

Хаустов О.Е. Аспірант PhD. Тел. +380978340377. E-mail : hausz91@gmail.com
(0009-0001-0363-6173)

Любарський Б.Г. Д.т.н., професор. E-mail: lboris1911@ukr.net, (0000-0002-2985-7345)

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002*

ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ ТЕПЛОВИХ МОДЕЛЕЙ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

***Анотація.** Стаття розглядає перспективні методи щодо аналізу теплового стану тягових двигунів які застосовуються на рухомому складі електротранспорту визначено, що перспективним методом аналізу теплового стану є метод еквівалентних теплових схем заміщення. Обґрунтовано, що незалежно від кількості елементів, навіть якщо вона дорівнює нескінченності, система залишається лінійною при переході від зосереджених постійних до розподілених параметрів. Процеси в ній описуються лінійними диференціальними рівняннями, і можна скористатися методом накладення теплових потоків. У режимі, що встановився, це виражається у рівності повного перевищення температури тіла сумі часткових перевищень температур від втрат в різних його частинах. Доведено, що під час перехідного процесу реальна крива нагрівання елемента двигуна будується шляхом підсумовування часткових кривих нагрівання, обумовлених втратами енергії в кожному окремому елементі за відсутності втрат в інших елементах. При дослідженні перехідного процесу необхідно враховувати швидкість поширення тепла в матеріалі та геометричні розміри тягових двигунів. Ці завдання вирішуються на основі сформульованих положень. Запропоновано загальні підходи до створення бази елементів схем заміщення, що дозволяють уніфікувати розробку теплової моделі двигуна в незалежності від його конструктивних особливостей.*

***Ключові слова:** тяговий двигун, тепловий стан двигуна, електротранспорт, схема заміщення*

Haustov O. PhD student. Tel. +380978340377. E-mail: hausz91@gmail.com (0009-0001-0363-6173)

Lyubarsky B. Doctor of technical sciences, professor. E-mail: lboris1911@ukr.net
(0000-0002-2985-7345)

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", St. 2 Kirpychova St.,
Kharkiv, Ukraine, 61002*

GENERAL APPROACHES TO THE CREATION OF THERMAL MODELS OF ELECTRIC TRANSPORTATION TRACTION ENGINES

***Annotation.** The article considers promising methods for analyzing the thermal state of traction motors used on rolling stock of electric transport. It is determined that the method of equivalent thermal substitution schemes is a promising method of thermal state analysis. It is substantiated that regardless of the number of elements, even if it is equal to infinity, the system remains linear during the transition from concentrated constant to distributed parameters.*

Processes in it are described by linear differential equations, and you can use the method of superimposing heat flows. In the established regime, this is expressed in the equality of the total excess of body temperature to the sum of partial temperature excesses from losses in its various parts. It is proved that during the transient process, the real heating curve of the engine element is built by summing up partial heating curves caused by energy losses in each individual element in the absence of losses in other

elements. When studying the transition process, it is necessary to take into account the speed of heat propagation in the material and the geometric dimensions of traction motors. These tasks are solved on the basis of formulated provisions. General approaches to the creation of a base of elements of substitution schemes are proposed, which allow to unify the development of the thermal model of the engine regardless of its design features.

Key words: traction engine, thermal state of the engine, electric transport, replacement scheme

Постановка проблеми. Сучасні транспортні засоби електротранспорту є невід’ємною складовою транспортної інфраструктури, як магістрального міжміського транспорту залізниць, так і міського колісного транспорту. Основним елементом який визначає енергоефективність транспортних засобів є система електромеханічного перетворення енергії – тяговий привод, що перетворює більшість електричної енергії у механічну. Безпосередньо це перетворення відбувається у тягових двигунах, конструкція яких та принцип роботи в більшості впливає на ефективність електромеханічної системи перетворення енергії в цілому [1, 2]. Розробка сучасних енергоефективних технологій для підвищення як енергетичних так і масогабаритних показників пов’язано з ідентифікацією теплового стану двигунів у процесі роботи є основним напрямом роботи який визначив напрям подальших досліджень що проведено у роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянемо аналіз останніх досліджень і публікацій перспективних методів аналізу теплового стану тягових двигунів електротранспорту. У роботах [3-5] розглядаються загальні підходи до визначення температурних режимів колекторних тягових двигунів при тягових розрахунках.

Як зазначається в роботах [1-5] криві нагрівання електричних машин не є експонентами, однак відомо, що реальні криві нагрівання добре апроксимуються експонентами, що широко використовується в інженерних розрахунках. Експонентам властиві постійні часу, які визначаються при найбільш точній апроксимації реальної кривої нагрівання в необхідному діапазоні температур.

