

УДК 629.429.3 : 621.313

О.М. Петренко<sup>1</sup>, Б.Г. Любарський<sup>2</sup><sup>1</sup> Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків<sup>2</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

## ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ МОДЕЛЕЙ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

В науковій статті розглядається основний підхід до створення універсальної теплової моделі тягових двигунів транспортних засобів. Зазначено, що така модель дозволяє визначати температурні поля у тяговому двигуні при його різних режимах роботи, у тому числі й ті, що визначені тяговими розрахунками. Помітним недоліком моделі є значна складність, що утрудняє її використання в контурах систем автоматичного регулювання температури обмоток тягових двигунів. Крім того, в моделі не враховується температура довкілля, вологість і барометричний тиск.

**Ключові слова:** універсальна тепла модель, еквівалентна тепла схема, тепловий опір, блок теплової схеми.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Визначення теплового стану тягових двигунів (ТД) – електромеханічних перетворювачів енергії колісних та рейкових транспортних засобів з електричною передачею потужності військового та цивільного призначення – як у процесі роботи так і на етапі проектування є важливою технічною задачею. Теплові режими вносять обмеження на такі показники ефективності як витрати енергії та середню швидкість руху транспортного засобу [1, 2]. Вони визначають потужність та конструкцію додаткових пристроїв охолодження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [3 – 5] розглянуто загальні підходи до визначення температурних режимів колекторних ТД при тягових розрахунках. У основу дослідження перехідних теплових процесів в ТД може бути покладений той самий принцип умовного розділення машини на систему однорідних тіл, що й при дослідженні стаціонарних теплових процесів. При перехідних процесах градієнт температури в металевих частинах може бути значним і допущення того, що тіло нагрівається рівномірно за усім об'ємом, вносить істотну похибку. Ця похибка менша, якщо машина розділена на більше число однорідних тіл, а тепловий процес протікає повільно.

Якою б не була великою кількістю елементів, навіть якщо б вона дорівнювала нескінченності, у разі переходу від зосереджених постійних до розподілених при колишніх допущеннях система залишається лінійною, процеси в ній описуються лінійними диференціальними рівняннями і можна скористатися методом накладення теплових потоків. У разі режиму, що встановився, це виражається в рівності повного перевищення температури тіла сумі часткових перевищень температур від втрат в різних його

частинах. При перехідному процесі реальну криву нагрівання цього елемента машини будують, підсумовуючи часткові криві нагрівання. Часткова крива нагрівання цього тіла (чи елемента) обумовлена втратами енергії в якому-небудь одному елементі за відсутності втрат в інших елементах; кожному елементу відповідає своя часткова крива нагрівання. Таким чином, розглядаються часткові криві перевищення температури цього тіла над температурою довкілля [3 – 5].

Розглянемо процес нагрівання ТД під дією втрат тільки в обмотці якоря. Спочатку нагрівається тільки мідь та ізоляція обмотки, потім зубці, спинка якоря, далі тепло поширюється по усій машині, тобто нагрівається корпус, масив остову або ротора і т. д. Таким чином, маса матеріалу, що бере участь в процесі нагрівання, збільшується до тих пір, поки тепловий режим в усій машині не встановиться. Умови віддачі тепла охолоджувальному повітрю впродовж процесу також міняються.

Таким чином, очевидно, що при дослідженні перехідного процесу необхідно враховувати швидкість поширення тепла в матеріалі та геометричні розміри машини. Вказані завдання вирішуються на основі наступних положень.

Криві нагрівання машин не є експонентами, що виходить з викладеного. Проте відомо, що реальні криві нагрівання добре апроксимуються експонентами — це широко використовується в інженерних розрахунках. Експонентам властиві постійні часу, визначувані при найбільш точній апроксимації істинної кривої нагрівання в необхідному діапазоні температур. Постійні часу нагрівання або отримують з досвіду, або розраховують і потім перевіряють експериментально.

