

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

БУРЯКОВСЬКИЙ СЕРГІЙ ГЕННАДІЙОВИЧ



УДК 629.429.3:621.382.2/.3

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВИБОРУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ
СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ ДЛЯ ШВИДКІСНИХ
ТА ВИСОКОШВИДКІСНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

**Науковий
консультант**

доктор технічних наук, професор
Любарський Борис Григорович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри електричного транспорту
та тепловозобудування

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Муха Андрій Миколайович,
Дніпровський національний університет
залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна,
завідувач кафедри електротехніки
та електромеханіки

доктор технічних наук, професор
Хворост Микола Васильович,
Харківський національний університет міського
господарства ім. О. М. Бекетова,
завідувач кафедри охорони праці
та безпеки життєдіяльності

доктор технічних наук, професор
Садовой Олександр Валентинович,
Дніпровський державний технічний університет,
професор кафедри електротехніки
та електромеханіки

Захист відбудеться « 27 » червня 2017 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.15 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розіслано « ____ » _____ 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Якунін Д. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Високошвидкісний і швидкісний залізничний транспорт являє нерозривну сукупність рухомого складу, колії, систем електропостачання та керування. Одними з найважливіших ланок колії, що визначають швидкість руху, є стрілочні переводи, відмінні особливості яких полягають в підвищеній, в порівнянні зі звичайними залізницями, довжині гостряків і наявності рухомого осердя хрестовин, що забезпечують безпечність роботи електротранспорту.

За кордоном для приводу гостряків та рухомого осердя хрестовин використовують, в основному, електроприводи на основі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Очевидно, що різна ширина колії 1435 мм і 1520 мм не може не позначатися на параметрах і робочих властивостях електроприводів стрілочних переводів. Тому розробки зарубіжних дослідників в цій області не можуть бути безпосередньо перенесені на умови експлуатації в Україні. Разом з тим, на загальнопромислових електроприводах в зв'язку з застосуванням нових електротехнічних матеріалів, новітніх технологій та розвитком перетворювальної техніки в даний час отримують широке розповсюдження системи з індукторними і лінійними електродвигунами, які завдяки унікальним властивостям конструкцій і можливостям систем керування забезпечують високу точність позиціонування робочого органу і необхідну регульованість тягового зусилля. Однак, робота цих електроприводів в системі стрілочних переводів для електротранспорту, де на різних ділянках по довжині ця регульованість тягового зусилля особливо потрібна, ще недостатньо вивчена. Тим більше відсутнє наукове обґрунтування порівняння різних типів електромеханічних перетворювачів енергії для електроприводів стрілочних переводів для вибору їх раціонального типу.

Тому робота, спрямована на створення наукових основ вибору електроприводів стрілочних переводів для швидкісних і високошвидкісних залізниць є актуальною науково-практичною проблемою для електротранспорту, яка й визначила напрямок дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту МОН України з урахуванням концептуальних положень підпрограми 02.5 «Залізничний транспорт», концепції розвитку транспортно-залізничного комплексу України на середньотерміновій період до 2020 року (Наказ Державної адміністрації залізничного транспорту № 764 від 05.11.2001 р.), а також відповідно до держбюджетних НДР МОН України «Нестационарні режими роботи перспективних систем стрілочного електроприводу» (ДР № 0110U002484) та «Розробка і дослідження роботи електроприводу стрілочного переводу моношпального типу» (ДР № 117U000643), де здобувач був науковим керівником.

Мета і задачі дослідження. *Метою досліджень* є створення наукових основ вибору електроприводів стрілочних переводів на базі сучасних і перспективних електромеханічних систем для швидкісних і високошвидкісних залізничних електротранспортних систем.

Для досягнення наміченої мети поставлені наступні задачі:

- сформувані на базі перспективних електромеханічних систем структурні схеми стрілочних переводів для швидкісних і високошвидкісних залізниць електротранспорту;

- визначити показники, параметри, характеристики та критерії оцінки ефективності роботи різних типів електроприводів стрілочних переводів;

- створити математичні та імітаційні моделі процесу перетворення енергії в переводних механізмах стрілок, які дозволять з єдиних позицій оцінити робочі властивості різних типів електроприводів стрілочних переводів при стаціонарних і нестаціонарних режимах їх роботи;

- вибрати раціональні схеми, та побудувати ефективні алгоритми управління для існуючих і перспективних електроприводів стрілочних переводів;

- шляхом комп'ютерного та фізичного моделювання реальних переводних механізмів стрілок з різними типами електроприводів, встановити закономірності впливу електрофізичних та механічних параметрів складових електроприводів та систем їх керування на робочі характеристики приводів при стаціонарних і нестаціонарних режимах їх роботи;

- виробити рекомендації щодо визначення раціональних типів електроприводів стрілочних переводів і параметрів їх складових для швидкісного та високошвидкісного електротранспорту.

Предмет дослідження: електромеханічні процеси в електроприводах стрілочних переводів.

Об'єкт дослідження: системи електромеханічного перетворення енергії електроприводів стрілочних переводів.

Методи дослідження: Методи узагальненої теорії електромеханічних перетворювачів енергії, які базуються на розв'язанні рівняння Лагранжа для електромеханічної системи; метод кінцевих елементів та комбінований коло-польовий метод для розрахунку магнітного поля електромеханічних перетворювачів енергії; методи теорії автоматичного керування для розробки математичних моделей керованих процесів в багатомасових електромеханічних системах; метод інтегральної оцінки теорії оптимального керування і метод найменших квадратів застосовано для синтезу систем керування; метод Зіглера – Нікольса та методи нечіткої логіки – для синтезу регулятора швидкості системи керування вентиляно-індукторним двигуном; методи Вейля та циклічного покоординатного спуску – для оптимізації геометричних розмірів лінійного двигуна; методи наближення функцій – для апроксимації дискретних експериментальних даних цифрового моделювання; імітаційне моделювання – для дослідження процесів роботи приводів; метод циклічного покоординатного спуску – при розв'язанні задач оптимізації режимів роботи тягових приводів; метод Рунге – Кутта – для отримання кривих швидкості та руху гостряків стрілочного переводу; методи фізичного моделювання – для перевірки адекватності розроблених математичних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів:

- для швидкісних і високошвидкісних (Ш і ВШ) електрифікованих залізниць з шириною колії 1520 мм отримала подальший розвиток теорія електромеханічного

перетворення енергії в частині вибору типу електроприводу (ЕП) стрілочного переводу (СП), яка, на відміну від існуючих, з єдиних позицій і загальних критеріїв враховує особливості робочих характеристик і вплив на них геометричних і електрофізичних параметрів різних типів двигунів та дає можливість їх порівняння, що дозволяє визначити тенденцію переходу від двигунів ротативного типу – постійного струму (ДПС), асинхронного (АД) і вентильно-індукторного (ВІД) до лінійних – електромагнітного типу (ЛДЕМТ) та індукторного (ЛІД) з мікропроцесорними (МП) системами керування (СК), як ефективний шлях зниження масогабаритних параметрів ЕП і поліпшення його робочих властивостей за рахунок спрощення механічних ланок приводів СП;

- отримала подальший розвиток теорія моделювання електромеханічних систем стрілочних переводів у напрямку створення узагальненої математичної моделі робочих процесів з урахуванням особливостей задіяних в них електродвигунів, які відрізняються принципом дії при спільності підходу до кінематичної лінії, а також дозволяють з єдиних позицій оцінити ефективність різних типів їх систем керування;

- удосконалено універсальний підхід до складання математичної моделі робочих процесів, що полягає у врахуванні параметрів електромеханічної системи та особливостей фрикційного навантаження в зоні контакту гостряк-подушка, який на відміну від існуючих дозволяє врахувати вплив нелінійностей на роботу пристрою в системах електротранспорту;

- вперше розроблено універсальний підхід до визначення оптимальних параметрів системи керування стрілочним переводом, що дозволяє реалізувати вимоги як до стрілочних електроприводів магістралей швидкісного і високошвидкісного транспорту, так і до гіркової централізації;

- вперше для оцінки ефективності роботи стрілочних переводів запропоновано узагальнений векторний критерій, складовими якого є значення часу переводу, пружної сили в робочій тязі, імпульсу удару гостряка, а також загальних втрат потужності системи, що наведені у відносних одиницях; за модулем цього критерію виконується остаточна оцінка ефективності використання конкретного типу електроприводу стрілочного переводу;

- вперше для електроприводу стрілочного переводу на базі асинхронного двигуна за компонентами векторного критерію оцінки ефективності синтезована система оптимального керування і визначена оптимальна траєкторія швидкості руху гостряків, структура системи керування, що включає цифрові ПІ-регулятори струму та положення, а також П-регулятор швидкості, та ідентифіковані їх параметри, що забезпечує безпеку руху електротранспорту при інтенсифікації його експлуатації;

- вперше за векторним критерієм ефективності запропоновані раціональні області використання різних типів електроприводів: приводи на базі ДПС і АД – для модернізації стрілочних переводів магістрального транспорту, приводи шпального типу на базі ВІД і ЛІД – для гостряків СП швидкісного і високошвидкісного руху, приводи на базі ЛДЕМТ – як для переміщення гостряків, так і рухомого осердя хрестовини стрілочного переводу.

Практичне значення отриманих результатів для електричного транспорту полягає у:

- можливості використання наукових положень, які підтверджено результатами фізичного моделювання робочих властивостей на макеті стрілочного переводу шпального типу, для відпрацювання конструкторських розробок і технологічних процесів по створенню перспективних стрілочних переводів швидкісного і високошвидкісного електричного транспорту;

- придбанні технологічного досвіду при створенні фізичної моделі електроприводу стрілочного переводу шпального типу з вентильно-індукторним двигуном і мікропроцесорним керуванням на базі фазі-логіки, що повністю підтверджує працездатність конструкції;

- можливості ефективної модернізації електроприводів стрілочних переводів на базі ДПС і АД для забезпечення безпеки руху електротранспорту в режимах експлуатації;

- універсальності отриманих наукових положень, які дозволяють здійснювати вибір та оцінку основних параметрів і робочих характеристик для електроприводів пристроїв тяги і допоміжних потреб електрорухомого складу, а також для приводів загальнопромислового застосування.

Оригінальність технічних рішень конструкцій електроприводів стрілочних переводів підтверджена патентами № 25058 «Електропривід стрілкового переводу», № 95497 «Електропривід стрілочного переводу», № 109159 «Безредукторний електропривід стрілочного переводу шпального типу».

Практична цінність роботи підтверджена актами про впровадження результатів дисертаційної роботи в ДП «Проектно-вишукувальний інститут «Укрзалізнич-проект» залізничного транспорту України» (м. Харків), ПрАТ ЕЛАКС (м. Харків), у навчальний процес в Інституті перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту (м. Харків) та в НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Положення та результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведено системний аналіз існуючих приводів стрілочних переводів, які можна використовувати для різних типів систем електричного транспорту, включаючи Ш і ВШ рух; на підставі універсального підходу до складання математичної моделі, який полягає у використанні параметрів електромеханічної системи з урахуванням особливостей фрикційного навантаження в зоні контакту гостряк-подушка, адаптовані моделі ДПС, АД, ВІД і ЛД для СП; перевірка адекватності математичних моделей процесу переводу гостряків для ДПС, АД, ВІД і ЛД за результатами фізичного і імітаційного моделювання; для оцінки робочих властивостей приводів СП в різних режимах роботи введено поняття узагальненого векторного критерію ефективності та визначені його компоненти; синтез СК для ЕП СП на базі ДПС, АД, ВІД і ЛД; розробка алгоритмів визначення параметрів перетворювачів частоти для досягнення заданого критерію якості керування; отримання залежності компонентів узагальненого векторного критерію ефективності для ЕП СП розглянутих типів;

проведено фізичне моделювання на діючому обладнанні, оброблені та узагальнені отримані результати дослідів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися и обговорювалися на: XV – XXII Міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (смт. Миколаївка, 2008, 2012; м. Алушта, 2009, 2010, 2013; м. Одеса, 2011, 2014; м. Харків, 2015), 10-й та 12-й Міжнародних наукових конференціях «Implementing of information systems in computerization and controlling transportation means Arabic and international participation» (Сирія, м. Тартус, 2006, 2008), Міжнародній науковій конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу» (м. Дніпродзержинськ, 2007), 20-й Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективні системи контролю і управління на залізничному транспорті» (м. Алушта, 2007), «Problemy Kolejnictwa» (Польща, м. Варшава, 2014), 77-й науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» УкрДАЗТ (м. Харків, 2015), VI Міжнародній конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» (м. Воловець, 2015), Міжнародній науково-практичній конференції «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Росія, м. Ростов на Дону, 2015), XIV, XVI, XVII Міжнародних конференціях «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах» (м. Кременчук, 2013, 2015, 2016), Міжнародній науково-технічній конференції «Силовая електроніка та енергоефективність» (м. Одеса, 2016).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 47 наукових публікаціях, з них 35 – у фахових наукових виданнях України (18 – у наукометричних базах), 5 – у періодичних фахових іноземних виданнях, 3 – патенти України, 16 – у матеріалах наукових конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертації становить 342 сторінки основного тексту, включаючи: 176 рисунків по тексту, 67 рисунків на 58 окремих сторінках, 15 таблиць по тексту, 239 найменувань використаних джерел інформації на 26 сторінках, 5 додатків на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтована актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з Державними програмами і бюджетними темами, сформульовані мета та основні задачі досліджень, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі наведено аналіз тенденцій розвитку на вітчизняній залізниці та за кордоном систем стрілочних переводів швидкісного та високошвидкісного електротранспорту і перспективних напрямків в компоновці електроприводів та систем керування.

Показані існуючі типи приводів стрілочних переводів від пневматичних і гідравлічних до електричних і комбінованих. Проаналізовано особливості систем стрілочних переводів для ліній швидкісного і високошвидкісного залізничного

транспорту. Окрему увагу приділено механічним вузлам і передавальним пристроям стрілочних переводів. Розглянуті системи діагностики примикання гостряків до рамної рейки для ліній з різними швидкісними режимами експлуатації.

Особливу увагу приділено стрілочним переводам і пристроям, що знаходяться в експлуатації в Україні та новим розробкам, які забезпечують їх безвідмовну роботу. Проаналізовано закони керування електроприводів стрілочних переводів, що знаходяться в експлуатації.

Проведено якісний аналіз типів електродвигунів, що використовуються зараз, та показано їх низьку ефективність і складність в експлуатації. На підставі чого зроблений висновок про необхідність переходу на нові більш сучасні та високоефективні електромеханічні перетворювачі енергії. Особливістю вітчизняних стрілочних переводів є те, що це розімкнуті системи без можливості регулювання основних координат електроприводу.

Таким чином, існує доцільність розробки систем регулювання швидкості та позиціонування гостряків для існуючих стрілочних переводів і створення нових на базі перспективних типів електродвигунів і МП СК.

В даний час найбільш перспективною є шпальна компоновка електроприводу, що дозволяє підвищити експлуатаційні властивості приводів. Розробка шпальних приводів СП обрана як стратегічний план в розробці нових систем електроприводів з перспективними типами двигунів, наприклад ВІД, з МП СК.

Оскільки всі електродвигуни ротаційного типу, що використовуються в приводах вимагають перетворення обертального руху ротора в поступальний рух гостряків, розроблено електромеханічні пристрої безпосереднього перетворення електричної енергії в механічну з поступальним переміщенням – лінійні двигуни, що задовольняють вимогам стрілочних переводів по зусиллям, швидкості і точності переводу гостряків.

