

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ТА РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Вступ

Особливістю роботи енергосистем електрифікованого транспорту є різкозмінні повторно-короткочасні режими тягового електроспоживання транспортних засобів та можливість рекуперації енергії при їх електричному гальмуванні. Регулювання в широкому діапазоні режимів руху електротранспорту викликає значні пікові навантаження систем тягового і зовнішнього електропостачання та підвищує рівень втрат енергії в них.

Розвиток високоефективних силових напівпровідникових перетворювачів та накопичувачів енергії, а також швидкодіючих систем керування ними відкриває широкі можливості щодо суттєвого підвищення енергетичної ефективності систем електричної тяги. За рахунок використання надсучасних силових енергетичних пристроїв та одночасної розробки раціональних алгоритмів їх функціонування, адаптованих до особливостей режимів електротягових навантажень, стає можливим мінімізувати втрати енергії в елементах системи електричної тяги та практично повністю вирішити проблему споживання надлишкової енергії рекуперації.

Актуальність

Одним з ефективних напрямів підвищення ефективності режимів тягового електроспоживання і рекуперації енергії електротранспорту є часткове або повне розділення в часі цих процесів, що дозволяє знизити втрати в елементах системи тягового електропостачання і може бути реалізовано при використанні стаціонарних або бортових накопичувачів енергії. Однак високі вартісні показники даного заходу вимагають пошуку менш затратних методів підвищення енергоефективності режимів тягового електроспоживання та рекуперації енергії електротранспорту та розробки підходів до зниження встановленої потужності накопичувачів шляхом підвищення коефіцієнту їх використання за рахунок оптимального управління їх режимами, що є актуальним напрямом досліджень.

Мета роботи

Розробка удосконалених технологій електроспоживання та рекуперації енергії електротранспорту шляхом вирівнювання графіків електротягових навантажень та управління режимами енергообміну між накопичувачами і тяговою та живлячою мережами засобами нечіткої логіки.

Огляд літератури

Режим тягового електроспоживання $p(t)$ в системах електротранспорту залежить від багатьох факторів, зокрема необхідної швидкості руху, профіля ділянки колії, маси та напруги на струмоприймачі транспортних засобів та ін. і є стаціонарним квазіусталеним випадковим процесом (рис. 1), розмах, інтенсивність і частота коливань якого здійснює вплив на рівень втрат енергії в елементах електричної тяги.

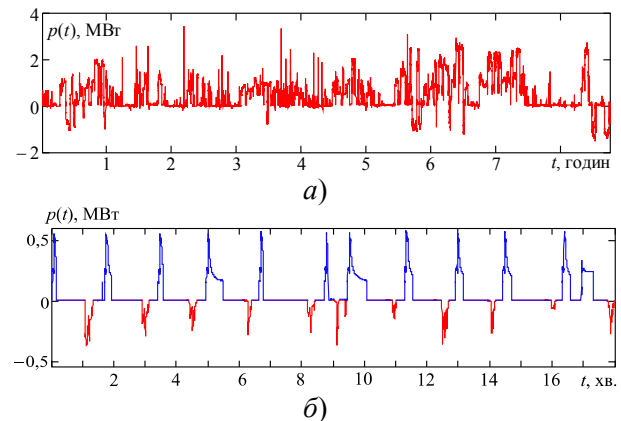


Рис. 1. Реалізації тягового електроспоживання електровозу ВЛ11М6 з вантажним поїздом (а) та електропоїзда метрополітену 81-717(714).5М (б) (рекуперація енергії при $p(t) < 0$)

В табл. 1 наведені основні імовірнісні характеристики процесу тягового електроспоживання транспортних засобів різних систем, що визначені в роботах [1-3] на базі дослідження множини реалізацій $\{p_n(t)\}$, отриманих в умовах реальної експлуатації.

Таблиця 1 – Основні імовірнісні характеристики електроспоживання тягового рухомого складу в різних системах електричного транспорту

Види транспортних засобів	m_p , МВт	σ_p , МВт	Mo_p , МВт	Me_p , МВт	As_p , від. од.	Ex_p , від. од.
Вантажні електровози	0,78	0,465	0,165	0,8	0,17	-1,07
Пасажирські електровози	0,595	0,576	0,32	0,565	0,93	0,03
Приміські електропоїзди	0,409	0,307	0,26	0,472	-0,01	-1,38
Швидкісні електропоїзди	0,724	0,375	0,144	0,575	0,83	-0,68
Міський транспорт (трамваї)	0,174	0,095	0,45	0,654	0,563	-1,23
Метрополітен	0,371	0,216	0,27	0,352	0,28	-1,85

Розподіл імовірності тягового електроспоживання має два виражені максимуми в області малих і середніх навантажень (рис. 2) що є характерним для всіх видів електричного транспорту. Це свідчить про недовикористання в експлуатації встановленої потужності тягового рухомого складу і його роботу в області понижених значень ККД.

