

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора, проректора з науково-педагогічної роботи Українського державного університету залізничного транспорту **Блиндюка Василя Степановича** на дисертаційну роботу Сабліна Олега Ігоровича «Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту», що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт, галузь знань 27 – транспорт

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Повний обсяг дисертації становить 364 сторінки, серед них 120 рисунків за текстом, з них 13 рисунків розташовано на 7 окремих сторінках, 39 таблиць за текстом, список використаних джерел з 301 найменувань – на 36 сторінках, додатки – на 47 сторінках. Основний текст роботи викладено на 277 сторінках.

1. Актуальність обраної теми дисертаційної роботи

Енерговитрати у собівартості перевезень на транспорті з електричною тягою сьогодні оцінюються на рівні 21...23 % і в наслідок постійного подорожчання енергоносіїв мають стійку тенденцію до зростання. Для зниження або стримування цього показника необхідно постійно розвивати і вдосконалювати енергозберігаючі технології відповідно до нових можливостей сучасних технічних засобів та методів управління ними. Особливо важливим це є у контексті інтеграції України у європейський простір в рамках реалізації програми ЄС «Пакет дій щодо боротьби зі зміною клімату та використання відновлюваної енергії», що ставить завдання зниження шкідливих викидів в атмосферу.

Нереалізованим резервом зниження енергоємності і покращення експлуатаційних показників електричного транспорту є використання можливостей часткового відновлення витраченої на тягу енергії шляхом її рекуперації, що дозволяє зменшувати витрати енергії на перевезення в різних видах руху на 10...40 %. Реалізація потенціалу рекуперованої електроенергії на електрифікованому транспорті повною мірою не можлива без узгодження режимів енергообміну між тяговим електроспоживанням і рекуперацією. Через відсутність такого узгодження спостерігаються незначні обсяги рекуперації енергії, середній показник якої зараз не перевищує 2...3 %.

Сучасні інформаційно-керуючі системи на основі smart grid технологій дозволяють вирішувати проблему використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту на якісно новому рівні. Для цього необхідні інтелектуальні алгоритми керування накопичувачами енергії, інверторами та регуляторами напруги. При цьому стає доступним примусовий розподіл енергії між елементами систем тягового і зовнішнього електропостачання, який є оп-

тимальним у порівнянні з природнім розподілом і дозволяє транспортним засобам реалізовувати рекуперацію енергії незалежно від графіків руху на ділянках, наявності тягового електроспоживання в момент рекуперації і режимів систем зовнішнього електропостачання.

Тому з огляду на вищесказане, розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту є безсумнівно актуальним напрямом наукових досліджень.

2. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Дослідження в дисертаційній роботі поставлені коректно та виконані кваліфіковано, розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує загальноприйнятих значень; дослідні результати одержано на основі великих обсягів реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики; більшу частину експериментальних даних одержано різними незалежними методами.

3. Основні наукові результати, отримані в дисертаційній роботі

В результаті теоретичних та експериментальних досліджень, проведених у дисертаційній роботі, автором отримані наступні наукові результати.

Вперше на основі експериментальних досліджень науково обґрунтовано раціональні умови передачі енергії рекуперації до систем зовнішнього електропостачання, при яких забезпечується нормативний діапазон напруги на вводі тягових підстанцій при роботі інверторів та стійкий процес рекуперації транспортних засобів.

Вперше запропоновано в якості параметра ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі використовувати швидкість зміни напруги на шинах постійного струму тягових підстанцій та науково обґрунтовано її діапазон, що забезпечує координацію роботи пристройів розподілу енергії рекуперації та захисту максимальної напруги на ЕРС, при якій зменшується імовірність «зривів» рекуперації.

Вперше розроблені принципи моделювання зони розподілу енергії рекуперації на основі математико-алгоритмічного конструктивізму, що дозволило поставити і запропонувати підходи до розв'язання декілька класів задач: раціонального розташування енергозберігаючого обладнання, вибору його параметрів та оптимальних алгоритмів управління в залежності від структури та режимів систем тягового електропостачання.

Вперше отримано залежність коефіцієнта споживання енергії рекуперації від експлуатаційних та режимних параметрів системи електричної тяги, що дозволяє розробляти на базі цього науково обґрунтовані рішення щодо раціонального розподілу енергії за критерієм мінімуму втрат в елементах систем тягового та зовнішнього електропостачання.

Вперше запропоновано метод інтелектуального управління процесом розподілу енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту за енергетичним критерієм на основі експертних систем та нейро-нечіткої логіки, що дозволяє в залежності від багатоваріантності структури системи тягового електропостачання максимально використовувати потенціал енергозбереження від рекуперації в умовах неповної інформації про режими систем тягового і зовнішнього електропостачання.

Отримав подальший розвиток метод розрахунку системи тягового електропостачання в частині декомпозиції струму рекуперації транспортних засобів на складові, що відрізняється від існуючих вирахуванням багатоваріантності структури системи тягового електропостачання і дозволяє визначати показники ефективності використання енергії рекуперації як в існуючих так і в перспективних системах тягового електропостачання.

Отримав подальший розвиток метод визначення потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту при рекуперації енергії в частині врахування експлуатаційних факторів, структури та режимів систем тягового та зовнішнього електропостачання, що дає можливість оптимізувати параметри енергозберігаючого обладнання на стадії проектування енергозберігаючих заходів та зменшити капітальні витрати при їх впровадженні.

4. Повнота викладення в опублікованих працях основних наукових та прикладних результатів дисертаційної роботи та їх апробація

За темою дисертації опубліковано 47 наукових робіт, у тому числі основні результати у 21 праці, з них: 3 – статті у журналах, що індексуються Scopus; 1 – монографія, 17 – статті у фахових виданнях, і додаткові – в 26 працях, з них 2 – охоронні документи, 19 – тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практических конференцій. В опублікованих працях повною мірою викладено основні наукові та прикладні результати досліджень, що проведені в дисертації.

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і одержали схвалення на 19 міжнародних науково-технічних конференціях та у повному обсязі на доповідалась на міжкафедральному науковому семінарі у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

5. Практична цінність отриманих результатів дисертаційної роботи

Практична цінність отриманих результатів полягає наступному:

- використання науково обґрунтованого діапазону напруг на вводах тягових підстанцій дозволяє приймати оперативні рішення щодо доцільності передачі енергії рекуперації до системи зовнішнього електропостачання;

- оцінка потенціалу енергозбереження систем електрифікованого транспорту при рекуперації енергії дозволяє виявляти резерви економії енергії в системах електричної тяги;

- методи управління режимами енергообміну накопичувачів, напруги на виході інверторів та на шинах постійного струму тягових підстанцій дозволяють забезпечити нормативні показники якості електроенергії при її передачі до зовнішньої мережі, підвищити коефіцієнт завантаження накопичувачів, інверторів і регуляторів напруги та мінімізувати їх встановлену потужність на ділянках залізниць, міському транспорті та метрополітені;

- розроблені способи ситуаційного регулювання напруги холостого ходу на шинах постійного струму тягових підстанцій дозволяють розширити зону рекуперації електротранспорту, що збільшує відстань передачі енергії в тяговій мережі в границях допустимої напруги на струмоприймах транспортних засобів та обсяги рекуперації енергії на 17...20 %;