Таким чином за якісними показниками, що характеризують робочі властивості: надійність і ремонтпридатність, загальні втрати потужності, швидкодія та простота експлуатації в якості перспективних типів для подальших досліджень обрано наступні типи електродвигунів: ДПС, АД, ВІД, ЛДЕМТ та ЛІД з мікропроцесорними системами керування.

Запропоновано для оцінки роботи ЕП СП ввести узагальнений векторний критерій ефективності з наступними компонентами: значення часу переводу (ts), пружної сили в робочій тязі (F_{12}), імпульсу удару гостряка об рамну рейку (M_i), а також загальні втрати потужності системи СП (ΣP) – $K = [ts, F_{12}, M_i, \Sigma P]^T$. Остаточну порівняльну оцінку ЕП СП запропоновано проводити за модулем узагальненого векторного критерію $|K| = \sqrt{ts^2 + M_i^2 + F_{12}^2 + \Sigma P^2}$.

У другому розділі досліджено поведінку існуючого СП з ДПС та розроблені математичні моделі зі штатною кінематичною ланкою та існуючим способом керування, а також з системами керування на базі системи підлеглого регулювання (СПР), модального регулювання (МР), та зі спостерігачем стану (СпС) за різних умов експлуатації, тобто при сталих та несталих процесах. Запропоновано універсальну математичну модель електромеханічної системи стрілочного переводу (рис. 1) з будь-яким приводним двигуном, що дозволяє враховувати вплив

пружних сил, сил внутрішнього в'язкого тертя, зазорів та нелінійність характеристики тертя виконавчого механізму. Досліджені дво- і тримасові моделі електро-механічної системи (ЕМС). Для верифікації розроблених моделей проведено експеримент на електроприводі стрілочного переводу з ДПС.

Враховано особливості експлуатації стрілочних переводів під впливом атмосферних опадів, а також можливість потрапляння різних вантажів і рідин безпосередньо на поверхні, тертя гостряк-подушка. Особливістю структурної схеми тримасової моделі ЕП (рис. 1) є реалізація характеристики тертя в контакті гостряк-подушка, яка вибиралася згідно з наявними даними про діапазон зміни коефіцієнта тертя з урахуванням специфіки її форми, де $U_{\text{жс}}$ – напруга живлення електродвигуна, V – приведена лінійна швидкість двигуна, F_{12} і F_{23} – пружні сили в робочій і міжгостряковій тязі, V_1 і V_2 – лінійні швидкості першого і другого гостряків СП.

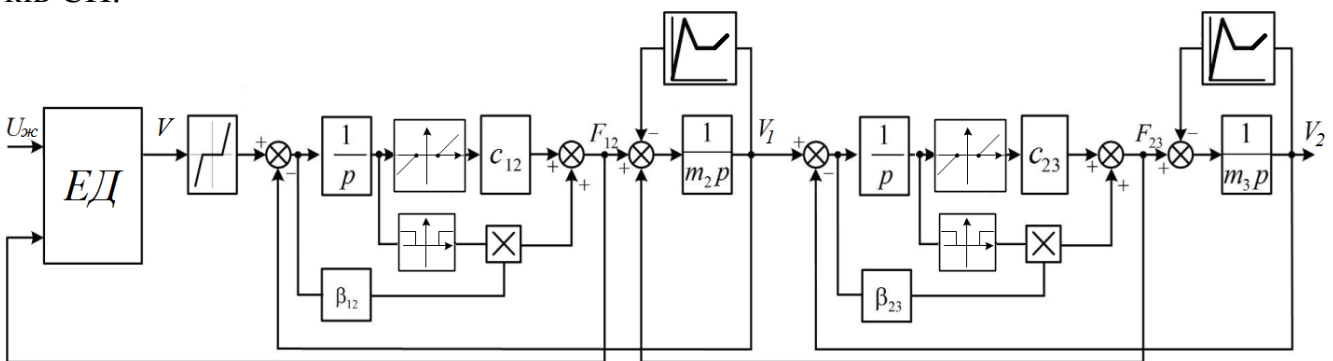


Рисунок 1 – Структурна схема тримасової моделі механічної частини ЕП

Графічне представлення характеристики тертя і робочої ділянки механічної характеристики двигуна наведені на рис. 2. В результаті експериментів на математичній моделі отримані графіки перехідних процесів, які показують, що коливання пружної сили F_{12} можуть носити як затухаючий характер в штатних ситуаціях (рис. 3.а), так і існує можливість виникнення фрикційних автоколивань в кінематичній лінії стрілочного переводу (рис. 3.б).

Синтезована триконтурна СПР з керуванням по координаті положення гостряків на базі ДПС, структурна схема якої показана на рис. 4. На її основі розроблена імітаційна модель ЕП СП. Дослідження, що проведені на імітаційній моделі, показали можливість регулювання швидкості переводу в широкому діапазоні з допустимими навантаженнями в колі струму якоря і досягнення режиму безударного переводу гостряків або з заданим значенням величини імпульсу удару гостряка об рамну рейку.

Результати розрахунків на імітаційній моделі наведені на рис. 5, де показаний перехідний процес в ЕП СП координат сили струму якоря I (1), швидкості обертання двигуна n (2) і їх переміщення S (3) в процентному відношенні до но-

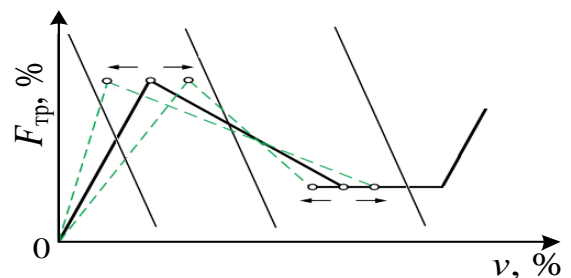


Рисунок 2 – Характеристика тертя і робочої ділянки механічної характеристики двигуна

мінальних значень при величині завдання швидкості 100 % (рис. 5а) та 140 % (рис. 5б).

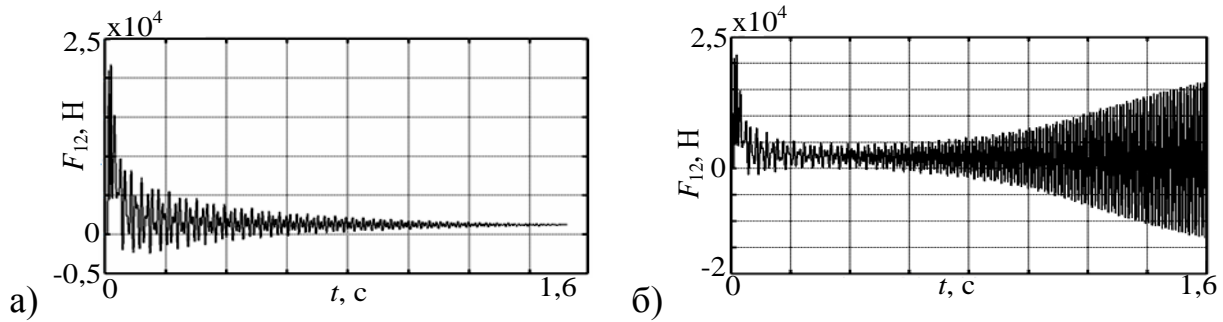


Рисунок 3 – Осцилограми коливання пружної сили F_{12} в кінематичній лінії СП

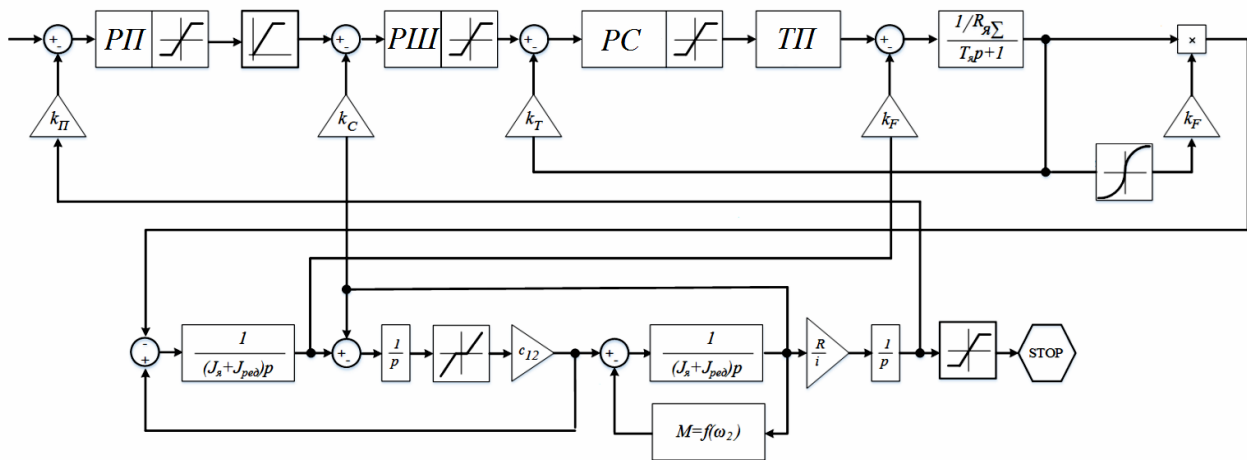


Рисунок 4 – Структурна схема СПР положення гостряків ЕП СП

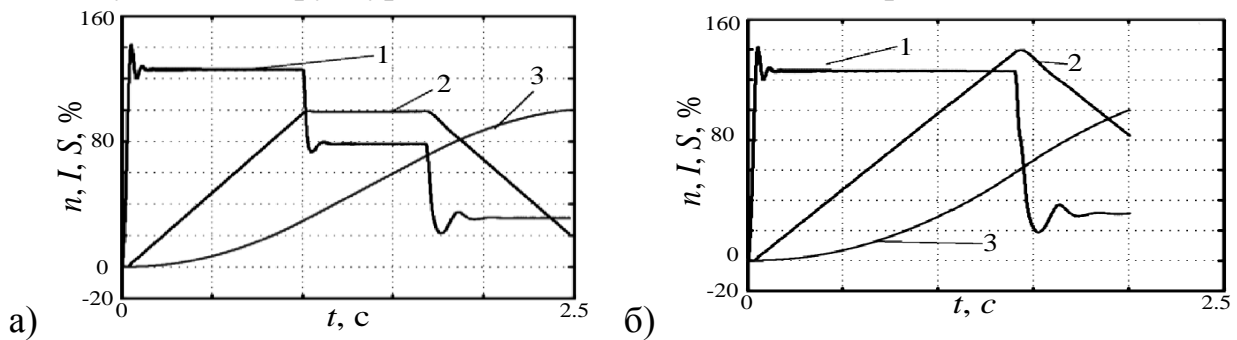


Рисунок 5 – Перехідний процес в СПР ЕП СП координат сили струму якоря I (1), швидкості обертання двигуна n (2) і їх переміщення S (3) при величині завдання швидкості 100 % – а) і 140 % – б)

Синтезована СПР з МР для двомасові ЕМС ЕП СП, структурна схема якої показана на рис. 6.

Результати імітаційного моделювання різноманітних швидкісних режимів роботи системи керування з МР показані на рис. 7, де на рис. 7а наведено приклад розгону до $\omega_{ном}$, а на рис. 7б до швидкості $1,4\omega_{ном}$ з подальшим процесом гальмування. В обох випадках величина імпульсу удару гостряка значно менше ніж в існуючих ЕП СП внаслідок зниження швидкості переводу.

Аналіз ефективності синтезованих систем і режиму прямого пуску показав, що найбільший ефект при управлінні від перетворювача досягається в зниженні

величини імпульсу удару гостряка M_i – на 55 %. Величина пружної сили в тязі F_{12} знизилася на 10 %, а час регулювання t_s зріс на 10 % за рахунок зниження швидкості в кінці переводу. Втрати в електродвигуні і відповідно в системі для розглянутих випадків приблизно рівні.

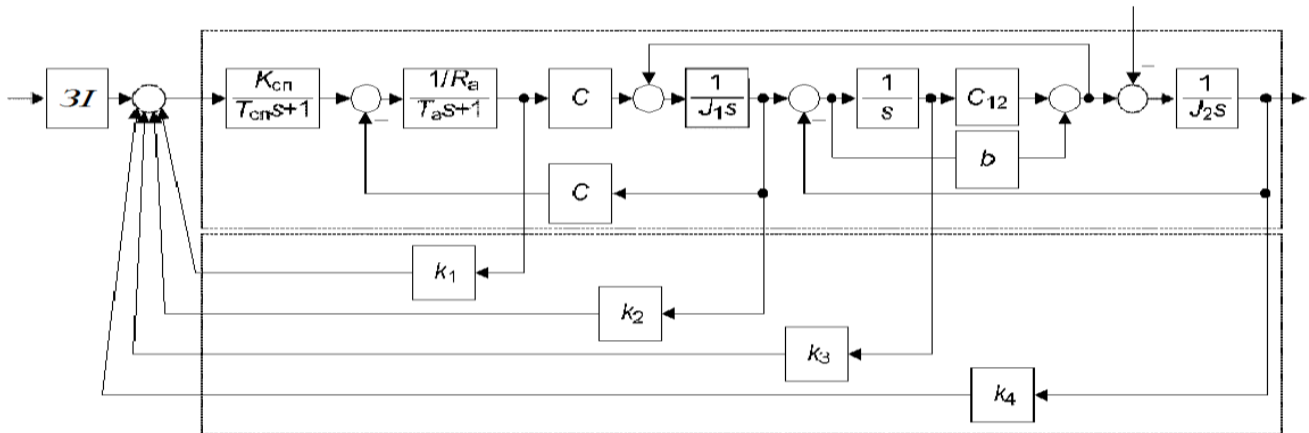


Рисунок 6 – Структурна схема двомасової ЕМС СП із СПР та МР

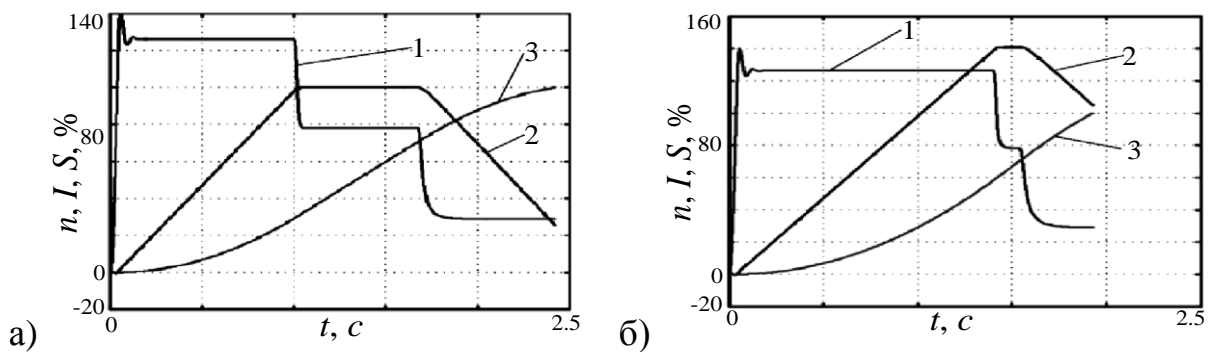


Рисунок 7 – Процес переводу в системі з МР при завданні швидкості: а) – 100 %, б) – 140 % від номінальної

Проведено адаптацію існуючих сучасних методик створення систем керування електроприводами загальнопромислового застосування СПР, МР і СпС до умов роботи приводів стрілочних переводів. Запропоновано вдосконалену математичну модель електромеханічної системи стрілочного переводу з двигуном постійного струму, що дозволяє враховувати вплив пружних сил, сил внутрішнього в'язкого тертя, зазорів та нелінійність характеристики тертя виконавчого механізму. Адекватність розробленої математичної моделі підтверджена фізичними експериментами (середньоквадратичне відхилення склало 4,8 %). Встановлено, що робота СПР для штатного ДПС дозволяє: шляхом налаштувань домогтися скорочення часу переведення з 2,5 с до 1,7 с, зменшення удару в кінці переводу в 2–4,5 рази. Встановлено, що в СП з ДПС можуть виникати фрикційні автоколивання. Основні показники складових узагальненого векторного критерію оцінки ефективності роботи покращились: знизилась величина імпульсу удару гостряка M_i на 55 %, знизилась величина пружної сили F_{12} в тязі на 10 %, час переводу t_s зріс на 9 % для завдання швидкості $\omega_{н.ом}$ та зменшився на 32 % для завдання швидкості $1,4\omega_{н.ом}$. Електричні втрати залишилися приблизно на базовому рівні.