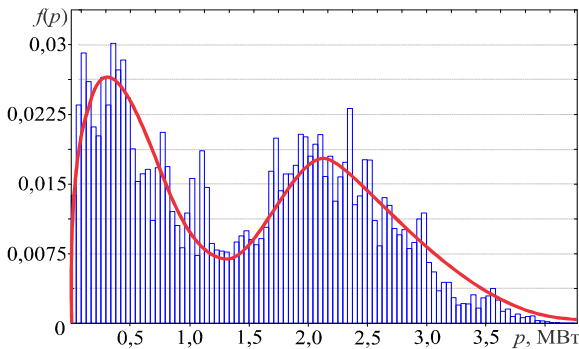


Рис. 2. Розподіл імовірності тягового електроспоживання вантажних електровозів

Кореляційні функції процесу $p(t)$ всіх видів електротранспорту мають незагасаючий коливальний характер (рис. 3), що властиво неергодичним випадковим процесам і пов'язано з наявністю в них схованої періодичності.

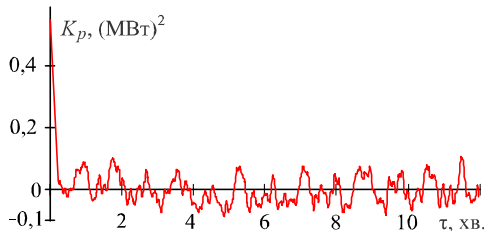
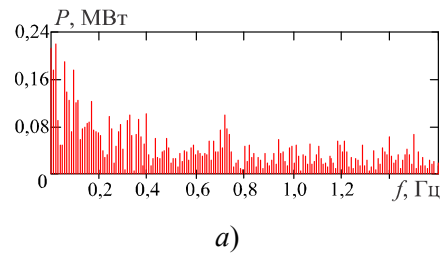


Рис. 3. Кореляційна функція тягового електроспоживання приміських електропоїздів ЕПЛ2Т

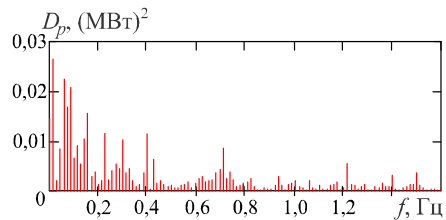
Для визначення періодичних коливань тягового електроспоживання в [4] застосовано перетворення Фур'є не до самого випадкового процесу $p(t)$, а до незагасаючої частини його

кореляційної функції $K_p(\tau)$ на інтервалі $\tau \in (\tau_k, T/5)$ (де τ_k – час кореляції, T – тривалість електроспоживання), що дозволило відфільтрувати періодичні коливання від власне випадкового процесу.

Спектри функцій $K_p(\tau)$ є прорідженими в порівнянні зі спектрами миттєвих графіків $p(t)$ (рис. 4) оскільки вільні від випадкової складової та вміщують у собі лише періодичні низькочастотні коливання процесу $p(t)$.



а)



б)

Рис. 4. Амплітудні спектри $p(t)$ (а) і $K_p(\tau)$ (б) приміських електропоїздів ЕПЛ2Т

Діапазон частот спектрів $p(t)$ і $K_p(\tau)$ в квазіусталених режимах електроспоживання транспортних засобів складає 0,001...1,5 Гц, а при регулюванні їх потужності – 0,1...10 Гц. Енергія періодичних коливань електроспоживання вантажних і пасажирських електровозів в квазіусталених режимах становить близько 15 % від усієї енергії випадкового процесу $p(t)$ та сягає 25 % для приміських електропоїздів, міського електротранспорту та метрополітенів, що

пов'язано з більш коливальним характером електроспоживання. Це необхідно враховувати при розробці заходів по зменшенню втрат в елементах системи електричної тяги.

Оцінка якості режимів тягового електроспоживання електротранспорту, що враховує вплив інтенсивності його коливань на рівень додаткових втрат в елементах системи електричної тяги у [5, 6] виконана з використанням таких показників, як пік-фактор pf та коефіцієнт форми k_ϕ процесу $p(t)$, що дорівнюють

$$pf = \frac{P_{\max}}{P_{\text{сеп}}} = P_{\max} / \left(\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \right),$$

$$k_\phi = \frac{P_d}{P_{\text{сеп}}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}{\left(\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \right)^2}},$$

де P_{\max} , $P_{\text{сеп}}$, P_d – відповідно максимальне, середнє та діюче значення споживаної потужності за графіком тягового навантаження $p(t)$.