- розроблений програмний комплекс по навчанню експертної системи для управління розподілом енергії рекуперації в тяговій мережі дає змогу моделювати процеси взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання та транспортних засобів в режимі рекуперації для існуючих і перспективних систем на стадії проектування;

- використання в комплексі розроблених технологій на електрифікованих залізницях постійного струму за наявної комплектації парку електрорухомого складу системою рекуперативного гальмування дозволить на 45...49 % збільшити обсяги рекуперації енергії від поточного стану та значно знизити імовірність «зривів» процесу рекуперації енергії в тягових мережах.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи впроваджено в КП «Дніпровський електротранспорт», службі електропостачання ДГТО «Львівська залізниця», ТОВ «ДАК-Енергетика» та у навчальній процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

6. Оцінка змісту дисертації та її завершеності в цілому

Побудова структури дисертації та послідовність викладення матеріалу не викликає заперечень, розподіл матеріалу за розділами та їх наповнення досить вдале, в кінці кожного розділу наводяться висновки та посилання на роботи, в яких опубліковано результати кожного розділу.

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, формулювання мети та завдань досліджень, основні наукові результати, що винесені на захист, а також відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію і публікації матеріалів досліджень.

Перший розділ присвячено аналізу стану проблеми ефективності використання енергії рекуперації в системах електричного транспорту. В розділі приводиться опис енергетичних процесів, що мають місце при рекуперації електричним гальмуванням, аналізуються фактори впливу на ефективність розподілу і використання енергії рекуперації, систематизуються показники ефективності рекуперації енергії та опрацьовуються методи підвищення ефективності використання електроенергії рекуперації.

У другому розділі приводяться результати експериментальних досліджень ефективності режимів рекуперації енергії в системах електричного транспорту. При цьому досліджувались режими напруги на струмоприймачах транспортних засобів та у тяговій мережі, впливи режимів систем зовнішнього електропостачання на ефективність рекуперації з інверторючими підстанціями, графіки потужності рекуперації в системах електричного транспорту постійного струму.

У третьому розділі наведені підходи до моделювання квазіусталених процесів струмозподілу енергії рекуперації в системах тягового і зовнішнього електропостачання. На підставі загальних підходів до моделювання режимів систем тягового електропостачання розроблені моделі електрорухомого складу в режимі рекуперації та елементів системи тягового електропостачання. Розроблені підходи до моделювання взаємодії електрорухомого складу в режимі рекуперації з системою тягового електропостачання. Враховано особливості впливу рекуперативного гальмування на облік витрат електричної енергії за лічильниками тягових підстанцій.

Четвертий розділ присвячено розвитку принципів нечіткого управління режимами систем тягового електропостачання при рекуперації енергії. За рахунок вдалого застосування конструкційно-продукційного моделювання зони рекуперації розвинуто підходи нечіткого управління режимами систем тягового електропостачання при розподіленні надлишкової енергії рекуперації. Напрямки реалізації розроблених підходів показано у вигляді принципів інтелектуального управління розподілом струму рекуперації транспортних засобів при їх взаємодії через систему тягового електропостачання.

У п'ятому розділі розглядаються необхідні удосконалення методу визначення потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту при рекуперації енергії. Наводяться теоретичні викладки з визначення потенціалу енергозбереження, виконана експериментальна оцінка резервів енергозбереження на прикладі Дніпровського метрополітену, пропонуються удосконалення системи обліку рекуперованої енергії на залізницях постійного струму.

Шостий розділ присвячено розробці рекомендацій з підвищення ефективності рекуперації енергії в системах електричного транспорту. Показані необхідні заходи для оптимізації транспортних потоків з урахуванням використання енергії рекуперації, принципи вибору типу та параметрів накопичувачів енергії для тягових підстанцій, підходи ситуаційного регулювання напруги на шинах тягових підстанцій і в тяговій мережі при рекуперації електроенергії. Приводяться результати розробки технології сумісної роботи інверторів та накопичувачів при розподілі надлишкової енергії рекуперації. Виконується техніко-економічна оцінка впровадження енергозберігаючих заходів з підвищення ефективності споживання енергії рекуперації.

Загальні висновки по дисертаційній роботі у повній мірі відображають одержані наукові результати.

У додатках приведені програми проведених експериментальних досліджень, документація на розроблені програмні продукти та акти впровадження результатів дисертації.

7. Ідентичність змісту автореферату і основних положень дисертації

Матеріали викладені у відповідних розділах автореферату дають повне й цілісне уявлення про дисертацію й у повній мірі розкривають її зміст. Матеріали, викладені в авторефераті на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, свідчать про те, що результати наукових досліджень, за якими здобувач її захистив, не винесені на захист докторської дисертації.

8. Зауваження по дисертаційній роботі

Оцінюючи в цілому дисертаційну роботу Сабліна О. І. позитивно, по роботі є такі зауваження:

1. В першому розділі доцільно було б розглянути вплив процесів гальмування транспортних засобів на обсяги рекуперації енергії в залежності від експлуатаційних параметрів ділянок.
2. В якості споживача надлишкової енергії рекуперації в роботі не розглядається можливість її використання на живлення кіл власних потреб рухомого складу та розташування накопичувачів власне на рухомому складі.
3. При виборі параметрів оптимізації процесу використання енергії рекуперації в роботі не враховується вплив рекуперативного гальмування на збитки від угону рейок та погіршення динаміки поїзда при локомотивній тязі.
4. С. 100, рис. 2.2 не зрозуміло за яким виразом визначалася автокореляційна функція процесу тягового електроспоживання транспортних засобів.
5. С. 111, рис. 2.13 статистичний розподіл струму рекуперації електровозу описано нормальним законом, але за видом гістограми він є явно іншого типу.
6. С. 116, рис. 2.19 не зрозуміло як забезпечувалася синхронність вимірювання пристріїв на електровозі і тягових підстанціях.
7. С. 117, табл. 2.5 при аналізі ефективності роботи інверторів на зовнішню мережу доцільно було б привести значення їх коефіцієнта потужності.
8. В дисертації обґрунтовано, що електрорухомий склад в режимі рекуперації повинен моделюватися у вигляді керованого напругою джерела струму (с. 138), але в подальших схемах заміщення від зображується як звичайне джерело струму.
9. Не зрозуміло чи придатна розроблена імітаційна модель системи тягового електропостачання (рис. 3.8) до дослідження роботи в ній накопичувачів інших типів, окрім ємнісних.
10. Втрати енергії рекуперації як цільову функцію у виразі (4.24) доцільно було б записати у вигляді аналітичного виразу, а не в загальному вигляді.
11. В моделі на рис. 4.13, с. 199, існує 5 вихідних величин, як параметрів управління, а у виразі (4.24), що описує виходи моделі записано лише 4.

12. В п.п. 4.2.2. при описанні нечіткої моделі не обґрунтовано чому використано трикутні функції принадлежності для описання вхідних і вихідних величин моделі, а не інші типи, наприклад криві Гауса.
13. З п.п. 5.3 не зрозуміло в чому конкретно полягає вдосконалення системи обліку енергії рекуперації на електрифікованих ділянках.
14. За текстом дисертації зустрічаються орфографічні помилки, описки та неточності. Зустрічаються позначення на схемах, що не відповідають ДСТУ, на рисунках зустрічаються позначення на російській мові.

