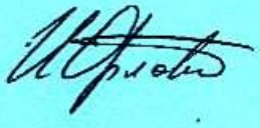
Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ОРЛОВСЬКИЙ ІГОР АНАТОЛІЙОВИЧ



УДК 621.313

СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНИХ РЕКУРЕНТНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електропривода та автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м Запоріжжя

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Клепіков Володимир Борисович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматизованих
електромеханічних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лозинський Андрій Орестович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
заступник начальника науково-дослідної частини

доктор технічних наук, професор
Толочко Ольга Іванівна,
Донецький національний технічний університет,
завідувач кафедри електропривода та
автоматизації промислових установок

доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович,
Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського, директор
Інституту електромеханіки, енергозбереження і
систем управління

Захист відбудеться "15" березня 2012 р. о 14^{30} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків-2, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків-2, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий "04" лютого 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради О. В. Осичев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для складних електротехнічних комплексів, які являють собою електромеханічні системи (ЕМС) з властивими їм нелінейностями, взаємовпливом зв'язків, стохастичним характером зміни параметрів, із розгалуженою кінематикою і нелінійним характером навантаження традиційні методи синтезу не в повній мірі забезпечують відповідність показників регулювання ЕМС вимогам технологічних процесів.

Для коректного вирішення завдання синтезу систем керування ЕМС необхідна ідентифікація об'єкта регулювання з врахуванням чинників, що обумовлюють його складність. Передумови досить точної ідентифікації складної ЕМС, як об'єкта регулювання, і використання цих результатів для вирішення завдань керування створюють сучасні інтелектуальні методи, засновані на фазі-логіці, теорії нейронних мереж (НМ), та методи генетичних алгоритмів (ГА), які дозволяють знаходити глобальний екстремум цільової функції. При цьому згадані вище методи можуть бути використані для синтезу регуляторів з необхідними показниками регулювання, а наявність мікропроцесорних пристроїв у сучасних ЕМС забезпечує можливість їх реалізації.

Для сучасних ЕМС розроблені математичні моделі технологічних процесів різної точності, інформацію з яких слід використовувати сумісно з інтелектуальними методами для забезпечення високої точності ідентифікації у реальному часі моделі об’єкта. Для цього доцільно використовувати рекурентні НМ (РНМ), оскільки їх структура передбачає наявність зворотних зв'язків за вихідними параметрами і забезпечує більшу гнучкість і більшу точність ідентифікації ЕМС.

Для передавання до НМ відомої інформації про ЕМС слід скористатися перетворенням значень параметрів відомої математичної моделі ЕМС у вагові коефіцієнти НМ. Для цього необхідна розробка модіфікованих структур НМ, з врахуванням особливостей ЕМС, і методів синтезу у їх вигляді моделей об'єктів у реальному часі. Такі структури дозволять реалізувати НМ з мінімальним числом вагових коефіцієнтів і забезпечити можливість ідентифікувати параметри ЕМС. Використання інформації про властивості моделі ЕМС дозволить прискорити налаштування систем керування (СК) за заданими критеріями.

Отже проблема забезпечення відповідності параметрів ЕМС вимогам технологічних процесів може бути вирішена шляхом розвитку автоматизованих ЕМС, в частині створення нових і удосконалення існуючих методів і методик на основі запропонованих модифікованих РНМ (МРНМ), як таких, що володіють зазначеними вище достоїнствами. Ця проблема є актуальна і складає напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі електропривода та автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету у рамках завдань держбюджетних НДР МОН України: «Адаптивні і високоінтелектуальні алгоритми керування електродвигунами змінного струму підвищеної якості» (ДР № 0103U000111); «Дослідження і розробка електромеханічних систем і способів автоматизації технологічних процесів» (ДР № 0105U005049), де здобувач був відповідальним виконавцем.

Розроблені методи синтезу автоматизованих ЕМС на основі МРНМ використовуються в межах «Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020

роки» Міністерства транспорту та зв’язку України, затвердженої наказом №1259 від 14 жовтня 2008 року.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження - створення методів синтезу автоматизованих електромеханічних систем на основі модифікованих рекурентних нейронних мереж для забезпечення ефективних показників регулювання.

Для досягнення зазначеної мети поставлені такі наукові задачі.

1. З урахуванням особливостей електромеханічних систем запропонувати структури модифікованих рекурентних нейронних мереж для синтезу в реальному часі моделей, що володіють узагальнюючими властивостями і можливістю ідентифікації параметрів об'єкта.
2. За параметрами режиму роботи електромеханічних систем розробити метод синтезу їх моделей у вигляді модифікованих рекурентних нейронних мереж.
3. Розробити методику ідентифікації параметрів електромеханічних систем за ваговими коефіцієнтами їх моделей у вигляді модифікованих рекурентних нейронних мереж.
4. Запропонувати методики підвищення ефективності керування нелінійними електромеханічними системами зі змінними параметрами інтелектуальними технологіями (нечітка логіка, генетичні алгоритми (ГА), нейронні мережі) з використанням моделей вигляду модифікованих рекурентних нейронних мереж.
5. Запропонувати методику синтезу моделей електромеханічних систем з неповністю визначеною структурою у вигляді модифікованих рекурентних нейронних мереж.
6. Застосувати розроблені методи для синтезу моделей у вигляді модифікованих рекурентних нейронних мереж складної електромеханічної системи мотор-вагонного асинхронного тягового електропривода дизель поїзда, що враховує взаємозв'язану роботу силового устаткування, пружності проміж вагонами, проковзування коліс і виконати на цій моделі ефективне налаштування системи керування.
7. Провести апробацію отриманих наукових результатів шляхами імітаційного моделювання, лабораторного експерименту і промислового випробування.

Об'єктом дослідження – перехідні процеси в електромеханічних системах з інтелектуальними системами керування.

Предмет дослідження – автоматизовані електромеханічні системи на основі модифікованих рекурентних нейронних мереж.

Методи дослідження. В основу досліджень покладені методи: теорії автоматичного керування (при синтезі ЕМС у просторі станів, розрахунку регуляторів, формування знань експертів при синтезі нечітких регуляторів), теорії електропривода (для математичного опису роботи ЕМС, розрахунку її параметрів), теорії ідентифікації (при отриманні аналітичних виразів ідентифікації параметрів ЕМС з вагових коефіцієнтів МРНМ), теорії штучних нейронних мереж (для навчання МРНМ, синтезі структури і навчання нечітких нейронних мереж), теорії нечітких множин (при синтезу нечітких регуляторів), теорії оптимізації, зокрема метод генетичного алгоритму (при синтезі параметрів регуляторів у відповідності заданим критеріям), теорії матриць (для розрахунку і навчання моделей вигляду МРНМ за параметрами режиму роботи ЕМС), теорії різницевих диференціальних рівнянь (при перетворенні математичних моделей ЕМС до вигляду МРНМ), теорії математичного моделювання (для дослідженні створених моделей ЕМС).

Наукова новизна одержаних результатів

1. Отримала подальший розвиток теорія електропривода в частині синтезу інтелектуальних електромеханічних систем керування на основі запропонованих модифікованих рекурентних нейронних мереж.

2. Запропоновані структури модифікованих рекурентних нейронних мереж для ідентифікації лінійних і нелінійних електромеханічних систем з врахуванням їх особливостей.

3. Для нелінійних електромеханічних систем створено метод синтезу математичних моделей вигляду модифікованих рекурентних нейронних мереж з використанням навчання градієнтними алгоритмами за параметрами режиму об'єкта, що дозволило корегувати параметри моделі у реальному часі.

4. Вперше розроблено метод перетворення лінійних і нелінійних математичних моделей електромеханічних систем в моделі вигляду модифікованих рекурентних нейронних мереж, що дозволило визначити структуру нейронних мереж.

5. Вперше запропоновано метод синтезу вагових коефіцієнтів модифікованих рекурентних нейронних мереж аналітичними співвідношеннями за параметрами режиму роботи об'єкта.

6. Вперше розроблено методику ідентифікації параметрів електромеханічних систем за їх моделями вигляду модифікованих рекурентних нейронних мереж, заснований на аналітичному зв'язку між параметрами електромеханічної системи і ваговими коефіцієнтами нейронних мереж, що дозволило одночасно визначати декілька параметрів.

7. Розроблено математичну модель спільної роботи усіх вузлів асинхронного тягового електропривода дизель поїзда з урахуванням вдосконаленого керування дизелем, генератором і тяговими асинхронними двигунами (ТАД), застосування акумуляторних накопичувачів енергії, пружності між вагонами, проковзування коліс і мотор-вагонної тяги, яка є основою синтезу структури моделей вигляду модифікованих рекурентних нейронних мереж.

8. Визначено особливості синтезу математичних моделей вигляду модифікованих рекурентних нейронних мереж електромеханічних систем з нелінійностями типу проміжок і обмеження за параметрами режиму роботи обладнання; синтез застосований для двомасової системи, асинхронного тягового електропривода, механічної частини дизель поїзда, синхронного генератора і дизеля з системою керування.

9. Запропоновано метод зменшення часу пошуку при використанні генетичних алгоритмів параметрів регуляторів на моделі електромеханічної системи вигляду модифікованої рекурентної нейронної мережі за рахунок використання інформації про електромеханічну систему.

Практичне значення одержаних результатів. Для галузей металургійної промисловості та транспорту запропоновані методи ідентифікації в реальному часі математичних моделей ЕМС у вигляді МРНМ і налаштування СК забезпечують підвищення ефективності керування і можливість досліджень нових СК. Метод синтезу моделей ЕМС з неповністю визначеною структурою дозволяє оцінювати параметри ЕМС у неприступних для виміру вузлах, що дає змогу суттєво поліпшити проектування перспективних електромеханічних систем.

Результати моделювання АТЕП ДП ДЕЛ-02 прийняті для використання у моторвагонному депо Христинівка Одеської залізниці при розробці режимних карт руху ДП. Можливість завдання швидкості поїзда з контролера дозволить зменшити кількість перемикань і полегшити умови праці машиніста. Забезпечення роботи дизеля на універсальній

економічній характеристиці і ведення ДП за оптимальними режимними картами дозволяє знизити витрати дизельного палива. Розрахункова економія впровадження складає 150 тисяч гривень на рік. Строк окупності – 1,9 року.

У ВАТ НДІ «Перетворювач» (м. Запоріжжя) прийнята до впровадження система вдосконаленого керування (з додатковими коректорами) дизелем, генератором і ТАД, що враховує особливості мотор-вагонної тяги, забезпечує незначні відмінності (до 2%) рушійних моментів ТАД у різних режимах руху ДП. Застосування гібридного АТЕП ДП з накопичувачами енергії в акумуляторах, згідно дослідженням на математичній моделі, понижує до 20% споживання дизельного палива.

Результати роботи впровадженні у навчальному процесі кафедри електропривода та автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка», зокрема, спеціальності 8.092203 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», що дозволило, у відповідності до зростаючих вимог, реалізувати концепції навчальних технологій при підготовці бакалаврів в курсах «Нетрадиційна автоматизація», «Системи керування електроприводами», спеціалістів і магістрів в курсі «Комп'ютерні технології автоматизації», для магістрів у спецкурсах: “Сучасні методи дослідження систем керування електроприводів”, «Спеціальні задачі моделювання в електромеханічних системах та електроприводах», «Напрямки наукових досліджень у теорії автоматичного керування», а також у практичній підготовці, курсовому та дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Посеред них: методи та методики: перетворення лінійних і нелінійних математичних моделей ЕМС в моделі вигляду МРНМ; синтезу моделей нелінійних ЕМС вигляду МРНМ за параметрами режиму об'єкта; ідентифікації параметрів ЕМС за їх моделями вигляду МРНМ; керування ЕП з паралельною нечіткою корекцією регулятора швидкості; використання нечітких НМ для апроксимації нелінійних залежностей і корекції параметрів регулятора; використання моделі об'єкта вигляду МРНМ при налагоджуванні регуляторів за допомогою ГА.

Уточнена математична модель СК ДП при вдосконаленому керуванні дизелем, генератором і ТАД, застосуванні акумуляторних накопичувачів енергії, урахуванні пружності проміж вагонами, проковзування коліс і мотор-вагонної тяги.

Розроблені особливості синтезу моделей вигляду МРНМ ЕМС з нелинейностями типу проміжок і обмеження, ТАД, механічної частини ДП, синхронного генератора і дизеля з СК за параметрами режиму. Уточнений метод пошуку з використанням ГА оптимальних параметрів СК АТЕП ДП. Виконано порівняння значень параметрів режиму ДП при промислових випробуваннях з його моделью вигляду МРНМ та параметрів режиму моделей двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПСПЗ) вигляду МРНМ і лабораторного стенда.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати докладалися, обговорювалися і отримали позитивні відгуки на Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Алушта, 2005, 2009, 2010 рр.; м. Одеса, 2006, 2011 рр.; Миколаївка, 2007, 2008 рр.); Міжнародних конференціях з керування «Автоматика» (м. Донецьк, 2002 р.; м. Севастополь, 2003 р.; м. Харків, 2005 р.); Міжнародних конференціях «Штучний інтелект. Інтелектуальні і багатопроцесорні системи» (с. Ка-

цивелі, 2004, 2006, 2008 рр.); Міжнародних конференціях «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2006, 2008 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті» (м. Дніпропетровськ, 2007 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Електромеханічні системи, методи моделювання і оптимізації» (м. Кременчук, 2007 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергоресурсозберігання в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2008-2010 рр.), Міжнародних наукових конференціях «Інтелектуальні системи ухвалення рішень і проблеми обчислювального інтелекту» (м. Євпаторія, 2008, 2011 рр.); семінарах Наукової Ради НАН України «Напівпровідникові і мікропроцесорні пристрої в електроенергетичних системах транспорту» (м Харків, 2009 р.) та «Динаміка нелінійних електромеханічних систем» (м. Харків, 2010 р.) та щорічних наукових семінарах кафедри «Електропривод і автоматизація промислових установок» Запорізького національного технічного університету (м. Запоріжжя, 2003-2011 рр.).

Публікації. За результатами досліджень, викладених в дисертаційній роботі, опубліковано 39 статей, у тому числі 35 у наукових фахових виданнях України.

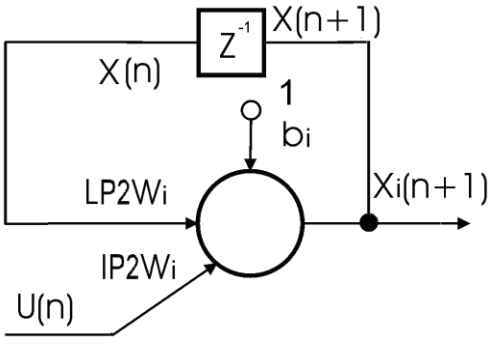
Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації складає 456 сторінок, з них 79 рисунків по тексту та 35 рисунків на 18 сторінках; 20 таблиць по тексту та 6 таблиць на 5 сторінках; списку використаних літературних джерел з 270 найменувань на 28 сторінках;15 додатків на 93 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

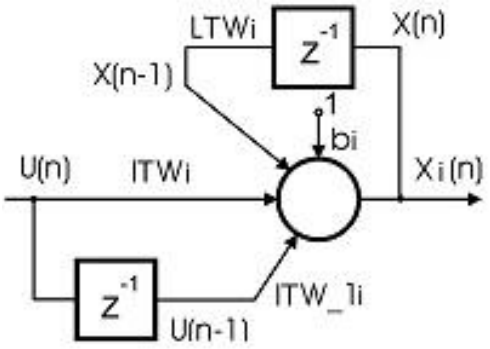
У вступі сформульована науково-прикладна проблема і обґрунтована її актуальність, визначено мету та основні задачі дослідження, сформульовані наукова новизна та практична значимість отриманих результатів.

У **першому** розділі проведене аналіз питань, пов'язаних з актуальністю удосконалення методів синтезу автоматизованих ЕМС; можливістю використання НМ, нечіткої логіки, ГА для забезпечення характеристик якості при змінюванні параметрів під час роботи. З огляду, аналізу і узагальнення науково-технічної інформації показано, що для забезпечення заданих показників регулювання при змінюванні параметрів ЕМС необхідна швидкодіюча система, що дозволяє у реальному часі отримувати математичну модель ЕМС та налагоджувати СК за критеріями оптимуму. Цього можна досягти, якщо об'єднати інформацію про математичні моделі ЕМС та методи пошуку оптимумів, що отримані в системах штучного інтелекту.

а)



б)



в)

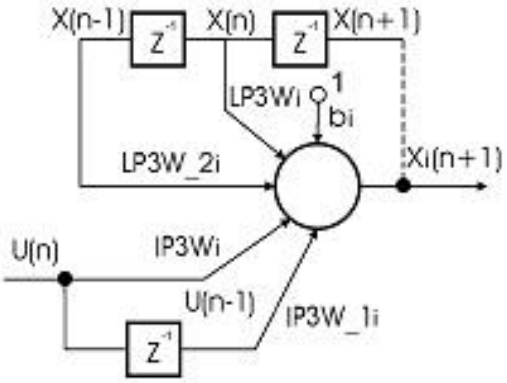


Рис. 1. Структури МРНМ; МРНМП1и МРНМП2 (а), МРНМТ (б), МРНМП3 (в)

Використовувані алгоритми налагоджування СК за допомогою ГА на математичній моделі об'єкта вимагають великих часових і обчислювальних ресурсів. Для прискорення їх роботи потрібне завдання в моделі вихідних значень параметрів ЕМС, часу її моделювання і забезпечення швидкого автоматичного оцінювання якості керування ЕМС з різними регуляторами

Аналіз методів синтезу моделі асинхронного двигуна (АД) у вигляді НМ прямого поширення сигналів з нелінійними функціями активації показав про обмеженість можливостей НМ прямого поширення сигналів при використанні їх як моделі ЕМС, перспективності застосування рекурентних НМ (РНМ) і необхідності розробки спеціальних структур РНМ та методів їх синтезу з використанням особливостей ЕМС, що дозволить забезпечити високу точність моделей. Відзначено, що запропоновані структури НМ повинні мати узагальнюючи властивості і можливість ідентифікації за їх коефіцієнтами параметрів ЕМС.