Наприклад для вантажних електровозів ці показники знаходяться в межах $pf \in [1,4; 7,52]$, $k_\phi \in [1,15; 3,72]$ при $\overline{pf} = 2,57$, $\overline{k_\phi} = 1,61$. Залежність додаткових втрат в системі електричної тяги від параметрів тягового електроспоживання pf та k_ϕ має вигляд рівняння

$$\Delta P_{\text{дод}}(pf, k_\phi) = 0,175 \Delta P_{\text{мін}} (0,19 pf + 0,81 k_\phi^2 - 1),$$

де $\Delta P_{\text{мін}}$ – мінімальні втрати для передачі заданої потужності P .

Виходячи з показників pf та k_ϕ основним критерієм ефективності режиму тягового електроспоживання електротранспорту, що забезпечує $\Delta P_{\text{дод}} \rightarrow \min$ є умова

$$|p(t) - P_{\text{сеп}}|_{\max} \rightarrow \min, \quad (1)$$

при якій також мінімізується пікове навантаження систем тягового та зовнішнього електропостачання.

Основний матеріал

Коливання тягового навантаження в системах електричного транспорту виникають не лише при регулюванні потужності транспортних засобів, а і в усталених режимах руху (рис. 5), особливо якщо тягові засоби побудовані за дискретним принципом регулювання сили тяги. Наприклад, у наслідок існування неперекритої області регулювання (де відсутні природні характеристики) в полі тягових характеристик електровозів $F \times v$ у діапазоні технічних швидкостей залізничного

транспорту 35...55 км/год в усталеному режимі руху поїздів на послідовно-паралельному з'єднанні двигунів (СП) в певних умовах можливий дефіцит, а на паралельному (П) – надлишок потужності тягових засобів. В такому разі підтримання постійної швидкості поїздів (особливо неповновагових та на легких ділянках профілю) виконується за рахунок багаторазових переходів тягових засобів з вищих схем з'єднань тягових електродвигунів (ТЕД) на нижчі (рис. 5, б), що погіршує якість режимів електроспоживання та порушує умову (1).

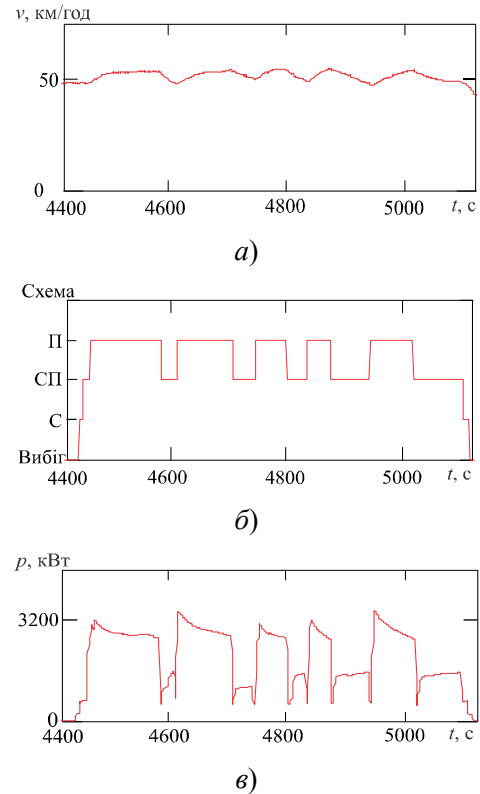


Рис. 5. Фрагмент реалізації швидкості руху (а), схеми з'єднання двигунів (б) і електроспоживання (в) електровоза ВЛ11Мб з вантажним поїздом

Зменшення втрат енергії в елементах системи електричної тяги та пікового навантаження систем електропостачання за рахунок зменшення надлишкової потужності тягових засобів може бути досягнуто за рахунок формування додаткових природних тягових характеристик в нерегульованій області потужності електровозів. Дані характеристики отримуються в усталеному режимі руху поїзда шляхом часткового вимикання груп двигунів на паралельному з'єднанні. В полі тягових характеристиках електровоза в результаті формуються додаткові природні характеристики $F'(v)$, а незаповнена область $F \times v$ частково заповнюється (рис. 6). При цьому залишені в роботі двигуни працюють в більш номіналь-

ному режимі, що може забезпечити їх більш високий експлуатаційний ККД.