В решті матеріал дисертаційної роботи викладено технічно грамотно, у логічній послідовності, ясно та аргументовано. Дисертація оформлена належним чином, відповідно до вимог, які пред'являються МОН України.

9. Загальний висновок

Зауваження, які наведені вище, не знижують якість роботи і не порушують основні її положення, не зменшують її наукову новизну та практичну цінність, а отже, й загальну високу оцінку.

Автореферат повною мірою відображає зміст дисертаційної роботи. Ілюстративний матеріал з достатньою інформативністю висвітлює основні наукові результати.

Дисертаційна робота Сабліна О. І. є завершеним науковим дослідженням, зміст якого відповідає спеціальності 05.22.09 – електротранспорт, галузі знань 27 – транспорт. В дисертаційній роботі на основі результатів виконаних теоретичних і експериментальних досліджень вирішена важлива науково-прикладна проблема енергоекспективного управління режимами тягового електропостачання систем електрифікованого транспорту при рекуперації електроенергії.

За актуальністю розглянутої проблеми, науковим рівнем, обсягом досліджень та практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів...» щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, а її автор, Саблін Олег Ігорович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
проректор з науково-педагогічної
роботи Українського державного
університету залізничного транспорту

Б. С. Блиндюк



104-48/79
від 21.06.18.

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Сабліна Олега Ігоровича «Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту», що подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт

Актуальність теми.

Необхідність підвищення техніко-економічної ефективності функціонування електроенергетичних систем в умовах зростання тарифів на енергоносії та розвитку новітніх енергозберігаючих технологій вимагає розв'язання нового класу задач. Зокрема, це стосується і необхідності підвищення енергоефективності систем електропостачання електричного транспорту, як складової частини електроенергетичного комплексу країни. Споживання електроенергії електрифікованим транспортом в загальноенергетичному балансі України складає більше 5 %, причому більша частина стосується безпосередньо витрат на електричну тягу.

Одним з важливих резервів зниження енергоємності і покращення енергетичних показників електротранспорту є використання можливостей часткового відновлення витраченої на тягу енергії шляхом її рекуперації, що дозволяє зменшувати витрати енергії на перевезення в різних видах руху на 10...40 %. Однак внаслідок неможливості забезпечення гарантованого тягового електроспоживання в моменти рекуперації існує ряд обмежень щодо можливостей повернення і повторного використання відновленої енергії на електрифікованому транспорті. Це, у свою чергу, є однією з причин незначних обсягів рекуперації енергії, середній показник якої зараз не перевищує 2...3 %.

Метою роботи Сабліна О. І. є розвиток методів і засобів використання енергії рекуперації для підвищення ефективності систем тягового енергопостачання. Мета роботи спрямована на забезпечення можливостей рекуперації енергії незалежно від графіків руху на ділянках, наявності тягового електроспоживання в момент рекуперації і режимів систем зовнішнього електропостачання. При цьому на струмоприймачах рекуперуючих транспортних одиниць буде мати місце допустимий рівень напруги, що значно знизить використання реостатного гальмування на та втрати енергії рекуперації. Враховуючи це тематика дисертаційного дослідження є безумовно актуальною.

У відповідності до поданих дисертаційних матеріалів результати роботи є складовою частиною науково-практичних розробок Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна за такими темами: «Підвищення ефективності електроспоживання ділянками системи електричної тяги постійного струму» (№ ДР 0109U000478); «Підвищення ефективності електропостачання об'єктів залізничного транспорту» (№ ДР 0111U009393); «Забезпечення раціональних режимів систем тягового електропостачання» (№ ДР 0111U009393); «Прикладне конструктивне моделювання

програмних сутностей» (№ ДР 0116U006841); «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту» (№ ДР 0115U002311); «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем» в рамках конкурсу наукових проектів молодих вчених МОН України (№ ДР 0116U006982); «Вдосконалені інформаційні технології моделювання взаємодії рухомого складу та колії» в рамках конкурсу міжнародних україно-білоруських наукових проектів МОН України (№ ДР 0117U006396). У цих роботах дисертант був відповідальним виконавцем та співавтором звітів з науково-дослідних робіт.

Вказані науково-дослідні роботи виконувалися відповідно до цільових державних програм та також постанов Кабінету Міністрів України.

Зміст і коротка характеристика результатів дослідження.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, наведено основні наукові положення, що виносяться на захист, а також подано відомості про апробацію та публікації результатів дослідень.

В першому розділі проаналізовано стан проблеми, фактори, що впливають на ефективність процесу використання енергії рекуперації в системах електричного транспорту, а також існуючі методи та засоби підвищення ефективності цього процесу, на основі чого сформульовано мету та задачі дослідження. Показано, що найбільш дієві технології підвищення ефективності використання енергії рекуперації належать до технічних і технологічних методів, а поява сучасних енергетичних пристройів та smart grid технологій дозволяє вирішувати проблему використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту на якісно новому рівні, реалізуючи інтелектуальні алгоритми керування накопичувачами енергії, інверторами та регуляторами напруги.

Другий розділ присвячено експериментальним дослідженням ефективності режимів рекуперації енергії в системах електричного транспорту, проаналізовані кількісні та якісні показники енергії рекуперації та фактори що впливають на них. Дослідження проводилися за даними, що отримані базі дослідних вимірювань на ділянках Придніпровської та Львівської залізниць, Дніпровських метрополітені та міському електротранспорті. Досліджені імовірнісні характеристики режиму напруги на струмоприймаочах і в тягової мережі при рекуперації дозволили врахувати вплив рівня напруги на шинах тягових підстанцій на втрати енергії рекуперації в різних умовах та ефективність процесу рекуперації в цілому. Аналіз режимів напруги живлячої мережі дозволив виділити межі напруги на вводах тягової підстанції, при яких є доцільним передача енергії рекуперації в систему зовнішнього електропостачання. Експериментальні дослідження процесу зриву рекуперації дозволили запропонувати спосіб ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі за ознакою швидкості зростання напруги на шинах тягової підстанції, що дозволить забезпечувати своєчасне спрацювання пристройів прийому та розподілу надлишкової енергії рекуперації та зменшить кількість зривів рекуперації. Визначені значення кількісних показників графіків рекуперації необхідно враховувати при обґрунтуванні технічних рішень щодо

повернення енергії рекуперації до систем зовнішнього електропостачання шляхом інвертування на тягових підстанціях та при розробці алгоритмів сумісної роботи інверторів і накопичувачів, що забезпечують стабілізацію вихідної потужності інверторів при роботі на живлячу мережу.

В третьому розділі проведено моделювання квазіусталених процесів струмозподілу енергії рекуперації в системах тягового і зовнішнього електропостачання, визначені основні критерії ефективності розподілу та втрати енергії рекуперації. В якості моделі ЕРС в режимі рекуперації в роботі обґрунтовано використання моделі керованого напругою (на струмоприймачі) джерела струму. В розділі також створено динамічну модель тягової мережі, де положення рухомих керованих джерел струму визначається зміною функцій опору тягової мережі. На основі використання інтегралу Дюамеля розроблені підходи до моделювання енергообмінних режимів накопичувачів в тяговій мережі. На основі моделювання визначені залежності напруги на струмоприймачах ЕРС в режимі рекуперації та тяги від співвідношення струмів тяги і рекуперації, що дозволяє обґрунтувати раціональну зону рекуперації в залежності від напруги на шинах тягових підстанцій.

