

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**Дудник Олексій Валентинович**



УДК 681.5.015.24

**ОПТИМАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПЕРЕХІДНИМИ  
ПРОЦЕСАМИ ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУЮЧИХ ОБ'ЄКТІВ ЗІ ЗМІННИМИ  
ПАРАМЕТРАМИ**

Спеціальність 05.13.03 – системи та процеси керування

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматики та управління в технічних системах Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Рогачов Олександр Іванович**,  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут»,  
професор кафедри автоматики та управління в  
технічних системах

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Тимчук Сергій Олександрович**,  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства ім. П. Василенка,  
професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-  
інтегрованих технологій

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Суздаль Віктор Семенович**,  
Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України,  
м.Харків, провідний науковий співробітник відділу  
технології вирощування монокристалів

Захист відбудеться “30” червня 2016 р. о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “27” травня 2016 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



І.Г. Ліберг

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Електропривод є одним з основних споживачів енергії на Україні. За деякими оцінками, його частка в загальному споживанні електроенергії становить близько 50-60 %. Разом з тим енергоємність продукції, що виробляється зокрема на металургічних підприємствах України, більше ніж у 2 рази вище, ніж у РФ, КНР та країнах ЄС.

Численний клас електроприводів постійного струму в автоматизованих системах керування технологічним процесом (АСК ТП) значну частину робочого часу знаходиться в нестационарному режимі. До таких об'єктів відносяться електроприводи шахтних підіймачів, транспортних засобів, реверсивних прокатних станів і багато інших. Питання оптимізації перехідних процесів успішно вирішуються з використанням напрацьованого досить значного математичного апарату, який постійно вдосконалюється. Класичні роботи Понтрягіна Л.С., Лєтова А.М., Калмана Р. та ін. по оптимізації перехідних процесів отримали свій подальший розвиток при розв'язку практичних задач керування електроприводом у роботах Панасюка В.І., Козирєва С.К., Кацевича В.М. та ін. Багато в цьому напрямку впроваджено у виробництво на апаратному і програмному рівні.

До задачі оптимізації перехідних процесів тісно примикає задача ідентифікації параметрів об'єкта керування в реальному масштабі часу. Як правило, джерелом інформації про об'єкт є його реакція на типовий вплив. Практичне застосування в цьому напрямку отримали роботи Пухова Г.Е., Ямпольського Д.С., Акімова Л.В., Сусідки В.Л. Сучасний рівень мікропроцесорної техніки дозволяє застосувати ідеї Орловського І.А. про ідентифікацію параметрів об'єкта за допомогою рекурентної нейронної мережі Елмана.

Таким чином, впровадження оптимального керування, що зменшує витрати енергії за умови збереження заданої продуктивності роботи АСК ТП, а також ідентифікація параметрів об'єкта керування у реальному часі є актуальною науково – практичною задачею, що визначила напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами.** Розробка основних положень роботи здійснювалася на кафедрі автоматики та управління в технічних системах НТУ «ХП» відповідно до держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України «Розробка методів цифрової обробки біомедичних сигналів та зображень» (Д.Р. № 0106U001488), та за господарною темою «Дослідження принципів побудови та розробка алгоритмів робастно-оптимального керування електроприводами СКЗ реакторів В-320» (АТ Хартрон, м. Харків), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є вдосконалення оптимальної системи керування перехідними процесами в енергозберігаючих об'єктах із змінними параметрами та обмеженням на керовані координати шляхом корекції діаграм електричного струму.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

- аналіз існуючих систем керування технологічним процесом гарячої прокатки та існуючих систем наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин;

- побудова моделі позиційного електроприводу на базі рекурентної штучної нейронної мережі (ШНМ), що має можливість ідентифікації параметрів об'єкта;

- вибір і обґрунтування критерію енергозаощаджуючого керування з урахуванням обмежень на керуючі впливи і фазові координати;

- рішення задачі пошуку оптимального керування, при якому мінімізуються теплові витрати в позиційному електроприводі з урахуванням обмеження фазових координат;

- визначення меж існування алгоритмів оптимального за часом і по витратах енергії керування позиційним електроприводом;

- розробка системи енергозберігаючого керування з нейронним ідентифікатором.

*Об'єкт дослідження:* перехідні процеси в системах автоматичного керування енергозберігаючими об'єктами зі змінними параметрами.

*Предмет дослідження:* математичні моделі та методи синтезу оптимальних енергозаощаджуючих систем керування приводом реверсивного прокатного стану та системою наведення і стабілізації озброєння з урахуванням обмежень на фазові координати.

**Методи досліджень.** Фундаментальні положення теорії оптимального керування використані для вибору і обґрунтування критерію оптимальності та вивчення умов існування особливих управлінь. Методи рішення задач математичної фізики, обчислювальні методи розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь використані для рішення задачі пошуку оптимального керування, визначення меж існування алгоритмів оптимального керування і безпосередньої розробки алгоритмів керування. Теорія електромашин застосовувалася при побудові математичних моделей роботи позиційного електроприводу. Методи теорії штучних нейронних мереж, теорії ідентифікації застосовані при розробці моделі приводу на основі рекурентної мережі, що надає можливість ідентифікації параметрів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

- отримав подальший розвиток метод розрахунку оптимальних алгоритмів керування за витратами енергії і по швидкодії з урахуванням обмежень фазових координат для позиційного електроприводу постійного струму, який, на відміну від відомих, дозволяє отримати відносно нескладні математичні залежності для синтезу керуючої дії на кожному з інтервалів алгоритму (рівняння 0-го, 1-го та 2-го порядку);

- вперше визначені межі існування алгоритмів керування для складної моделі позиційного електроприводу, що дозволило прискорити процес вибору оптимального за витратами енергії і по швидкодії алгоритму керування на етапі складання технологічної програми;

– удосконалено модель позиційного електроприводу постійного струму на основі рекурентної ШНС Елмана за рахунок використання лінійних функцій активації та зменшення кількості координат, що дозволило спростити модель до одного внутрішнього шару без втрати точності;

– отримав подальший розвиток метод ідентифікації параметрів електропривода на основі рекурентної ШНС Елмана за рахунок застосування комбінованого методу ідентифікації на початковому етапі навчання мережі, що дозволило скоротити загальний час навчання.

**Практичне значення отриманих результатів** для керування енергозберігаючими об'єктами зі змінними параметрами полягає в підвищенні ефективності роботи позиційного електроприводу завдяки зниженню витрат енергії при збереженні продуктивності, що ґрунтується на застосуванні алгоритмів енергозберігаючого керування. Програмно реалізований ідентифікатор на базі ШНМ Елмана дозволяє виконувати ідентифікацію параметрів в реальному часі.

