

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Баленко Олексій Іванович

УДК 681.5.015.23:629.424.

**ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕЮ
ДИЗЕЛЬ-ПОТЯГУ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2006

Дисертація є рукопис

Робота виконана в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

- Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Заполовський Микола Йосипович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
декан факультету комп'ютерних та інформаційних
технологій
- Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кузнєцов Борис Іванович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
професор кафедри колісних та гусеничних машин
- кандидат технічних наук, доцент
Ситнік Борис Тимофєєвич,
Українська державна академія залізничного
транспорту, м. Харків,
доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем
- Провідна установа: Одеський національний політехнічний університет,
Міністерство освіти і науки України, м. Одеса

Захист відбудеться "26" жовтня 2006 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "14" вересня 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Гамаюн І.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Завдання створення автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСК ТП) для складних об'єктів, до яких відносяться різні види залізничного транспорту, у тому числі й енергетична системі дизель-потягу, до складу якої входять генератор із випрямлячем, перетворювачі частоти (ПЧ) і тягові асинхронні двигуни (ТАД), як електропривод, досить актуальне, оскільки такі системи на сьогоднішній день є найбільш економічними й перспективними. Основою АСК ТП є системи автоматичного керування (САК). САК в об'єктах залізничного транспорту призначені для автоматизації ведення поїзда, включаючи пуск і розгін, вибір режиму ведення на перегонах, гальмування біля платформ, з метою підвищення якості технологічного процесу: економії палива; дотримання графіка руху; підвищення пропускної здатності залізниць у процесі перевезення вантажів і пасажирів. Як один зі способів рішення завдання вдосконалювання технологічного процесу, пропонується використання електропривода з ТАД і ПЧ на основі автономного інвертора напруги (АІН), що здійснює регулювання частоти й діючого значення амплітуди вихідної напруги, згідно певних законів. Крім цього, за допомогою САК здійснюється процес регулювання потужності тягових двигунів електропривода в режимі рушення потягу і його розгоні до заданої швидкості з одночасним обмеженням режиму роботи ТАД по струму й потужності. Однак САК, використовувані в АСК ТП, не завжди забезпечують функціонування об'єкта керування і його підсистем оптимальним образом. Особливо це стосується функціонування об'єкта в перехідних режимах при розгоні дизель-потягу. Підвищення якості технологічного процесу досліджуваного об'єкта істотно можна досягти шляхом розробки САК із використанням методів оптимізації й нейромережових технологій. При цьому виникає коло завдань, пов'язаних з уточненням структур і визначенням конструктивних параметрів САК, синтезом оптимальної системи керування електропривода. Рішення подібних завдань вимагає залучення методів аналізу й синтезу систем керування нелінійними об'єктами, розробки раціональних математичних моделей, адаптації методів оптимізації, а також застосування нових перспективних методів і технологій на основі штучних нейронних мереж, що саме по собі представляє науковий і практичний інтерес і може бути використане при організації керування технологічними процесами аналогічних об'єктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до Державної програми “Розвиток рейкового рухомого складу соціального призначення для залізничного транспорту й міського господарства”, уведеної в дію Постановою Кабінету Міністрів України № 769 від 2 червня 1998 р. і відповідно до плану науково-дослідних робіт НТУ “Харківський політехнічний інститут” у рамках держбюджетних тем: “Розробка теорії й методів оптимізації гібридних динамічних об'єктів на основі К-значного диференціального вираховування й методів штучного інтелекту” (№ ДР 0101U001804); “Розробка теорії й методів штучного інтелекту для моделювання й оптимізації динамічних об'єктів” (№ ДР 0104U003016) і гозпдоговірних тем “Розробка моделей й алгоритмів САР електропередачі дизель-потягу” (№ 60119); “Розробка на основі інформаційних технологій та методів штучного інтелекту системи керування дизель-потягу” (№ 60306), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка й дослідження системи керування електропередачі дизель-потягів із ПЧ і ТАД, що забезпечують підвищення якості технологічного процесу: економію електроенергії; ефективне використання потужності ТАД у режимі тяги; підвищення пропускної здатності залізниць у процесі перевезення вантажів і пасажирів.

Для досягнення цієї мети були поставлені та вирішені наступні основні задачі наукового дослідження:

- сформулювання постановки завдання синтезу системи керування нелінійним багатомірним об'єктом керування;
- проведення аналізу методів оптимізації й критеріїв якості, які використовуються для

синтезу систем керування нелінійними об'єктами;

- розробка нелінійних математичних моделей вузлів і компонент електромеханічної системи об'єкта керування;

- здійснення адаптації методу аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи (АКУР);

- застосування розробленого підходу для визначення структур і конструктивних параметрів каналів контурів регуляторів енергетичної системи й здійснення синтезу системи керування електроприводу дизель-потяга;

- проведення аналізу впливу зміни структури й конструктивних параметрів САК на кількісні і якісні показники функціонування об'єкта керування.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси перевезення вантажів і пасажирів тяговим рухливим складом з асинхронним приводом.

Предмет дослідження – математичні моделі, методи й структури регуляторів, які оптимізують технологічні процеси САК електропередачі із ПЧ і ТАД дизель-потягу.

Методи дослідження. У роботі застосовані методи операторного перетворення Лапласа – при розробці моделей компонент контурів САК електропередачі дизель-потягу; математичне моделювання – при уточненні параметрів регуляторів САК електропередачі, дослідженні як окремих компонентів АСК ТП, так й об'єкта керування в цілому; методи дослідження функції багатьох змінних і теорія матриць – при розробці методики визначення коефіцієнтів β_{ij} й ρ_{ij} оптимізуемого функціоналу методу АКУР; методи теорій оптимального керування, рівноважних математичних моделей і нейронних мереж – при синтезі системи управління електропривода дизель-потягу.