В четвертому розділі розвинуті наукові принципи моделювання зони розподілу енергії рекуперації на основі математико-алгоритмічного конструктивізму та метод нейро-нечіткого управління режимами систем тягового електропостачання при рекуперації енергії. Для розробки методів оптимального управління пристроями розподілу енергії рекуперації в широкому спектрі існуючих і потенційних схем системи тягового електропостачання в роботі запропоновано використання апарату математико-алгоритмічного конструктивізму. Це дає можливість розробляти засоби і методи формування множин реальних і потенційних структурних схем системи тягового електропостачання з різною комплектацією і поїзною ситуацією для подальшого навчання нейрофазі-мереж на основі експертних рішень і формування раціонального керування обладнанням з метою ефективного використання енергії рекуперації. Розв'язання задачі раціонального розподілу енергії рекуперації в СТЕ зі стаціонарними (НЕ) і інвертуючими ТП з плавним регулюванням вихідної напруги було виконано на основі декомпозиції надлишкового струму рекуперації на складові, що споживаються керованими накопичувачами енергії, інверторами та перетікають до віддалених тягових навантажень при зниженні напруги на шинах тягових підстанцій регуляторами. Це лягло в основу створення нечіткої моделі, що визначає шукані струми в умовах неповної інформації про режими систем тягового та зовнішнього електропостачання. Також виконано навчання створеної моделі на основі розробленої багатошарової нейронної мережі з прямим поширенням сигналу. Навчання нейронної мережі дозволяє підвищити точність управління розподілом, ґрунтуючись на неповних даних отриманих системами вимірювань, що є основою інтелектуального управління режимами систем тягового електропостачання при рекуперації енергії.

П'ятий розділ присвячено вдосконаленню методу оцінки потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту за рахунок підвищенні ефективності використання енергії рекуперації та розробці рекомендацій по вдосконален-

ню системи обліку енергії рекуперації. Досліджено залежність величини коефіцієнта споживання енергії рекуперації від основних експлуатаційних та режимних параметрів систем тягового електропостачання (в тому числі при використанні сучасного і перспективного енергозберігаючого обладнання). Це дозволило зробити висновок, що при сумісному використанні інверторів, накопичувачів і регуляторів напруги та методів нейро-нечіткого управління їх режимами має місце практично повне використання енергії рекуперації ($k_{\text{сп}} \rightarrow 1$) та досягається зниження встановленої потужності розглянутого енергозберігаючого обладнання. Виконана експериментальна оцінка теоретичного потенціалу енергозбереження при використанні рекуперації енергії в умовах Дніпровського метрополітену.

У шостому розділі приведені практичні рекомендації щодо реалізації розроблених теоретичних положень дисертації, методів і технологій з підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту. В розділі виконано вдосконалення системи управління режимами енергообміну накопичувачів енергії, розроблено алгоритми регулювання напруги на шинах постійного струму для розширення зони рекуперації, а також розроблено структуру системи управління накопичувачами і інверторами при сумісній роботі та програмний комплекс по навчанню розробленої системи методам нейро-нечіткого управління.

У висновках наведено загальні висновки роботи. Також у роботі є **список використаних джерел** (301 джерело на 36 с.), а також **4 додатка**.

Таким чином, Саблін О. І. провівши сукупність наукових досліджень, спираючись на сучасні методи досліджень і технічні засоби, досяг поставленої мети – розвинув наукові підходи щодо енергоефективного управління режимами тягового електропостачання систем електрифікованого транспорту при рекуперації електроенергії.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна.

В дисертації Саблін О. І. отримав такі основні результати, які мають **наукову новизну**. Вона полягає в розвитку теорії і практики керування режимами тягового електропостачання, що забезпечує оптимальний розподіл енергії рекуперації в системах тягового і зовнішнього електропостачання та зменшення втрат енергії рекуперації транспортних засобів, зокрема:

- вперше *науково обґрунтовано* раціональні умови передачі енергії рекуперації до систем зовнішнього електропостачання, при яких забезпечується нормативний діапазон напруги на вводі тягових підстанцій при роботі інверторів та стійкий процес рекуперації транспортних засобів, *запропоновано* в якості параметра ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі використовувати швидкість зміни напруги на шинах постійного струму тягових підстанцій та *науково обґрунтовано* її діапазон, *розроблені* принципи моделювання зони розподілу енергії рекуперації на основі математико-алгоритмічного конструктивізму, що дозволяє раціонально розташувати енергозберігаюче облад-

нання, обирати його параметри та оптимальні алгоритми управління в залежності від структури та режимів систем тягового електропостачання;

– розвинуто та удосконалено: *метод розрахунку* систем тягового електропостачання в частині декомпозиції струму рекуперації транспортних засобів на складові, що дозволяє визначати показники ефективності використання енергії рекуперації як в існуючих так і в перспективних системах тягового електропостачання, *метод визначення* потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту при рекуперації енергії, що дає можливість оптимізувати параметри енергозберігаючого обладнання на стадії проектування енергозберігаючих заходів та зменшити капітальні витрати при їх впровадженні.

Це дозволило розв'язати важливу науково-практичну проблему – підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електричного транспорту в умовах відсутності або обмеженого тягового електроспоживання на ділянках.

Положення і висновки відносно суті проблеми, принципів і методів побудови математичних моделей обґрунтовані в роботі і базуються на принципах системного та статистичного аналізу, теорії математичного моделювання, теорії електричної тяги та електричних систем. Висновки по розділах і по роботі в цілому відповідають змісту дисертації і є об'єктивними. Можна стверджувати, що приведені в дисертаційній роботі Сабліна О. І. висновки і рекомендації щодо використання результатів досліджень **достатньо обґрунтовані** і відповідають дійсності. **Достовірність** їх забезпечена коректністю використання математичного апарату та наукових положень. Вона підтверджується результатами тестування розроблених методів, моделей і програмних засобів, зіставленням розрахунків з експериментальними вимірюваннями та результатами впровадження розробок у виробництво.