Результати роботи використовувалися при створенні системи керування тренажерними комплексами танку БМ «Оплот» та бронетранспортера БТР-4 на ДП «ХКБМ» (м. Харків) для ідентифікації параметрів електропривода і формування оптимального керуючого впливу на виконавчий пристрій модуля наведення озброєння.

Основні положення дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі автоматики та управління в технічних системах НТУ «ХП» при дипломному проектуванні й викладанні дисциплін «Теорія автоматичного керування», «Сучасні проблеми і методи математичного та комп'ютерного моделювання».

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: визначення математичних залежностей для отримання оптимальних керуючих впливів позиційним приводом з урахуванням обмежень, що накладаються на фазові координати об'єкта; визначення порядку проходження алгоритмів керування по мірі збільшення тривалості перехідного процесу і кута повороту; складання математичних залежностей, що дозволяють визначити межі існування кожного з алгоритмів; побудова моделі позиційного електроприводу на базі рекурентної нейронної мережі Елмана; синтез інтелектуальної системи оптимального керування позиційним електроприводом з нейронним ідентифікатором відхилення параметрів на базі ADSP-2181 та розробка алгоритмів функціонування; порівняльне моделювання роботи СПР приводу блюмінга і синтезованої інтелектуальної системи в середовищі MATLAB.

**Апробація результатів досліджень.** Основні положення і результати роботи доповідалися й обговорювалися на: VI, VII, IX, X, XIX Міжнародних науково-практичних конференціях «Автоматика» (м. Харків, 1999, м. Львів, 2000, м. Донецьк 2002, м. Севастополь 2003, м. Київ, 2012), 5-й Міжнародної конференції «Контроль та керування в складних системах» (м. Вінниця,

1999), XVII, XX, XXI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2009, 2012, 2013), 1-й Науково-технічної конференції «Актуальні проблеми автоматизації та приладобудівництва України» (м. Харків, 2014).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 18 наукових публікаціях, з них: 9 статей у наукових фахових виданнях України, 1 – у наукометричній базі, 1 – у закордонному періодичному фаховому виданні, 7 – у матеріалах конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 156 сторінок, включаючи: 35 рисунків за текстом, 10 рисунків на 6 окремих сторінках, 27 таблиць за текстом, список використаних джерел з 101 найменувань на 12 сторінках, 2 додатки на 3 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету й задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також відомості про публікації, впровадження, апробацію і структуру роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз інформації про стан енергоємного виробництва, зокрема металопрокату, на Україні. З науково-технічних джерел випливає, що основним споживачем електроенергії (до 60%) є електропривод промислових установок, який більшу частину часу працює в старто-стопному режимі. Зниження витрат енергії на перехідних процесах, при умові підтримання інтенсивності виробництва дозволить в кінцевому підсумку зменшити собівартість продукції.

Проаналізована структура реверсивного прокатного стану та його режими роботи, принципи побудови систем керування приводом прокатного стану. Відзначено, що мінімізація витрат енергії повинна вирішуватися спільно із збереженням швидкодії. Вирішити таку проблему можна на базі сучасних мікропроцесорних систем керування.

Схожа проблема зниження витрат енергії при збереженні швидкодії розглянута по відношенню до мобільного об'єкту – системи стабілізації та наведення модуля озброєння легкоброньованих машин.

Відзначено, що суттєвого зменшення витрат енергії під час перехідних процесів можна досягнути шляхом використання особливих (вироджених) керувань, які забезпечивають трансформацію діаграм фазових координат, додаючи інтервали енергозаощадження.

При переході до практичної реалізації пристрою оптимального керування виникає закономірне питання про параметри об'єкта керування. Саме на підставі значень цих параметрів і виконується обчислення оптимального керуючого впливу. Таким чином, достовірне значення параметрів є визначальним при технічній реалізації. У дисертаційній роботі об'єктом керування

фактично є двигун постійного струму, для якого напрацьовано широкий аналітичний опис. Однак розрахунок за аналітичними формулами не дозволяє отримати адекватного результату в силу неточності формул, їх громіздкості та відхилення реальних характеристик двигуна від паспортних.

Аналіз результатів ідентифікації параметрів в реальному масштабі часу дозволив зробити висновок про ефективне застосування в якості ідентифікатора рекурентної нейронної мережі Елмана. Для підвищення точності і швидкості навчання такої мережі доцільно використовувати комбінований метод ідентифікації.

**Другий розділ** присвячений побудові математичної моделі позиційного електроприводу, обґрунтуванню критерію оптимальності і розв'язанню задачі в загальному вигляді.

Процес проходження злитка через обтискні валки представлений математичною моделлю електроприводу постійного струму при постійному моменті навантаження  $M_n$ . При цьому здійснюється розгін і гальмування двигуна від початкової швидкості  $n_3$  до кінцевої  $n_B$ , через досягнення деякої швидкості  $n_{НОМ}$ . Таким чином, механізми блюмінга можна описати рівняннями динаміки електропривода постійного струму, що працює при постійному моменті навантаження в режимі відпрацювання переміщень або в режимі відпрацювання переходів по швидкості. Аналогічний підхід можна в даному випадку застосувати до виконавчого пристрою наведення і стабілізації озброєння, при цьому похибка такого спрощення не перевищує 4,5%.

Математична модель силової частини позиційного електроприводу постійного струму, що складається з тиристорного перетворювача, двигуна незалежного збудження і кінематичної схеми, що описується у відносних одиницях чотирма лінійними диференціальними рівняннями першого порядку:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{d\tau} = \omega; \\ \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{1}{\beta_m} (i - m_n); \\ \frac{di}{d\tau} = \varepsilon_n - \omega - i; \\ \frac{d\varepsilon_n}{d\tau} = \frac{1}{\beta_n} (u - \varepsilon_n), \end{cases} \quad (1)$$

де  $i$  – відносне значення струму якоря;  $\omega$  – відносна швидкість обертання;  $m_n$  – відносний момент навантаження на валу;  $\varphi$  – відносний кут повороту;  $\beta_m$  – співвідношення постійних часу двигуна;  $\beta_n$  – відношення постійних часу керованого випрямляча;  $\varepsilon_n$  – відносна напруга на керованому випрямлячі;  $u$  – напруга мережі.

Структурна схема позиційного електроприводу, що відповідає системі (1), наведена на рис. 1.