Перевищення температур, що встановилися, визначають по методу теплових параметрів, вносячи

поправки за результатами стендових випробувань, коли необхідно; на цьому ґрунтуються розрахунки нестационарних процесів нагрівання [3–5].

Аналіз моделей, створених на основі методу теплових схем для різних близьких по конструкції, але не однакових ТД показує, що вони надзвичайно схожі по структурі. В той же час навіть електричні машини, що істотно відрізняються по конструкції, містять значне число аналогічних конструктивних елементів. Це дозволило [6–8] сформулювати задачу розробки універсальної математичної моделі для розрахунку теплових полів в електричних машинах, яка легко адаптується до конструкції будь-якого ТД.

**Метою даної статі** є висвітлення основних положень створення універсальної теплової моделі тягових двигунів.

### Результати досліджень

У основу універсальної моделі покладено застосування блокової структури для дослідження будь-якої електричної машини у поєднанні з методом еквівалентних теплових схем заміщення вузлів ТД. Точність моделі конкретного електродвигуна в цьому

випадку залежить від числа блоків досліджуваного об'єкту (чи ступеню його дискретизації) і правильності теплових зв'язків між ними, точності розрахунку тепловиділень окремих елементів конструкцій й точності визначення теплових опорів, правильності заведення початкових та граничних умов, коефіцієнтів тепловіддачі поверхонь охолодження, а також точності системи рівнянь, що описують систему охолодження електродвигуна. У роботах [6–8] для кожного конструктивного вузла електродвигуна: якоря, головного і додаткового полюсів, станини, колектора і так далі, – розроблений блок теплової схеми заміщення. Для конструктивно відмінних вузлів двигунів розробляються різні варіанти схем заміщення, на основі яких створена бібліотека схем заміщення вузлів ТД. Наявність бібліотеки схем заміщення для різних конструкцій вузлів електродвигунів дозволяє легко розробляти теплові моделі різних ТД, а також дозволяє без особливих утруднень досліджувати різні варіанти виконання тих або інших вузлів конкретного електродвигуна.

На рис. 1 приведений блок теплової схеми заміщення компенсаційної обмотки ТД.

