

*Нікітенко А.В., Костін М.О., д-р техн. наук,  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка  
В. Лазаряна (Дніпропетровськ, Україна)*

## Збільшення об'єму рекуперованої електроенергії на електропоїздах постійного струму

**Ключові слова:** рекуперація, електроенергія, електропоїзди, опір руху, ємнісний накопичувач, бортова система, швидкість, імпульсне регулювання, зарядний струм.

### Вступ та постановка проблеми

Ця робота є продовженням і розвитком досліджень [1] по підвищенню електроенергетичної ефективності режимів рекуперативного гальмування електрорухомого складу (ЕРС) постійного струму.

Одним із недоліків схемотехніки і режимів рекуперативного гальмування (РГ) діючих електропоїздів ЕР2Т і ЕПЛ2Т є вузький діапазон швидкостей, при якому реально здійснюється рекуперація [2, 3]. Це підтверджується результатами моніторингу, виконаного нами, значень швидкостей початку  $V_n$  і кінця (закінчення)  $V_k$  рекуперації електропоїзда ЕПЛ2Т на ряді ділянок Придніпровської залізниці (рис. 1, 2).

Із цих рис. випливає, що найменша швидкість закінчення РГ 50-46 км/год, а найімовірніший діапазон швидкостей ( $V_n - V_k$ ) становить приблизно 80-50 км/год. Зазначене обумовлено тим, що система керування електропоїздом при досягненні струму збудження обмоток головних полюсів тягових електродвигунів (ТЕД) 250 А і швидкості 50-45 км/год переводить силову схему на режим реостатного гальмування. Останнє, у свою чергу, обумовлено тим, що у цьому режимі ТЕД працюють з повним магнітним полем і  $C_e \Phi = 17,25 \text{ В} \cdot \text{год/км}$ , що при-

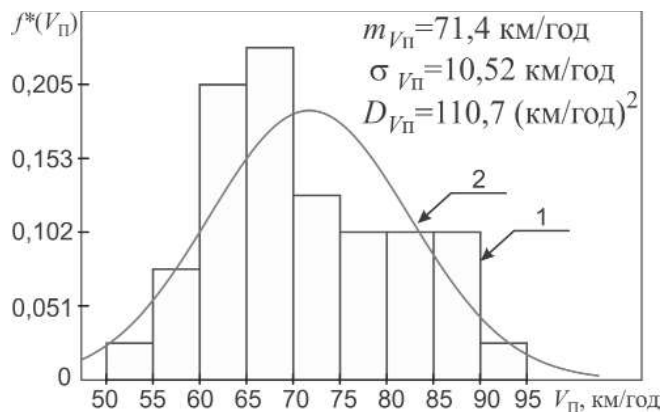


Рис. 1 – Статистичний (1) та теоретичний (2) розподіли початкової швидкості  $V_n$  рекуперативного гальмування електропоїзда ЕПЛ2Т

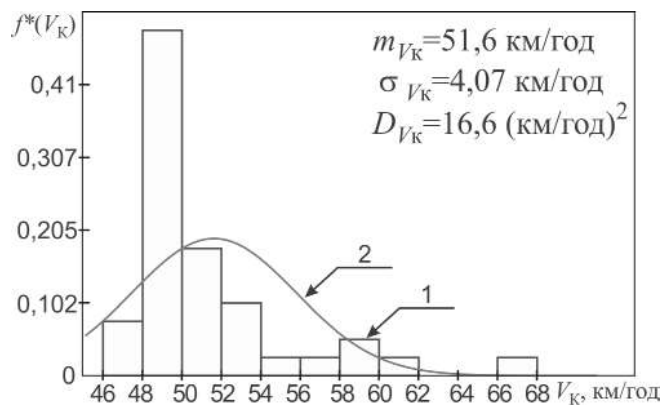


Рис. 2 – Статистичний (1) та теоретичний (2) розподіли кінцевої швидкості  $V_k$  рекуперативного гальмування електропоїзда ЕПЛ2Т