Основні результати дослідження **достатньо апробовані**. Вони доповідались на міжнародних науково-технічних конференціях: III-VI Міжнародних науково-практических конференціях «Енергозбереження на залізничному транспорти і в промисловості» (Воловець, 2012-2015); II-IV Міжнародних науково-технічних конференціях «Оптимальне керування електроустановками» ОКЕУ» (Вінниця, 2013, 2015, 2017); I Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми розвитку інтелектуальних систем транспорту» (Дніпропетровськ, 2014); VII та VIII Міжнародних науково-практических конференціях «Електрифікація залізничного транспорту. ТРАНСЕЛЕКТРО» (Одеса, 2014, 2015); III, V, VI International Conference «Najnowsze technologie w transporcie szynowym» (Warsaw, 2014, 2016, 2017); 75 та 76 Міжнародних науково-практических конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2015, 2016); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорти, в промисловості та освіті» (Дніпропетровськ, 2015); 4th International Conference «Advanced Rail Technologies» (Warsaw, 2015); I та II Міжнародних науково-практических конференціях «Енергооптимальні технології перевізного процесу» (Моршин, 2016; Львів, 2017); VIII Міжнародной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель,

2017). В повному обсязі дисертація доповідалась на міжкафедральному науковому семінарі у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Основний зміст дисертації достатньо повно відображені у 21 публікаціях, в тому числі: 3 – статті у закордонних журналах, що індексуються Scopus; 1 – монографія, 17 – статті у фахових виданнях, що входять до списку ДАК. Решта 26: 5 – у виданнях не зі списку, 19 – тези науково-технічних конференцій, отримано 1 патент на корисну модель та 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерна програма).

Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що в них у повному обсязі представлені матеріали дисертації. Автореферат ідентичний за змістом та основними положеннями дисертації. У авторефераті розкрито внесок дисертанта в даний науковий напрям, розкрито новизну розробок, теоретичні та практичні значення результатів проведених досліджень. **Положення та висновки, захищені здобувачем у кандидатській дисертації, не виносяться на захист докторської.**

Значення отриманих результатів для теорії і практики.

Практичне і теоретичне значення отриманих результатів визначається тим, що на підставі виконаних автором досліджень розроблено методи та засоби підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту.

Використання експериментально обґрунтованого діапазону напруг на вводах тягових підстанцій $U_{\max} \dots U_{\min}$ дозволяє приймати оперативні рішення щодо доцільності передачі енергії рекуперації до системи зовнішнього електропостачання і забезпечувати нормативні показники електропостачання нетягових споживачів. Оцінка потенціалу енергозбереження систем електрифікованого транспорту при рекуперації енергії на базі вдосконаленого методу дозволяє виявляти резерви економії енергії в системах електричної тяги в залежності від її експлуатаційних показників та виконувати техніко-економічне обґрунтування заходів з підвищення ефективності використання енергії рекуперації. Запропоновані методи управління режимами снєрообміну накопичувачів, напруги на виході інверторів та на шинах постійного струму тягових підстанцій дозволяють забезпечити нормативні показники електроенергії при її передачі до зовнішньої мережі та підвищити коефіцієнт завантаження накопичувачів, інверторів і регуляторів напруги до 0,8...0,9. Розроблені способи ситуаційного регулювання напруги холостого ходу на шинах постійного струму тягових підстанцій дозволяють розширити зону рекуперації і тим самим збільшити відстань передачі енергії в тяговій мережі в границях допустимої напруги на струмоприймах транспортних засобів, що збільшує обсяги рекуперації енергії на 17...20 %. Створений програмний комплекс по навчанню експертної системи для управління розподілом енергії рекуперації в тяговій мережі дає змогу моделювати процеси взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання та транспортних засобів в режимі рекуперації як для існуючих систем так і перспективних, на стадії їх проектування. Використання в комплексі розроблених технологій на елек-

трифікованих залізницях постійного струму за наявної комплектації парку електрорухомого складу системою рекуперативного гальмування дозволить на 45...49 % збільшити обсяги рекуперації енергії від поточного стану. В цілому розроблені в дисертації методи та принципи можуть бути використані в якості інструментарію для побудови smart grid систем тягового електропостачання транспорту.

Розроблені методики та засоби підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електричного транспорту прийнято до використання в Комунальному підприємстві «Дніпровський електротранспорт», службі електропостачання регіональної філії «Львівська залізниця» ПАТ «Українські залізниці», а також ТОВ «ДАК-Енергетика». Результати досліджень автора також використовуються у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна.

Зauważення

1. Назва дисертації не конкретизована в контексті розгляду лише процесів і проблем рекуперації електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму (залізниці, метрополітен, міський електротранспорт), оскільки в роботі відсутні дослідження ефективності процесів рекуперації в системі тяги змінного струму. В роботі є лише часткове розглядання процесів у системах електропостачання змінного струму, а не їх повний аналіз.
2. Мета роботи «...розвиток наукових підходів щодо енергоефективного управління режимами..» не в повній мірі відображає називу дисертації «.. підвищення ефективності використання енергії рекуперації..».
3. Об'єктом досліджень є процес а не його показник «...ефективність її споживання в системах тягового та зовнішнього електропостачання..» як зазначено у роботі.
4. На с. 40 зазначається «На сучасному ЕРС з плавним регулюванням... є можливість здійснення рекуперативного гальмування майже до зупинки ..», але це не відповідає дійсності. Ця можливість залежить від особливостей тягових двигунів та тягових перетворювачів рухомого складу.
5. С. 47, абзац 2 зазначено, $W_{\text{нагрек}}$ визначається у %, а не в Джоулях або кВт·год.
6. Перший розділ переобрятений оглядовою інформацією. Вплив режиму напруги на шинах підстанцій і шляхи підвищення ефективності використання енергії рекуперації при застосування накопичувачів можна було б скоротити, наприклад, а викласти більш докладно роз'яснення щодо використання Smart Grid в рамках теми дисертації.
7. В роботі розглядалися лише ємнісні накопичувачі енергії і не розглянуті інші типи. З дисертації не зрозуміло який був обраний критерій оптимізації їх роботи.
8. В роботі відсутні підходи до ранжування по ступеню важливості експлуатаційних і режимних факторів, що впливають на ефективність використання енергії рекуперації.

9. У роботі не позначені режими навантаження тягових підстанцій при яких наведені осцилограмми фазних напруг, струмів в мережі 35 кВ, які наведені на рис. 2.20-2.23 (с.118-119). Також не наведено яким чином отримані ці данні.
10. У роботі не позначено які закономірності встановлені при дослідженні режимів напруг на струмоприймаючих ЕРС і шинах тягових підстанцій в розділі 2 і як ці дослідження використовувалися надалі.
11. На с. 149 зазначено «в якості моделі накопичувача була прийнята відома схема заміщення...», але не наведено посилань до джерела інформації у яких розглянуто аналогічна модель.
12. Для аналізу залежностей, що наведені на рис. 3.11-3.13 було б доцільне вказати, значення шкал по осям абсцис та ординат.
13. В п. 4.3 при розробці нейронної мережі, слід було вказати можливі типи її структури та приділити увагу шляху навчання мережі.
14. Для порівняння і обґрунтування достовірності вдосконалого методу оцінки потенціалу енергозбереження в табл. 7 автореферату та табл. 5.7 дисертації доцільно було б привести величину коефіцієнта рекуперації для метрополітену, що визначена не тільки з експериментальних вимірювань, а і з розрахунку за запропонованім методом.
15. Щодо загальної оцінки змісту, структури та оформлення результатів роботи. У роботі зустрічаються граматичні помилки, стилістичні неточності і описки, але кількість їх допустима. Путаються деякі поняття: «величина» і «значення», «рекуперація» і «генерація», тощо.