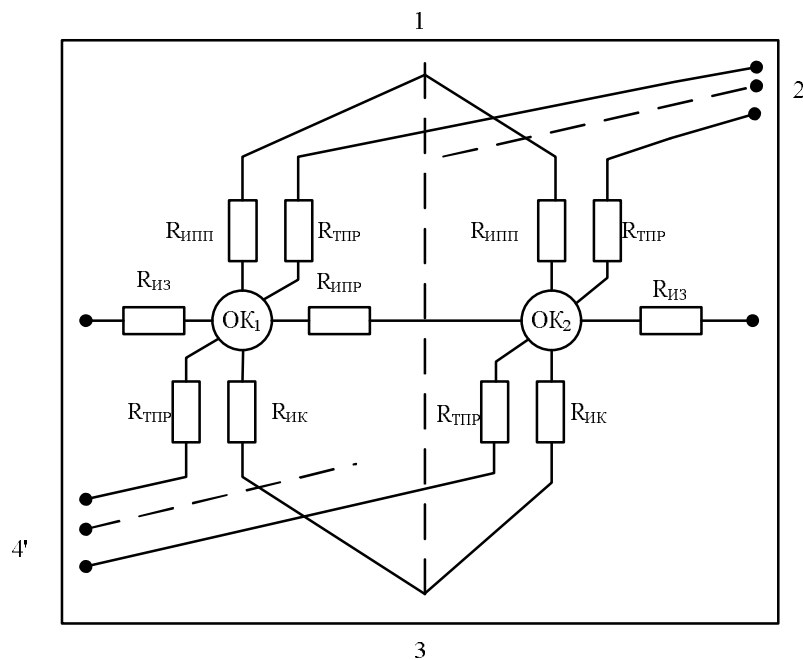


Рис. 1. Блок-схема заміщення компенсаційної обмотки ТД

На рис. 1 прийняті такі позначення:  $OK_1, OK_2$  – провідники компенсаційної обмотки ТД;  $R_{ИПП}$  – тепловий опір шарів ізоляції компенсаційної обмотки у напрямку до підпазової частини;  $R_{ТТР}$ ,  $R_{ИПР}$  – відповідно тепловий опір обмотувального дроту і шарів ізоляції між провідниками обмотки;  $R_{ИЗ}$ ,  $R_{ИК}$  – відповідно тепловий опір шарів ізоляції у напрямку до зубців і у напрямку до клину; 1, 3 – відповідно виходи блоку схеми заміщення з боку підпазової частини головного полюса і з боку клину; 2, 4 – виходи блоку схеми заміщення з боку зубців

головного полюса електродвигуна; 2', 4' – виходи блоку теплової схеми заміщення уздовж провідників компенсаційної обмотки; 3 – вихід блоку еквівалентної схеми заміщення з боку клину.

Число виведень 2', 4' блоку теплової схеми заміщення визначається числом провідників компенсаційної обмотки, тому зміна числа провідників міняє тільки число виведень блоку. На рис. 1 пунктирними лініями показані у блоці додаткові зв'язки при збільшенні числа провідників компенсаційної обмотки. Ці зв'язки аналогічні зв'язкам, наявним у

блоці. Таким чином, блок-схема заміщення компенсаційної обмотки дозволяє в тепловій схемі моделювати компенсаційну обмотку електродвигуна з довільним числом провідників  $n$ .

Аналогічним чином розроблені блоки теплової схеми заміщення для усіх інших вузлів електродвигуна. З використанням елементарних блоків теплової схеми заміщення можуть бути розроблені складніші блоки.

На рис. 2 приведено схему заміщення обмотки якоря під бандажем з боку натискної шайби, де використовуються  $n$  блоків схем заміщення обмотки якоря двигуна. На рис. 2 прийняті наступні позначення:

Боя<sub>1</sub>, ..., Боя <sub>$n-1$</sub> , Боя <sub>$n$</sub>  – блоки обмоток якоря електродвигуна; ШН – шайба натискна;  $R_{\text{вояб}}$  – тепловий опір між повітрям і обмоткою якоря під бандажем;  $R_{\text{вояж}}$  – тепловий опір між повітрям і обмоткою якоря під шайбою;  $R_{\text{шнн}}$  – тепловий опір шайби натискної уздовж валу;  $R_{\text{шнв}}$  – тепловий опір до охолоджувального повітря від шайби натискної;  $R_{\text{шнв}}$  – тепловий опір між валом і шайбою; 1 – вихід теплової схеми заміщення з боку бандажа; 2, 4 – виходи теплової схеми заміщення уздовж валу; 2', 4' – виходи теплової схеми заміщення уздовж провідників; 5 – виходи теплової схеми заміщення до охолоджувального повітря в каналі.

