

# РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 621.333-048.24

В. Є. ВАСИЛЬЄВ<sup>1\*</sup>, А. М. АФАНАСОВ<sup>2\*</sup>, О. М. ГУЛІВЕЦЬ<sup>3\*</sup>, Ю. Я. ПОПУДНЯК<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

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

<sup>3\*</sup>Каф. «Фізика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 23, ел. пошта agulivets@outlook.com, ORCID 0000-0003-3410-9605

<sup>4\*</sup>Каф. «Архітектурне проектування, землеустрій та будівельні матеріали», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 774 17 47, ел. пошта 19brit18@ukr.net, ORCID 0000-0002-1383-9863

## Експериментальні дослідження енергетичної ефективності прискорених теплових випробувань тягових електромашин

**Мета.** Випробування на нагрівання тягових електричних машин є найбільш енергоємним. Ураховуючи необхідність вибору раціонального варіанта схеми взаємного навантаження для зменшення витрат електричної енергії під час випробувань, автори передбачають провести дослідження кількості сумарних корисних енергій джерел живлення стенда за годинного і пускового струму. **Методика.** Експериментальні дослідження проведено на стенді взаємного навантаження. Як джерела живлення (вольтододаткова машина й лінійний генератор) використано обертові машини. Напругу та коефіцієнт ослаблення поля тягових двигунів під час випробувань підтримували номінальними. Умовою рівності кінцевих перевищень температур випробовуваних тягових двигунів для обох режимів було досягнення однакового сумарного опору кола. Для аналізу результатів випробувань використано методи теоретичного дослідження й аналітичного розрахунку електричних кіл, теоретичних основ електротехніки, математичного моделювання електричних та енергетичних процесів. **Результати.** Проведений комплекс випробувань на нагрівання тягових двигунів моторвагонного електрорухомого складу показав, що витрати електричної енергії за пускового струму менші на 36 % порівняно з годинним режимом навантаження. Випробування на стенді взаємного навантаження підтвердили практичну можливість проведення прискорених випробувань тягових електричних двигунів. **Наукова новизна.** Доведено, що використання режиму випробування на нагрівання пусковим струмом забезпечує підвищення енергетичної ефективності випробувань та відповідне зменшення загальних витрат електроенергії на прийнятно-здавальні випробування. Намічено подальші дослідження для визначення резервів енергозбереження під час післяремонтних випробувань тягових електричних двигунів магістрального, кар'єрного і приміського транспорту. **Практична значимість.** Результати випробувань можуть стати основою модернізації стендів взаємного навантаження локомотиворемонтних підприємств для теплових випробувань тягових двигунів постійного та пульсувального струму. Проведені дослідження дозволяють розробити рекомендації щодо проектування раціональних схем випробних стендів із підвищеною енергетичною ефективністю системи взаємного навантаження тягових електричних машин, які відрізняються врахуванням коефіцієнта корисної дії джерел та перетворювачів потужності.

**Ключові слова:** взаємне навантаження; випробування; режим навантаження; нагрівання; тягова електромашини; корисна енергія; температура; лінійний генератор; вольтододаткова машина; час випробування; годинний режим; пусковий струм

## Вступ

Якісне проведення післяремонтних випробувань тягових електромашин можливе тільки під навантаженням [8, 10, 12]. На станціях для випробування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту, як правило, використовують схему взаємного навантаження з лінійним генератором та вольтододатковою машиною.

Енергоємність випробувань тягових електромашин визначають тривалістю випробувань та сумарною потужністю, споживаною з мережі, яка складається з втрат потужності у випробовуваних тягових електромашин та втрат у перетворювачах випробного стенда взаємного навантаження [1, 2, 9, 11, 13]. Умови проведення випробувань повинні забезпечувати повну відповідність характеру втрат потужності в тягових електромашин реальним умовам експлуатації. Сумарні втрати у випробовуваних тягових електромашин не повинні залежати ні від структури випробного стенда, ні від характеристик його джерел та перетворювачів. Сумарні втрати потужності в джерелах та перетворювачах пов'язані із забезпеченням випробувань і повинні бути мінімізовані.

