

УДК 621.313.2.077.3:621.313.2.072.2

О. С. ШАПОВАЛОВ^{1*}

^{1*} Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, ул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 233 32 99, ел. пошта: shapovalov93as@gmail.com, ORCID 0000-0002-3151-6574

МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ДОПОМІЖНИХ ЕЛЕКТРОМАШИН ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Мета. Розробка та впровадження енергоефективних схем випробування допоміжних електричних машин рухомого складу вимагає проведення математичного моделювання з метою визначення найбільш раціональної схеми з точки зору якості проведених випробувань, а також мінімізації енерговитрат на проведення самих випробувань. **Методи.** Методологічною основою дослідження є аналітичні методи дослідження, що базуються на складанні розрахункової системи диференціальних рівнянь, розв'язуючи які, можна визначити параметри схеми взаємного навантаження. **Результати.** З огляду на те, що система взаємного навантаження є достатньо складною для розв'язання системою, в роботі було виконано розкладання системи на більш прості схеми заміщення електричної і механічної частини. На основі схем заміщення було створено систему диференціальних рівнянь, яка дозволила створити модель системи взаємного навантаження з трьома вхідними і трьома вихідними параметрами. Розроблену модель достатньо легко можливо реалізувати в спеціалізованих програмних середовищах, наприклад, SIMULINK за допомогою стандартних вбудованих блоків. **Наукова новизна.** Запропоновано раціональну схему випробування допоміжних машин методом взаємного навантаження, з покриттям витрат від одного джерела електричної потужності. **Практична значимість.** Впровадження отриманих результатів підприємствами з ремонту допоміжних машин рухомого складу дозволить знизити матеріальні витрати на проведення ремонтів з одночасним збереженням якості проведених випробувань.

Ключові слова: математична модель, допоміжні машини, випробування електромашин.

Вступ

Колекторні машини постійного струму на сьогодні є найбільш розповсюдженим типом електричних машин які використовуються на рухомому складі залізниць України. Широке розповсюдження даний тип електричних машин отримав завдяки відмінним пусковим та робочим характеристикам, а також простоті в системі керування та регулювання частоти обертання. Проте даний тип електричних машин має достатньо низькі показники надійності, які пов'язані з наявністю колекторно-щіткового вузла, який є найбільш слабким елементом конструкції.

З метою забезпечення надійної роботи електричних машин тягового рухомого складу в обов'язковому порядку мають проходити випробування. Згідно стандарту ДСТУ 2582:2017 [1] кожна виготовлена, а також відремонтована електрична машина обов'язково має пройти приймально-здавальні випробування. Програма випробувань електричних машин (тягових та допоміжних) включає в себе цілий ряд випробувань які проводяться як з навантаження електричних машин, так і без навантаження [2].

Найбільш енерговитратним пунктом в програмі випробувань є випробування на нагрівання [3].

Як правило випробування тягових електричних машин відбувається на стендах взаємного навантаження, за рахунок чого вдається зекономити значну кількість електроенергії. Стосовно допоміжних машин рухомого складу, для випробувань використовувались методи безпосереднього навантаження в яких вся енергія яка підводилась до випробуваної електричної машини розсіювалась в навколишнє середовище. Даний підхід пов'язаний з відносно невеликою потужністю самих машин, здебільшого від 5 до 80 кВт, і відносно низькою ціною електроенергії в минулому. Сьогодні стрімко зростаючі ціни на енергоресурси, розвиток технологій виробництва статичних перетворювачів потужності дає можливість впровадження енергоефективних стендів для випробування допоміжних машин електрорухомого складу.

Постановка завдання дослідження

При розробці автоматизованих випробувальних стендів широко використовуються методи математичного моделювання електромеханічних процесів, за допомогою чого можливо здійснити вибір структури та оцінити енергетичні

показники та характеристики розробленої системи. В роботі [4] було проведено визначення раціональних варіантів системи взаємного навантаження тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму. Стосовно допоміжних машин використання даних схем вимагає додаткового дослідження. Як предмет дослідження було взято схему взаємного навантаження з покриттям всіх втрат від одного джерела електричної потужності.

Матеріал і результати досліджень

Схема системи взаємного навантаження допоміжних електромашин з покриттям всіх втрат джерелом електричної потужності зображена на рис. 1.

