

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.424.3:621.313.12

С. В. АРПУЛЬ^{1*}, А. М. АФАНАСОВ^{2*}, Д. С. БІЛУХІН^{3*}, В. Є. ВАСИЛЬЄВ^{4*},
О. С. ШАПОВАЛОВ^{5*}, С. Ю. БУРЯК^{6*}

^{1*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта arpul@ukr.net, ORCID 0000-0003-3698-2627

^{2*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{3*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта comandor04@gmail.com, ORCID 0000-0002-2791-617X

^{4*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

^{5*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта shapovalov93as@gmail.com, ORCID 0000-0002-3151-6574

^{6*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта ser.buryak@gmail.com, ORCID 0000-0002-8251-785X

Визначення раціонального режиму взаємного навантаження тягових двигунів магістральних електровозів

Мета. Реальний стан багатьох наявних станцій із випробування тягових електромашин не відповідає сучасним вимогам щодо організації ремонту й технічного контролю. На більшості таких станцій використовують стенди взаємного навантаження з низькою енергетичною ефективністю. Основною метою роботи є визначення раціонального режиму навантаження тягових електромашин, який забезпечить зниження сумарної потужності джерел живлення випробувальної станції та підвищення енергетичної ефективності і якості випробувань. **Методика.** Методологічною основою роботи є загальні теоретичні положення й принципи системного підходу теоретичної електротехніки, теоретичної механіки, теорії електричних машин та перетворювачів. Обґрунтування енергетичних та електромеханічних принципів взаємного навантаження тягових електромашин виконано з використанням основ узагальнення й систематизації фізичних величин і понять, теорії електричних кіл, теорії механічних систем, теорії електричних машин. Аналіз теплових процесів та енергетичних показників системи випробування електромашин виконано з використанням теорії нагрівання однорідного твердого тіла та відомих методів розрахунку теплових схем. Результати теоретичних досліджень підтверджено експериментально. **Результати.** Проведений аналіз виразу для визначення коефіцієнта енергетичної ефективності нагрівання обмоток тягових електромашин, отриманого в роботі, показує, що найбільш раціональними під час випробувань на нагрівання тягових двигунів електрорухомого складу магістрального транспорту є пусковий струм. Використання цього струму навантаження дозволяє знизити витрати електроенергії на випробування на 20–30 % (порівняно з годинним режимом) без зниження якості випробувань, а також зменшує час випробувань на нагрівання в 3 – 4 рази. **Наукова новизна.** Науково обґрунтовано доцільність проведення випробувань на нагрівання тягових двигунів магістрального електрорухомого складу за струму навантаження, який дорівнює струму пускового режиму, що забезпечує підвищення енергетичної ефективності випробувань та відповідне зменшення загальних витрат електроенергії на прийнятно-здавальні випробування. Запропоновано метод аналітичного визначення вагових коефіцієнтів впливу на перевищення температури обмотки якоря електричних втрат, використання якого дозволяє оцінити вплив режимів взаємного навантаження випробовуваних тягових електромашин на ступінь розбіжності теплових навантажень обмоток їх

якорів. **Практична значимість.** Визначення раціональних режимів взаємного навантаження тягових електричних машин дозволяє зменшити витрати електроенергії та скоротити час на проведення їх випробувань на нагрівання. Крім того, стає можливим запропонувати спосіб оцінювання якості приймально-здавальних випробувань тягових електричних машин, у якому враховано ступінь розбіжності теплових навантажень обмоток.

Ключові слова: навантаження; випробування; нагрівання; струм; напруга; тягова електромашини; режим випробування; час; ефективність; коефіцієнт; температура

Вступ

Особливістю тягових електричних двигунів (ТЕД) електровозів, що відрізняє їх від звичайних електродвигунів великої потужності, є компактність конструкції у зв'язку з обмеженим простором їх розміщення й умовами монтажу. Невеликі розміри ТЕД продиктовані необхідністю максимально використати внутрішній простір машини, що, у свою чергу, призводить до більш високої робочої температури її вузлів порівняно з електричними машинами загальнопромислового виробництва.

Надійна й безвідмовна робота електричної машини як складного пристрою залежить від надійності роботи її складових частин – магнітної системи, обмоток, а для двигунів постійного струму – колектора й щіткового пристрою. Вихід з ладу будь-якої із цих частин призводить до відмови в роботі всієї машини.