За текстом дисертації допущені різні позначення одних і тих же величин та їх розмірностей, наприклад потужність рекуперації по тексту позначається малою p і великою P літерами, не має описання наступних умовних позначень та скорочень:

— с. 44 рис. 1.1 – p ; с. 51 рис. 1.5 – РУ, U_{max} , $U_{\text{max}}^{\text{xx}}$; с. 51 рис. 1.6 – РЕС; с. 64 рис. 1.14 – ϕ ; с. 80 табл. 1.3 – E_{max} , E_{min} , H_{max} , H_{min} ; с. 99 табл. 2.1 – усі імовірнісні характеристики електроспоживання тягового рухомого складу; с. 113 табл. 2.4 – усі показники; с. 131 рис. 3.1 – НЭ, ЭПС, ВИП, струми $I_{\text{peak1}}-I_{\text{peak5}}$; с. 143 рис. 3.5 – R_{ϕ} , ρ_1 , ρ_2 , ρ_s , ρ_n , ПСК, ППС;

— використовується однакове позначення ϕ різних за текстом величин на рис. 1.14 та у формулах (3.26), (3.30);

— у списку скорочень немає наступних абревіатур, які присутні по тексту дисертації та в рисунках: ИНЕ, РППН, АИТ, Д, СПН, АЕ, ИРПТ, ФТВП, 4QS, КМ, СТ, ЛЕП, БАРН, ПСК, ЕЕ, ОКПС, КПС, ESD;

В позначеннях на рисунках зустрічається використання слів та термінів російською мовою.

Проте зазначені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву результати досліджень. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Сабліна О. І.

Висновок

Дисертація Сабліна Олега Ігоровича є завершеною науково-прикладною працею, в якій отримано нові науково-обґрунтовані результати, що присвячені вирішенню актуальної проблеми підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електричного транспорту. Дисертаційна робота за актуальністю теми, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, новизною досліджень і практичною цінністю отриманих результатів світового рівня відповідає пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 р., №656) і вирішує важливу наукову проблему – підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту, що має суттєве значення для його розвитку. Дисертація відповідає спеціальності 05.22.09 – електротранспорт, а її автор, Саблін Олег Ігорович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук.

Професор кафедри електричного транспорту
та тепловозобудування

Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
доктор технічних наук, професор

Б. Г. Любарський



Любарський БГ

Заковертний О.Ю.

20.18 р.

*1204-48772
21.06.18*

**ВІДГУК
ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

на дисертаційну роботу

Сабліна Олега Ігоровича

«Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання
енергії рекуперації в системі електричного транспорту»,
що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт

Загальний аналіз дисертації

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми ефективності процесу споживання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту шляхом розробки наукових основ вибору раціональних енергоощадних технологій для реалізації максимального потенціалу енергозбереження при використанні режимів рекуперації, що є актуальною проблемою транспорту. Теоретичні та експериментальні дослідження дисертації спрямовані на розробку науково обґрунтованих методів, технологічних рішень, експертних і імітаційних моделей, інтеграції сучасного електротехнічного обладнання і інформаційних систем для підвищення енергоефективності режимів рекуперації енергії і зниження питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів в процесі перевезень.

Актуальність теми

Енергетична стратегія України на період до 2035 року передбачає зниження енергоємності всіх галузей вітчизняної промисловості. Транспортна система країни займає четверте місце серед споживачів енергоресурсів, де більше 85 % витрат енергії припадає на здійснення перевізного процесу. У собівартості перевезень транспорту з електричною тягою енерговитрати сьогодні оцінюються на рівні 21...23 % і в наслідок подорожчання енергоносіїв мають стійку тенденцію до зростання. Зниження або стримування цього показника вимагає постійного розвитку і вдосконалення енергозберігаючих технологій відповідно до нових можливостей сучасних технічних засобів та методів управління ними. При інтеграції України у європейський простір це є важливим елементом у реалізації програми ЄС «Пакет дій щодо боротьби зі зміною клімату та використання відновлюваної енергії», що ставить завдання перед європейськими країнами до 2020 р. знизити шкідливі викиди в атмосферу на 21 % порівняно з 1990 р.

Важливим джерелом енергозбереження на електрифікованому транспорті є ефективне використання можливостей рекуперації електроенергії, що дозволяє в різних видах руху транспорту знижувати витрати енергії на тягу в межах 12...35 % порівняно тягою без рекуперації. Однак процес рекуперації потребує в тяговій мережі наявність гарантованого споживача рекуперованої енергії, що не можуть забезпечувати належним чином існуючи графіки та режими руху поїздів, тому на електрифікованому транспорті існує ряд обмежень щодо можливостей повернення і повторного використання відновленої енергії. Це, у свою чергу, є

однією з причин незначних обсягів рекуперації енергії, середній показник якої за останні роки не перевищує 3 %.

Таким чином розвиток технологій, методів і засобів, що дозволяють підвищувати ефективність використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту є вкрай актуальною проблемою, що потребує наукового розв'язання.

Наукова новизна одержаних результатів автора полягає в наступному

1. Вперше на основі експериментальних досліджень науково обґрунтовано раціональні умови передачі енергії рекуперації до систем зовнішнього електропостачання, при яких забезпечується нормативний діапазон напруги на вводі тягових підстанцій при роботі інверторів та стійкий процес рекуперації транспортних засобів.
2. Вперше запропоновано в якості параметра ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі використовувати швидкість зміни напруги на шинах постійного струму тягових підстанцій та науково обґрунтовано її діапазон, що забезпечує координацію роботи пристрій розподілу енергії рекуперації та захисту максимальної напруги на ЕРС, при якій зменшується імовірність «зривів» рекуперацій.
3. Вперше розроблені принципи моделювання зони розподілу енергії рекуперації на основі математико-алгоритмічного конструктивізму, що дозволило поставити і запропонувати підходи до розв'язання декілька класів задач: раціонального розташування енергозберігаючого обладнання, вибору його параметрів та оптимальних алгоритмів управління в залежності від структури та режимів систем тягового електропостачання.
4. Вперше отримано залежність коефіцієнта споживання енергії рекуперації від експлуатаційних та режимних параметрів системи електричної тяги, що дозволяє розробляти на базі цього науково обґрунтовані рішення щодо раціонального розподілу енергії за критерієм мінімуму втрат в елементах систем тягового та зовнішнього електропостачання.
5. Вперше запропоновано метод інтелектуального управління процесом розподілу енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту за енергетичним критерієм на основі експертних систем та нейро-нечіткої логіки, що дозволяє в залежності від багатоваріантності структури системи тягового електропостачання максимально використовувати потенціал енергозбереження від рекуперації в умовах неповної інформації про режими систем тягового і зовнішнього електропостачання.
6. Отримав подальший розвиток метод розрахунку системи тягового електропостачання в частині декомпозиції струму рекуперації транспортних засобів на складові, що відрізняється від існуючих вирахуванням багатоваріантності структури системи тягового електропостачання і дозволяє визначати показники ефективності використання енергії рекуперації як в існуючих так і в перспективних системах тягового електропостачання.

7. Отримав подальший розвиток метод визначення потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту при рекуперації енергії в частині врахування експлуатаційних факторів, структури та режимів систем тягового та зовнішнього електропостачання, що дає можливість оптимізувати параметри енергозберігаючого обладнання на стадії проектування енергозберігаючих заходів та зменшити капітальні витрати при їх впровадженні.

