

УДК 629. 423

А. М. АФАНАСОВ^{1*}, Д. І. ЛИНИК^{2*}, С. В. АРПУЛЬ^{3*}, Д. С. БІЛУХІН^{4*}, В. Є. ВАСИЛЬЄВ^{5*}

^{1*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{2*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 114 71 74, ел. пошта danil.linnik@gmail.com

^{3*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 632 94 55, ел. пошта arpu@ukr.net, ORCID 0000-0001-5691-0925

^{4*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 233 32 99, ел. пошта comandor04@mail.ru, ORCID 0000-0002-2791-617X

^{5*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373-15-31, ел. пошта wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ З БОРТОВИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета. Підвищення ефективності пасажирських перевезень на неелектрифікованих ділянках залізниці України шляхом оптимізації структури та створення принципів побудови тягового електроприводу перспективного автономного електропоїзда з живленням тягових двигунів від системи бортових накопичувачів електроенергії. **Методи.** Методологічною основою дослідження є загальні теоретичні положення і принципи системного підходу теоретичної електротехніки, теоретичної механіки, теорії електричних машин та перетворювачів. Використані основні принципи теорії керування та основи теорії прийняття рішень. **Результати.** Сформульовані загальні принципи побудови тягового електроприводу перспективного автономного електропоїзда з живленням тягових двигунів від бортових накопичувачів електроенергії. Запропоновано функціональну схему тягового електроприводу перспективного автономного електропоїзда, проведено аналіз роботи електроприводу в режимах тяги та рекуперативного гальмування. Визначені масові показники накопичувачів енергії двох типів, а саме електрохімічних акумуляторів та суперконденсаторів. Сформульовано основні вимоги до системи автоматичного керування тяговим приводом такого електропоїзда. Показано, що в перспективі використання автономних акумуляторних електропоїздів буде технічне можливе та економічно виправдане на неелектрифікованих ділянках Укрзалізниці.

Ключові слова: електропоїзд, тяговий привод, акумулятор, суперконденсатор, перетворювач напруги, пусковий режим, рекуперативне гальмування.

Вступ

Значна частка неелектрифікованих ділянок в загальній протяжності мережі залізниць України потребує використання автономного тягового та моторвагонного рухомого складу. В даний час ця проблема вирішується за рахунок експлуатації тепловозів і дизель-поїздів. Відсутність в існуючому парку автономного рухомого складу акумуляторних електровозів і електропоїздів в першу чергу пояснюється високою собівартістю і недостатньо високими енергетичними показниками електрохімічних джерел енергії минулих часів.

Аналіз історії та перспектив розвитку тягових акумуляторів показує, що в найближчому майбутньому застосування таких накопичувачів енергії на моторвагонному рухомому складі буде економічно доцільним і близьким за енергетичними показниками з існуючим варіантом

живлення тягового електроприводу від контактної мережі.

Дослідна експлуатація моторвагонного рухомого складу з частковим використанням в якості джерела електроенергії сучасних тягових акумуляторів вже ведеться на залізницях Західної Європи. Для зменшення часу простою при зарядці тягових акумуляторів організація експлуатації автономних електропоїздів має передбачати заміну блоку батарей на пунктах технічного обслуговування, на цих же пунктах повинна здійснюватися і зарядка акумуляторів. Висока енергетична ефективність використання акумуляторних електропоїздів може бути досягнута шляхом оптимізації їх режимів руху, за рахунок зниження аеродинамічного опору руху поїзда та використання високоефективної системи рекуперативного гальмування.

Постановка завдання дослідження

Режими пуску і електричного гальмування поїзда вимагають відбору і повернення енергії зі значеннями потужності, на порядок більшими, ніж в ustalених режимах руху електропоїзда. Енергетична ефективність тягових акумуляторів в таких режимах значно знижується. Рішенням даної проблеми може бути застосування в якості додаткового накопичувача суперконденсаторів [1-3]. Накопичення і віддача електроенергії з використанням суперконденсаторів можливе з високими значеннями потужності при незначних втратах, при цьому величини питомих значень накопичуваної енергії для суперконденсаторів значно менше, ніж для класичних електрохімічних джерел. Тому найбільш раціональним буде рішення про використання електрохімічного джерела енергії в якості основного, а суперконденсатора – як додаткового накопичувача, який буде використовуватися тільки в режимах пуску і рекуперативного гальмування. Силова схема і система управління електропоїзда повинні забезпечувати автоматичний перехід з одного режиму в інший.