Отримані результати свідчать про достатню ефективність використання МП СК ЕП СП, проте їм, як і раніше, властиві традиційні недоліки приводів з ДПС і існуючої кінематичної схеми.

Третій розділ присвячено дослідженню поведінки існуючого СП з АД в системі керування рухом електротранспорту та розробленню імітаційних моделей зі штатною кінематичною ланкою та існуючим способом керування, а також зі скалярною та векторною системами керування на базі СПР, та СПР з МР.

Дослідження на імітаційній моделі по структурній схемі, наведеній на рис. 1 з використанням в якості приводного АД і живлення його від перетворювача частоти (ПЧ) при формуванні бажаних тахограм швидкості різними засобами: по темпу розгону, гальмування і величиною завдання живлячої напруги з лінійним і нелінійним законом керування дозволили створити бази даних, на основі яких побудовані закономірності зміни компонент узагальненого векторного критерію у вигляді поверхонь. Залежність величини M_i від часу розгону t , величини завдання швидкості U_z і точки початку гальмування l тахограм для системи керування ПЧ-АД показана на рис. 8.

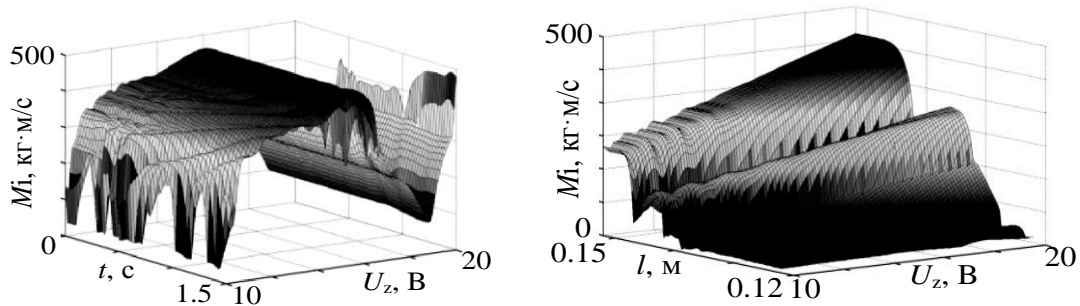


Рисунок 8 – Поверхні розподілу величини імпульсу удару гостряка M_i при зміні параметрів часу розгону (t), величини напруги живлення (U_z) та моменту початку гальмування (l)

Проведені дослідження можливості виникнення фрикційних автоколивань в електроприводі СП з АД, що експлуатується в даний час. Результати показали, що при певному поєднанні факторів в кінематичній лінії стрілочного переводу можуть протікати як процеси затухаючого характеру (рис. 9а), так і коливання пружної сили в робочій тязі зі сталою амплітудою (рис. 9б).

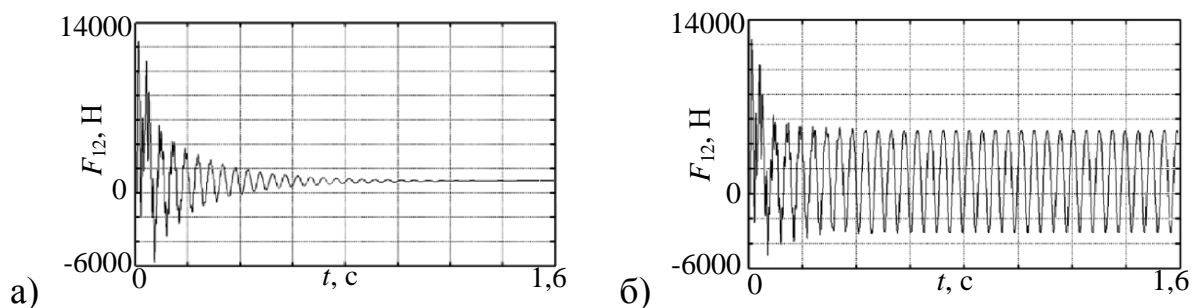


Рисунок 9 – Осцилограми зміни величини пружної сили F_{12} а) при затухаючих та б) автоколивальних процесах в кінематичній лінії СП з АД

Синтезована триконтурна система керування для переводу гостряків на СП з АД, структурна схема якої наведена на рис. 10. Результати імітаційного моделю-

вання наведені на рис. 11, де показаний перехідний процес в ЕП СП координат сили струму статора I , швидкості обертання двигуна n і їх переміщення S в процентному відношенні до номінальних значень. У першому випадку (рис. 11а) привід встигає загальмуватися швидше, що мінімізує удар гостряка о рамну рейку.

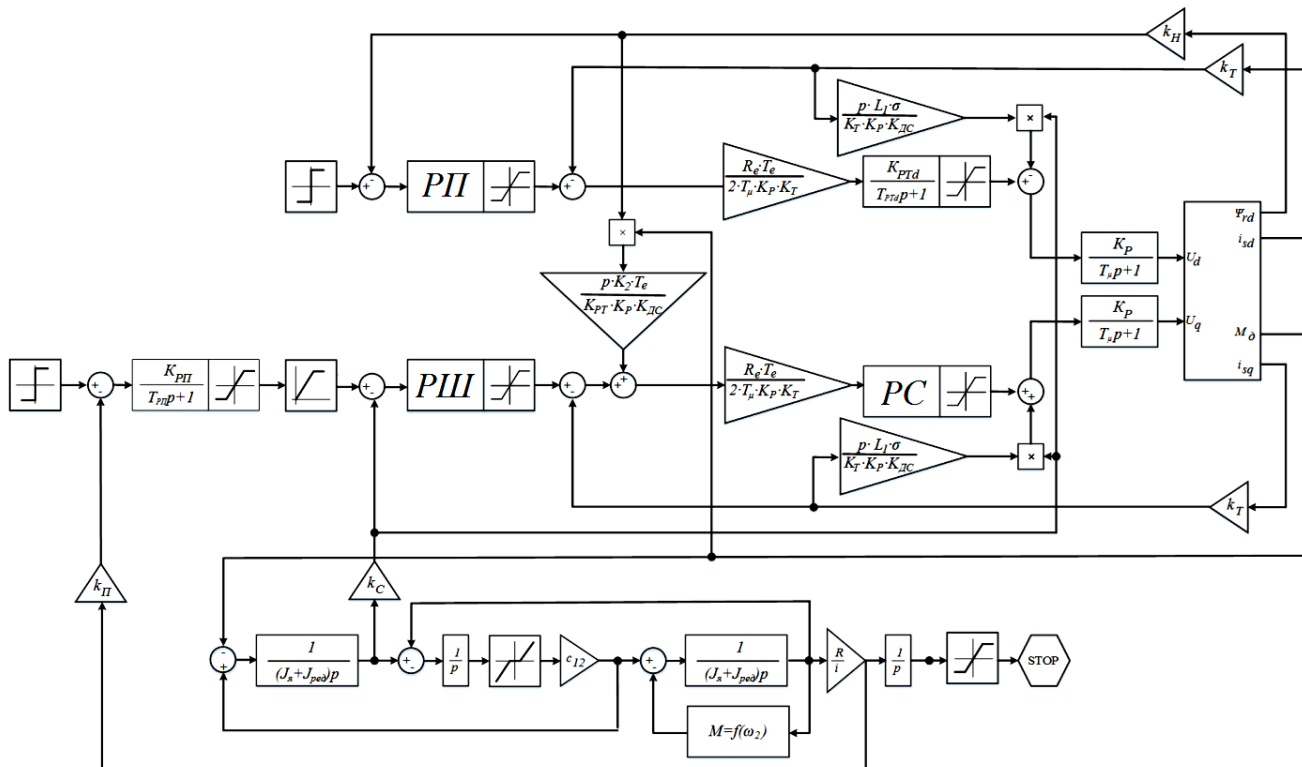


Рисунок 10 – Структурна схема СПР положення ЕП СП з АД

Синтезована система керування ЕП СП з модальним регулятором, структурна схема якої наведена на рис. 12. Результати імітаційного моделювання за отриманою структурною схемою наведені на рис. 13, в якій використані алгоритми і координати, що наведені на рис. 11.

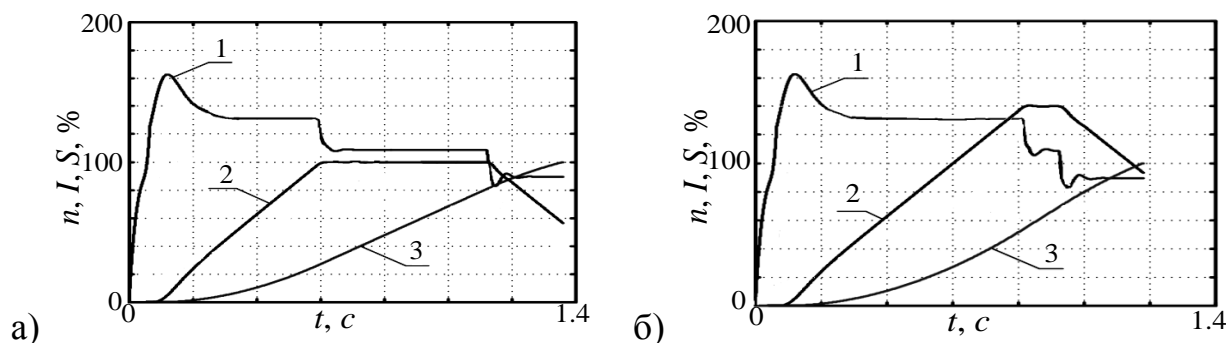


Рисунок 11 – Перехідний процес в СПР ЕП СП координат сили струму статора I (1), швидкості обертання двигуна n (2) і їх переміщення S (3 при величині завдання швидкості а) – 100 % і б) – 140 %

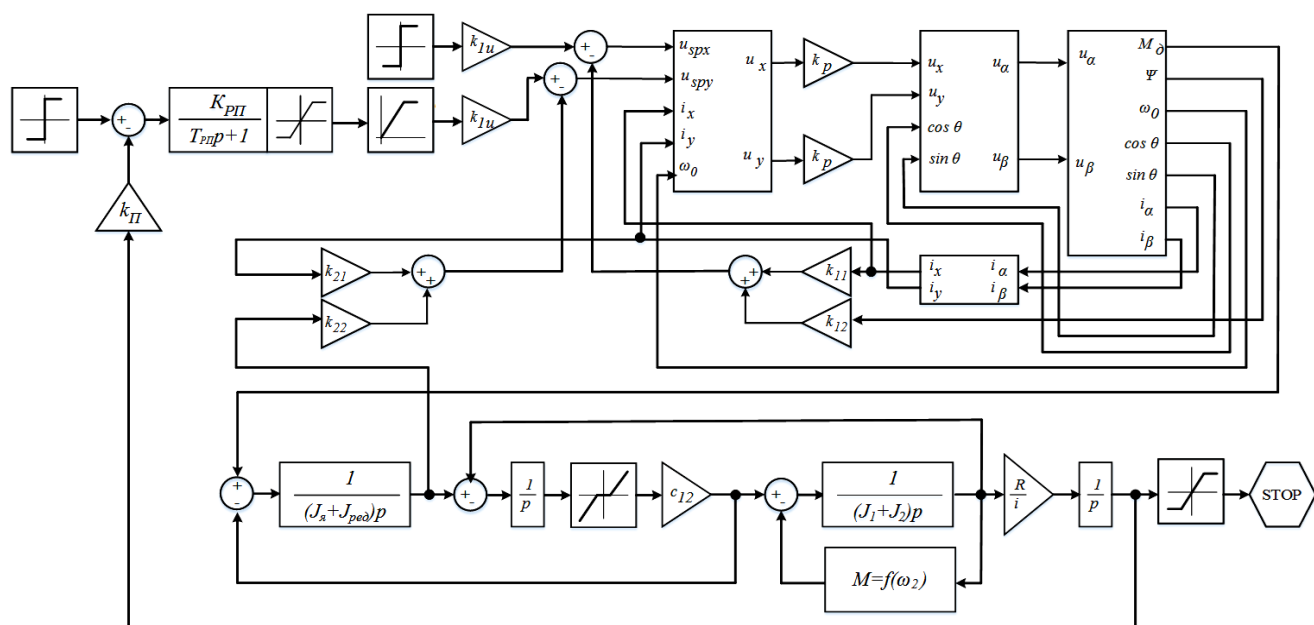


Рисунок 12 – Структурна схема СПР ЕП СП з АД на основі МР

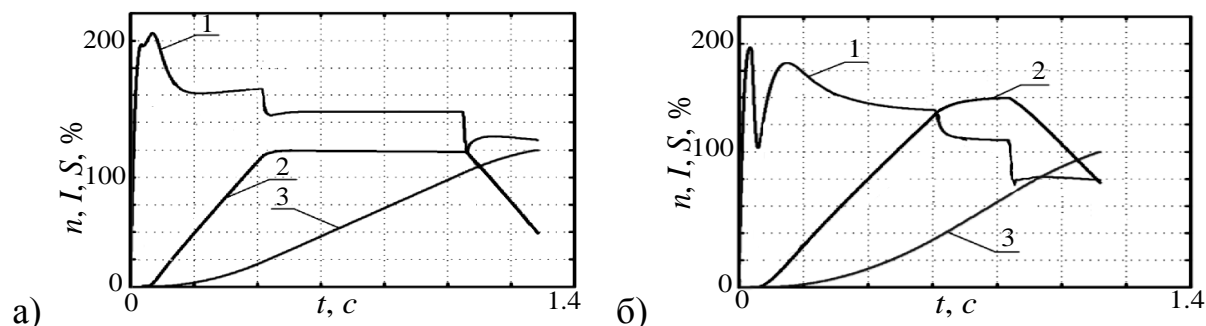


Рисунок 13 – Перехідний процес в СПР ЕП СП з МР

Аналіз результатів експериментів на імітаційних моделях ЕП СП на базі АД з різними конфігураціями систем керування показав, що при реалізації різноманітних тахограм швидкості можливо скорочення часу переходу до 1,2 с у СПР і до 1,15 с в системі з МР, однак, не знайдено загального рішення для всіх критеріїв одночасно.