Особливістю тягових двигунів постійного та пульсувального струму електрорухомого складу промислового транспорту (тягових агрегатів) є наявність п'ятнадцятихвилинного режиму навантаження [4]. Струм п'ятнадцятихвилинного режиму для цих тягових двигунів є типовим параметром, і під час їх випробування на нагрівання найбільш раціональним із точки зору максимуму енергетичної ефективності випробувань за мінімуму сумарної наведеної потужності джерел випробного стенда може бути взятий саме струм навантаження, що дорівнює струму п'ятнадцятихвилинного режиму.

Відношення п'ятнадцятихвилинного струму до годинного для тягових двигунів тягових агрегатів є величиною, близькою до відношення пускового та годинного струмів тягових двигунів моторвагонного електрорухомого складу. Тому для досягнення економії енергетичних ресурсів необхідно визначити раціональні режими взаємного навантаження електричних машин постійного та пульсувального струму тягового рухомого складу приміського сполу-

чення, що мають забезпечити високу енергетичну ефективність і якість приймально-здавальних випробувань електромашин [6, 7].

## Мета

Основною метою цього експериментального дослідження є визначення різниці сумарних корисних енергій джерел системи взаємного навантаження, витрачених на випробування на нагрівання тягових електродвигунів РТ–51Д за пускового та годинного струму навантаження, й отримання аналітичних виразів для знаходження сумарної приведеної потужності джерел живлення випробної системи, яку можна розглядати як один із критеріїв вибору раціонального варіанта схеми взаємного навантаження випробовуваних електромашин тягового рухомого складу магістрального, промислового та приміського залізничного транспорту.

## Методика

Упровадження нових технологій і технічних засобів на електрорухомому складі не виключає проведення післяремонтних випробувань і складання звіту результатів стендового навантаження. Під час проведення приймально-здавальних випробувань спираються на нормативи і правила. Так, чинними документами [4, 5] передбачена перевірка тягових електродвигунів на нагрівання.

Випробування проведено на стенді взаємного навантаження, устаткованого в лабораторії кафедри «Електрорухомий склад залізниць» Українського державного університету науки і технологій ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту». Об'єкт випробування – тягові електродвигуни РТ–51Д.

Тяговий електродвигун РТ–51Д призначений для встановлення на електропоїздах змінного струму ЕР9, ЕР9п і є чотириполюсною некомпенсованою електричною машиною пульсувального струму із самовентиляцією й опорно-рамною підвіскою. Збудження двигуна – послідовне. Кріплення обмотки якоря – клинове. Осердя якоря й додаткових полюсів шихтовані з листів електротехнічної сталі марки Е12 завтовшки 0,5 мм, головних полюсів – завтовшки 2 мм, кріплення до остова – за допомогою болтів. Нагрівостійкість ізоляції всіх

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

обмоток двигуна – за класом ізоляції F. Технічні дані тягового електродвигуна ТР–51Д представлені в табл. 1.

Таблиця 1

## Технічні дані тягового двигуна РТ–51Д

Table 1

## Technical data of the RT-51D traction motor

Збудження головних полюсів, %	92,5 %	32 %
Напруга, В	825	825
Струм якоря, А	215	266
Потужність на валу, кВт	182	200
Частота обертання, об./хв	645	1 140
Опір обмоток тягового двигуна за температури 20 °С/110 °С, Ом		
Якір (Я)	0,056/0,0762	
Головні полюси (ГП)	0,128/0,174	
Додаткові полюси (ДП)	0,025/0,034	
Загальний опір обмоток двигуна	0,209/0,2842	

Вимірювання опору обмоток проведено методом амперметра-вольтметра приладами класу точності 0,5. Значення опорів після вимірювання зведені до температури 20 °С. Температуру колектора, охолоджувального й навколишнього повітря вимірюють спиртовими термометрами. Перевищення температур визначено за різних струмів якоря і номінальної кількості охолоджувального повітря методом опорів відповідно до [3, 5].