зводить до того, що при  $V < 45$  км/год сумарна е.р.с. якорів ( $4E_a$ ) чотирьох послідовно з'єднаних ТЕД не перевищує 2700-2800 В. З урахуванням спаду напруги в силовому колі 4-х ТЕД цих значень сумарної е.р.с. недостатньо для здійснення РГ, оскільки напруга в контактній мережі нормально можлива в діапазоні 2700-4000 В. Отже, цей недолік режимів РГ пов'язаний з тим, що рекуперуємий електропоїзд неавтономний відносно контактної мережі, тобто залежить від системи тягового електропостачання. Істотно, що зазначений вузький швидкісний діапазон РГ обмежує можливості повного використання кінетичної енергії електропоїзда при його гальмуванні. Крім цього, зазначимо, що в існуючих електропоїздах РГ здійснюється при незалежному збудженні ТЕД, що вимагає наявності спеціального статичного перетворювача.

За нашою думкою, розв'язання цієї проблеми, тобто розширення інтервалу швидкостей рекуперації й тим самим збільшення об'єму рекуперованої електроенергії, можливо шляхом здійснення режимів комбінованої (гібридної) рекуперації на основі бортової системи ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) і імпульсного регулювання напруги на ТЕД.

#### **Аналіз останніх публікацій з проблеми, що вирішується**

Наукові публікації останніх років з бортових систем ЄНЕ, що базуються на суперконденсаторах (конденсаторах подвійного електричного шару (КПЕШ)), стосуються лише міського електричного транспорту і в деяких випадках метрополітену.

Зокрема, найбільш ґрунтовні дослідження, практичні розробки і їх впровадження здійснено в Німеччині фірмою *Bombardier* на трамваях [4, 5]. В місті Гельдерберг з 2009 р. експлуатуються 19 трамваїв, обладнаних ЄНЕ типу «MITRAC ES500». Три блоки з КПЕШ, що встановлено на дахах кожного вагону, накопичують до 3 кВт•год рекуперованої електроенергії. Наявність бортової системи ЄНЕ дозволяє досягти економії електроенергії до 30 %.

В Швейцарії, в місті Женева з 2011 р. здійснюється дослідна експлуатація 32 трамвайних складів моделі «Tango» з бортовими ЄНЕ типу «Supercap» [6].

Провідні вагонобудівні компанії *Alstom*, *Kawasaki*, *CAF*, *Siemens* теж розпочали розробку і виготовлення трамвайних складів з бортовими енергетичними джерелами (акумуляторами) [7].

У Франції в місті Парижі в 2009 р. пройшли випробування швидкісного трамвая типу *Alstom Citadis* з бортовими суперконденсаторами [8].

В [9 і 10] розглядаються питання можливості розташування ЄНЕ фірми *Ecos* на тролейбусах типу *ЗиУ-682г*, що експлуатуються в місті Новосибірськ (Росія).

В Англії [11] і в Росії [12, 13] ведуться поки що лише дослідження по використанню суперконденсаторів в системі рекуперації поїздів метрополітену.

В проаналізованих публікаціях, зокрема по трамваям і тролейбусам, розглядаються питання використання накопиченої рекуперованої електроенергії при зрушенні рухомого складу з місця, при його прискоренні і при проїзді колійних ділянок без контактного проводу. Питання ж розширення швидкісного діапазону рекуперації й тим самим збільшення об'єму енергії рекуперації не ставилось. Певно, для

електрорухомого складу міського транспорту воно або неважливе, або зовсім не стоїть. Інша справа електропоїзди і в цьому сенсі, за нашою думкою, існує лише одна робота [14], в якій автор пропонує підвищити енергетичну ефективність режиму РГ електропоїздів *ЭД4М* шляхом розробки імпульсної системи регулювання напруги на ТЕД з віддачею енергії рекуперації ємнісному накопичувачу на основі іоністорів типу *30ЕК303U*, що дозволяє розширити інтервал швидкостей рекуперації. Однак в режимі РГ до  $V = 50$  км/год автор пропонує здійснювати класичну рекуперацію, яка має, як зазначено в [1], суттєві недоліки і до того ж складні схемотехнічні рішення, які зв'язані з системою незалежного збудження ТЕД.

**Мета роботи** – збільшення об'єму рекуперованої електроенергії на електропоїздах постійного струму шляхом розширення їх швидкісного діапазону рекуперації на основі розробки бортової, з ємнісним накопичувачем, імпульсної системи регулювання напруги на тягових двигунах.