За результатами регресійного аналізу отримані аналітичні вирази компонентів векторного критерію якості процесу переходу. Так, вирази оптимальних з точки зору мінімізації імпульсу удару M_i та часу переходу t_s мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 M_{i7}(U_z, l) &= -35.7 \cdot U_z \cdot l^2 - 8.9 \cdot U_z \cdot l^3 + 126.1 \cdot U_z^2 \cdot l^3 - 3.0 \cdot U_z^2 \cdot l^4 + \\
 &+ 0.027 \cdot U_z^2 \cdot l^6 - 0.36 \cdot U_z^3 \cdot l^6 + 1.62 \cdot U_z^4 \cdot l^6 - 2.37 \cdot U_z^5 \cdot l^6 \\
 t_{s7}(U_z, t) &= 0.018 \cdot t^2 + 0.86 \cdot U_z^2 \cdot t - 0.0015 \cdot U_z \cdot t^2 - 0.1 \cdot U_z^2 \cdot t^2 - 0.0008 \cdot t^3 + \\
 &+ 0.023 \cdot U_z^2 \cdot t^3 + 0.0022 \cdot U_z^3 \cdot t^3 - 0.0568 \cdot U_z^4 \cdot t^2 - 0.00027 \cdot U_z^4 \cdot t^3 + \\
 &+ 0.1068 \cdot U_z^5 \cdot t^2 - 0.0029 \cdot U_z^5 \cdot t^3 - 0.562 \cdot U_z^6 \cdot t - 0.00123 \cdot U_z^6 \cdot t^2 + \\
 &+ 0.000478 \cdot U_z^6 \cdot t^3 + 1.394 \cdot U_z^7
 \end{aligned} \quad (1)$$

Отримані вирази описують кожен із компонентів векторного критерію з точки зору керуючих впливів (U_z – величини напруги живлення двигуна і t – часу розгону, тобто роботи задатчика інтенсивності). За допомогою отриманих залежностей процес вироблення рекомендацій можна автоматизувати шляхом застосування алгоритму завдання уставок мінімізації за основними критеріями. Цей алгоритм передбачає в якості вихідних даних залежності критеріїв у вигляді (1) і певні значення уставки мінімізації cr . В процесі обробки формули алгоритм вибирає ті значення керуючих впливів, при яких критерій оптимізації менше, ніж його задане значення за допомогою cr (наприклад для $M_i(U_z, t)$ та $ts(U_z, t)$):

$$M_i(U_z, t)_{cr} = (\max(M_i(U_z, t)) - \min(M_i(U_z, t))) \cdot \frac{cr}{100\%} + \min(M_i(U_z, t)) \quad (2)$$

$$ts(U_z, t)_{cr} = (\max(ts(U_z, t)) - \min(ts(U_z, t))) \cdot \frac{cr}{100\%} + \min(ts(U_z, t))$$

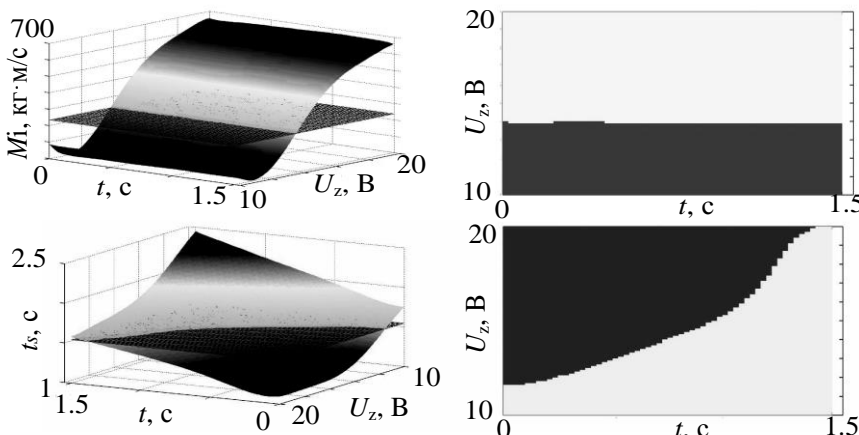


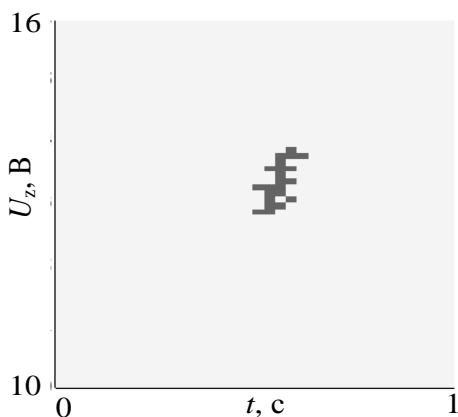
Рисунок 14 – Графічний сенс уставки мінімізації для M_i та ts

Алгоритм передбачає графічну візуалізацію у вигляді карт параметрів. На таких картах відтінком виділені області допустимих значень керуючих впливів, що є більш наочним представленням результатів роботи. На рис. 14 праворуч показана геометрична інтерпретація

уставки мінімізації cr . Це січна площина на поверхні відповідного критерію. Варіюючи значення cr можна зміщувати перетин по осі Z . На картах значень параметрів темним відтінком позначені ті інтервали, при яких значення критерію, обчислене по залежностям (наприклад 1) знаходиться під площиною cr , тобто менше значення, отриманого за (2).

Вирішення задачі оптимізації за всіма чотирма критеріями здійснюється методом суперпозицій. В результаті отримується карта загальних значень, на якій видно, при яких значеннях вхідних величин можна досягти заданих за допомогою cr уставок всіх критеріїв одночасно. Геометрична ілюстрація карти загальних оптимізованих параметрів наведена на рис. 15.

Рисунок 15 – Приклад вибору параметрів по карті з заданими значеннями критеріїв



Результати проведених досліджень можна оцінити по часовим залежностям критеріїв оптимізації, наведеним на рис. 16, де показані порів-

няльні осцилограми перехідних процесів для прямого пуску, оптимізації за обраною тахограмою і для оптимізованих параметрів електроприводу.

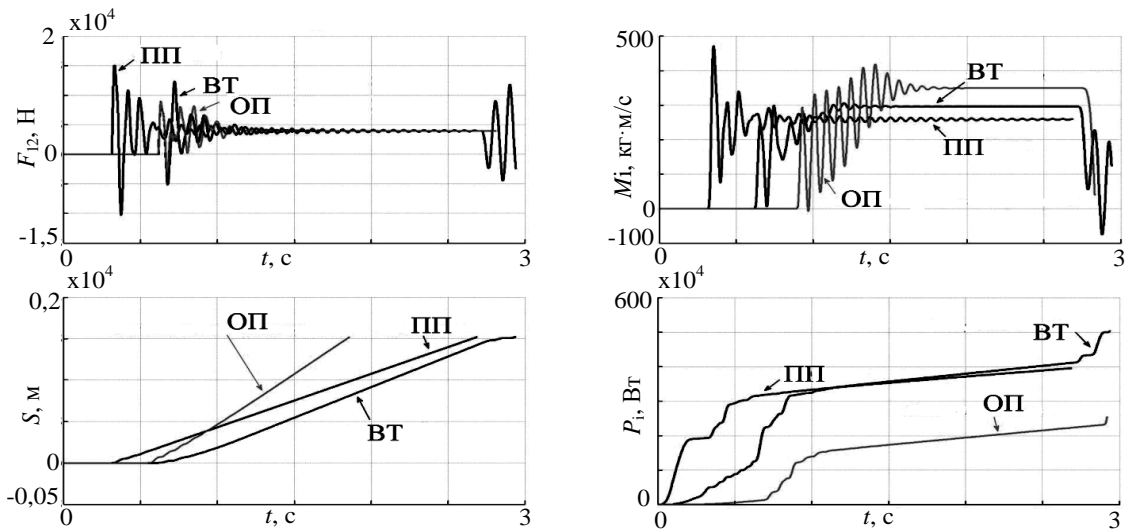


Рисунок 16 – Порівняння процесів прямого пуску (ПП) з результатами оптимізації по вибраній тахограмі (ВТ) та розрахункам (ОП)

Для підтвердження результатів досліджень проведено ряд експериментів на фізичних об'єктах. У лабораторії автоматики УкрДУЗТ проведені випробування роботи стрілочного переводу типу СП-6, що експлуатується в даний час з керуванням від перетворювача частоти типу «Simover» фірми Siemens, а також на стрілці №530 ст. Основа Південної залізниці з перетворювачем частоти вітчизняного виробництва. В ході експерименту, що проводився на ст. Основа, підтверджена доцільність застосування частотно-регульованого асинхронного електроприводу стрілочного переводу. Час переведення стрілки при частоті напруги живлення 100 Гц, дорівнює 1,7 с. У порівнянні з типовою п'ятипроводною схемою керування час переводу знизився на 50-60 %.

Розроблена математична модель процесу переводу гостряків СП з АД, що встановлює зв'язок електрофізичних показників електроприводу і механічних характеристик робочого органу. Адекватність моделі реальному об'єкту підтверджена експериментально (середньоквадратичне відхилення склало 4,9 %). Синтезовано СПР зі скалярним і векторним керуванням для штатного АД, яка дозволяє забезпечити регулювання моменту на валу. На її основі синтезовано систему модального керування.

Отримані аналітичні залежності обмежень у вигляді функцій від керуючих впливів перетворювача частоти, що дозволяють з максимальною точністю визначити оптимальні зони роботи по кожному з них. Методом суперпозиції виявлена область оптимальних рішень, що задовольняє всім обмеженням одночасно.

Таким чином, узагальнений векторний критерій ефективності роботи ЕП СП з АД для розглянутої конструкції має наступні значення: час переводу $t_s = 1,64$ с, величина пружної сили в робочій тязі $F_{12} = 10,64$ кН, величина імпульсу удару гостряка $M_i = 58,74$ кг·м/с, а також загальні втрати системи СП $\Sigma P = 0,161$ кВт.

Використання в якості приводної машини асинхронного двигуна з систе-

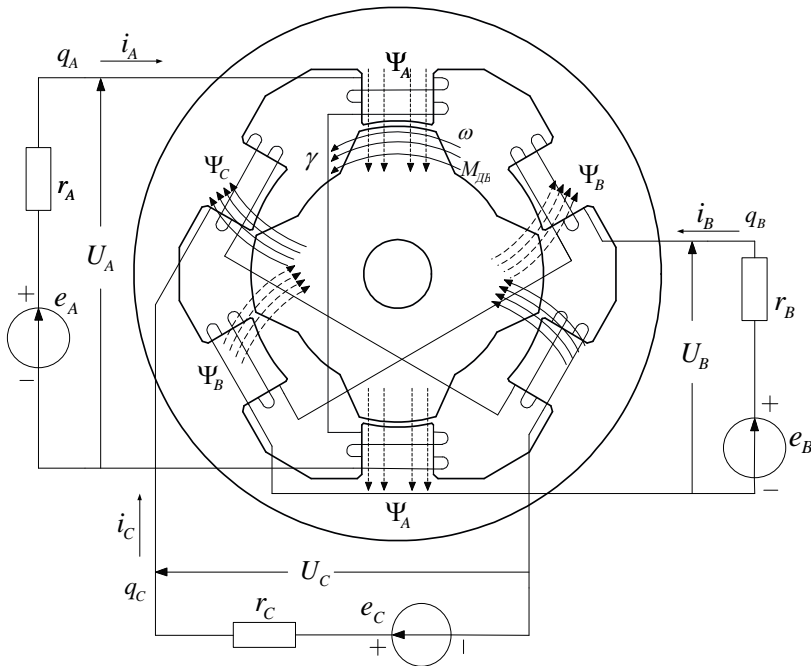


Рисунок 17 – Схема трифазного ВІД, де: e_A, e_B, e_C – напруги джерел живлення; r_A, r_B, r_C – активні опори відповідних фаз статора; i_A, i_B, i_C – струми в відповідних фазах статора; U_A, U_B, U_C – напруги на відповідних фазах без урахування падіння напруги на їх активних опорах; Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C – потокозчеплення відповідних фаз

Для нього розроблена імітаційна модель та проведені дослідження ефективності роботи даного типу двигуна з існуючою кінематичною лінією по структурній схемі, показаної на рис. 1. В результаті отримані осцилограми швидкостей гостряків і пружних сил в робочій і міжгостряковій тязі, які показують що, як і в приводах з ДПС та АД, можливі затухаючі, і такі, що розходяться коливальні процеси. Осцилограми перехідних процесів координати F_{12} наведені на рис. 18.

Таким чином, узагальнений векторний критерій ефективності роботи ЕП СП з ВІД для існуючої конструкції має наступні значення: час переходу $t_s = 1,54$ с, величина пружної сили в робочій тязі $F_{12} = 14,29$ кН, величина імпульсу удару гостряка $M_i = 53,86$ кг·м/с, а також загальні втрати системи СП $\Sigma P = 0,193$ кВт.

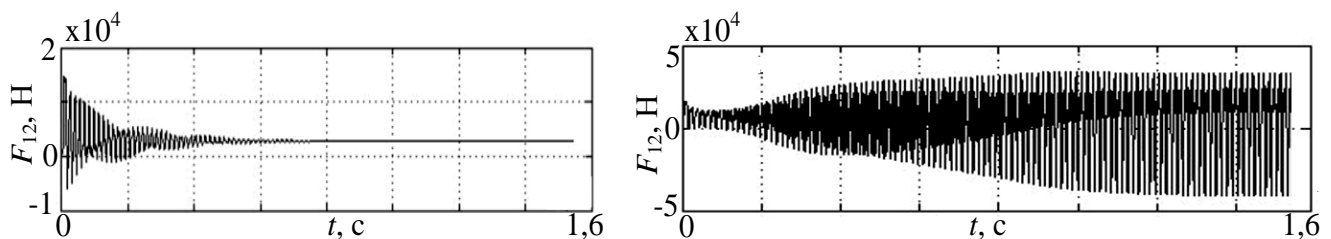


Рисунок 18 – Перехідні процеси координати F_{12} в кінематичній лінії СП з ВІД

мою керування дозволяє підвищити робочі властивості електроприводу стрілочного переводу. Разом з тим цьому приводу властиві окремі недоліки, мається на увазі багатомасовість кінематичної схеми з пружними елементами і зазорами, а так само наявність понижуючого редуктора.

У четвертому розділі дисертації проведена оцінка ефективності роботи ЕП СП на базі ВІД з існуючою кінематичною схемою та запропоновано нову – шпальну з різними варіантами системи керування, а також проведені експериментальні дослідження на фізичній моделі.

За основу взято ВІД, схема якого наведена на

Аналіз проведених досліджень показує доцільність створення нового типу ЕП СП, що дозволяє зменшити число мас, зазорів і пружних зв'язків в кінематичній лінії. Найбільш доцільною представляється шпальна компоновка, яка дозволяє автоматизувати процеси обслуговування верхньої будови колії, зробити привід більш компактним і зручним для експлуатації.

Загальний вигляд приводу, що пропонується, показаний на рис. 19. У цьому випадку в якості передавального пристрою виступає передача типу «гвинт-гайка»

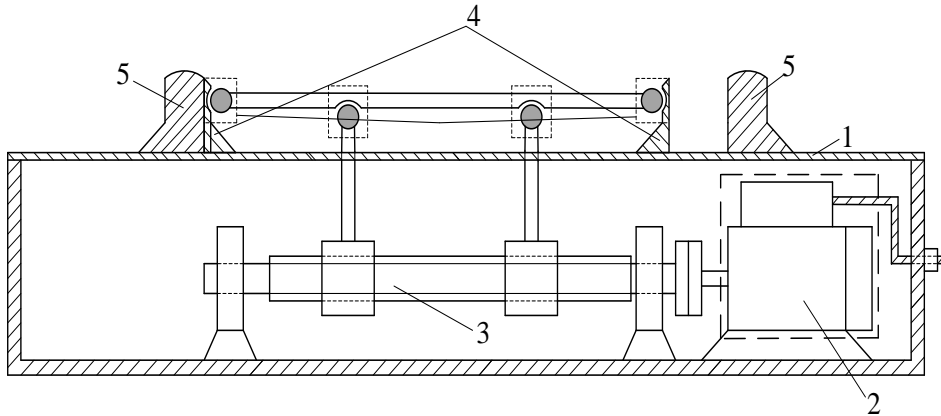


Рисунок 19 – СП шпального типу з ВІД, де: 1 – корпус, 2 – ВІД, 3 – передача «гвинт-гайка», 4 – гостряки, 5 – рамна рейка

підвищує динамічні властивості ЕП і його надійність, знижуючи при цьому пульсації електромагнітного моменту.

