

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ**

На правах рукопису

Демченко Федір Олегович

УДК 681.32

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ
ВИКОНАВЧИМИ ПРИСТРОЯМИ ОБ'ЄКТІВ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ**

05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

**Науковий керівник
доктор технічних наук
професор Г.І. Загарій**

ХАРКІВ 2007

ЗМІСТ

ЗМІСТ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ ВИКОНАВЧИМИ ПРИБОРАМИ ОБ'ЄКТІВ ТРАНСПОРТНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ.....	Error! Bookmark not defined.
1.1. Виконавчі пристрої об'єктів забезпечення транспортної діяльності та їх призначення	Error! Bookmark not defined.
1.2. Особливості побудови контурів керування існуючих виконавчих пристроїв	Error! Bookmark not defined.
1.3. Методи керування виконавчими пристроями транспортного устаткування	Error! Bookmark not defined.
1.4. Постановка задачі досліджень	Error! Bookmark not defined.
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ КЕРУВАННЯ ВИКОНАВЧИМИ ПРИБОРАМИ.....	Error! Bookmark not defined.
2.1. Побудова моделей електромеханічних перетворювачів виконавчих пристроїв	Error! Bookmark not defined.
2.2. Модель виконавчого пристрою як об'єкту керування.....	Error! Bookmark not defined.
2.3. Модель контуру з прямим керуванням струмом.....	Error! Bookmark not defined.
2.4. Розробка моделі контуру керування з модуляцією просторового вектору поля	Error! Bookmark not defined.
Висновки по розділу	Error! Bookmark not defined.
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ВИКОНАВЧИХ ПРИБОРІВ, ЗАБЕЗПЕЧУЮЧИХ ТРАНСПОРТНУ ДІЯЛЬНІСТЬ.....	Error! Bookmark not defined.
3.1. Розробка законів керування на основі критерію максимального ступеню стійкості.....	Error! Bookmark not defined.
3.2. Побудова контуру керування з формуванням вектора поля.....	Error! Bookmark not defined.

3.4. Порівняння результатів моделювання контурів керування	Error! Bookmark not defined.
Висновки по розділу	Error! Bookmark not defined.
РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ УНІФІКОВАНИХ КОНТУРІВ КЕРУВАННЯ	
ВИКОНАВЧИМИ ПРИСТРОЯМИ З ОСЛАБЛЕННЯМ ПОЛЯ	Error!
Bookmark not defined.	
4.1. Структура контуру керування з формуванням струму i_d по інтегральному закону	Error! Bookmark not defined.
4.2. Контур керування ослабленням поля при постійній напрузі та постійній потужності виконавчого пристрою	Error! Bookmark not defined.
4.3. Контур управління ослабленням поля з використанням оцінки базової швидкості виконавчого пристрою	Error! Bookmark not defined.
4.4. Розробка контуру комбінованого керування ослабленням поля	Error! Bookmark not defined.
Висновки по розділу	Error! Bookmark not defined.
РОЗДІЛ 5 ПЕРСПЕКТИВИ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ НА ОСНОВІ НЕЙРОНИХ МЕРЕЖ	
Error! Bookmark not defined.	Bookmark not defined.
5.1. Вибір структури нейронних регуляторів для керування виконавчими пристроями забезпечення транспортної діяльності	Error! Bookmark not defined.
5.2. Навчання нейронних мереж для побудови контурів керування	Error! Bookmark not defined.
5.3. Керування виконавчими пристроями на основі нейронних регуляторів.....	Error! Bookmark not defined.
Висновки по розділу	Error! Bookmark not defined.
ВИСНОВКИ	Error! Bookmark not defined.
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	13
ДОДАТКИ	129

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ОЗТД – об'єкти забезпечення транспортної діяльності.

СД – синхронний двигун

АД – асинхронний двигун.

ДПС – двигун постійного струму.

ПЧ – перетворювач частоти.

АН – автономний інвертор напруги.

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ШІР – широтно-імпульсне регулювання.

НМ – нейронна мережа.

БП (MLP) – багатошаровий перцептрон (Multi Layer Perceptron)

ЗПП – метод зворотного поширення помилки.

ГА – генетичний алгоритм.

МГА – модифікований генетичний алгоритм.