Наукова новизна отриманих результатів. Дослідження, проведені в дисертаційній роботі, дозволили одержати такі наукові результати:

вперше запропоновано:

- перспективний підхід для визначення коефіцієнтів оптимізуемого функціоналу методу АКУР за допомогою теорії рівноважних моделей, що дозволило одержати спектр можливих рішень й обґрунтувати необхідність застосування евристичних методів пошуку структур і параметрів системи керування з використанням даного методу;

- моделі каналів САР генератора, ТАД, електромеханічної системи дизель-потягу, що дозволило уточнити структури й визначити конструктивні параметри компонентів АСК ТП електропередачі дизель-потягу;

- алгоритми синтезу керувань у функції фазових координат, що дало можливість здійснювати розробку АСК ТП електропередачі, що забезпечує вдосконалення технологічного процесу перевезення вантажів і пасажирів з одночасною оптимізацією енергетичних показників дизель-потягу;

- методика оцінки якості системи керування на основі перехідної характеристики й питомої витрати електроенергії на одиницю пройденого шляху, що дозволило в процесі досліджень автоматизувати процес відбору “кращих” варіантів синтезованої САК;

- структура регулятора на основі паралельно працюючого основного регулятора й допоміжного, на базі тришарової нейронної мережі, що дозволило поліпшити якісні показники технологічного процесу САК електропередачі дизель-потягу;

одержав подальший розвиток:

- метод АКУР у змісті визначення коефіцієнтів оптимізуемого функціоналу на основі методу Лагранжа й критерію Сильвестра, що дозволило усунути недолік, який пов'язаний із методикою знаходження коефіцієнтів синтезованої системи керування, властивий даному методу.

Практичне значення одержаних результатів складається з того, що на основі розроблених інженерних методів, моделей, синтезованих систем керування може бути вирішене широке коло конкретних задач при керуванні технологічними процесами перевезення вантажів та пасажирів тяговим рухливим складом з асинхронним приводом по підвищенню економії електроенергії, ефективного використання потужності ТАД у режимі рушання потягу і

його розгону до заданої швидкості, пропускної здатності залізниць у процесі перевезення вантажів та пасажирів. Зокрема, для дизель-потягу з тяговими асинхронними двигунами, який вперше створено на Україні підприємством ВАТ “ХК “Луганськтепловоз”: запропонована структура каналів САР енергетичної системи електропередачі та визначені її параметри, що забезпечують якісні показники в статичних та перехідних режимах функціонування; визначено вплив структур та параметрів окремих контурів та блоків системи керування на реалізацію сили тяги асинхронних двигунів, надійності функціонування перетворювача частоти, який є складовою частиною електроприводу; здійснено синтез системи керування електроприводу з урахуванням миттєвих значень фазових змінних, яка забезпечує оптимізацію енергетичних показників за умови виконання необхідного графіка руху; розроблені й реалізовані на ПЕОМ математичні моделі енергетичної системи дизель-потягу із ПЧ і ТАД і синтезованою системою керування дозволили на стадії проектування замінити експериментальні дослідження чисельним моделюванням.

Результати досліджень використані ДП заводом “Електроважмаш” (м. Харків), що підтверджується прикладеними актами про впровадження, при проектуванні першого на Україні дизель-потягу із ПЧ і ТАД.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, одержані здобувачем самостійно. Серед них: розроблені математичні моделі електропередачі дизель-потягу в режимі тяги; запропоновані структури для формування керуючих впливів АСК ТП; запропонована методика визначення коефіцієнтів оптимізованого функціоналу на основі теорії рівноважних математичних моделей, методу Лагранжа й критерію Сильвестра; проведений синтез оптимальної системи керування технологічними процесами електропривода, що містить ПЧ і ТАД, з використанням методу АКУР і штучних нейронних мереж, що забезпечує високу якість перевізного процесу у всьому робочому діапазоні зміни навантаження дизель-потягу; розроблені структури компонентів системи керування електропередачі й алгоритми для їхньої технічної реалізації, а також рекомендації з удосконалення системи керування в цілому.

Апробація дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були повідомлені й пройшли обговорення на міжнародній науково-технічній конференції “Функціонально-орієнтовані обчислювальні системи” (Київ-Харків, 1993); міжнародних науково-технічних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я” (Харків, 1995, 1996, 1997, 2001, 2002 й 2004 р.); міжнародної конференції “Комп'ютерне моделювання” (Белгород, РФ, 1998); 1-й, 3-й й 4-й міжнародних науково-технічних конференціях “Проблеми інформатики та моделювання” (Харків, 2001, 2003 й 2004 р.).

Публікації: Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 14 друкованих працях, з них 7 статей у фахових наукових виданнях виданнях ВАК України.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, заключення, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 266 сторінок; з них 8 ілюстрацій по тексту; 55 ілюстрацій на 54 стор.; 4 таблиць по тексту; 3 додатка на 42 стор.; 142 найменування використаних літературних джерел на 14 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність, сформульовано мету та основні задачі досліджень, визначено методи вирішення поставлених задач, сформульовано наукову новизну роботи та практичну цінність отриманих результатів. Наведені дані про впровадження результатів роботи, її апробацію та публікації.

У першому розділі проведено аналіз існуючих методів керування асинхронними двигунами змінного струму з погляду вдосконалення керування технологічними процесами під час перевезення вантажів і пасажирів. Показано, що найпоширенішим на даний момент на Україні є частотне керування, що забезпечує найбільш повну економію споживаної енергії.

В роботі наведений аналіз методів і критеріїв якості, використовуваних для синтезу

систем автоматичного керування технологічними процесами (САК ТП). Показано, що найбільш доцільно використання таких показників якості процесу керування: час регулювання, перерегулювання й коливальність перехідного процесу. У якості ж критерію оптимізації процесів у тяговому електроприводі можуть використовуватися: активна або повна споживана потужність у технологічному процесі перевезення вантажів і пасажирів, коефіцієнт корисної дії, струм статора, втрати або деякий набір із цих показників. Розглянутий ряд методів, які дозволяють проводити синтез оптимальних систем керування нелінійними об'єктами, дає підставу говорити про необхідність використання методу АКУР і сучасних методів, які базуються на основі нейронних мереж.