Система диференціальних рівнянь для такого ВІД має наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = F_A(E_A, R_A, E_B, R_B, E_C, R_C, E_D, R_D, \omega, \gamma, i_A, i_B, i_C, i_D), \\ \frac{di_B}{dt} = F_B(E_A, R_A, E_B, R_B, E_C, R_C, E_D, R_D, \omega, \gamma, i_A, i_B, i_C, i_D), \\ \frac{di_C}{dt} = F_C(E_A, R_A, E_B, R_B, E_C, R_C, E_D, R_D, \omega, \gamma, i_A, i_B, i_C, i_D), \\ \frac{di_D}{dt} = F_D(E_A, R_A, E_B, R_B, E_C, R_C, E_D, R_D, \omega, \gamma, i_A, i_B, i_C, i_D), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{(M_{ДВ}(i_A, i_B, i_C, i_D, \gamma) - \alpha\omega - M_O)}{J}, \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega. \end{array} \right. \quad (3)$$

де i_A, i_B, i_C, i_D – струми у відповідних фазах, E_A, E_B, E_C, E_D – ЕРС у відповідних фазах, R_A, R_B, R_C, R_D – опір у відповідних фазах, ω – кутова швидкість обертання ротору двигуна, α – коефіцієнт тертя в підшипниках машини, γ – кут комутації, $M_{ДВ}$ та M_O – моменти двигуна та опору відповідно. Для спрощення моделі створені m-файли – функцій F_A, F_B, F_C, F_D відповідних фаз в залежності від вхідних параметрів $(E_A, R_A, E_B, R_B, E_C, R_C, E_D, R_D, \omega, \gamma, i_A, i_B, i_C, i_D)$.

Функції F_A, F_B, F_C, F_D використовуються для створення імітаційної моделі ВІД в MATLAB Simulink.

Оскільки ротор ВІД жорстко пов'язаний з передачею «гвинт-гайка», а та в свою чергу так само жорстко з'єднана з міжгостряковою тягою, кінематична лінія такого ЕП може бути представлена як одномасова ЕМС без зазорів. Структурна

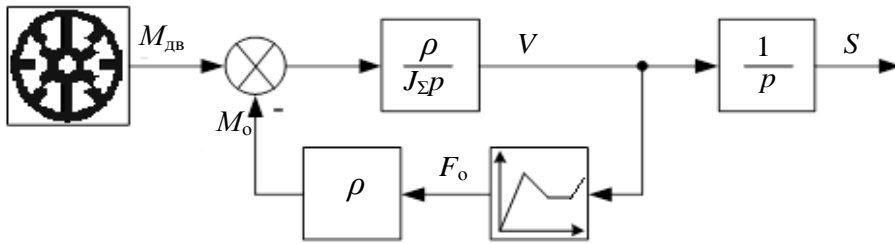


схема механічної частини такої системи представлена на рис. 20, де J_{Σ} – це сумарний момент інерції гостряків і тяги. Для керування новим типом ЕП СП розроблено МП СК з цифровим ПІД-регулятором швидкості.

Рисунок 20 – Структурна схема механічної частини ЕП СП шпального типу, де: V - лінійна швидкість гостряків, S - їх переміщення

Регулятори швидкості, описані вище, мають недостатньо високі показники якості при управлінні нелінійними і складними системами. Характеристики регуляторів в деяких випадках можна поліпшити за допомогою методів нечіткої логіки. Графічне представлення ланок фазі-ПІД-регулятора (ФПІД) наведено на рис. 21.

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі процесу перевodu гостряків і підтвердження коректності результатів досліджень створено фізичний макет СП в масштабі 1:2 із ВІД та мікропроцесорною системою керування на основі фазі-логіки. На рис. 26 наведені осцилограми струму I_{ϕ} і напруги U_{ϕ} фази ВІД для моменту опору $M_o = 0,05$ Нм і швидкості обертання $n = 2750$ об/хв., які зняті на макеті та розробленій імітаційній моделі.

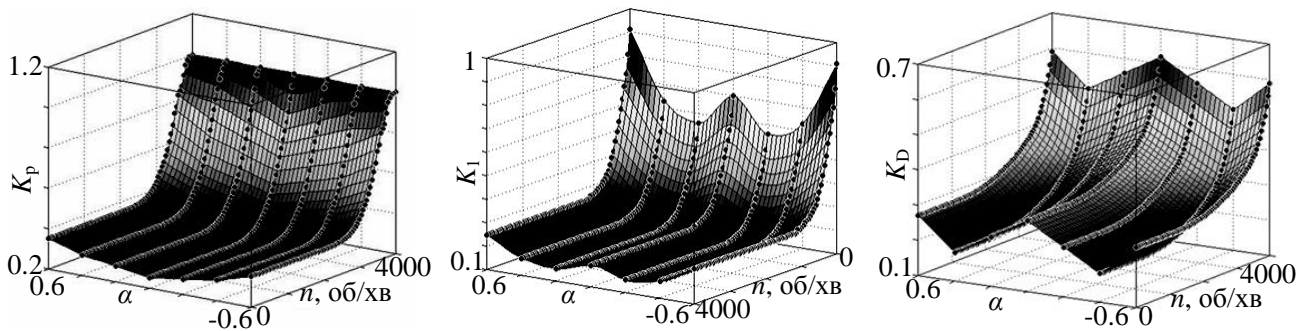


Рисунок 21 – Графічне представлення розподілу коефіцієнта пропорційного K_p , інтегрального K_i і диференціального K_d ланок ФПІД-регулятора в залежності від фазі-множителя α та швидкості обертання двигуна n

Результати експериментів, що наведені на рис. 22, визначили достатньо високу збіжність та можливості використання ЕП СП з ВІД шпального компонування для експлуатації в умовах швидкісного руху і гіркової централізації, оскільки час перевodu гостряків при номінальному завданні швидкості не перевищує 0,8 с. Порівняльні показники якості ПІД- і ФПІД-регуляторів приведені в таблиці 1, звідки однозначно можна зробити висновок про переваги системи керування на основі нечіткої логіки. Фізичне моделювання на макеті електроприводу з вентильно-індукторним двигуном стрілочного перевodu в масштабі 1:2 з цифровими регуляторами підтвердили його

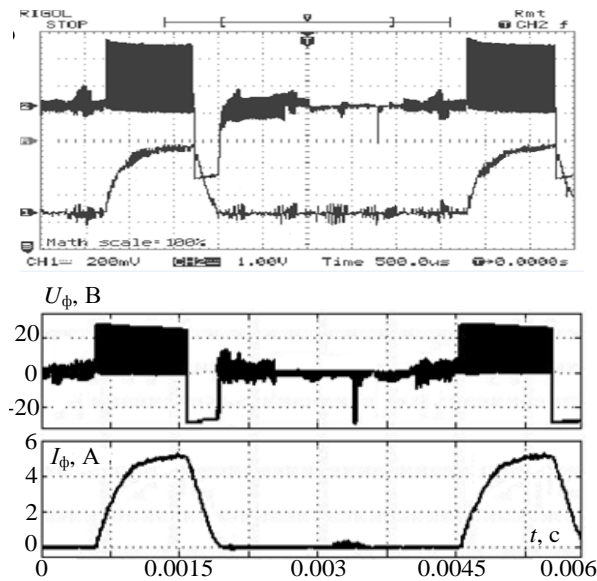


Рисунок 22 – Експериментальні (вгорі) і комп'ютерні (внизу) осцилограми струму I_ϕ і напруги U_ϕ фази ВІД

працездатність і показали, що створення шпальних приводів на основі ВІД із мікропроцесорними системами керування і кінематичною схемою у вигляді передачі «гвинт-гайка» дозволяє не тільки спростити механічну частину приводу і систему контролю гостряків, а й підвищує його надійність, швидкодію та ККД.

Таким чином, узагальнений векторний критерій ефективності роботи ЕП СП з ВІД для запропонованої конструкції має наступні значення: час переводу $t_s = 0,98$ с, величина пружної сили в робочій тязі $F_{12} = 0$ кН, величина імпульсу удару гостряка $M_i = 21,09$ кг·м/с, а також загальні втрати системи СП $\Sigma P = 0,133$ кВт.

В результаті проведених досліджень запропоновано схему приводу СП на базі

Таблиця 1 – Основні показники якості процесу регулювання

Показник якості	ПІД-регулятор	ФПІД-регулятор
Максимум перерегулювання, %	16,6	0
Час регулювання, с	0,36	0,15
Число коливань	2	0

ВІД з новою кінематичною схемою типу «гвинт-гайка», що адаптована для установки до порожнистої шпали, яка дозволила усунути багатомасовість з пружними елементами і зазорами, а також необхідність в наявності понижуючого редуктора. Синтезовано і досліджено СПР для ЕП шпального типу з ВІД, як з мікропроцесорним керуванням, так і на базі нечіткої логіки, що дозволили поліпшити робочі властивості ЕП СП за умовами критеріїв оптимізації. Адекватність моделі реальному об'єкту підтверджена експериментально (середньоквадратичне відхилення склало 4,6 %).

П'ятий розділ дисертації присвячено розробці та дослідженню ЕП СП шпального типу на базі лінійних двигунів.

Оскільки всі досліджені ЕП СП перетворювали обертальний рух в поступальний, поставлена задача знайти рішення здійснення безпосереднього перетворення електромагнітної енергії в механічну з поступальним рухом. Задовольнити цим вимогам в стані лише лінійний двигун. За основу взято два типи лінійних двигунів – електромагнітного та індукторного. Компонування ЛДЕМТ в СП показано на рис. 23. Для забезпечення працездатності такого ЕП різними методами вирішувалося завдання оптимізації геометричних параметрів двигуна виходячи з розмірів стандартної шпали. Оптимізація геометричних розмірів електродвигуна, що виконана методами Вейля і циклічного покоординатного спуску, дозволила отримати параметри двигуна, які забезпечують необхідний вид

тягової характеристики (рис. 24), зменшити витрати на матеріали, що призводить до отримання більш високого ККД приводу в цілому.

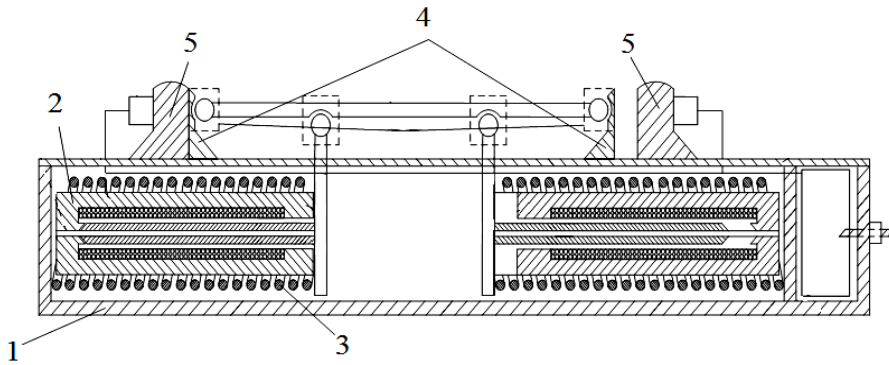


Рисунок 23 – СП шпального типу з ЛДЕМТ, де:
1 – корпус, 2 – ЛДЕМТ, 3 – пружина, 4 – гостряки,
5 – рамна рейка

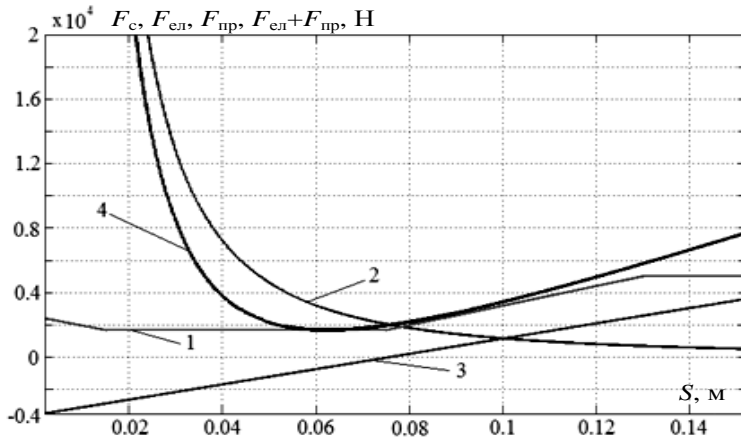


Рисунок 24 – Розподіл сил в ЕП: 1 - сила опору (F_o);
2 - електромагнітна сила ($F_{ел}$); 3 - сила пружини ($F_{пр}$);
4 - сила, прикладена до гостряків ($F_{ел} + F_{пр}$)

так і по відношенню до марки стрілки, і може приймати значення від $5 \cdot 10^4$ Н / м до $12 \cdot 10^4$ Н / м.

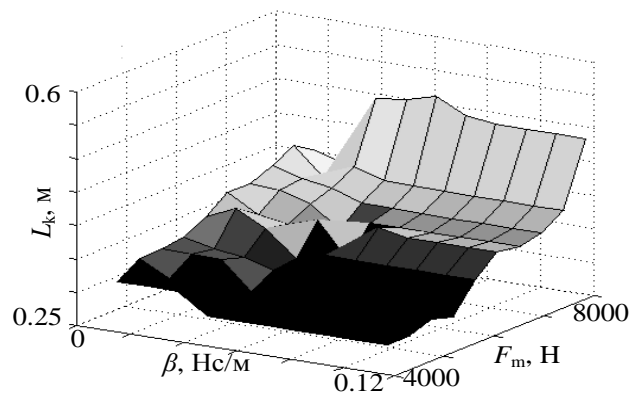
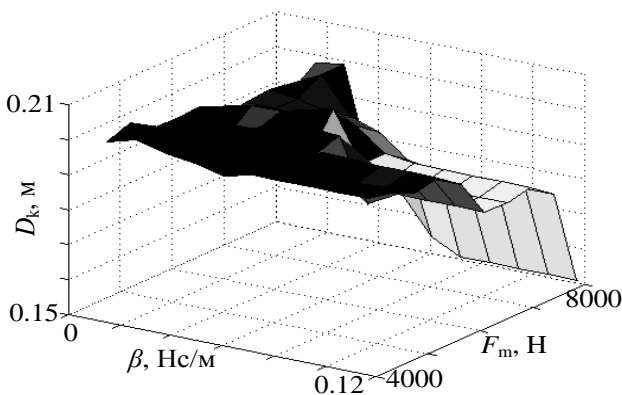


Рисунок 25 – Поверхні, що відображають вплив параметрів гостряка на геометричні розміри ЛД

Відмінною особливістю моделювання процесів, що відбуваються в ЕП СП з ЛДЕМТ є облік наявності пружинного акумулятора енергії, призначеного для під-

В процесі оптимізації геометричних розмірів ЛД вдалося встановити залежність розмірів діаметра D_k і довжини котушки L_k , товщини спинки статора H_{sp} та коефіцієнта жорсткості пружини K_{pr} від параметрів гостряків (рис. 25) – його ваги (F_m) і жорсткості характеристики навантаження (β). При цьому показники варюються в межах: діаметр котушки 150 – 210 мм, довжина 300 – 600 мм, а товщина спинки статора 11–16 мм. Коефіцієнт жорсткості пружини досить сильно змінюється як у відношенні жорсткості характеристики тертя,

вищення початкової рушійної сили. Пружинний акумулятор енергії дозволяє значно підвищити початкове значення рушійної сили гостряків, особливо за умов погіршення стану переводних поверхонь – примерзання, зникнення змазки з подушок, тощо.

