассовой ЭМС с квазинейрорегулятором путем компьютерного моделирования подтверждена правильность методики расчета весовых коэффициентов квазинейрорегулятора.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, система автоматического регулирования, фрикционные автоколебания, квазинейрорегулятор, цифровые регуляторы, передаточная функция.

**Polyanskaya I. S. Synthesis of the electromechanical systems with quazyneurocontroller with a friction load.** - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Cand. Tech. Sci. on a speciality 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. - NTU “KhPI”, Kharkov, 2006.

In the dissertation is offered making the digital regulator which provides the required regulation factors based on the architecture of an artificial neural network with analytical determination its weight coefficients.

The method of the calculation of the factor feedback on output coordinate and its derived that allows to automate the procedure of the quazyneurocontroller synthesis for any linear completely operated system presented in state space or given as a structure is offered.

The benchmark analysis of digital regulators synthesized by different methods which provide the required regulation factors is executed. Show-but that method of the syntheses quazyneurocontroller allows to get the digital filter with the most simple structure.

The influence of the sample period on quality and stability of the dynamic processes in the one-mass electromechanical system with quazyneurocontroller is experimental explored. Analytical dependencies

for determination of critical importance of the sample period which provides losing stability are received.

The results of the experimental studies of microprocessor system with quazyneurocontroller which confirms main theoretical position of the dissertation are presented.

**The Keywords:** electromechanical system, automatic control system, friction oscillations, quazyneurocontroller, digital controllers, transmission function.

Відповідальний за випуск д.т.н., проф. Болюх В.Ф.

Підписано до друку 31.08.2007 р. Формат видання 145×215.  
Формат 60×90/16. Папір офсетн. Друк ризографія. Ум.-друк. арк. 0,9  
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Зам. № 670391.

---

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.

Свідотство № 04058841Ф0050331 від 21.03.2001 р.

61024, м. Харків, вул. Гуданова, 4/10

---