

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 004.9:621.313.2

А. М. АФАНАСОВ^{1*}, С. В. АРПУЛЬ^{2*}, В. Є. ВАСИЛЬЄВ^{3*}, О. О. ГОЛОЛОВОВА^{4*},
С. М. ГОЛІК^{5*}

^{1*}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

^{2*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта arpul@ukr.net, ORCID 0000-0003-3698-2627

^{3*}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

^{4*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

^{5*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 904 51 46, ел. пошта diit-ers@ukr.net, ORCID 0000-0002-7697-3832

Автоматизовані системи керування взаємним навантаженням тягових електромашин

Мета. Проведення випробувань електричних машин повинно бути максимально об'єктивним і нести достовірну інформацію про якість виготовлення або ремонту електричної машини. Під час випробувань змінюються параметри сумарної потужності джерел випробного стенда, енергетична ефективність кожного процесу випробування, розбіжності теплових навантажень обмоток якорів та обмоток збудження. Для виконання повного обсягу випробування електричної машини необхідно обладнати випробні стенди системами автоматичного керування процесом взаємного навантаження. У зв'язку з цим у нашій роботі передбачено провести аналіз різних варіантів виконання систем автоматичного керування. **Методика.** Проведено теоретичні дослідження електромагнітних процесів із використанням математичної моделі системи «джерело напруги – тяговий двигун», яка дозволяє визначити енергетичні показники електричних машин у всьому діапазоні зміни навантажень і напруги під час випробувань. Для аналізу використано методи теоретичного дослідження й аналітичного розрахунку електричних кіл, теоретичних основ електротехніки, математичного моделювання електричних та енергетичних процесів. **Результати.** Виконано аналіз раціональних варіантів побудови функціональних схем систем автоматичного керування з різною кількістю джерел живлення, контурів автоматичного керування, механічними та електричними перетворювачами потужності. Імітаційне математичне моделювання електромагнітних процесів у випробному стенді електричних машин дозволило визначити електричні навантаження елементів силового кола двигунів. Розроблено раціональні функціональні схеми систем автоматичного керування для випробування різноманітних колекторних електричних машин постійного та пульсуючого струму. **Наукова новизна.** Запропоновано раціональні варіанти побудови випробних стендів з електричними й механічними перетворювачами моменту, що враховують змінні процеси навантаження електричних машин під час випробування. Виконано аналіз енергетичної ефективності різних варіантів побудови стендів для випробування електричних машин у всьому діапазоні зміни випробних навантажень і напруги джерел живлення в разі використання автоматичної системи керування процесом взаємного навантаження. **Практична значимість.** Проведені дослідження дозволять розробити рекомендації щодо проектування автоматизованих систем керування випробними стендами для поліпшення їх техніко-економічних характеристик, зменшення витрат електричної енергії під час випробувань.

Ключові слова: система автоматичного регулювання; напруга; баланс напруг; навантаження; взаємне навантаження; струм навантаження; функціональна схема; обмотка збудження; тягова електромашини; випробування електромашин

Вступ

Надійність тягового рухомого складу й ефективність його використання є визначальними умовами ритмічної та стійкої роботи залізничного транспорту.

У зв'язку зі збільшенням обсягів перевезень і підвищенням інтенсивності експлуатації зростають вимоги до експлуатаційної надійності тягового рухомого складу. Найважливішою умовою ефективної експлуатації електрорухомого складу є забезпечення надійної роботи одного з основних його вузлів – тягового двигуна. У сучасних економічних умовах підвищення надійності роботи локомотивів, які перебувають в експлуатації, здійснюють за рахунок підвищення якості випробування найбільш відповідальних вузлів і деталей, упровадження сучасних технологій діагностування.