Експериментальне дослідження проведено на стенді взаємного навантаження з використанням вольтододаткової машини (ВДМ) та лінійного генератора (ЛГ). Схему стенда наведено на рис. 1.

На першому етапі проведено випробування на нагрівання тягових двигунів РТ–51Д з годинним струмом навантаження  $I_T = 215$  А та номінальною напругою  $U_H = 825$  В протягом години. Коефіцієнт ослаблення поля під час випробування був номінальним  $\beta_H = 0,535$ .

Наприкінці випробування методом опорів визначено перевищення температури обмоток якорів обох тягових електромашин (генератора G та двигуна M).

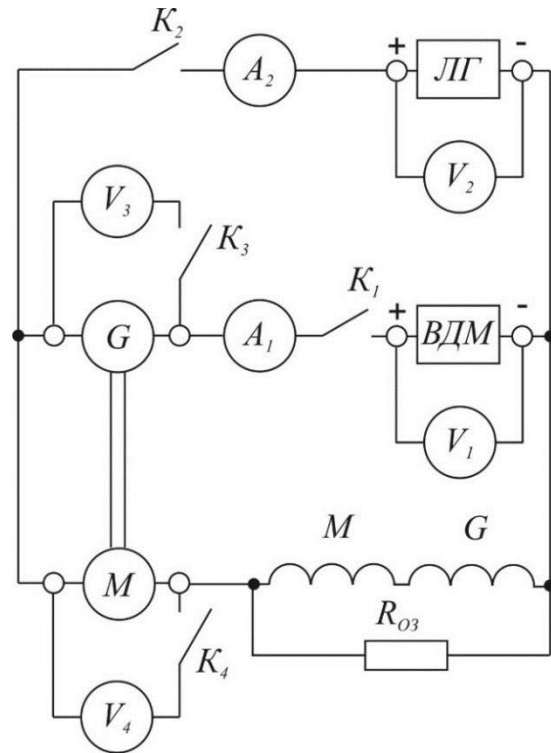


Рис. 1. Схема випробного стенда

Fig. 1. Scheme of the test stand

На другому етапі проведено випробування на нагрівання цих двигунів, із використанням цієї ж схеми, але за пускового струму навантаження  $I_{\text{ПУСК}} = 370$  А. Напругу та коефіцієнт ослаблення поля тягових двигунів на другому етапі підтримували номінальними:  $U_H$  і  $\beta_H$  відповідно.

Випробування на нагрівання за пускового струму  $I_{\text{ПУСК}} = 370$  А проведено протягом часу досягнення сумарного опорів кола випробуваних двигунів того ж значення, яке було зафіксовано під час випробування протягом години за годинного струму навантаження  $I_T = 215$  А. Сумарний опір цього кола оцінено за величиною напруги на затискачах вольтододаткової машини (ВДМ), яку попередньо фіксували протягом випробування на нагрівання за годинного струму навантаження на першому етапі.

Таким чином, було досягнуто умов рівності кінцевих перевищень температур випробуваних тягових двигунів для обох режимів випробування.

Корисні енергії джерел випробного стенда (ВДМ і ЛГ) визначено за значеннями їх напруги та струмів, які періодично зафіксовано про-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тягом усього часу випробування для обох режимів навантаження за допомогою вольтметрів  $V_1$  і  $V_2$ , а також амперметрів  $A_1$  і  $A_2$ .