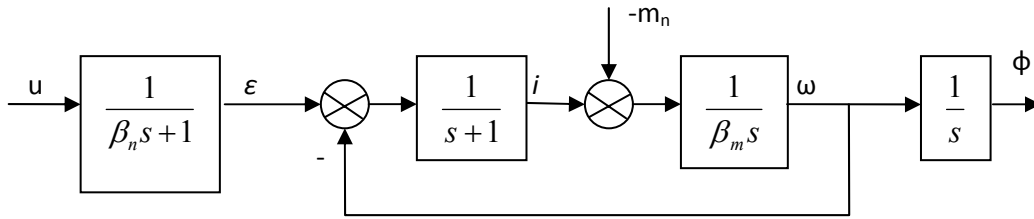


Рисунок 1 – Структурна схема позиційного електроприводу

При реалізації керованого випрямляча на біполярних транзисторах з ізолюваним затвором, його можна розглядати як безінерційну ланку, завдяки малій постійній часу. У цьому випадку система (1) спрощується за рахунок відмови від останнього рівняння та приводиться до вигляду:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{d\tau} = \omega; \\ \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{1}{\beta_m}(i - m_n); \\ \frac{di}{d\tau} = u - \omega - i. \end{cases} \quad (2)$$

На фазові координати реальних об'єктів завжди накладаються обмеження. В даному випадку обмежується керуюча напруга, швидкість наростання струму якоря, струм якоря і швидкість обертання валу:

$$\begin{cases} |u(\tau)| \leq 1; \\ |\omega(\tau)| \leq \alpha_\omega; \\ |i(\tau)| \leq \alpha_i; \\ \left| \frac{di}{dt} \right| \leq \alpha_{i'}. \end{cases} \quad (3)$$

З іншого боку двигун постійного струму представляється у вигляді рекурентної нейронної мережі Елмана, при цьому встановлюється математичний зв'язок між ваговими коефіцієнтами вхідного і внутрішнього шарів і фізичними параметрами двигуна. Оскільки кут повороту  $\varphi$  являє собою інтегральну величину від швидкості обертання, то особливий інтерес представляє поведінка струму якоря  $i$  та швидкість обертання вала  $\omega$ , для яких може бути реалізована рекурентна мережа у вигляді, наведеному на рис.2.



де  $J$  – приведений момент інерції вала двигуна;  $R$  – опір ланки якоря;  $k\Phi$  – конструктивна стала двигуна помножена на потік збудження;  $Tя$  – електромагнітна стала часу якоря;  $I Wij$  і  $L Wij$  – вагові коефіцієнти зовнішнього і внутрішнього рекурентного шару. По мірі навчання мережі відбувається корекція її коефіцієнтів, що дозволяє визначати значення параметрів в реальному масштабі часу. Математичне моделювання такої мережі в системі MATLAB виявило, що відхилення по швидкості обертання вала не перевищує 0,07%, а по струму 0,09%.

Аналіз витрат енергії в електроприводі постійного струму з двигуном незалежного збудження, керованим по ланці якоря, показав, що якщо знехтувати витратами енергії в керуючому пристрої, інші витрати визначаються витратами в самому двигуні. Доведено, що в двигунах середньої і великої потужності електричні витрати становлять 70% – 90%. Це витрати пропорційні квадрату струму якірної ланки. Введення в критерій якості механічних, магнітних та інших витрат сильно ускладнює рішення задачі. Крім того, облік механічних і магнітних витрат додатково зі середньквдратичними струмовими витратами при визначенні оптимальних керувань у електроприводі має незначний вплив на струмову діаграму. Розрахунками показано, що відхилення від оптимальної діаграми, коли у критерії якості враховується лише квадрат струму, становлять 0,01% – 0,2%, тобто досить незначні. Це дозволяє вибрати основний критерій оптимальності у вигляді інтеграла від квадрата струму ланки якоря, що у відносних одиницях представляється наступним чином

$$q = \int_0^{\tau_k} i^2(\tau) d\tau, \quad (8)$$

де  $\tau_k$  – час перехідного процесу.

Однак, слід враховувати вимоги до високої продуктивності, що в кінцевому підсумку виражається зменшенням тривалості процесу, тобто

$$\tau_k = \int_0^T 1 \cdot d\tau \rightarrow \min. \quad (9)$$

У дисертації поставлена задача мінімізації витрат енергії в позиційному електроприводі, що описується системою (2) при врахуванні обмежень на координати (3) і час перехідного процесу (9) для основного критерію (8).

Для розв'язання оптимізаційної задачі стосовно до лінійних неперервних систем невисокого порядку найбільш зручним з точки зору отримання аналітичного рішення є принцип максимуму Л. С. Понтрягіна, доповнений методом фазового простору. Однак, якщо критерій оптимальності являє собою інтеграл від квадрата однієї з фазових координат, як в даному випадку, то основна теорія принципу максимуму не дозволяє отримати екстремалі цілком, а лише окремі відрізки їх. Відрізки екстремалі, що не описуються принципом максимуму, отримали назву особливих (або вироджених) керувань. Вираз для струму якоря на інтервалі виродженого керування

$$i = \frac{1}{2\beta_m}(\psi_{20} - \psi_{10}\tau), \quad (10)$$

де  $\psi_{10} = const$ ,  $\psi_{20} = const$  – початкові значення для складових допоміжної вектор-функції  $\bar{\psi}(t)$ . Наявність цього інтервалу, його тривалість і кут нахилу струмової діаграми забезпечують зниження витрат енергії.

У третьому розділі досліджені окремі випадки визначення вироджених

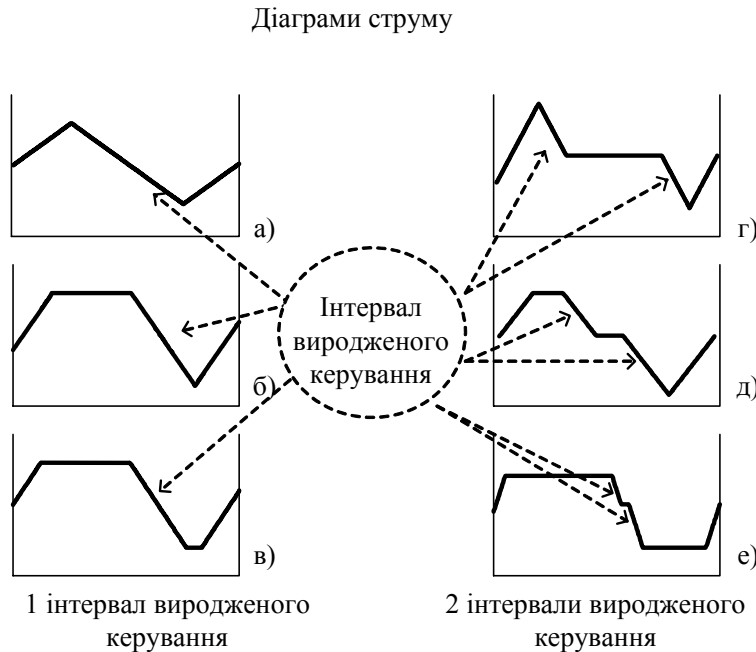


Рисунок 3 – Функціональний вигляд оптимального керування: а) 3-інтервальний; б) 4-інтервальний; в) 5-інтервальний; г) 5-інтервальний з обмеженням по швидкості обертання валу; д) 6-інтервальний; е) 7-інтервальний.