Враховуючі властивості електрохімічних накопичувачів електроенергії та суперконденсаторів [3], а також вимоги до тягового електроприводу автономного електропоїзда, можна сформулювати наступні вимоги до електричної

схеми тягового перетворювача [4]. Тяговий перетворювач забезпечуватиме можливості:

- плавного регулювання напруги на тяговому двигуні при пуску з живленням від суперконденсаторів;
- плавного регулювання напруги на тяговому двигуні з живленням від акумуляторної батареї;
- плавного регулювання струму тягового двигуну при рекуперативному гальмуванні з забезпеченням заряду суперконденсаторів;
- плавного регулювання струму тягового двигуну при рекуперативному гальмуванні з забезпеченням заряду акумуляторної батареї;
- автоматичного переключення з режиму тяги в режим рекуперативного гальмування при стабілізації швидкості руху.

Основний матеріал дослідження

Вибір загальної структури тягового електропривода. На рис. 1 наведено функціональну схему тягового електропривода, яка забезпечує всі режими тяги та електричного гальмування автономного електропоїзда з використанням або акумуляторної батареї, або суперконденсаторів. Функціональна схема включає акумуляторну батарею АБ, суперконденсатор СК, регулятори постійної напруги (конвертори) РН1, РН2, регулятори постійного струму РС1, РС2, комутатори К1, К2, ланку постійного струму ЛПС та електропривод ЕП.

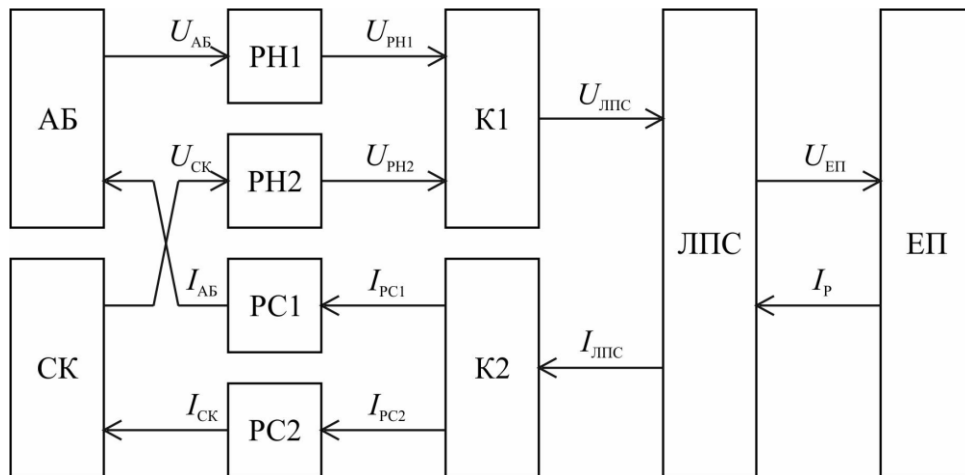


Рис. 1. Функціональна схема тягового електропривода

В якості тягового двигуна електроприводу на автономному електропоїзді може бути використано тягові двигуни будь якого типу, зокрема: колекторні двигуни пульсуючого струму, асинхронні, синхронні, індукторні [5]. При використанні асинхронних, синхронних або індукторних тягових двигунів необхідно використовувати додатковий перетворювач (інвертор), який

є невід'ємною частиною такого електроприводу [4].

Схема дозволяє регулювати напругу на ланці постійного струму ЛПС в режимі тяги як з її пониженням, так й з підвищенням відносно напруги на акумуляторній батареї АБ або суперконденсаторі СК. При використанні в якості джерела живлення акумуляторної батареї АБ працює регулятор РН1, при використанні

суперконденсатора – регулятор РН2. Відповідні переключення в схемі забезпечуються електронним комутатором К1. Система автоматичного керування (на рис. 1 не показано) забезпечує стабілізацію напруги на ЛПС.

В режимі електродинамічного гальмування можливий заряд як акумуляторної батареї, так й суперконденсатора [6]. Струм заряду акумуляторної батареї регулюється регулятором РС1, а струм заряду суперконденсатора – регулятором РС2. Відповідні переключення в схемі в режимі рекуперації забезпечуються електронним комутатором К2. Система автоматичного керування забезпечує стабілізацію напруги на ЛПС.

Режими роботи самого електропривода ЕП при стабілізованій напрузі на ланці постійного струму ЛПС регулюються системою автоматичного регулювання, яка може забезпечувати:

- стабілізацію сили тяги (прискорення) при розгоні електропоїзда;
- стабілізацію гальмівного зусилля при електродинамічному гальмуванні;
- стабілізацію швидкості руху електропоїзда.