Математична модель такого двигуна описується наступними рівняннями:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi}{\partial i}} \cdot \left[E - ri - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot v \right], \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_{ел} + 2F_{пр} - F_o}{m}, \\ \frac{dS}{dt} = v, \end{cases} \quad (4)$$

де i – струм в обмотці статора, E – ЕРС, r – опір обмотки статора, v – лінійна швидкість якоря, Ψ – потокозчеплення, $F_{ел}$ – електромагнітна сила, $F_{пр}$ – сила пружини, F_o – сила опору, m – маса, S – переміщення якоря.

На основі (4) побудована структурна схема (рис. 26), що дозволила створити імітаційну модель ЕП СП з ЛДЕМТ.

В процесі досліджень на імітаційній моделі встановлено, що за умовами швидкодії та відповідності необхідним навантажувальним характеристикам в якості електромеханічного перетворювача енергії для стрілочного переводу доцільно використовувати лінійний двигун електромагнітного типу з пружинним акумулятором енергії.

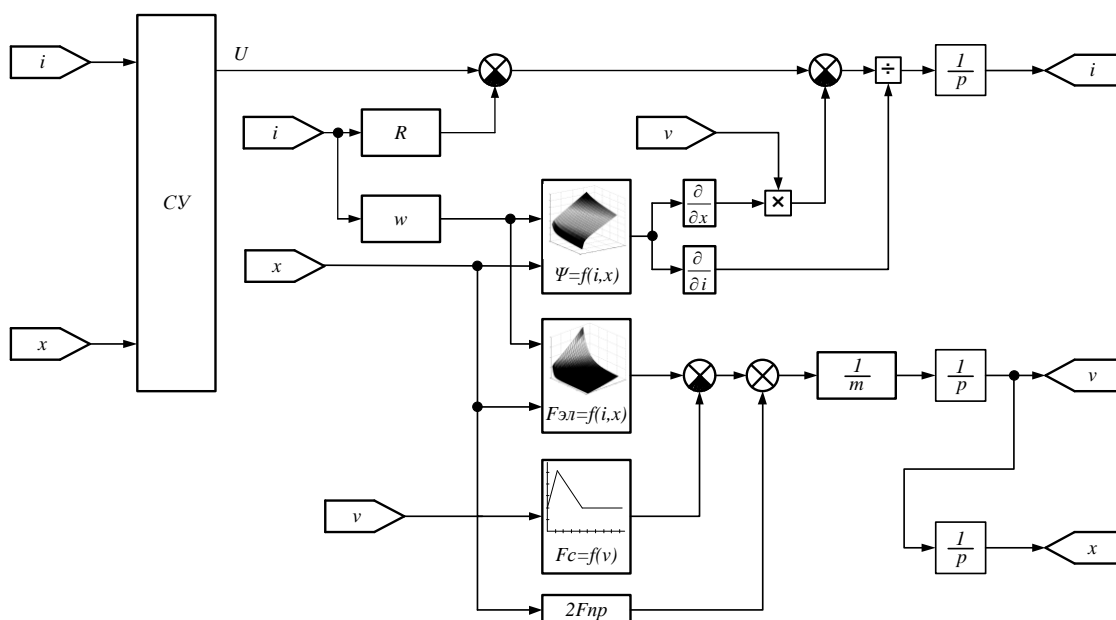


Рисунок 26 – Структурна схема ЕП СП з ЛДЕМТ

Встановлено, що для ефективної роботи СП з ЛДЕМТ раціонально використовувати нейроконтролерну (НК) систему керування на базі тришарового перцептрона виду 3-10-1, приклад функціональної схеми якої показаний на рис. 27. Така система керування дозволяє забезпечити високу швидкість переводу

гостряків (0,55 с) з безударним примиканням до рамної рейки. Розрахункові характеристики процесу перевodu гостряків наведені на рис. 28. За результатами

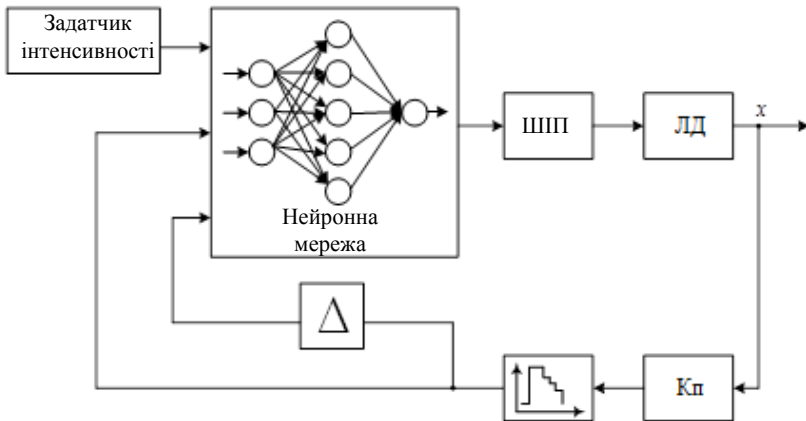


Рисунок 27 – Функціональна схема СК ЕП СП з НК на базі ЛДЕМТ

теоретичних розрахунків виготовлений дослідний зразок ЛДЕМТ в масштабі 1:2 й проведені випробування його працездатності. При проведенні досліджень на фізичному макеті динамометр з'єднувався з двигуном через систему важеля, що дозволило не тільки створювати навантаження для ЛД з можливістю вибору різної

величини плеча, але і вимірювати його.

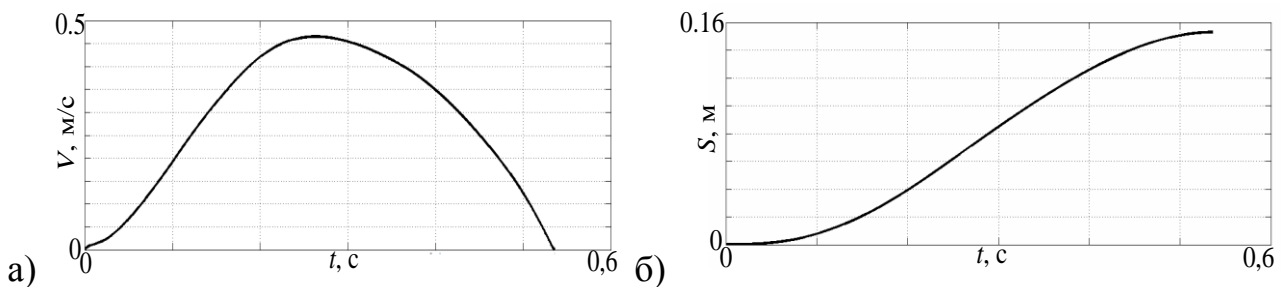


Рисунок 28 – Характеристика а) швидкості V і б) переміщення S гостряків СП з ЛДЕМТ

Результати експериментів по дослідженню тягової характеристики ЛДЕМТ (рис. 29) показали, що середньоквадратична похибка не перевищує 9 %. В процесі експерименту величина живлячої напруги ($U_{жс}$) змінювалася в діапазоні $(0,5 - 1)U_n$ за допомогою широтно-імпульсного перетворювача.

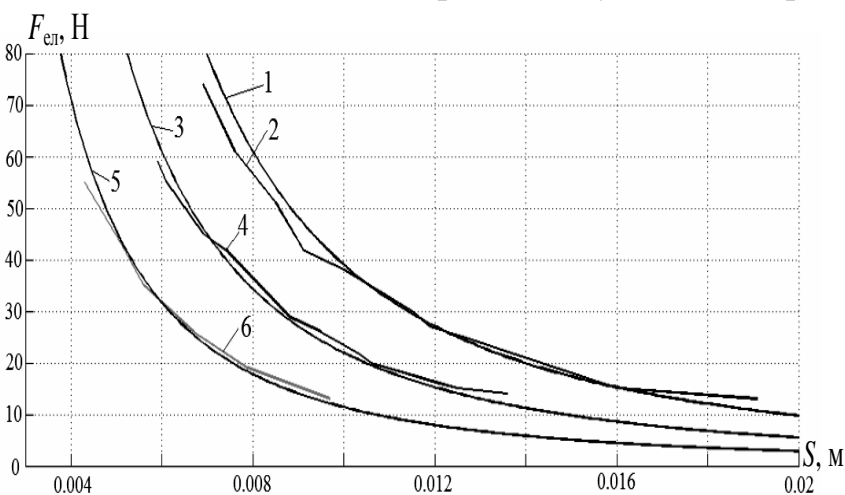


Рисунок 29 – Тягові характеристики ЛДЕМТ при різних значеннях $U_{жс}$: 1, 2 - U_n ; 3, 4 - $0,7U_n$; 5, 6 - $0,5U_n$; (1,3,5 - розрахункові, 2,4,6 - експериментальні)

Таким чином, узагальнений векторний критерій ефективності роботи ЕП СП з ЛДЕМТ має наступні значення: час перевodu $t_s = 0,58$ с, величина пружної сили в робочій тязі $F_{12} = 0$ кН, величина імпульсу удару гостряка $M_i = 0,57$ кг·м/с, а також загальні втрати системи СП $\Sigma P = 0,08$ кВт.

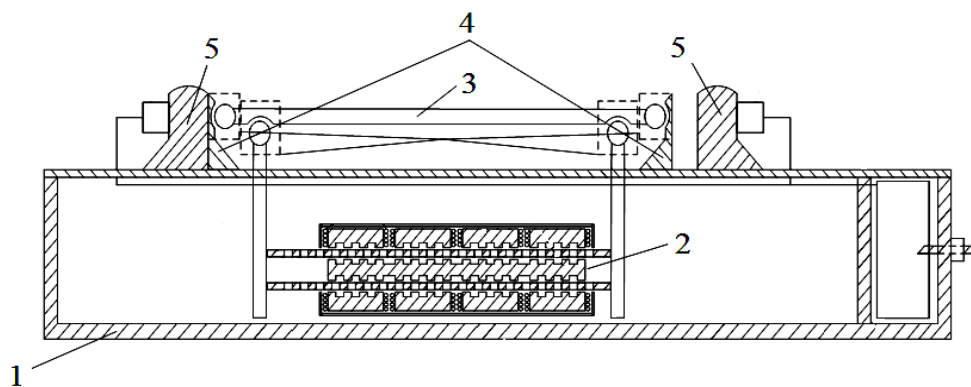


Рисунок 30 – СП шпального типу з ЛД, де: 1 – корпус, 2 – ЛД, 3 – тяга, 4 – гостряки, 5 – рамна рейка

Досліджено роботу ЕП СП з лінійним двигуном індукторного типу. Компонування ЛД в СП показано на рис. 30. Для забезпечення працездатності такого ЕП вирішено завдання оптимізації геометричних розмірів

двигуна виходячи з розмірів стандартної шпали. Пропонується в якості приводного двигуна використовувати чотирьохфазний ЛД, математична модель якого має вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_A(i_A, S)}{\partial i_A}} \left(U_A - r_A i_A - \frac{\partial \Psi_A(i_A, S)}{\partial x} v \right), \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_B(i_B, S)}{\partial i_B}} \left(U_B - r_B i_B - \frac{\partial \Psi_B(i_B, S)}{\partial x} v \right), \\ \frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_C(i_C, S)}{\partial i_C}} \left(U_C - r_C i_C - \frac{\partial \Psi_C(i_C, S)}{\partial x} v \right), \\ \frac{di_D}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_D(i_D, S)}{\partial i_D}} \left(U_D - r_D i_D - \frac{\partial \Psi_D(i_D, S)}{\partial x} v \right), \\ \frac{dv}{dt} = \frac{F_{ЕЛ} - F_O - \alpha v}{m}, \\ \frac{dS}{dt} = v, \end{array} \right. \quad (5)$$

де i_A, i_B, i_C, i_D – струм у відповідних фазах, U_A, U_B, U_C, U_D – живляча напруга відповідної фази, r_A, r_B, r_C, r_D – опір у відповідних фазах, v – лінійна швидкість якоря, $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_D$ – потокозчеплення відповідної фази, $F_{ЕЛ}$ – електромагнітна сила, F_O – сила опору, m – маса, S – переміщення якоря), α – коефіцієнт тертя між направляючою і якорем.

Особливістю математичних моделей ЛД є те, що ідентифікація параметрів сил, потокозчеплення та їх похідних здійснена за результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів з наступною апроксимацією результатів функціями на основі методу поліномів Чебишева на безлічі рівновіддалених точок. Для ЛД відмінністю є те, що обмотки різних фаз не зв'язані магнітним полем. Це забезпечує більшу керованість двигуна з точки зору точності позиціонування якоря, а також діапазону регулювання швидкості переміщення. Проведено комплекс експериментів на розробленій моделі, результати яких показані на

рис. 31, звідки видно, що процес переводу закінчується в 0,65 с. Даний показник забезпечує можливість використання цього типу ЕП як для швидкісного та високошвидкісного електротранспорту, так й для гіркової централізації. При цьому забезпечується безударний режим переведення гостряків з гальмуванням в кінці переводу.

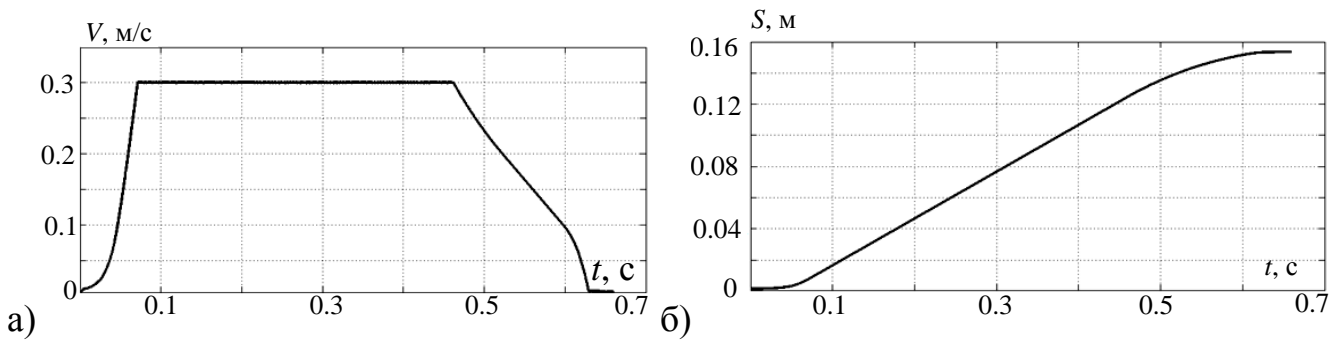


Рисунок 31 – Осцилограми а) швидкості переводу V та б) позиціювання S гостряків стрілочного переводу при $V_z = 0,3$ м/с з ЕП на основі ЛІД

Таким чином, в результаті проведених досліджень визначено, що середньоквадратичне відхилення сили тяги від необхідної траєкторії навантажувальної характеристики СП для ЛІД значно нижче, ніж для ЛДЕМТ. Тому систему керування ЛІД раціонально синтезувати на основі цифрового ПІД-регулятора швидкості, а для ЛДЕМТ бажано застосувати нейроконтролер. Оскільки система керування індукторним двигуном ротаційного типу розроблена та перевірена на фізичній моделі, пропонується використовувати її в якості базової для лінійного двигуна індукторного типу.

Узагальнений векторний критерій ефективності роботи ЕП СП з ЛІД має наступні значення: час переводу $t_s = 0,69$ с, величина пружної сили в робочій тязі $F_{12} = 0$ кН, величина імпульсу удару гостряка $Mi = 4,57$ кг•м/с, а також загальні втрати системи $\Sigma P = 0,695$ кВт.