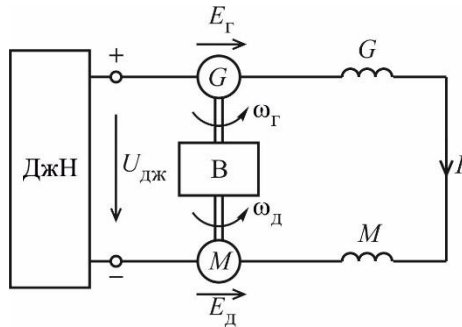


Рис. 1. Схема системи взаємного навантаження

Обмотки якорів та збудження двигуна M і генератора G з'єднані послідовно і підключені до джерела наруги ДжН. Вали електричних машин з'єднані між собою через варіатор B . Всі втрати потужності (електричні і холостого ходу) в даній схемі покриваються одним джерелом ДжН.

Діаграма, що характеризує баланс напруги в колі в залежності від струму навантаження, наведена на рис. 2.

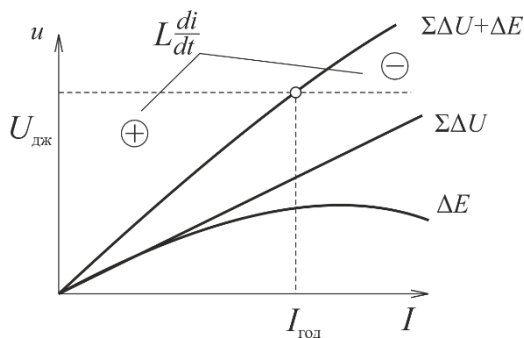


Рис. 2. Діаграма балансу напруг

Характеристики керуючих параметрів, які забезпечують режим взаємного навантаження:

$$U_{дж} > 0;$$

$$K_{\omega} < 0,$$

де $U_{дж}$ – напруга джерела ДжН;

K_{ω} – коефіцієнт передачі кутової швидкості варіатора B

$$K_{\omega} = \frac{\omega_{г}}{\omega_{д}}, \quad (1)$$

де $\omega_{г}$ і $\omega_{д}$ – кутові швидкості валів генератора і двигуна відповідно.

Схема заміщення електричного кола стенда наведена на рис. 3.

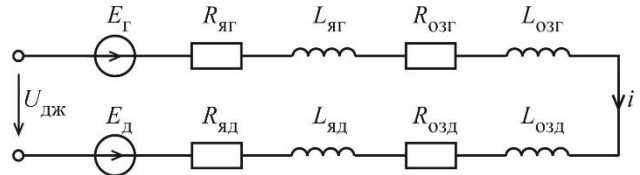


Рис. 3. Схема заміщення електричного кола

На рис. 3 показано:

$E_{г}$, $E_{д}$ – е. р. с. генератора і двигуна відповідно;

$R_{яг}$, $R_{яд}$ – опори обмоток якорів генератора і двигуна відповідно;

$L_{яг}$, $L_{яд}$ – індуктивності обмоток якорів генератора і двигуна відповідно;

$R_{озг}$, $R_{озд}$ – опори обмоток збудження генератора і двигуна відповідно;

$L_{озг}$, $L_{озд}$ – індуктивності обмоток збудження генератора і двигуна відповідно.

Е. р. с. генератора і двигуна можуть бути визначені у вигляді

$$E_{г} = c\Phi_{г}\omega_{г},$$

де c – конструктивна стала електромашин;

$\Phi_{г}$ – магнітний потік генератора;

$\omega_{г}$ – кутова швидкість вала генератора.

$$E_{д} = c\Phi_{д}\omega_{д},$$

де $\Phi_{д}$ – магнітний потік двигуна;

$\omega_{д}$ – кутова швидкість вала двигуна.