Аналіз енергетичних показників використання суперконденсаторів

Розглянемо режим пуску електропоїзда та його розгону до розрахункової швидкості з використанням в якості джерела живлення суперконденсатора СК. Загалом енергетичний баланс для такого режиму можна представити у вигляді [7]

$$\Delta A_c \cdot \eta = K + A_w, \quad (1)$$

де ΔA_c – енергія, спожита з конденсатора за час пуску;

η – середнє загальне значення к. к. д. перетворювачів та електроприводу;

K – кінетична енергія електропоїзда в кінці пуску;

A_w – робота, витрачена за час пуску на подолання сил опору руху.

Неважко переконатися в тому, що

$$\frac{A_w}{K} = \frac{w_0}{1000a}, \quad (2)$$

де a – прискорення при пуску, м/с²;

w_0 – середній питомий опір руху за час пуску, Н/т.

Введемо позначення $k_w = \frac{A_w}{K}$ і запишемо вираз (1) у вигляді

$$\Delta A_c \cdot \eta = (1 + k_w) K. \quad (3)$$

Ступінь використання енергії попередньо зарядженого конденсатора може бути оцінена коефіцієнтом ступеня розряду

$$k_A = \frac{\Delta A_c}{A_c},$$

де A_c – початкова енергія зарядженого конденсатора.

Тоді вираз (1) можна записати у вигляді

$$k_A \cdot \eta \cdot \Delta A_c = (1 + k_w) K. \quad (4)$$

Проведемо оцінку маси конденсатора потрібної енергетичної ємності, представивши повну енергію суперконденсатора A_c у вигляді

$$A_c = a_c \cdot m_c, \quad (5)$$

де a_c – питома щільність енергії суперконденсатора;

m_c – маса суперконденсатора.

Кінетична енергія електропоїзда в кінці пуску

$$K = \frac{M v_k^2}{2}, \quad (6)$$

де v_k – швидкість електропоїзда в кінці пуску; M – маса електропоїзда.

Відношення мас конденсатора і електропоїзда маємо у вигляді

$$k_m = \frac{m_c}{M} = \frac{k_w \cdot v^2}{2 \cdot a_c \cdot \eta_{\text{еп}} \cdot k_A}. \quad (7)$$

У табл. 1 наведені результати розрахунку залежності $k_m(v)$, отримані за формулою (7) для наступних значень параметрів, що входять до виразу:

$$\eta = 0,9; k_A = 0,75; k_w = 1,05; w_0 = 50 \frac{\text{Н}}{\text{т}};$$

$$a = 0,7 \text{ м/с}^2; a_c = 4 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг}.$$

Таблиця 1

Результати розрахунку залежності $k_m(v)$

v , м/с	0	5	10	15	20	30	40
k_m , %	0	0,05	0,2	0,44	0,77	1,75	3,12

Графік залежності $k_m(v)$ наведено на рис. 2.

Як видно з табл. 1 та рис. 2, для забезпечення пуску електропоїзду до швидкості 40 м/с з живленням електроприводу від суперконденсатора з щільністю енергії $4 \cdot 10^4$ Дж/кг потрібно

підвищення навантаження на вісь електропоїзди не більше, ніж на 3,1%. Загальна маса суперконденсатора для одного вагона електропоїзда масою 50 т для даних характеристик пуску становить приблизно 2,5 т. Для випадку пуску електропоїзда до швидкості 30 м/с потрібна загальна маса суперконденсаторів складає приблизно 1,4 т.

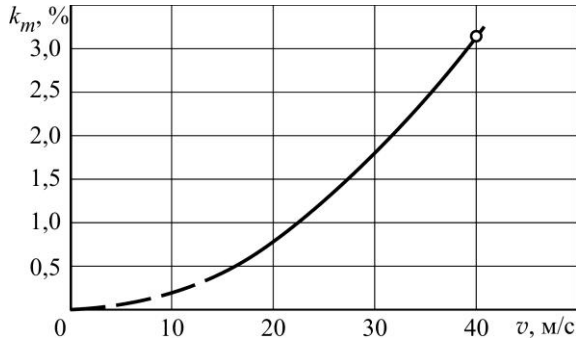


Рис. 2. Залежність коефіцієнта відношення мас конденсаторів і електропоїзда k_m від швидкості руху

Аналіз енергетичних показників використання акумуляторної батареї

Розглянемо режим руху електропоїзда в сталому режимі на площадці з живленням електроприводу від акумуляторних батарей. Метою цього аналізу є визначення залежності додаткового навантаження від колісних пар електропоїзда на рейки, яке обумовлено наявністю акумуляторної батареї.