Визначено мету даної роботи й сформульований ряд завдань, які будуть у ній вирішуватися.

В другому розділі розглядаються питання розробки математичних моделей каналів і компонент керування енергетичної системи вперше створюваного в Україні дизель-потягу з ТАД і ПЧ й їхньої технічної реалізації з використанням комп'ютерних й інформаційних технологій.

Електропередача дизель-потягу має автономну САК, що здійснює спільну роботу з дизелем і забезпечує керування ТАД для реалізації тягових характеристик у всьому діапазоні швидкостей і навантажень. В електропередачі дизель-потягу САК виконана у вигляді двоконтурної. Перший контур здійснює регулювання збудження тягового генератора й задає величину напруги, яка йде до двигунів. Другий контур регулювання є підлеглим стосовно першого й здійснює регулювання частоти живлення тягових двигунів.

До першого контуру САК електропередачі відноситься регулятор тягового генератора (РТГ), що призначений для формування сигналу керуючого впливу по збудженню тягового генератора U_{Γ} . Математична модель регулятора збудження представлена у вигляді:

$$U_{\Gamma} = U_{\Gamma} \frac{K_1}{T_1 p + 1}, \quad U_{\Gamma} = (U_{\Gamma} - U_{3\Gamma} \frac{K_3}{T_3 p})(K_2 + \frac{1}{T_2 p}), \quad U_{\Gamma} = f_{\Gamma} \frac{K_4}{T_4 p + 1},$$

$$U_{\text{В}} = U_{\text{ВГ}} \frac{K_5}{T_5 p + 1}, \quad U_{3\Gamma} = K_9 + K_7 U_{\Gamma} - K_6 (U_{3\text{В}} + U_{\text{В}}), \quad U_{3\text{В}} = K_8 U_{\Gamma} + K_{10},$$

де U_{Γ} – напруга генератора; U_{Γ} – сигнал, пропорційний лінійній напрузі тягових обмоток генератора; U_{Γ} – сигнал керування збудженням тягового генератора (ТГ); U_{Γ} – напруга, пропорційна частоті ТГ; f_{Γ} – частота обертання генератора; $U_{\text{В}}$ – напруга обмотки збудження генератора; $U_{\text{ВГ}}$ – сигнал завдання; $U_{3\Gamma}$ – сигнал помилки; $U_{3\text{В}}$ – напруга завдання збудження генератора; K_i ($i = 1, 10$) – коефіцієнти підсилення; T_j ($j = 1, 5$) – постійні часу інтегрування; p – оператор Лапласа.

Математична модель регулятора вихідної напруги інверторів електропривода каналу струму I_g у режимі тяги без обліку процесів буксування представлена у вигляді:

$$K I_g = K_{12} (U_{\text{КМ}} \frac{K_{11}}{p} - I_g) (K_{13} + \frac{K_{14}}{p}), \quad U_{\text{УШ}} = (K I_g \frac{1}{T_6 p + 1}) \frac{K_{15}}{p},$$

$$U_G = U_{\text{УШ}} \frac{K_{16} K_{17}}{(T_7 p + 1)}, \quad I_g = K_{18} U_G \frac{K_{19} K_{20}}{(T_8 p + 1) (T_8 p + 1) (T_9 p + 1)},$$

де $K I_g$ – вихідний сигнал ПІ-регулятора каналу струму; $U_{\text{КМ}}$ – сигнал, пропорційний позиції контролера машиніста; I_g – сигнал, пропорційний струму навантаження ТАД; $U_{\text{УШ}}$ – сигнал керуючого впливу по вихідній напрузі інверторів; U_G – сигнал, що відповідає ефективному значенню напруги живлення ТАД; K_i ($i = 11, 20$) – коефіцієнти підсилення; T_j ($j = 6, 9$) – постійні часу (T_6 – постійна часу задатчика інтенсивності).

На підставі розроблених математичних моделей каналів компонент системи керування реалізована модель із використанням пакета моделювання безперервних процесів, що дозволила провести ряд експериментів, які підтверджують її адекватність. На цій основі зроблений висновок про те, що запропоновані моделі можуть бути використані для проведення досліджень і синтезу керуючих впливів у вигляді амплітуди й частоти напруги живлення ТАД, синтезу регуляторів, що формують керуючі впливи по каналах обмеження струму й підтримки сталості

потужності, визначення параметрів системи керування виходячи з вимог до якісних показників перехідного процесу, проведення досліджень об'єкта керування як у розімкнутій, так й у замкнутій системі автоматичного керування. У процесі досліджень уточнена структура САК каналу обмеження струму, визначені значення параметрів регулятора вихідної напруги, що містить у своїй структурі ПІ-регулятор і задатчик інтенсивності з урахуванням забезпечення вимог до якісних показників перехідного процесу (величини перерегулювання, часу регулювання, числа коливань).

У третьому розділі здійснена математична постановка задачі оптимізації динамічних процесів за допомогою методу АКУР, у результаті якої зроблений висновок про необхідність розробки методики по визначенню коефіцієнтів β_{ij} й ρ_{ij} оптимізуемого функціоналу. Зроблено аналіз проблеми вибору множини коефіцієнтів за допомогою теорії рівноважних математичних моделей. Аналіз показав, що існуючі методи визначення коефіцієнтів не дозволяють знайти глобальний мінімум функціоналу, а визначають тільки слабоекстремальні рішення в багатомірних й багатоекстремальних просторах. У зв'язку із цим пропонується із класів однотипних завдань виділити одну й для неї визначати зі спектра можливих найбільш раціональну стратегію пошуку кращого набору коефіцієнтів β_{ij} й ρ_{ij} . Після цього використати знайдену стратегію для рішення всієї множини однотипних завдань.

Уперше був запропонований підхід до вибору коефіцієнтів β і ρ на основі методу Лагранжа й критерію Сильвестра, що дозволяє звузити простір пошуку цих коефіцієнтів. Також уперше було запропоновано використати для нелінійних об'єктів з аналітичними характеристиками при синтезі систем керування методом АКУР, з метою спрощення пошуку оптимальних параметрів системи керування, евристичний підхід із застосуванням нейронних мереж, зокрема, трьохрядних перцептронів.