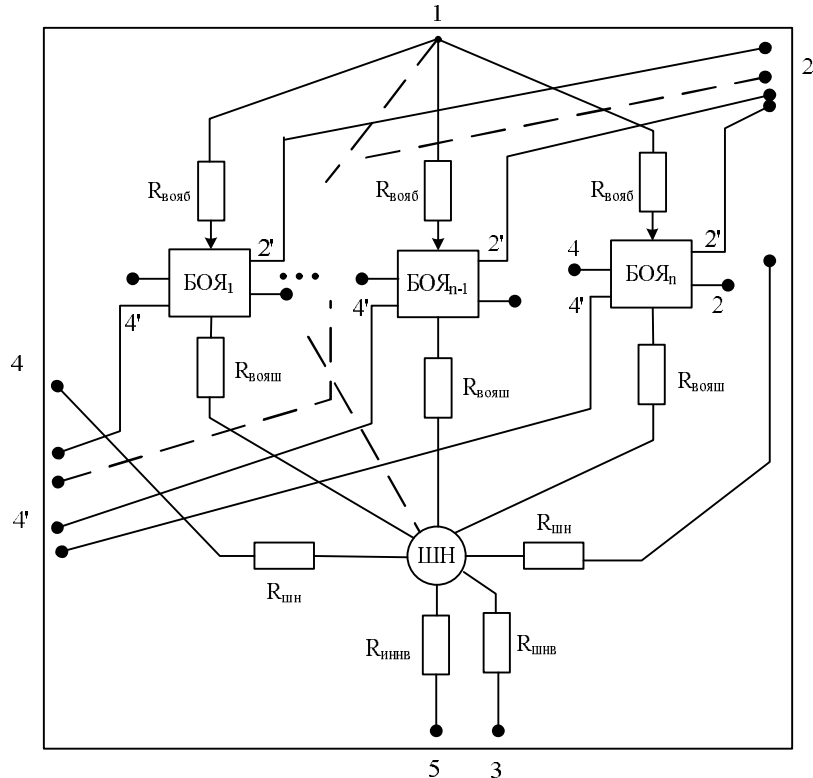


Рис. 2. Блок теплової схеми заміщення обмотки якоря під бандажем з боку шайби натискної

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, що дозволяє розраховувати витрати охолоджувального повітря, що проходить через канали і порожнини ТД. Модель є системою нелінійних рівнянь високого порядку, яка описує розгалужену систему аеродинамічних трійників.

На основі теплових схем заміщення окремих вузлів ТД і моделі вентиляційного розрахунку отримана загальна система нелінійних диференціальних рівнянь для розрахунку температурного поля в просторі електричної машини. Для вирішення отриманої системи диференціальних рівнянь використовується неявна різницева схема обчислень.

Рівняння для неявної схеми обчислень, що визначає температуру в  $i$ -му вузлі усередині твердих тіл в просторі електродвигуна, має вигляд:

$$\rho_i c_i V_i \frac{t_i^{\omega+1} - t_i^{\omega}}{\Delta\tau} = \sum_{j=1}^n k_{ij} (t_j^{\omega+1} - t_i^{\omega+1}) + P_i, \quad (1)$$

де  $\rho_i$  – щільність  $i$ -го елемента твердого тіла;  $i = \overline{1, n}$ ;  $n$  – загальне число вузлів;  $c_i, V_i$  – теплоємність і об'єм  $i$ -го елемента твердого тіла;  $t_i^{\omega+1}, t_i^{\omega}$  – відповідно температура  $i$ -го вузла в моменти часу  $\omega+1$  і  $\omega$ ;  $\Delta\tau$  – крок за часом;  $k_{ij}$  – коефіцієнт, що враховує перенесення тепла між вузлами  $i$  та  $j$ ;  $t_j^{\omega+1}$  – температура у момент часу  $\omega + 1$  вузла  $j$ .

Рівняння, що визначає температуру в  $k$ -му вузлі усередині охолоджувального повітря має вигляд:

$$\rho_k c_k F_k \Delta x_k \cdot (t_k^{\omega+1} - t_k^{\omega}) / \Delta \tau = \rho_k c_k W_k F_k \times$$

$$\times (t_m^{\omega+1} - t_k^{\omega+1}) + \sum_{q=1}^n K_{kq} (t_q^{\omega+1} - t_k^{\omega+1}), \quad (2)$$

де  $F_k$  – площа поперечного перерізу  $k$ -ї ділянки повітряного каналу;  $\Delta x_k$  – довжина  $k$ -ї ділянки повітряного каналу;  $W_k$  – швидкість повітряного потоку на  $k$ -й ділянці каналу;  $t_m^{\omega+1}$  – температура повітря в ділянці каналу, передуючій  $k$ -й ділянці у момент часу  $\omega+1$ ;  $K_{kq}$  – коефіцієнт, що враховує перенесення тепла між вузлами  $k$  та  $q$ ;  $n_1$  – число вузлів усередині охолоджувального повітря.