СК – система керування.

u_d – проекція вектора напруги статора на подовжню ось d в обертаючій системі координат.

i_d – проекція вектора струму статора на подовжню ось d в обертаючій системі координат.

u_q – проекція вектора напруги статора на поперечну ось d в обертаючій системі координат.

i_q – проекція вектора струму статора на поперечну ось d в обертаючій системі координат.

i_{ref} – завдання впливу струму.

ω_r – кутова швидкість ротора.

ω_c – синхронна швидкість поля.

ω_b – базова швидкість.

ω_k – критична швидкість.

M - електромагнітний момент, що розвивається двигуном.

M_c - момент опіру.

L_s - індуктивність статора.

$\vec{\psi}_s$ - потокозчеплення статора у нерухомій системі координат.

ψ_r - потокозчеплення ротора.

L_d - індуктивність подовжній ланці.

L_q - індуктивність поперечній ланці.

R - активний опір ланки.

λ - величина магнітного потоку.

θ - кут оберту ротора.

F - сила тертя .

P_2 - механічна потужність.

z_p - число пар полюсів.

$\varepsilon(t)$ - сигнал помилки.

w_i - вагові коефіцієнти.

b - постійна зміщення.

k_{pr} - коефіцієнт перетворення.

T_{pr} - постійна часу перетворювача.

T_d - постійна часу по осі d .

T_q - постійна часу по осі q .

ВСТУП

Функціонування залізниць України потребує ефективної роботи великої кількості об'єктів забезпечення транспортної діяльності (ОЗТД) (рухомих одиниць, компресорних станцій, навантажувально-розвантажувального обладнання, приводів стрілок та ін.).

Одним з основних напрямків удосконалення ОЗТД на залізничному транспорті є оптимізація технологічних процесів керування виконавчими пристроями. Для цього необхідно будувати ефективні контури керування такими пристроями. Тенденції розвитку контурів керування виконавчими пристроями спрямовані на підвищення коефіцієнта їх корисної дії при зниженні собівартості. Перспективним напрямком є створення інтелектуальних контурів керування, які забезпечують економію енергоресурсів. Для України це має істотне значення, тому що питома витрата енергоносіїв вища, ніж у більшості розвинених промислових країн.

Синтез контурів керування виконавчими пристроями ОЗТД на залізничному та інших видах транспорту традиційно здійснюється на основі лінійних законів керування. Для оптимізації контурів керування виконавчих пристроїв дотепер застосовувалися інтегральні критерії, модульний критерій і критерій симетричного оптимуму. У реальних умовах функціонування різні випадкові фактори можуть привести до втрати стійкості контурів, синтезованих за цими критеріями. Оптимізація контурів керування виконавчими пристроями ОЗТД за критерієм максимального ступеня стійкості дозволяє одержати порівняно прості інженерні співвідношення для вибору параметрів настроювання регуляторів і забезпечити високу якість процесів. Цей критерій дозволяє уникнути недоліків вищевказаних критеріїв за рахунок забезпечення найбільшої стійкості.

У теперішній час удосконалення процесів керування виконавчими пристроями вимагає використання нових перспективних інформаційних технологій. Одним з таких напрямків є використання нейронних мереж (НМ). НМ - це потужний апарат імітації процесів і явищ, що дозволяє відтворювати надзвичайно складні залежності та використовувати його в задачах керування.

Актуальність теми. У зв'язку з широкою номенклатурою виконавчих пристроїв ОЗТД та їх масовим розповсюдженням актуальною є задача удосконалення технологічних процесів керування та експлуатації таких пристроїв. При цьому необхідна уніфікація контурів керування виконавчими пристроями з використанням методів оптимізації, що забезпечить енергозбереження при високій якості процесів керування. Однак керування виконавчими пристроями ускладнюється через наявність ряду невизначеностей у їхньому описі. Невизначеності обумовлені розкидом параметрів виконавчих пристроїв, неточністю знань про механізми, що приводяться в дію, відсутністю повної й достовірної інформації про навантаження й зовнішні впливи, наявністю паразитної динаміки у вигляді пружності виконавчих пристроїв та ін.

Таким чином уніфікація контурів керування на основі методів оптимізації повинна враховувати вказані невизначеності, що дозволить удосконалити технологічні процеси функціонування та обслуговування виконавчих пристроїв.