Основні експлуатаційні характеристики колекторних машин постійного струму, у тому числі й тягових двигунів рухомого складу, значною мірою визначаються їх комутаційною стійкістю. Вирішення цієї задачі неможливе без глибоких теоретичних та експериментальних досліджень в галузі комутації, що дозволяють з'ясувати причини виникнення іскріння під щітками колекторних машин у різних режимах їх роботи і сформулювати заходи з їх усунення. Відомо значна кількість технічних пропозицій, які розробляють не тільки в Україні, але й за кордоном [11–13].

Підвищити якість функціонування тягових електродвигунів в експлуатації можна шляхом удосконалення систем технічного обслуговування під час проведення діагностичних заходів на випробних стендах із метою більш об'єктивного й достовірного контролю технічного стану відповідальних деталей і вузлів.

Відомо, що на комутаційну стійкість впливають відхилення конструкційних і технологічних параметрів електромагнітної та механічної природи, від яких залежить якість випробування тягових електродвигунів. Для таких досліджень необхідно сформулювати й проаналізувати різні варіанти випробних стендів, які повинні містити системи автоматичного керування режимами взаємного навантаження.

Аналіз окремих систем автоматичного керування для їх використання у складі випробних

стендів дозволить оцінити технічний стан тягових електродвигунів на основі поєднання аналогової та цифрової електронної техніки, а також створення спеціальної методики й розрахункових програм обробки діагностичної інформації для досягнення максимальної достовірності випробувань. За такого підходу діагностування тягових двигунів на випробних стендах взаємного навантаження та контроль їх працездатності будуть задовольняти вимоги доступності виміру, достовірності результатів виміру, інформативності й розрізняльної здатності.

Мета

Основною метою нашої роботи є вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму шляхом обґрунтування нових принципів визначення раціональних схем і режимів їх навантаження, що забезпечують зниження сумарної потужності джерел живлення випробної станції, підвищення енергетичної ефективності, як цього вимагають державні закони та постанови [4–9].

Методика

Показники надійності електричної машини як сукупності її властивостей, що обумовлюють здатність задовольняти визначені потреби відповідно до призначення, оцінюють кількісно. Найбільш розповсюдженими показниками надійності є: імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, параметр потоку відмов, напруженість на відмову, ресурс, термін служби, імовірність відновлення.

У стандартах на електричні машини сформульовано технічні вимоги до показників їх якості. Більшість із цих вимог потребує перевірки шляхом випробування електричних машин [10]. До них належать: вимоги до надійності, нагрівання, енергетичних показників, а також вимоги до електричної міцності ізоляції обмоток, механічної міцності обертових частин машини, експлуатаційних показників (таких, як максимальний, початковий пусковий і мінімальний моменти, початковий пусковий струм, швидкість наростання напруги та ін.), вимоги до роботи щіткового вузла колекторних машин, здатності витримувати перевантаження, до шумів і вібрацій, індустриальних радіоперешкод.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

За всіма переліченими, а також за рядом інших вимог до якості електричних машин у стандартах встановлено кількісні показники, а в деяких випадках допуски на них. Під час випробувань перевіряють відповідність вимірних чи розрахованих показників якості вимогам стандартів.

Для досягнення поставленої мети необхідно мати автоматичну систему керування процесом випробування електричних машин.

У роботі було використано такі методи дослідження: математичне моделювання електромагнітних процесів у силових колах тягових двигунів і випробного обладнання (автоматичних системах керування) шляхом чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь, що описують процеси в електричних колах, магнітних колах, а також аналогових і дискретних елементах систем керування; аналіз розподілу струмів і напруг за елементами схеми та визначення енергетичних показників електроенергії.

Результати

Методика визначення раціональних альтернатив, застосована в [2], не враховує особливостей конструкцій і типових параметрів тягових електромашин, які можуть впливати на принципову можливість використання того чи іншого варіанта системи взаємного навантаження під час проведення випробувань конкретного типу тягових електромашин.

Проаналізуємо кожне із раціональних варіантів, щоб з'ясувати можливості його технічної реалізації для окремих кластерів типового ряду тягових електромашин.