Постійні часу нагрівання отримують з досвіду або розраховують і потім перевіряють експериментально [5].

Перевищення встановлених температур визначають методом теплових параметрів з внесенням поправок за результатами експериментальних випробувань; на цьому ґрунтуються розрахунки нестационарних процесів нагрівання [3-5].

Аналіз моделей, створених на основі методу теплових схем для різних конструкцій тягових двигунів, показує, що вони надзвичайно схожі по структурі. Водночас навіть електричні машини, які істотно відрізняються по конструкції, містять значну кількість аналогічних конструктивних елементів. Це дозволило авторам [6-8] сформулювати задачу розробки математичних моделей для розрахунку теплових полів в електричних машинах, яка легко адаптується до конструкції будь-якого тягового двигуна.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення розробка загальних підходів до створення теплових моделей теплового стану тягових двигунів для електротранспорту. Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити дві основні задачі:

- аналіз теплових моделей колекторних тягових двигунів;
- аналіз теплових моделей тягових двигунів змінного струму.

Ця робота спрямована на розробку загальних підходів до створення теплових моделей на підставі еквівалентних теплових схем заміщення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження перехідних теплових процесів в таких двигунах базуються на принципі умовного розділення машини на систему однорідних тіл, що використовується і при дослідженні стаціонарних теплових процесів. У перехідних процесах градієнт температури в металевих частинах може бути значним, і припущення про рівномірне нагрівання всього об'єму тіла вносить істотну похибку. Ця похибка зменшується при збільшенні кількості однорідних тіл, а також за умови повільного протікання теплового процесу.

Незалежно від кількості елементів, навіть якщо вона дорівнює нескінченності, система залишається лінійною при переході від зосереджених постійних до розподілених параметрів. Процеси в ній описуються лінійними диференціальними рівняннями, і можна скористатися методом накладення теплових потоків. У режимі,

що встановився, це виражається у рівності повного перевищення температури тіла сумі часткових перевищень температур від втрат в різних його частинах. Під час перехідного процесу реальна крива нагрівання елемента двигуна будується шляхом підсумовування часткових кривих нагрівання, обумовлених втратами енергії в кожному окремому елементі за відсутності втрат в інших елементах. При дослідженні перехідного процесу необхідно враховувати швидкість поширення тепла в матеріалі та геометричні розміри тягових двигунів. Ці завдання вирішуються на основі наступних положень.

В основу моделі колекторних тягових двигунів покладено застосування блокової структури для дослідження будь-якої електричної машини у поєднанні з методом еквівалентних теплових схем заміщення вузлів двигуна. Точність моделі конкретного електродвигуна в цьому випадку залежить від кількості блоків досліджуваного об'єкта (ступеня його дискретизації), правильності теплових зв'язків між ними, точності розрахунку тепловиділень окремих елементів конструкцій, точності визначення теплових опорів, правильності завдання початкових і граничних умов, коефіцієнтів тепловіддачі поверхонь охолодження, а також точності системи рівнянь, що описують систему охолодження електродвигуна. У роботах [6-8] для конструктивних вузлів двигунів, таких як якоря, головного і додаткового полюсів, станини, колектора тощо, розроблено блок теплової схеми заміщення. Для конструктивно відмінних вузлів двигунів створено різні варіанти схем заміщення, на основі яких сформована база даних схем заміщення вузлів тягових двигунів. Наявність такої бази даних для різних елементів конструкції електродвигунів дозволяє легко розробляти теплові моделі різних конкретних технічних рішень, а також досліджувати різні варіанти виконання тих або інших вузлів конкретного електродвигуна.

На рис. 1 наведено приклад розробки елемента бази даних конструктивного елемента – якоря двигуна. Опираючись на досвід роботи [1].