## Результати

Загальна витрата корисної електроенергії кожного з джерел (ВДМ та ЛГ) за час випробування може бути визначена у вигляді:

$$Q_{\text{ЛГ}} = \int_0^{t_{\text{В}}} U_{\text{ЛГ}} \cdot I_{\text{ЛГ}} dt;$$

$$Q_{\text{ВДМ}} = \int_0^{t_{\text{В}}} U_{\text{ВДМ}} \cdot I_{\text{ВДМ}} dt.$$

де  $U_{\text{ЛГ}}$ ,  $I_{\text{ЛГ}}$  – напруга та сила струму лінійного генератора;  $U_{\text{ВДМ}}$ ,  $I_{\text{ВДМ}}$  – напруга та сила струму вольтодавальної машини;  $t_{\text{В}}$  – час проведення випробування.

Як показує досвід численних випробувань на нагрівання, струм лінійного генератора протягом випробування практично не змінюється. Це зумовлено відсутністю впливу температури обмоток тягових електромашин на величину втрат холостого ходу, які визначають струм лінійного генератора.

Необхідно відзначити, що в разі розбіжності магнітних характеристик випробовуваних електромашин струм лінійного генератора може змінюватися зі зміною температури їх обмоток і, відповідно, електричних втрат. У випробуваннях використано тягові двигуни з магнітними характеристиками, що практично збігаються, тому такого явища в експерименті не спостерігалося.

Сумарна корисна енергія лінійного генератора за умови сталості струму  $I_{\text{ЛГ}} = \text{const}$  може бути визначена у спрощеному вигляді як

$$Q_{\text{ЛГ}} = U_{\text{ЛГ}} \cdot I_{\text{ЛГ}} \cdot t_{\text{В}}.$$

За умови  $I_{\text{ЛГ}} = \text{const}$  і  $I_{\text{Д}} = \text{const}$  струм ВДМ також постійний.

$$I_{\text{ВДМ}} = \text{const}.$$

Тоді вираз визначення  $Q_{\text{ВДМ}}$  може бути представлено у вигляді

$$Q_{\text{ВДМ}} = I_{\text{ВДМ}} \cdot \int_0^{t_{\text{В}}} U_{\text{ВДМ}} dt.$$

Для підтримки постійного значення струму навантаження тягових двигунів напруга ВДМ по мірі зростання перевищення температури та опору їх обмоток повинна підвищуватися. Форма залежності  $U_{\text{ВДМ}}(t)$  повинна повторювати форму зміни в часі сумарного опору всіх обмоток тягових двигунів  $\sum R(t)$  і мати такий самий експоненційний характер.

Фіксацію результатів вимірювання струмів та напруг під час випробування під струмом навантаження  $I_{\Gamma} = 215$  А проводили кожні 10 хвилин, а під час випробування струмом навантаження  $I_{\text{ПВСК}} = 370$  А – кожні три хвилини.

Результати вимірювання струмів та напруг джерел для режиму  $I_{\Gamma} = 215$  А (перший етап) наведено в табл. 2, результати вимірювання цих параметрів для режиму  $I_{\text{ПВСК}} = 370$  А (другий етап) – у табл. 3.

Перевищення температур обмоток якорів випробовуваних тягових двигунів визначено за формулою [2]:

$$\tau = \frac{R_{\text{ГОР}} - R_{\text{ХОЛ}}}{R_{\text{ХОЛ}}} (235 + \Theta_{\text{ХОЛ}}) + \Theta_{\text{ХОЛ}} + \Theta_{\text{В}},$$

де  $R_{\text{ГОР}}$ ,  $R_{\text{ХОЛ}}$  – опори обмотки якоря в гарячому та холодному стані відповідно;  $\Theta_{\text{ХОЛ}}$  – температура обмотки якоря в холодному стані;  $\Theta_{\text{В}}$  – температура навколишнього повітря.

Випробування за двома етапами проведено з проміжком часу, що дорівнює дві доби. Температура обмоток якорів у холодному стані дорівнює температурі навколишнього повітря  $\Theta_{\text{ХОЛ}} = \Theta_{\text{В}}$ . Перевищення температури визначено за формулою:

$$\tau = \frac{R_{\text{ГОР}} - R_{\text{ХОЛ}}}{R_{\text{ХОЛ}}} (235 + \Theta_{\text{ХОЛ}}).$$

Опір обмоток якорів визначено методом амперметра-вольтметра на стенді з використанням вимірювальних щіток. Падіння напруги на якірних обмотках визначено вольтметрами  $V_3$  і  $V_4$  за нерухомих якорів (ЛГ вимкнено).