керувань з урахуванням обмежень (3). Отримані при цьому шість алгоритмів оптимального керування відрізняються один від одного місцем розташування та кількістю інтервалів виродженого керування, які забезпечують енергозаощадження (рис. 3). Якщо швидкість наростання струму на цих інтервалах досягає максимального значення  $\frac{di}{dt} = \alpha_i'$ , то вироджене керування забезпечує мінімальну тривалість перехідного процесу. При зменшенні швидкості наростання струму до значення  $\frac{di}{dt} = \gamma_i' < \alpha_i'$  тривалість перехідного процесу зростає, що забезпечує зниження витрат енергії. Формули для визначення величини швидкості зростання струму на інтервалах енергозбереження наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вирази для визначення швидкості зростання струму

Алгоритм	Швидкість зростання струму
3-інтервальний	$\gamma_i' = \frac{2\alpha_i'T_1}{\tau_a - 2T_1}$ , де $\tau_a$ – тривалість оптимального перехідного процесу, $T_1$ – тривалість 1-го робочого інтервалу, $\alpha_i'$ – максимальна швидкість наростання струму
4-інтервальний	$\gamma_i' = -\frac{(\alpha_i - m_n + \alpha_i'T_4)^2}{2\beta_m K + 2(\alpha_i - m_n + \frac{1}{2}\alpha_i'T_4)T_4}$ , де $T_4$ – тривалість 4-го робочого інтервалу, $\alpha_i$ – максимальне значення струму, $m_n$ –

керувань з урахуванням обмежень (3). Отримані при цьому шість алгоритмів оптимального керування відрізняються один від одного місцем розташування та кількістю інтервалів виродженого керування, які забезпечують енергозаощадження (рис. 3). Якщо швидкість наростання струму на цих інтервалах досягає максимального значення  $\frac{di}{dt} = \alpha_i'$ , то вироджене керування забезпечує мінімальну тривалість перехідного процесу. При зменшенні швидкості наростання струму до зна-

	<p>навантаження на валу, <math>\beta_m</math> – співвідношення сталих часу</p> $K = -\frac{1}{\beta_m}(\alpha_i - m_n)\left(\tau_a + \frac{\alpha_i - m_n}{\alpha_{i'}}\right)$
5- інтервальний	$\gamma_{i'} = \sqrt{\frac{K1}{K2}}, \text{ де}$ $K1 = -\frac{\alpha_i^3}{3\beta_m}; K2 = -\varphi_k + \frac{\alpha_{i'}}{6\beta_m}(T_5^3 + T_1^3) + \left(\frac{m_n\alpha_i}{\beta_m\alpha_{i'}} - \frac{\alpha_i - m_n}{2\beta_m}\tau_a\right) \times$ $\times \left(\frac{m_n\alpha_i}{\alpha_{i'}} + \frac{\alpha_i - m_n}{2}\tau_a\right)\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{2\beta_m}\alpha_{i'}T_2^2\tau_a + \frac{\alpha_i - m_n}{2\beta_m}\tau_a^2,$ <p><math>T_2, T_5</math>, – тривалість 2-го и 5-го робочих інтервалів, <math>\varphi_k</math> – кінцеве значення куту повороту вала</p>
5- інтервальний з обмеженням по швидкості обертання	$8\alpha_\omega^3\beta_m\left(-\frac{\gamma_{i'}^3}{\alpha_{i'}^2} - \frac{\gamma_{i'}^2}{\alpha_{i'}} - \frac{1}{3}\gamma_{i'}\right)^2 = (\varphi_k - \alpha_\omega T_3)^2\left(\frac{\gamma_{i'}^2}{\alpha_{i'}} + \gamma_{i'}\right)^3$ <p>Розв'язується за допомогою обчислювальних методів,  <math>\alpha_\omega</math> – обмеження за швидкістю обертання вала, <math>T_3</math> – тривалість 3-го робочого інтервалу</p>
6- інтервальний	$\left(K + \frac{(\alpha_i - m_n)^3}{24\beta_m}\left(\frac{1}{\alpha_{i'}^2} - \frac{1}{\gamma_{i'}^2}\right)\right)^2 \alpha_{i'}\left(1 + \frac{\alpha_{i'}}{\gamma_{i'}}\right)^3 = 2\beta_m\alpha_\omega^3\left(\frac{\alpha_{i'}^2}{3\gamma_{i'}^2} + \frac{\alpha_{i'}}{\gamma_{i'}} + \frac{2}{3}\right)^2,$ $K = \alpha_\omega\left(\tau_k - \frac{\alpha_i + 3m_n}{2\alpha_{i'}}\right) - \frac{\alpha_\omega^2\beta_m}{2(\alpha_i - m_n)}.$ <p>Розв'язується за допомогою обчислювальних методів</p>
7- інтервальний	$\gamma_{i'} = \sqrt{\frac{K1}{K2}}, K1 = \frac{\alpha_i}{4\beta_m}\left(\frac{1}{3}\alpha_i^2 + m_n^2\right), K2 = -\frac{\alpha_i\beta_m\alpha_\omega^2}{\alpha_{i'}^2 - m_n^2} +$ $+ \alpha_\omega\left[\tau_a - T_1 - T_7 + \frac{\alpha_i}{\alpha_{i'}}\right] - \frac{\beta_m}{2} \times \left[\frac{\omega_2^2}{\alpha_i - m_n} + \frac{\omega_7^2}{\alpha_i + m_n}\right] - \varphi_7 + \varphi_2$ <p><math>T_7</math> – тривалість 7-го робочого інтервалу, <math>\omega_2, \omega_7</math> – швидкість обертання валу наприкінці 2-го та на початку 7-го інтервалів, <math>\varphi_2, \varphi_7</math> – значення куту повороту вала наприкінці 2-го та на початку 7-го інтервалів</p>

Кожен алгоритм керування існує в певному діапазоні допустимих тривалостей перехідного процесу. Причому на початку цього діапазону (відповідає задачі швидкодії) швидкість наростання струму на всіх інтервалах максимальна. В кінці цього діапазону, коли тривалість перехідного процесу найбільш велика, інтервали енергозбереження досягають своїх максимальних значень, а швидкість зростання струму на них – мінімальна (відповідає задачі енергозбереження). Якщо продовжувати збільшувати тривалість перехідного

процесу, то інтервали, прилеглі до інтервалу виродженого керування, поглинаються, що призводить до переходу від одного алгоритму керування до іншого. Ці міркування можуть бути проілюстровані граф-схемою проходження алгоритмів (рис. 4).

Величини зростання струму на інтервалах виродженого керування в точках трансформації алгоритмів визначаються співвідношеннями, наведеними у табл.2.