Значення результатів роботи для науки та практики

Практична цінність роботи полягає в тому, що за результатами теоретичних та експериментальних досліджень:

1. Використання експериментально обґрунтованого діапазону напруг на вводах тягових підстанцій $U_{\max} \dots U_{\min}$ дозволяє приймати оперативні рішення щодо доцільності передачі енергії рекуперації до системи зовнішнього електропостачання в залежності від її завантаження у вузлах приєднання тягових підстанцій, що забезпечує нормативні показники електропостачання нетягових споживачів.
2. Оцінка потенціалу енергозбереження систем електрифікованого транспорту при рекуперації енергії на базі вдосконалених методів дозволяє виявляти резерви економії енергії в системах електричної тяги в залежності від її експлуатаційних показників та виконувати техніко-економічне обґрунтування заходів з підвищення ефективності використання енергії рекуперації.
3. Запропоновані методи управління режимами енергообміну накопичувачів, напруги на виході інверторів та на шинах постійного струму тягових підстанцій дозволяють забезпечити нормативні показники електроенергії при її передачі до зовнішньої мережі, підвищити коефіцієнт завантаження накопичувачів, інверторів і регуляторів напруги до 0,8...0,9 та мінімізувати їх встановлену потужність, що дозволить зменшити капітальні витрати при модернізації існуючих та електрифікації нових ділянок залізниць, міського транспорту та метрополітенів.
4. Розроблені способи ситуаційного регулювання напруги холостого ходу на шинах постійного струму тягових підстанцій дозволяють розширити зону рекуперації електротранспорту, що збільшує відстань передачі енергії в тяговій мережі в границях допустимої напруги на струмоприймах транспортних засобів та обсяги рекуперації енергії на 17...20 %.
5. Розроблений програмний комплекс по навчанню експертної системи для управління розподілом енергії рекуперації в тяговій мережі дає змогу моделювати процеси взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання та транспортних засобів в режимі рекуперації як для існуючих систем так і перспективних, на стадії їх проектування. В цілому розроблені в дисертації методи та принципи можуть бути використані в якості інструментарію для побудови smart grid систем тягового електропостачання транспорту.
6. Використання в комплексі розроблених технологій на електрифікованих залізницях постійного струму за наявної комплектації парку електрорухомого складу системою рекуперативного гальмування дозволить на 45...49 % збі-

льшити обсяги рекуперації енергії від поточного стану та значно знизити імовірність «зривів» процесу рекуперації енергії в тягових мережах.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в КП «Дніпровський електротранспорт», службі електропостачання ДГТО «Львівська залізниця», ТОВ «ДАК-Енергетика» та у навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, у вигляді короткої анотації викладені основні завдання досліджень, показано зв'язок із науковими програмами, планами темами, відокремлена наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача.

Оцінка змісту дисертації

У *першому розділі* проаналізовано стан проблеми, фактори, що впливають на ефективність процесу використання енергії рекуперації в системах електричного транспорту, а також існуючі методи та засоби підвищення ефективності цього процесу, на основі чого сформульовано мету та задачі дослідження.

У *другому розділі* представлено результати експериментальних досліджень ефективності режимів рекуперації енергії в системах електричного транспорту, проаналізовані кількісні та якісні показники енергії рекуперації та фактори що впливають на них. Дослідження проводилися на ділянках Придніпровської та Львівської залізниць, Дніпровських метрополітені та міському електротранспорту. Отримані імовірнісні характеристики напруги шинах тягових підстанцій та струмоприймачах транспортних засобів в режимі рекуперації, досліджено вплив режимів живлячої мережі на ефективність споживання енергії рекуперації. Експериментально досліджено стрибки напруги в тяговій мережі і на струмоприймачах ЕРС при рекуперації, що дозволило використовувати похідну напруги на шинах тягових підстанцій в якості параметра ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі для забезпечення своєчасного спрацювання інверторів (накопичувачів) або регуляторів напруги на шинах постійного струму ТП раніше моменту спрацювання захисту на транспортному засобі за максимальною напругою і перемикання його на реостатне гальмування.

У *третьому розділі* проведено моделювання квазіусталених процесів струмоподілу енергії рекуперації в системах тягового і зовнішнього електропостачання, визначені основні критерії ефективності розподілу та втрати енергії рекуперації. Побудовані імітаційні моделі взаємодії транспортних засобів в режимі рекуперації з системою тягового електропостачання, що враховують існуючі обмеження щодо граничних значень напруги на струмоприймачах та гнучкість розподілу енергії для забезпечення заданих обмежень. Вдосконалено метод розрахунку систем тягового електропостачання в частині аналізу струмоподілу енергії рекуперації, що дозволяє обирати раціональні канали розподілу надлишкової енергії рекуперації за заданими критеріями ефективності та визначати вплив рекуперації на основні показники роботи СТЕ. На основі цього визначені раціональні режими роботи енергозберігаючого обладнання, а саме

глибина та швидкість розряду накопичувачів, вихідна потужність інверторів. Визначена ефективна зона рекуперації в функції коефіцієнта споживання, при якій забезпечується стійкий генераторний струм ЕРС при обмеженні максимальної напруги на струмоприймачі у всьому діапазоні значень коефіцієнта споживання енергії рекуперації.

У четвертому розділі розвинуті наукові принципи моделювання зони розподілу енергії рекуперації на основі математико-алгоритмічного конструктивізму та метод нейро-нечіткого управління режимами систем тягового електропостачання при рекуперації енергії. Розроблена методологія моделювання зони розподілу енергії рекуперації на основі математико-алгоритмічного конструктивізму, що дозволило поставити і запропонувати підходи до розв'язання декілька класів задач: раціонального розташування енергозберігаючого обладнання в тяговій мережі, вибору їх раціональних параметрів та алгоритмів управління. Запропоновано науковий метод раціонального (інтелектуального) управління розподілом енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту за енергетичним критерієм на основі експертних систем та нейро-нечіткої логіки, що дозволяє максимально використовувати потенціал енергозбереження в умовах неповної інформації про режими систем тягового і зовнішнього електропостачання. Запропоновано науковий принцип, що дозволяє в залежності від багатоваріантності структури системи тягового електропостачання та наповнення її відповідним енергозберігаючим обладнанням реалізовувати інтелектуальне управління режимами енергообміну накопичувачів, роботи інверторів та регуляторів вихідної напруги підстанції при рекуперації енергії.

У п'ятому розділі вдосконалено метод оцінки потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту за рахунок підвищенні ефективності використання енергії рекуперації та розроблені рекомендації по вдосконаленню системи обліку енергії рекуперації. Вдоскональний науковий метод оцінки потенціалу енергозбереження при використання рекуперації енергії в системах електрифікованого транспорту, де встановлено залежність потенціалу від коефіцієнта споживання енергії рекуперації в СТЕ, який є функцією поїздної ситуації на ділянці, напруги на шинах ТП, енергоємності приймачів надлишкової енергії. На основі цього пропонується виконувати науково обґрунтований вибір енергозберігаючих технологій для підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту та визначення їх техніко-економічної доцільності. Експериментально визначено теоретичний, технічно-реалізований та економічно-доцільний потенціал енергозбереження для Дніпропетровського метрополітену при існуючих і збільшених в перспективі розмірах руху, що склав відповідно 14...34 % (на підйомі 8 %) і 38...52 % у (на відповідному спуску) напрямках, тобто в середньому 26...43 % від електроспоживання на тягу поїздів, що практично узгоджується з теоретичними розрахунками.