Перевищення температур якоря електромашини, яку випробовували в режимі двигуна

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

у двох дослідах ( $I_{\Gamma} = 215 \text{ А}$  і  $I_{\text{ПУСК}} = 370 \text{ А}$ ) склали відповідно 110 та 112 °С.

Час випробування за струму  $I_{\text{ПУСК}} = 370 \text{ А}$  склав  $t_2 = 16 \text{ хв}$ .

Значення корисної енергії вольтодобаткової машини для обох випробувань визначено шляхом підсумовування окремих складових, отри-

маних для кожного відрізка часу за середнім значенням  $U_{\text{ВДМ}}$  на відповідному відрізку.

Результати розрахунку корисних енергій ВДМ та ЛГ, відданих за час випробування, для годинного режиму навантаження ( $I_{\Gamma} = 215 \text{ А}$ ) наведено в табл. 2, а для пускового режиму навантаження ( $I_{\text{ПУСК}} = 370 \text{ А}$ ) – у табл. 3.

Таблиця 2

**Дані випробувань і результати розрахунку корисних енергій ВДМ та ЛГ для годинного режиму навантаження**

Table 2

**Test data and results of calculation of useful energies of VDM and LH for an hourly load mode**

$t, \text{ хв}$	$U_{\text{ВДМ}}, \text{ В}$	$U_{\text{ВДМСР}}, \text{ В}$	$I_{\text{ВДМ}}, \text{ А}$	$Q_{\text{ВДМ}}, \text{ Вт} \cdot \text{г}$	$I_{\text{ЛГ}}, \text{ А}$	$U_{\text{ЛГ}}, \text{ В}$	$Q_{\text{ЛГ}}, \text{ Вт} \cdot \text{г}$
0	87	–	215	–	11	–	–
10	97	92	215	3 297	11	825	1 513
20	105	101	215	3 619	11	825	1 513
30	111	108	215	3 870	11	825	1 513
40	117	114	215	4 085	11	825	1 513
50	122	119,5	215	4 282	11	825	1 513
60	126	124	215	4 443	11	825	1 513

Таблиця 3

**Дані випробувань і результати розрахунку корисних енергій ВДМ та ЛГ для пускового режиму навантаження**

Table 3

**Test data and results of calculation of useful energies of VDM and LH for starting load mode**

$t, \text{ хв}$	$U_{\text{ВДМ}}, \text{ В}$	$U_{\text{ВДМСР}}, \text{ В}$	$I_{\text{ВДМ}}, \text{ А}$	$Q_{\text{ВДМ}}, \text{ Вт} \cdot \text{г}$	$I_{\text{ЛГ}}, \text{ А}$	$U_{\text{ЛГ}}, \text{ В}$	$Q_{\text{ЛГ}}, \text{ Вт} \cdot \text{г}$
0	157	–	370	–	10	–	–
3	170	163,5	370	3 025	10	825	412,5
6	182	176	370	3 256	10	825	412,5
9	193	187,5	370	3 469	10	825	412,5
12	202	197,5	370	3 654	10	825	412,5
15	212	207	370	3 830	10	825	412,5
16	215	213,5	370	1 317	10	825	137,5

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Сумарна корисна енергія ВДМ для годинного режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{ВДМ.Г}} = 23\,600 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Сумарна корисна енергія ЛГ для годинного режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{ЛГ.Г}} = 9\,075 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Сумарна корисна енергія двох джерел (ВДМ та ЛГ) для годинного режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{Г}} = 32\,675 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Сумарна корисна енергія ВДМ для пускового режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{ВДМ.П}} = 18\,550 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Сумарна корисна енергія ЛГ для пускового режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{ЛГ.П}} = 2\,200 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Сумарна корисна енергія двох джерел (ВДМ та ЛГ) для пускового режиму навантаження:

$$\sum Q_{\text{П}} = 20\,750 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