Рівняння динамічної рівноваги для схеми на рис. 3 матиме вигляд

$$U_{дж} = \Delta E + \sum R \cdot i + \sum L \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

де ΔE – небалансна е. р. с. двигуна і генератора;

$\sum R$ – сумарний активний опір кола;

$\sum L$ – сумарна індуктивність кола.

$$\Delta E = E_d - E_r ;$$

$$\sum R = R_{яг} + R_{яд} + R_{озг} + R_{озд} ;$$

$$\sum L = L_{яг} + L_{яд} + L_{озг} + L_{озд} .$$

Небалансна е. р. с. може бути представлена у вигляді

$$\Delta E = c\Phi_d \omega_d - c\Phi_r \omega_r .$$

Якщо прийняти умову

$$\Phi_d = \Phi_r = \Phi ,$$

вираз для ΔE можна записати у вигляді

$$\Delta E = c\Phi(\omega_d - \omega_r) .$$

З урахуванням виразу (1) для K_ω вираз для ΔE можна перетворити на вигляд

$$\Delta E = c\Phi\omega_d(1 - K_\omega) . \quad (3)$$

На рис. 4 наведена схема механічної частини системи взаємного навантаження.

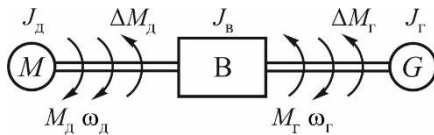


Рис. 4. Схема механічної частини

Електромагнітні моменти двигуна та генератора можуть бути визначені у вигляді:

$$M_d = c\Phi_d i ;$$

$$M_r = c\Phi_r i .$$

З урахуванням рівності $\Phi_d = \Phi_r$ отримаємо

$$M_d = M_r = c\Phi \cdot i . \quad (4)$$

Рівняння динамічної рівноваги для механічної частини системи взаємного навантаження має вигляд

$$M_d = K_\omega M_r + \Delta M_d + K_\omega \Delta M_r + \sum J \frac{d\omega_d}{dt} , \quad (5)$$

де ΔM_d і ΔM_r – моменти опору, обумовлені втратами холостого ходу в двигуні та генераторі відповідно;

$\sum J$ – сумарний момент інерції системи, приведеної до валу двигуна.

З допустимим ступенем спрощення можна припустити, що

$$\Delta M_d = \Delta M_r = \Delta M .$$

Сумарний момент інерції системи, приведений до валу двигуна, можна знайти у вигляді

$$\sum J = J_d + K_\omega^2 \cdot J_r + J_b ,$$

де J_d , J_r – моменти інерції якорів двигуна та генератора відповідно;

J_b – момент інерції варіатора, приведений до валу двигуна.

Момент опору, обумовлений втратами холостого ходу може бути представлений у вигляді суми

$$\Delta M = \Delta M_{\text{мех}} + \Delta M_{\text{маг}} ,$$

де $\Delta M_{\text{мех}}$, $\Delta M_{\text{маг}}$ – моменти опору, обумовлені механічними та магнітними втратами потужності відповідно.

З іншого боку

$$\Delta M = \frac{\Delta P_{\text{xx}}}{\omega_d} ,$$

де ΔP_{xx} – втрати холостого ходу

$$\Delta P_{\text{xx}} = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{маг}} ,$$

де $\Delta P_{\text{мех}}$, $\Delta P_{\text{маг}}$ – механічні та магнітні втрати відповідно.

Механічні втрати є функцією кутової швидкості

$$\Delta P_{\text{мех}} = f(\omega_d) .$$

Магнітні втрати залежать як від частоти обертання (кутової швидкості), так і від магнітного потоку Φ

$$\Delta P_{\text{маг}} = f(\omega_d, \Phi) .$$

Об'єднавши вирази (2) і (3), з урахуванням всіх спрощень, прийнятих вище, після перетворення отримаємо систему рівнянь, що визначають характер електромеханічних процесів в системі взаємного навантаження:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{дж}} = c\Phi\omega_d(1 - K_\omega) + \sum R \cdot i + \sum J \frac{di}{dt} ; \quad (6) \\ c\Phi i(1 - K_\omega) = \Delta M(1 + K_\omega) + \sum J \frac{d\omega_d}{dt} . \quad (7) \end{array} \right.$$

В сталому режимі дана система набуває вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{дж}} = c\Phi\omega_d(1 - K_\omega) + \sum R \cdot i ; \quad (8) \\ c\Phi i(1 - K_\omega) = \Delta M(1 + K_\omega) . \quad (9) \end{array} \right.$$

Помноживши ліву та праву частини рівняння (8) на i , а ліву та праву частини рівняння (9) на ω_d , після перетворень та заміни позначок отримаємо рівняння балансу потужностей у вигляді

$$\begin{cases} P_{дж} = P_{емд} (1 - K_{\omega}) + \sum \Delta P_{ел}; & (10) \\ P_{емд} (1 - K_{\omega}) = \Delta P_{хх} (1 + K_{\omega}), & (11) \end{cases}$$

де $P_{дж}$ – електрична потужність джерела;
 $P_{емд}$ – електромагнітна потужність двигуна;
 $\Delta P_{хх}$ – втрати холостого ходу однієї електричної машини.