Значний внесок у розвиток методів керування виконавчими пристроями, методів оптимізації контурів, методів еволюційного підходу до керування внесли вітчизняні та закордонні вчені. Серед них Бабаєв М.М., Бесекерский В.А., Вальмарк О. (Oskar Wallmark), Вінер Н., Вороновський Г.К., Герман-Галкін С.Г., Голуб А.П., Гусевський Ю.І., Дука А.К., Емельянов С.В., Загарій Г.І., Ключев В.І., Колоколов Ю.В., Костюк В.І., Красовський А.А., Кунцевич В.М., МакКоллок В.С. (McCulloch W.C.), Махотіло К.В., Мінський М., Міхайлович З. (Zoran Mihailovic), Небилов О.В., Осмолловський П.Ф., Перельмутер В.М., Петров Б.Н., Піттс В.Х. (Pitts W.H.), Решмін Б.И., Соколовський Г.Г., Сандлеров А.С., Сергіїв С. А., Тунік А.А., Фельбаум А.А., Хайкін С. (Haykin S.), Ципкін Я.З., Чілікін М.Г., Шубладзе О.М., Ямпольський Д.С. та ін. Роботи цих вчених створили теоретичні та методичні основи для побудови ефективних контурів керування об'єктами у різних галузях промисловості та транспорту.

Рішення науково-прикладної задачі, направленої на удосконалення технології функціонування та обслуговування виконавчих пристроїв ОЗТД залізниць на основі уніфікованих контурів керування, дозволяє

стверджувати, що сформульована тема дисертації є актуальною.

Поставлені завдання вимагають використання методів аналізу та синтезу оптимальних контурів керування, створення їхніх математичних моделей і впровадження перспективних технологій побудови контурів керування на базі нейронних мереж і генетичних алгоритмів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Спеціалізовані комп'ютерні системи» Української державної академії залізничного транспорту відповідно до заходів щодо реструктуризації залізничного комплексу України, Закону України "Про ресурсозбереження" (74/ 94-ВР), а також в рамках бюджетних науково-дослідних робіт "Розробка та дослідження алгоритмів оптимального керування електричною передачею локомотивів" (ДР№0100U000821, № інв. 0205U000881) та "Дослідження перспективного гібридного тягового приводу на базі синхронних машин з постійними магнітами" (ДР№0107U000343), у яких здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення технологічних процесів керування виконавчими пристроями ОЗТД залізниць для підвищення якості керування в різних режимах роботи при забезпеченні ресурсозбереження.

Відповідно до мети роботи були поставлені наступні задачі:

1. Виконати аналіз технології керування виконавчими пристроями ОЗТД залізниць для створення оптимальних уніфікованих контурів керування, що забезпечить економію енергоресурсів та спростить їх експлуатацію;
2. Розробити методи керування виконавчими пристроями з метою оптимізації їх швидкісних та механічних характеристик у широкому діапазоні зміни навантажень;
3. Удосконалити математичні моделі контурів керування, які враховують динаміку роботи виконавчих пристроїв різної потужності ОЗТД залізниць;
4. Реалізувати варіанти заміни ПІ-регуляторів нейромережевими структурами та обґрунтувати метод навчання нейронних мереж, що підвищить динамічні властивості контурів керування;

5. Сформулювати рекомендації щодо створення уніфікованих контурів керування виконавчими пристроями ОЗТД різної потужності на основі класичних та нейрорегуляторів.

Об'єкт дослідження - технологічні процеси керування виконавчими пристроями об'єктів забезпечення транспортної діяльності залізниць.

Предмет дослідження - уніфіковані оптимальні контури керування виконавчими пристроями об'єктів забезпечення транспортної діяльності.

Методи дослідження. При рішенні поставлених у роботі завдань використовувався метод перетворення Лапласа - при розробці моделей двигунів виконавчих пристроїв і контурів керування ними; методи теорії автоматичного керування (критерії максимального ступеня стійкості, симетричного оптимуму, модульного оптимуму) при синтезі контурів керування виконавчими пристроями ОЗТД; методи нейрокібернетики й еволюційного підходу - при синтезі й дослідженні нейронного керування; методи комп'ютерного моделювання - для дослідження окремих частин і всієї системи регулювання.