У цілому по мережі українських залізниць на сьогодні дні найчастіше застосовують тягові електродвигуни НБ–418К6 і ТЛ–2К1 (36 і 38 % від загальної кількості ТЕД). Аналіз статистичних даних щодо відмов тягових електродвигунів показав, що на зазначені типи припадає майже 50 % усіх псувань і несправностей.

Найбільша кількість відмов електродвигунів пов'язана з виходом із ладу ізоляції через перевищення допустимих норм теплового стану, вплив механічних зусиль (тиск, вібрація й удари), вологи, агресивного середовища, а також інші чинники. При цьому однією з головних причин виникнення несправностей як для машин постійного, так і змінного струму є порушення їх теплового стану (робота з недостатнім охолодженням або взагалі без нього). З огляду на те, що тягові електродвигуни ЕРС і постійного, і змінного струму працюють в однакових важких умовах експлуатації і навантажень, а також на те, що системи охолодження двигунів є аналогічними, можна зробити висновок, що застосовувана в ТЕД ізоляція буде схильна до передчасного старіння. Температура електродви-

гуна впливає на ізоляцію обмоток, на роботу підшипників та інші активні елементи машини. Гранично допустимі температури активних частин належать до числа найважливіших чинників, які обмежують потужність ТЕД, і значно впливають на підвищення надійності й ресурсу, а також на величину граничної одиничної потужності.

Таким чином, одним з основних факторів, що впливає на термін служби ізоляції обмоток ТЕД, є їх тепловий стан. Тому необхідний постійний контроль за температурою вузлів двигуна під час випробувань у разі взаємного навантаження.

Мета

Основною метою роботи є вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсувального струму шляхом обґрунтування режимів їх навантаження, щоб забезпечити зниження сумарної потужності джерел живлення випробувальної станції, підвищити енергетичну ефективність та якість випробувань. Досягнення поставленої мети передбачає виконання таких завдань:

– отримати аналітичні вирази для визначення енергетичної ефективності нагрівання обмоток випробовуваної тягової електричної машини

– подати тягову електричну машину у вигляді відношення зміни її сумарної термічної енергії до сумарної енергії втрат у ній;

– обґрунтувати можливість підвищення енергетичної ефективності випробування тягових двигунів електрорухомого складу магістрального залізничного транспорту на нагрівання за рахунок збільшення струму навантаження до пускового значення.

Методика

Чинний стандарт [9] передбачає перевірку всіх (як нових, так і тих, що пройшли ремонт) тягових електродвигунів на нагрівання. З урахуванням їх теплових параметрів за

номінальної кількості охолоджувального повітря.

Перевірку тягових електродвигунів на нагрівання виконують із використанням таких їх теплових параметрів, як перевищення температури τ_{∞} , що встановилося, і постійна часу нагрівання T [10]. Перевищення температури обмоток тягових електричних машин визначають за графіками, що показують залежність перевищення температури τ від часу t за певних значень струму й номінальної кількості охолоджувального повітря. Ці графіки будують за результатами теплових випробувань тягових електричних машин на стенді: у разі постійного навантаження вимірюють температури обмоток через певні проміжки часу й наносять на графік. Аналогічні графіки будують для інших струмів.

Програма випробувань передбачає:

– вимірювання опору обмоток постійного струму в практично холодному стані;

– створення режимів нагрівання й охолодження за різних струмів якоря та за різної кількості охолоджувального повітря, а саме:

$Q = Q_{НОМ}$; $Q = 0,75Q_{НОМ}$; $Q = 0,5Q_{НОМ}$;
 $Q = 0 \text{ м}^3/\text{хв.}$

Вимірювання опору обмоток проведено методом вольтметра-амперметра приладами класу точності 0,5. Значення опорів зведено до температури 20 °С.

Режими нагрівання й охолодження створювали за номінального значення ступеня ослаблення збудження, на робочому струмі (постійному або пульсувальному), за схемою взаємного навантаження з лінійним генератором і вольтододатковою машиною. Випробування полягали у визначенні перевищення температур обмоток двигуна над охолоджувальним повітрям і визначенні величини нагріву колектора. Перевищення температур визначали за різних струмів якоря й різної кількості охолоджувального повітря методом опору відповідно до [9]. Температуру колектора, охолоджувального й навколишнього повітря вимірювали ртутними термометрами. Кількість продуваного через двигун повітря, контролювали за допомогою водяного манометра за величиною статичного тиску в колекторній камері відповідно до кривої $H_{СТ}(Q)$.