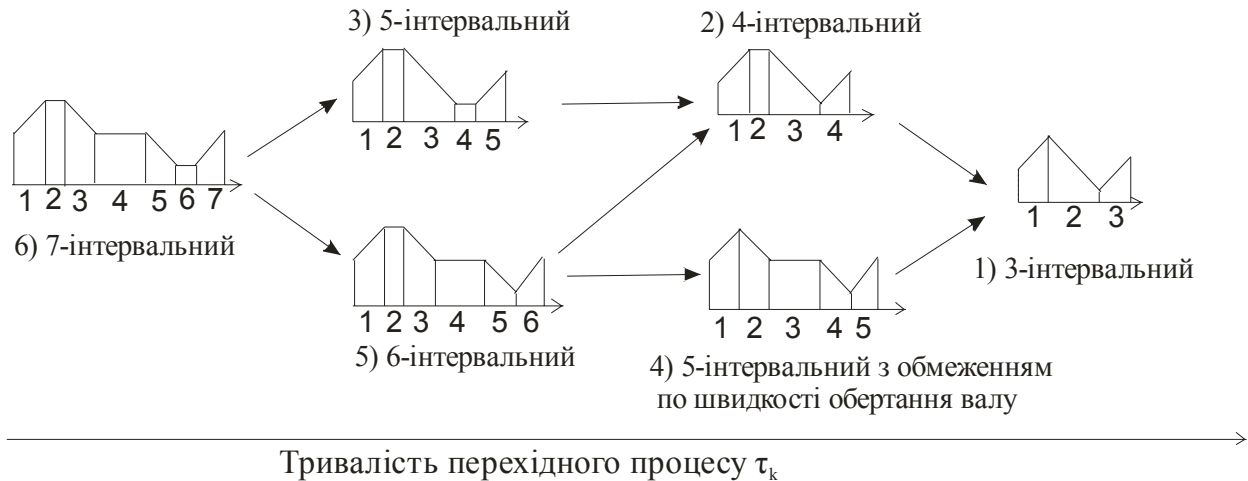


Рисунок 4 – Граф-схема трансформації алгоритмів керування

Таблиця 2 – Швидкість зростання струму на межах інтервалів

Швидкість зростання струму	Межа алгоритмів
$\gamma_{i'} = \frac{(\alpha_i + m_n)^2}{2\beta_m \alpha_\omega - \frac{(\alpha_i + m_n)^2}{\alpha_{i'}}$	Межа 7-ми та 6-ти інтервального алгоритмів
$\gamma_{i'} = \frac{1}{\frac{2\alpha_\omega \beta_m}{(\alpha_i - m_n)^2} - \frac{1}{\alpha_{i'}}$	Межа 6-ти та 5-ти інтервального з обмеженням по швидкості алгоритмів
$\gamma_{i'} = \frac{\alpha_{i'}^2}{\frac{2\alpha_\omega \beta_m}{T_1^2} - \alpha_{i'}}$	Межа 5-ти інтервального з обмеженням по швидкості та 3-інтервального алгоритмів
$a_8 \gamma_{i'}^8 + a_7 \gamma_{i'}^7 + a_6 \gamma_{i'}^6 + a_5 \gamma_{i'}^5 + a_4 \gamma_{i'}^4 + a_3 \gamma_{i'}^3 + a_2 \gamma_{i'}^2 + a_1 \gamma_{i'} = 0,$ <p>Розв'язується за допомогою обчислювальних методів</p>	Межа 6-ти та 4-х інтервального алгоритмів

$\gamma_{i'} = 2 \frac{\alpha_i - m_n}{T_3}$	Межа 4-х та 3-х інтервального алгоритмів
$\gamma_{i'} = \frac{2A}{-B + \sqrt{B^2 - 4AD}}, \text{ де}$ $A = -\frac{\alpha_i}{12\beta_m} (\alpha_i^2 + 3m_n^2), \quad B = \alpha_\omega \alpha_i,$ $D = \varphi_2 - \varphi_4 + \omega_2 C_1 + \omega_6 C_2 + \frac{\beta_m}{2} \left[ \frac{(\alpha_\omega - \omega_2)^2}{(\alpha_i - m_n)} + \frac{(\alpha_\omega - \omega_4)^2}{(\alpha_i + m_n)} \right], C_1 = \frac{\beta_m (\alpha_\omega - \omega_2)}{\alpha_i - m_n},$ $C_2 = \frac{\beta_m (\alpha_\omega - \omega_4)}{\alpha_i + m_n}$	Межа 7-ми та 5-ти інтервального алгоритмів
$\gamma_{i'} = \frac{2A}{-B + \sqrt{B^2 - 4AD}}, \text{ де}$ $A = \frac{2\alpha_i^2}{\beta_m} \left( \frac{m_n \alpha_i}{\alpha_i - m_n} + \frac{\alpha_i}{3} \right), \quad B = 2\alpha_i \left( \omega_4 + \frac{\omega_4 m_n}{\alpha_i - m_n} \right),$ $D = \frac{(\omega_4 - \omega_2)^2 \beta_m}{2(\alpha_i - m_n)} + \omega_2 C - \varphi_4 + \varphi_2,$ $C = \frac{(\omega_4 - \omega_2) \beta_m}{\alpha_i - m_n}$	Межа 5-ти та 4-х інтервального алгоритмів

Зменшення витрат енергії, яке має місце при збільшенні тривалості перехідного процесу має екстремум, після якого починається зростання витрат енергії. Пояснюється це явище впливом навантаження на валу, яке враховується як підінтегральна величина при визначенні значення енерговитрат. Із збільшенням тривалості перехідного процесу вплив навантаження підвищується. Математичне моделювання, проведене для різних вихідних даних, дозволяє зробити висновок, що мінімум енерговитрат спостерігається за умови, що максимальний струм якоря досягає значення, що відповідає подвоєному моменту навантаження на валу

$$i_{\max} = 2m_n. \quad (11)$$

За умови, що обмеження на величину струму якоря  $\alpha_i > 2m_n$ , домогтися виконання співвідношення (11) можна тільки для 3-х і 5-ти інтервального з