Відношення сумарних корисних енергій двох джерел (ВДМ та ЛГ) у годинному та пусковому режимах навантаження

$$\frac{Q_{\text{Г}}}{Q_{\text{П}}} = 1,57.$$

Економія сумарної корисної енергії двох джерел (ВДМ та ЛГ) у пусковому режимі навантаження порівняно з годинним режимом:

$$\Delta Q = \sum Q_{\text{Г}} - \sum Q_{\text{П}} = 11\,925 \text{ Вт} \cdot \text{г.}$$

що становить 36 % від сумарної корисної енергії двох джерел годинного режиму.

Особливістю тягових двигунів із самовентиляцією є відносно висока частка в сумарних втратах потужності втрат холостого ходу, які зі зростанням струму навантаження дещо знижуються через падіння частоти обертання тягових електромашин. Потужність втрат холостого ходу мало впливає на перевищення температури обмотки якоря, але становить істотну частку в загальній потужності втрат у стенді взаємного навантаження, для компенсації якої потрібна

потужність із мережі. Істотне скорочення часу випробування на нагрівання (у три – чотири рази) водночас зменшує загальну корисну енергію джерел системи взаємного навантаження тягових електромашин, що витрачається на компенсацію втрат холостого ходу.

Із результатів розрахунку видно, що загальна корисна енергія лінійного генератора, який компенсує втрати холостого ходу, під час випробування на нагрівання з пусковим струмом навантаження вчетверо нижча, ніж під час випробування годинного режиму навантаження. Такий характер зниження загальної енергії втрат холостого ходу зі збільшенням струму навантаження буде притаманний усім варіантам систем взаємного навантаження, незалежно від того, як у них компенсуються втрати холостого ходу.

Результати розрахунку під час експериментальних досліджень досить добре узгоджуються з результатами теоретичних досліджень впливу величини струму навантаження тягових випробовуваних електромашин на енергетичну ефективність випробування на нагрівання.

### Наукова новизна та практична значимість

У результаті проведених досліджень на стенді взаємного навантаження:

– визначено величину економії сумарної корисної енергії двох джерел (ВДМ та ЛГ), що дозволило обґрунтувати можливість підвищення енергетичної ефективності випробування на нагрівання тягових двигунів електрорухомого складу магістрального залізничного транспорту за рахунок збільшення струму навантаження до пускового значення;

– науково обґрунтовано доцільність проведення випробувань на нагрівання тягових двигунів моторвагонного рухомого складу залізничного транспорту за струму навантаження пускового режиму, що забезпечує підвищення енергетичної ефективності випробувань та відповідне зменшення загальних витрат електроенергії на приймально-здавальні випробування;

– удосконалено метод визначення енергетичної ефективності системи взаємного навантаження тягових електричних машин, який відрізняється врахуванням у ньому к.к.д. джерел та

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

перетворювачів потужності, а також уведених понять енергетичної ефективності – непрямих методів компенсації втрат.

**Висновки**

Зниження витрати електроенергії на випробування на нагрівання тягових електродвигунів зі збільшенням струму навантаження підтверджено експериментально. Проведення випробувань на нагрівання тягових двигунів моторвагонного електрорухомого складу за струмів навантаження, що дорівнюють пусковому, дозволяє знизити витрати електроенергії на приймально-здавальні випробування на 36 % порівняно з годинним режимом навантаження.

Схеми та режими взаємного навантаження

тягових електричних машин, які використовуються під час їх приймально-здавальних випробувань, є нерациональними. Наявні станції з випробування тягових електричних машин, стан яких не відповідає сучасним вимогам організації технічного контролю, потребують модернізації, яка повинна бути направлена на зниження сумарної потужності джерел живлення випробної системи, підвищення енергетичної ефективності та якості випробувань.