Відповідно до закону нагрівання однорідного твердого тіла [1], перевищення температури тягових електродвигунів τ , °С визначають аналітично:

$$\tau = \tau_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}, \quad (1)$$

де τ_0 – початкове перевищення температури для розрахункового проміжку часу, °С; τ_{∞} – значення перевищення температури обмоток якоря, що встановилося, °С; e – основа натуральних логарифмів; T – постійна часу нагрівання, хв., що відповідає такому часу, упродовж якого нагрілася б обмотка ТЕД до температури, що встановилася, за повної відсутності тепловіддачі.

У разі зміни кількості охолоджувального повітря Q певним чином змінюватимуться й теплові параметри. Для набуття достовірного значення τ під час виконання тягових розрахунків у формулу (1) необхідно підставляти змінні значення τ_{∞} і T . З метою отримання залежностей $\tau_{\infty}(I)$ і $T(I)$ за змінної кількості охолоджувального повітря, необхідно виконати статистичну обробку наявних кривих нагрівання ТЕД. Для цього потрібно провести розрахунки за такою методикою:

а) за наявними кривими нагрівання обчислити постійну часу нагрівання T для різних значень струму якоря I за певних величин кількості повітря Q , що охолоджує ТЕД;

б) розрахувати залежність $T(I)$ для певних значень Q ;

в) за наявними кривими нагрівання визначити значення перевищення температури τ_{∞} , що встановилося, для різних значень струму якоря I за постійної величини Q ;

г) побудувати залежності $\tau_{\infty}(I)$ для певних значень Q .

Для обчислення постійної часу нагрівання якірної обмотки T використовуємо аналітичний метод [2], згідно з яким T визначаються з формули:

$$\tau = \tau_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (2)$$

Тоді шляхом логарифмування й подальшого перетворення отримуємо:

$$T = -\frac{t}{\ln \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{\infty}} \right)}. \quad (3)$$

Через відсутність у початкових даних функціональної залежності $\tau(t)$ для розрахунку у формулу (3) можна підставити тільки значення t і τ узяті з експериментальної кривої нагрівання, наявної в протоколі випробувань.

Для інших значень t і відповідних їм значень τ розрахунки виконано аналогічно.

У зв'язку з тим що сьогодні використовують в основному ступінчасте керування продуктивністю вентиляторів, для виконання тягових розрахунків під час перевірки можливості водіння поїздів локомотивами, обладнаними пристроями керування продуктивність вентиляторів, досить знати два значення T : значення Q_H і те значення Q , на яке перемикають вентилятори.

Результати

Режим навантаження тягових електромашин під час випробування характеризується такими параметрами, як:

- напруга на колекторі;
- струм навантаження;
- коефіцієнт ослаблення поля;
- витрата повітря, що охолоджує.

Розглянемо кожен із цих параметрів щодо можливості їхнього впливу на раціональність режиму навантаження тягових електромашин під час випробування.

Як критерії раціональності будемо розглядати:

- мінімум сумарної наведеної потужності джерел випробувального стенда;
- максимум енергетичної ефективності процесу випробування;
- максимум якості випробувань.

Відповідно вимогам [9], випробування на нагрівання тягових електродвигунів необхідно проводити за номінальної напруги, при цьому

частоту обертання випробовуваних електромашин визначають за струмом навантаження та їх електромеханічними характеристиками. У разі відхилення магнітних характеристик випробовуваних електромашин від типових залежностей їх частоти обертання за номінальної напруги також відрізнятимуться від типового значення, що відповідає номінальному (годинному) струму.

Напруга на колекторі. Результати досліджень [11] показують, що зміни випробувальної напруги у вузьких межах ($\pm 5\%$) не надають помітного впливу на характер протікання теплових процесів в обмотках випробовуваних електромашин. Отже, під час проведення випробувань на нагрівання немає необхідності в жорсткій стабілізації випробувальної напруги на рівні номінального значення. І більш раціонально, із точки зору керованості системи взаємного навантаження, буде стабілізувати частоту обертання якорів випробовуваних електромашин до значення, що відповідає струму навантаження за типовою електромеханічною характеристикою тягової електромашини.