Електромагнітна потужність двигуна

$$P_{емд} = E_d \cdot i = c\Phi\omega_d \cdot i.$$

Сумарні електричні втрати в колі електромашини

$$\sum \Delta P_{ел} = \sum R \cdot i^2.$$

Із системи рівнянь (10) та (11) можна отримати загальне рівняння балансу потужностей

$$P_{дж} = \Delta P_{хх} (1 + K_{\omega}) + \sum \Delta P_{ел}.$$

Дослідження електромеханічних процесів в системі взаємного навантаження може бути проведено з використанням моделі, яка відповідає системі диференціальних рівнянь (6), (7), і графічно представлена рис. 5.

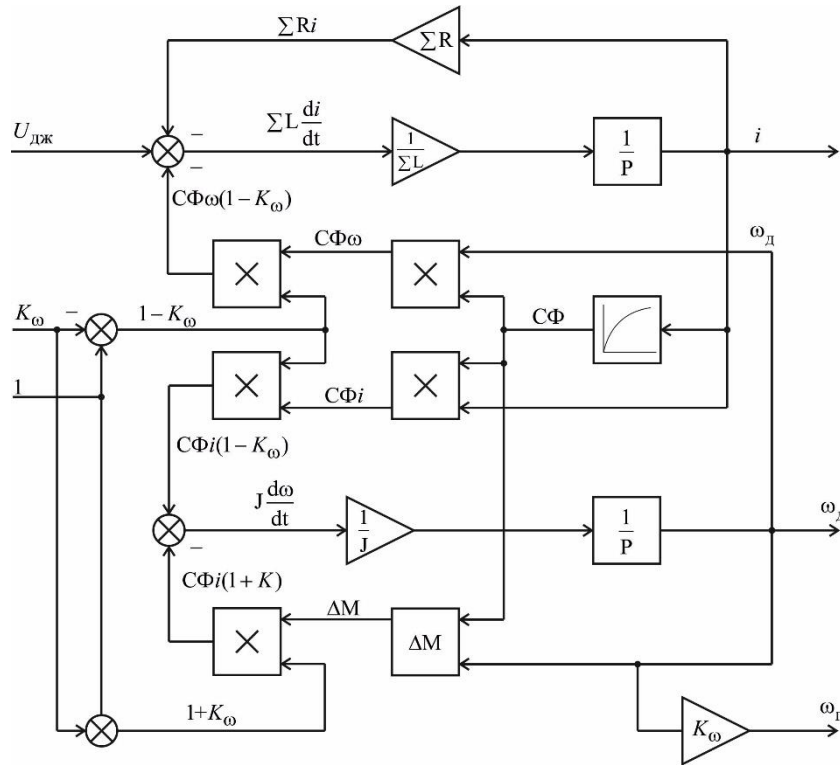


Рис. 5. Модель системи взаємного навантаження

Вхідними параметрами (керуючими координатами) даної моделі є наруга джерела $U_{дж}$ і коефіцієнт передачі кутової швидкості K_{ω} . Вихідними параметрами (керованими координатами) є струм навантаження випробуваних електромашин i та кутова швидкість випробуваного двигуна ω_d (генератора ω_r).

Залежність питомої е. р. с. від струму $c\Phi = f(i)$ доцільно представити у вигляді

$$c\Phi = A \arctg(Bi),$$

де A і B – постійні коефіцієнти, які можуть бути визначені за відомими методиками [5].

Для визначення моменту опору від магнітних втрат в моделі можуть бути використано вираз [6]

$$\Delta P_{маг} = K_{маг} \left(\frac{1}{f} + 0,0127 \right) E^2,$$

де $K_{маг}$ – постійний коефіцієнт;
 f – частота перемагнічування якоря;
 E – е. р. с. електромашини.