Подальші дослідження слід спрямувати на скорочення тривалості випробувань за мінімуму джерел системи взаємного навантаження за рахунок регулювання кількості охолоджувального повітря.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасов А. М., Арпуль С. В., Друбецкий А. Е. Синтез систем взаимного нагружения тяговых двигателей постоянного и пульсирующего тока. *Електрифікація транспорту*. 2017. № 13. С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i13.117823>
2. Афанасов А. М. Повышение энергетической эффективности испытаний тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока. *Електричні машини та апарати*. 2015. № 1. С. 12–15. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.1.02>
3. Гетьман Г. К. *Теорія електричної тяги* : підручник у 2 т. Т. 2. Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2015. 492 с.
4. *ДСТУ ГОСТ 2582:2017 Машини електричні обертові тягові. Загальні технічні умови (ГОСТ 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ)* [Дійсний від 2017-03-01]. Київ : ДП «Укр-НДНЦ», 2017. 50 с.
5. *Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063*. Київ : Видавничий дім «САМ», 2003. 286 с.
6. *Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top>
7. *Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text>
8. Gavrilovic B. A mechatronic approach for the detection of wheel slip/slide and antislip control of locomotive with AC traction motors. *American journal of mechanics and applications*. 2017. Vol. 5. Iss. 6. P. 47–52. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20170506.11>
9. Jacobs S., Vandenbossche L., Attrazic E. How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design. A Serviceable Contribution to Electric Vehicles. *IEEE Electrification Magazine*. 2019. Vol. 7. Iss. 1. P. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.1109/mele.2018.2889550>
10. Sahoo S. K., Bhattacharya T. Rotor Flux-Oriented Control of Induction Motor With Synchronized Sinusoidal PWM for Traction Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 31. Iss. 6. P. 4429–4439. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2475398>
11. Sequeira, J. L., Casimiro, T. M. Portable steam engines and traction engines and their use in rural areas : The case of Lezíria Ribatejana, Portugal. *Industrial Archaeology Review*. 2018. Vol. 40. Iss. 1. P. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.1080/03090728.2018.1430921>
12. Tudor E., Strambeanu D., Lipcinski D., Nicolaie S., Ilie C., Ovezza D., Tanase N., Voina A., Fartan M. Locomotive Diesel Engine Test Stand with Energy Recovery in the Electrical Network. *2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*. 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/icate49685.2021.9464995>

V. Y. VASYLIEV<sup>1\*</sup>, A. M. AFANASOV<sup>2\*</sup>, O. M. HULIVETS<sup>3\*</sup>, Y. Y. POPUDNIAK<sup>4\*</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332<sup>2\*</sup>Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361<sup>3\*</sup>Dep. «Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 23, e-mail agulivets@outlook.com, ORCID 0000-0003-3410-9605<sup>4\*</sup>Dep. «Architectural Design, Landscaping and Building Materials», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 774 17 47, e-mail 19brit18@ukr.net, ORCID 0000-0002-1383-9863

## Experimental Research of the Energy Efficiency of Accelerated Thermal Tests of Traction Electric Machines

**Purpose.** Heating tests of traction electric machines are the most energy-intensive tests. Taking into account the need to choose a rational variant of the mutual load scheme in order to reduce the consumption of electrical energy during the tests, a study of the amount of total useful energy of the power sources of the stand at hourly and starting current was carried out. **Methodology.** Experimental studies were carried out on a mutual load stand. Rotating machines were used as power sources (voltage booster and linear generator). The voltage and field attenuation coefficient of the traction motors during the tests were kept nominal. The condition of the equality of the final temperature excesses of the tested traction motors for both test modes was the achievement of the same total circuit resistance. For analysis of test results, methods of theoretical research and analytical calculation of electric circuits, theoretical foundations of electrical engineering, mathematical modeling of electrical and energy processes were used. **Findings.** The conducted set of tests on heating the traction motors of electric rolling stock practically showed that the consumption of electrical energy at the starting current is 36% lower compared to the hourly load mode. Tests on the mutual load stand confirmed the practical possibility of accelerated tests of traction electric motors. **Originality.** It has been practically proven that the use of the heating test mode with the starting current ensures an increase in the energy efficiency of the tests and a corresponding reduction in the total electricity consumption for acceptance tests. Further development of practical research is planned for the purpose of determining energy saving reserves during post-repair tests of traction electric motors of highway, quarry and suburban transport. **Practical value.** The results of practical tests can become the basis for modernization of mutual load stands of locomotive repair enterprises for thermal tests of traction motors of direct and pulsating current. The conducted tests allow us to create recommendations for the design of rational schemes of test benches with increased energy efficiency of the system of mutual loading of traction electric machines, which differ by accounting the efficiency of sources and power converters.