Варіант 1. Схема цього варіанта наведена на рис. 1.

Схема містить джерело напруги ДН, випробовувані тягові електромашини М і G та регулятор ослаблення поля РОП. Характеристики керівних параметрів, що відповідають режиму взаємного навантаження електромашин за цим варіантом, мають вигляд:

$$\begin{cases} U_{\text{д}} > 0; \\ \Phi_{\text{д}} > \Phi_{\text{г}}; \\ \Delta\Phi = \Phi_{\text{д}} - \Phi_{\text{г}}. \end{cases} \quad (1)$$

де $U_{\text{д}}$ – напруга джерела живлення, В; $\Phi_{\text{д}}$ – магнітний потік двигуна, Вб; $\Phi_{\text{г}}$ – магнітний потік генератора, Вб.

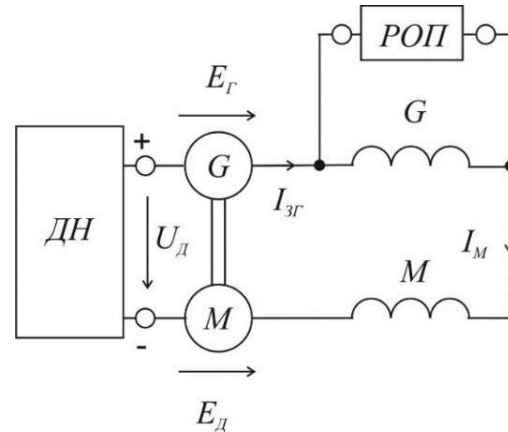


Рис. 1. Раціональний варіант 1

Fig. 1. Rational variant 1

Система рівнянь балансу напруги та механічних моментів для цих варіантів має вигляд:

$$\begin{cases} \sum \Delta U = U_{\text{д}} - C\Delta\Phi\omega_{\text{о}}; \\ \sum \Delta M = C\Delta\Phi i. \end{cases} \quad (2)$$

де C – конструктивний коефіцієнт тягового двигуна; $\Delta\Phi$ – різниця магнітних потоків двигуна і генератора, Вб; $\omega_{\text{о}}$ – частота обертання, об/хв; i – струм, А.

Діаграми, що характеризують баланс напруги в колі якорів у разі зміни струму навантаження випробовуваних електромашин, якісно відповідають універсальним діаграмам, наведеним на рис. 2.

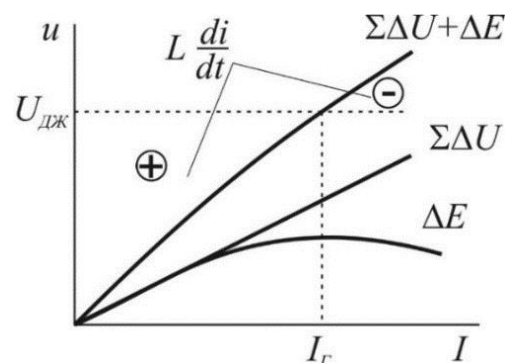


Рис. 2. Діаграми балансу напруг

Fig. 2. Voltage balance diagrams

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Перевагами цієї схеми є:

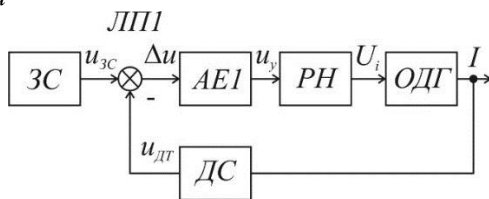
- наявність лише одного джерела потужності;
- відсутність джерел високої напруги;
- однакове теплове навантаження обмоток якорів.

До недоліків цієї схеми належать:

- розбіжність теплових навантажень обмоток збудження;
- необхідність у системі автоматичного регулювання.