Тоді момент опору від даних втрат можна представити у вигляді

$$\Delta M_{маг} = K_{маг} \left(\frac{1}{f} + 0,0127 \right) (c\Phi)^2 \cdot \omega_d.$$

Частота перемагнічування якоря

$$f = \frac{p}{2\pi} \cdot \omega,$$

де p – число пар полюсів електромашини.

Для визначення моменту опору від механічних втрат може бути застосований вираз [7]

$$\Delta M_{\text{мех}} = K_{\text{мех}} (0,65\omega + 0,35),$$

де $K_{\text{мех}}$ – постійний коефіцієнт.

Сумарний момент опору однієї електромашини, обумовлений втратами холостого ходу

$$\Delta M = \Delta M_{\text{маг}} + \Delta M_{\text{мех}}.$$

Висновки

Використання запропонованої математичної моделі системи взаємного навантаження дозволяє визначити параметри джерела потужності, та передатного відношення варіатора, які необхідні для побудови енергоефективних стендів для випробування допоміжних машин електродвигуна.

Впровадження енергоефективних стендів дозволить знизити споживання електричної енергії, яка необхідна для проведення ремонтів, зі збереженням високої якості кінцевої продукції.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ДСТУ ГОСТ 2582:2017 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия (ГОСТ 2582-2013, ИДТ; ИЕС 60349-1:2010,

ИЕС 60349-2:2010, ИЕС) [Действителен от 2017-03-01]. Киев : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 50 с

2. Правила ремонту электрических машин электровозов і електропоїздів. ЦТ-0063. Київ : Видавничий дім «САМ», 2003. – 286 с.

3. Афанасов, А. М. Определение расхода электроэнергии на проведение приёмо-сдаточных испытаний тяговых электрических машин / А. М. Афанасов, С. В. Арпуль, А. С. Шаповалов // Электромагнитная совместимость та безпека на залізничному транспорті. – 2018. – № 16. – С. 51–56. – DOI:10.15802/ecsrt2018/172600.

4. Афанасов, А. М. Системы для испытания электрических машин тягового и моторвагонного подвижного состава магистрального и промышленного транспорта / А. М. Афанасов // Локомотив-информ. – 2015. – № 1 (103). – С. 68–72.

5. Архангельский Б. И. Аналитическое выражение кривой намагничивания электрических машин / Б. И. Архангельский // Электричество. – 1958. – № 1. – С. 14-18.

6. Афанасов, А. М. Определение магнитных потерь в тяговых двигателях электроподвижного состава магистрального и промышленного транспорта / А. М. Афанасов // Збір. наук. праць Донецького інституту залізничного транспорту. – Донецьк, 2014. – Вип. 39. – С. 71–77.

7. Проектирование тяговых электрических машин / под ред. М. Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с

Надійшла до редколегії 15.05.2023.

Прийнята до друку 20.05.2023.

O. SHAPOVALOV

PAPER TITLE SYSTEM MODEL FOR TESTING AUXILIARY ELECTRIC MACHINES OF TRACTIONAL ROLLING STOCK

Purpose. The development and implementation of energy-efficient test schemes for auxiliary electrical machines of rolling stock requires mathematical modeling in order to determine the most rational scheme from the point of view of the quality of the tests performed, as well as to minimize energy costs for conducting the tests themselves. **Methodology.** The methodological basis of the research is the analytical research methods based on the compilation of the calculation system of differential equations by solving which it is possible to determine the parameters of the mutual load scheme. **Findings.** Given the fact that the mutual load system is complex enough to be solved by the system, in the work, the system was decomposed into simpler schemes for replacing the electrical and mechanical parts. A system of differential equations was created on the basis of substitution schemes, which made it possible to create a model of a mutual load system with three input and three output parameters. The developed model can be easily implemented in specialized software environments (for example, SIMULINK) using standard built-in blocks. **Originality.** A rational scheme for testing auxiliary machines by the mutual load method is proposed, with coverage of losses from one source of electrical power. **Practical value.** The implementation of the obtained results by enterprises for the repair of auxiliary rolling stock machines will allow to reduce the material costs of carrying out repairs while maintaining the quality of the conducted tests.

Keywords: mathematical model, auxiliary machines, testing of electric machines.