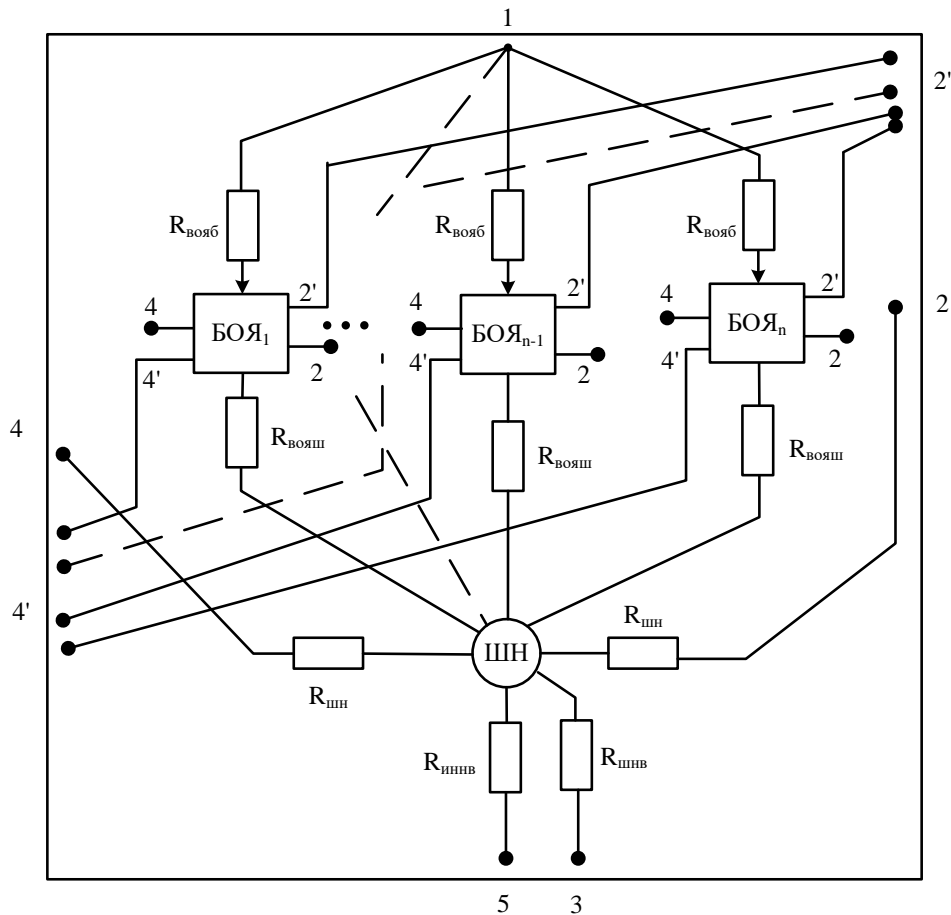


Рисунок 1 – Якір тягового двигуна – елемент бази даних теплової схеми [1]

На рис. 1 прийнято такі позначення: БОЯ₁, ..., БОЯ_{п-1}, БОЯ_п – блоки обмоток якоря електродвигуна; ШН – натискна шайба; R_{вояб} – тепловий опір між повітрям і обмоткою якоря під бандажем; R_{вояж} – тепловий опір між повітрям і обмоткою якоря під шайбою; R_{шн} – тепловий опір натискної шайби вздовж валу; R_{шнв} – тепловий опір до охолоджувального повітря від натискної шайби; R_{шнв} – тепловий опір між валом і шайбою; 1 – вихід теплової схеми заміщення з боку бандажа; 2, 4 – виходи теплової схеми заміщення вздовж валу; 2', 4' – виходи теплової схеми заміщення вздовж провідників; 5 – виходи теплової схеми заміщення до охолоджувального повітря в каналі.

Використовуючи елементарні блоки теплової схеми заміщення, можна створювати більш складні блоки. Схему заміщення обмотки якоря розроблено з боку натискної шайби, де використано n блоків схем заміщення обмотки якоря двигуна.

Теплова модель тягових двигунів змінного струму. Теплову схему заміщення двигунів змінного струму розглянемо на прикладі найбільш складного з боку теплового навантаження асинхронного тягового двигуна. На підставі моделі, що наведено у роботі [1, 2], яка є спрощеною, можливо врахувати основні теплові процеси в тягових двигунах з припустимою для інженерних розрахунків похибок (рис.2.).