За результатами проведених досліджень встановлено, що СП з обома типами ЛД цілком можуть бути ефективно використані для верхньої будови колії швидкісного й високошвидкісного руху. При цьому ЛІД, оскільки він може забезпечити більший хід виконавчого механізму, доцільно використовувати для переводу гостряків. У той час як ЛДЕМТ, що має підвищену швидкодію й значне зусилля в кінці ходу, більш підходить в якості ЕМП для приводу рухомого осердя хрестовин.

Таким чином, створені теоретичні передумови розрахунків, в яких з єдиних позицій для перспективних та існуючих електроприводів знаходяться оптимальні значення регуляторів систем керування і можуть бути визначені показники їх ефективності.

Остаточна ефективність досліджених конструкцій ЕП СП, що визначається модулем узагальненого векторного критерію ефективності, наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Модуль узагальненого векторного критерію ефективності ЕП СП

Тип ЕП СП (існуючого типу)	ДПС з МП СК	АД з МП СК	ВІД з МП СК
Модуль векторного критерію	0,65	0,59	0,55
Тип ЕП СП (шпального типу)	ВІД з МП СК	ЛДЕМТ з МП СК	ЛІД з МП СК
Модуль векторного критерію	0,21	0,0818	0,04

Системне порівняння ефективності переводів на базі двигунів різних типів показало наступне. Електроприводи з ДПТ та АД, що знаходяться в експлуатації мають найгірші показники з точки зору обраного критерію якості навіть при використанні МП СК. Електропривод СП шпального типу з ВІД доцільно застосовувати для колії з підвищеною швидкістю руху. Електроприводи СП з ЛД найбільш придатні для застосування на швидкісному та високошвидкісному транспорті, а також для гіркової централізації.

У додатках наводяться матеріали щодо впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична проблема створення наукових основ щодо оцінки та вибору електроприводів стрілочних переводів з різними компоновочними рішеннями, типами електромеханічних перетворювачів енергії та системами керування, які забезпечують можливість їх використання для швидкісного та високошвидкісного електротранспорту залізниць.

1. Розроблені наукові основи теорії електромеханічного перетворення енергії в електричному залізничному транспорті в частині вибору типу електроприводу стрілочного переводу для швидкісних і високошвидкісних залізниць з шириною колії 1520 мм, які, на відміну від існуючих, з єдиних позицій і загальних критеріїв враховують особливості робочих характеристик і вплив на них геометричних та електрофізичних параметрів ДПС, АД, ВІД, ЛДЕМТ і ЛІД з МП СК. Це дозволило визначити тенденцію переходу від двигунів ротативних типу до лінійних двигунів як шлях зниження масогабаритних параметрів ЕП і поліпшення його робочих властивостей за рахунок усунення механічних ланок приводів СП.

2. Запропоновано узагальнений векторний критерій оцінки ефективності роботи стрілочних переводів, складовими якого є значення часу переводу, пружної сили в робочій тязі, імпульсу удару гостряка, а також загальні втрати потужності системи. Остаточна оцінка ефективності використання конкретного типу електроприводу стрілочного переводу запропоновано проводити згідно модуля цього критерію.

3. Розроблено універсальний підхід до визначення оптимальних параметрів системи керування стрілочним переводом, що дозволяє реалізувати вимоги до стрілочних електроприводів як магістралей швидкісного і високошвидкісного транспорту, так і гіркової централізації.

4. Для стрілочного переводу з двигуном постійного струму запропоновано математичну модель роботи електромеханічної системи у вигляді структурної схеми, що дозволяє враховувати вплив пружних сил, внутрішнього в'язкого тертя, зазорів і нелінійність характеристики тертя виконавчого механізму. Використання СПР для штатного ДПС дозволяє домогтися скорочення часу переведення на 32 % (з 2,5 с до 1,7 с) та зменшення удару в кінці переводу (в 1,5 - 2 рази). В СП з ДПС можуть виникати фрикційні автоколивання. Показники узагальненого векторного критерію оцінки ефективності роботи покращились: величина пружної сили в тязі знизилась на 10 %, імпульсу удару гостряка на 60 %. Інші складові залишилися приблизно на базовому рівні.

5. Для стрілочного переводу з штатним АД синтезовано СПР зі скалярним і векторним керуванням, яка дозволяє забезпечити регулювання моменту на валу. На її основі синтезована система модального управління. Також синтезована система оптимального керування по компонентам векторного критерію оцінки ефективності і визначена оптимальна траєкторія швидкості руху гостряків. Структура системи керування включає в себе цифрові ПІ-регулятори струму і положення, а також ПІ-регулятор швидкості та ідентифіковані їх параметри.

6. Запропоновано схему приводу СП на базі ВІД з новою кінематичною ланкою типу «гвинт-гайка», що дозволило усунути зі схеми багатомасовість з пружними елементами і зазорами, позбавитись понижуючого редуктора та розмістити цей привід в порожній шпалі. Для нього синтезовані СПР, як з мікропроцесорним керуванням, так і на базі нечіткої логіки, що дозволили поліпшити основні показники критеріїв якості роботи приводу.

7. Запропонований перспективний універсальний підхід удосконалення математичної моделі ЕП СП у вигляді структурної схеми, що полягає в використанні параметрів електромеханічної системи з урахуванням особливостей фрикційного навантаження в зоні контакту гостряк-подушка, який на відміну від існуючих дозволяє врахувати вплив нелінійностей на роботу пристрою. Це визначило адекватність математичної моделі щодо процесів перетворення енергії без спрощення визначальних чинників.

8. Встановлено, що за умовами швидкодії і відповідності необхідним навантажувальним характеристикам для стрілочного переводу доцільно використовувати лінійний двигун електромагнітного типу з пружинним акумулятором енергії (ЛДЕМТ), а також лінійний кроковий двигун індукторного типу (ЛІД). За критерієм середньоквадратичного відхилення сили тяги від необхідної траєкторії навантажувальної характеристики СП при допустимих геометричних і електромагнітних обмеженнях визначено, що відхилення характеристики СП для ЛІД значно нижче, ніж для ЛДЕМТ. Тому систему керування ЛІД раціонально синтезувати на основі цифрового ПІД-регулятора швидкості, а для ЛДЕМТ потрібен нейроконтролер на базі тришарового перцептронного виду 3-10-1.

9. За показниками векторного критерію ефективності обрані раціональні області використання різних типів електроприводів стрілочних переводів в залежності від призначення і особливостей інфраструктури залізничного електротранспорту: приводи на базі ДПС і АД доцільні для магістрального транспорту, приводи

шпального типу на базі ВІД і ЛІД – для гостряків швидкісного і високошвидкісного, а електроприводи шпального типу на базі ЛДЕМТ – для переміщення рухомого осердя хрестовини.

10. У результаті роботи на базі підходу з єдиних позицій і загальних критеріїв визначені робочі характеристики і раціональні схеми ЕП СП і вплив на їх властивості геометричних і електрофізичних параметрів ДПС, АД, ВІД, ЛДЕМТ і ЛІД з МП СК. Встановлено, що МП СК забезпечує для всіх ЕП зниження, аж до повного усунення, імпульсу удару гостряка в кінці переводу гостряків і значне зниження величини пружної сили в міжгостряковій тязі, а також знижує час переводу і підвищує загальний ККД системи. Тенденція переходу від двигунів ротативного типу до лінійних двигунів веде до зниження масогабаритних параметрів ЕП і поліпшення його робочих властивостей, перш за все, за рахунок суттєвого зменшення кількості механічних ланок приводів СП.

11. Збіг результатів комп'ютерного моделювання з показниками фізичного моделювання на макетах стрілочних переводів підтверджує адекватність розроблених наукових основ вибору електроприводів з різними електромеханічними перетворювачами енергії. Технологічний досвід, що отримано при створенні фізичних моделей електроприводів стрілочного переводу шпального типу підтверджує працездатність перспективних конструкцій для швидкісного і високошвидкісного електричного транспорту та має практичну цінність.

12. Вироблені наукові положення є ефективним інструментом модернізації існуючих і створення нових електроприводів стрілочних переводів для залізничного транспорту. Результати дисертаційної роботи впроваджені в ДП «Проектно-вишукувальний інститут «Укрзалізничпроект» залізничного транспорту України» (м. Харків), ПрАТ ЕЛАКС (м. Харків), та у навчальний процес в Українському державному університеті залізничного транспорту, Інституті перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів (м. Харків), та НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Буряковский С.Г. Исследование динамических свойств электропривода стрелочного перевода с частотным управлением / С.Г. Буряковский, В.В. Смирнов, А.А. Рафальський // Вестник КДПУ, Кременчуг – 2007. – №4 (45). – С. 10-12.

Здобувач визначив критерії оцінки динамічних якостей електроприводів та запропонував типи систем керування перетворювачем частоти .

2. Буряковский С.Г. Результаты эксплуатационных испытаний системы керування електроприводом стрілочного переводу / С.Г. Буряковский, В.І. Мойсєєнко, В.В. Гаєвський, В.В. Смірнов // Вестник НТУ «ХПІ». – 2008. – № 30. – С. 324-325.

Здобувачем розроблена програма експлуатаційних випробувань, та здійснено контроль за обробкою отриманих результатів.

3. Буряковский С.Г. Исследование на математической модели электромеханической системы стрелочного перевода с учетом конструктивных особенностей /

С.Г. Буряковский, В.В. Смирнов // Вестник КДПУ, Кременчуг. – 2009. – №4 (57). – С. 183-186.

Здобувач розробив імітаційну модель і запропонував методику врахування нелінійностей у вигляді зазорів та пружних елементів у кінематичній ланці.

4. Буряковский С.Г. Застосування керованого частотного електропривода в стрілочному переводі / С.Г. Буряковский, В.І. Мойсеєнко, В.В. Смирнов, Р.В. Семчук, Ф.О. Демченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків: УкрДАЗТ. – 2009. – № 4 – С. 105-108.

Здобувач запропонував алгоритми частотного керування в асинхронному електроприводі та засоби підключення до існуючої системи керування.

5. Буряковский С.Г. Дослідження роботи стрілкового електропривода з урахуванням характеристики навантаження / С.Г. Буряковский, В.В. Смирнов, І.В. Обруч // Електроінформ. – 2009. – 2. – С. 10.

Здобувач розробив програму досліджень та засоби, що враховують особливості характеристики навантаження.

6. Буряковский С.Г. Регулируемый стрелочный электропривод / С.Г. Буряковский, В.В. Смирнов // Локомотивинформ. – 2010. – №07. – С. 8-9.

Здобувач розробив загальну концепцію перспективних стрілочних переводів з регулюванням координат струму, швидкості та положення.

7. Буряковский С.Г. Системы скалярного и нейросетевого управления электроприводом стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, И.В. Обруч, В.В. Смирнов // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 28. – С. 574-576.

Здобувач розробив основні принципи керування системою з нейроконтролем та визначив напрямки досліджень.

8. Буряковский С.Г. Математическое моделирование вентильно-индукторного двигателя для привода стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, А.С. Маслий, Б.Г. Любарский, А.Д. Петрушин // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011 – № 3 (79) – С. 157-158

Здобувач розробив основи методики для побудови математичної моделі двигуна та запропонував загальну форму математичної моделі.

9. Буряковский С.Г. Разработка алгоритмов управления электроприводом стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, С.П. Иглин, В.В. Смирнов, В.И. Моисеєнко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків: УкрДАЗТ. – 2012. – № 6 (97). – С. 3-8.

Здобувач запропонував алгоритми керування та методику їх використання в залежності від типу стрілочного переводу.

10. Буряковский С.Г. Интеграция программного обеспечения разгалуженных телекоммуникационных та інформаційно-керуючих систем / В.І. Мойсеєнко, С.Г. Буряковский // Збірник наукових праць ДонІЗТ – Донецьк: – 2012. – №29. – С. 5-11.

Здобувач запропонував методику об'єднання алгоритмів складних систем з урахуванням особливостей їх роботи.

11. Буряковский С.Г. Математическая модель реактивного индукторного трехобмоточного электромеханического преобразователя / Б.Г. Любарский,

С.Г. Буряковский, А.С. Маслий, Н.А. Гордеева // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 20. – С. 95-104.

Здобувач ідентифікував параметри математичної моделі та провів попередні розрахунки складових моделі.

12. Буряковский С.Г. Применение нетрадиционных регуляторов скорости для улучшения динамических характеристик стрелочного железнодорожного перевода / Л.В. Акимов, С.Г. Буряковский, В.В. Смирнов // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – №3. – С. 70-74.

Здобувач запропонував структуру системи керування та визначив особливості роботи регулятора швидкості.

13. Буряковский С.Г. Идентификация параметров математической модели вентильно-индукторного трехфазного двигателя непрерывными функциями на основе полиномов Чебышева на множестве равноудаленных точек / С.Г. Буряковский, А.С. Маслий, Б.Г. Любарский // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ. – 2012. – № 3 (19) – С. 605-606.

Здобувач запропонував підходи для визначення похідних потокозчеплень та визначив методику урахування взаємного впливу параметрів.

14. Буряковский С.Г. Улучшение динамики железнодорожного стрелочного перевода с частотно-регулируемым электроприводом при нестационарных режимах работы / Л.В. Акимов, С.Г. Буряковский, А.С. Маслий, В.В. Смирнов // Электротехнические и компьютерные системы. – 2012. – №5 (81). – С. 22-30.

Здобувач розробив підходи до побудови нетрадиційного регулятора швидкості з урахуванням особливостей характеристики навантаження.

15. Буряковский С.Г. Математическое моделирование вентильно-индукторного привода для стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, В.И. Моисеенко, Н.П. Карпенко, А.С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків:УкрДАЗТ.– 2013. – № 1 (98) – С. 67-76.

Здобувач запропонував основні підходи до розробки математичної моделі та обґрунтував доцільність використання вентильно-індукторного двигуна.

16. Буряковский С.Г. Оптимизация системы управления вентильно-индукторного двигателя для стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, А.В. Шевкунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2. – С. 61-67.

Здобувач розробив основні підходи до побудови системи керування та запропонував критерії оптимізації.

17. Буряковский С.Г. Перспективы модернизации электроприводов стрелочных переводов / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2013. – №2 (22). – С. 124-127.

Здобувач запропонував критерії оцінки існуючих електроприводів стрілочних переводів та запропонував напрямки їх модернізації.

18. Буряковский С.Г. Микропроцессорное керування частотним перетворювачем / С.Г. Буряковский, А.О. Габінський // Збірник наукових праць УкрДАЗТ – Харків. – 2013. №141. – С. 212-215.

Здобувач запропонував структурну схему системи керування, алгоритм її роботи та методику проведення досліджень.

19. Буряковский С.Г. Разработка электропривода стрелочного перевода с вентильно-индукторным электродвигателем и исследование на математической модели режимов его работы / С.Г.Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, А.Д. Петрушин // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – №36 – С. 198-201.

Здобувач розробив програму досліджень, визначив напрямки та пріоритети і провів комплекс випробувань.

20. Буряковский С.Г. Скоростной подвижной состав требует модернизации стрелочных переводов / Д.В. Ломотько, С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків:УкрДАЗТ.– 2013. – № 4. – С. 95-96.

Здобувачу належить обґрунтування необхідності модернізації існуючої інфраструктури СЦБ для використання на швидкісному русі.

21. Буряковский С.Г. Разработка и исследование системы управления вентильно-индукторным электродвигателем / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, Б.Г. Любарский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків:УкрДАЗТ.– 2013. № 5 (102). – С. 68-74.

Здобувач запропонував конфігурацію системи керування та методику обробки отриманої інформації.

22. Буряковский С.Г. Синтез регуляторов скорости вентильно-индукторного электропривода стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків:УкрДАЗТ.– 2014. – № 1 (104). – С. 31-40.

Здобувач запропонував методику синтезу регулятора швидкості та зробив попередні розрахунки.