**Keywords:** mutual load; test; load mode; heating; traction electric machine; useful energy; temperature; linear generator; voltage booster; test time; hour mode; starting current

### REFERENCES

1. Afanasov, A. M., Arpul, S. V., & Drubetskiy, A. Yu. (2017). Synthesis of systems of mutual loading of drive motors of direct and pulsing current. *Electrification of Transport*, 13, 33-38. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i13.117823> (in Russian)
2. Afanasov, A. M. (2015). Increase of Energy Efficiency of Testing of Traction Electric Machines of Direct and Pulsating Current. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 1, 12-15. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.1.02> (in Russian)
3. Hetman, H. K. (2015). *Teorija elektrychnoji tjaghy: pidruchnyk* (Vol. 2). Dnipropetrovsk: Akcent PP. (in Ukrainian)
4. *Mashyny elektrychni obertovi tjaghovi. Zagaljni tekhnichni umovy (GhOST 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ), 50 DSTU GOST 2582:2017*. (2017). (in Ukrainian)
5. *Pravyla remontu elektrychnykh mashyn elektrovoziv i elektropojizdiv. CT-0063*. (2003). Kyiv: Vydavnychyj dim «SAM». (in Ukrainian)
6. *Pro skhvalennja Energhetychnoji strateghiji Ukrajinny na period do 2035 roku «Bezpeka, energhoefektyvnistj, konkurentospromozhnistj»*. (2017). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top> (in Ukrainian)



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

7. *Pro skhvalennja Nacionaljnoji transportnoji strategiji Ukrainy na period do 2030 roku.* (2021). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> (in Ukrainian)
8. Gavrilovic, B. (2017). A Mechatronic Approach for the Detection of Wheel Slip/Slide and Antislip Control of Locomotive with AC Traction Motors. *American Journal of Mechanics and Applications*, 5(6), 47-52. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20170506.11> (in English)
9. Jacobs, S., Vandenbossche, L., & Attrazic, E. (2019). How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design: A Serviceable Contribution to Electric Vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, 7(1), 39-48. DOI: <https://doi.org/10.1109/mele.2018.2889550> (in English)
10. Sahoo, S. K., & Bhattacharya, T. (2016). Rotor Flux-Oriented Control of Induction Motor With Synchronized Sinusoidal PWM for Traction Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(6), 4429-4439. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2475398> (in English)
11. Sequeira, J. L., & Casimiro, T. M. (2018). Portable Steam Engines and Traction Engines and Their Use in Rural Areas: The Case of Lezíria Ribatejana, Portugal. *Industrial Archaeology Review*, 40(1), 11-17. DOI: <https://doi.org/10.1080/03090728.2018.1430921> (in English)
12. Tudor, E., Strambeanu, D., Lipcinski, D., Nicolaie, S., Ilie, C., Ovezza, D., Tanase, N., Voina, A., & Fartan, M. (2021). Locomotive Diesel Engine Test Stand with Energy Recovery in the Electrical Network. In *2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)* (pp. 1-6). DOI: <https://doi.org/10.1109/icate49685.2021.9464995> (in English)

Надійшла до редколегії: 17.02.2022

Прийнята до друку: 20.06.2022