У роботі використовується основна теорема методу АКУР, у якій досліджуєий об'єкт описується системою нелінійних диференціальних рівнянь виду

,

де $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ – фазові координати об'єкта; $f_i, \varphi_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ – безперервні задані функції; $U_j (j=1, 2, \dots, m)$ – керування.

Оптимальними у змісті мінімуму функціоналу I методу АКУР

$$I = V_3[X_1(t_2), \dots, X_n(t_2), t_2] + \int_{t_1}^{t_2} Q(X_1, \dots, X_n, t) dt + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{U_j}{R_j} \right)^2 dt + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \int_{t_1}^{t_2} R_j^2 V_j^2 dt, \quad (1)$$

є керування

де V – рішення лінійного рівняння у часткових похідних

при граничній умові

.

Якщо функції $f_i(X_1, \dots, X_n, t)$, $Q(X_1, \dots, X_n, t)$, $V_3[X_1(t_2), \dots, X_n(t_2), t_2]$ можна представити у вигляді ступеневих рядів

де $\alpha_i, \alpha_{ijk}, \alpha_{ijkl}, \dots$; $\beta_{ij}, \beta_{ijk}, \beta_{ijkl}, \dots$ – у загальному випадку функції часу, що не змінюються при перестановці індексів, починаючи із другого; $\rho_{ij}, \rho_{ijk}, \rho_{ijkl}, \dots$ – постійні величини, що не змінюються при перестановці індексів, то можна записати співвідношення, що визначає структуру регулятора, оптимального в змісті мінімуму функціоналу (1):

$$U_j = -R_j^2 \left(\sum_{i=1}^n \varphi_{ij} \left(\sum_{k=1}^n A_{ik} X_k + \sum_{k,l=1}^n A_{ikl} X_k X_l + \sum_{k,l,r=1}^n A_{iklr} X_k X_l X_r + \dots \right) \right). \quad (2)$$

У запису (2), що визначає структуру регулятора, невідомими значеннями, що підлягають визначенню, є коефіцієнти A_{ij}, A_{ijk}, \dots . При їхньому визначенні виникає завдання знаходження коефіцієнтів $\beta_{ij}, \beta_{ijk}, \dots$, і $\rho_{ij}, \rho_{ijk}, \dots$, спосіб вибору яких методом АКУР не визначено. У зв'язку із цим пропонується один з можливих підходів, що полягає в розробці методики вибору коефіцієнтів $\beta_{ij}, \beta_{ijk}, \dots$, $\rho_{ij}, \rho_{ijk}, \dots$, які є складовими компонентами керування.

У роботі показано, що функції Q й V_3 позитивно визначені й можуть бути представлені у вигляді квадратичних форм: $Q = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \beta_{ij} X_i X_j$, $V_3 = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \rho_{ij} X_i X_j$, де X_i й X_j –

фазові координати об'єкту керування. На підставі методу Лагранжа та критерію Сильвестра визначені співвідношення, які встановлюють зв'язок між значеннями β_{ij} (аналогічно й ρ_{ij}) оптимізуемого функціоналу. У результаті отримані співвідношення: $\beta_{11} > 0$, $\beta_{11}\beta_{22} > \beta_{12}^2$, $\Delta_3 = (\beta_{11}\beta_{22}\beta_{33} + \beta_{12}\beta_{13}\beta_{23} + \beta_{12}\beta_{13}\beta_{23}) - (\beta_{12}^2\beta_{33} + \beta_{13}^2\beta_{22} + \beta_{23}^2\beta_{11}) > 0$ і ряд умов, виконання яких забезпечує позитивну визначеність квадратичної форми: $(\beta_{11}\beta_{22}\beta_{33} + 2\beta_{12}\beta_{13}\beta_{23}) > (\beta_{12}^2\beta_{33} + \beta_{13}^2\beta_{22} + \beta_{23}^2\beta_{11}) > 0$, $\beta_{11}\beta_{22}\beta_{33} < 2\beta_{12}\beta_{13}\beta_{23}$, $\beta_{12}\beta_{13}\beta_{23} > 0$.

Аналогічні співвідношення отримані й для коефіцієнтів ρ_{ij} ($j = 1, 2, \dots, n$).

Таким чином, наведені співвідношення дають можливість зменшити число можливих варіантів “підбору” коефіцієнтів β_{ij} й ρ_{ij} , що забезпечують мінімізацію функціоналу, і тим самим дозволяють перебороти один з відзначених недоліків методу АКУР.

Використовуючи метод АКУР і розроблену методику визначення коефіцієнтів β_{ij} й ρ_{ij} вирішене завдання оптимального керування з урахуванням середніх значень фазових координат і змінних станів. Синтезовані керування отримані у вигляді:

$$U_1 = A_{01} + A_{11}X_1 + 2A_{19}X_1X_9, \quad (3)$$

$$U_2 = A_{01}X_2 - A_{02}X_1 + A_{03}X_4 - A_{04}X_3 + 2X_9X_1X_2A_{99} \frac{K_{31}}{a_1a_2}, \quad (4)$$

де змінні X_1, X_2 (проекції потокозчеплення обмотки статора на відповідні осі координат α й β) і X_9 (кутова швидкість обертання ротора ТАД) – одержують шляхом безпосереднього виміру, а X_3 й X_4 (проекції потокозчеплення обмотки ротора на відповідні осі координат α й β) – з моделі. Для визначення змінних X_3 і X_4 потрібна наявність вбудованого обчислювального пристрою, що в остаточному підсумку приводить до ускладнення системи керування в

цілому, однак при його наявності, реалізація моделі для визначення змінних X_3 і X_4 не викликає затруднення.