Система автоматичного керування режимом взаємного навантаження має бути двоконтурною [1]. Перший контур повинен забезпечувати стабілізацію струму навантаження, а другий – стабілізацію частоти обертання. Структурна схема системи автоматичного керування [3] представлена на рис. 3.

a – a



б – б

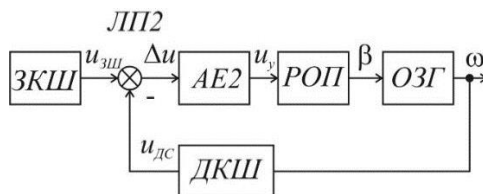


Рис. 3. Функціональна схема системи автоматичного регулювання для варіанта 1

Fig. 3. Functional diagram of the automatic control system for variant 1

Перший контур автоматичного регулювання (рис. 3, *a*) містить: задатчик струму ЗС, датчик струму ДС, ланку порівняння струмів ЛП1, астатичний елемент АЕ1, регулятор напруги РН, обмотки двигуна і генератора ОДГ.

Другий контур автоматичного регулювання (рис. 3, *б*) містить: задатчик кутової швидкості ЗКШ, датчик кутової швидкості ДКШ, ланку порівняння ЛП2, астатичний елемент АЕ2, регулятор ослаблення поля РОП, обмотку збудження генератора ОЗГ.

Цей варіант є раціональним для всіх типів тягових електричних двигунів та допоміжних машин.

Варіант 2. Головною особливістю цього варіанта є наявність механічного конвертора. Регулювання режиму взаємного навантаження в цій схемі здійснюється за рахунок зміни напруги джерела та передавального відношення механічного конвертора. Для цього останній має бути виконаний варіатором, що регулюється. Схему системи взаємного навантаження наведено на рис. 4. Схема містить джерело напруги ДН, випробовуваний тягові електромашини М і G, механічний варіатор В і регулятор ослаблення поля РОП.

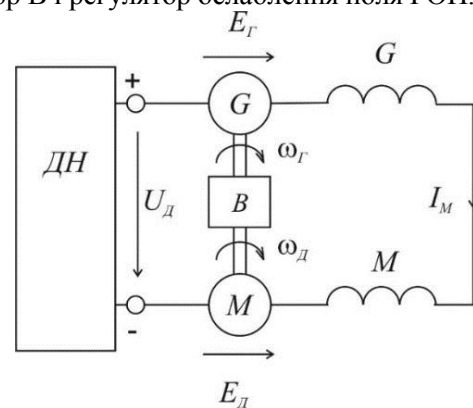


Рис. 4. Раціональний варіант 2

Fig. 4. Rational variant 2

Характеристики керівних параметрів, що відповідають режиму взаємного навантаження електромашин за варіантом АІ, мають вигляд:

$$\begin{cases} U_d > 0; \\ K_\omega < 1; \\ K_M > 1. \end{cases} \quad (3)$$

де K_ω – коефіцієнт передавального відношення варіатора; K_M – коефіцієнт механічного конвертора.

Система рівнянь балансу напруги та механічних моментів для цього варіанта має вигляд:

$$\begin{cases} \sum \Delta U = U_d - C\Phi\omega_d(1 - K_\omega) \\ \sum \Delta M = C\Phi i(K_M - 1) \end{cases}, \quad (4)$$

де ω_d – частота обертання валу двигуна, що випробовується, об/хв.

Діаграми, що характеризують баланс напруги в колі якорів у разі зміни струму навантаження випробовуваних електромашин, якісно

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

відповідають універсальним діаграмам, наведених на рис. 2.

Перевагами цієї схеми є:

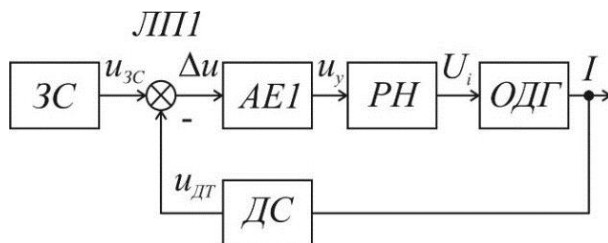
- одне джерело електричної потужності;
- відсутність джерела високої напруги;
- однакове теплове навантаження обмоток якорів та обмоток збудження пари випробовуваних електромашин.