Забезпечення величини напруги на колекторі, близької до номінального значення, під час проведення випробувань на нагрівання є вимогою якісної перевірки потенційних умов на колекторі та стійкості проти дугоутворення. Таким чином, випробувальну напругу не можна розглядати як фактор, варіювання якого впливає на критерії вибору раціонального режиму випробування.

По суті, вимоги до напруги на колекторі випробовуваної електромашини є обмеженням завдання вибору раціонального режиму навантаження.

Коефіцієнт ослаблення поля. І за вимогами [9], і з точки зору забезпечення якості випробувань на нагрівання коефіцієнт ослаблення поля повинен дорівнювати номінальному значенню. Для перевірки комутації коефіцієнт ослаблення поля потрібно взяти мінімальним, що зумовлено вимогами якості цієї перевірки [9].

Вимога до значення коефіцієнта ослаблення поля, як і вимоги до випробувальної напруги, є обмеженням завдання вибору раціонального режиму навантаження.

Витрата охолоджувального повітря. Як [9], так і [7] допускають, за узгодженням із замовником, проведення випробувань на нагрівання

в разі витрати охолоджувального повітря в кількості, меншій ніж номінальна, зокрема і вентиляції. При цьому еквівалентні значення струму навантаження випробовуваних електромашин встановлюють меншими за годинний і тривалий струм. Це зумовлено нагріванням частин випробовуваної електромашини за годину часу випробування до значень перевищення температури, що відповідають перевищенню в номінальному режимі [9].

Економічний ефект від упровадження такого методу випробувань на нагрівання полягає, як правило, в економії електроенергії, витраченої на вентиляцію, та у відсутності вентиляційної системи на випробувальній станції [5, 8]. Слід зазначити, що випробування на нагрівання без вентиляції ще й значно підвищує енергетичну ефективність нагрівання обмоток електромашин за рахунок зниження енергії тепловіддачі [3].

Істотним недоліком випробувань на нагрівання без вентиляції є відсутність перевірки ефективності охолодження елементів електромашини, яку визначають потужністю тепловіддачі [6]. За такого методу випробування малий вплив на характер теплообмінних процесів мають теплові опори конвективної та кондуктивної тепловіддачі, а також аеродинамічний опір електромашини. Усе це призводить до зниження якості випробувань на нагрівання.

Ще одним істотним недоліком випробувань на нагрівання без вентиляції, що знижує їх якість, є робота випробовуваних електромашин за еквівалентних струмів, значно менших за годинний і тривалий струм електромашини [5]. За таких умов навантаження знижується якість перевірки стійкості проти дугоутворення протягом випробувань на нагрівання. Незважаючи на те, що метою випробувань на нагрівання є визначення перевищення температури частин електромашини, деякі випадки бракування електромашин пов'язані з появою кругового вогню під час цього випробування.

Можливою перевагою проведення випробувань на нагрівання без вентиляції могла б бути менша наведена сумарна потужність джерел випробувального стенда, але в [9] передбачена перевірка комутації, яка потребує можливості встановлення значення струму навантаження нагрітих електромашин, що дорівнює пусковому струму. Отже, у діапазоні зміни від нуля до

пускового значення величина струму навантаження, яку обирають для проведення випробувань на нагрівання, на сумарну величину наведеної потужності джерел випробувального стенда не впливає.

Струм навантаження. За вимогами [9], струм навантаження електромашин під час випробування на нагрівання повинен дорівнювати годинному значенню. При цьому і [9], і [7] допускають проведення випробувань за еквівалентних струмів, що дають перевищення температур обмоток електромашин, які відповідають тривалому режиму.

Одним із критеріїв вибору раціонального режиму навантаження є максимум коефіцієнта енергетичної ефективності процесу нагрівання обмоток електромашин.

Як показали результати попередніх досліджень, величина струму навантаження впливає на енергетичну ефективність випробувань на нагрівання та загальну витрату електроенергії на випробування. Проведемо аналіз виразу коефіцієнта енергетичної ефективності процесу нагрівання, отриманого в [3]:

$$k_{\text{ефн}} = \frac{T_e \cdot \tau_1}{\tau_\infty (t_1 + \alpha (\tau_\infty t_1 - \tau_1 T_e))}, \quad (4)$$

де T_e – еквівалентна постійна часу нагрівання; τ_1 – перевищення температури обмотки наприкінці випробування; τ_∞ – перевищення температури, що встановилося; t_1 – час випробувань на нагрівання; α – температурний коефіцієнт опору.