При синтезі запропонованих структур МРНМ використовується інформація про математичні моделі об'єктів, тому потрібна розробка математичних моделей складних взаємопов'язаних ЕМС, що змінюються. Важливим є застосування розроблених методів для створення ефективної СК мотор-вагонного АТЕП ДП, бо в усьому світі, взагалі, й в Україні, зокрема, більше ніж на 50% залізниць не електрифіковані. Наприкінці розділу сформульовано задачі наукового дослідження, викладеного в дисертаційній роботі.

У другому розділі розроблені методи: перетворення лінійних математичних моделей ЕМС в моделі вигляду МРНМ і синтезу їх за параметрами режиму роботи об'єкта та методика ідентифікації параметрів ЕМС з її моделі вигляду МРНМ. При цьому структури МРНМ складаються за описом моделей динамічних об'єктів у просторі станів. У цих мережах для відтворення динаміки виходи нейронів, що формують вектор стану об'єкту, замкнені на вхідний шар через елементи затримки. Функції активації нейронів - одиничні лінійні, вагові коефіцієнти зміщень дорівнюють нулю. Підвищення точності моделі вигляду МРНМ і швидкості її навчання досягається визначенням структури мережі за відомою інформацією про структуру математичної моделі об'єкта. Для цього лінійний об'єкт описується системою в просторі станів

$$\dot{x} = Ax + Bu \ , \qquad (1)$$

де $x = [x_1, x_2, ..., x_q]^T$ вектор стану об'єкта; $u = [u_1, u_2, ..., u_m]^T$ – вектор вхідних і збурюючих сигналів; A і B - матриці коефіцієнтів, розмірами $q \times q$ і $q \times m$.

Залежно від подання похідної вектора стану отримані різні структури моделей об'єкта (1)

вигляду МРНМ (рис. 1) і аналітичні вирази для визначення їх вагових коефіцієнтів (табл. 1). Прогнозування динаміки на один такт рахунку T виконують НМ МРНМП1 – МРНМП4, зокрема, при $\dot{x} = \big(x(n+1) - x(n)\big)/T$, матриці коефіцієнтів нейронів МРНМП1 для вхідних сигналів $IP1W$ і сигналів зворотного зв'язку $LP1W$ (рис. 1, а) визначаються рівняннями приведеними в четвертому рядку табл. 1, де I - одинична матриця, розміром $q \times q$; $x(n+1)$ і $x(n)$ – вектори станів моделі в дискретні моменти часу $n+1$ і n, $[I - A \cdot T_0]^{-1}$ – зворотна матриця.

Таблиця 1

Різницеві рівняння та вирази для розрахунку вагових коефіцієнтів МРНМ

Вигляд різницевих рівнянь	Вирази для розрахунку вагових коефіцієнтів МРНМ	Познач. МРНМ
$x^{-}(n) = x(n-1) + Ax^{-}(n)T + Bu(n)T$	$L1W = [I - A \cdot T]^{-1}$ $I1W = [I - A \cdot T]^{-1} \cdot B \cdot T$	МРНМ1
$x(n) - x(n-1) = 0{,}5T \cdot$ $\cdot \left[\begin{array}{l} A \cdot (x(n) + x(n-1)) + \\ + B \cdot (u(n) + u(n-1)) \end{array} \right]$ (рівн. Тастіна)	$ITW = 0{,}5T \cdot [I - 0{,}5T \cdot A]^{-1} \cdot B$, $ITW_1 = 0{,}5T[I - 0{,}5TA]^{-1} B$, $LTW = [I - 0{,}5TA]^{-1} \cdot [I + 0{,}5TA]$	МРНМТ
$x^{+}(n+1) = x(n) + Ax(n)T + Bu(n)T$	$LP1W = [I + A \cdot T]$, $IP1W = B \cdot T$	МРНМП1
$x(n+1) = (x^{-}(n+1) + x^{+}(n+1))/2 =$ $= 0{,}5 \times [[I + A \cdot T] + [I - A \cdot T]^{-1}] \cdot x(n) +$ $+ 0{,}5 \times [B + [I - A \cdot T]^{-1} \cdot B] \cdot T \cdot u(n)$	$LP2W = 0{,}5[[I + AT] + [I - AT]^{-1}]$ $IP2W = 0{,}5[B + [I - AT_0]^{-1} B]T$	МРНМП2
$x(n+1) - x(n) = 0{,}5T \cdot$ $\cdot \left[\begin{array}{l} A \cdot x(n+1) + B \cdot u(n+1) + \\ + A \cdot x(n) + B \cdot u(n) \end{array} \right]$	$IP3W = 1{,}5TB$, $IP3W_1 = -0{,}5TB$ $LP3W = I + 1{,}5T \cdot A$, $LP3W_2 = -0{,}5T \cdot A$	МРНМП3
$x(n+1) = [I - 0{,}5TA]^{-1} \cdot [I + 0{,}5TA]x(n) +$ $+ 1{,}5T[I - 0{,}5TA]^{-1} \cdot Bu(n) -$ $- 0{,}5T[I - 0{,}5TA]^{-1} Bu(n-1)$	$IP4W = 1{,}5T[I - 0{,}5TA]^{-1} B$, $IP4W_1 = -0{,}5T[I - 0{,}5TA]^{-1} B$, $LP4W = [I - 0{,}5TA]^{-1} \cdot [I + 0{,}5TA]$	МРНМП4

Більш точне обчислення похідної досягається для середніх її значень на попередньому і наступному тактах рахунку. Якщо змінювання вектора вхідного сигналу за час T відбувається повільніше, ніж процеси усередині динамічного об'єкта, то модель реалізується у вигляді МРНМП2 при умові $u(n) \approx u(n+1)$. Модель без цієї умови реалізується МРНМП3. За умови однакового змінювання тільки вхідних сигналів на попередньому і наступному тактах рахунку, для зменшення числа зворотних зв'язків формується МРНМП4. При опису моделі об'єкта формулою Тастіна, синтезовані МРНМТ, в яких додаються затримані на такт рахунку вхідні сигнали та матриця вагових коефіцієнтів - ITW_1 (рис 1, б).

Розроблений метод перетворення математичних моделей лінійних об'єктів дозволяє синтезувати їх моделі вигляду МРНМ з прогнозуванням і без прогнозування динаміки, оцінити складність структур і аналітичних виразів розрахунку вагових коефіцієнтів для цих моделей, що дає

можливість вибрати для конкретного об'єкта і поставленого завдання мінімальну структуру МРНМ, що забезпечує необхідну точність та дозволяє зменшити час синтезу МРНМ за параметрами режиму об'єкта.

Дослідження структур МРНМ виконане на прикладі синтезу моделей тиристорного електропривода постійного струму (ТЕППС). Такий привод має перетворювач і двигун, робота яких в лінеаризованому вигляді описується системою

$$T_\mu\, du_Д/dt + u_Д = kU, \quad T_e\, di/dt + i = R^{-1}u_Д - R^{-1}\tilde{n}\hat{O}\omega, \quad J\, d\omega/dt = \tilde{n}\hat{O}i - M_C \Big\}, \quad (2)$$

де k, T_μ –коефіцієнт посилення і постійна часу тиристорного перетворювача; R, T_e – активний опір і електромагнітна постійна часу якірного кола; $c\Phi$ – добуток постійної двигуна на номінальний магнітний потік двигуна; J – зведений до вала двигуна момент інерції. Для цієї системи $x = [u_Д, i, \omega]^T$, $u = [U, M_C]^T$.

Виконані перетворення моделі (2) в моделі вигляду МРНМ за рівняннями табл. 1. Результати моделювання ТЕППС з параметрами: R=0,476 Ом; T_μ=0,01с; k=17,55; $c\Phi$=0,634 В·с; T_e=0,159 с; J=0,144 кг·м^2 і його моделей вигляду МРНМ при подачі випадкових послідовностей напруги U і статичного момента опору механізму (далі момента опору) M_C показали, що усі розраховані моделі мають високу точність. Проте, в мережі МРНМП3 із-за наявності двох зворотних зв'язків виникають коливання координат ЕП. Значення помилок моделей МРНМТ і МРНМП4 дуже близькі між собою: для кутової швидкості (далі швидкості) помилки не перевищують 1,4 %, для струму якоря – 5 %, для напруги на двигуні – наближаються до нуля. Помилки для МРНМП2 у декілька разів менші, ніж для МРНМТ і МРНМП4. Мережа МРНМП1 має просту структуру, найбільш прості аналітичні вирази, що зв'язують матриці A і B об'єкта з ваговими коефіцієнтами мережі (табл. 1), має високу точність і здійснює прогнозування вихідного сигналу. Отже в подальших дослідженнях при синтезі моделей нелінійних об'єктів вигляду МРНМ за основу узята ця мережа.

За розробленим методом визначені вагові коефіцієнти МРНМ за параметрами режиму роботи за допомогою ГА. Метод включає: визначення структури МРНМ, формування мінімальної задаючої послідовності сигналів, вибір параметрів ГА, завдання фітнес-функції для оцінювання якості моделі. Похибка відпрацювання сигналів моделями ТЕППС вигляду МРНМ склала 2-10%. Порівняння різних способів організації задаючих послідовностей показало, що точність моделей при роздільному пошуку вагових коефіцієнтів кожного нейрона в 2-5 разів краще, ніж при спільному пошуку для всіх нейронів. Також реалізована модель ТЕППС у вигляді схеми з трьома МРНМ першого порядку і виконана корекція алгоритму навчання РНМ Эльмана з використанням інформації про об'єкт, при цьому відносна похибка відпрацювання координат моделлю менше 0,5%.

Отримані вирази для ідентифікації параметрів ТЕППС з його моделей у вигляді МРНМП1 (система (3)) і МРНМП2.

$$\left.\begin{array}{l} T_{\mu} = T \cdot (1 - LP1W11)^{-1},\ \ k = IP1W11 \cdot (1 - LP1W11)^{-1},\ \ T_d = T \cdot (1 - LP1W22)^{-1}, \\ T_m = -T(1 - LP1W22)LP1W21(IP1W32)^{-1}(LP1W23)^{-2},\ \ R_d = (1 - LP1W22)/LP1W21, \\ c\Phi = -LP1W23/LP1W21,\ \ \ J = -T/I1W32\ ,\ \ L_d = T/LP1W21\ . \end{array}\right\} \quad (3)$$

Похибка ідентифікації параметрів не перевищує 0,03% при обчисленні вагових коефіцієнтів МРНМ з точністю до п'яти значущих цифр.

У третьому розділі розроблені методи розрахунку і навчання моделей вигляду МРНМ нелінійних ЕМС з використанням інформації про структуру їх математичних моделей і параметрів режиму. Виконана ідентифікація параметрів ЕМС з їх моделей вигляду МРНМ і перевірені розроблені методи на реальному обладнанні.

Нелінійності в МРНМ реалізуються розширенням вхідного простору з подальшою лінійною комбінацією нових змінних. Нелінійності коефіцієнтів різницевих рівнянь від однієї змінної з високою точністю представлені у вигляді степеневого ряду. Мережі, що мають розширення вхідного простору у вигляді степеневих залежностей, названі степеневими РНМ (СРНМ).

Розроблено метод перетворення відомої математичної моделі об'єкта в модель вигляду СРНМ, що дозволяє визначити її структуру. Матриця A при використанні степеневого ряду m-го порядку і матриця B для ряду r-го порядку системи (1) мають вигляд

$$A = A_m X^m + A_{m-1} X^{m-1} + ... + A_1 X + A_0, \quad B = B_r U^r + B_{r-1} U^{r-1} + ... + B_1 U + B_0\ ,\Big\} \quad (5)$$

де X – діагональна матриця стану розміру $q \times q$, U – діагональна матриця вхідних сигналів. Тоді вагові коефіцієнти СРНМ визначаються виразами

$$LW_m = A_m T,\ LW_{m-1} = A_{m-1} T, ... LW_0 = A_0 T + I,\ IW_r = B_r T,\ \ IW_{r-1} = B_{r-1} T, ... IW_0 = B_0 T.\Big\} \quad (6)$$

Для визначення вагових коефіцієнтів СРНМ за параметрами режиму ЕМС запишемо систему (1), з урахуванням систем (5) і (6) таким чином:

$$x_n = (LW_m X_{n-1}^m + ... + lW_1\ X_{n-1} + LW_0\ ) x_{n-1} + (IW_r\ U_n^r + ... + IW_1\ U_n + IW_0\ ) u_n\ . \quad (7)$$

Матриця $LW = [LW_m, ..., LW_0\ ]$ (кожен елемент якої є матриця розміру $q \times q$) і матриця $IW = [IW_r\ , ..., IW_0\ ]$ (кожен елемент - матриця розміру $q \times k$) невідомі. Загальне число невідомих $N = (m+1)q^2 + (r+1)qk$. При $M+1$ ($M > N$) послідовних вимірів вхідного вектора і вектора стану складається система з M рівнянь. Позначимо значення векторів в лівій частині системи (8) протягом M тактів у вигляді матриці $X_M = \left[x_n\ x_{n-1}\ ...x_{n-M+1}\right]^T$, розмірністю $(M \times 1)$, кожен елемент якої має розмірність $(q \times 1)$. Позначимо через $X_{M,u}$, матрицю степенів сигналів стану об'єкта і степенів вхідних сигналів системи (розміру $(m+k+2) \times M$), елементи якої, визначувані через x, мають розмірність $(q \times 1)$, елементи, визначувані через u, мають розмірність $(k \times 1)$, тоді систему з M рівнянь можна представити у виді $X_M = (W \cdot X_{M,u})^T$, де $W = \left[LW_m, LW_{m-1}, ..., LW_0\ , IW_r\ , IW_{r-1}, ..., IW_0\ \right]$.

Якщо число рівнянь дорівнює числу шуканих коефіцієнтів ($M = N$), то матриця W визначається через зворотну матрицю $X_{M,u}^{-1}$ (8). Якщо $M > N$, матриця W обчислюється за допо-

могою псевдозворотної матриці $X^{+}_{M,u}$ (9).

$$W = (X_M)^T \cdot X^{-1}_{M,u} \ . \qquad (8) \qquad\qquad W = (X_M)^T \cdot X^{+}_{M,u} \ . \qquad (9)$$

Забезпечення точної роботи моделі в перші моменти часу моделювання досягається завданням початкових станів в часових затримках СРНМ.

Отримані у вигляді СРНМ моделі об'єкта, що складається з джерела живлення, нелінійного підсилювача, навантаження у вигляді послідовного з'єднання індуктивності і нелінійного активного опору. Розглянуті випадки, коли нелінійність коефіцієнта підсилення представляє різні степеневі залежності від ЕРС джерела живлення, а опори від струму. Структура СРНМ обиралася в точній відповідності з моделлю об'єкта, коефіцієнти визначалися за рівнянням (9). Результати моделювання показали високу точність моделей. Відносна помилка не перевищувала 0,66%. Була розроблена модель у вигляді СРНМ і оцінена її точність для ТЕП з ДПСПЗ при безперервному струмі якоря з різними нелінійними залежностями, відмінними від степеневих, а саме: коефіцієнта передачі тиристорного перетворювача від керуючої напруги, магнітного потоку від струму двигуна, активного опору від модуля струму двигуна та момента інерції механізму від швидкості. Постійна часу перетворювача і момент опору прийняті такими, що дорівнюють нулю.

Структури СРНМ мали три рекурентні нейрони і один вхідний сигнал. Вхідні і вихідні сигнали нормалізувалися. Розрахунок виконувався на всьому наборі даних. За результатами моделювання у СРНМ другого, п'ятого, і дев'ятого степенів відносні помилки для швидкості не перевищували 5,3, 0,9 і 0,54 % відповідно.

При нелинейностях коефіцієнтів рівнянь від декількох змінних і їх похідних вони з високою точністю подаються у вигляді поліномів. Моделі таких об'єктів виконуються у вигляді поліноміальних РНМ (ПРНМ). Математичною основою ПРНМ є рекурентні моделі з використанням поліноміальної апроксимації для опису існуючих нелинейностей. Розроблені методи перетворення нелінійної математичної моделі об'єкта в модель вигляду ПРНМ (рис. 2), та розрахунку і навчанням ПРНМ за параметрами режиму роботи об'єкта.

У нелінійній системі рівнянь (1) елементи матриць A і B в загальному випадку є нелінійними від усіх елементів вектора стану об'єкта, керуючих і збурюючих сигналів та їх похідних. Рівняння об'єкта (1) має вигляд

$$\dot{x} = CY \ , \qquad (10)$$

де $Y = [x_1, x_2, ..., x_q, u_1, u_2, ..., u_m]^T = [y_1, y_2, ..., y_K]^T$ – вектор, що об'єднує вектори стану об'єкта і вхідних сигналів; C – матриця, що об'єднує матриці A і B. Введено вектор Z, що об'єднує величини, від яких є не лінійності, розміром $R = K(P+1)$,

$$Z = [z_1,..., z_R]^T = [y_1,..., y_K, dy_1,..., dy_K, d^2y_1,..., d^2y_K,..., d^Py_1,..., d^Py_K]^T, \qquad (11)$$

де $d^i y$ – i-ті похідні елементів вектора Y. Кількість похідних для усіх елементів Y обрано однаковою и такою, що дорівнюю P. Різницеве рівняння об'єкта при обчисленні похідної на наступному такті має вигляд

$$x_n = x_{n-1} + TCY \ . \qquad (12)$$

Вагові коефіцієнти ПРНМ при перетворенні математичної моделі розраховуються за формулою

$$W = Pol_r(TC)\ , \tag{13}$$

тоді, елементи матриці вагових коефіцієнтів ПРНМ для j зв'язку i-го нейрона розраховуються за формулою $w_{ij} = pol_r(Tc_{ij})$, де: Pol_r і pol_r – матриця і вектор коефіцієнтів поліномів степеня r, обчислені при поліноміальному розкладанні виразів, що знаходяться в дужках.