#### **Результати теоретичних і експериментальних досліджень та їх аналіз**

##### 1. Сутність комбінованого методу рекуперації.

На рис. 3 представлена запропонована нами схема силових кіл моторного вагону електропоїзда постійного струму в режимі РГ і тяги, де «*n*» – кількість послідовно з'єднаних ТЕД (позначення інших елементів в схемі подаються при її описанні).

Принцип роботи схеми полягає в наступному.

При перемиканнях, зв'язаних з переходом електропоїзда від тягового режиму до гальмівного рекуперативного, магнітні системи ТЕД розмагнічуються до залишкової індукції, що складає лише 2...3% від номінальної. І тому на початку режиму рекуперації в обмотках якорів ТЕД індуктується невелика залишкова е.р.с., яка не в змозі створити необхідний за величиною зарядний струм. В зв'язку з цим і відсутністю незалежного збудження ТЕД (рис. 3) перехід ТЕД від режиму тяги до режиму повноцінної рекуперації здійснюється не миттєво, а через протікання так званої початкової стадії, під якою розуміється період самозбудження ТЕД з одночасним повільним зростанням е.р.с. і струму їх якорів, однак ще при відсутності процесу передачі рекуперованої електроенергії в ємнісний накопичувач. І в теоретичному, і в практичному відношенні ця початкова стадія важлива також ще й тому, що її

тривалість свідчить про термін готовності і швидкодію гальмівної системи електрорухомого складу. Тривалість процесу початкового самозбудження залежить від величини початкової (високої чи середньої) швидкості  $V_n$  гальмування і величини залишкової е.р.с.  $E_{я0}$  якорів ТЕД, яка також визначається залишковим намагнічуванням  $\Phi_0$  остовів ТЕД, бо  $E_{я0} = C_e \cdot \Phi \cdot V_n$ .

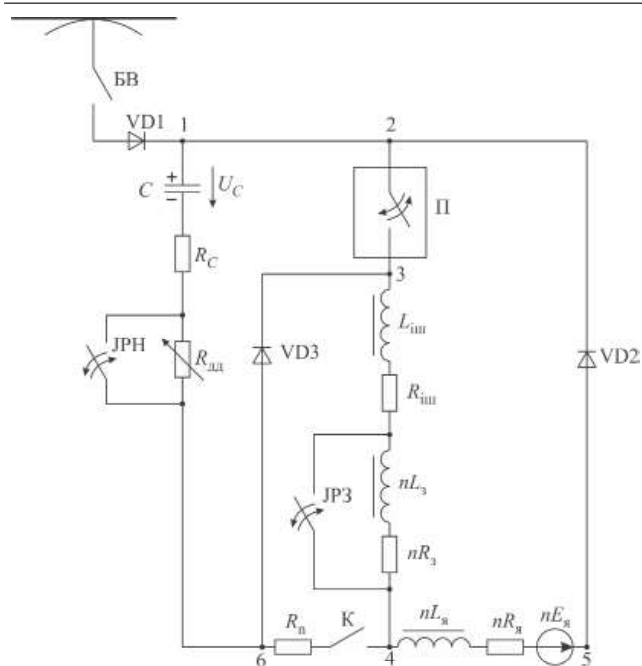


Рис. 3 – Схема силових кіл бортової системи ємнісного накопичувача рекуперованої електроенергії електропоїзда

Для здійснення процесу самозбудження виконується реверсування обмоток якорів ТЕД і вмикається імпульсний регулятор (переривач) П (рис. 3), тим самим створюється коло самозбудження 2-3-4-5-VD2-2 для протікання струму через обмотки збудження (ОЗ) ТЕД. Однак поки що (на початку) струм по цьому колу не протікає, оскільки, по-перше, ємність накопичувача (внаслідок залишкової енергії, енергії «мертвого» об'єму [15]) має початкову напругу  $U_{c0}$ , яка перевищує сумарну початкову («залишкову») е.р.с.  $nE_{я0}$  якорів двигунів і, по-друге, катод напівпровідникового діода VD2 має потенціал «+», створений ємністю  $C$ , і тому він закритий. У зв'язку з цим далі застосовується форсування (зменшення терміну часу) процесу самозбудження шляхом підмагнічування ТЕД від ємності  $C$  накопичувача. Для цього вмикається контактор  $K$  та імпульсний регулятор JPH. В результаті