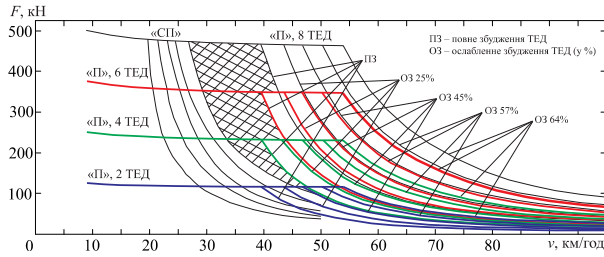


Рис. 6. Додаткові тягові характеристики електровоза ВЛ11М6

Енергоефективний режим електроспоживання електровоза при роботі на одній з двох рівних за потужністю тягових характеристиках (наприклад «П», 8 ТЕД, ОЗ 25% і «П», 6 ТЕД ОЗ 45% на рис. 6) може бути визначено на підставі порівняння ККД в цих режимах. Згідно електромеханічних характеристик в області допустимих струмів можна отримати, що $\eta(I)|_{OZ1} > \eta(I)|_{ПЗ}$, $\eta(I)|_{OZ2} > \eta(I)|_{OZ1}$ і т. д. в області більших струмів двигуна.

Математичне моделювання режимів електроспоживання електротранспорту з додатковими тяговими характеристиками дозволило встановити, що використання запропонованого принципу зниження надлишкової потужності тягових засобів в ustalених режимах руху не порушує умов зчеплення коліс тягових засобів з рейками та дозволяє вирівняти тягове навантаження і зменшити втрати енергії в системі тягового електропостачання на 20...25 %. Застосування даного принципу є ефективним, в тому числі для тягових засобів з плавним регулюванням потужності.

Треба зазначити, що ефект від використання розглянутих заходів полягає в першу чергу у зменшенні пікових навантажень систем тягового і зовнішнього електропостачання і втрат енергії в них. Можливості зниження на 1...5 % витрат енергії на тягу неповногазових поїздів, особливо на ділянках з легким профілем, при відключенні частини ТЕД тягового рухомого складу детально розглянуто в роботах професора Гетьмана Г.К. [7, 8].

В силу розглянутої специфіки режимів тягового електроспоживання в системах електротранспорту зберігається проблема споживання енергії рекуперації. Оскільки процес рекуперації енергії на транспорті переважно є короткочасним, що особливо виражено у приміському русі електропоїздів, на міському електротранспорті і метрополітенах, то при зниженні розмірів руху на ділянках практично унеможливу-

ється повторне використання відновленої енергії. Це вимагає розробки технологій підвищення ефективності використання енергії рекуперації поїздів в умовах зниження тягового електроспоживання на ділянках. Системний аналіз існуючих методів, а саме повернення енергії рекуперації в живлячу енергосистему, локалізація в системі електричної тяги накопичувачами енергії (НЕ) або шляхом оптимізації рівня вихідної напруги тягових підстанцій (ТП) та регулювання транспортного потоку поїздів виявив їх недостатню енергоефективність при окремому застосуванні, що змушує використовувати комплексний підхід для поєднання можливостей всіх методів.

Крім того, треба зазначити, що ефективність споживання надлишкової енергії рекуперації поїздів системою зовнішнього електропостачання (на приєднаннях 6, 35, 110 кВ) залежить від режимів нетягових споживачів у вузлах приєднання ТП системи тягового електропостачання [9], особливо коли енергосистема є недовантаженою. При підключенні суміжних інвертуючих ТП залізниць до ліній різного класу напруги можливим є нерівномірний розподіл завантаження суміжних ТП в режимі рекуперації, що збільшує втрати генерованої енергії в тягових мережах. В системах тяги постійного струму існують проблеми із забезпеченням необхідного рівня якості енергії рекуперації на виході інверторів згідно ГОСТ 13109-97, що передається до живлячої мережі [10].

Для забезпечення раціональних умов рекуперації електротранспорту в системі електричної тяги зі стаціонарними керованими НЕ і реверсивними ТП з плавним регулюванням вихідної напруги (рис. 7) необхідно вирішувати низку завдань з високим ступенем невизначеності, що вимагає врахування багатьох випадкових факторів, таких як режими живлячих мереж і тягових навантажень, які безпосередньо впливають на необхідні алгоритми управління роботою НЕ, інверторів і регуляторів.

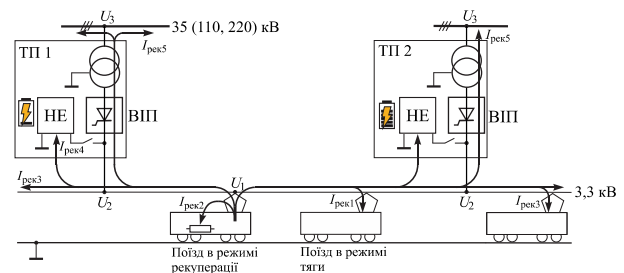


Рис. 7. Розподіл струму рекуперації в системі електротранспорту

На рис. 7 наведена схема декомпозиції струму рекуперації електротранспорту $I_{рек}$, де під надлишковим струмом розуміється частина струму $I_{рек}$, що не може бути використана безпосередньо на тягу інших поїздів, тобто