Час проведення випробувань на нагрівання визначають за формулою:

$$t_1 = T_e \ln \frac{\tau_\infty}{\tau_\infty - \tau_1}. \quad (5)$$

Значення перевищення температури τ_1 , відповідно до [9], беруть для кожної частини електричної машини (якір, полюси) таким, яке дорівнює максимально допустимому значенню, що відповідає класу нагрівостійкості ізоляції. Для більшості типів тягових електромашин обмоткою, що лімітує за нагріванням, є обмотка якоря [4], тому далі розглядатимемо перевищення температури саме цієї обмотки. При цьому необхідно відзначити, що вибір раціонального струму

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

навантаження для тягових електромашин з іншими обмотками, що лімітують, буде аналогічним за принципом.

Таким чином, у формулі (4) параметрами, що визначають критерій енергетичної ефективності $k_{\text{ефн}}$, є τ_{∞} і T_e . Як указано вище, еквівалентну постійну часу T_e для тягових двигунів можна брати постійною й незалежною від струму навантаження [4]. А перевищення температури τ_{∞} , що встановилося, є функцією струму навантаження, яку можна вважати відомою для кожного типу тягової електромашини [4].

Характер такої залежності наведено на рис. 1. Як було зазначено, залежність $\tau_{\infty}(I)$ із допустимим ступенем спрощення можна вважати параболічною.

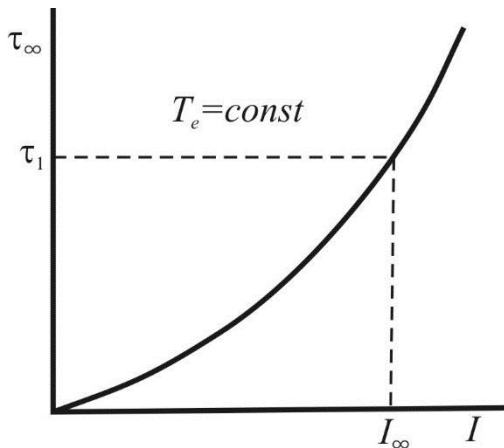


Рис. 1. Характер залежності $\tau_{\infty}(I)$

Fig. 1. Nature of dependence $\tau_{\infty}(I)$

З аналізу формул (4) і (5) можна зробити висновки, що за струму навантаження I , для якого $\tau_{\infty}(I) < \tau_1$, час випробування t_1 буде прагнути до нескінченності, а коефіцієнт енергетичної ефективності $k_{\text{ефн}}$ дорівнює нулю.

Умова $\tau_{\infty}(I) < \tau_1$ може бути представлена у вигляді:

$$I < I_{\infty}, \quad (6)$$

де I_{∞} – тривалий струм тягового електродвигуна (рис. 1).

Тоді матиме місце вираз:

$$\tau_1 \rightarrow \infty, \quad k_{\text{ефн}} = 0 \quad \text{за } I < I_{\infty}.$$

У разі зростання струму навантаження I та відповідного зростання перевищення $\tau_{\infty} \cdot t_1$ зменшується, а $k_{\text{ефн}}$ збільшується.

У випадку прагнення значень I і τ_{∞} до нескінченності час випробування t_1 буде прагнути до нуля, а коефіцієнт енергетичної ефективності – до одиниці. Прямая лінія $k_{\text{ефн}} = 1$ є асимптотою для характеристики $k_{\text{ефн}}(I)$:

$$\lim_{I \rightarrow \infty} t_1 = 0; \quad \lim_{I \rightarrow \infty} k_{\text{ефн}} = 1. \quad (7)$$

Характери залежностей $k_{\text{ефн}}(I)$ і $t_1(I)$ графічно представлені на рис. 2.