обмеженням по швидкості алгоритмів. Швидкість зростання струму на інтервалах виродженого керування визначається залежностями:

$$\text{для 5-ти інтервального алгоритму } \gamma_i = \frac{m_n^2}{2\beta_m(\alpha_\omega - \omega_2)},$$

$$\text{для 3-х інтервального алгоритму } \gamma_i = \frac{2m_n}{T_2}.$$

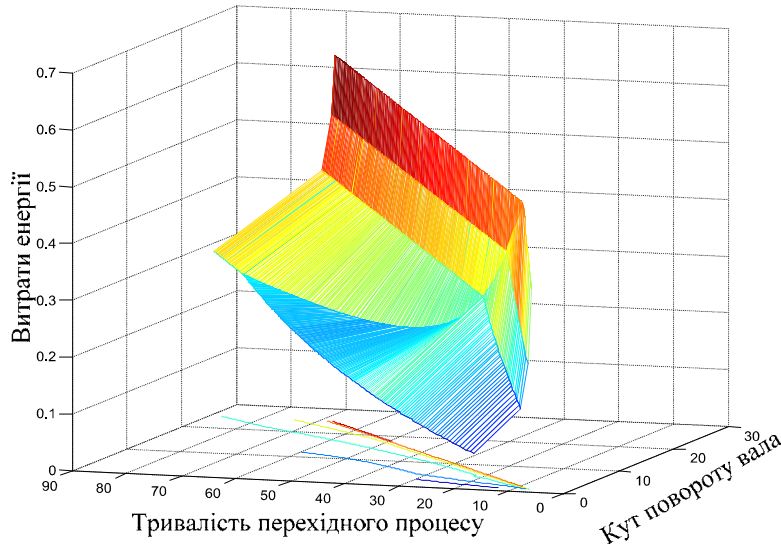


Рисунок 5 – Простір витрат енергії

У **четвертому розділі** вирішується задача синтезу системи оптимального керування.

Практичне застосування наведених у третьому розділі алгоритмів оптимального керування очевидним чином передбачає необхідність не тільки розрахувати оптимальний керуючий вплив, але і попередньо вибрати відповідний алгоритм. При цьому зниження витрат енергії не повинно негативно позначатися на продуктивності. Оскільки вибір алгоритму і його реалізація повинні виконуватися в реальному часі, то для прискорення процесу в дисертації запропоновано виконати попередній розрахунок простору енерговитрат. Цей простір містить інформацію про дотримання алгоритмів оптимального керування при різних кутах повороту і тривалостях процесу. Вид простору енерговитрат наведено на рис. 5.

З вищевикладеного випливає, що для реалізації енергозберігаючих законів цифрову систему доцільно виконати у вигляді дворівневої ієрархічної структури, яка зображена на рис. 6. На верхньому рівні знаходиться ЕОМ з досить високою швидкодією і великим обсягом ОЗП. Від зовнішніх джерел керування ця ЕОМ одержує інформацію про технологічні схеми прокатки та інші дані технологічної програми. Від контролера нижнього рівня надходять відомості про параметри об'єкта. За цими даними ЕОМ формує граничні умови, спираючись на простір витрат енергії здійснює вибір конкретного багатоінтервального алгоритму керування, розраховує тривалості інтервалів і характер керування на кожному з них, а також величини коефіцієнтів много-

членів нульового, першого і другого порядків, згідно з якими повинні змінюватися керуючі дії на даних інтервалах. Крім формування керуючого сигналу, контролер нижнього рівня здійснює ідентифікацію параметрів об'єкта і передачу їх в ЕОМ верхнього рівня для внесення корекцій в алгоритми керування.

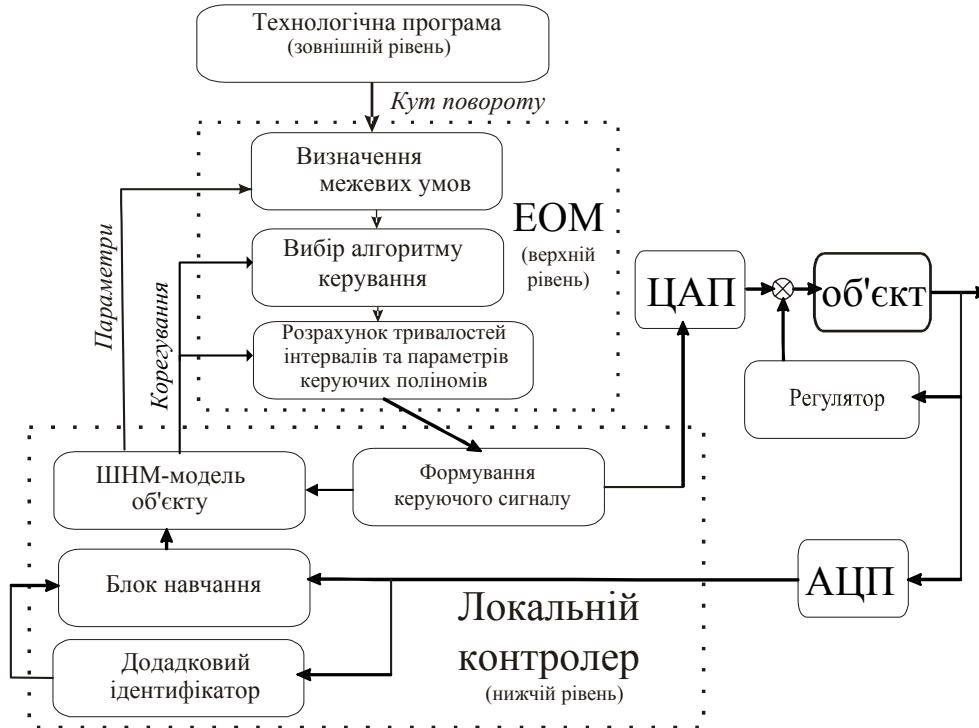


Рисунок 6 – Структура дворівневої системи оптимального керування

Секція ідентифікації включає в себе ШНМ-модель об'єкта, побудовану на базі рекурентної мережі Елмана, блоку навчання і додаткового ідентифікатора. ШНМ -модель є основним елементом секції ідентифікації та функціонує за правилами, описаними в другому розділі. Блок навчання здійснює постійну корекцію коефіцієнтів моделі. Додатковий ідентифікатор визначає початкові значення параметрів ШНМ-моделі за спрощеними залежностями, також описаними у другому розділі.

У **додатках** наведені акти використання результатів дисертаційної роботи в навчальному процесі кафедри автоматики і управління в технічних системах НТУ «ХП», а також при створенні системи керування тренажерними комплексами танку БМ «Оплот» та бронетранспортеру БТР-4 на ДП «ХКБМ» (м. Харків).

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача оптимізації перехідних процесів енергозберігаючими об'єктами зі змінними параметрами при врахуванні обмежень на фазові координати. В роботі на основі принципу максимуму Л.С. Понтрягіна, доповненому методом фазового простору отримані наступні результати:

1. В результаті аналізу систем керування енергозберігаючими об'єктами, на прикладі реверсивного прокатного стану і системи наведення і стабілізації озброєння, з урахуванням сучасних вимог, науково обгрунтована перспективність застосування алгоритмів оптимізації.

2. На основі обраної математичної моделі роботи позиційного електроприводу розроблена рекурентна нейронна мережа Елмана, виведені математичні залежності між ваговими коефіцієнтами нейронної мережі та параметрами вихідної математичної моделі. Моделювання показало точність мережі Елмана не гірше 0,09%. Використання ШНМ як ідентифікатора параметрів об'єкта дозволило корегувати оптимальну керуючу дію у реальному часі, що забезпечило підвищення якості керування.