23. Буряковский С.Г. Вентильно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального типа / С.Г. Буряковский, В.В. Захарченко, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 15 (91). – С. 148-150.

Здобувачем запропонований передаточний механізм гвинт-гайка в якості основного засобу передачі обертового моменту.

24. Buryakovskiy S.G. Energy-Efficient Electric Drive of Multifunctional Turnout / Y.I. Sokol, S.G. Buryakovskiy, Ar.S. Masliy // Problemy Kolejnictwa, Warszawa. – 2014. – Zeszyt 165. – P. 99-107.

Здобувачем запропоновані шляхи модернізації стрілочних переводів та їх систем керування.

25. Буряковский С.Г. Расчет тяговой характеристики линейного двигателя для стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, Б.Г. Любарский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків:УкрДАЗТ.– 2015. – № 1(110). – С. 83-87.

Здобувачем запропоновані конструктивні обмеження, що накладаються на лінійний двигун та методика їх урахування.

26. Буряковский С.Г. Расчет и оптимизация геометрических размеров линейного привода стрелочного перевода моношпального типа / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. Кременчук: КрНУ. – 2015. – №.1 (3). – С. 65-67.

Здобувач запропонував методи рішення задачі оптимізації розмірів лінійного двигуна та провів попередні розрахунки.

27. Buryakovskiy S. Mathematical modeling of the electric drive turnouts based on a linear motor / S. Buryakovskiy, B. Lyubarskiy, Ar. Masliy, An. Masliy // Electrotechnic and computer systems Science and Technical, Odessa. – 2015. – № 19 (95). – P. 75-78.

Здобувач розробив імітаційну модель електроприводу та провів перевірку її працездатності.

28. Буряковский С.Г. Исследование работы электропривода стрелочного перевода на базе линейного двигателя / С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий. // Вестник НТУ «ХПИ». – 2015.–№ 12 (1121). – С. 209-213

Здобувач розробив програму та алгоритм досліджень, провів попередню обробку отриманої інформації.

29. Буряковский С.Г. Математическая модель работы электропривода стрелочного перевода на базе линейного двигателя / С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків: УкрДАЗТ.– 2015. – № 3(112). – С. 59-65.

Здобувач запропонував реалізацію математичної моделі механічної частини стрілочного переводу з урахуванням її особливостей.

30. Буряковский С.Г. Использование модального регулятора в системе управления электродвигателем стрелочного перевода / С.Г. Буряковский // Збірник наукових праць УкрДУЗТ- Харків. – 2015. – №153. – С. 54-60.

31. Буряковский С.Г. Сравнение эффективности современных систем управления для привода постоянного тока стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, А.А. Рафальский, В.В. Смирнов // Международный сборник научных трудов. Рынок транспортных услуг – Гомель: БГУТ. – 2015. – №. 8. – Часть 3. – С. 227-236.

Здобувач запропонував критерії оцінки ефективності системи керування за технічними та економічними показниками.

32. Буряковский С.Г. Математическое описание линейного электродвигателя индукторного типа для стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, Н.П. Карпенко, Б.Г. Любарский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах – Кременчук: КрНУ. – 2016. – № 1 (4). – С. 258-260.

Здобувач запропонував конфігурацію лінійного двигуна та зробив опис його математичної моделі.

33. Буряковский С.Г. Применение системы подчиненного регулирования положения остряков на базе эксплуатируемого стрелочного перевода постоянного тока / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, А.А. Рафальский, В.В. Смирнов // Інфор-

маційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків:УкрДАЗТ.– 2016. – № 2(117). – С. 47-51.

Здобувач запропонував використати структурну схему системи підлеглого регулювання в якості системи керування електроприводом стрілочного переводу.

34. Buriakovskiy S. Determining parameters of electric drive of a sleeper-type turnout based on electromagnet and linear inductor electric motor / S. Buriakovskiy, An. Masliy, Ar. Masliy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies and computer systems Engineering technological systems. – 2016. – № 4/1 (82). – P. 32-41.

Здобувач запропонував шляхи та методи рішення задачі оптимізації.

35. Буряковский С.Г. Разработка системы управления вентиляционно-индукторного двигателя / С.Г. Буряковский, Б.М. Горкунов, А.А. Тищенко, Шахин Исам Хусейн // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – № 4 (1), Том 1. – С. 10-13.

Здобувач запропонував систему керування на основі сучасної мікропроцесорної техніки та визначив алгоритм роботи мікроконтролера.

36. Буряковский С.Г. Регульований стрілочний перевід з двигуном постійного струму на базі мікропроцесорного тиристорного перетворювача / С.Г. Буряковский // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава. – 2017. – №1 (41) – С. 55-58..

37. Буряковский С.Г. Электропривід стрілкового переводу. Патент України № 25058 / С.Г. Буряковский // Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25 липня 2007 р.

38. Буряковский С.Г. Электропривід стрілочного переводу. Патент України № 95497/ С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслій, Ан.С. Маслій // Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25 грудня 2014 р.

Здобувач запропонував використовувати вентиляционно-індукторний двигун та передавальний механізм типу «гвинт-гайка».

39. Буряковский С.Г. Безредукторний електропривід стрілочного переводу шпального типу. Патент України № 109159 / С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарський, Ар.С. Маслій, Ан.С. Маслій // Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10 серпня 2016 р.

Здобувач запропонував шпальну компоновку електроприводу з лінійним двигуном та використання накопичувача енергії пружинного типу.

40. Буряковский С.Г. Використання частотнокерованого асинхронного електроприводу для стрілочного переводу // Тези 10-й Міжнародною наукової конференції «Implementing of information systems in computerization and controlling transportation means Arabic and international participation», Сирія, м. Тартус. – 2006. – С. 7-9.

41. Буряковский С.Г. Модернизация стрелочных переводов постоянного тока путем применения частотно-управляемого асинхронного привода / С.Г. Буряковский, В.И. Моисеенко, В.В. Смирнов, А.А. Рафальський // Тез. докл. науч.-техн. конф. с межд. уч. «Проблемы автоматизированного электропривода», Днепропетровск. – 2007. – № 7 – С. 338-339.

Здобувачем запропоновані модернізовані схеми стрілочних переводів с перетворювачами частоти різних конфігурацій.

42. Буряковський С.Г. Векторні та скалярні системи керування асинхронним електроприводом стрілочного переводу // Тези 12-й Міжнародною наукової конференції «Implementing of information systems in computerization and controlling transportation means Arabic and international participation», Сирія, м. Тартус. – 2008. – С. 35-37.

43. Буряковський С.Г. Модернізація системи керування стрілковим приводом з двигуном постійного струму / С.Г. Буряковський, В.І. Мойсеєнко, О.Ф. Майборода // Тези доповідей 20-й Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективные системы контроля и управления на железнодорожном транспорте», Алушта – 2007. – №4. – С. 29.

Здобувачем запропонована модернізована система керування шляхом впровадження системи підлеглого регулювання.

44. Буряковский С.Г. Перспективные системы управления железнодорожной автоматики / С.Г. Буряковский, В.И. Моисеенко, В.В. Смирнов // Тезисы XVI научно-технической конференции с международным участием «Проблемы автоматизированного электропривода», Львов. – 2009. – №7. – С. 205-206.

Здобувач розробив критерії оцінки якості роботи системи керування та обґрунтував необхідність модернізації існуючих електроприводів стрілочних переводів.

45. Буряковський С.Г. Оптимізація геометричних розмірів лінійного двигуна для шпального стрілочного переводу / С.Г. Буряковський, А.С. Маслій // Тези 77-ї науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті», Харків. – 2015. – № 151. – С. 86.

Здобувач запропонував обмеження в задачі оптимізації та визначив напрямки досліджень.

46. Буряковский С.Г. Электропривод стрелочного перевода моношпального типа на базе линейного электродвигателя / С.Г. Буряковский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // Тезисы VI Международной конференции «Энергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», Воловець. – 2015. – С. 33-34.

Здобувач запропонував загальну концепцію конструкції стрілочного переводу шпального типу у з лінійним двигуном та керованим електроприводом.

47. Буряковский С.Г. Определение параметров линейного привода стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий // Труды Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи», г. Ростов на Дону. – 2015. – С. 85-90.

Здобувач визначив параметри механічної частини електроприводу стрілочного переводу з лінійним двигуном.

АНОТАЦІЇ

Буряковський С. Г. Наукові основи вибору електроприводів стрілочних переводів для швидкісних та високошвидкісних залізниць. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – «Електротранспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2017.

Дисертація присвячена створенню теоретичних основ вибору та оцінки типу електроприводів стрілочних переводів, що працюють в оптимальних режимах з урахуванням нелінійностей навантаження та електрофізичних властивостей двигунів, на основі рішення задачі мінімізації основних показників якості як: час переводу, величина імпульсу удару гостряка об рамну рейку, величина пружної сили в робочій тязі, а також величина загальних втрат в системі. Запропоновано узагальнений векторний критерій ефективності роботи електроприводу стрілочного переводу, компонентами якого є час переводу, величини імпульсу удару гостряка, пружної сили, а також загальних втрат потужності системи за яким проведено оцінку придатності використання конкретного типу переводу для ділянок швидкісного та високошвидкісного руху. Розглянуто існуючі кінематичні схеми з типовими двигунами, а також запропоновано використати перспективну – шпальну компоновку з новими типами електродвигунів ротаційного та лінійного виду.

Розроблено математичні моделі для існуючих та перспективних типів стрілочних переводів на базі двигунів ротативного і лінійного типів, що оснований на рішенні рівняння Лагранжа для електромеханічної системи з урахуванням нелінійності магнітної системи. Створені імітаційні моделі електроприводів стрілочних переводів в середовищі MATLAB SIMULINK на базі двигуна постійного струму (ДПС), асинхронного двигуна (АД), вентильно-індукторного двигуна (ВІД), лінійного двигуна електромагнітного типу (ЛДЕМТ) і лінійного індукторного двигуна (ЛІД) та проведена перевірка адекватності існуючим зразкам. Сформульовано задачу аналізу з визначення раціональної структури електроприводу стрілочного переводу на основі ДПС, АД, ВІД, ЛДЕМТ і ЛІД.

Ключові слова: електротранспорт, швидкісний та високошвидкісний рух, електромеханічні системи, колійна структура, стрілочний перевід, система керування, математична модель, критерій ефективності,

Буряковский С.Г. Научные основы выбора электроприводов стрелочных переводов для скоростных и высокоскоростных железных дорог. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.09 – «Электротранспорт». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2017.

Диссертация посвящена созданию теоретических основ выбора и оценки типов электроприводов стрелочных переводов, работающих в оптимальных режимах с учетом нелинейностей нагрузки и электрофизических свойств двигате-

лей, на основе решения задачи минимизации основных показателей качества как: время перевода, величина импульса удара острия о рамный рельс, величина упругой силы в рабочей тяге и величина общих потерь в системе.

Предложен универсальный векторный критерий эффективности работы электропривода стрелочного перевода, компонентами которого являются время перевода, величины импульса удара острия о рамный рельс, упругой силы в рабочей тяге и общих потерь в системе, по которому проведена оценка целесообразности использования конкретного типа перевода для участков скоростного и высокоскоростного движения.

Рассмотрены существующие кинематические схемы в виде двух- и трёхмассовых электромеханических систем с типовыми двигателями. Показано, что на данный момент в Украине используются электродвигатели двух типов – постоянного тока последовательного возбуждения и асинхронный с короткозамкнутым ротором. В эксплуатации находятся системы управления разомкнутого типа, т.е. без контроля по основным координатам электропривода – току, скорости и положению. Поэтому в работе предложены различные системы управления для эксплуатируемых электроприводов, обеспечивающие более высокие показатели качества процесса перевода остриев по быстродействию, точности позиционирования и силе соударения о рамный рельс. Разработаны математические модели для существующих и перспективных типов стрелочных переводов на базе двигателей ротативных и линейного типов, основанные на решении уравнения Лагранжа для электромеханической системы с учетом нелинейности магнитной системы.

В работе также предложено использовать более перспективную – шпальную компоновку привода стрелочного перевода с новыми типами электродвигателей. Рассмотрена передача типа «винт-гайка» для электропривода на основе вентильно-индукторного двигателя, а также приведено обоснование перехода от электроприводов ротационного типа с механическими преобразователями вращательного движения в поступательное к электроприводам с линейными двигателями. Электродвигатели данного типа, осуществляя непосредственное преобразование электромагнитной энергии в механическую поступательного движения, позволяют исключить ряд механических звеньев (различного рода редукторы, передачи, тяги) из кинематической линии, что повышает надежность системы, снижает общие потери и повышает эффективность привода стрелочного перевода.

Созданы имитационные модели электроприводов стрелочных переводов в среде MATLAB SIMULINK на базе двигателя постоянного тока (ДПТ), асинхронного двигателя (АД), вентильно-индукторного двигателя (ВИД), линейного двигателя электромагнитного типа (ЛДЭМТ) и линейного индукторного двигателя (ЛИД). Проведена проверка адекватности на физических моделях стрелочных переводов в масштабе 1:2 с ЛДЭМТ и ВИД, а также на действующем оборудовании с АД и ДПТ. Сформулирована задача анализа по определению рациональной структуры электропривода стрелочного перевода на основе ДПТ, АД, ВИД, ЛДЭМТ и ЛИД.

Ключевые слова: электротранспорт, скоростное и высокоскоростное движение, электромеханические системы, путевая структура, стрелочный перевод, система управления, математическая модель, критерий эффективности,

Buriakovskiy S. G. The scientific bases for the selection of electric drives of turnouts for rapid and high-speed railways. – As manuscript.

Doctoral thesis, technical sciences, specialty 05.22.09 – "Electric transport." National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2017.

The dissertation is dedicated to develop of theoretical bases for the selection and evaluation of the types of electric drives of turnouts operating in optimal modes, taking into account the nonlinearities of the load and the electrophysical properties of the engines, on the basis of solving the problem of minimizing the main quality indicators such as: the transfer time, the value of the impulse of switch rail impact against a rail, the value of the elastic force in the working draft and the magnitude of the total losses in the system. The universal vector criterion for the working efficiency of the electric drive of turnouts is proposed. Its components are the transfer time, the value of the impulse of switch rail impact against a rail, the value of the elastic force in the working draft and the magnitude of the total losses in the system. The assessment of the appropriateness of application a specific type of turnouts for rapid and high-speed traffic segments is made. The kinematic schemes in the form of two- and three-mass electromechanical systems with standard engines are considered. Various control systems for the operated electric drives, which provide higher quality indicators for rapidity of the switching process of the switch rails, positioning accuracy and the impact force on the rail, are proposed. The railway sleeper layout of the turnout with new types of electric motors is suggested to applying. The mathematical models for existing and prospective types of turnouts based on motors of rotational and linear types, which based on the solution of the Lagrange equation for electromechanical system taking into account the nonlinearity of the magnetic system, have been developed. The simulation models of electric drives of turnouts in the software environment of MATLAB SIMULINK on the basis of a DC motor, an asynchronous motor, a valve-inductor motor, a linear motor of electromagnetic type and a linear inductor motor are developed. The adequacy verification on physical models was made. The problem of analysis for determining the rational structure of the electric drive of turnout based on DC motor, asynchronous motor, valve-inductor motor, linear motor of electromagnetic type and linear inductor motor is formulated.

Keywords: electric transport, rapid and high-speed traffic, electromechanical systems, track structure, turnout, control system, mathematical model, criterion of effectiveness



Відповідальний за випуск
к.т.н., доц. кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ “ХПІ”
Єрціян Б.Х.

Підписано до друку 17.05.2017 р.
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 1,9. Тираж 100 прим. Зам. № 21

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
М. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354