Розраховані моделі у вигляді ПРНМ ТЕП з ДПСПЗ, що описуються системою

$$\left.\begin{aligned} &T_\mu\left(dU/dt\right)+U = k(U_Y)\cdot U_Y,\\ &L(I,D)\left(dI/dt\right)+IR_d = U - c\Phi(I,D)\omega,\\ &J(\omega)\left(d\omega/dt\right) = c\Phi(I,D)\cdot I - M_C\ , \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

де U_Y – напруга керування; M_C – момент опору; U – напруга на затискачах двигуна; $\boldsymbol{I}$ і ω – якірний струм і швидкість двигуна; $k(U_Y)$ і T_μ – коефіцієнт підсилення, що залежить від U_Y, і усереднене значення постійної часу тиристорного перетворювача; R_d і $L(I,D)$ – еквівалентні активний опір і індуктивність кола постійного струму, що залежить від струму і похідної струму $D = dI/dt$; $c\Phi(I,D)$, – добуток постійної двигуна c на значення магнітного потоку двигуна, що залежить від струму і похідної струму; $J(\omega)$ – зведений до вала двигуна момент інерції привода, який залежить від швидкості. Похідна момента інерції при роботі електропривода мала не велике значення, тому в рівняннях не враховувалася. Для системи (14) – $x = [U, I, \omega]^T$, $u = [U_y, M_C]^T$, $Z = [U, I, \omega, U_y, M_C, D]^T$.

За виразом (13) перетворена математична модель ТЕП з ДПСПЗ (14) в модель у вигляді ПРНМ (рис. 3).

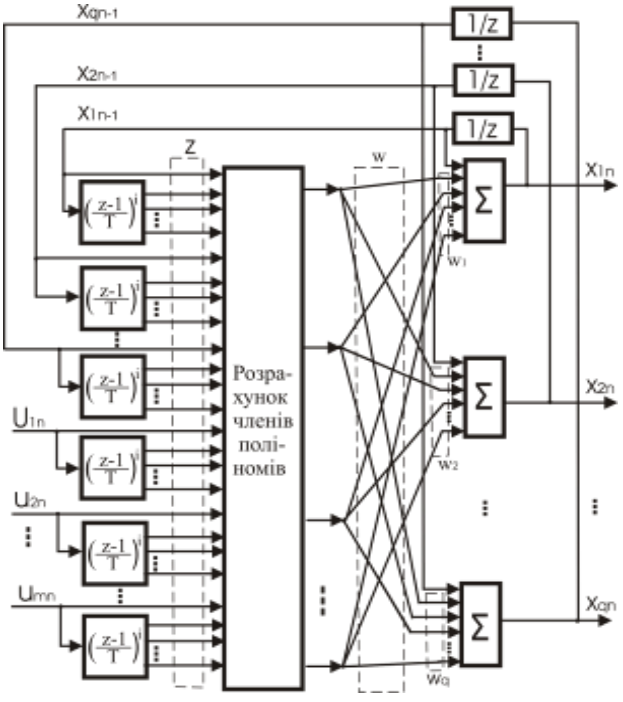


Рис. 2. Структурна схема ПРНМ

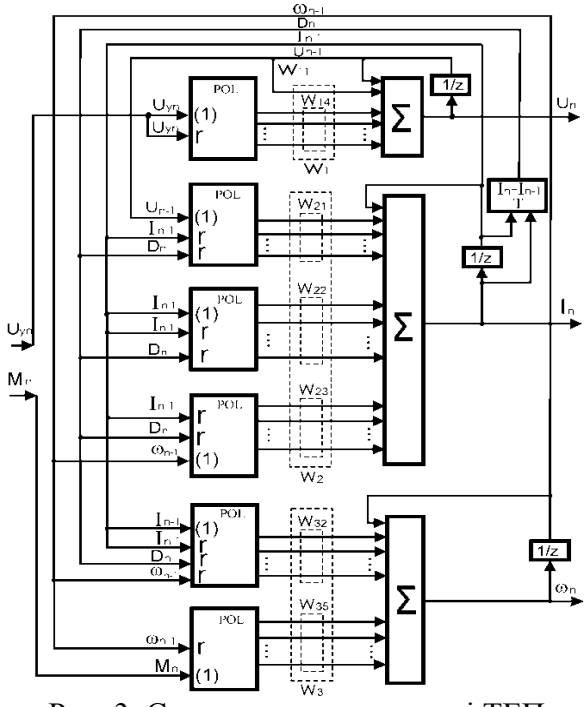
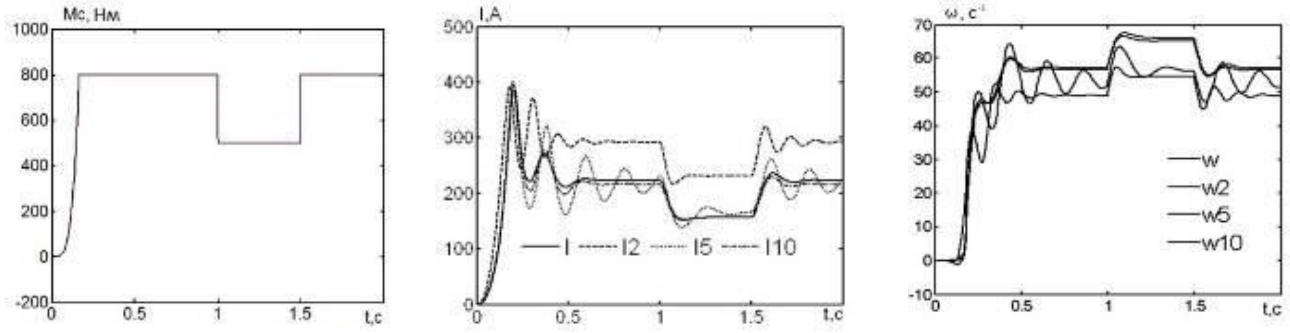


Рис. 3. Структура схема моделі ТЕП з ДПСПЗ вигляду ПРНМ

Усередині поліноміального блока POL кожний вхідний сигнал позначається числом без дужок, наприклад "r", при цьому вихідні сигнали блока містять поліноміальні члени з усіма степенями від 0 до "r" цієї змінної. Якщо число біля вхідного сигналу взяте в дужки, наприклад "(1) ", то вихідні сигнали блока містять добуток поліноміальних членів на цю змінну в степені, вказаного в дужках.

Розрахунок і дослідження моделей вигляду ПРНМ виконано для ТЕП з ДПСПЗ, що складається з двигуна типу МП- 62 з такими параметрами: $U_{ном} = 220$ В; $I_{ном} = 260$ А; $\omega_{ном}$=53,4 с$^{-1}$; с=78,5; $\Phi_{ном}$=0,048 Вб; $L_{Я}$=0,00475 Гн; L_{δ}=0,0037 Гн; $J_{Д}$=0,56 кг·м^2; приймалися: T_{μ}=0,01с; R_d=0,0647 Ом та СІФК з лінійною опорною напругою. Задавалися характеристика намагнічування двигуна $\Phi = f(I, D)$ і залежність сумарної індуктивності якірного кола $L = f(I, D)$. Для підвищення точності нормалізовані сигнали на входах "r" блока POL. Досліджений вплив степеня поліномів (другого, п'ятого і десятого) з використанням і без використання нормалізації вхідних сигналів на точність моделей вигляду ПРНМ.

При моделюванні на вході перетворювача задавався лінійно зростаючий сигнал від 0 до 5,3 В протягом 0,35 с, при цьому графік момента опору зображений на рис. 4, а. На рис. 4, б, в, відповідно, наведені залежності струму і швидкості двигуна при моделюванні процесів в ТЕП з ДПСПЗ (14) (безперервні лінії) і в його моделях вигляду ПРНМ при використанні поліномів другого (штрихові лінії), п'ятого (пунктирні) і десятого (штрих-пунктирні) степенів. Точність моделей істотно зростала з використання поліномів більш високих степенів. Статична і динамічна похибки ПРНМ десятого степеня для струму і швидкості не перевищують 3% і 1% відповідно.



а) б) в)

Рис. 4. Результати моделювання ТЕП з ДПСПЗ і його моделей у вигляді ПРНМ (число біля змінної вказує степінь полінома)

Для отримання математичної моделі об’єкта під час роботи розроблений метод розрахунку вагових коефіцієнтів ПРНМ за параметрами режиму. Об'єднуючий вектор Y подамо в нормалізованому вигляді: $\overline{Y} = [\bar{y}_1, \bar{y}_2, ..., \bar{y}_K]^T$, де: $\bar{y}_i$ - нормалізоване значення i-ої змінної вектора Y. Виходи блоків POL позначимо векторами h_{ij} з такими ж індексами, як у елементів векторів вагових коефіцієнтів w_{ij} і елементів c_{ij} матриці C. В загальному випадку для степеня полінома r при нелінійній залежності елементів c_{ij} від усіх K елементів вектора $\overline{Y}$ розмірність вектора h_{ij} дорівнює $(r+1)^K \times 1$. З урахуванням прийнятих позначень систему (12)

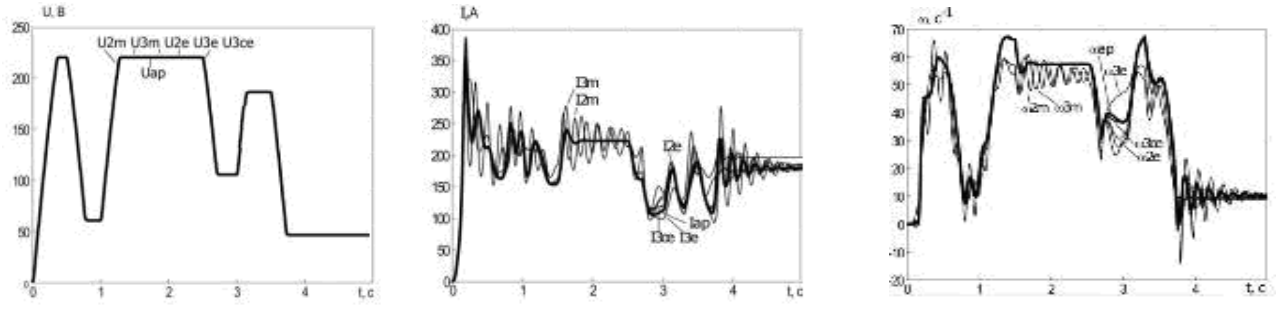
представимо у вигляді (15), де $\Delta x_{in} = x_{in} - x_{in-1}$; h_{in} – вектори-стовпці, отримані додаванням відповідно до векторів h_{i1n} знизу послідовно елементів векторів-стовпців h_{i2n}, …, h_{iKn}; w_i – вектори-рядки, отримані додаванням відповідно до векторів-рядків w_{i1} справа послідовно елементів векторів-рядків w_{i2},…, w_{iK}.

Число невідомих коефіцієнтів поліномів степеня r для K сигналів одного різницевого рівняння визначається виразом $N_C = (q+m)\cdot(r+1)^K$. Для розрахунку невідомих коефіцієнтів ПРНМ вимірюються вхідні сигнали і сигнали вектора стану об'єкта в послідовних $(M \geq N_C + 1)$ тактах рахунку. Тоді кожне з рівнянь системи (15) дає M рівнянь: $w_i^* h_i^* = \Delta x_{in}^*$, де $w_i^* = [w_i,...,w_i]^T$ - вектор з однаковими елементами розміру $(M \times 1)$; $h_i^* = [h_{in},...,h_{in-M+1}]$, $\Delta x_{in}^* = [\Delta x_{in},...,\Delta x_{in-M+1}]^T$. При $M = N_C + 1$ матриця вагових коефіцієнтів визначається виразом (16), при $M \neq N_C + 1$ – виразом (17)

$$w_i h_{in} = \Delta x_{in},\ i = 1,...,q \quad (15), \qquad w_i^* = \Delta x_{in}^* (h_i^*)^{-1}. \quad (16), \qquad w_i^* = \Delta x_{in}^* (h_i^*)^{+}. \quad (17)$$

Розраховані моделі у вигляді ПРНМ ЕП з ДПСПЗ другого НМ2м, НМ2е і третього НМ3м, НМ3е степеня, а також третього степеня з обмеженням сумарного степеня членів полінома до трьох НМ3се, обчислені перетворенням математичної моделі ЕП (НМм) та за параметрами режиму (НМе). Вагові коефіцієнти НМ обчислені за параметрами режиму залежать від режимів роботи ЕП і довжини послідовності даних.

На рис. 5, б. в, г відповідно, показані сигнали напруги, струму і швидкості двигуна для моделей вигляду ПРНМ і моделі за рівняннями (14). Для порівняння точності моделей в табл. 2 наведені максимальні похибки для двох інтервалів часу роботи: від нульової до другої секунди (для даних, що використовувались для розрахунку) і з другої до п'ятої секунди (тестові дані). Похибки моделей, що обчислені в інтервалі 2-5 секунди мають значення близькі до максимальних похибок ПРНМ, що обчислені перетворенням математичної моделі (16). Похибки моделей в розрахунковому інтервалі часу 0-2с, менше похибок ПРНМ, обчислених за математичною моделлю.



а) б) в)

Рис. 5. Результати моделювання ТЕП з ДПСПЗ і його моделей у вигляді ПРНМ

Порівняння результатів розрахунку ПРНМ третього степеня з обмеженням сумарного степеня сигналів (НМ3се), з НМ3е виявило, що разом із зменшенням числа членів поліномів з 37 до 31, така мережа має вищу точність на обох інтервалах часу (помилки відпрацювання координат менше 5,3 %).

Для спрощення структури МРНМ і забезпечення високої точності моделі на

Таблиця 2

Максимальні похибки ПРНМ

Степень ПРНМ	Інтервал часу	ПРНМ	Максимальні похибки в %		
			U	I	ω
3	0-2с	НМ3м	0,15	24,6	14,9
3	2-5с	НМ3м	0,15	15,4	19,4
3	0-2с	НМ3е	0.005	6,42	2,24
3	2-5с	НМ3е	0,005	17,9	27,6
3с	0-2с	НМ3се	0.005	6,42	1,94
3с	2-5с	НМ3се	0,005	4,74	5,22

вході НМ використана структура функціональних перетворень сигналів, що відома з математичної моделі. Така НМ названа функціональною РНМ (ФРНМ). В структурній схемі ФРНМ замість блоку «Розрахунок членів поліномів (рис. 2) встановлено блок «Функціональних перетворень сигналів».У блоці функціонального перетворення сигналів нелінійності можуть реалізовуватися, як поліномами, так і іншим способом. Окремим випадком ФРНМ є ПРНМ. Метод синтезу моделей у вигляді ФРНМ досліджений для ТАД при живленні його від чисто синусоїдного джерела і від автономного інвертора напруги з ШІМ, а також для моделі ЕП з ДПСПЗ, пружністю, демпфуванням і люфтом.

Асинхронний двигун має нелінійні параметри і нелінійності у вигляді перехресних зв'язків. Виконані розрахунки і дослідження моделей ТАД у вигляді ФРНМ за його математичній моделі і за параметрами режиму роботи. Модель ТАД подана в нерухомій (відносно статора) системі координат в просторі станів, де $x=[\psi_{r\alpha},\ \psi_{r\beta},\ I_{s\alpha},\ I_{s\beta},\ \omega]^T$ – в ектор стану, $u=\left[U_{s\alpha},\ U_{s\beta},\ M_c\right]^T$ – вектор вхідних і збурюючих сигналів. Вектор Z з урахуванням змінних, отриманих в результаті функціональних перетворень має вигляд $Z=[\psi_{r\alpha},\ \psi_{r\beta},\ I_{s\alpha},\ I_{s\beta},\ \ \omega,\ U_{s\alpha},\ U_{s\beta},M_c,\ D_1,\ D_2,D_3,\ D_4]^T$, де $D_1=\psi_{r\alpha}\omega$, $D_2=\psi_{r\beta}\omega,\ D_3=\psi_{r\beta}I_{s\alpha}$ і $D_4=\psi_{r\alpha}I_{s\beta}$ змінні функціональних перетворень; $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$ – ортогональні проекції узагальненого вектора напруги статора ТАД на осях α і β нерухомої (відносно статора) ортогональної системи "$\alpha-\beta$"; $\psi_{r\alpha}$ і $\psi_{r\beta}$ та $I_{s\alpha}$ і $I_{s\beta}$ – проекції на осі "α" і "β" векторів потокозчеплення ротора ТАД та струму статора.

Виконаний розрахунок коефіцієнтів ФРНМ за параметрами режиму роботи ТАД за рівнянням (17). Для мінімізації часу розрахунку формувалися набори з вибраних фрагментів даних режиму двигуна, здійснювалося їх розрідження (використання одного значення з ряду послідовних значень). Досліджувалася модель двигуна АД906У1, потужністю $P_{ном}$=240 кВт. Відміна значень більшості вагових коефіцієнтів ФРНМ, знайдених за параметрами режиму, від отриманих перетворенням математичної моделі не перевищує 5 %. При живленні ТАД від АІН з ШІМ є нульові значення напруги статора, що зажадало розробки окремого методу синтезу моделі ТАД у вигляді ФРНМ за параметрами режиму роботи і ідентифікації параметрів. Це дозволило отримати відносні помилки відпрацювання координат моделями й ідентифікації параметрів ТАД менше 0,2% і 7% відповідно.

Зниження часу пошуку коефіцієнтів МРНМ досягається використанням основної переваги НМ – їх навчання, при якому при отриманні нових даних відбувається коригування градієнтними алгоритмами, знайдених раніше коефіцієнтів. Це дозволяє коригувати значення коефіцієнтів диференціального рівняння, що описує об'єкт, який змінюється, за змінюванням у кожному такті часу його рішення. При навчанні не вимагається обчислення псевдозворотних матриць

великої розмірності.