$$I_{рек}^{надл} = \sum_{k=2}^5 I_{рек k}, \quad (2)$$

де $I_{рек1}$ – частина струму рекуперації, що споживається на тягу; $I_{рек2}$ – частина струму рекуперації, що утилізується в гальмівних реостатах; $I_{рек3}$ – частина струму рекуперації, що перетікає на суміжні міжподстанційні зони (до віддалених поїздів); $I_{рек4}$ – частина струму рекуперації, що споживається НЕ; $I_{рек5}$ – частина струму рекуперації, що споживається живлячою мережею (через випрямно-інверторний перетворювач (ВІП) ТП).

Для мінімізації втрат енергії рекуперації необхідна мінімізація відстані до її потенційного споживача (поїзд, НЕ, живляча мережа) з урахуванням його ККД. Для цього формалізована та вирішена задача оптимізації розподілу надлишкової енергії рекуперації поїздів шляхом визначення раціонального співвідношення між значеннями складових струму (2) в реальному часі, що забезпечує виконання цільової функції

$$\left(\begin{array}{l} I_{рек2} \rightarrow 0, \\ \Delta P_{рек} (I_{рек3}(t), I_{рек4}(t), I_{рек5}(t)) \rightarrow \min \end{array} \right). \quad (3)$$

Враховуючи низький рівень інформаційного забезпечення систем тягового електропостачання для прийняття оперативних рішень згідно умови (3) можуть бути використані принципи нечіткого управління. Нечіткі закони регулювання режимів тягового електропостачання забезпечують підтримку напруги на струмоприймачах рекуперативних поїздів в допустимих межах при дефіциті тягового електроспоживання шляхом прийняття рішень про споживання енергії рекуперації НЕ (в залежності від їх заряду) або живлячою енергосистемою (в залежності від її завантаження), або забезпечення перетоків даної енергії на суміжні міжпідстанційні зони до віддалених поїздів (в залежності від їх положення на ділянці). При цьому можливе узгодження роботи НЕ в режимах вирівнювання пікового тягового навантаження і локальної буферизації надлишкової енергії рекуперації.

Пріоритетність розподілу надлишкової енергії рекуперації відповідно струмами $I_{рек3}$, $I_{рек4}$

або $I_{рек5}$. визначена в залежності від положення рекуперативного поїзда на ділянці. Алгоритм нечіткого управління режимами НЕ, ВІП та регуляторів вихідної напруги ТП в області допустимих значень розроблено з урахуванням умови (3) та обмежень напруги в тяговій мережі згідно [11, 12] у випадках коли $U_1 \rightarrow U_1^{max}$. Вхідними параметрами нечіткого регулятора є набір змінних (згідно рис. 7)

$$X = (E(t), I_1(t), U_1(t), U_2(t), U_3(t)),$$

де $E(t)$ – поточний заряд НЕ; I_1 – тягове електроспоживання в зоні рекуперації; $U_1(t)$ – напруга на струмоприймачі рекуперативного поїзда; $U_2(t)$ – напруга на виході ТП; $U_3(t)$ – напруга на вході ТП.

Параметрами управління нечіткого регулятора є змінні

$$Y = (I_{рек2}(t), I_{рек3}(t), I_{рек4}(t), I_{рек5}(t)).$$

Діапазон вхідних даних і параметрів управління задається п'ятьма нечіткими термами (низький, середньо-низький, середній, середньо-високий, високий) з трикутними функціями приналежності [13].

В роботі було створено модель нечіткого розподілу надлишкової енергії рекуперації, побудованої на базі п'яти блоків правил, структура якої наведена на рис. 8. Кожен блок правил використовує метод Мамдані для нечіткого виводу. Блоки зв'язані у вигляді послідовності для забезпечення покрокового прийняття рішення, за заданими пріоритетами. Вихід першого блоку служить входом для наступного, що дозволяє визначати необхідність розподілу залишку енергії за менш пріоритетними напрямками. Для останнього блоку виводу, служать входами всі попередні рішення, це дозволить визначити висновок тільки в тому випадку, якщо ще не було прийнято рішення.

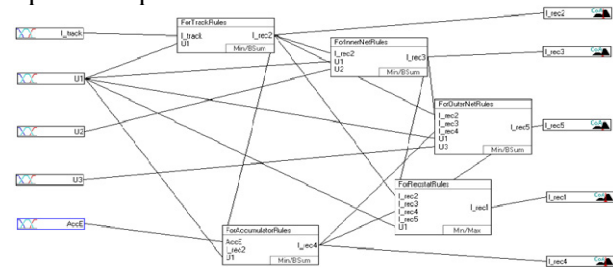


Рис. 8. Модель нечіткого регулятора розподілу енергії рекуперації

Для прийняття рішення про кількість енергії рекуперації, що передається до НЕ, вхідними параметрами є змінні $U_1(t)$ та $E(t)$, а виходом $I_{рек4}$. Знання експерта являють собою співвід-

ношення вигляду:

$$R = (U_1, E) \rightarrow I_{рек4},$$

де (U_1, E) – послідовність; $I_{рек4}$ – наслідок; \rightarrow – операція нечіткої імплікації.