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

1. Вперше:

- запропоновано новий ефективний метод керування виконавчими пристроями рухомих та стаціонарних об'єктів забезпечення транспортної діяльності на залізничному транспорті, який дозволяє удосконалити технологію функціонування виконавчих пристроїв за рахунок розширення області стійкої роботи у широкому діапазоні змін динамічних навантажень і швидкостей і створити контури керування з уніфікованою структурою для агрегатів різної потужності;
- використано критерій максимального ступеня стійкості для оптимізації параметрів настроювання регуляторів контурів підлеглого керування об'єктами забезпечення транспортної діяльності, що спрощує процедуру вибору параметрів настроювання регуляторів і забезпечує спрощення їх експлуатації;

- розроблено структуру сполученого регулятора виконавчих пристроїв на основі нейронних мереж, що забезпечує скорочення тривалості перехідних процесів при їхньому аперіодичному характері і зменшує витрати енергії.

2. Удосконалені:

- моделі контурів керування виконавчих пристроїв рухомих та стаціонарних агрегатів ОЗТД залізниць шляхом доповнення їх ланками, враховуючими динаміку та фізику роботи компонентів виконавчих пристроїв, що дозволяє одержати більш достовірну інформацію про характеристики контурів у статичних і динамічних режимах і реалізувати універсальну модель;
- метод синтезу контурів керування за допомогою комбінації генетичного алгоритму й штучних нейронних мереж, що дозволило скоротити час перехідних процесів за рахунок чого зменшено енерговитрати.

Практична значимість отриманих результатів. У результаті проведених досліджень можна виділити наступні практичні рекомендації:

- розроблено та реалізовано на ПЕОМ математичні моделі оптимальних контурів керування виконавчих пристроїв ОЗТД залізничного транспорту, до складу яких входять: модель автономного інвертора та синхронного двигуна (СД), які дозволили на етапі розробки замінити натурні дослідження моделюванням (підтверджено актом впровадження ВАТ «Електромашина»);

- отримані процедури визначення моменту початку виконання режимів керування, що дозволило реалізувати більш ефективне керування виконавчими пристроями у всьому діапазоні частот обертання, у тому числі вище номінальної: забезпечується підвищення механічної потужності та скорочення процесів керування (підтверджено актом впровадження ВАТ «Ізюмський тепловозоремонтний завод»);

- на основі запропонованих методів керування виконавчими пристроями ОЗТД сформульовані рекомендації щодо створення уніфікованих контурів керування на основі класичних та нейрорегуляторів, що спрощує процедури настроювання регуляторів та підвищує якість процесів керування,

при цьому забезпечується зменшення енерговитрат на виконання різних режимів роботи та більш ефективно використовується потужність.

Результати дослідження використовуються в навчальному процесі, курсовому й дипломному проектуванні (підтверджено актом впровадження УкрДАЗТ).

Особистий внесок здобувача. Основні результати та положення роботи отримані автором самостійно.

Статі [1-3, 7] написані автором самостійно. У працях, що опубліковані у співавторстві, особисто здобувачу належить: у [4] - розробка нового методу регулювання для контурів керування виконавчими пристроями в режимі швидкостей вище номінальної, який використовує обчислення базової швидкості та реалізує необхідні характеристики; у [5] - розробка математичних моделей компонентів контурів керування виконавчими пристроями як частини об'єкта керування; у [6] - розробка моделей для одержання оптимальних параметрів настроювання регуляторів з використанням різних критеріїв.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на: 16 - 20-й міжнародних конференціях «Перспективні системи керування на залізничному, промисловому й міському транспорті» (м. Алушта, 2003 - 2007 рр.); 63 - 69-й міжнародних науково-технічних конференціях кафедр Української державної академії залізничного транспорту й фахівців залізничного транспорту (м. Харків, 2001- 2007 рр.); 12- й міжнародної конференції по автоматичному керуванню «Автоматика-2005»(м. Харків, 2005 р.); наукових семінарах і розширених засіданнях кафедр «Автоматика і комп'ютерні системи керування» і «Спеціалізовані комп'ютерні системи» Української державної академії залізничного транспорту. (м. Харків, 2004- 2007 рр.)