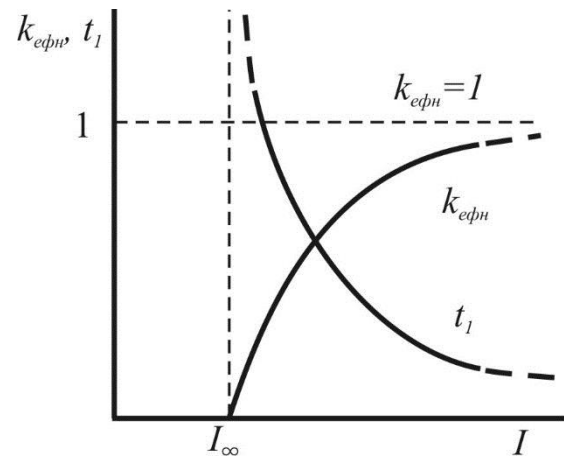


Рис. 2. Характери залежностей $k_{\text{ефн}}(I)$ і $t_1(I)$

Fig. 2. Nature of dependencies $k_{\text{ефн}}(I)$ and $t_1(I)$

Іншим критерієм вибору оптимального режиму навантаження є мінімум максимальної наведеної потужності джерела випробувального стенда. Цей критерій був використаний під час вибору раціональних схем навантаження випробуваних тягових електромашин.

Мінімально допустимим значенням підведеної потужності джерела живлення є $\sum \bar{P}_{\text{дж}}(I_{\text{ПУСК}})$. Це зумовлено необхідністю перевірки комутації за пускового струму. Таким чином, діапазон зміни струму I , у якому слід шукати його раціональне значення, може бути представлений у вигляді:

$$I \in [I_{\text{ПУСК}}; \infty). \quad (8)$$

Аналіз залежностей $k_{\text{ефн}}(I)$, отриманих для реальних типів тягових електродвигунів [2], показує, що збільшення струму навантаження від годинного до пускового значення призводить до підвищення $k_{\text{ефн}}$ приблизно в 1,5 раза, у своїй величині $\sum \bar{P}_{\text{дж}}$ збільшується на 20–30 % (у разі використання одного джерела). Час проведення випробувань на нагрівання за пускового струму навантаження зменшується майже втричі порівняно з годинним режимом.

Подальше підвищення струму навантаження, наприклад, до $2I_{\text{год}}$, призводить до незначного зростання $k_{\text{ефн}}$ та значного збільшення $\sum \bar{P}_{\text{дж}}$. Із цього погляду найбільш раціональним буде значення струму навантаження під час випробувань на нагрівання, що дорівнює пусковому струму:

$$I_{\text{рац}} = I_{\text{пуск}}$$

Наукова новизна та практична значимість

У роботі запропоновано енергетичну ефективність випробування тягових електромашин на нагрівання розглядати як залежність від енергетичної ефективності системи взаємного навантаження й процесу нагрівання, що дозволяє розв'язувати задачу підвищення енергетичної ефективності випробування тягових електричних машин у двох незалежних напрямках, один із яких – підвищення ККД джерел та перетворювачів потужності, а другий – вибір раціональних режимів навантаження. Для визначення енергетичної ефективності нагрівання обмоток випробовуваної тягової електричної машини введено поняття критерію енергетичної ефективності й отримано аналітичні вирази, які подано у вигляді відношення зміни сумарної термічної енергії електромашини до сумарної енергії втрат у ній. Це дозволило обґрунтувати можливість підвищення енергетичної ефективності випробувань на нагрівання тягових двигунів електродвигунового складу магістрального залізничного транспорту за рахунок збільшення струму навантаження до пускового значення. Доцільність проведення випробувань на нагрівання за пускового струму навантаження пов'язана з підви-

щенням енергетичної ефективності випробувань та відповідним зменшенням загальних витрат електроенергії на приймально-здавальні випробування.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, отримані в роботі, дозволили визначити раціональні режими систем взаємного навантаження, використання яких забезпечує зниження собівартості нових і матеріальні витрати на модернізацію наявних станцій для випробування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту в 1,5 – 2 рази. Запропоновано спосіб оцінювання якості приймально-здавальних випробувань тягових електричних машин, у якому враховано ступінь розбіжності теплових навантажень їх обмоток. Результати досліджень упроваджені в навчальний процес Навчально-наукового інституту «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» (ДІІТ) Українського державного університету науки і технологій, курс «Теорія електропривода».