Додаткове навантаження на одну вісь чотирьохвісного вагону електропоїзда може бути знайдено у вигляді

$$P_{аб} = \frac{m_{аб}}{4}, \quad (8)$$

де $m_{аб}$ – загальна маса акумуляторних батарей одного вагону.

Загальна маса акумуляторних батарей вагону електропоїзда може бути визначеною у вигляді

$$m_{аб} = \frac{A}{a_б}, \quad (9)$$

де $a_б$ – питома енергія акумуляторних батарей, Дж/кг.

Загальні витрати енергії можуть бути визначені за формулою

$$A = W_о \cdot S, \quad (10)$$

де $W_о$ – основний опір руху електропоїзду на горизонтальній дільниці; S – довжина шляху, пройденого електропоїздом.

Основний опір руху вагону може бути знайденим у вигляді

$$W_о = w_о \cdot M, \quad (11)$$

де $w_о$ – основний питомий опір руху електропоїзда;

M – маса вагону.

Основний питомий опір електропоїзда визначається за формулою [9]

$$w_о = 1,1 + 0,012 \cdot v + 0,000267 \cdot v^2, \quad (12)$$

де v – швидкість руху електропоїзда.

За даними формулами розрахуємо додаткове навантаження на вісь для діапазону швидкостей 40-130 км та декількох значень питомій енергії акумуляторних батарей $a_б$. Масу одного вагону електропоїзда прийнято рівною 50 т. Загальна довжина шляху, що пройдено електропоїздом, прийнята рівною 100 км. Результати розрахунків додаткового навантаження на вісь від акумуляторних батарей $P_{аб}$ наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Додаткове навантаження на вісь електропоїзду в залежності від швидкості руху

v, км/год	40	60	80	100	110	120	130
$a = 50$ Вт·год/кг							
$P_{аб}, т$	1,39	1,9	2,6	3,4	3,9	4,4	4,9
$a = 100$ Вт·год/кг							
$P_{аб}, т$	0,67	0,93	1,21	1,53	1,69	1,86	2,03
$a = 300$ Вт·год/кг							
$P_{аб}, т$	0,22	0,31	0,41	0,51	0,56	0,62	0,68
$a = 1000$ Вт·год/кг							
$P_{аб}, т$	0,07	0,09	0,12	0,15	0,17	0,19	0,2

Графічно додаткові навантаження на вісь електропоїзда від акумуляторних батарей в залежності від швидкості руху $P_{аб}(v)$ наведені на рис. 3.

Зміни лінійного пробігу в залежності від додаткового навантаження на вісь від акумуляторів різних питомих енергій наведено рис. 4, де прийняті наступні позначення: S – лінійний пробіг; P – додаткове навантаження на одну вісь електропоїзда. Середня швидкість руху електропоїзда при розрахунках лінійного пробігу була прийнята рівною 100 км/год.

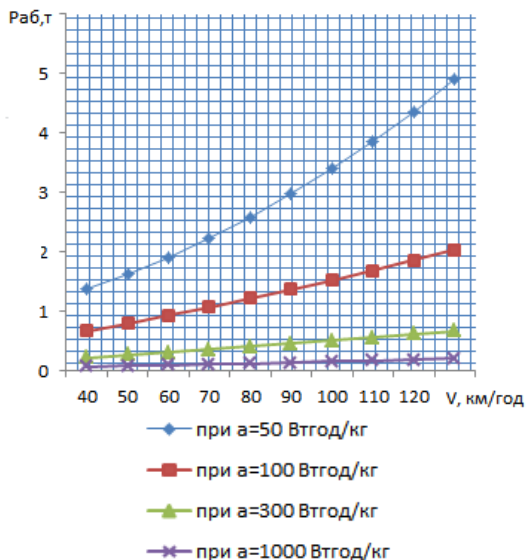


Рис. 3. Залежність додаткового навантаження на вісь електропоїзда від швидкості руху

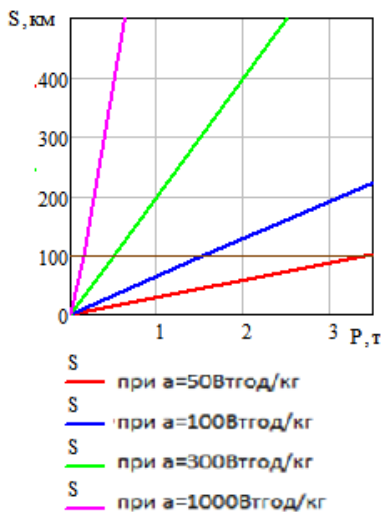


Рис. 4. Тенденція зміни лінійного пробігу з підвищенням навантаження на вісь від акумуляторів різних питомих енергій

Висновки

1. Актуальну проблему залізниць України – забезпечення пасажирських перевезень на неелектрифікованих ділянках може бути ефективно вирішено за рахунок використання автономних акумуляторних поїздів з електричним тяговим приводом та бортовими накопичувачами електроенергії.