Повністю результати дисертаційної роботи були обговорені та схвалені на розширеному засіданні кафедри «СКС», УкрДАЗТ, 2007р. за участю членів спеціалізованої ради.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 7 основних наукових робіт у виданнях, що затверджені ВАК України як фахові 1 додаткова, 2 тези

доповідей у матеріалах наукових конференцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Демченко Ф.О. Управление движением электропоезда метрополитена. Часть 1. Задача совершенствования технологии управления электропоездом метрополитена // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2002. - № 3.
2. Демченко Ф.О. Управление движением электропоезда метрополитена. Часть 2. Моделирование нагрузок электроподвижного состава // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2002. - № 4,5.
3. Демченко Ф.О. К разработке дискретно-непрерывной модели электропривода. Часть 1. Выбор методов моделирования. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. - № 1. С. 43-47.
4. Управление синхронными двигателями с постоянными магнитами в области скоростей выше номинальной. / Ю.И. Гусевский, Ф.О. Демченко, Г.И. Загарий и др. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. - № 4. - С. 74-79.
5. Моделирование тягового частотного управляемого электропривода на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами / Ф.О. Демченко, Г.И. Загарий, А.К. Дука, Семчук Р.В. и др. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. - № 5,6. - С. 80-86.
6. Демченко Ф.О., Дука А.К. Оптимальное управление автономными электротранспортными средствами // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007. - № 1. С. 80-86.
7. Демченко Ф.О. Оптимизация параметров системы управления электропривода переменного тока с синхронными двигателями с постоянными магнитами // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2007. – Вип. №9 – С. 74 – 86.

8. Демченко Ф.О. Моделирование электромеханического преобразователя поезда метрополитена // 17 міжнародна науково-практична конференція «Перспективні системи управління на залізничному, промисловому та міському транспорті» м. Алушта, 13-15 вересня 2004 р.- Харків, 2004. - №4,5. – 2004. – С. 107.
9. Демченко Ф.О. Моделирование алгоритмов управления электроприводом маневрового тепловоза // Автоматика-2005: Материалы 12-й Международной конференции по автоматическому управлению, - г. Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», - 2005. – Т.2. - С. 57-58.
10. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
11. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Уч. пособ. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
12. Онищенко Г.Б. Электрический привод. Учебник для вузов — М.: РАСХН., 2003. —320 с.
13. Общий курс электропривода: Учебник для вузов / Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф.– М.: Энергоатомиздат, 1992. - 544 с.
14. Белов М.П. Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов. – М: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
15. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат. 1982. – 392с.
16. Драчев Г.И. Теория электропривода. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 137 с.
17. Чиликин М.Г., Сандлеров А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
18. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 560 с.
19. Соколовский. Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 272 с.

20. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоиздат, 201. – 576 с.
21. Wallmark O. On Control of Permanent – Magnet Synchronous Motors in Hybrid - Electric Vehicle Application. Chalmers University of technology Geteborg Sweden, 2004. – 130 p.
22. Rcefenstahl U. Electriche Antreibstechnik – Magdeburg: Otto-von – Gericke – Universitat Magdeburg, 2000. – 400 p.
23. Шубладзе А.М. Способы синтеза систем управления максимальной степени устойчивости // Автоматика и телемеханика – 1980. - №1 – С. 28-37.
24. Цагурия Н.Н., Шубладзе А.М. Способы синтеза оптимальных предельных систем // Автоматика и телемеханика – 1984. - №10 – С.51-59.
25. Шубладзе А.М. Синтез оптимальных линейных регуляторов // Автоматика и телемеханика – 1984. - №12 – С. 22-33.
26. Загарий Г.И., Шубладзе А.М. Методы адаптивного управления для промышленного применения // Автоматика и телемеханика – 1981. - №3 – С. 50-60.
27. Загарий Г.И., Шубладзе А.М. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости – М.: Энергоатомиздат, – 1988. - 104с.
28. Mihailovic Z. Modeling and control design of VSI-FED PMSM drive systems with active load. Virginia Polytechnic Institute, 1998. – 145 p.
29. Levi E., Jones M., Vukosavic S.N.. A Series-Connected Two-Motor Six-Phase Drive with Induction and Permanent Magnet Machines //IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.21, - №1
30. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. – Х.: Основа, 2004 – 210с.
31. Корельский Д.В., Потапенко Е.М., Васильева Е.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами // Радіоелектроніка Інформатика Управління. – 2001. - №2 – С. 155-159.