Наявність функціональних перетворень сигналів на вході МРНМ призводить до необхідності змінювання відомих алгоритмів навчання РНМ, яке полягає в додатковому обчисленні приростів вихідних сигналів і векторів h_i. Це дозволяє навчати МРНМ алгоритмами навчання поодинокого не рекурентного нейрона. При навчанні мінімізуються сумарні квадратичні помилки E_i (i – номер нейрона) між приростами елементів вектора стану і приростами вихідних сигналів МРНМ при однаковій послідовності вхідних сигналів за залежностями:

$$E_i = 0{,}5\sum_{n=1}^{N_V} e_{in}^2, \qquad e_{i_n} = \Delta x_{in} - \Delta g_{i_n}, \tag{18}$$

де e_{i_n} – помилка виходу i-го нейрона в n-му такті рахунку; N_V - об'єм повчальної вибірки; $\Delta g_n = g_{in} - g_{in-1}$ – різниця в n-му такті між поточним g_{in} і попереднім g_{in-1} значеннями i-го елемента вихідного вектора МРНМ.

Корекція коефіцієнтів i-го нейрона (вектор w_i) на основі градієнтного пакетного методу навчання здійснюється за формулами:

$$\partial E_{i_n} / \partial w_{ikn} = -e_{in} \cdot h_{i_{kn}}, \qquad w_{ikm} = w_{ikm-1} - \sum_n \eta \, \partial E_{i_n} / \partial w_{ikn} = w_{ikm-1} + \sum_n \eta \cdot e_{in} \cdot h_{i_{kn}}, \tag{19}$$

де $h_{i_{kn}}$ $-k$-ий елемент вектора h_i для n-го такту, η - коефіцієнт навчання.

Розрахунок і навчання моделей у вигляді ПРНМ виконувалися для ТЕП з ДПСПЗ за даними перших двох секунд, перевірка роботи - за даними наступних трьох секунд. Нелінійності в ПРНМ подавалися поліномами нульового, першого, другого, третього і п'ятого степенів. Задавалися по дві структури ПРНМ високих степенів (третього і п'ятого) з повним набором степенів сигналів і з обмеженням сумарного степеня елементів в поліномах до трьох і п'яти. Знайдені значення вагових коефіцієнтів залежать від режимів роботи ЕП і довжини послідовності даних, що використовувались для навчання. Із зростанням степеня помилки моделей ПРНМ нульового, першого і другого степенів зменшуються. Для ПРНМ третього і п'ятого степенів в інтервалі часу, що використовувався для розрахунку (0-2с), помилки знижуються, а в інтервалі з другої до п'ятої секунди зростають (навіть до не стійкої роботи), що пояснюється зниженням узагальнювальних властивостей ПРНМ високих степенів.

Для моделей у вигляді ПРНМ, що мають обмеження сумарного степеню сигналів точність на перевірному наборі даних (2-5с) із зростанням степеня ПРНМ зростає, при цьому зменшується число вагових коефіцієнтів. Висока точність ПРНМ досягнута за одну епоху, що дозволяє виконувати навчання в реальному часі. Число обчислень при цьому на порядки менше, ніж при розрахунку ПРНМ за формулою (17).

Виконано порівняння параметрів режимів роботи моделей у вигляді ПРНМ з роботою реального обладнання. Розроблено лабораторний стенд для виміру параметрів режиму роботи ДПСПЗ. Виміри струмів і напруги здійснювалися, відповідно, давачами Хола типу ACS і дава-

чами напруги на основі резистивних шунтів і мікросхем гальванічного розв'язання HCPL 7800. Давачі підмикалися до порту USB комп'ютера через модуль mDAG. Програмними засобами виконувалася цифрова фільтрація сигналів.

З експериментальних даних стенда отримані методами розрахунку і навчання математичні моделі ДПСПЗ типу ПБ32 у вигляді ПРНМ, за наявності нелінійної залежності момента опору від швидкості. Максимальні відносні похибки моделей для струму і швидкості на навчальних даних не перевищували 4%.

Досліджені способи підвищення точності ідентифікації нелінійних параметрів ДПСПЗ (друге і третє рівняння системи (14), без залежностей від похідної струму D). з його моделі вигляду ПРНМ. Досліджувалася точність ідентифікації і для загального випадку (без завдання спеціальних режимів) і для декількох спеціальних режимів ЕП та для нелинейностей заданого вигляду, а саме випадки: а) нелінійності в межах змінювання змінних режиму точно описуються поліномами заданого степеня; б) використання додаткових функціональних перетворень для того ж набору вимірюваних даних; в) завдання режимів ЕП, при яких частина елементів вектора стану дорівнює нулю.

Для загального випадку помилка ідентифікації нелінійних параметрів (($L(I)$, $c\Phi(I)$) не перевищує 10%. При завданні спеціальних режимів для випадку "а" забезпечується висока точність (похибка 1%). Випадок "б" застосовується для нелінійностей заданих довільно, але вимагає ускладнення обчислень і забезпечує не високу точність (похибка 25%); У випадку "в" похибка ідентифікації менше 5%.

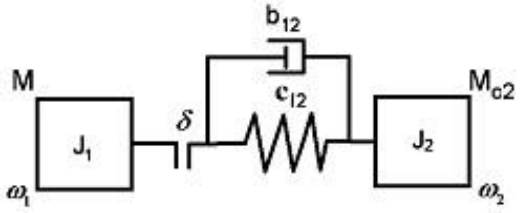


Рис. 9. Функціональна схема механіки двомасової ЕМС

Розроблений метод синтезу за параметрами режиму роботи устаткування математичної моделі у вигляді ФРНМ двомасовою ЕМС, що включає ДПСПЗ, пружність, демпфування і люфт [(рис. 9), де. J_1 і J_2 зосереджені моменти інерції першої та другої мас; δ – проміжок в кінематичній передачі, c_{12} – коефіцієнт пружності, b_{12} – коефіцієнт демпфування]. Структура ФРНМ складена за структурою системи скінчено-різницевих рівнянь двомасової ЕМС

$$
\begin{cases}
I_n = I_{n-1} - TR_d L^{-1}(I_{n-1})I_{n=1} + Tc\Phi(I_{n-1})L^{-1}(I_{n-1})\omega_{1n-1} + TL^{-1}(I_{n-1})U_{Дn}, \\
\omega_{1n} = \omega_{1n-1} + TJ_1^{-1}c\Phi(I_{n-1})I_{n-1} - TJ_1^{-1}c_{12}D_{1n-1} - TJ_1^{-1}b_{12}D_{2n-1} - TJ_1^{-1}M_{c1}(\omega_{1n-1}), \\
\omega_{2n} = \omega_{2n-1} + TJ_2^{-1}c_{12}D_{1n-1} + TJ_2^{-1}b_{12}D_{2n-1} - TJ_2^{-1}M_{c2}(\omega_{2n-1}), \\
\varphi_{1n} = \varphi_{1n-1} + TD_{3n-1}, \quad \varphi_{2n} = \varphi_{2n-1} + T\omega_{2n-1}, \\
D_{1n-1} = \begin{cases} 0, & якщо \ |\varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1}| < \delta/2, \\ \varphi_{1n-1} - \delta/2 - \varphi_{2n-1}, & якщо \ \varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1} \ge \delta/2, \\ \varphi_{1n-1} + \delta/2 - \varphi_{2n-1}, & якщо \ \varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1} \le \delta/2, \end{cases} \\
D_{2n-1} = \begin{cases} 0, & якщо \ |\varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1}| < \delta/2, \\ \omega_{1n-1} - \omega_{2n-1}, & якщо |\varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1}| \ge \delta/2, \end{cases} \quad D_{3n-1} = \begin{cases} \omega_{1n-1}, & якщо |\varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1}| \ge \delta/2, \\ \omega_{2n-1}, & якщо |\varphi_{1n-1} - \varphi_{2n-1}| < \delta/2, \end{cases}
\end{cases}
\tag{20}
$$

де φ_1 і φ_2 – кути повороту першої і другої мас; D_1, D_2 і D_3 – додаткові змінні, відповід-

но, різниці кутів і швидкостей першої і другої мас і швидкості пружного валу з боку люфта. Вектор стану $x=[I,\omega_1,\omega_2,\varphi_1,\varphi_2]^T$; вектор вхідних сигналів $u=[U_Д,\ D_1,D_2,D_3,1]^T$. П'ятий елемент вектора u узятий таким, що дорівнює одиниці для забезпечення спільності виразів при опису у вигляді поліномів моментів опору $M_{c1}(\omega_1)$ і $M_{c2}(\omega_2)$.

В системі (20) є 5 скінчено-різницевих рівнянь, отже, ФРНМ має п'ять рекурентних нейронів. На вході мережі є блоки поліноміального розкладання сигналів для кожного нелінійного коефіцієнта і обчислення D_1, D_2 і D_3. З-за нелінійності розривного вигляду, викликаної проміжком, спочатку ідентифікується значення проміжку відомими методами, а потім навчається ФРНМ за даними режиму при вибраному проміжку.

При апроксимації нелинейностей першого - третього рівнянь системи (20) поліномами другого порядку, вектора h_1, h_2 і h_3 такі:

$$\left.\begin{aligned} &h_{1n}=[I_{n-1},I_{n-1}^2,I_{n-1}^3,\omega_{n-1},\omega_{n-1}I_{n-1},\omega_{n-1}I_{n-1}^2,U_{n-1},\ U_{n-1}I_{n-1},U_{n-1}I_{n-1}^2]^T,\\ &h_{2n}=[I_{n-1},I_{n-1}^2,I_{n-1}^3,D_{1n-1},\ D_{2n-1},\ 1,\ \omega_{n-1},\ \omega_{n-1}^2]^T,\ h_{3n}=[D_{1n-1},D_{2n-1},1,\omega_{n-1},\omega_{n-1}^2]^T,\end{aligned}\right\} \quad (21)$$

що дозволяє систему (20) подати у вигляді:

$$x_{in}=x_{in-1}+w_{i1}h_{i1n}+w_{i2}h_{i2n}+...+w_{ik}h_{ikn},\quad i=1,2,3;\ k=\overline{1,...,10}\ , \qquad (22)$$

де w_{ij} – вектор вагових коефіцієнтів j-го входу i-го нейрона. Навчалися ФРНМ за рівняннями (18), (19).

Задавалися значення параметрів ДПСПЗ типу МП62, момент інерції другої маси $J_2=2J_1$; коефіцієнти пружності $c_{12}=100\ Нм/рад$ і демпфування $b_{12}=0{,}25\ Нмс$. Максимальні помилки моделі вигляду ФРНМ відпрацювання струму двигуна, кутових швидкостей першої і другої мас не перевищують 1,5%, 1% і 2,5% відповідно. Помилка ідентифікації проміжку менше 3,3%.

Четвертий розділ присвячено вдосконаленню керування ЕМС інтелектуальними засобами з використанням їх математичних моделей у вигляді МРНМ. У розділі послідовно розглядаються: регулятор із змінною структурою; експериментальний підбір параметрів нелінійного регулятора; формування нелінійних коефіцієнтів регулятора нечіткою логікою; паралельна нелінійна корекція виходу класично налагодженого регулятора з використанням нечітких НМ; визначення оптимального налагодження регулятора з використанням ГА і блоком NCD налагодження СК.

У регуляторі із змінною структурою використовуються переваги П-регулятора в перехідних режимах і ПІ-регулятора в усталених. Моделювання нелінійного ПІ-регулятора швидкості, коефіцієнти якого є функції помилки керування, показало, що при збільшенні коефіцієнта підсилення розімкненої системи до 200 разів, система залишається стійкою, хоча є коливання при певних значеннях помилки керування. Система із стандартним лінійним регулятором при додатковому коефіцієнті підсилення розімкненої системи більше ніж 1,5 була нестійкою.

Виконаний синтез нелінійного ПІ-регулятора з використанням нечіткої логіки. Коефіцієнти регулятора подані у вигляді $K_П=K_Pk_P$, $K_И=K_Ik_I$, де K_P і K_I лінійні і k_P і k_I нормовані нелінійні (формовані фазі-блоками (ФБ)) коефіцієнти, відповідно, пропорційної й інтегральної

частин ПІ-регулятора, Лінійні коефіцієнти K_P і K_I визначаються розрахунковим шляхом, виходячи із спрощеної лінійної моделі об'єкта з номінальними параметрами. Вхідними змінними ФБ є: помилка керування e і її похідна de, вихідні змінні $k_P = f_P(e,de)$ і $k_I = f_I(e,de)$. Коефіцієнти що масштабують (МК) m_P і m_I вхідних змінних визначаються за змінюванням помилки керування і її похідної при різних режимах роботи об'єкта. Фазі-блок реалізований у вигляді алгоритму Мамдані. Кожній вхідній змінній покладено у відповідність 5 лінгвістичних термів. Вихідним змінним ФБ покладено у відповідність по 3 позитивних лінгвістичних терми. Функції приналежності лінгвістичних термів подані функціями Гауса з дисперсією відхилення σ=0,22, їх центри рівномірно розміщені в нормованому діапазоні вхідних (- 1,1) і вихідних (0,1) змінних. Складені по 25 нечітких правил для формування k_P і k_I ,, виходячи зі знань експерта про бажану реакцію регулятора на помилку керування. Для дефазіфікації використаний центроїдний метод.

Досліджувалося поліпшення динаміки системи з нелінійним фазі-регулятором (ФР) для об'єктів у вигляді коливальної ланки другого порядку при змінюванні коефіцієнта підсилення ланки і коефіцієнта a_2 при старшій похідній. За результатами моделювання система з ФР залишається стійкою при змінюванні коефіцієнта підсилення об'єкта в 6 разів і коефіцієнта a_2 в 2 рази. У системі без ФР такі ж зміни параметрів призводять до нестійкої роботи. Результати моделювання інших об'єктів показали необхідність врахування динамічних властивостей об'єкта при виборі МК на вході ФБ, складанні наборів правил і розміщенні функцій приналежності або застосувати навчання ФБ на математичній моделі об'єкта.

Одним з підходів спільного застосування теорій автоматичного керування, нечіткої логіки і навчання ФР в процесі роботи є використання класичного регулятора, налагодженого для певних параметрів об'єкта і ФР, що навчається, який коригує за розбіжностями між відомою моделлю і реальним об'єктом вихідний сигнал класичного регулятора при змінюванні параметрів об'єкта. Цей підхід застосований для розробки регулятора швидкості в двомасовій системі ЕП постійного струму чорнової прокатної кліті (рис. 7). У механічній частині ЕМС давач швидкості розміщений на валу двигуна (перша маса), проте забезпечити якісні перехідні процеси необхідно в механізмі (друга маса). Блок "Модель ЕМС", є математична модель з налагодженими регуляторами швидкості блоком NCD і струму для фіксованих параметрів привода. У моделі враховується пружність вала, вплив сил сухого тертя, момент демпфування. У блоці

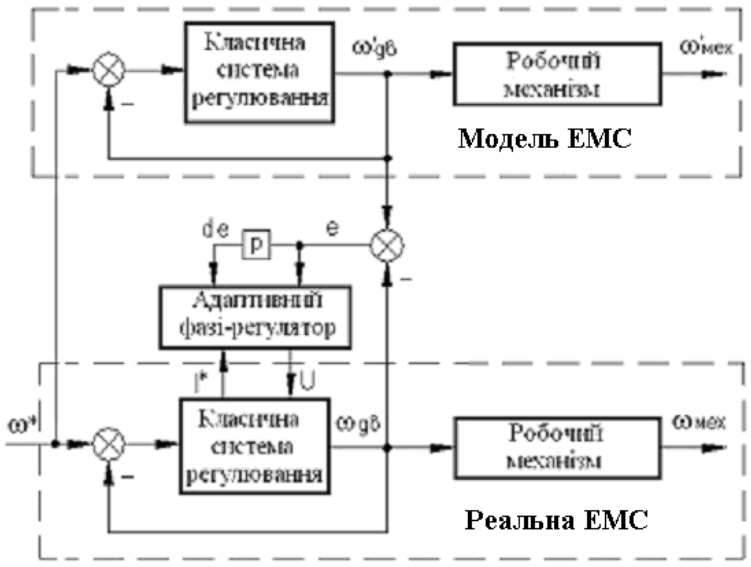


Рис. 7. Структурна схема адаптивної фазі системи регулювання ЕП

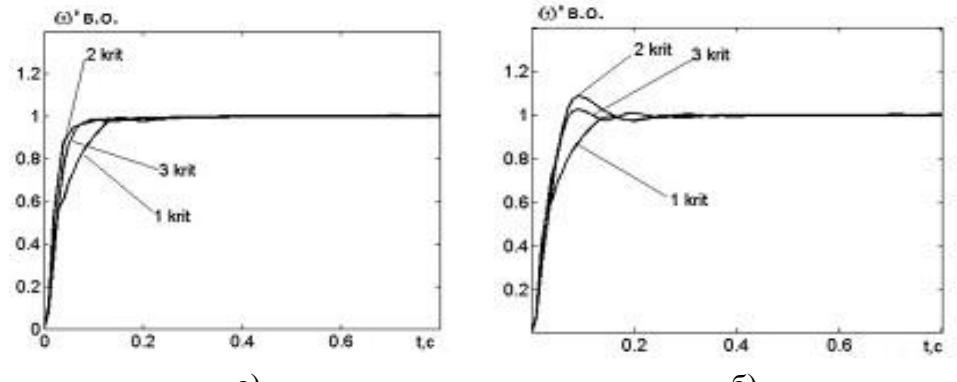
"Реальна ЕМС", який при дослідженнях виконаний у вигляді моделі, встановлені такі ж регулятори струму і швидкості. Змінювання параметрів призводить до виникнення помилки $e = \omega'_{дв} - \omega_{дв}$. Помилка e і її похідна de є входами ФР, вихідний сигнал U якого додається до вихідного сигналу регулятора швидкості, як такого, що формує завдання струму якоря.