Аналіз адекватності розробленої теплової моделі тягових двигунів на прикладі теплових розрахунків тягового двигуна НБ-418К показав, що розбіжність розрахункових даних з відомими експериментально-розрахунковими даними не перевищує 10%. Подібна погрішність отримана й при моделюванні тягових електричних двигунів ЕД118А, ТЛ-2К і НБ514, що підтверджує можливість використання отриманої теплової моделі для розрахунку нестационарних теплових процесів широкого спектру двигунів постійного струму.

## ВИСНОВКИ

1. Отримана тепла модель дозволяє визначати температурні поля в ТД при його різних режимах роботи, у тому числі й ті, що визначені тяговими розрахунками.

2. Помітний недолік розглянутої теплової моделі – значна складність, що утрудняє її використання в контурах систем автоматичного регулювання температури обмоток ТД. Крім того, в моделі не враховується температура довкілля, вологість і барометричний тиск.

## ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А.Н. Петренко, Б.Г. Любарский

*В научной статье рассматривается основной подход к созданию универсальной тепловой модели тяговых двигателей транспортных средств. Показано, что такая модель позволяет определять температурные поля в тяговом двигателе при его различных режимах работы, в том числе и определенных тяговыми расчетами. Заметным недостатком модели является значительная сложность, что затрудняет ее использование в контурах систем автоматического регулирования температуры обмоток тяговых двигателей. Кроме того, в модели не учитывается температура окружающей среды, влажность и барометрическое давление.*

**Ключевые слова:** универсальная тепловая модель, эквивалентная тепловая схема, тепловое сопротивление, блок тепловой схемы.

## PRINCIPAL APPROACHES TO UNIVERSAL CREATION THERMAL MODEL TRACTION ENGINE VEHICLES

A.N. Petrenko, B.G. Liubarskyi

*In the scientific article the basic approach to a universal thermal model traction engines of vehicles. It is indicated that this model allows to determine the temperature field in the traction engine at its various modes, including those identified traction calculations. Noticeable is a significant lack of model complexity that makes it difficult to use in circuits of automatic temperature control windings of traction motors. In addition, the model does not take into account the environmental temperature, humidity and barometric pressure.*

**Keywords:** universal thermal model, thermal equivalent circuit, thermal resistance, thermal circuit block.

## Список літератури

1. Любарский Б.Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу : дисс ... д-ра техн. наук : 05.22.09 – електротранспорт / Любарский Борис Григорьевич. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2014. – 368 с.

2. Мугиншейн Л.А. Энергооптимальные методы управления движением поездов / Л.А. Мугиншейн, А.У. Илютович, И.А. Ябло – М.: Интекст, 2012. – 80 с.

3. Безрученко В.М. Тягові електричні машини електрорухомого складу / В.М. Безрученко, В.К. Варченко, В.В. Чулак. – Дніпр-ск : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.

4. Космодамианский А.С. Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов : дисс ... д-ра техн. наук / А.С. Космодамианский. – М., 2002. – 285 с.

5. Безрученко В.М. Тягові електричні машини електрорухомого складу / В.М. Безрученко, В.К. Варченко, В.В. Чулак. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.

6. Платов Н.А. Разработка универсальной модели для тепловых расчетов тяговых электродвигателей локомотивов : автор. ... к.т.н. : 05.14.01 – энергетические системы и комплексы / Н.А. Платов. – М.: МИИТ, 2009. – 24 с.

7. Платов Н.А. Применение блочной структуры для разработки эквивалентной тепловой схемы замещения главного и добавочного полюсов тягового электродвигателя / Н.А. Платов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2008. – № 3. – С. 27 – 31.

8. Минаев Б.Н. Расчет температурного поля электромашин / Б.Н. Минаев, Н.А. Платов // Мир транспорта. – 2009. – №1. – С. 42 – 49.

Надійшла до редколегії 11.09.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. В.Т. Доманський, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.