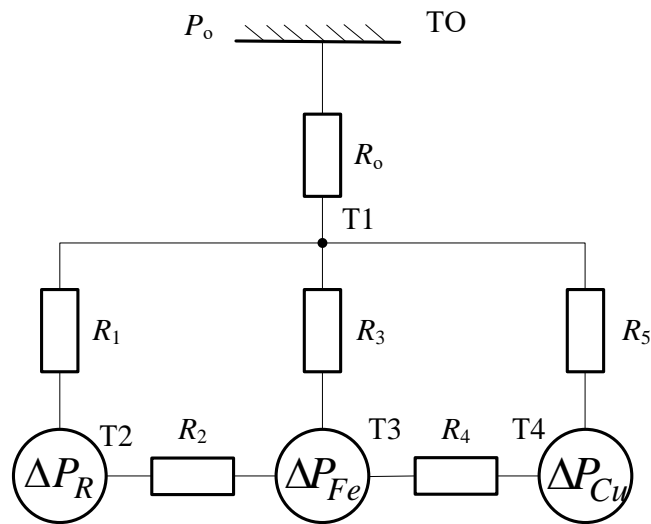


Рисунок 2 – Імітаційна модель механічної частини системи нахилу кузова

В схемі на рис. 2 наведено: T_o – температура навколишнього середовища; T_1 – температура корпусу; T_2 – температура ротора; T_3 – температура сталі ротора; T_4 – температура обмотки статора; R_o – тепловий опір між корпусом двигуна і доквіллям; $R_1 - R_5$ – теплові опори між відповідними вузлами електричної машини; ΔP_R – втрати в роторі; ΔP_{Fe} – втрати в сталі ротора; ΔP_{Cu} – втрати в міді статора; P_o – потужність, що відбирається системою охолодження.

Це важливо для розробки систем управління температурними режимами тягових двигунів, оскільки контроль температури може бути здійснений лише в декількох вузлах, що найбільш нагріваються. Зазначена модель відображає основні теплові процеси в електричних машинах і дозволяє розробити системи охолодження тягових двигунів. Її схема, як показано на рис. 2 в роботі [1,2], є інструментом для аналізу та контролю температурних режимів двигунів.

Ця модель може бути корисною для практичного застосування, оскільки вона дозволяє ефективно вирішувати проблеми управління тепловим режимом електричних машин з урахуванням їх основних теплових характеристик.

Згідно наведеної на рис. 2 схема теплової моделі може бути описана наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} (T_0 - T_1)\lambda_0 = P_o \\ T_1(\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5) - T_2\lambda_1 - T_3\lambda_3 - T_4\lambda_5 = 0 \\ T_2(\lambda_1 + \lambda_2) - T_1\lambda_1 - T_3\lambda_3 = \Delta P_R \\ T_3(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) - T_2\lambda_2 - T_1\lambda_3 - T_4\lambda_4 = \Delta P_{Fe} \\ T_4(\lambda_4 + \lambda_5) - T_3\lambda_4 - T_1\lambda_5 = \Delta P_{Cu} \end{cases}, \quad (1)$$

де $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ - теплові провідності між елементами конструкції двигуна, які визначаються як $\lambda_i = \frac{1}{R_i}$, $i = \overline{0, 5}$.

Температура охолоджувального повітря в порожнинах і каналах ТД залежить від коефіцієнтів тепловіддачі та швидкості руху охолоджувального повітря, яка є результатом вентиляційного розрахунку двигуна при його різних навантаженнях [6-8]. Розроблена математична модель дозволяє розраховувати температуру елементів конструкції тягового двигуна. Модель є системою нелінійних рівнянь, яка описує тепловий стан електродвигуна.

Аналіз адекватності розробленої теплової моделі тягових двигунів наведено на прикладі теплових розрахунків тягового двигуна НБ-418К електровозу ВЛ 80С показав, що розбіжність між розрахунковими даними та відомими експериментально-розрахунковими результатами не перевищує 10 %. [1]. Аналогічна похибка була отримана також при моделюванні тягових електричних двигунів ЕД118Б для тепловозу 2 ТЕ 116, та електровозних ТЛ-2К1 (ВЛ 11) і НБ514 (ВЛ85), що підтверджує можливість використання створеної теплової моделі для розрахунку нестационарних теплових процесів у широкому діапазоні двигунів постійного струму.

Результати наведеного вище аналізу демонструють, що модель, яка базується на методі теплових схем заміщення, є ефективним підходом для аналізу теплового

стану тягових двигунів змінного струму, що наведено на рис. 2. Максимальна похибка температур, отриманих за допомогою цієї моделі, не перевищує 10% , що свідчить про її адекватність [1,7,8].

Додатково, виявлено, що для ефективного управління тепловим режимом двигуна достатньо контролювати тільки температуру обмотки статора. Це дає можливість спростити системи управління температурними режимами, зменшуючи складність вирішення цих завдань.

З урахуванням цих результатів, метод на основі теплових схем заміщення можливо обрати як основний підхід для теплового стану перспективних конструкцій тягових двигунів. Цей підхід забезпечить необхідний рівень точності і ефективності для аналізу та контролю температурних режимів тягових електродвигунів.

Висновки.

1. В роботі вперше узагальнено перспективні методи аналізу теплового стану тягових двигунів на основі застосування теплових схем заміщення, як для двигунів постійного так і змінного струмів.

2. Запропоновано загальні підходи до створення бази елементів схем заміщення, як для тягових колекторних двигунів, так і для двигунів змінного струму, що дозволяють уніфікувати розробку теплової моделі двигуна в незалежності від його конструктивних особливостей.