Висновки

1. Режими взаємного навантаження тягових електричних машин, які використовують під час їх приймально-здавальних випробувань, є нераціональними. Наявні станції з випробування тягових електричних машин, стан яких не відповідає сучасним вимогам організації технічного контролю, потребують модернізації, спрямованої на зниження сумарної потужності джерел живлення випробувальної системи, підвищення енергетичної ефективності та якості випробувань.

2. Аналіз енергообмінних і теплових процесів, виконаний у роботі, показав, що загальна енергетична ефективність процесу випробування електромашин на нагрівання може бути представлена у вигляді добутку коефіцієнта енергетичної ефективності системи взаємного навантаження та коефіцієнта енергетичної ефективності процесу нагрівання обмоток тягових електромашин.

3. Використання критеріїв та методу вибору раціональних режимів взаємного навантаження, розроблених у роботі, дозволить установити найбільш раціональні варіанти систем взаємного навантаження для тягових електродвигунів та допоміжних електричних машин постійного й пульсувального струму тягового рухомого

складу магістрального та промислового залізничного транспорту.

4. Аналіз виразу для визначення коефіцієнта енергетичної ефективності нагрівання обмоток тягових електромашин, отриманого в роботі, показує що найбільш раціональними під час випробування на нагрівання тягових двигунів еле-

ктрорухомого складу магістрального транспорту є пусковий струм. Використання цього струму навантаження дозволяє знизити витрати електроенергії на випробування на 20–30 % (порівняно з годинним режимом) без зниження якості випробувань, а також зменшує час випробувань на нагрівання в 3 – 4 рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гетьман Г. К. *Теорія електричної тяги* : підручник : у 2 т. Т. 1. Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2015. 492 с.
2. *ДСТУ ГОСТ 2582:2017. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия (ГОСТ 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ)*. [Действующий от 2017-01-30]. 2017. 50 с.
3. *Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063*. Київ : Видавничий дім «САМ», 2003. 286 с.
4. Afanasov A. M. Increase of energy efficiency of testing of traction electric machines of direct and pulsating current. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2015. Vol 1. P. 12–15. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.1.02>
5. Afanasov A. M., Shapovalov O. S., Holik S. N., Arpul S. V., Bilukhin D. S. Energy efficiency of heat tests for traction electric machines. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. P. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012026>
6. Jacobs S., Vandenbossche L., Attrazic E. How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design. *IEEE Electrification Magazine*. 2019. Vol. 7. Iss. 1. P. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.1109/MELE.2018.2889550>
7. Popa G., Ilie C., Arsene S. Stand for testing electrical machines up to 1,500 kilowatts used in railway traction. *2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*. 2010. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/AQTR.2010.5520829>
8. 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>
9. Sokol Y., Sychenko V., Voitovych Y., Styslo B., Hubsnyi P. AC/DC Converter for DC Traction Power Supply System with High-Speed Train Operation. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2019. P. 116–121. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764207>
10. Sychenko V, Antonov A., Liashuk V., Rudevich N., Belukhin D., Danylov O., ... Bozhko V. Increased controllability of the distributed traction system in emergency mode. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2020. P. 58–62. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160285>
11. Tudor E., Strambeanu D., 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>

S. V. ARPUL^{1*}, A. M. AFANASOV^{2*}, D. S. BILUKHIN^{3*}, V. Y. VASYLIEV^{4*},
O. S. SHAPOVALOV^{5*}, S. Y. BURIYAK^{6*}

^{1*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +380 (056) 373 15 31, e-mail arpul@ukr.net, ORCID 0000-0003-3698-2627

^{2*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +380 (056) 373 15 31, e-mail afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

^{3*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +380 (056) 373 15 31, e-mail comandor04@gmail.com, ORCID 0000-0002-2791-617X

^{4*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +380 (056) 373 15 31, e-mail wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

^{5*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, +380 (056) 373 15 31, e-mail shapovalov93as@gmail.com, ORCID 0000-0002-3151-6574

^{6*}Dep. «Automatics and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail ser.buryak@gmail.com, ORCID 0000-0002-8251-785X

Determination of the Rational Mode of Mutual Loading of Traction Engines of Main Electric Locomotives