У роботі був проведений синтез керуючих впливів і для випадку рішення завдання керування, що не вимагає значення змінних X_3 й X_4 :

$$U_1 = -b_1^2 A_{01} + 2A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + A_{19}X_9 \quad (5)$$

$$U_2 = -b_2^2 A_{01} + 2A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + A_{19}X_9 \bar{X}_2 + \\ + b_2^2 A_{02} + A_{22}X_2 + A_{12}X_1 + A_{29}X_9 \bar{X}_2, \quad (6)$$

у яких змінні X_1 , X_2 і X_9 одержують шляхом безпосереднього виміру, що дає можливість побудови субоптимальної системи керування, оскільки не всі змінні використані при синтезі керуючих впливів. Структура регулятора, описувана рівняннями (5) і (6), на відміну від розглянутої вище, не вимагає наявності моделі, а, отже, і бортового обчислювального пристрою, для визначення фазових координат, які безпосередньо не можна виміряти, що є позитивним чинником з погляду її побудови й не вимагає додаткових фінансових витрат при її технічній реалізації.

У четвертому розділі розглянуті питання реалізації й дослідження системи керування електропередачею дизель-потягу, розроблені рекомендації з технічної реалізації контурів САК, уточнені структурні схеми компонентів САК, запропоновані структури регуляторів систем керування згідно синтезованих законів керування, які забезпечують оптимізацію її динамічних процесів при розгоні дизель-потягу протягом заданого часу. Розроблено структурні схеми нейронних мереж для корекції сигналів регуляторів системи керування з метою оптимізації технологічного процесу перевезення пасажирів і вантажів дизель-потягом.

Проведено дослідження динаміки об'єкта із синтезованою системою керування як з використанням моделей, так і на реальному об'єкті (натурному зразку дизель-потягу).

Для випадку, коли для синтезу керувань доступні всі фазові координати (у результаті вимірів або одержані за допомогою моделювання), з метою визначення параметрів системи керування й дослідження об'єкта в замкнутій системі керування, використовувалися керування, синтезовані в третьому розділі, виду:

$$U_x = K_u (K_0 + K_{21}X_1 + K_{22}X_1\omega), \quad (7)$$

$$U_\omega = K_\omega (K_{01}X_2 + K_{02}X_1 + K_{03}X_4 + K_{04}X_3 + K_{05}X_1X_2\omega), \quad (8)$$

де K_u , K_ω , K_{01} , K_{02} , K_{03} , K_{04} , K_{05} , K_{22} – коефіцієнти, обумовлені в процесі досліджень; X_1 , X_2 – відповідно проекції потокозчеплення обмотки статора на осі координат α і β ; X_3 , X_4 – відповідно проекції потокозчеплення обмотки ротора на осі координат α і β ; ω – електрична кутова швидкість обертання ротора.

При цьому U_x відповідає U_1 , а U_ω – керуванню U_2 у вираженнях (3), (4).

Частково результати моделювання представлені у вигляді табл. 1.

У табл. 1, крім значень коефіцієнтів, наведені значення споживаної потужності (P), швидкості (V) у кінцевій крапці пройденого шляху (S), питомих витрат на одиницю пройденого шляху (P/S) для відповідної синтезованої системи керування й значень її параметрів. Як ознака оптимальності використалися питомі витрати на одиницю пройденого шляху, за умови, що пройдений шлях і швидкість у кінцевій момент часу пройденого шляху відповідає заданим граничним умовам (у цьому випадку швидкість не менш 47 км/годину, пройдений шлях не менш 420 м).

Перевага віддана процесам, що відповідають № 5 у табл. 1, хоча питомі витрати в порівнянні з питомими витратами, що відповідають № 1, вище на 1,01%, однак є виграш по швидкості, що становить 1,69%. При цьому витрати енергії склали $P = 7,811 \cdot 10^6$ Вт·сек, швидкість досягла 47,89 км/годину, пройдений шлях – 420,8 м.

Результати моделювання

№ п/п	K_{21}	K_{22}	$K_{01},$ K_{03}	$K_{02},$ K_{04}	K_{05}	$P,$ Вт·сек	$V,$ км/год	$S,$ м	$(P/S) \cdot 10^{-3},$ Вт·сек / м
1	32,54	0,16	32,1	35,9	0,136	$7,989 \cdot 10^6$	47,08	434,3	18,40
2	32,31	0,16	32,0	35,9	0,143	$7,452 \cdot 10^6$	45,55	419,9	17,75
3	33,00	0,16	32,7	36,1	0,129	$8,126 \cdot 10^6$	47,16	426,2	19,07
4	32,69	0,18	32,0	36,1	0,132	$8,331 \cdot 10^6$	46,62	428,6	19,44
5	32,73	0,17	32,2	36,3	0,134	$7,811 \cdot 10^6$	47,89	420,8	18,56

З урахуванням технічної реалізації керування, задані рівняннями (7) – (8), перетворені до виду (9) – (10):

$$U_x = K_{24}(K_{23} + K_{25}\sqrt{X_1^2 + X_2^2} + K_{26}\omega\sqrt{X_1^2 + X_2^2}), \quad (9)$$

$$U_\omega = K_{27}\sqrt{X_1^2 + X_2^2} + K_{28}\sqrt{X_3^2 + X_4^2} + K_{29}\omega + K_{30}, \quad (10)$$

оскільки набагато простіше використати не проєкції потокозчеплення, а їхні модулі. Тут K_{24} – K_{29} – коефіцієнти, що є функціями часу, обумовлені в процесі синтезу системи керування і які забезпечують якісні показники об'єкта згідно заданого критерію якості; K_{23} , K_{30} – постійні коефіцієнти.

Коефіцієнти K_{24} – K_{29} визначаються у вигляді

де K_i ($i = 24, 29$) – постійний коефіцієнт; T_{10} – постійна часу.