Складається ФР з ФБ, які виконано у вигляді нечіткої НМ, і блоків масштабування. Значенням вхідних і вихідний змінних покладаються у відповідність 7 функцій приналежності. На основі логічного аналізу перехідних процесів складено 49 нечітких правил. Використовуються загальноприйняті поєднання операторів обробки інформації: оператори агрегації і імплікації - мінімум оператор; оператор акумуляції - максимум оператор; дефазіфікація - синглетон метод. Функції приналежності нормовані, тому на вході ФБ розміщені блоки масштабування. МК знаходяться автоматично при пуску ЕП з відімкненим виходом ФР. Налагоджування у процесі роботи коефіцієнтів фазі-правил ґрунтується на використанні алгоритму зворотного поширення помилки Відроу-Хофа.

Налагоджування ПІ-регулятора швидкості NCD блоком дозволило отримати перерегулювання швидкостей двигуна і механізму 0,21%, і 1,27% відповідно. Проте, система стає нестійкого при моделюванні процесу прокатки слябів, коли на початку прокатки нового сляба зростають момент інерції і статичний момент навантаження в 2 рази. Після навчання ФР перехідні процеси в ЕМС стають стійкими.

Досліджено на моделях вигляду МРНМ пошук параметрів нелінійних регуляторів з застосуванням ГА для різних критеріїв у системі підпорядкового регулювання (СПР) ТЕП постійного струму як з незмінними так і такими, що змінюються параметрами. У ЕП задавалася залежність зведеного момента інерції від швидкості. При цьому з регуляторами, налагодженими на номінальний момент інерції виникає перерегулювання до 55% і зростає час перехідного процесу до 1с.

При визначенні параметрів регулятора за допомогою ГА особинами є моделі ЕП з різними параметрами регулятора (генами). Формувалися фітнес функції для декількох критеріїв: перший – зниження втрат електроенергії у момент пуску ЕП; другий – збільшення швидкодії перехідного процесу; третій – забезпечення швидкодії і одночасно зниження втрат енергії. Нелінійність кожного коефіцієнта в нелінійних П і ПІ-регуляторах швидкості задавалася 14 точками. Параметри ГА, вибрані за результатами експериментів.



а) б)

Рис. 8. Перехідні процеси з нелінійними регуляторами; П-регулятор (а), ПІ-регулятор (б)

Результати моделювання пуску ЕП без навантаження з налагодженими за різними критеріями параметрами регуляторів швидкості для нелінійного об'єкта наведено на рис. 8. Тут цифра-

ми 1-3 позначені криві при налагодженні за 1-3 критеріями відповідно.

Для підвищення точності ідентифікації параметрів розглянуто об'єднання аналітичних розрахунків, основаних на попередніх знаннях про об'єкт, і алгоритмів навчання нечітких НМ. Виконана аналітична ідентифікація в реальному часі в ЕП постійного струму нелинейностей момента інерції і момента опору механізму від кута повороту. Результати ідентифікації використані для навчання нечітких НМ, де здійснена їх апроксимація, а надалі для коригування параметрів регуляторів в реальному часі. Нелінійності задавалися коефіцієнтами $k_J(\alpha) = J(\alpha)/J_{HOM}$ і $k_M(\alpha) = M_C(\alpha)/M_{HOM}$, де J_{HOM}, M_{HOM} – номінальні значення момента інерції і рушійного момента двигуна, $J(\alpha), M_C(\alpha)$ – момент інерції і момент опору при куті повороту α.

Ідентифікація $k_J(\alpha)$ і $k_M(\alpha)$ виконується за виміряними дискретними значеннями струмів, швидкостей і кутів повороту вала двигуна при різних напрямках руху, або при різних швидкостях в одному напрямку за залежностями:

$$k_J(\alpha_1) = \frac{A\cdot(D-F)+B\cdot E}{(E+C)\cdot(D-F)+F\cdot E}\ , \qquad k_M(\alpha_1) = \frac{L-M\cdot N-P}{M_{HOM}}\ , \tag{23}$$

де $A = \left[i_1(t_1) - i_2\left(\grave{t_2}\right)\right]\cdot c$, $B = \left[i_1(t_2) - i_2\left(\grave{t_2}\right)\right]\cdot c$,

$C = J_{HOM}\left[\frac{\omega_1(t_1)}{\Delta t_1} - \frac{\omega_1(t_2)}{\Delta t_1} - \frac{\omega_2(\grave{t_1})}{\Delta t_2} + \frac{\omega_2(\grave{t_2})}{\Delta t_2}\right]$, $D = J_{HOM}\left[\frac{\omega_1(t_2)}{\Delta t_1} - \frac{\omega_1(t_3)}{\Delta t_1} - \frac{\omega_2(\grave{t_2})}{\Delta t_2} + \frac{\omega_2(\grave{t_3})}{\Delta t_2}\right]$,

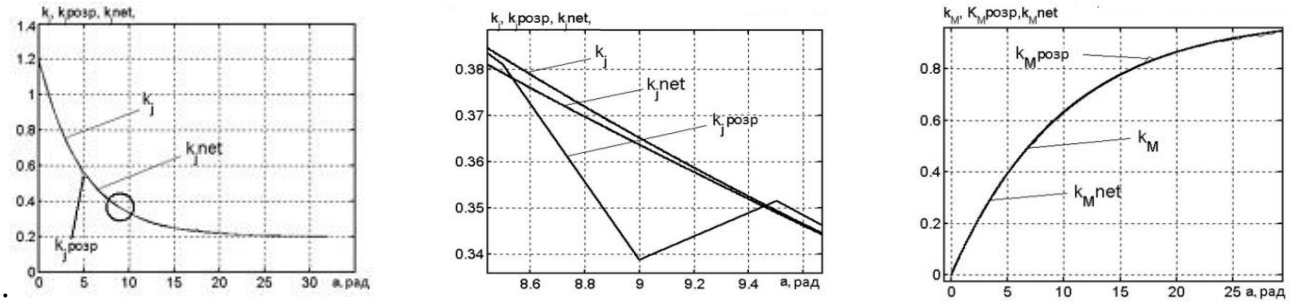
$N = \frac{A - k_J(\alpha_1)C}{E}$, $E = J_{HOM}\left[\frac{\omega_1(t_1)}{\Delta t_1} - \frac{\omega_2(\grave{t_1})}{\Delta t_2}\right]$, $F = J_{HOM}\left[\frac{\omega_1(t_2)}{\Delta t_1} - \frac{\omega_2(\grave{t_2})}{\Delta t_2}\right]$, $L = i_1(t_1)c$,

$M = \frac{J_{HOM}\omega_1(t_1)}{\Delta t_1}$, $P = \frac{J_{HOM}k_J(\alpha_1)\left[\omega_1(t_1) - \omega_1(t_2)\right]}{\Delta t_1}$, t_1, t_2, t_3 – моменти часу при проходженні привода в прямому і $\grave{t_1}$, $\grave{t_2}$, $\grave{t_3}$ – у зворотному напрямку кутів положення α_1, α_2 і α_3; $\Delta t_1 = t_1 - t_2 = t_2 - t_3$ – крок дискретизації вимірів; $i_1(t_1)$, $i_1(t_2)$, $\omega_1(t_1)$, $\omega_1(t_2)$, $\omega_1(t_3)$ – струми і швидкості в моменти часу t_1, t_2, t_3; c – конструктивна постійна двигуна; Апроксимуються дискретні значення $k_J(\alpha)$ і $k_M(\alpha)$ за допомогою двох адаптивних нечітких НМ. Досліджувався ЕП з такими параметрами двигуна: $I_{HOM} = 80{,}5\ A$ $U_{HOM} = 220B$, $\omega_{HOM} = 104{,}72c^{-1}$ $J_{HOM} = 0{,}9кг\cdot м^2$, $c = 1{,}97H/A$, $R_Я = 0.618Ом$, $L_Я = 0.105Гн$.

Задавалися $k_J(\alpha) = 0{,}5 + e^{-0{,}2\alpha}$, $k_M(\alpha) = 1 - e^{-0{,}1\alpha}$. Регулятори струму і швидкості налагоджувалися на модульний оптимум, регулятор положення – параболічний. Параметри регуляторів положення і швидкості коригувалися ідентифікованими значеннями момента інерції. Дія момента опору компенсувалася на вході регулятора швидкості. На рис. 9 показані: змінювання момента інерції і момента опору від кута повороту вала – k_J і k_M; аналітична їх ідентифікація – $k_{Jðàçð}$ і $k_{Mðàçð}$; апроксимація нечіткою НМ – k_{Jnet} і k_{Mnet}. При ідентифікації за рівняннями (23) є сплески в місцях перегину кривих струму і швидкості, які відсутні після їх апроксимації

нечіткої НМ. Помилки ідентифікації менше 2 %.

При навчанні нечітких НМ налагоджувалися параметри функцій Гауса і значення вагових

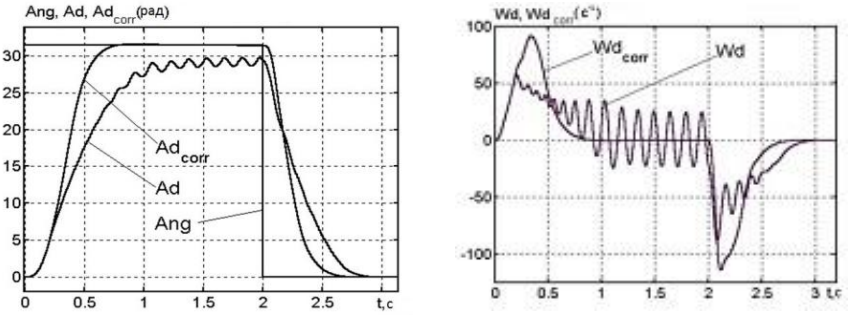


а) б) в)

Рис. 9. Результати ідентифікації; момента інерції (а)
(збільшений фрагмент момента інерції (б)), момента опору (в)

коефіцієнтів фазі-правил. З графіків моделювання ЕП (рис. 10) видно, що в системі з ідентифікацією параметрів і корекцією регуляторів відсутні коливання і статична помилка переміщення (сигнал Ang – завдання переміщення, Ad і Ad_{corr} – відпрацювання переміщення системою без і з корекцією регуляторів відповідно; Wd і Wd_{corr} – змінювання швидкості для системи без корекції і з корекцією відповідно).

На моделі ДПСПЗ вигляду ПРНМ, описаної в третьому розділі, при ідентифікації



а) б)

Рис. 10. Моделювання ЕП переміщення

параметрів для випадку "б", виконано налагоджування блоком NCD (рис. 11) параметрів ПІ-регулятора швидкості. Перехідні процеси струму і швидкості (рис. 12) в ЕП зі знайденими на моделі регуляторами ($I_{об}$, $\omega_{об}$) і в моделі ЕП, де ДПСПЗ показаний у вигляді ПРНМ ($I_{нм}$, $\omega_{нм}$), не мають перерегулювання і при цьому практично однакові (максимальні помилки за струмом і швидкостю складають 3% і 2% відповідно, помилки в усталеному режимі менше 0,72% і 0,28%). Отже, модель ДПСПЗ вигляду ПРНМ має точність і узагальнювальні властивості необхідні для

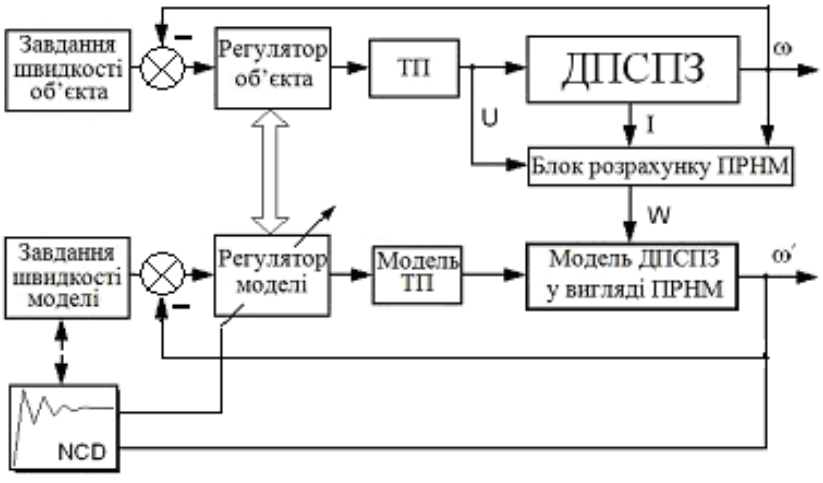
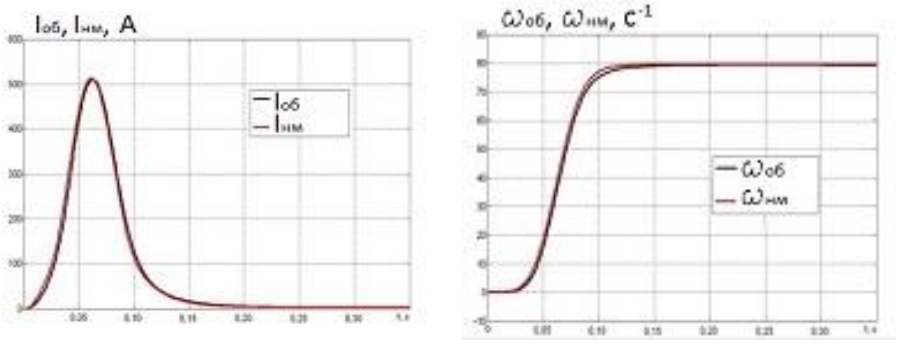


Рис. 11. Схема налагоджування СК ЕП.

налагоджування регуляторів.



а) б)

Рис. 12. Перехідні процеси в ЕП

У п'ятому розділі апробіровані і розвинені розроблені вище методи при вдосконалення систем керування АТЕП ДП, Названа ЕМС має генератори, двигуни, перетворювачі, мотор-вагонну тягу, пружності, обмеження. ДП ДЕЛ-02 складається з 3-х вагонів: крайні – головні моторні, середній – пасажирський. У моторному вагоні встановлені два ТАД, кожен з яких через редуктор приводить до руху колісну пару.

Розроблена математична модель АТЕП ДП (рис. 13), із якої визначена структура моделі вигляду МРНМ. Виконаний її розрахунок і навчання за параметрами режиму. Налагоджена на цій моделі СК ДП з використанням ГА. При побудові моделі прийняті такі допущення: вагони ДП подані у вигляді зосереджених мас; пружністю шляху і елементів вагонів нехтується, характеристики усіх ТАД і векторних СК прийняті однаковими; АТЕП з векторною СК поданий ідеалізованим ТАД, а перетворювачі частоти з АІН-ШІМ можуть подаватися у двох можливих варіантах: на ідеалізованих силових ключах з урахуванням дискретності їх властивостей, або у вигляді лінеаризованих передатних функцій замкнених контурів регулювання швидкості двигуна намагнічувальної і активної складових струму статора. Робота дизеля здійснювалася за економічною характеристикою.

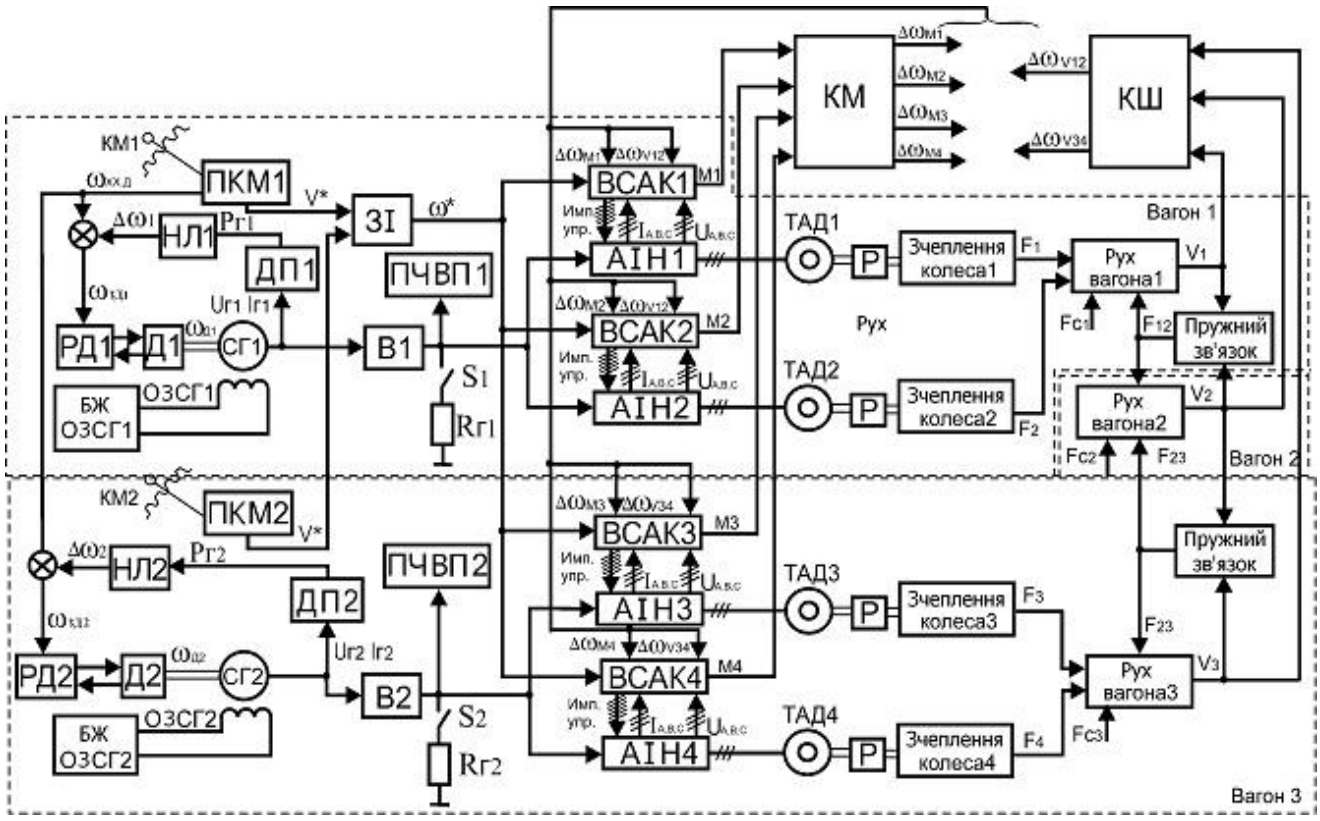


Рис. 13. Структурна схема розрахункової моделі АТЕП ДП

Математична модель ДП ДЭЛ-02 враховує запропоновані удосконалення СК, які полягають у такому: застосування векторної СК ТАД; використання швидкості ДП (замість потужності дизеля в існуючій системі) як завдання від контролера машиніста; забезпечення роботи дизеля на економічній характеристиці; застосування додаткових коректорів у СК АТЕП для забезпечення рівності моментів двигунів і зниження амплітуди коливань між вагонами.