2. Проведений аналіз режимів роботи існуючих електропоїздів та параметрів сучасних накопичувачів енергії показує, що на автономному моторвагонному рухомому складі в якості основного накопичувача електроенергії є доцільним застосування акумуляторної батареї, а в якості додаткового накопичувача – суперконденсаторів.

3. Результати аналізу пуску електропоїзда з живленням тягових двигунів від накопичувачів електроенергії та результати розрахунку масових показників накопичувачів підтверджують економічну доцільності та технічну можливість використання акумуляторних електропоїздів в пасажирському русі залізниць України.

4. Високу енергетичну ефективність використання акумуляторних електропоїздів може бути досягнуто шляхом оптимізації їх режимів руху, використання системи автоматичного ведення, за рахунок зниження аеродинамічного опору руху поїзда і шляхом використання високоефективної системи рекуперативного гальмування.

БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Деспотули А. Л., Андреева А. В., Веденеев В. В., Аристов В. В., Мальцев П. П. Высокоёмкие конденсаторы для ультраплотного поверхностного монтажа. Нано- и микросистемная техника. 2006. № 3.
2. Pasquier A. Du, Plitz I., Gural J., Menocal S., Amatucci G. Characteristics and performance of 500F asymmetric hybrid advanced supercapacitor prototypes. J. Power Sources. 2003. V. 113. P. 62.
3. Кузнецов В., Панькина О., Мачковская Р., Шувалов Е., Востриков И. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство. Компоненты и технологии. 2005. № 6.
4. Тихменев Б. Н., Трахман Л. М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. Учебник для вузов ж.-д. трансп. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
5. Гетьман Г. К.: Тория электрической тяги: Монография [Текст]: в 2т. / Г. К. Гетьман – Дн-вск: Изво Маковецкий, 2011. Т. 1 – 456 с. – ISBN 978-966-1507-64-6 (полное собрание).
6. Афанасов А. М., Арпуль С.В., Мясников А. С. Анализ режимов пуска автономного электропоезда при питании тягового электропривода от ионистора. Електрифікація транспорту 10/2015, 2016. – С. 39 – 43.
7. Афанасов А. М., Арпуль С. В., Демчук Р. Н. Пусковые режимы автономного электропоезда с бортовым накопителем энергии. Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, 11/2016. – С. 18-23.
8. Автоматизация электроподвижного состава: Учебник ля вузов ж.-д. трансп. / А. Н. Савоськин, Л. А. Баранов, А. В. Плакс, В. П. Феоктистов; По ред. А. Н. Савоськина. М.: Транспорт, 1990. 311 с.
9. Правила тяговых расчётов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287с.

Надійшла до редколегії 10.06.2022

Прийнята до друку 16.06.2022

PROSPECTS OF USING AUTONOMOUS ELECTRIC TRAINS WITH ONBOARD STORAGE STORES

Purpose. Improving the efficiency of passenger traffic on non-electrified sections of the railway of Ukraine by optimizing the structure and creating principles for building a traction electric drive of a promising autonomous electric train powered by traction engines from the system of onboard storage of electricity. **Methods.** The methodological basis of the study are the general theoretical provisions and principles of the system approach of theoretical electrical engineering, theoretical mechanics, theory of electrical machines and converters. The basic principles of management theory and the basics of decision theory are used. **Results.** The general principles of construction of the traction electric drive of the perspective autonomous electric train with power supply of traction engines from onboard energy storage devices are formulated. The functional scheme of the traction electric drive of the perspective autonomous electric train is offered, the analysis of work of the electric drive in the modes of traction and regenerative braking is carried out. The mass parameters of two types of energy storage devices, namely electrochemical batteries and supercapacitors, have been determined. The basic requirements to the system of automatic control of the traction drive of the electric train are formulated. It is shown that in the future the use of autonomous battery electric trains will be technically possible and economically justified on non-electrified sections of Ukrzaliznytsia.

Keywords: electric train, traction drive, battery, ionistor, voltage converter, starting mode, regenerative braking.