До недоліків схеми належать:

- відносна складність регулювання передавального відношення варіатора;
- необхідність у системі автоматичного керування.

Функціональна схема системи автоматичного регулювання варіанта 2 наведена на рис. 5.

a – a



б – б

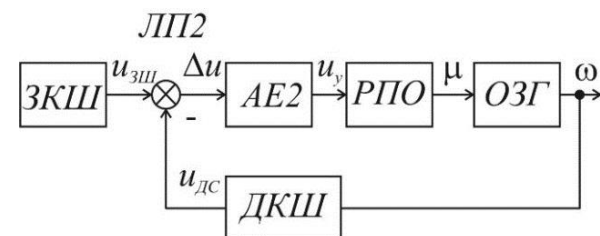


Рис. 5. Функціональна схема системи автоматичного регулювання для варіанта 2

Fig. 5. Functional diagram of the automatic control system for variant 2

Виконання варіаторів із великою потужністю, що відповідає реальній потужності тягових двигунів рухомого складу магістрального та промислового транспорту, надто складне, у зв'язку з чим ця схема є раціональною лише для допоміжних електромашин.

Перший контур системи (рис. 5, *a*) аналогічний контуру стабілізації струму за варіантом 1. Другий контур (рис. 5, *б*) відрізняється від варіанта 1 наявністю регулятора передавального відношення РПВ (замість регулятора ослаблення

поля РОП), який з'єднаний із валами двигуна та генератора ВДГ.

Варіант 3. Головною особливістю цієї схеми, як і схеми за варіантом 2, є наявність перетворювача механічного моменту, що визначає його основні недоліки, пов'язані з труднощами застосування для тягових електромашин великої та середньої потужності. Вирішити цю проблему можна за рахунок створення гібридної схеми, що містить елементи варіанта 1. Така схема наведена на рис. 6

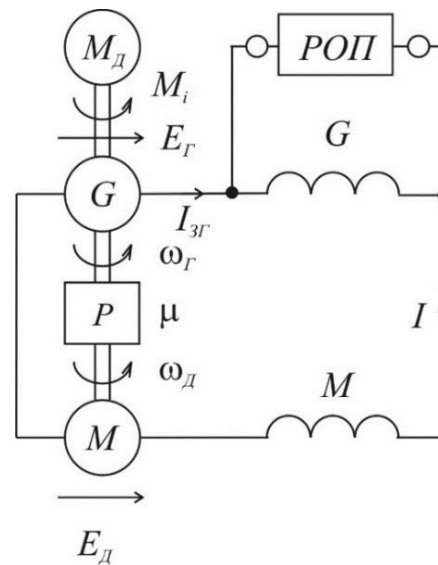


Рис. 6. Раціональний варіант 3

Fig. 6. Rational variant 3

Схема містить додатковий привідний двигун МД, випробовувані електромашини М і G, постійний редуктор Р, регулятор ослаблення поля РОП.

Система рівнянь балансу напруги та механічних моментів для цього варіанта має вигляд:

$$\begin{cases} \sum \Delta U = C \Phi_D \omega_D (K_\omega - 1); \\ \sum \Delta M = M_D - C \Phi_G i (1 - K_M). \end{cases} \quad (5)$$

де Φ_D – магнітний потік двигуна, Вб; M_D – момент на валу двигуна, Н·м.

Діаграми, що характеризують баланс напруги в колі якорів у разі зміни струму навантаження випробовуваних електромашин, якісно відповідають універсальним діаграмам, наведеним на рис. 7.