При запуску дизелів Д1 і Д2 до кутових швидкостей неробочого ходу $\omega_{XX.Д}$ на виходах СГ (СГ1 і СГ2) індуктується напруга. Сигнал завдання швидкості поїзда V^* від контролерів машиніста КМ1 або КМ2, розташованих на пультах керування ПУМ1 і ПУМ2, через задавач інтенсивності ЗІ надходить на векторні СК ВСАК1 - ВСАК4 кожного ТАД. Давачі потужності ДП1 і ДП2 визначають споживані потужності відповідно для СГ1 і СГ2, які у вигляді сигналів $P_{Г1}$ і $P_{Г2}$ надходять до нелінійних ланок НЛ1 і НЛ2 для утворення сигналів корекції кутових швидкостей дизелів Д1 і Д2, згідно їх економічній характеристиці.

Силові схеми перетворювачів складаються з випрямлячів В, автономних інверторів АІН, гальмівних резисторів R_T, СК інверторами, систем векторного регулювання струму. Від ТАД1 – ТАД4 через редуктори Р і колеса створюються зусилля тяги поїзда $F_1 - F_4$. У ДП виникають сили опору руху $F_{C1} - F_{C3}$, відповідно першого – третього вагонів і сили F_{12}, F_{23} між вагонами.

При зростанні навантаження генераторів зростають сигнали $\Delta\omega_1$ і $\Delta\omega_2$, що призводить до збільшення кутових швидкостей дизелів. Однакове завантаження двигунів і зниження подовжніх коливань між вагонами досягається коректорами: КМ – за різницею моментів двигунів і КС – за різницею швидкостей вагонів. Сигнали коректорів змінюють завдання швидкостей ТАД за формулами.

$$\left.\begin{aligned} &\omega_{Z1} = \omega^* - d\omega_{V1} - d\omega_{M1}, && \omega_{Z2} = \omega^* - d\omega_{V2} - d\omega_{M2}, \\ &\omega_{Z3} = \omega^* - d\omega_{V3} - d\omega_{M3}, && \omega_{Z4} = \omega^* - d\omega_{V4} - d\omega_{M4}. \end{aligned}\right\} \quad (24)$$

Коректор КС за швидкостями вагонів V_1, V_2, V_3 і коректор КМ за моментами $M_1 - M_4$ вироблюють сигнали корекції завдання швидкостей ТАД $d\omega_V$ і $d\omega_M$

$$d\omega_{V1} = d\omega_{V2} = (V_1 - V_2)k_{1V}, \qquad d\omega_{V3} = d\omega_{V4} = (V_3 - V_2)k_{2V}, \} \quad (25)$$

$$\left.\begin{aligned} &d\omega_{M1} = (2M_1 - M_2 - M_4)(k_{PM} + k_{IM}/p), && d\omega_{M2} = (2M_2 - M_1 - M_3)(k_{PM} + k_{IM}/p), \\ &d\omega_{M3} = (2M_3 - M_2 - M_4)(k_{PM} + k_{IM}/p), && d\omega_{M4} = (2M_4 - M_1 - M_3)(k_{PM} + k_{IM}/p). \end{aligned}\right\} \quad (26)$$

Модель ТАД з векторною СК має вигляд

$$\left.\begin{aligned} &\omega^* = V^* W_{3I},\ I^*_{1Y(i)} = (\omega_{Zi} - \omega_i)W_{PC}(p), && I^*_{1X(i)} = (\Psi^*_r - \Psi_{r(i)})W_{PП}(p), \\ &I_{1X(i)} = I^*_{1X(i)} G_T(p),\ I_{1Y(i)} = I^*_{1Y(i)} G_T(p), && L_m I_{1x(i)} = \Psi_{r(i)} + T\, d\Psi_{r(i)}/dt, \\ &L_m I_{1y(i)} = (\omega_{\Psi r(i)} - z\omega_i)T\Psi_{r(i)}, && M_i = 1{,}5zk\Psi_{r(i)} I_{1y(i)},\ \omega_i = V_i i / r_i, \end{aligned}\right\} \quad (27)$$

де ω_i – швидкості двигунів; V_{ki} – швидкості коліс; r_i – радіуси коліс; $W_{PC}(p)$, $W_{PП}(p)$, W_{3I}, $G_T(p)$ – передавальні функції відповідних контурів та ланок.

Математичні моделі дизеля, СГ першого моторного вагону і руху коліс з урахуванням проковзування описуються відповідно системами:

$$\left.\begin{aligned} &I_{ДВ1}=\sqrt{I_{1x(1)}^2+I_{1y(1)}^2}, I_{ДВ2}=\sqrt{I_{1x(2)}^2+I_{1y(2)}^2}, \\ &U_{Г1}=\omega_{Д1}\Phi\left(i_{f1}\right)/T_B p+1-I_{Г1}R, \\ &\Delta\omega_{Д1}=f_{НЗ}\left(P_{Г1}\right)/T_{НЗ}p+1, \end{aligned}\right| \left.\begin{aligned} &I_{Г1}=I_{ДВ1}+I_{ДВ2}+U_{Г1}/R_{СН}, \\ &P_{Г1}=(U_{Г1}+I_{Г1}R)\cdot I_{Г1}, M_{СД1}=P_{Г1}/\omega_{Д1}, \\ &\omega_{ЗД1}=\omega_{ХХ.Д}+\Delta\omega_{Д1}, h_{Р1}=k_h\cdot\omega_{ЗД1}, \\ &\omega_{Д1}=h_{Р1}k_\mu/T_\mu p+1-M_{СД1}k_\lambda/T_\lambda p+1. \end{aligned}\right\} \quad (28)$$

$$\left.\begin{aligned} &F_i=P_i\Psi_i,\ \Psi_i=f(u_i,V_{ki},k_{f1},k_{f2}), \\ &F_{Mi}=M_i k_P R_i^{-1}\eta_p, \end{aligned}\right| \left.\begin{aligned} &du_i/dt=R_i^2(F_{Mi}-F_i)/J_k, \\ &P_i=[m_i g/4+k_{nfi}\sum_{j=1}^{4}(P_j\Psi_j)]k_{pi}, \end{aligned}\right\} \quad (29)$$

де: P_i – зусилля тиску на вісь, J_k – зведений до вала двигуна момент інерції колісної пари, η_p – ККД редуктора, u_i – швидкість проковзування, V_{ki} – дотична швидкість на ободі і-ої колісної пари; коефіцієнти: Ψ_i – зчеплення, k_{f1}, k_{f2}, k_p – змінювання зчеплення та тиску на вісь, k_{nf} – перерозподілу положення зчепу по осях.

Рух вагонів ДП описується системою

$$\left.\begin{aligned} &F_1+F_2-F_{C1}-F_{12}=m_1 dV_1/dt, \\ &F_{12}=C_{12}\int_0^T(V_1-V_2)dt,\ F_{23}=C_{23}\int_0^T(V_2-V_3)dt, \end{aligned}\right| \left.\begin{aligned} &F_3+F_4-F_{C3}+F_{23}=m_3 dV_3/dt, \\ &F_{12}-F_{23}-F_{C2}=m_2 dV_2/dt. \end{aligned}\right\} \quad (30)$$

Задавалися: маса моторного m_M=64 т і пасажирського m_P=46 т вагонів, коефіцієнти пружності між вагонами $C_{12}=C_{23}$=938600 Н/м, передаточне i=2,37, r_1=0,47 м, r_2=0,445м, r_3=0,45 м, r_4=0,465 м,. k_V=5,006, k_{PM}=0,00025, k_{IM}= ,0057. Для ТАД АД906У1: P_H=240кВт, $U_{ФН}$=665В, $I_{ФН}$=155А, M_H=2366 Н·м. Параметри дизеля і генератора 12V183ДЕ і СГ ГС 530У2 такі: T_μ=3с; T_λ=3с; k_μ=197,6;

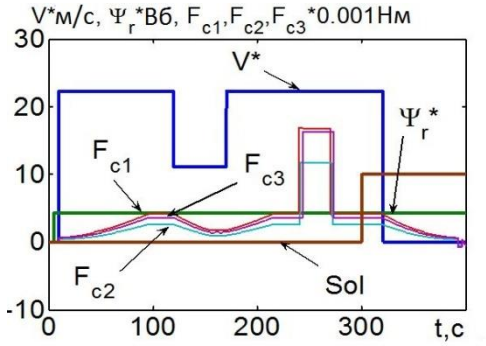
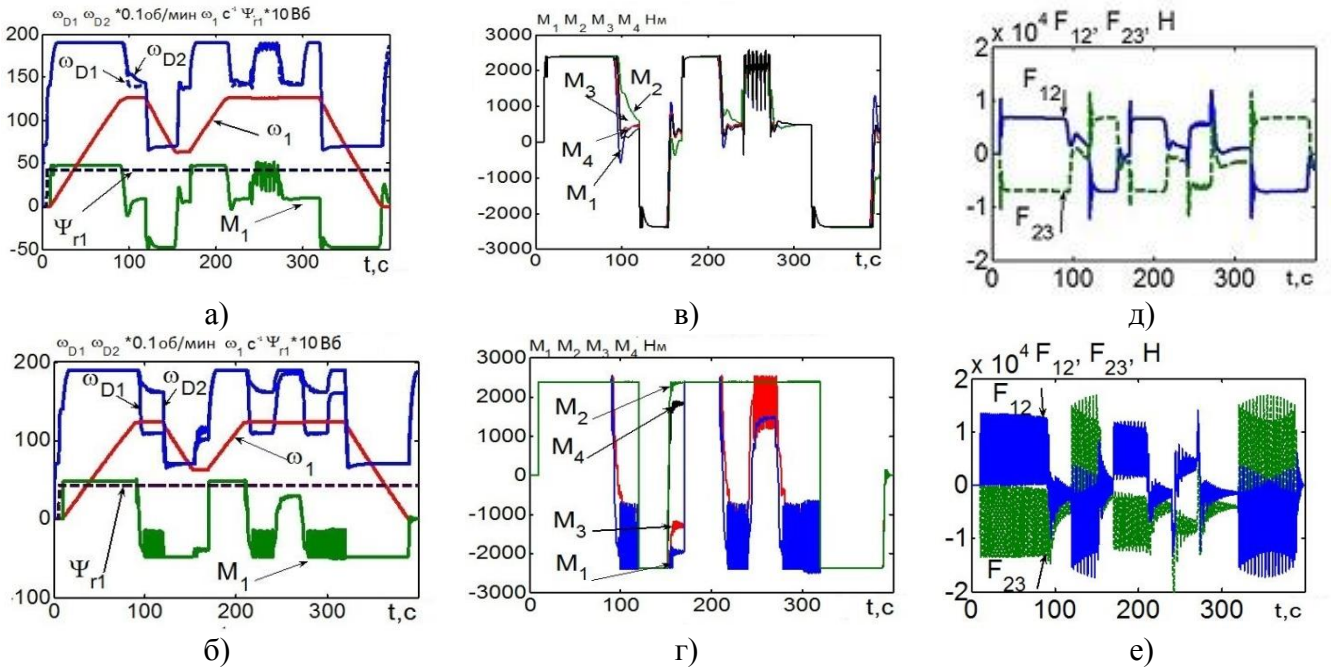


Рис. 14. Задавальні дії і сили опору

k_λ=1 Н$^{-1}$м$^{-1}$с$^{-1}$; $T_{НЗ}$=0,01с; R=0,216 Ом; T_B=0,5с; M_{C0}=473,2 Н·м; k_2=10 Н·м·с. Задавальні дії і сили опору показані на рис. 14.

Порівняння моделювання векторної СК ТАД з силовими приладами керованого випрямляча й інвертора у вигляді ідеалізованих силових ключів з урахуванням дискретності їх роботи (частота перемикання задавалася 1000 Гц) і перетворювачів у вигляді лінеаризованих передатних функцій виявило невелику розбіжність результатів (швидкості двигунів відрізнялися на 5 %). Тому моделювання усього АТЕП ДП (з метою зниження часу) виконувалося для лінеаризованих передатних функцій. Розглядалися процеси в тяговому приводі ДП з використанням коректорів (рис. 15, а, в, д) і без них (рис. 15, б, г, е). При відсутності коректорів стають різними кутові швидкості дизелів, моменти ТАД набувають протилежні знаки і з’являються

коливання різниць швидкостей вагонів. При цьому виникає додатковий нагрів ТАД, збільшується знос механічних вузлів, підвищується витрата палива і погіршуються комфортні умови. Підмикання коректорів вирівнює моменти ТАД та кутові швидкості дизелів, знижує коливання вагонів.



а) в) д)

б) г) е)

Рис. 15. Результати моделювання електромеханічних процесів у ДП

Розроблена математична модель гібридного АТЕП ДП, в якій ТАД споживають або енергію СГ, або акумуляторних батарей (АБ). Заряд АБ може поновлюватися від СГ і ТАД. При гальмуванні ДП електроенергія від двигуна через автономний інвертор надходить до ланки постійного струму, де через конвертор, який виконаний у вигляді імпульсного перетворювача, поновлює заряд АБ. Ємності АБ вистачає для здійснення набору швидкості ДП від нульової до номінальної. Струми заряду і розряду АБ перевищують подвійний струм ТАД.

Раніше розглянута математична модель АТЕП ДП (24)-(30) доповнена рівняннями, що описують роботу системи з конверторами та АБ:

$$\left.\begin{aligned} I_{\tilde{A}} &= \left(2I_1 + I_{\tilde{N}\acute{i}} + I_A/K_{conv}\right)Zar, \quad U_d = \left(\AA_{\tilde{A}} - I_{\tilde{A}}R\right)Zar + E_A K_{conv}\overline{Zar}, \\ I_{\grave{A}} &= \frac{sat\left(U_{\tilde{A}}Zar\right) - E_A}{R_A}Zar - \left(2I_1 + I_{\tilde{N}\acute{i}}\right)K_{conv}\overline{Zar}, \quad Q = Q_{\acute{I}\acute{O}} + \int I_A dt \end{aligned}\right\}, \tag{31}$$

$$Zar(n) = \begin{cases} 1,\ \c{c}\grave{a}\eth\ddot{y}\ddot{a}\ae\aa\acute{i}\ddot{y} \quad \grave{A}\acute{A}, \hat{e}\hat{i}\ddot{e}\grave{e} \ \left(Q < Q_{\min}\right) \vee \left[Zar(n-1) \wedge \left(Q < Q_{\max}\right)\right], \\ 0\ \eth\hat{i}\c{c}\eth\ddot{y}\ddot{a}\ae\aa\acute{i}\acute{i} \quad \ddot{y}\,\grave{A}\acute{A}, \hat{e}\hat{i}\ddot{e}\grave{e} \ \left(Q > Q_{\max}\right) \vee \left[\overline{Zar(n-1)} \wedge \left(Q > Q_{\min}\right)\right] \end{cases}, \tag{32}$$

де R_A – активний опір силового кола АБ; I_A – струм АБ; K_{conv} – коефіцієнт передачі конвертора постійного струму; Q і Q_{HY} – поточне і початкове значення заряду АБ; E_A – ЕРС АБ. Бінарний сигнал Zar задає режим заряду або розряду АБ, згідно виразу (32)..Мінімальний $Q_{\min}$ і максимальний $Q_{\max}$ заряди АБ залежать від величини заряду Q_Z, що задається, яка змінюється при русі ДП залежно від режимів і умов руху на певній ділянці. За результатами моделювання гібридного АТЕП ДП на розглянутій ділянці економія палива склала 20%.