Для кожного параметра відомі функції приналежності до нечітких термів, відповідно $\mu_{U_1}(x)$, $\mu_E(x)$ і $\mu_{I_{рек4}}(x)$. Ступінь приналежності конкретних входних значень (U_1, E) до кожного правила з експертної бази визначається за виразом:

$$\mu_{I_{рек4j}}(I_{рек4j}) = \mu_{Ej}(U_1) \wedge \mu_{I_{рек4j}}(E),$$

де $j = 1..n$ – номер правила; \wedge – операція логічного мінімуму.

В результаті отримуємо наступну нечітку множини

$$I_{рек4} = \bigvee_{j=1..n} \mu_{I_{рек4j}}(I_{рек4j}),$$

де \bigvee – операція логічного максимуму.

Точне значення параметрів змінної $I_{рек4}$ визначається як середньозважена сума

$$I_{рек4} = \frac{\sum_{j=1..n} \mu_{I_{рек4j}}(I_{рек4j}) I_{рек4j}}{\sum_{j=1..n} \mu_{I_{рек4j}}(I_{рек4j})}.$$

Для визначення чітких значень вихідних величин у роботі було використано метод дефазифікації «Center of Area» (центр площі). В результаті перебору безлічі варіантів різних входних станів моделі отримано простри прийняття рішень щодо розподілу енергії рекуперації електротранспорту по всіх можливих напрямках, геометричною інтерпретацією яких у певних умовах є поверхні, одна з яких наведена на рис. 9.

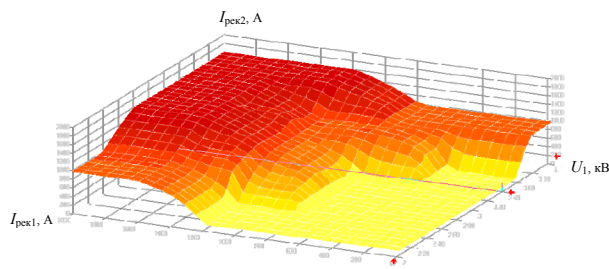


Рис. 9. Область прийняття рішень для залежності $I_{рек2} = f(I_{рек1}, U_1)$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Саблін, О. І. Підвищення ефективності електропостачання електрорухомого складу постійного струму [Текст]: арф. дис... к.т.н.: 05.22.09 / О. І. Саблін. – ДНУЗТ. Д., 2009. – 21 с.
2. Шевлюгин, М. В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии [Текст]: арф. дис... д.т.н.:

Дані залежності відображають необхідні алгоритми керування силовим обладнанням ТП у реальному часі залежно від поточного стану тягової і живлячої енергосистем (а саме рівня тягового навантаження в зоні рекуперації, заряду НЕ, напруги на вводах ТП).

Розроблені алгоритми нечіткого управління дозволяють приймати оперативні рішення про раціональний розподіл надлишкової енергії рекуперації в умовах неповної інформації та є основою інтелектуального регулювання режимів тягового електропостачання при рекуперації енергії транспортних засобів.

Висновки

Зменшення надлишкової потужності тягових засобів шляхом оптимізації потрібної кількості їх двигунів (при частковому вимиканні двигунів на паралельному з'єднанні) дозволяє розширити регульовальні властивості транспортних засобів в діапазоні технічних швидкостей. В такому випадку при електропостачанні тягових засобів в ustalених режимах руху можливим є на 20...25 % зменшити пікові тягові навантаження та втрати енергії в системах тягового і зовнішнього електропостачання залізниць.

Розроблений алгоритм управління накопичувачами енергії, інверторами та регуляторами вихідної напруги тягових підстанцій на базі нечіткої логіки забезпечує необхідні умови рекуперації електротранспорту на ділянках при дефіциті тягового електропостачання та дозволяє оптимізувати розподіл надлишкової енергії гальмування транспортних засобів шляхом визначення раціонального співвідношення між складовими надлишкового струму рекуперації в реальному часі, що забезпечує мінімум втрат рекуперативної енергії в системах тягового та зовнішнього електропостачання. Використання цього алгоритму є ефективним в умовах неповної інформації та дозволяє мінімізувати встановлену потужність накопичувачів, інверторів та регуляторів вихідної напруги тягових підстанцій, що зменшує капітальні витрати на модернізацію існуючих та електрифікацію нових ділянок систем електротранспорту.