У процесі досліджень із урахуванням оптимізації енергетичних витрат отримані наступні значення параметрів синтезованої системи керування, реалізованої відповідно до співвідношень (9) і (10)

Керування, задані рівняннями (11) – (12), в відмінності від попередніх, формуються з використанням поточної інформації про модулі потокозчеплень і модулі струмів статорної обмотки двигуна.

$$U_x = K_{32}(K_{31} + K_{33}\sqrt{X_1^2 + X_2^2}\sqrt{i_{\alpha_1}^2 + i_{\beta_1}^2} - K_{34}\omega\sqrt{i_{\alpha_1}^2 + i_{\beta_1}^2} + K_{35}\omega\sqrt{X_1^2 + X_2^2} + K_{36}\omega), \quad (11)$$

$$\omega_0 = K_{37}(\omega_{00} + K_{38}\sqrt{X_1^2 + X_2^2}\sqrt{i_{\alpha_1}^2 + i_{\beta_1}^2} + K_{39}\omega\sqrt{X_1^2 + X_2^2} - K_{40}\omega\sqrt{i_{\alpha_1}^2 + i_{\beta_1}^2} + K_{41}\omega), \quad (12)$$

де U_x , ω_0 – відповідно сигнали керування, пропорційні амплітуді й частоті напруги живлення ТАД; X_1 , X_2 , i_{α_1} , i_{β_1} – відповідно проєкції на осі б і в потокозчеплення й струму обмотки статора; ω – електрична кутова частота обертання ротора ТАД; K_i ($i = 31, 41$) – коефіцієнти; ω_{00} – початкове значення частоти напруги живлення ТАД.

Вирази (11), (12) дозволяють побічно врахувати вплив потокозчеплення роторної обмотки на процес формування керувань (струм статорної обмотки визначається спільною дією потокозчеплення статорної й роторної обмоток), що дозволяє уникнути вимірів потокозчеплення й струму ротора. Практично одержуємо керування, умовою формування яких є наявність інформації про всі фазові координати об'єкта керування.

За допомогою моделювання, аналогічно, як і для попереднього випадку, визначені параметри САК, що забезпечують оптимізацію енергетичних показників.

Дослідження динаміки об'єкта з існуючим регулятором і допоміжним регулятором на основі тришарової нейронної мережі, спільна робота яких забезпечує оптимізацію енергетичних витрат у процесі перевезення вантажів і пасажирів, показали поліпшення системи керування тяговими асинхронними двигунами.

На рис. 1 наведена узагальнена структурна схема системи керування з використанням

основного й допоміжного регуляторів на основі нейронної мережі, для навчання якої використався генетичний алгоритм.

Результати дослідження СК з допоміжними нейрорегуляторами наведені в таблиці 2.

Тут за допомогою коефіцієнта p/J моделювалася величина завантаження дизель-потягу. Змінні V, S, E – відповідно швидкість, пройдений шлях і витрати енергії на переміщення об'єкту із начального стану фазового простору в кінцевий, t – час. У стовпцях, відзначених цифрою 1, наведені результати досліджень системи керування тільки з основним регулятором, а в стовпцях, відзначених цифрою 2 – результати досліджень при паралельній роботі обох регуляторів. Виходячи з аналізу наведених результатів дослідження, можна зробити висновок, що введення нейронних мереж до складу системи керування дозволяє поліпшити роботу енергетичної системи дизель-потягу в процесі розгону, забезпечуючи при цьому виконання заданих граничних умов. При цьому економія по енергетичних витратах становить не менш 3,2% у порівнянні з досліджуваним дослідним зразком системи керування дизель-потягу.

Таблиця 2

Результати досліджень

№	p/J	t, c	$V, \text{км/г}$		$S, \text{м}$		$E, \text{кВт/г}$	
			1	2	1	2	1	2
1	0,0001	45	38,16	37,61	255,3	257,1	5255	5014
2	0,0002	30	69,92	68,93	298,8	305,7	8755	8351
3	0,00009	30	24,27	24,12	103,4	103,9	2416	2337
4	0,0001	45	38,16	40,06	255,3	259,2	5255	5251
5	0,0002	30	69,92	72,44	298,8	302,6	8755	8759
6	0,00009	30	24,27	26,31	103,4	104,2	2416	2422
7	0,0001	40	32,54	32,61	234,2	243,5	4762	4621
8	0,0002	35	75,53	75,51	324,3	335,2	9867	9754
9	0,00009	30	24,27	24,32	103,4	110,6	2416	2384

На рис. 2 наведені результати дослідження одного з варіантів синтезованої системи керування на експериментальному зразку дизель-потягу в процесі розгону, де формування сигналу керування по амплітуді напруги живлення здійснюється за законом

Аналіз графіків перехідних процесів показує, що значення струмів (активного і повного) не перевищують їхніх припустимих значень, розгін – стійкий, а швидкість зростає за лінійним законом. Прискорення перебуває в припустимих межах. Аналогічні процеси отримані й для інших законів зміни сигналу керування, пропорційного амплітуді напруги живлення. Значення струмів, прискорень, діапазон зміни швидкостей при різній завантаженості дизель-потягу, отримані в процесі експериментальних досліджень при різних законах формування сигналів керування показує, що синтезована система керування забезпечує нормальне функціонування об'єкта в процесі розгону з урахуванням вимог до експлуатаційних характеристик дизель-потягу.

Проведені дослідження ряду систем керування на реальному об'єкті дозволяють зробити висновок про працездатність запропонованих структур регуляторів, синтезованих законів за допомогою методу АКУР і нейронних мереж і можливості їхнього подальшого використання в електропередачах змінного струму дизель-потягів і локомотивів.

У додатку А розглядаються питання розробки структурних і функціональних схем моделей електропередачі дизель-потягу з тяговим електроприводом змінного струму.

У додатку Б приведено формування керуючих впливів і визначення адекватності моделей.

У додатку В приведені документи, що підтверджують практичне значення і впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична проблема синтезу системи керування тяговим асинхронним приводом дизель-потягу, що забезпечує надійне й економічне здійснення технологічного процесу перевезення вантажів і пасажирів й є істотним внеском у рішення проблеми створення тягового рухомого складу з асинхронним приводом на Україні. Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Розроблена математична модель САК електропередачі для перших українських дизель-потягів із ПЧ і ТАД, що дозволяє проводити дослідження й оптимізацію параметрів системи керування.