Отримана у вигляді ФРНМ математична модель СГ і дизеля з СК шляхом перетворення математичної моделі і розрахунком за параметрами режима роботи, а також виконана ідентифіка-

ція параметрів за ваговими коефіцієнтами ФРНМ. Модель дизеля і СГ вигляду ФРНМ розроблена з урахуванням наявних обмежень на виході НЛ і на виході регулятора швидкості дизеля. Згідно останнім рівнянням системи (28), кутова швидкість дизеля подана, у вигляді різниці її складових, викликаних впливом положення рейки паливної помпи ω_h і момента навантаження дизеля ω_M. Обмеження в регулятору і НЛ описані рівняннями:

$$\left.\begin{array}{ll} \omega_Д = \omega_h - \omega_M,\ \Delta\omega_Д = sat(\Delta\omega 1_Д), & \omega_h = \mathrm{Re}g2/(T_\mu p + 1), \\ \mathrm{Re}g2 = sat(\mathrm{Re}g1), & \mathrm{Re}g1 = (h_P k_\mu - \omega_Д)(k_П + k_i/p), \end{array}\right\} \quad (33)$$

де $k_П$ и k_i – пропорційний і інтегральний коефіцієнти ПІ регулятора швидкості дизеля відповідно; $\mathrm{Re}g1$ і $\mathrm{Re}g2$ – виходи регулятора швидкості дизеля перед і після блока обмеження; $sat()$ – функція обмеження сигналу, $\Delta\omega 1_Д$ і $\Delta\omega_Д$ – сигнали перед і після обмеження на виході НЛ. Вхідні сигнали моделі: U_B, $I_Г$, ω_{XX}. Змінні вектора стану: $E_Г$, $\Delta\omega 2_Д$, $\mathrm{Re}g2$, ω_h, ω_M. При розрахунку НМ за параметрами режиму вимірюються величини: $\omega_Д$, $I_Г$, $\Delta\omega 2_Д$, $\mathrm{Re}g1$, $\mathrm{Re}g2$, M_{XX}. ЕРС генератора $E_Г$ обчислюється. Робота СГ і дизеля описується рівняннями:

$$\left.\begin{array}{l} E_{Гn} = E_{Гn-1} - \dfrac{TE_{Гn-1}}{T_B} + \dfrac{T\omega_{Дn-1}k_B U_{Bn}}{T_B},\quad \Delta\omega 1_{Дn} = \Delta\omega 1_{Дn-1} - \dfrac{T\cdot\Delta\omega 1_{Дn-1}}{T_{НЗ}} + \dfrac{Tk_{НЛ}(P_{Дn-1})}{T_{НЗ}}, \\ \mathrm{Re}g1_n = \mathrm{Re}g1_{n-1} + Tk_\mu^{-1}k_i\Delta\omega_{Дn-1} + Tk_\mu^{-1}k_i\omega_{xxn} + Tk_\mu^{-1}k_П D_{\Delta\omega_Д n-1} - Tk_П D_{\omega_Д n-1} - Tk_i\omega_{Дn-1} + HB, \\ \omega_{hn} = \omega_{hn-1} - \dfrac{T\omega_{hn-1}}{T_\mu} + \dfrac{T\,\mathrm{Re}g2}{T_\mu},\quad \omega_{Mn} = \omega_{Mn-1} - \dfrac{T\omega_{Mn-1}}{T_\lambda} + \dfrac{TE_{Гn-1}I_Г k_\lambda}{\omega_{Дn-1}T_\lambda} + \dfrac{TM_{XX}k_\lambda}{T_\lambda}, \end{array}\right\} \quad (34)$$

де $D_{\Delta\omega_{Дn-1}} = (\Delta\omega_{Дn} - \Delta\omega_{Дn-1})/T$ і $D_{\omega_Д n-1} = (\omega_{Дn} - \omega_{Дn-1})/T$ – похідні. Модель (34) вигляду ФРНМ має 5 нейронів рекурентного шару і блок функціональних перетворень, де реалізуються нелінійності. НЛ подана поліномом.

Згідно розробленим у розділі 3 методам отримані загальні вирази для розрахунку вагових коефіцієнтів моделей вигляду ФРНМ СГ і дизеля з СК за параметрами режиму роботи. Отримані вирази для ідентифікації параметрів дизеля, СГ і НЛ за ваговими коефіцієнтами ФРНМ. Розрахунок вагових коефіцієнтів ФРНМ за параметрами режиму виконувався для різної довжини тимчасового проміжку і в різних початкових точках. Результати роботи усіх моделей достатньо схожі. Помилка ідентифікації більшості параметрів об'єкта не перевищує 5%. При розрахунку ФРНМ на 20000 тактах максимальна помилка ідентифікації НЛ менше 1%.

Отримана вигляду ФРНМ математична модель механічного руху АТЕП ДП методами перетворення системи (35) і розрахунку за параметрами режиму, де F_{cd} – сили додаткового опору

$$\left\{\begin{array}{l} V_{1,n} = V_{1,n-1} - T(F_{12,n-1} + F_{1,n} + F_{2,n} - F_{cd1,n})/m_1 - T\cdot g\cdot sign((V_{1,n-1})Pol(|V_{1,n-1}|), \\ V_{2,n} = V_{2,n-1} + T(F_{12,n-1} - F_{23,n-1} - F_{cd2,n})/m_2 - T\cdot g\cdot sign((V_{2,n-1})Pol(|V_{2,n-}|), \\ V_{3,n} = V_{3,n-1} + T(F_{23,n-1} + F_{3,n} + F_{4,n} - F_{cd3,n})/m_3 - T\cdot g\cdot sign((V_{3,n-1})Pol(|V_{3,n-}|), \\ F_{12,n} = F_{12,n-1} + TC_{12}V_{1,n-1} - TC_{12}V_{2,n-1},\quad F_{23,n} = F_{12,n-1} + TC_{23}V_{2,n-1} - TC_{23}V_{3,n-1}. \end{array}\right. \quad (35)$$

Сили основного опору в (35) задаються поліноміальними залежностями від швидкості ДП. Отримані вирази для ідентифікації параметрів за ваговими коефіцієнтами ФРНМ. Виконано моделювання руху ДП, згідно системи (30) і ФРНМ, вичисленої перетворенням математичній моделі (НСМ) і за параметрами режиму ДП (НСЕхр). Максимальна помилка відпрацювання вектора стану НСМ склала 1%, НСЕхр – 0,5%. Помилка ідентифікації параметрів за НСЕхр менше 2%.

Розроблений метод налагодження на моделі вигляду ФРНМ СК мотор-вагонного АТЕП ДП з використанням ГА, що забезпечує однакові моменти двигунів і зниження втрат енергії E на демпфування подовжніх коливань вагонів. Налагодження коректорів здійснювалася для таких критеріїв

$$\left.\begin{aligned} &f_1 = \int_{T_1}^{T_2}\left(|V_1 - V_2| + |V_2 - V_3|\right)dt\ ,\quad f_2 = \int_{T_1}^{T_2}\left(k_V[|V_1 - V_2| + |V_2 - V_3|] + \sum_{i=2}^{4}|M_1 - M_i|\right)dt\ , \\ &f_3 = \int_{T_1}^{T_2}\left((V_1 - V_2)^2 + (V_2 - V_3)^2\right)dt\ . \end{aligned}\right\} \qquad (36)$$

Перший критерій забезпечує зниження сумарних відхилень швидкостей вагонів. Другий – знижує різниці швидкостей вагонів і різниці моментів ТАД. Коефіцієнт k_V (k_V=100) забезпечує бажаний вплив різниць швидкостей вагонів і моментів ТАД на значення фітнес функції. Третій критерій– знижує втрати енергії на демпфування швидкостей вагонів.

Для зниження часу налагодження параметрів k_{PM}, k_{IM}, k_V, коректорів за допомогою ГА в усіх інтеграторах моделі задавалися початкові умови й інтервал часу, у відповідності до заданого режиму руху. Початковий і кінцевий час моделювання складав: T_1=104 с і T_2=110 с. За цей час виникало декілька подовжніх коливань вагонів, період яких складав близько 2 с. Радіуси моторних колісних пар задавалися різними: r_1=0,445 м, r_2=0,47 м, r_3=0,45 м, r_4=0,465 м; коефіцієнт демпфування B=10 кНс/м. У ГА популяція складалася з 20-ти особин, кожна мала три хромосоми (коефіцієнти коректорів). Пошук здійснювався за 100 епох. Параметри коректорів, знайдені ГА, приведені в табл. 3. Тут у п'ятому стовпці подані значення втрат енергії, що вичислені за рівнянням $E = B\int_0^{T_k}\left((V_1 - V_2)^2 + (V_2 - V_3)^2\right)dt$ протягом T_k=400 с. Мінімальні втрати отримані для другого і третього критеріїв. Налагодження забезпечило рівність моментів ТАД і знизило втрати енергії E з 2,15 кДж до 0,61 кДж за 400 с.

Таблиця 3.

Результати налагодження

Критерії	k_{PM}	k_{IM}	k_V	Е, Дж.
1	0,0237	0,00885	176,6	685
2	0,0094	0,0093	196,8	611
3	0,1927	0,5185	0,657	628
–	0	0	0	2146

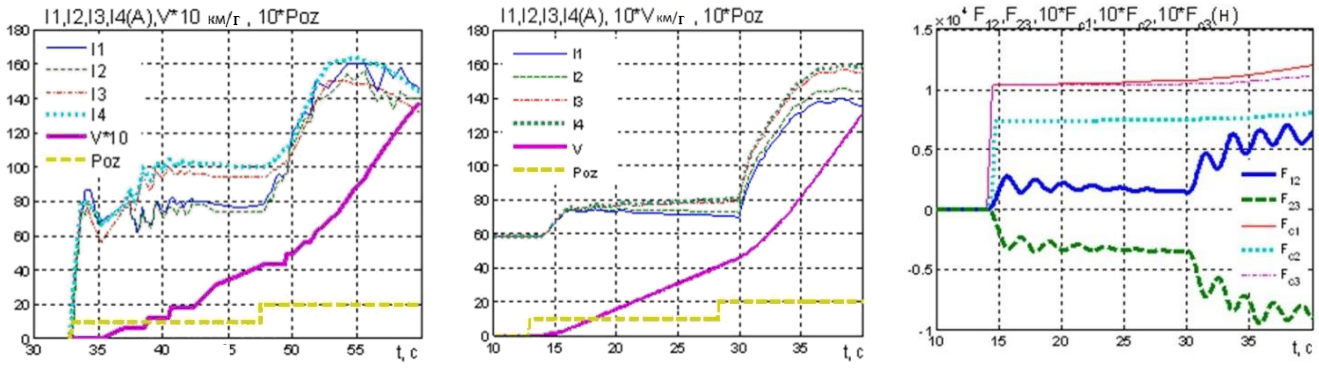
При порівнянні реальних режимів роботи АТЕП ДП ДЕЛ-02(04) під час експлуатації з даними моделювання до моделі були внесені зміни, що враховують особливості силової частини АТЕП цього ДП. Досліджувалася робота ДП в умовах експлуатації на мотор-вагонному депо Христинівка Одеської залізниці, зокрема для двох експлуатаційних режимів: розгону при створенні рушійних моментів усіма чотирма ТАД та розгону при роботі двох ТАД

одного моторного вагону. На штатній системі зберігання та відображення інформації фіксувалися швидкості дизелів і ТАД, струми, напруги і потужності силового устаткування АТЕП ДП.

Розроблена базова математична модель АТЕП ДП вигляду МРНМ, у структурі якої прийнятий один з варіантів реалізації СК ТАД - векторна СК. Використовувалися ідеалізовані моделі ТАД і перетворювачі частоти з АІН-ШІМ, у вигляді лінеаризованих передатних функцій замкнених контурів регулювання.

Результати вимірів і моделювання режимів ДП при русі на рівній ділянці шляху для першого випадку показані на рис. 16 а, б і в відповідно. При перемиканні контролера в позицію 1 (сигнал Poz) починається рух ДП, викликаний збільшенням струмів $I1 - I4$ і моментів ТАД. При перемиканні контролера в позицію 2 збільшується кутова швидкість дизелів і зростають потужності генераторів. Струми ТАД обмежені, відрізняються не значно і складають 150-160 А, прискорення ДП при цьому максимальне – 0,33 м/с^2. При моделюванні сили опору руху вагонів F_{c1}, F_{c2}, F_{c3} обчислювалися за рівняннями основного питомого опору і задавалися незначні відмінності в радіусах коліс – r_1=0,4700 м, r_2=0,4704 м, r_3=0,4741 м, r_4=0,4750 м. При підмиканні коректорів досягаються рівність моментів ТАД і зниження у декілька разів амплітуди і частоти коливань швидкостей вагонів.

Порівняння параметрів режимів роботи АТЕП ДП при промислових випробуваннях і базової математичної моделі показало адекватність моделі вигляду МРНМ реальному об'єкту при не повністю відомій його будові. Відмінності струмів ТАД під час розгону не перевищували 25% (пояснюється наявністю спектра гармонік струмів ТАД в реальному устаткуванні і моделюванням тільки першої (основної) гармоніки струмів), як на моделі так і в експерименті виникали коливання струмів ТАД, період яких відрізнявся на 30%. Додаткові дослідження на моделі показали виникнення коливань швидкостей вагонів, коливань сил і відстаней між вагонами. При цьому амплітуда коливань сил між вагонами перевищує 1000 Н. Амплітуди коливань різниць



а) б) в)

Рис. 16. Результати досліджень при русі ДП на чотирьох ТАД; струмів ТАД, швидкості потягу і позиції контролера при випробуваннях і моделюванні відповідно (а) і (б), сили між вагонами і сили опору руху вагонів (в)

швидкостей вагонів досягають 0,04 км/г. Параметри режиму механічної частини ДП (швидкість поїзду, сили опору руху) в моделі і в експерименті відрізнялися на 10 %.

ВИСНОВКИ

В дисертації розв’язана науково-прикладна проблема синтезу СК лінійних і нелінійних ЕМС із заданими, відповідно вимог технологічних процесів, показниками якості регулювання. Розв’язання проблеми здійснюється на основі синтезу моделей ЕМС вигляду МРНМ. Наведені в дисертаційній роботі дослідження дозволяють дійти таких висновків.

1. Сформульований напрям досліджень, який полягає в розробці (з урахуванням особливостей математичного опису ЕМС) структур МРНМ, методів синтезу у їх вигляду математичних моделей ЕМС й ідентифікації параметрів в реальному часі, оптимального налагодження на цих моделях СК.

2. Розроблені методи перетворення математичних моделей лінійного об'єкта з прогнозуванням і без прогнозування динаміки дозволяють отримати мінімальну структуру моделі вигляду МРНМ і задати початкові значення її вагових коефіцієнтів, що підвищує точність моделі і зменшує час її навчання.

3. Розроблені структури МРНМ (з урахуванням особливостей математичного опису ЕМС) і методи розрахунку і навчання на них моделей нелінійних ЕМС (що, описуються диференціальними рівняннями з різним видом нелінійностей) за параметрами режиму роботи об'єкта, дозволяють значно зменшити в МРНМ кількість вагових коефіцієнтів, підвищити точність моделей і зменшити час навчання.

4. Розроблений метод синтезу моделей вигляду МРНМ ЕМС з неповністю відомою структурою дозволяє за параметрами режиму роботи ЕМС (з врахуванням вимог до окремих елементів) синтезувати модель заданої точності.

5. Синтезовані за розробленими методами моделі вигляду МРНМ: АД при живленні від синусоїдного джерела напруги і від АІН з ШІМ; ТЕП з ДПСПЗ; двомасовою ЕМС з ДПСПЗ, пружними зв'язками і люфтом; СГ і дизеля з СК; механічної частини мотор-вагонного АТЕП ДП, мають високу точність.

6. Застосування розроблених методів синтезу вигляду МРНМ моделей ДПСПЗ з нелінійною залежністю статичного момента опору від швидкості двигуна за параметрами режиму устаткування дослідного стенда, показало високу точність (максимальна відносна помилка за струмом й швидкістю не перевищувала 4%) отриманих моделей.

7. Розроблена методика ідентифікації параметрів ЕМС за ваговими коефіцієнтами їх моделей вигляду МРНМ дозволила для розглянутих об'єктів забезпечити помилку ідентифікації, менше ніж 5-10%.

8. Досліджені методики оптимального налагоджування СК на математичній моделі ЕМС показали: нелінійний регулятор із структурою, що перемикається, забезпечує високу якість перехідних процесів, як в статиці, так і в динаміці; при використанні нелінійного регулятора досягається стійкість системи при змінюванні параметрів об'єкта на два порядки; формування нелінійних коефіцієнтів ФР дозволяє підвищити якість перехідних процесів; паралельна нелінійна корекція (на нечітких НМ) виходу класично налагодженого регулятора покращує якість перехідних процесів в двомасовій ЕМС; налагодженням нелінійних регуляторів із застосуванням ГА за різними критеріями досягаються бажані перехідні процеси в нелінійній ЕМС.

9. Методика ідентифікації струму навантаження і електромеханічної постійної часу ЕП з ДПС під час розгону двигуна (режим відсічення за струмом) без використання інформації від давача швидкості дозволив забезпечити високу точність (помилка менше 1%).

10. Математична модель АТЕП ДП дозволяє досліджувати електромагнітні і електромеханічні процеси у взаємозв'язаній системі, що враховує спільну роботу дизеля, генератора, частотно-регульованих (при векторному керуванні) ТАД, пружності між вагонами, мотор-вагонну тягу і проковзування коліс. На цій моделі показана працездатність запропонованого удосконалення керування ДП, коли машиніст задає швидкість поїзду і дизель працює на економічній характеристиці. Математичні моделі вузлів АТЕП ДП вигляду МРНМ мали високу точність.

11. Дослідження математичної моделі гібридного АТЕП ДП показало доцільність її використання для дослідження СК і процесів у силових агрегатах. За результатами моделювання економія палива на розглянутій ділянці склала 20 %, при цьому знижені в 2-3 рази динамічні навантаження на дизель і АБ.

12. Дослідження на моделі ДП з АТЕП показали, що без введення в СК додаткових коректорів виникають поздовжні коливання між вагонами і ТАД розвивають різні (навіть до різних знаків) моменти. Введення в СК, налагоджених за допомогою ГА, коректорів за різницею швидкостей вагонів і моментів двигунів дозволило забезпечити рівність моментів ТАД і знизити амплітуду коливань сил між вагонами і втрати енергії на їх демпфування з 2,15 кДж до 0,61 кДж протягом 400 с руху ДП.

13. Порівняння параметрів режиму ДП при його експлуатації з моделью вигляду МРНМ показало, що відмінності струмів ТАД під час розгону не перевищували 25 % (відмінності пояснюються наявністю спектра гармонік струмів в реальному устаткуванні і моделюванням першої (основної) гармоніки); як на моделі, так і в експерименті виникали коливання струмів ТАД, їх період відрізнявся на 30%; швидкості поїзду відрізнялися менш, ніж на 10 %. Показані на моделі змінювання фізичних величин, що не вимірювались, так амплітуда коливань сил між вагонами перевищує 1000 Н, амплітуди коливань різниць швидкостей вагонів досягають 0,04 км/г.