32. T. Koch. Eisenbahningenieur. – 2002. - № 8, - P. 59 – 65.
33. O. Körner. Elektrische Bahnen. – 2004. - № 11, - P. 463 – 473.
34. Непосредственный привод тяговый привод // Железные дороги мира. – 2005. - № 9. – С. 27- 31.
35. Сравнение концепций механической части трехфазного тягового привода // Железные дороги мира. – 2005. - № 9. – С. 32-40.
36. Вентильные двигатели и их применение на электроподвижном составе / Б.Н.Тихменев, Н. Н. Горин, В. А. Кучумов, В.А. Сенаторов. - М.: Транспорт, 1976. - 280 с.
37. С.Н. Прокофьев, С.В. Волконовский. Усовершенствование системы управления вентильным тяговым приводом // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. - № 1.
38. Раков В.А. Локомотивы и мотор-вагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза.- М: Транспорт – 1979. - 213 с.
39. Toyota Hybrid System. Toyota Press Information. 1997. – 16р.
40. Lexus Hybrid Drive. Lexus Knowledge Center Information. 2001. – 18р.
41. Elektrische Kraftübertragung-Technologie und praktische. Anwendung Soldat und Technik, - Mai, 2003, - P. 22-27.
42. Паластин Л.М. Электрические машины автономных источников питания. - М. «Энергия». 1972. - 463 с.
43. Digital Signal Processing Solution for Permanent Magnet Synchronous Motor. Application Note. Literature Number: BPPA044 Texas Instrument Incorporated, - 1997,- 204 p.
44. Козаченко В. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам // CHIP NEWS. -1999. - №1.
45. Козаченко В., Соловьев А. Новые DSP-микроконтроллеры фирмы Analog Devices ADMC300/330 для высокопроизводительных систем векторного управления электроприводами переменного тока // CHIP NEWS. - 1998.-№5.-С. 16-21.

46. Обухов Н., Горбунов В., Чуев П. Высокопроизводительные встраиваемые системы управления двигателями на базе сигнального микроконтроллера TM8320E241 // CHIP NEWS. - 2000. - №5. - С. 28-32.
47. Luukko J. Direct torque control of permanent magnet synchronous machines – analysis and Implementation. Lappeenranta. 2000. - 172 p.
48. Vyncke T.J. Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motors – An Overview // 3rd Ieee Benelux Researchers Symposium In Electrical Power Engineering 27-28 April 2006, Ghent, Belgium – P. 28-33.
49. Ocen D. Direct Torque Control (DTC) / The thesis of the Universitat Politecnica de Catalunya. - May 2005. – 61 p.
50. Vasile Comnac, Mihai Cernat, Florin Moldoveanu, Ioan Draghici. Sensorless Speed and Direct Torque Control of Surface Permanent Magnet Synchronous Machines using an Extended Kalman Filter // Proceedings of the IEEE Mediterreanean Conferences - 2001.
51. Rashed M. Sensorless Indirect Rotor Field Orientation Speed Control Of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Adaptive Rotor Flux Estimator /M. Rashed, PFA MacConnell, AF Stronach, P Acarnley.// Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005 Seville, Spain, December 12-15, 2005 – P. 647-655.
52. Elbuluk M.E. Neural-Network-Based Model Reference Adaptive Systems for High-Performance Motor Drives and Motion Controls./M.E. Elbuluk , L. Tong, I. Husain // IEEE Transactions On Industry Applications, - 2002. - Vol. 38, № 3.
53. Nahid-Mobardkeh B., Meibody-Tabnr F., F.M. Sargos Nahid-Mobardkeh State and Disturbance Observers in Mechanical Sensorless Control of PMSM. //IEEE International Conference on fndustrial Technology (ICIT). - 2004 – P. 181-186.
54. Lim K.W. A Position Observer for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive / K.W. Lim., K.S. Low, M.F. Rahnan //IECON. – 1994. – Vol. 3. - P. 49-61.
55. Потапенко Е.М., Корельский Д.В., Васильева Е.В. Робастное управление электроприводом с вентильным

двигателем // *Радіоелектроніка, інформатика, управління.* - 2000. - 1. - С. 161-166.

56. Xie Yue. Observer-Based Robust Adaptive Control of PMSM With Initial Rotor Position Uncertainty/ Xie Yue, D. Mahinda Vilathgamuwa, King-Jet Tseng // *IEEE Transactions On Industry Applications*, - 2003 - Vol 39, №3.

57. Nahid Mobarakeh B. A Self-Organizing Intelligent Controller for Speed and Torque Control of a PMSM / B. Nahid Mobarakeh, F. Meibody-Tabar, F.M. Sargos // *Congres International Annuel IEEE-IAS, Rome(Italie).* – 2000. – Vol. 2. – P. 1283-1290.

58. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами / В.Б. Клепиков, К.В. Махотило С.А. Сергеев, И.В. Обруч // *Электротехника.* - 1999 - №5 - С. 2-6.