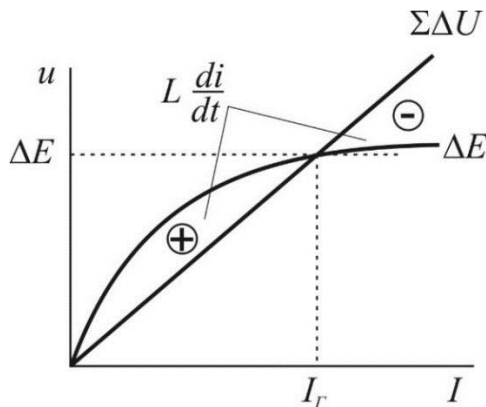


Рис. 7. Діаграми балансу напруг

Fig. 7. Voltage balance diagrams

До переваг цієї схеми належить:

- одне джерело механічної потужності;
- відсутність джерел високої напруги;
- однакове теплове навантаження обмоток якоря;
- мала розбіжність теплових навантажень обмоток збудження.

Недоліками схеми є такі:

- наявність регулятора та перетворювача;
- необхідність у системі автоматичного регулювання;
- необхідність у коробці передач.

Функціональну схему системи автоматичного регулювання струму наведено на рис. 8.

Передавальне число (постійне) механічного редуктора P підбирають таким, щоб за максимально можливою розбіжністю магнітних характеристик випробовуваних електромашин небалансна е.р.с. ΔE в разі вимкненого РОП забезпечувала максимальний струм навантаження I . Ця схема є найбільш раціональною для тягових двигунів електропоїздів та тепловозів.

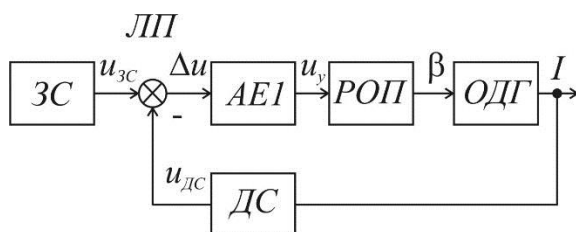


Рис. 8. Функціональна схема контуру регулювання струму для варіанта 3

Fig. 8. Functional diagram of the current control circuit for variant 3

Наукова новизна та практична значимість

У роботі формалізовано загальні енергетичні та електромеханічні принципи взаємного навантаження електричних машин постійного струму, які подані у вигляді умови компенсації втрат потужності у взаємно навантажених електромашинах, множини умов протікання струму навантаження та множини умов обертання роторів, що дозволило визначити повний ряд можливих схемних рішень системи взаємного навантаження електричних машин постійного та пульсувального струму тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту. Отримали подальший розвиток і вдосконалення систематизація та класифікація систем взаємного навантаження тягових електричних машин постійного та пульсувального струму, в основу яких покладено як енергетичні, так і електромеханічні принципи взаємного навантаження, що дозволило збільшити кількість ознак розбиття множини альтернатив під час вирішення задачі вибору раціональних схем навантаження випробовуваних електромашин. Результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили:

- визначити раціональні схеми систем взаємного навантаження, використання яких забезпечує зниження собівартості нових та матеріальні витрати на модернізацію наявних станцій для випробування електричних машин тягового рухомого складу магістрального та промислового залізничного транспорту в 1,5 – 2 рази;

- визначити раціональні режими взаємного навантаження тягових електричних машин, що дозволяють зменшити витрати електроенергії на проведення їх випробувань на нагрів на 20–30 % та скоротити час проведення випробувань на нагрів у 3 – 4 рази;

- розробити функціональні рішення систем автоматичного керування стендами для випробування тягових електричних машин постійного та пульсувального струму, виконаних за раціональними електромеханічними схемами.

Висновки

З погляду мінімум наведеної сумарної потужності джерел, максимум енергетичної ефективності, мінімум розбіжності теплових навантажень обмоток якорів та обмоток збудження, а також із точки зору можливості виконання

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

програми прийнятно-здавальних випробувань тягових електромашин найбільш раціональними є варіанти системи взаємного навантаження 1, 2 і 3.