створюється коло 1-2-3-4- $K$ - $R_n$ -6-JPH- $R_c$ - $C$ -1, (при цьому резистор  $R_n$  після самозбудження вимикається). Рівняння цього режиму має вигляд:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R_{\Sigma} \cdot du_C}{L_{\Sigma} \cdot dt} + \frac{1}{L_{\Sigma} \cdot C_{\Sigma}} \cdot u_C(t) = E_{\Gamma}(t), \quad (1)$$

де  $R_{\Sigma} = R_c + R_{\partial\partial} + 4 \cdot R_{\partial\partial} + R_{iIII}$ ;

$L_{\Sigma} = 4 \cdot (L_{я} + L_{O3} + L_{\partial n}) + L_{iIII}$ .

В цій фазі ємність розряджається, а е.р.с. якорів  $E_{\Gamma}$  збільшується за рахунок протікання розрядного струму по обмоткам збудження, тобто внаслідок підмагнічування. Одна із початкових умов рівняння (1) однозначна:  $i(0) = C \frac{du_C}{dt} \Big|_{t=0} = 0$ , а друга  $u_C(0) = U_{c0}$ , де  $U_{c0}$  може вибиратись довільно. Вона визначається глибиною розряду ЄНЕ і різні дослідники вважають по різному: ця глибина розряду може складати від 50 до 75% від кінцевої напруги [15]. Протікання струму по цьому колу, а отже і по ОЗ ТЕД, форсує підмагнічування ТЕД, що обумовлює зростання сумарної е.р.с.  $nE_{я0}$  ТЕД. Остання стає більшою, ніж  $U_{c0}$  ( $nE_{я0} > U_{c0}$ ), діод VD2 відкривається і по раніше зібраному колу 2-3-4-5-VD2-2 (колу самозбудження) починає протікати гальмівний струм ТЕД, який зростає по мірі підсилення намагнічування системи ТЕД згідно рівняння:

$$(R_{дв} + R_{iIII}) \cdot i(t) + (L_{дв} + L_{iIII}) \cdot \frac{di}{dt} = E_{\Gamma}(t), \quad (2)$$

при початковій умові  $i(0) = \frac{E_{\Gamma}}{R_{дв} + R_{iIII} + R_c + R_{дл}}$ .

Розв'язок рівняння (2) має вигляд

$$i(t) = \frac{E_{\Gamma}(t)}{R_{дв} + R_{iIII}} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

В результаті  $E_{\Gamma}$  зростає до максимального значення ( $nE_{яmax}$ ). Після цього початкову стадію РГ, стадію самозбудження, можна вважати закінченою.

Далі переривач П вимикається і попереднє коло (2-3-4-5-VD2-2) струму гальмування (але ще не зарядного) переривається. І тепер гальмівний струм під дією е.р.с.  $nE_{яmax}$  починає протікати уже по новому колу 5-VD2-2-1- $C$ - $R_c$ -JPH-6-VD3-3-4-5. Цей гальмівний рекуперативний струм і заряджає ємність  $C$  накопичувача.

У подальшому процес заряджання здійснюється в два етапи в залежності від величини швидкості руху ЕРС.

Перший етап – зона високих швидкостей.

Щоб в зоні від високих до середніх швидкостей е.р.с. якоря ( $E_{я} = C_e \cdot \Phi \cdot V$ ) не перевищувала допустимої напруги на колекторі ТЕД, необхідно щоб останні працювали з ослабленим магнітним потоком (на лінійній ділянці кривої намагнічування  $C_e \cdot \Phi(I_3)$ ); тому, потік  $\Phi$  треба регулювати. По-друге, по мірі зниження швидкості підтримку на заданому рівні величини  $nE_{яmax}$  теж треба здійснювати регулюванням (збільшенням) величини  $C_e \cdot \Phi$ . Останнє в зазначеній вище зоні швидкостей регулювання збудження ТЕД виконується за допомогою імпульсного регулятора збудження JPЗ струму і тому  $E_{я} = const = E_{яmax}$  (рис. 3). Одночасно, підтримка гальмівного зарядного струму на рівні заданої уставки здійснюється виводом опору резистора  $R_{од}$  імпульсним регулятором JPH (рис. 3). Рівняння режиму цього етапу:

$$u_C(t) + R_{\Sigma} \cdot i(t) + R_{дл}(t) \cdot i(t) + L_{\Sigma} \frac{di}{dt} = n \cdot E_{я.маx}, \quad (3)$$