3. Критерій якості від квадрата електричного струму визнано у повному обсязі відповідаючим суті наукової проблеми. Використання цього критерію призвело до виникнення особливого енергозберігаючого інтервалу в алгоритмі керування. Врахування обмежень, що накладаються на фазові координати, обумовило додаткові інтервали алгоритму. На відміну від особливого інтервалу, ці додаткові інтервали не забезпечують зменшення витрат енергії. Таким чином отримано загальний вид 6-ти багатоінтервальних алгоритмів оптимального керування і відповідні діаграми електричного струму. Виконання умов швидкодії дозволило визначити нижню межу області рішень та відповідний нахил діаграми електричного струму.

4. Розв'язана задача пошуку оптимального керування позиційним електроприводом. Отримані математичні залежності для визначення тривалостей інтервалів керування, кутів нахилу діаграм електричного струму та керуючої дії. Аналіз залежностей для діаграм електричного струму дозволив визначити верхню межу області рішень. Доведено, що керуюча дія описується рівняннями 0-, 1- і 2-го порядку. Реалізація таких залежностей у цифровому вигляді забезпечує підвищення ефективності системи в цілому.

5. Алгоритми керування формують область, в рамках якої існує оптимальне рішення. Область обмежена мінімально можливою тривалістю процесу з одного боку та мінімально можливими витратами енергії – з іншого. У середині цієї області алгоритми розташовуються в певному порядку по міру руху в бік збільшення тривалості перехідного процесу і зниження витрат енергії. На підставі цих міркувань виведені залежності, що дозволяють визначити межі зіткнення алгоритмів керування та побудувати простір енерговитрат. Використання простору енергозатрат дозволяє корегувати технологічну програму на етапі її розробки, а на етапі керування об'єктом прискоряє вибір алгоритму оптимального керування.

6. Виконано синтез дворівневої системи оптимального керування. Верхній рівень розрахунку алгоритму керування реалізовано на ЕОМ. Нижній рівень, що реалізує керуючий вплив і блок ідентифікатора реалізований на ADSP-2181. Результати виконаних теоретичних та експериментальних досліджень використані на ДП «ХКБМ» (м. Харків), АТ Хартрон (м. Харків) та у навчальному процесі НТУ «ХПІ».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дудник А.В. Оценка чувствительности оптимального по потерям электропривода / Рогачёв А.И., Дудник А.В. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 72. – С.161–164.

*Здобувачем виконана розробка програми і проведено математичне моделювання чутливості оптимального щодо витрат електроприводу.*

2. Дудник А.В. Квазиоптимальная система управления, минимизирующая потери энергии в электроприводе / Рогачёв А.И., Дудник А.В. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып.71. – С.80 – 82.

*Здобувачем доопрацьована програма моделі, виконано математичне моделювання роботи квазіоптимальної системи та систематизовано його результати.*

3. Дудник О.В. Дослідження вироджених керувань в енергозощаджувальному електроприводі постійного струму / Рогачов О.І., Дудник О.В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВДТУ, 2000. – №1. – С.46 – 50.

*Здобувачем розглянуто приклад, що підтверджує залежність характеру вироджених керувань від близькості керованої координати до вихідної змінної.*

4. Дудник А.В. Локальная управляющая сеть и сигнальные процессоры при решении задачи оптимального энергопотребления // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, вип. 48 – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – С.325–328.

5. Дудник О.В. Оцінка можливостей енергозощадження в позиційних електроприводах постійного струму // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – №6, т. 2 – с.142-147.

6. Дудник А.В. Предварительная оценка выбора оптимального по потерям энергии алгоритма управления с учётом ограничений // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – №21 – с.73-78.

7. Дудник А.В. Квазиоптимальный энергосберегающий регулятор для позиционного электропривода / Проскурин А.С., Рогачёв.А.И., Денисенко Н.А., Дудник А.В. // Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. Володимира Даля. – 2003. – №6. – С.55–61.

*Здобувачем розроблений і реалізований алгоритм квазіоптимального регулятора на базі сигнального процесора ADSP2181.*

8. Дудник А.В. Оптимальное и квазиоптимальное энергосберегающее управление электроприводом постоянного тока / Рогачёв А.И., Евсина Н.А., Дудник А.В. // Вестник СевГТУ. Вып.63: Автоматизация процессов и управление: Сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005 – С.163–169.

*Здобувачем виконано порівняльний аналіз оптимізації процесів керування при використанні суто оптимального критерію оптимальності та складеного критерію з різними ваговими коефіцієнтами.*

9. Дудник А.В. Определение длительности оптимального по затратам энергии переходного процесса // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №36 – с.31-36.

10. Дудник А.В. Применение рекуррентных нейронных сетей для идентификации параметров ДПТ / Звягинцева Е.А., Дудник А.В.// Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №57 – с.92-96.

*Здобувачем розроблена математична модель двигуна постійного струму на базі мережі Елмана і виведена залежність між ваговими коефіцієнтами мережі і параметрами двигуна.*

11. Дудник А.В. Выбор оптимального по энергозатратам алгоритма управления позиционным электроприводом // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева – Алмата, Казахстан: КазАТК, 2015. – №4(94) – С.51-58.

12. Дудник А.В. Задающее устройство для энергосберегающего электропривода на сигнальном процессоре ADSP– 2181 / Рогачёв.А.И., Дудник А.В.// Праці Міжнародної конференції з керування “Автоматика – 2000”. – Львів: НВМ Поліграфічного технікуму УАД, 2000. – С.114–117.

*Здобувачем виконано технічне обґрунтування застосування сигнального процесора ADSP2181 при розв’язанні задачі енергоощадного керування.*

13. Дудник А.В. Локальная управляющая сеть и сигнальные процессоры при решении задач оптимального энергопотребления / Рогачёв.А.И., Дудник А.В.// Матеріали Міжнародної конференції з керування “Автоматика-2002”. – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – С.202.

*Здобувачем обґрунтовано розподіл завдань між центральною ЕОМ і локальних контролером при реалізації оптимального керування.*

14. Дудник А.В. Оптимальное и квазиоптимальное энергосберегающее управление электроприводом постоянного тока / Рогачёв А.И., Евсина Н.А., Дудник А.В.// Тези доповідей XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», 20-22 травня – Харків: НТУ «ХПІ», – 2009 – С.424-425.