Варіант 1 є раціональним для випробування всіх типів тягових електродвигунів та допоміжних електромашин.

Варіант 2 є раціональним для випробування допоміжних електромашин.

Варіант 3 є найбільш раціональним для випробувань тягових електродвигунів моторвагонного рухомого складу та тепловозів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасов А. М., Арпуль С. В., Білухін Д. С., Шемет А. Я., Васильєв В. Є., Гололобова О. О., Маркуль Р. В. Використання глибокого послаблення збудження для тягових двигунів магістральних електровозів. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 6 (96). С. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/258106>
2. Афанасов А. М., Арпуль С. В., Друбецкий А. Е. Синтез систем взаємного нагрівання тягових двигателів постійного і пульсуючого току. *Електрифікація транспорту*. 2017. № 13. С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i13.117823>
3. 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)* [Действителен от 2017-03-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 50 с.
4. *Закон України Про енергетичну ефективність*. Документ 1818-IX [Чинний від 2021-10-21]. Законодавство України / ВР України. URL <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-IX#Text>
5. *Концепція Державної програми реформування залізничного транспорту*. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2006 р. № 651-2006-р. Законодавство України / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/651-2006-p#Text>
6. *Проект Концепції Державної цільової економічної програми з енергоефективності та розвитку відновлюваних джерел енергії на 2022-2026 роки*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/pidvishchennya-energoeffektivnosti-nacionalnoyi-ekonomiki-konceptsiya-novoyi-cilovoyi-programi-na-2022-2026-roki>
7. *Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року*. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 грудня 2021 р. № 1803-2021-р. Законодавство України / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-p#Text>
8. *Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”*. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-2017-р. Законодавство України / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top>
9. *Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року*. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.18 р. № 430-р, із змінами, внесеними згідно з Розпорядженням КМ № 321-р від 07. 04. 2021. Законодавство України / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text>
10. Савоськин А. Н., Баранов Л. А., Феоктистов В. П. / под ред. А. Н. Савоськина. *Автоматизация электроподвижного состава*. Москва : Транспорт, 1990. 311 с.
11. 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>
12. 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>
13. Zarri L., Mengoni M., Tani A., Serra G., Casadei D., Ojo J. O. Control Schemes for Field Weakening of Induction Machines. *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (Wemdcd)* (Turin, 26-27 March 2015). Turin, 2015. P. 146-155. DOI: <https://doi.org/10.1109/wemdcd.2015.7194523>

A. M. AFANASOV^{1*}, S. V. ARPUL^{2*}, V. Y. VASYLIEV^{3*}, O. O. HOLOLOBOVA^{4*},
S. M. HOLIK^{5*}

^{1*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail afanasof@ukr.net, ORCID 0000-0003-4609-2361

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

^{3*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail wasiljew@ukr.net, ORCID 0000-0001-7551-2332

^{4*}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 gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

^{5*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (067) 904 51 46, e-mail diit-ers@ukr.net, ORCID 0000-0002-7697-3832

Automated Control Systems for Mutual Loads of Traction Electric Machines

Purpose. Testing of electric machines should be as objective as possible and contain reliable information about the quality of manufacture or repair of electric machines. During the tests, the parameters of the total power of the test bench sources, energy efficiency of each test process, the difference in thermal loads of the armature windings and excitation windings change. To perform the full test of the electric machine, it is necessary to equip test benches with systems for automatic control of the process of mutual loading. The analysis of different variants of automatic control systems is performed in the work. **Methodology.** Theoretical studies of electromagnetic processes using a mathematical model of the system «voltage source – traction motor» were performed. This system allows determining the energy performance of electric machines in the entire range of changes in loads and voltages during the tests. The methods of theoretical research and analytical calculation of electrical circuits, theoretical foundations of electrical engineering, mathematical modelling of electrical and energy processes were used in the analysis. **Findings.** The analysis of rational variants of functional schemes' construction of automatic control systems with various quantity of power supplies, automatic control loops, mechanical and electric power converters is performed. Rational functional schemes of automatic control systems for testing various collector electric machines of direct and pulsating current are developed. **Originality.** Rational variants of construction of test benches with electric and mechanical moment converters taking into account variable processes of loading of electric cars during the test are offered. The analysis of energy efficiency of various variants of construction of test benches for testing electric machines in entire range of change of test loadings and voltage of power supplies in the case of using the automatic control system of mutual loading process is performed. **Practical value.** The conducted research will allow creating recommendations for the design of automated control systems for test benches in order to improve the technical and economic characteristics, reduce the consumption of electricity consumed for testing.