а через  $U_C(t)$ :

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R_{\Sigma} + R_{дл}(t)}{L_{\Sigma}} \cdot \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{L_{\Sigma} \cdot C} \cdot u_C(t) = n \cdot E_{я.маx} \cdot (4)$$

Другий етап – зона середніх і низьких швидкостей.

В зоні середніх і низьких швидкостей зарядження починається при виході магнітної системи ТЕД на характеристику повного магнітного поля (на ділянці насичення характеристики  $C_e \cdot \Phi(I_3)$ ). Оскільки на цій ділянці  $C_e \cdot \Phi \approx const$ , а швидкість зменшується за лінійним законом, то  $E_{я}$  також спадає за таким же законом:

$$E_{я}(t) = E_{я.маx} - \frac{E_{я.маx} - E_{я.мін}}{t_{пн}} \cdot t,$$

де  $t_{пн}$  – тривалість РГ при роботі ТЕД з повним магнітним полем.

На цьому етапі імпульсний регулятор JPЗ не діє і тому його вимикають, а гальмівний струм підтримується на рівні уставки регулятором JPH шляхом подальшого виводу опору резистора  $R_{од}$ . При цьому в початковий термін етапу ємність  $C$  накопичувача заряджається повним струмом силового кола доти, поки е.р.с.  $E_{г}$ , що зменшується, не урівноважить зростаючу до  $U_{c2}$  напругу накопичувача з урахуванням спаду напруги на  $R_{\Sigma}$  силового кола ТЕД:

$$E_{я}(t_x) = U_{C2} + R_{\Sigma} \cdot I_{г}, \quad (5)$$

де  $t_x$  – тривалість процесу зарядження.

При такій умові подальше зарядження ЄНЕ повним гальмівним струмом силового кола на рівні уставки уже не може бути забезпечене. Подальше зарядження, згідно з дещо спрощеною схемою РГ (рис. 4), повинно здійснюватись шляхом імпульсної передачі енергії через індуктивні елементи силового кола.

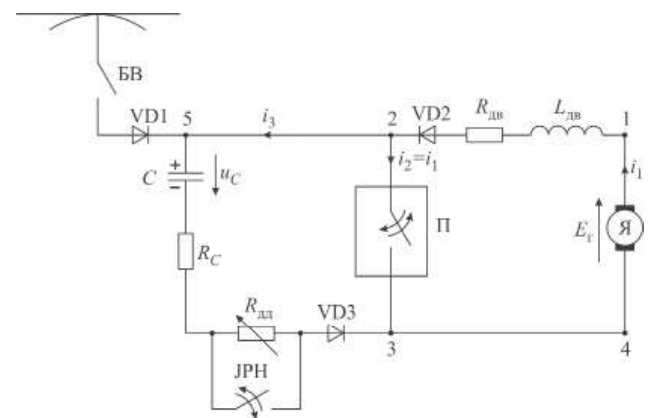


Рис. 4 – Схема імпульсної передачі рекуперованої електроенергії ємнісному накопичувачу

Для цього необхідно задати імпульсний періодичний режим роботи імпульсного регулятора П, починаючи з мінімального значення коефіцієнта заповнення його імпульсного циклу. Переривач (імпульсний регулятор) П короткочасно вмикається й тим самим закорочує силові кола ТЕД по колу 2-3-4-1-2. За цей термін часу при протіканні зростаючого гальмівного струму в індуктивностях  $L_{дв}$  силового кола ТЕД накопичується енергія. Через деякий час регулятор П вимикається і гальмівний зарядний струм протікає під дією  $nE_{яmax}$  і накопиченої електроенергії по колу (рис. 4): 2-5-3-4-1-2. Напруга на ємності  $C$  зростає, а гальмівний струм  $i_3(t)$  зменшується до певного значення  $i_{3min}$ . При наступному вмиканні регулятора П (рис. 4) ТЕД знову переходить в режим к.з., знову  $i_1(t)$  збільшується, а при вимиканні П – зменшується і далі процес повторюється. В квазіусталеному режимі роботи схеми рис. 4 перемикання регулятора П мають стабільний коливальний характер з частотою від 30 до 600 Гц [16]. Однак при цьому треба врахувати, що в процесі гальмування швидкість руху ЕРС, а отже і швидкість обертання якорів ТЕД,