REFERENCES

1. Sablin, O. I. Pdivy'shshennya efekty'vnosti elektrospozhy'vannya elektroruxomogo skladu postijnogo strumu [Tekst]: aref. dy's... k.t.n.: 05.22.09 / O. I. Sablin. – DNUZT. D., 2009. – 21 s.
2. Shevlyugin, M. V. Resurso- i energosberegayushchie tehnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenah, realizuemyie s ispolzovaniem nakopiteley energii

05.14.02 / М. В. Шевлюгин. – МГУПС. Москва, 2014. – 49 с.

3. Павелчик, М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии [Текст]: автореф. дис... д.т.н.: 05.09.03, 05.22.09 / М. Павелчик. – МГУПС. Москва, 2000. – 48 с.

4. Саблін, О. І. Спектральний аналіз випадкових функцій тягового току і напруги на токоприемнику електроподвижного складу / О. І. Саблін // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – № 15. – С. 41-47.

5. Саблін, О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О. І. Саблін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 9-13.

6. Саблін, О. І. Аналіз якості рекуперованої електроенергії в системі електричного транспорту / О. І. Саблін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – Вип. 38. – С. 186-189.

7. Гетьман, Г. К. О расчетном определении экономии электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей электроподвижного состава / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 4. – С. 51-54.

8. Гетьман, Г. К. О возможности снижения расхода электроэнергии на тягу карьерных поездов за счет частичного отключения части тяговых двигателей / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Електрифікація транспорту. – 2015. – № 10. – С. 49-58.

9. Саблін, О. І. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О. І. Саблін, Д. О. Босий, В. Г. Кузнецов та ін. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 73-79.

10. Костін, Н. А. Якість електроенергії, рекуперованої електровозами VL11M6 і VL11M / Н. А. Костін, А. Н. Муха, А. В. Нікітенко // Електрифікація транспорту. – 2015. – № 10. – С. 108-116.

11. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75 – [Действует с 1977-01-01] – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 3 с.

12. Напряжение питания тяговых железнодорожных сетей: Стандарт NF EN 50163-1996 – [Действует с 01.11.1996]. МКС 29.280, 1995. – 11 с.

13. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MathLab и FuzzyTech / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

[Текст]: avtoref. dis... д.т.н.: 05.14.02 / М. В. Shevlyugin. – MGUPS. Moskva, 2014. – 49 s.

3. Pavelchik, M. Povyishenie effektivnosti elektricheskoy tyagi pri pomoschi nakopiteley energii [Tekst]: avtoref. dis... д.т.н.: 05.09.03, 05.22.09 / M. Pavelchik. – MGUPS. Moskva, 2000. – 48 s.

4. Sablin, O. I. Spektral'nyj analyz sluchajnykh funkcyj tyagovogo toka y`napryazheniya na tokopry'emny`ke elektropodvy`zhnogo sostava / O. I. Sablin // Visny`k Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universy`tetu zalizny`chnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana. – 2007. – # 15. – S. 41-47.

5. Sablin, O. I. Doslidzhennya effektivnosti protsesu rekuperatsiyi elektroenergiyi v umovah metropolitenu / O. I. Sablin // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tehnologiy. – 2014. – # 6/8 (72). – S. 9-13.

6. Sablin, O. I. Analiz kachestva rekuperiruemoy elektroenergiyi v sisteme elektricheskogo transporta / O. I. Sablin // Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». – 2013. – Vip. 38. – S. 186-189.

7. Getman, G. K. O raschetnom opredelenii ekonomii elektroenergiyi pri chastichnom otklyuchenii tyagovykh dvigateley elektropodvizhnogo sostava / G. K. Getman, V. E. Vasil'ev // Zaliznichniy transport Ukraini. – 2011. – # 4. – S. 51-54.

8. Getman, G. K. O vozmozhnosti snizheniya rashoda elektroenergiyi na tyagu karernykh poezdov za schet chastichnogo otklyucheniya chasti tyagovykh dvigateley / G. K. Getman, V. E. Vasil'ev // Elektrifikatsiya transportu. – 2015. – # 10. – S. 49-58.

9. Sablin, O. I. Efektyvnist` rekuperatsiyi elektroenergiyi v sy`stemi elektротранспорту z invertornymi tyagovymi pidstanciyami postojnogo strumu / O. I. Sablin, D. O. Bosy`j, V. G. Kuznecov ta in. // Visny`k Vinny`cz'kogo politexnicnogo insty`tutu. – 2016. – # 2. – S. 73-79.