У шостому розділі приведені практичні рекомендації щодо реалізації розроблених теоретичних положень дисертації, методів і технологій з підвищення

ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту. На основі виконаних досліджень запропоновані науково-обґрунтовані технології та методи підвищення ефективності використання енергії рекуперації, що полягають у виборі раціонального діапазону напруг на вводах тягових підстанцій, при яких доцільно повернення енергії в систему зовнішнього електропостачання, обґрунтування раціональних енергообмінних режимів роботи накопичувачів енергії, що дозволяють максимально використовувати їх встановлену потужність, принципи стабілізації вихідної потужності інверторів при роботі на живлячу мережу сумісно з накопичувачами, де останні виступають в якості стабілізатору вихідної потужності інверторів, регулювання вихідної напруги тягових підстанцій щодо забезпечення максимальних перетоків надлишкового струму рекуперації на суміжні міжпідстанційні зони до віддалених тягових навантажень, що дасть можливість збільшити обсяги рекуперації енергії на 10...15 %. В якості інструментарію для розробки відповідних рекомендацій виступають розроблені в програмні комплекси, що дозволяють навчати системи керування енергозберігаючим обладнанням в залежності від багатоваріантності структури системи тягового електропостачання на експертному рівні в умовах неповної інформації про режими систем тягового та зовнішнього електропостачання. В цілому розроблені в дисертації методи та принципи можуть бути використані в якості інструментарію для побудови Смарт Грід систем електрифікованого транспорту.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

В дисертаційній роботі коректно поставлені та кваліфіковано виконані експериментальні дослідження, розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує 5 %; дослідні результати одержано на основі великого обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики; більшу частину експериментальних даних одержано різними незалежними методами.

Повнота викладення в опублікованих працях основних наукових та прикладних результатів дисертаційної роботи

Основні положення дисертаційної роботи Сабліна Олега Ігоровича опубліковано у 21 основній праці, з них: 3 – статті в закордонних виданнях, що індексуються базою даних Scopus; 1 – монографія, 17 – статті у фахових виданнях України, і 26 додаткових, з них 2 – охоронні документи, 19 – тези доповідей та матеріали міжнародних наукових конференцій.

Оцінка структури дисертації, мови та стилю викладення

Представлена до захисту дисертаційна робота написана українською мовою, складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Повний обсяг дисертації становить 364 сторінок, серед них 120 рисунків за текстом, з них 13 рисунків розташовано на 7 окремих сторінках, 39 таблиць за текстом, список використаних джерел з 301 найменувань – на 36 сторінках, додатки – на 47 сторінках. Основний текст роботи викладено

на 277 сторінках. Мова та стиль достатньо зрозумілі, викладення матеріалу логічне та послідовне, не викликає заперечень та відповідають вимогам, що висуваються для подібного роду робіт.

Ідентичність змісту автореферату й основних положень дисертації

Матеріали викладені у відповідних розділах автореферату дають повне й цілісне уявлення про дисертацію й у повній мірі розкривають її зміст. Матеріали, викладені в авторефераті дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, свідчать про те, що результати наукових досліджень, за яким здобувач її захистив, не винесенні на захист докторської дисертації.

Основні зауваження до дисертаційної роботи

Оцінюючи в цілому дисертаційну роботу Сабліна О.І. позитивно, маю такі зауваження:

1. В першому розділі, на мою думку, не достатньо розглянуто закордонний досвід сучасних розробок з удосконалення та модернізації систем тягового електропостачання транспорту;
2. Доцільно було б провести моделювання стрибків напруги на струмоприймачах при увімкненні рекуперації на ділянках без тягового струмоспоживання, які були експериментально досліджені в другому розділі;
3. Не зрозуміло як використовувалися інтегральні показники графіків рекуперації (табл. 2.7, стор. 124) у подальшому матеріалі роботи;
4. В тексті дисертації доцільно було б більш детально описати блоки створеної імітаційної моделі (рис. 3.8, стор. 148);
5. В роботі відсутнє обґрунтування застосованого автором математичного апарату для реалізації нечіткого розподілу енергії рекуперації.
6. Із розроблених в четвертому розділі конструкційно-продукційного структур системи тягового електропостачання не зрозуміло як формується узагальнений раціональний алгоритм керування пристроями в залежності від багатоваріантності структури системи тягового електропостачання в умовах невизначеності її режимів;
7. Стор. 194, рис. 4.11 не зрозуміло як управляти величиною струмів накопичувача $I_{\text{рек}4}$ та інвертора $I_{\text{рек}5}$ при розподілі струму рекуперації поїзда.
8. Залежність величини коефіцієнта споживання енергії рекуперації від розглянутих факторів (вираз (5.12), стор. 216) в п'ятому розділі доцільно представити у вигляді рівняння регресії а не в чисельному вигляді для окремих енергозберігаючих технологій (табл. 5.1, стор. 217), оскільки не зрозуміло як дана величина в явному вигляді залежить від розглядуваних параметрів;
9. Не достатньо обґрунтовано використання вдосконаленого методу оцінки потенціалу енергозбереження при підвищенні ефективності використання енергії рекуперації для виконання техніко-економічної оцінки пропонованих в роботі енергозберігаючих технологій.

В роботі відсутні в явному вигляді підходи і методики до обґрунтування раціонального розташування енергозберігаючого обладнання та не зрозуміла

методика мінімізації їх встановленої потужності на основі використання розроблених нейро-нечітких алгоритмів керування обладнанням.

11. По тексту роботи мають місце помилки, неточності та описки, зустрічаються русизми, але їх кількість не перевищує допустимого рівня.

Загальний висновок

Зауваження, які наведені вище, не знижують якість роботи і не порушують основні її положення, не зменшують її наукову новизну та практичну цінність, а отже, й загальну високу оцінку.

Дисертаційна робота Сабліна Олега Ігоровича «Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту» є завершеним науковим дослідженням, зміст якого відповідає спеціальності 05.22.09 – електротранспорт. В дисертаційній роботі на основі результатів виконаних теоретичних і експериментальних досліджень вирішена важлива науково-прикладна проблема ефективності процесу рекуперації енергії в системах електрифікованого транспорту шляхом розробки наукових основ вибору раціональних енергоощадних технологій для реалізації максимального потенціалу енергозбереження при використанні режимів рекуперації на основі її раціонального розподілу між елементами систем тягового і зовнішнього електропостачання.

За актуальністю розглянутої проблеми, науковим рівнем, обсягом досліджень та практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567, а її автор, Саблін Олег Ігорович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри охорони праці
та безпеки життєдіяльності
Харківського національного університету
міського господарства ім. О. М. Бекетова,
доктор технічних наук, професор,

M.B. Хворост

« ____ » 2018 р.

Підпись	<i>Хворост М.Б.</i>
Засвідчує:	<i>КНВ</i>
від. калібрів	
	20



Ганник О.Б.

*1104-48/90
22.06.18*