зменшується. В результаті знижуються генераторні е.р.с. кожного двигуна, а отже і сумарна е.р.с.  $E_{\Gamma}$ . Тому для підтримання заданих меж  $I_{1max} - I_{1min}$ , що необхідно для підтримання гальмівного струму ( $I_1 = \text{const}$ ), потрібно: а) в термін замкненого стану регулятора П зменшувати коефіцієнт імпульсного заповнення  $\gamma = \frac{t_i}{T}$ ; б) в термін вимкненого стану П зменшувати імпульсним регулятором РН величину додаткового опору  $R_{\text{до}}$ .

2. Результати числових розрахунків та аналіз енергії рекуперації електропоїзда ЕПЛ2Т

Основний склад електропоїзда ЕПЛ2Т містить 8 вагонів за структурою: 2Г+4М+2П, тобто має 2 вагона головні, 4 – моторні і 2 – причіпні. При повній завантаженості поїзда маса головного вагона складає 63,4 т, моторного – 78,6 т, причіпного – 62,7 т.

Визначимо його енергію рекуперації  $E_p$ , як залишкову кінетичну енергію, для двох діапазонів швидкості руху ( $V_n - V_k$ ) при РГ: для існуючого, тобто  $V = 80-50$  км/год (рис. 1-2) і для додаткового  $V = 5-50$  км/год за виразом:

$$E_p(V) = \left\{ m \cdot (1 + \gamma) \cdot \left[ \frac{V_n^2 - V_k^2}{2} \right] - A_w(V) \right\} \cdot \eta_p, \quad (6)$$

де  $m$  – фізична маса поїзда в [кг];

$(1 + \gamma) = 1,08$  – коефіцієнт інерції частин, що обертаються [3, с. 261; 17];

$V_n, V_k$  – відповідно, початкова і кінцева швидкості фази гальмування в [м/с];

$\eta_p$  – к.к.д. рекуперативного гальмування, що враховує механічні та електричні втрати;

$A_w(V)$  – енергія, яка витрачається на переборювання повного (основного і додаткового) опору руху поїзда, що визначається як

$$A_w(V) = l_{p\Gamma} \cdot W, \quad (7)$$

де  $l_{p\Gamma}$  – шлях, що пройдений в режимі РГ;

$W$  – повний опір руху поїзда, який має три складові: основний опір  $W_0$ , додатковий опір  $W_{\text{до}}$  і опір від нахилів  $W_i$  і кривих  $W_r$  в залізничній колії.

Вважаємо, що режим РГ перед зупинками здійснюється на прямолінійних горизонтальних ділянках колійного шляху, тобто без підйомів, спусків і кривих, тому  $W_i = 0$  і  $W_r = 0$ . Тоді величина повного руху поїзда дорівнює:

$$W = W_0 + W_{\text{до}}. \quad (8)$$

Визначення енергії  $A_w(V)$  у формулі (6) здійснюємо за виразом (7), в якому шлях  $l_{p\Gamma}$  було встановлено за експериментальними поїздками ЕПЛ2Т на діючих ділянках Придніпровської залізниці. При цьому значення  $l_{p\Gamma}$  склали: 363,4 м для діапазону 80-50 км/год і 191,3 м – 50-5 км/год.

Основний опір руху поїзда знаходимо за виразом [3, с. 103]

$$W_0 = w_0 \cdot m \cdot g, \text{ Н}, \quad (9)$$

де  $m$  – фізична маса повністю завантаженого поїзда в [т];

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

В (9)  $m = 566,5 \text{ т}$ , а функціональна залежність питомого основного опору руху  $w_0$  згідно експериментальних досліджень [2, с. 174-175], прийнята у вигляді:

$$w_0' = 1,24 + 0,02 \cdot V + 0,000267 \cdot V^2,$$

де  $V$  – швидкість в км/год.