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Петренко О. М. Наукові основи вибору оптимальних параметрів та режимів роботи систем охолодження асинхронних тягових двигунів електротранспорту [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.22.09 / Олександр Миколайович Петренко; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2018. – 34 с. – URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/3d0d605c-d8bd-4c8c-bb08-8a5083aca885/content> (дата звернення: 05.06.2024)

2. Mizuno, S. Development of a Totally Enclosed Fan-Cooled Traction Motor / Sueyoshi Mizuno, Shinichi Noda, Makoto Matsushita, Taihei Koyama, Shigetomo Shiraishi //IEEE Transactions on Industry Applications. — 2013. — Vol. 49, No.4, july/august. — P 1508—1513. <https://doi.org/10.1109/tia.2013.2256872>

3. Introduction to Thermal Equivalent Circuits. Power Magnetic Devices, –2021. – 349–398. Portico. <https://doi.org/10.1002/9781119674658.ch10>

4. Chen R Induction Motors and Permanent Magnet Motors in Electric Vehicles Characteristics and Development Trends. / R Chen, T. Tong // 2023 International Conference on Internet of Things, Robotics and Distributed Computing (ICIRDC) [Internet]. - 2023. - Dec 29; Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/icirdc62824.2023.00046>

5. Zhalkin D. Improving methods of monitoring the thermal state electric locomotives traction electric motors. / D. Zhalkin, A. Taran // Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport, – 2020 – 2(158). <https://doi.org/10.18664/1994-7852.158.2015.63392>
6. Boglietti, A. Evolution and Modern Approach for Thermal Analysis of Electrical Machines / A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, C. Mejuto // IEEE transactions on industrial electronics. — 2009. — Vol. 56, No. 3, March. P. 871—882. <https://doi.org/10.1109/tie.2008.2011622>
7. Петренко О. М. Оптимізація параметрів вентилятора асинхронного тягового двигуна трамвайного вагону [Текст] / О. М. Петренко // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2017. — № 1. — С. 19—24. — URL: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/633/555> (дата звернення: 05.06.2024)
8. Liubarskyi B. Optimization of thermal modes and cooling systems of the induction traction engines of trams / B. Liubarskyi, A. Petrenko, D. Iakunin, O. Dubinina // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies and computer systems Engineering technological systems. – 2017. – № 3/9 (87). – P. 59–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102236>

REFERENCES:

1. Petrenko O. M. (2018) NaukovI osnovi voboru optimalnih parametrIv ta rezhimIv roboti sistem oholodzhennya asinhronnih tyagovih dvigunIv elektrotransportu avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk Nats. tehn. un-t "HarkIv. polItehn. In-t". – HarkIv, 34 p. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/3d0d605c-d8bd-4c8c-bb08-ea5083aca885/content>
2. Mizuno, S. Noda, S., Matsushita, M., Koyama, T., & Shiraishi, Sh. (2013) Development of a Totally Enclosed Fan-Cooled Traction Motor . IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No.4, 1508—1513. <https://doi.org/10.1109/tia.2013.2256872>
3. Introduction to Thermal Equivalent Circuits. (2021). Power Magnetic Devices, 349–398. Portico. <https://doi.org/10.1002/9781119674658.ch10>
4. Chen, R., & Tong, T. (2023). Induction Motors and Permanent Magnet Motors in Electric Vehicles: Characteristics and Development Trends. 2023 International Conference on Internet of Things, Robotics and Distributed Computing (ICIRDC). <https://doi.org/10.1109/icirdc62824.2023.00046>
5. Zhalkin, D., & Taran, A. (2020). IMPROVING METHODS OF MONITORING THE THERMAL STATE ELECTRIC LOCOMOTIVES TRACTION ELECTRIC MOTORS. Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport, 2(158). <https://doi.org/10.18664/1994-7852.158.2015.63392>
6. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D., Shanel, M., Mueller, M., & Mejuto, C. (2009) Evolution and Modern Approach for Thermal Analysis of Electrical Machines. IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 56, No. 3, 871—882. <https://doi.org/10.1109/tie.2008.2011622>
7. Petrenko O. M. (2017) OptimIzatsIya parametrIv ventilyatora asinhronnogo tyagovogo dviguna tramvaynogo vagonu Sistemi upravlnnya, navIgatsIYi ta zv'yazku, № 1, 19—24. <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/633/555>
8. Liubarskyi, B., Petrenko O., Iakunin, D. and Dubinina, O. (2017) “Optimization of thermal modes and cooling systems of the induction traction engines of trams”, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(9 (87), pp. 59–67. doi: 10.15587/1729-4061.2017.102236.

Надійшла до редакції 10.07.2024р.