15. Дудник А.В. Оптимальное управление ДПТ на базе сети Элмана / Рогачев А. И., Звягинцева Е. А., Дудник А.В.// Автоматика -2012. XIX Міжнародна конференція з автоматичного керування: матеріали конференції, 26-28 вересня 2012 року, Київ, Україна / НАН України, МОН молоді та спорту України, Укр. Асоц. з автоматич. керування, НУХТ та ін. — К. : НУХТ, 2012. — С. 248

*Здобувачем обґрунтована і розроблена структура системи оптимального керування з використанням нейронного ідентифікатора.*

16. Дудник А.В. Повышение точности идентификации параметров

ДПТ на базе сети Элмана / Звягинцева Е.А., Дудник А.В.// Тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» 15-17 травня – Харків: НТУ "ХПИ", 2012. – С.107

*Здобувачеві належить висновок уточнених математичних залежностей за середнім значенням похідної для вагових коефіцієнтів рекурентної мережі Элмана.*

17. Дудник А.В. Комбинированный метод обучения сети Элмана для идентификации параметров ДПТ // Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» 29-31 травня – Харків: НТУ "ХПИ", 2013. – С.106

18. Дудник А.В. К вопросу об обучении сети Элмана при идентификации параметров объекта / Евсина Н.А., Дудник А.В.// Актуальні проблеми автоматики і приладобудування: матеріали I Всеукр. наук.-техн. конфер. 11-12 грудня 2014р. – Харків: НТУ «ХПИ», 2014 – С.63-64

*Здобувачем запропонована структура системи навчання рекурентної мережі, заснована на комбінованому методі.*

## АНОТАЦІЇ

**Дудник О.В. Оптимальні системи керування перехідними процесами енергозаощаджуючих об'єктів зі змінними параметрами** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13. 03 – системи та процеси керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної задачі вдосконалення оптимальною за витратами енергії системи керування.

У дисертаційній роботі розглянуто метод оптимального керування в лінійній системі при квадратичному критерії якості з урахуванням обмежень на керовані координати, стосовно до розімкнутої системи. Показано, що існує шість варіантів алгоритмів оптимального керування, в залежності від поєднання обмежень, що накладаються на керовані координати. В залежності від тривалості процесу оптимального керування, алгоритми розташовуються у певному порядку, відносно один одного, утворюючи область рішення, обмежену часом максимальної швидкодії з одного боку і часом мінімальних витрат з іншого. Математичні залежності для визначення цих обмежень, а також кордонів сусідніх алгоритмів всередині цієї області виведені в дисертації.

В дисертації запропоновано метод ідентифікації параметрів позиційного приводу, заснований на рекурентній нейронній мережі Элмана. Математичний зв'язок між ваговими коефіцієнтами рекурентного і зовнішнього шарів мережі з параметрами двигуна дозволяє застосувати здатність мережі до навчання як спосіб ідентифікації.

В роботі запропонована функціональна схема дворівневої системи оптимального керування. На верхньому рівні здійснюється вибір алгоритму оптимального керування і розрахунок тривалості його інтервалів. Контролер нижнього рівня здійснює вироблення керуючих впливів на об'єкт, форма і тривалість яких визначена ЕОМ верхнього рівня.

*Ключові слова:* система оптимального керування, алгоритмічне забезпечення, моделювання, самонавчання, принцип максимуму, рекурентна нейронна мережа Елмана, позиційний електропривод, оптимальне енергозбереження.

**Дудник А. В. Оптимальные системы управления переходными процессами энергосберегающих объектов с переменными параметрами – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13. 03 – системы и процессы управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016.

Диссертация посвящена решению научно-практической задачи усовершенствования оптимальной по затратам энергии системы управления.

В диссертационной работе рассмотрен метод оптимального управления в линейной системе при квадратичном критерии качества с учётом ограничений на управляемые координаты, применительно к разомкнутой системе. Показано, что существует шесть вариантов алгоритмов оптимального управления, в зависимости от сочетания ограничений, накладываемых на управляемые координаты. В зависимости от длительности процесса оптимального управления, алгоритмы располагаются в определённом порядке, относительно друг друга, образуя тем самым область решения задачи, ограниченную временем максимального быстрогодействия с одной стороны и временем минимальных затрат с другой. Математические зависимости для определения этих ограничений, а также границ соседних алгоритмов внутри этой области выведены в диссертации.

Поскольку точность знания параметров объекта, при определении алгоритма оптимального управления играет решающую роль, в диссертации предложен метод идентификации параметров позиционного привода, основанный на рекуррентной нейронной сети Элмана. Математическая связь между весовыми коэффициентами рекуррентного и внешнего слоёв сети с параметрами двигателя позволяет применить способность сети к обучению в качестве способа идентификации. Для повышения скорости и точности обучения сети применяется скорректированный метод скорейшего спуска, комбинированный с традиционными методами идентификации параметров двигателя по виду переходных процессов.

В работе предложена функциональная схема двухуровневой системы оптимального управления. На верхнем уровне осуществляется выбор алгоритма оптимального управления и расчёт длительностей его интервалов. Осно-

ванием для вычислений служат внешние управляющие данные. При расчёте используются параметры объекта, идентифицированные на нижнем уровне.

Контроллер нижнего уровня осуществляет выработку управляющих воздействий на объект, форма и длительность которых определена ЭВМ верхнего уровня. На контроллере нижнего уровня реализована система подчинённого регулирования, с целью удержания объекта на выбранной траектории оптимального движения в фазовом пространстве. Дополнительно, локальный контроллер реализовывает функции нейронного идентификатора параметров.

*Ключевые слова:* система оптимального управления, алгоритмическое обеспечение, моделирование, самообучение, принцип максимума, рекуррентная нейронная сеть Элмана, позиционный электропривод, оптимальное энергосбережение.

**Dudnik A.V. Optimal control system transients power saving objects with variable parameters – Manuscript**

The thesis for scientific degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.13.03 – control systems and processes. – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, 2016.

The thesis is devoted to solving scientific and practical problems of improvement of cost effective energy control system.

In the thesis has given the method of optimal control in a linear open-loop system with quadratic criteria of quality. It is shown that there are six variants of the algorithms of optimal control, depending on the combination of constraints on the controlled axes. Depending on the duration, optimal control algorithms are arranged in a specific order, relative to each other, thereby forming a region of the problem solution by the time of maximum speed with one hand and minimal time costs with other. Mathematical dependences for definition of these limits and the borders of neighbour algorithms within this field are derived in the thesis.

In the thesis is proposed a method for the identification of the drive parameters/ This method based on recurrent neural network Elman. The mathematical relationship between the weight coefficients of the network layers and parameters of the engine allows using the network learning as a way of identification.

The paper presents a functional diagram of a two-tier system of optimal control. On the upper level, there is a choice of algorithm of optimal control and calculation of intervals durations. The lower level controller performs the generation of control actions on the object, the shape and duration of which is determined the upper-level computer.

*Key words:* optimal control system, algorithmic software, modeling, selfteaching, maximum principle, recurrent Elman neural network, positional electric drive, optimal energy efficiency.