Вагони електропоїзда ЕПЛ2Т обладнані установками кондиціонування повітря, тому питомий опір від підвагонних генераторів  $W_{n\Gamma}$  складає (0,2...0,83) Н/кН в інтервалі  $V = 20...80$  км/год [3, с. 133].

Прийmemo, що електропоїзд експлуатується при температурі не нижче  $-30^\circ\text{C}$ . Тоді коефіцієнт  $K_{nm} = 1,04...1,025$  для інтервалу 80...50 км/год і 1,02...1,01 – для інтервалу 50...5 км/год [3, с. 134], а додатковий опір від низької температури визначається як:  $W_{nm} = K_{nm} \cdot w_0'$ .

Додатковий опір від вітру  $W_{\Gamma}$  визначимо при його швидкості 8 м/с, тоді коефіцієнт  $K_{\Gamma}$  складе: 1,11...1,14 для інтервалу 80...50 км/год і 1,14...1,19 – для інтервалу 50...5 км/год [3, с. 135], а  $W_{\Gamma} = K_{\Gamma} \cdot w_0'$ .

Додатковий опір  $W_{\text{до}}$  від усіх факторів визначимо як суму

$$W_{\text{до}} = w_{n\Gamma} \cdot w_{nm} \cdot w_{\Gamma},$$

а повний опір руху – за формулою (8).

Механічні та електричні втрати енергії  $\Delta A_{em}$  в тяговому електроустановці складаються із втрат: в ТЕД, в тяговій передачі, в провідниковому монтажі силових електричних кіл, в імпульсній перетворювальній установці, і в блоці ємнісного накопичувача електроенергії. Відповідні сумарні втрати

потужностей визначають ККД відповідних вузлів системи перетворення і передачі електроенергії. Тому величину  $\Delta A_{em}$  в розрахунках енергії рекуперації  $E_p$  врахуємо шляхом введення ККД ТЕД  $\eta_{med}$ , ККД імпульсного перетворювача  $\eta_{in}$  та ККД ЕНЕ  $\eta_c$ .

Кінетичну енергію руху поїзда  $A_{кн.в.}$  в (6) визначаємо як

$$A_{кн} = m \cdot (1 + \gamma) \cdot \left[ \frac{V_{п}^2 - V_{к}^2}{2} \right],$$

а енергію рекуперації:  $E_p = (A_{кн} - A_w) \cdot \eta_{med} \cdot \eta_{in} \cdot \eta_c$ , де  $\eta_{med} = 0,915$  [3],  $\eta_{in} = 0,97$  [9],  $\eta_c = 0,93$  [9].

Результати числових розрахунків представлені в таблиці.

Адекватність викладеної методики і числових даних розрахунку енергії рекуперації електропоїзда встановлена за результатами вимірювання енергії рекуперації при реальній експлуатації ЕПЛ2Т на ділянці Дніпропетровськ – П’ятихатки Придніпровської залізниці. Дані розрахунків і дослідів відрізняються лише на 2,4...7,2 %.

Із аналізу таблиці випливає, що при умові розширення швидкісного діапазону рекуперації додатково від 50 до 5 км/год об’єм рекуперованої електроенергії збільшується на 40 %. Окрім того, запропоноване схемне рішення не вимагає наявності статичного перетворювача для збудження ТЕД.

**Висновки**

1. Діючі на сьогодні вітчизняні електропоїзди постійного струму володіють вузьким діапазоном швидкостей при рекуперативному гальмуванні, що обмежує корисне використання кінетичної енергії поїзда й обумовлює гасіння рекуперованої електроенергії в гальмівних резисторах.

2. Розширення швидкісного діапазону рекуперації й тим самим суттєве збільшення об’єму рекупе-

рованої енергії можливо шляхом здійснення комбінованих режимів рекуперації на основі розробки бортових систем ємнісних накопичувачів електроенергії.

3. Найбільш ефективними і тому перспективними накопичувачами рекуперованої енергії, які задовольняють основні вимоги бортових систем, є суперконденсатори (конденсатори подвійного електричного шару). Вони поєднують в собі високе значення заощаджуваної питомої енергії, велику кількість зарядно-розрядних циклів, високий коефіцієнт корисної дії, тривалий термін часу зберігання накопиченої електроенергії, роботу в широкому діапазоні температур та ін.