10. Kostin, N. A. Yakist elektroenergiyi, rekuperovanoi elektrovozami VL11M6 i VL11M / N. A. Kostin, A. N. Muha, A. V. Nskstenko // Elektrifikatsiya transportu. – 2015. – # 10. – S. 108-116.

11. Transport elektrifikatsirovannyi s pitaniem ot kontaktnoy seti. Ryad napryazheniy: GOST 6962-75 – [Deystvuet s 1977-01-01] – M.: Izd-vo standartov, 1976. – 3 s.

12. Napryazhenie pitaniya tyagovykh zheleznodorozhnykh setey: Standart NF EN 50163-1996 – [Deystvuet s 01.11.1996]. MKS 29.280, 1995. – 11 s.

13. Leonenkov, A. V. Nechetkoe modelirovaniye v srede MathLab y` FuzzyTech / A. V. Leonenkov. – SPb.: BVXV-Peterburg, 2005. – 736 s.

Надійшла до друку 17.02.2016.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

Розробка дієвих заходів з підвищення ефективності режимів тягового електроспоживання і рекуперації енергії в системі електричної тяги є важливим елементом зниження енергоємності електротранспорту та собівартості перевезень ним, що є актуальним в умовах стрімкого зростання цін на енергоносії. Одним з

ефективних заходів в цьому напрямку є часткове або повне розділення в часі процесів електроспоживання і рекуперації енергії електротранспорту, що дозволяє знизити втрати в елементах систем тягового і зовнішнього електропостачання і може бути реалізовано при використанні стаціонарних або бортових накопичувачів енергії. Високі вартісні показники даного заходу вимагають пошуку менш затратних методів підвищення енергоефективності режимів тягового електроспоживання та рекуперації енергії електротранспорту та розробки підходів до зниження встановленої потужності накопичувачів шляхом підвищення коефіцієнту їх використання за рахунок оптимального управління режимами енергообміну між ними, тяговою і живлячою мережами.

Ключові слова: рекуперація, тягове електроспоживання, надлишкова потужність, втрати енергії, накопичувачі, інвертори, тягове та зовнішнє електропостачання, нечітке управління.

УДК 621.331.3

О. И. САБЛИН (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 49010, м. Днепропетровск, ул. Лазаряна, 2, тел. (056) 793-19-11, эл. почта: olegsss@i.ua

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ И РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Разработка действенных мер по повышению эффективности режимов тягового электропотребления и рекуперации энергии в системе электрической тяги является важным элементом снижения энергоемкости электротранспорта и себестоимости перевозок им, что является актуальным в условиях стремительного роста цен на энергоносители. Одним из эффективных мероприятий в этом направлении является частичное или полное разделение во времени процессов электропотребления и рекуперации энергии электротранспорта, что позволяет снизить потери в элементах систем тягового и внешнего электроснабжения и может быть реализовано при использовании стационарных или бортовых накопителей энергии. Высокие стоимостные показатели данного мероприятия требуют поиска менее затратных методов повышения энергоэффективности режимов тягового электропотребления и рекуперации энергии электротранспорта и разработки подходов к снижению установленной мощности накопителей путем повышения коэффициента их использования за счет оптимального управления режимами энергообмена между ними, тяговой и питающей сетями.

Ключевые слова: рекуперация, тяговое электропотребление, избыточная мощность, потери энергии, накопители, инверторы, тяговое и внешнее электроснабжение, нечеткое управление.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Андриенко П. Д.*

UDC 621.331.3

O. I. SABLIN (DNURT)

Dnipropetrovsk national University of railway transport named after academician V. Lazaryan, 49010, Dnepropetrovsk, M., Lazaryan str., 2, tel (056) 793-19-11, e-mail: olegsss@i.ua

OPTIMIZATION OF THE MODES OF TRACTION POWER CONSUMPTION AND ENERGY RECUPERATION IN SYSTEMS OF ELECTRIC TRANSPORT

Development of effective measures to enhance the effectiveness of the modes of traction power consumption and energy recovery in the system of electric traction is an important element in reducing the energy intensity of electric transport systems and the cost of transportation that is relevant in the context of soaring energy prices. One of the most effective measures in this direction is the partial or complete separation in time of the processes of consumption and energy recovery of electric vehicles, what allows to reduce losses in the elements of systems of traction and external electric supply and can be implemented using stationary or onboard energy storage. High values of this event requires us to find less costly methods to increase efficiency of the modes of traction power consumption and energy recovery electro transport and develop approaches to reduce the installed capacity of disk drives by increasing utilization at the expense of optimum control of modes of energy exchange between them, traction and power supply networks.

Keywords: recovery, traction electricity consumption, excess capacity, loss of energy, drives, inverters, traction and power supply, fuzzy control.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Andrienko P. D.*