14. Результати роботи впроваджені в ВАТ НДІ «Перетворювач» м. Запоріжжя, у моторвагонному депо Христинівка Одеської залізниці і навчальному процесі кафедри електропривода та автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Орловский И.А. Разработка алгоритма управления с переменной структурой двигателем постоянного тока / И.А. Орловский, Д.С. Пацелий // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2001. – № 2. – С. 32–38.

Здобувачем розроблено алгоритм СК ЕП у якому структура регулятора швидкості змінюється з П на ПІ під час перехідного процесу.

2. Орловский И.А. Определение параметров привода постоянного тока в режиме ограничения тока якоря / И.А. Орловский // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. –

2002. – № 1. – С. 63–66. (Перелік № 5. – Бюлетень ВАК України. – 2000. – № 3. – С. 10)

3. Орловский И.А. Оценка вектора состояния асинхронного двигателя искусственной нейронной сетью / И.А. Орловский // Автоматизація процесів та управління. Вісник СевДТУ. – Севастополь: СевНТУ. – 2004. вип. 58. – С. 150–160.

4. Орловский И.А. Использование фаззи-регулирования в электроприводе постоянного тока с упругой связью / И.А. Орловский, П.А. Соколов // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2004. – № 2. – С. 9–15.

Здобувачем розроблено алгоритм СК ЕП двомасовою системою з паралельною адаптивною нечіткою корекцією виходу класичного регулятору швидкості.

5. Орловский И.А. Идентификация момента инерции и момента сопротивления в электроприводе постоянного тока / И.А. Орловский // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2005. – № 1(13). – С. 140–144.

6. Орловский И.А. Использование нечётких нейронных сетей для управления в электроприводе постоянного тока с изменяющимися параметрами / И.А. Орловский, А.А. Синявский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – вип. 45. – С. 196–199.

Здобувачем отримані рівняння ідентифікації нелінійних від кута повернення вала моментів інерції та статичного опору, та ідея апроксимації цих коефіцієнтів НМ.

7. Орловский И.А. Формирование нелинейных коэффициентов ПИ-регулятора с помощью нечёткой логики / И.А. Орловский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – вип. 54. – С. 88–93.

8. Орловский И.А. Применение генетических алгоритмов для определения параметров нелинейных регуляторов в электроприводе постоянного тока / И.А. Орловский, Ю.С. Бут // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2005. – № 2. – С. 46–53.

Здобувачем розроблено метод пошуку параметрів нелінійних регуляторів для різних критеріїв з використанням ГА.

9. Орловский И.А. Нахождение параметров нелинейных регуляторов в системах электропривода с использованием методов искусственного интеллекта / И.А. Орловский // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2006. – Ч. 7, Тематичний вип. – С. 57–62.

10. Орловский И.А. Модель электропривода постоянного тока на рекуррентных нейронных сетях / И.А. Орловский // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2006. – № 1 (15). – С. 151–159.

11. Орловский И.А. Прогнозирование динамики тиристорного электропривода постоянного тока моделями на рекуррентных нейронных сетях/ И.А. Орловский // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ.– 006.– № 1.– С. 61–68.

12. Орловский И.А. Модель тиристорного электропривода постоянног о тока на рекуррентных нейронных сетях. / И.А. Орловский, Д.Б. Горянский // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ: Техніка. – 2006. – вип. 66. – С. 357–360.

Здобувачем розроблено алгоритм корегування навчання НМ Ельмана при синтезі моделі тиристорного ЕП.

13. Орловский И.А. Поиск генетическими алгоритмами весовых коэффициентов в моделях тиристорного электропривода на рекуррентных нейронных сетях / И.А.Орловский, Ю.С. Бут // Штучний інтелект. – Донецьк: ІПШІ МОН і НАН України «Наука і освіта». – 2006. – № 3. – С. 310–322.

Здобувачем розроблено метод пошуку вагових коефіцієнтів математичної моделі вигляду МРНС тиристорного ЕП з використанням ГА.

14. Орловский И.А. Разработка моделей нелинейных электротехнических объектов в виде степенных рекуррентных нейронных сетей / И.А. Орловский, А.А. Синявский // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2007. – № 1(17). – С. 128–137.

Здобувачем розроблено метод синтезу математичних моделей у вигляді СРНС нелінійних електротехнічних об'єктів за параметрами режиму.

15. Орловский И.А. Идентификация внутренних параметров тиристорного электропривода постоянного тока по его моделям на рекуррентных нейронных сетях / И.А. Орловский // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2007. – № 5. – С. 19–24.

16. Орловский И.А. Математическая модель частотно-регулируемого асинхронного тягового электропривода дизель-поезда с усовершенствованной системой управления / И.А. Орловський, Е.В. Страколист // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2007. – Тематичний вип. – С. 261–264.

Здобувачем розроблено: математичну модель АТЕП ДП у взаємопов'язаній системі «дизель – генератор – асинхронний двигун» з удосконаленою СК.

17. Орловский И.А. Учёт упругих связей и распределённой нагрузки при векторном управлении асинхронным тяговым приводом дизель-поезда / И.А. Орловский, А.Н. Кулешов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропнтровськ: Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – вип. 19. – С. 209–213.

Здобувачем розроблено: математичну модель АТЕП ДП з врахуванням пружності між вагонами, СК з додатковими блоками коректорів.

18. Орловский И.А. Математическая модель многодвигательного частотно-регулируемого асинхронного электропривода дизель-поезда с векторной системой управления / А.В. Волков, И.А. Орловский // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2008. – Ч. 6, Тематичний вип. – С. 31–36.

Здобувачем розроблено: математичну та імітаційні моделі мотор-вагонного АТЕП ДП з удосконаленою СК.

19. Орловский И.А. Расчёт моделей тиристорного электропривода постоянного тока на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях / И.А. Орловский, А.А. Синявский // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2008. – № 1. – С. 7–19.

Здобувачем розроблено метод розрахунку математичних моделей у вигляді ПРНС нелінійних ЕМС за параметрами режиму роботи, структура програми.

20. Орловский И.А. Расчёт моделей тягового асинхронного двигателя на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях / И.А Орловский // Вісник Національного технічного універси-

тету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – вип. 30. – С. 582–585.

21. Орловский И.А. Расчёт и обучение моделей нелинейных электромеханических объектов на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях / И.А. Орловский, А.А. Синявский // Штучний інтелект. – Донецьк: ІПШІ МОН і НАН України «Наука і освіта». – 2008. – № 3. – С. 579–590.

Здобувачем розроблено методи розрахунку та навчання моделей вигляду ПРНС нелінійних ЕМС за параметрами режиму роботи, структура програми.

22. Орловский И.А. Расчёт моделей нелинейных электромеханических объектов на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях из их известных математических моделей / И.А. Орловский // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2009. – № 1. – С. 20–31.

23. Орловский И.А. Расчёт на рекуррентных нейронных сетях математических моделей асинхронного двигателя при питании от автономного инвертора напряжения / И.А. Орловский, Ю.В. Голянчук // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2009. – № 1. – С. 28– 39.

Здобувачем розроблено метод розрахунку математичних моделей вигляду ФРНС АД при живлені від АІН.

24. Орловский И.А. Математическая модель на рекуррентной нейронной сети механики движения вагонов дизель-поезда / И.А. Орловский, Ю.В. Голянчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – Ч. 2, вип. 3(56). – С. 116–119.

Здобувачем розроблено метод розрахунку математичних моделей вигляду ФРНС механіки руху вагонів ДП, структура програми.

25. Орловський І.А. Математична модель та система керування гібридного асинхронного тягового електроприводу дизель-потяга / І.А. Орловський, Ю.О. Крисан // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2009. – № 2. – С. 43–49.

Здобувачем розроблено математичну модель та СК гібридного АТЕП ДП.

26. Орловский И.А. Настройка системы управления распределённого электропривода дизель-поезда генетическими алгоритмами / И.А. Орловский, Ю.Ю. Туник // Електроінформ. – Львів: ЕКОінформ. – 2009. – Тематичний вип. – С. 443–446.

Здобувачем розроблено методика настроювання удосконаленої СК ЕП дизель-поїзда за різними критеріями з використанням ГА.

27. Орловский И.А. Измерение параметров режима дизель-поезда ДЭЛ-02 во время эксплуатации и сравнение их с математической моделью. // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2010. – № 1. – С. 4–18.

28. Орловский И.А. Математические модели дизеля и синхронного генератора тягового электропривода дизель-поезда на нейронной сети / И.А. Орловский // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2010. – № 2. – С. 62 –72.

29. Орловский И.А.. Разработка моделей на нейронных сетях сериесного двигателя постоянного тока по экспериментальным данным / И.А. Орловский, И.В. Блохин, А.С. Смирнов // Віс-

ник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ. – 2010. – Ч. 1, вип. 3(62). – С. 153–156.

Здобувачем розроблено метод розрахунку та навчання математичних моделей серієсного двигуна вигляду МРНС за даними експерименту.

30. Орловский И.А. Обучение на рекуррентной нейронной сети модели сериесного двигателя и идентификация его внутренних параметров. / И.А. Орловский, И.В. Блохин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – вип. 28. – С. 566–568.

Здобувачем отримано рівняння ідентифікації параметрі двигуна з його математичної моделі вигляду ПРНС.

31. Орловский И.А. Синтез базовой математической модели в виде модифицированной рекуррентной нейронной сети электромеханической системы с не полностью известной структурой. / П.Д. Андриенко, И.А. Орловский, В.П. Метельский // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2011. – № 1. – С. 50–56.

Здобувачем розроблено метод синтезу математичних моделей ЕМС вигляду МРНС при не повністю визначеній структури об'єкту.

32. Орловский И.А. Идентификация математической модели в виде полиномиальной рекуррентной нейронной сети и настройка регуляторов электропривода с сериесным двигателем / И.А. Орловский // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2011. – № 1(24). – С. 149–157.

33. Орловский И.А. Синтез автоматизированных электромеханических систем на основе модифицированных рекуррентных нейронных сетей / В.Б. Клепиков, И.А. Орловский // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Київ: Техніка. – 2011. – №3(79). – С. 453–457.

Здобувачем розроблені методи синтезу автоматизованих ЕМС на основі МРНМ.

АНОТАЦІЇ

Орловський І.А. Синтез автоматизованих електромеханічних систем на основі модифікованих рекурентних нейронних мереж

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2012.

Дисертація присвячена розвитку теорії синтезу СК ЕМС із заданими показниками якості регулювання на основі запропонованих МРНМ, які відрізняються від відомих тим, що структура математичної моделі вигляду МРНМ визначається структурою математичної моделі ЕМС.

Розроблені методи перетворення лінійних і нелінійних (з різним видом нелінійностей) математичних моделей ЕМС вигляду МРНМ, розрахунку та навчання градієнтними алгоритмами цих моделей за параметрами режиму ЕМС. Метод навчання дозволяє за одну епоху коригувати вагові коефіцієнти МРНС і отримувати модель ЕМС в реальному часі. Розроблена методика ідентифікації параметрів ЕМС з їх математичних моделей вигляду МРНМ.

Запропоновані методи застосовані для синтезу математичних моделей вигляду МРНМ: ТАД,

механічної частини ДП, синхронного генератора і дизеля з СК та ТЕППС. Відповідно запропонованим критеріям знайдені параметри СК АТЕП ДП з використанням його моделей вигляду МРНМ і ГА, що дозволило забезпечити рівність моментів двигунів, зниження амплітуди і тривалості коливань сил між вагонами та зменшення споживання дизельного палива. Розроблені методи синтезу перевірено на дослідному стенді, де були зрівняні параметри режиму математичних моделей ДПСПЗ вигляду ПРНМ і реального устаткування, а також зрівняні параметри режиму АТЕП ДП при експлуатації з результатами моделювання. Це порівняння виявило високу точність моделей.

Ключові слова: автоматизована електромеханічна система, електропривод, система керування, рекурентна нейронна мережа, математичне моделювання, генетичний алгоритм, критерій якості, дизель-поїзд.

Орловский И.А. Синтез автоматизированных электромеханических систем на основе модифицированных рекуррентных нейронных сетей

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2012.

Диссертация посвящена развитию теории синтеза систем управления (СУ) электромеханических систем (ЭМС) с заданными показателями качества регулирования на основе предложенных модифицированных рекуррентных нейронных сетей (МРНС), которые отличаются от известных тем, что структура математической модели в виде МРНС определяется структурой математической модели ЭМС. Анализ характеристик автоматизированных ЭМС, требований к ним и традиционных методов их синтеза показал, что необходима разработка новых методов синтеза совместного использования искусственного интеллекта и информации о ЭМС.

Для повышения точности моделей и снижения времени их обучения разработаны методы преобразования математических моделей линейных и нелинейных ЭМС (описывающиеся дифференциальными уравнениями с разным видом нелинейностей) с прогнозированием и без прогнозирования динамики для получения минимальной структуры модели в виде МРНС и задания начальных значений ее весовых коэффициентов. Разработаны методы расчета и обучения математических моделей нелинейных ЭМС в виде МРНС по параметрам режима работы объекта. Метод обучения позволяет за одну эпоху корректировать весовые коэффициенты МРНС и получать модель ЭМС в реальном времени.

Предложенные методы применены для синтеза математических моделей в виде МРНС: тягового асинхронного двигателя (ТАД) при питании от синусоидального источника напряжения и от автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией; тиристорного электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТПВ); двухмассовой ЭМС с ДПТПВ, упругими связями и люфтом; СГ и дизеля с СУ; механической части мотор-вагонного асинхронного тягового электропривода (АТЭП) дизель-поезда (ДП). Разработанные методы синтеза проверенны на опытном стенде при сравнении параметров режима математических моделей ДПТПВ в виде МРНС и реального оборудования, а также при

сравнении значений параметров режима АТЭП ДП при эксплуатации с результатами моделирования. Результаты показали высокую точность моделей. Разработанная методика идентификации параметров ЭМС по весовым коэффициентами их моделей в виде МРНС позволила, для рассмотренных объектов, обеспечить ошибку идентификации менее 5-10%.

Исследованы следующие методики оптимальной настройки СУ на математической модели ЭМС: регулятор с переключающейся структурой; при использовании нелинейного регулятора достигается устойчивость системы при изменении параметров объекта на два порядка; формирование нелинейных коэффициентов нечёткого регулятора позволяет повысить качество переходных процессов; параллельная нелинейная коррекция (на нечетких нейронных сетях) выхода классически настроенного регулятора улучшает качество переходных процессов в двухмассовой ЭМС; при настройке нелинейных регуляторов с применением генетических алгоритмов для разных критериев достигаются желательные переходные процессы в нелинейной ЭМС.

Разработана математическая модель АТЭП ДП позволяет исследовать электромагнитные и электромеханические процессы во взаимосвязанной системе, которая учитывает совместную работу дизеля, генератора, частотно-регулируемых (при векторном управлении) ТАД, упругости между вагонами, мотор-вагонную тягу и проскальзывания колес. На этой модели показана работоспособность предложенного усовершенствования управления ДП, когда машинист задает скорость поезда и дизель работает на экономической характеристике. Синтезированные математические модели узлов АТЭП ДП в виде МРНС имели высокую точность. На математической модели показаны изменения физических величин, которые не измерялись, например, амплитуда колебаний сил между вагонами превышает 1000 Н, амплитуды колебаний разностей скоростей вагонов достигают 0,04 км/г. Исследования СУ и процессов в силовых агрегатах на математической модели гибридного АТЭП ДП показали целесообразность использования модели при синтезе СУ.

Согласно заданным критериям, найдены параметры СУ АТЭП ДП с использованием его моделей в виде МРНС и генетических алгоритмов, что позволило обеспечить равенство моментов двигателей, снижение амплитуды и длительности колебаний сил между вагонами и. потребление дизельного топлива.

Принятые к внедрению в НИИ «Преобразователь» г. Запорожья система усовершенствованного управления АТЭП ДП, методы синтеза ЭМС в виде МРНС и настройка регуляторов АТЭП позволит улучшить технико-экономические показатели функционирования ДП.

Ключевые слова: автоматизирована электромеханическая система, электропривод, система управления, рекуррентная нейронная сеть, математическое моделирование, генетический алгоритм, критерий качества, дизель-поезд.

Orlovsky. I.A. A synthesis of automation electromechanics systems on the basis of the modified recurrent neuron networks

The dissertation on competition of a scientific degree of Dr.Sci.Tech. on a speciality 05.09.03 – electrical engineering complexes and systems. – National Technical Univer-

37

sity «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, 2012.

Dissertation is sacred to development of theory of synthesis of control systems (CS) electro mechanics systems (EMS) with the set indexes of quality adjusting on the basis of offered modified recurrent neuron networks (MRNN), which differ from known by the structure of mathematical model of type of MRNN is determined by the structure of mathematical model of EMS.

During the work were developed methods of transformation of linear and nonlinear mathematical models of EM S of type of MRNN, calculation and trains of these models gradient algorithms by parameters of the mode of EMS. The method of training allows to correct the weight coefficients of MRNN and get the model of EMS in real-time for one epoch. Also was developed method of identification of EMS parameters from their mathematical models of MRNN type.

The offered methods are applied for the synthesis of mathematical models of MRNN elements type: the traction asynchronous drive, mechanical part of the DT, the synchronous generator and diesel with CS and direct current thyristor drive. According to criteria the found parameters of CS diesel-train with using of his models of MRNN type and genetic algorithms, that allowed to provide equality of engines moments decline of amplitude, duration of forces vibrations between carriages and to reduce the consumption of diesel fuel. The developed methods of synthesis were tested on the test stand, where compared parameters of the mathematical models mode of electric motor of MRNN type and real equipment , and also at comparison of parameters values of the drive mode of diesel-train during exploitation with results of modelling. Results showed high exactness of models.

Keywords: the electromechanics system, electrodrive, control system, recurrent neuron network, mathematical model, genetic algorithm, criterion of quality, diesel-train, is automated.

Підписано до друку 03.01.2012 р. Формат 60х90 1/16.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 1,9. Наклад 100 прим. Зам. № 000

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21