**Література**

1. Костин Н. А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной и энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н. А. Костин, А. В. Никитенко // *Залізничний транспорт України*. – 2014. – №3(106). – С. 15–23.
2. Басов Г. Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. – Харків: «Апекс+», 2005. – Ч. 2. – 248 с.
3. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги: в 2-х т. – Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 1. – 456 с.
4. Variobahn mit Energiespeicher in Heidelberg in Betrieb // *Elek. Bahnen*. – 2010. – 108, №1-2. – S. 93-94.
5. Klohr M. Energiespeicher auf Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen – das erste Serienprojek / M. Klohr, A. Maroschik // *Elek. Bahnen*. – 2012. – 108, №8-9. – S. 444-451.
6. Tango für Genf mit Energiespeicher // *Elek. Bahnen*. – 2012. – 110, №8-9. – S. 508.

Таблиця 1.

Складові опору руху, кінетична енергія і енергія рекуперації електропоїзда ЕПЛ2Т

Інтервал швидкостей при рекуперації, $V_n - V_k$ , км/год	Основний опір руху поїзда		Додатковий опір, Н			Повний опір руху поїзда, $W$ , Н	Шлях, пройдений при рекуперації, $l_{p2}$ , м	Енергія на переборювання повного руху, $A_w$ , МДж	Кінетична енергія, $A_{кн}$ , МДж	Енергія рекуперації, $E_p$ , МДж
	питомий, $w_0'$ , Н/кН	абсолютне значення, $W_0$ , Н	від підвагонних генераторів, $W_{пг}$	від низької температури, $W_{нт}$	від вітру, $W_v$					
80-50	4,5488-2,9075	25253,6-16141,6	1110,34-1832,06	1010,1-403,5	2777,9-2259,8	30152-20637	363,4	10,957-7,5	92,06	66,94-69,8
50-5	2,9075-1,3467	16141,6-7476,5	1832,06-4607,9	322,8-74,77	2259,8-1420,5	20556,3-13579,7	191,3	3,93-2,6	58,42	45-46

7. Pulling, N. Tram builders go to ground to find business / Neil Pulling // *Tramways and Urban Transit*. – 2009. – 72, №860. – P. 300-303.

8. Transit new // *Int. Railway J.* – 2009. – 49, №8. – P. 10-12.

9. Штанг А. А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии: дис. ... к-та техн. наук : 05.09.03 / Штанг Александр Александрович ; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет». – Новосибирск, 2006. – 233 с.

10. Спиридонов Е. А. Повышение эффективности использования энергии в электротранспортных комплексах с накопительными устройствами: дис. ... к-та техн. наук : 05.09.03 / Спиридонов Егор Александрович ; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет». – Новосибирск, 2010. – 165 с.

11. Iannuzzi, D. Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors / Diego Iannuzzi, Pietro Tricoli // *IEEE Trans. Power Electron.* – 2012. – 27, №3-4. – P. 2129-2140.

12. Каптел И. А. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов на метрополитене при использовании бортовых накопителей энергии / И.

А. Каптел // Актуальные проблемы развития транспортного комплекса: Материалы 6 Всероссийской дистанционной научно-практической конференции, Самара, 2010. – Самара: СамГУПС. 2010. – С. 90-92.

13. Рябцев Г. Г. Расчет конденсаторных накопителей энергии для вагонов метрополитена / Г. Г. Рябцев, И. А. Ермаков, Н. А. Рубичев // *Электротехника*. – 2011. – №8. – С. 15-19.

14. Васильев В. А. Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока: автореф. дис. ... к-та техн. наук : 05.22.07 / Васильев Виталий Алексеевич; Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения». – Санкт-Петербург, 2012. – 22 с.

15. Астахов Ю. Н. Функциональные возможности накопителей электрической энергии в энергосистемах / Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, В. М. Иванов и др. // *Электричество*. – 1983. – №4. – С. 1-5.

16. Соболев В. Е. Двигатели пульсирующего тока / В. Е. Соболев. – Ленинград: Энергия, 1968. – 231 с.

17. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.