59. Капылов И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов – М.: Высшая школа.- 2004. - 607с.

60. Капылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа., 2001. – 327 с.

61. Кацман М.М. Электрические машины автоматических устройств. – М.: ФОРУМ, ИНФРА-М., 2002. – 264с.

62. Голуб А.П., Осмоловский П.Ф. Системы подчиненного регулирования электроприводами. – Х.: УЗПИ, 1979. – 64с.

63. Голуб А.П., Осмоловский П.Ф. Системы подчиненного регулирования электроприводами. – Х.: УЗПИ, 1980. – 89с.

64. Решмин Б.И., Ямпольский Д.С. Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. – М.: Энергия, 1975.

65. Фишбейн В.Г. Расчет систем подчиненного регулирования вентильного электропривода постоянного тока – М.: Энергия, 1972. – 134.

66. Ремшмин Б.И. Исследование динамических процессов синхронного двигателя с постоянными магнитами при векторном управлении / *Труды*

конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» - 2002. 681 - 693 с.

67. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288с.

68. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. - М. Физматлит. - 2001.

69. Нейроуправление и его приложение: Кн. 2 / Под. общ. ред. А.И. Галушкина. М.: ИРПЖР, - 2000.

70. Махотило К.В. «Разработка методик эволюционного синтеза нейросетевых компонентов систем управления», Дисс. ... кандидата тех. наук по, — Харьков, ХГПУ, —1998. — 189 с.

71. Вороновский Г.К. Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях. – Х: Изд-во «Харьков». -240с.

72. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев и др.— Х.: ОСНОВА, 1997.— 112 с.

73. Б. Лю. Теория и практика неопределенного программирования. – М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2000. – 416с.

74. Kawato M., Furukawa K., Suzuki A. A hierarchical neural network model for control and learning of voluntary movement // Biological Cybernetics. 1987. - Vol. 57. - P. 169-185.

75. Hierarchical neural network model for voluntary movement with application to robotics / M. Kawato, Y. Uno, M. Isobe, A. Suzuki // IEEE Control Systems Magazine. 1988. - Vol. 8. - P. 8-16.

76. Saiful A, Omatu S. Neuromorphic self-tuning PID controller // Proc. of IEEE ICNN. San Francisco. 1993. P. 552-557.

77. Kuperstein M., Rubinstein J. Implementation of an adaptive neural controller for sensory-motor coordination // IEEE Control Systems Magazine. 1989. - Vol. 9.-P. 25-30.

78. Psaltis O., Sideris A., Yamamura A. A Multilayered neural network controller // IEEE Control Systems Magazine. 1988. Vol. 8. P.17-21.
79. Saertns R.M., Soquet A. A neural controller based on back propagation algorithm // Proc. of First IEE Int. Conf. on Artificial Neural Networks. London. 1989. - P. 211-215.
80. Нейронные сети. MATLAB 6 / Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496с.
81. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem // IEEE First Annual Int. Conf. On Neural Networks San. Diego., 1987. vol 3. P11-13.
82. Muller B., Reinhart J. Neural Networks: an introduction, SpringerVerlag. Berlin: Heidelberg, 1990.
83. Cybenko G. Approximation by superposition of a sigmoidal function // Mathematics 01 Control, Signals and Systems. 1989. - Vol. 2. - P.303-314.
84. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика – М.: Горячая Линия – Телеком, 2004. -143 с.
85. Репин А.И., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И. Технологии искусственного интеллекта в задачах диагностики частичных отказов измерительных каналов АСУТП // Теплоэнергетика. - 2004. - № 10. - С.10-16.
86. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, - 2004. – 344 с.
87. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем: Учеб. пособие. – М: Финансы и статистика, - 2004. – 320с.
88. Паклин Н.Б. Адаптивные модели нечеткого вывода для идентификации нелинейных зависимостей в сложных системах: Дисс. ... к-та техн. наук. – И.: 2004. – 162 с.
89. Гаврилов Г.К. Приближенные методы анализа переходных процессов. – М: «Советское радио», - 1966. – 152с.
90. Оценка эффективности применения адаптивных регуляторов, синтезированных по критерию максимальной степени устойчивости / В.С. Коновалов, А.В. Мамонов, Б.Т. Сытник, Гусев П.В. и

др. // Микропроцессорные системы управления и устройства контроля на железнодорожном транспорте. – Харьков. – 1986. – С.10-17.