Keywords: automatic control system; voltage; voltage balance; load; mutual load; load current; functional diagram; excitation winding; traction electric machine; testing of electric machines

REFERENCES

1. Afanasov, A. M., Arpul, S. V., Bilukhin, D. S., Shemet, A. Ia., Vasyliiev, V. Ie., Hololobova, O. O., & Markul, R. V. (2021). Deep Attenuation Use for Traction Motors of Mainline Electric Locomotives. *Science and Transport Progress*, 6(96), 84-92. (in Ukrainian)
2. Afanasov, A. M., Arpul, S. V., & Drubetskyi, 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)
3. *Mashyny elektricheskije vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskije usloviya (GOST 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ), 50 DSTU GOST 2582:2017.* (2017). (in Ukrainian)
4. *Zakon Ukrainy Pro enerhetychnu efektyvnist.* Dokument 1818-IX. (2021). Zakonodavstvo Ukrainy/VR Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-IX#Text> (in Ukrainian)
5. *Kontsepsiia Derzhavnoi prohramy reformuvannia zaliznychnoho transportu.* (2006). Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 27 hrudnia 2006 r. No 651-2006-r. Zakonodavstvo Ukrainy/VR Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/651-2006-p#Text> (in Ukrainian)
6. *Proekt Kontsepsii Derzhavnoi tsilovoi ekonomichnoi prohramy z enerhoefektyvnosti ta rozvytku vidnovliuvanykh dzherel enerhii na 2022-2026 roky.* (2022). Retrieved from

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- <https://www.kmu.gov.ua/news/pidvishchennya-energoefektivnosti-nacionalnoyi-ekonomiki-koncepciya-novoyi-cilovoyi-programi-na-2022-2026-roki> (in Ukrainian)
7. *Pro Natsionalnyi plan dii z enerhoefektyvnosti na period do 2030 roku.* (2021). Rozporiadzhennia Kabinet Ministriv Ukrainy vid 29 hrudnia 2021 r. No 1803-2021-r. Zakonodavstvo Ukrainy/VR Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-p#Text> (in Ukrainian)
 8. *Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2035 roku "Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist".* (2017). Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 18 serpnia 2017 r. No 605-2017-r. Zakonodavstvo Ukrainy/VR Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top> (in Ukrainian)
 9. *Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku.* (2021). Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 30.05.18 r. No 430-r, iz zminamy, vnesenymy zghidno z Rozporiadzhenniam KM No 321-r vid 07. 04. 2021. Zakonodavstvo Ukrainy/VR Ukrainy. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> (in Ukrainian)
 10. Savoskin, A. N., Baranov, L. A., & Feoktistov, V. P. (1990). *Avtomatizatsiya elektropodvizhnogo sostava.* (Savoskina, A. N. (Ed.)). Moscow: Transport. (in Russian)
 11. 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)
 12. 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)
 13. Zarri, L., Mengoni, M., Tani, A., Serra, G., Casadei, D., & Ojo, J. O. (2015). Control Schemes for Field Weakening of Induction Machines. In *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (Wemdcd)* (pp. 146-155). Turin, Italy. DOI: <https://doi.org/10.1109/wemdcd.2015.7194523> (in English)

Надійшла до редколегії: 23.11.2021

Прийнята до друку: 21.03.2022