2. Проведено дослідження методу АКУР за допомогою рівноважних математичних моделей, що дозволило одержати спектр можливих рішень, які дає метод, і обґрунтувати необхідність застосування евристичних методів пошуку структур і параметрів системи керування з використанням даного методу.

3. Одержав подальший розвиток метод АКУР у плані розробки евристичного алгоритму визначення параметрів системи керування на основі методу Лагранжа й критерію Сильвестра, що дозволило звузити область пошуку їхніх прийнятних значень. При цьому використання даного алгоритму дозволяє зменшити число можливих варіантів “підбора” коефіцієнтів β_{ij} й ρ_{ij} , що забезпечують мінімізацію заданого функціонала й тим самим дозволяє перебороти один з відзначених недоліків методу АКУР.

4. Сформульовані й вирішені завдання синтезу регуляторів для системи керування тяговими асинхронними двигунами методом АКУР з урахуванням повноти інформації про вектор фазових змінних об'єкта.

5. Для системи керування тяговими асинхронними двигунами синтезовані нейрорегулятори, що працюють разом з основним регулятором і підвищують ефективність й надійність системи керування.

6. Аналіз результатів досліджень системи керування, синтезованої з використанням методу АКУР, які проведені на математичних моделях і натурному зразку дизель-потягу показав, що математичні моделі адекватно відображують процеси, що відбуваються в об'єкті, а розроблена система забезпечує зменшення енергетичних витрат у порівнянні з існуючими системами й працездатність у всьому діапазоні завантаженості складу.

7. Проведені дослідження з використанням моделей дозволили виробити рекомендації з уточнення структури й параметрів системи керування окремими контурами регулювання електропередачі й скоротити час налагоджувальних випробувань, а дослідження на натурному зразку перших українських дизель-потягів – підтвердити вірогідність отриманих результатів.

8. Результати дисертаційної роботи використані ДП завод “Електроважмаш” при розробці електропередачі перших українських дизель-потягів з перетворювачами частоти й тяговими асинхронними двигунами.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Баленко А.И. К вопросу определения коэффициентов функционала в задаче аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1997. – Выпуск № 2. – С. 39–42.

2. Баленко А.И., Заполовский Н.И. Разработка и исследование оптимизационной мо-

дели нелинейного объекта управления. // Збірник наукових праць. – Харьков: ХВУ. – 1998. – Випуск 21. – С. 93–100.

Здобувачем було розроблено математичні моделі електропередачі дизель-потягу.

3. Баленко А.И., Заполовский Н.И., Пуйденко В.А. Математическая модель электропередачи дизель-поезда в режиме тяги // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ. – 1998. – № 27. – С. 67–71.

Здобувачем були розроблені математичні моделі електропередачі дизель-потягу в режимі тяги.

4. Баленко А.И., Заполовский Н.И. Синтез оптимальной системы управления для объекта, описываемого системой нелинейных дифференциальных уравнений // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ. – 1999. – № 30. – С. 26–27.

Здобувачем проведено синтез оптимальної системи керування з використанням методу АКУР.

5. Баленко А.И., Заполовский Н.И. К вопросу реализации системы управления электрической передачей дизель-поезда // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ. – 2000. – № 80. – С. 14–16.

Здобувачем були розроблені структури компонентів системи керування та алгоритми їх реалізації.

6. Баленко А.И., Заполовский Н.И. Выбор коэффициентов оптимизирующего функционала метода аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы // Системи обробки інформації. – Харьков: ХВУ. – 2001. – Випуск №6 (16). – С. 7–11.

Здобувачем запропонована методика визначення коефіцієнтів оптимізуемого функціоналу.

7. Баленко А.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Носков В.И. Равновесные математические модели при синтезе регуляторов для систем управления приводом // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2002. – № 9, т. 7. – С. 54–60.

Здобувачем було запропоновано використання теорії рівноважних математичних моделей для визначення коефіцієнтів методу АКУР.

8. Баленко А.И., Заполовский Н.И. Исследование объекта с использованием пакета моделирования непрерывных систем // Материалы международной научно-технической конференции „Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. – Харьков: ХГПУ. – 1996. – Часть 2. – С. 7.

Здобувачем були запропоновані структури для формування керуючих впливів автоматизованої системи керування.

9. Баленко А.И., Заполовский Н.И. Шарма Сунил Дутт. Результаты исследования математической модели электропривода переменного тока с синтезированной системой регулирования // Материалы международной научно-технической конференции „Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. – Харьков: ХГПУ. – 1997. – Часть 5. – С. 51–54.

Здобувачем синтезовано оптимальну СК ТП електропривода, що містить ПЧ та ТАД.

10. Баленко А.И., Заполовский Н.И., Носков В.И. Исследование с помощью имитационного моделирования электропередачи дизель-поезда // Компьютерное моделирование. – Белгород: БелГТАСМ. – 1998. – С. 74–79.

Здобувачем були запропоновані структурні моделі для формування керуючих впливів АСК ТП.

11. Баленко А.И., Заполовский Н.И. Выбор коэффициентов оптимизирующего функционала метода аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми інформатики і моделювання”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2001. – С. 9.

Здобувачем запропоновано використання методу Лагранжа та критерію Сильвестра

для знаходження співвідношень між коефіцієнтами методу АКУР.

12. Баленко А.И., Заполовский Н.И., Носков В.И. Разработка и исследование САР электропередачи дизель-поезда с электроприводом переменного тока // Матеріали третьої міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми інформатики і моделювання”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2003. – С. 3–4.

Здобувачем були розроблені рекомендації щодо удосконалення системи керування електропередачі дизель-потягу.

13. Баленко А.И. Оптимизация системы управления дизель-поезда на основе метода АКОР с использованием нейронных сетей // Матеріали четвертої міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми інформатики і моделювання”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2004. – С. 22.

14. Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Баленко А.И., Носков В.И. Равновесные математические модели динамических процессов электропривода переменного тока // Научные ведомости. – Белгород: Белгородский государственный университет. – 2004. – Том 1, выпуск 1(19). – С. 52–62.

Здобувачем було запропоновано використання теорії рівноважних математичних моделей для зменшення області пошуку коефіцієнтів оптимізуемого функціоналу.

АНОТАЦІЇ

Баленко О.І. Оптимізація системи керування електропередачею дизель-потягу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2006.

Дисертація присвячена питанням розробки й дослідження систем керування, що забезпечують оптимізацію перевізного технологічного процесу дизель-потягу із перетворювачами частоти і тяговими асинхронними двигунами. Запропоновані математичні моделі компонент електропередачі дизель-потягу, новий підхід за допомогою теорії рівноважних моделей для визначення коефіцієнтів оптимізуемого функціоналу, співвідношення, які встановлюють зв'язок між значеннями β_{ij} (аналогічно й ρ_{ij}) оптимізуемого функціонала методу аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи (АКУР), алгоритми синтезу керувань електропередачею, яка забезпечує оптимізацією енергетичних показників дизель-потягу, структура системи керування з існуючим регулятором та працюючим паралельно допоміжним регулятором на основі тришарової нейронної мережі.

Ключові слова: система керування, технологічний процес, математична модель, рівноважні моделі, оптимізація, метод аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи, нейронна мережа, метод Лагранжа, дизель-потяг.

Баленко А.И. Оптимизация системы управления электропередачей дизель-поезда. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация технологических процессов. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2005.

Диссертация посвящена вопросам разработки и исследования систем управления, обеспечивающих оптимизацию перевозочного технологического процесса дизель-поезда с преобразователями частоты (ПЧ) и тяговыми асинхронными двигателями (ТАД).

В работе проведен анализ существующих методов управления ТАД с точки зрения совершенствования управления технологическими процессами при перевозке грузов и пассажиров. Показано, что наиболее распространенным на данный момент в существующих системах является частотное управление, обеспечивающее наиболее полную экономию по-

требляемой энергии. Установлено, что среди рассмотренных методов, которые позволяют проводить синтез оптимальных систем управления технологическими процессами, наиболее перспективными для этих целей являются метод аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы (АКОР) и современные методы, которые базируются на основе нейронных сетей.

Для уточнения структур и определения конструктивных параметров, синтеза систем управления и их исследования предложены математические модели каналов и компонент системы автоматического управления (САУ) электропередачи впервые создаваемого в Украине дизель-поезда с ПЧ и ТАД. Анализ результатов исследований, проведенных на математических моделях и натурном образце дизель-поезда, показал, что математическое моделирование адекватно отражает процессы, происходящие в объекте.

Приведены результаты анализа проблемы выбора множества коэффициентов оптимизируемого функционала с помощью теории равновесных математических моделей. Установлено, что существующие методы определения коэффициентов не позволяют найти глобальный минимум оптимизируемого функционала, а определяют только слабо экстремальные решения в многомерных и многоэкстремальных пространствах. В связи с этим в работе предлагается из классов однотипных задач выделять одну и для нее определять из спектра возможных наиболее рациональную стратегию поиска лучшего набора коэффициентов β_{ij} и ρ_{ij} . Одной из таких стратегий поиска коэффициентов рассматривается подход на основании метода Лагранжа и критерия Сильвестра. Полученные при этом соотношения устанавливают связь между значениями β_{ij} (аналогично и ρ_{ij}) оптимизируемого функционала и позволяют уменьшить число возможных вариантов “подбора” коэффициентов β_{ij} и ρ_{ij} , обеспечивающих минимизацию функционала, и тем самым преодолеть недостаток метода АКОР.

Приведены алгоритмы синтеза управлений в функции фазовых координат, что дало возможность осуществлять разработку системы управления электропередачи, обеспечивающей выполнение перевозочного процесса с одновременной оптимизацией энергетических показателей дизель-поезда и методика оценки качества системы управления на основе переходной характеристики и удельного расхода электроэнергии на единицу пройденного пути.

Предложена структура системы управления с существующим регулятором и вспомогательным регулятором, работающим параллельно с основным, на основе трехслойной нейронной сети, совместная работа которых обеспечивает оптимизацию энергетических затрат на перевод объекта из заданной точки фазового пространства в конечную.

Синтезированные оптимальные системы управления технологическими процессами электропередачи, содержащего ПЧ и ТАД, с использованием метода АКОР и искусственных нейронных сетей, как показали исследования, выполненные на моделях и натурном образце дизель-поезда, обеспечивают высокое качество перевозочного процесса во всем рабочем диапазоне изменения его нагрузки и по сравнению с известными решениями имеют лучшие технические характеристики.

Ключевые слова: система автоматического управления, технологический процесс, математическая модель, равновесные модели, оптимизация, метод АКОР, нейронная сеть, метод Лагранжа, дизель-поезд.

Balenko A.I. Optimization of control system for diesel-train electric drive. – Manuscript.

Thesis for the Ph.D. (candidate of science) degree, specialization 05.13.07 – automation of technological processes. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2006.

The thesis studies the problems of development and analysis of control system for optimization of transportation processes involving diesel-trains with frequency shifters and traction non-synchronous engines. Aiming at specification of structures and definition of design parameters for control systems synthesis and analysis, the thesis proposes mathematical models of their channels and components of a diesel-train. The work introduces as well a novel approach to determining co-

efficients of optimized functional using the theory of equilibrium models, which has been resulted in extension of AKOR method. The obtained correlations link values β_{ij} (as well as ρ_{ij}) of optimized functional. Algorithms are proposed for the synthesis of directions of electric drive, which implements transportation process with the simultaneous optimization of energy consumption indices of a diesel-train and The structure of a control system in which an existing controller is supplemented with an additional one based on three-layer neural network is designed.

Keywords: control system, diesel-train, technological process, mathematical model, equilibrium model, optimization, AKOR method, neural network, Lagrange method.