Purpose. The actual state of many of the existing testing stations for traction electric machines does not meet modern requirements for the organization of repair and technical control. At most of these stations, mutual loading stands with low energy efficiency are used. The purpose of the work is to determine the rational mode of loading electric traction machines, which will ensure a decrease in the total power of the power sources of the test station, an increase in energy efficiency and the quality of tests. **Methodology.** The methodological basis of the work is the general theoretical provisions and principles of the systematic approach of theoretical electrical engineering, theoretical mechanics, the theory of electric machines and converters. The substantiation of the energy and electromechanical principles of mutual loading of traction electric machines is performed using the basics of generalization and systematization of physical quantities and concepts, the theory of electric circuits, the theory of mechanical systems, and the theory of electric machines. The analysis of thermal processes and energy parameters of the electric machine test system was performed using the theory of heating a homogeneous solid body and known methods of calculating thermal circuits. The results of theoretical studies have been confirmed experimentally. **Findings.** The analysis of the expression for determining the energy efficiency coefficient of heating the windings of traction electric machines, obtained in the work, shows that the starting current is the most rational when testing the traction motors of electric rolling stock of mainline transport for heating. The use of this load current allows reducing the electricity consumption for tests by 20-30% (compared to the hourly mode) without reducing the quality of tests, as well as reduces the time of heating tests by three to four times. **Originality.** The expediency of conducting the heating tests of traction motors of main electric rolling stock with a load current equal to the current of the start-up mode has been scientifically substantiated, which ensures the energy efficiency increase of the tests and a corresponding reduction in the total cost of electricity for acceptance tests. The method of analytical determination of the weighting coefficients of influence on the temperature excess of the armature winding of electric losses was proposed, the use of which allows evaluating the influence of the mutual loading modes of the tested traction electric machines on the discrepancy degree of the thermal loads of their armature windings. **Practical value.** The results of theoretical studies allow determining the rational modes of mutual loading of traction electric machines, which make it possible to reduce the electricity consumption for conducting their heating tests and shorten the time of conducting heating tests. In addition, it becomes possible to propose a method of evaluating the quality of acceptance tests of traction electric machines, which takes into account the discrepancy degree in the thermal loads of the windings.

Keywords: load; test; heating; current; voltage; traction electric machine; test mode; time; efficiency; coefficient; temperature

REFERENCES

1. Hetman, H. K. (2015). *Teorija elektrychnoji tzhaghy: pidruchnyk* (Vol. 1). Dnipropetrovsk: Akcent PP. (in Ukrainian)
2. *Mashiny elektricheskije vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya (GOST 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ)*, 50 DSTU GOST 2582:2017. (2017). (in Russian)
3. *Pravyla remontu elektrychnykh mashyn elektrovoziv i elektropojizdiv. CT-0063*. (2003). Kyiv: Vydavnychyj dim «SAM». (in Ukrainian)

4. 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 English)
5. Afanasov, A. M., Shapovalov, O. S., Holik, S. N., Arpul, S. V., & Bilukhin, D. S. (2020). Energy efficiency of heat tests for traction electric machines. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 985, pp. 21-30). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012026> (in English)
6. Jacobs, S., Vandebossche, L., & Attrazic, E. (2019). How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design. In *IEEE Electrification Magazine* (Vol. 7, pp. 39-48).
DOI: <https://doi.org/10.1109/MELE.2018.2889550> (in English)
7. Popa, G., Ilie, C., & Arsene, S. (2010). Stand for testing electrical machines up to 1,500 kilowatts used in railway traction. In *2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)* (pp. 64-70). DOI: <https://doi.org/10.1109/AQTR.2010.5520829> 64-70 (in English)
8. 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, 11-17.
DOI: <https://doi.org/10.1080/03090728.2018.1430921> (in English)
9. Sokol, Y., Sychenko, V., Voitovych, Y., Styslo, B., & Hubsnyi, P. (2019). AC/DC Converter for DC Traction Power Supply System with High-Speed Train Operation. In *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)* (pp. 116-121). DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764207> (in English)
10. Sychenko, V., Antonov, A., Liashuk, V., Rudevich, N., Belukhin, D., Danylov, O., ... & Bozhko, V. (2020). Increased controllability of the distributed traction system in emergency mode. In *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)* (pp. 58-62).
DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160285> (in English)
11. Tudor, E., Strambeanu, D., & 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> (in English)

Надійшла до редколегії: 19.11.2021

Прийнята до друку: 18.03.2022