

КОМПЛЕКСНА МУЛЬТИФІЗИЧНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ПОТУЖНИХ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ

Ю.М. Васьковський*, докт. техн. наук, Д.С. Нестеренко
НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна.
E-mail: vun157@gmail.com; denia111222@gmail.com.

Розроблено комплексну коло-польову мультифізичну математичну модель фізичних процесів в тяговому асинхронному двигуні. Модель враховує взаємний вплив електромагнітних, теплових і вентиляційних процесів під час розрахунку характеристик двигуна, що забезпечує високу достовірність результатів моделювання та відрізняє її від існуючих підходів і математичних моделей. Модель реалізовано на прикладі серійного двигуна типу СТА-1200 потужністю 1200 кВт, який призначений для використання в локомотивах потягів і характеризується високими електромагнітними та тепловими навантаженнями. Вважається, що конструкція серійного СТА-1200 є оптимальною. Але моделювання зазначеного двигуна з використанням розробленої мультифізичної моделі показало, що за рахунок урахування взаємного впливу фізичних процесів різної природи, які відбуваються під час його роботи, шляхом оптимального вибору певної кількості його конструктивних параметрів можливо суттєво покращити показники серійного СТА-1200. Як результат моделювання удосконалений двигун в номінальному режимі має кращі питомі масо-габаритні показники і менший нагрів обмотки статора. Бібл. 8, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: тяговий асинхронний двигун, мультифізична математична модель, температура обмотки статора, питомі масо-габаритні показники.

Вступ. Під час проектування електричних машин (ЕМ) з помірним рівнем електромагнітних навантажень електромагнітні, теплові та вентиляційні процеси, що відбуваються під час роботи машин, розраховуються послідовно і окремо без урахування взаємного впливу цих процесів. Такий підхід використовується під час розробки ЕМ, коли взаємним впливом фізичних процесів різної природи можна нехтувати або врахувати у наближений спосіб. Практика створення серій ЕМ різного типу підтвердила допустимість і ефективність такого підходу.

В ЕМ зі значним рівнем використання активних матеріалів і високими масо-габаритними показниками взаємний вплив процесів різної фізичної природи на характеристики машини проявляється в значній мірі. Наприклад, температура електропровідних елементів обмоток ЕМ впливає на величину їхньої електропровідності, а значить і на величину струму обмоток. Це, в свою чергу, змінює величину електричних (теплових) втрат, а значить і температуру обмоток тощо. Створення ЕМ з високим і надвисоким рівнем електромагнітних і теплових навантажень є особливо актуальним сьогодні у зв'язку з суворими вимогами до зменшення маси та габаритів ЕМ під час розробки ефективних електродвигунів для транспортних засобів різного типу і призначення, літальних апаратів, малогабаритних, але потужних електричних генераторів тощо.

Задля розрахункового урахування взаємного впливу електромагнітних і теплових процесів різними дослідниками розроблялися *мультифізичні* математичні моделі на основі спільного використання теорій електромагнітного і теплового полів [1, 4 і інш.]. Такий підхід дав змогу підвищити достовірність розрахункових результатів, але у ряді випадків залишався недостатнім. Це обумовлено тим, що температурне поле ЕМ визначається не тільки величиною теплових втрат і теплофізичними характеристиками активних матеріалів, а і в значній мірі конструкцією системи охолодження ЕМ та характеристиками нагнітальних пристроїв (вентилятори тощо). Тому під час створення форсованих ЕМ з великим рівнем використання активних матеріалів необхідним є підхід, що передбачає спільний комплексний аналіз взаємопов'язаних електромагнітних, електромеханічних, теплових і вентиляцій-

© Васьковський Ю.М., Нестеренко Д.С., 2025

* ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1262-0939>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

них процесів з урахуванням усього спектру конструктивних особливостей і режимів роботи ЕМ. Урахування *взаємного впливу* робочих процесів різної фізичної природи є обов'язковим у прагненні до отримання максимально високих питомих масо-габаритних і енергетичних показників нових типів ЕМ. Реалізація такого підходу потребує розробки *комплексних мультифізичних математичних моделей* електромагнітних і тепловентиляційних процесів в ЕМ.

Метою роботи є розробка *комплексної мультифізичної математичної моделі* (КМММ) електромагнітних і тепловентиляційних процесів в потужному тяговому асинхронному двигуні та оптимізація його технічних характеристик за результатами комплексного математичного моделювання.

Об'єкт дослідження. У роботі розроблену КМММ реалізовано на прикладі тягового частотнокерованого асинхронного двигуна (АД) потужністю 1200 кВт. Цей сучасний АД призначений для приводу електровоза ДС-3 із частотною системою керування, розробленою фірмою Siemens. У даний час виготовляється серійно [7] і має такі характеристики: номінальна потужність $P = 1200$ кВт; номінальна фазна напруга $U_{\text{нф}} = 1080$ В; номінальний фазний струм $I_{\text{нф}} = 452$ А; кількість полюсів $2p=6$; повітряний проміжок $\delta = 2$ мм; довжина осердя статора $l_1=0,46$ м; зовнішній діаметр осердя статора $D_j = 0,85$ м; кількість пазів статора і ротора $Z_1 = 72$, $Z_2 = 62$; номінальне ковзання $s = 0,01$; матеріал стрижнів ротора – мідь. В осердях статора і ротора виконано аксіальні вентиляційні канали, кількість, розміри і розташування яких обрано за результатами оціночних тепло-вентиляційних розрахунків. Загальна кількість вентиляційних каналів становить 124, а діаметр кожного каналу дорівнює 0,02 м. Для охолодження ярма статора навколо його зовнішньої поверхні ярма статора виконано кільцевий вентиляційний канал висотою 0,007 м. Охолодження СТА-1200 – повітряне примусове за допомогою потужного вентилятора, який в режимі холостого ходу (за нескінченно великого аеродинамічного опору вентиляційної системи) утворює тиск 1300 кПа, а в режимі короткого замикання (за нульового опору системи) спроможний видати обсяг повітря $1,8$ м³/с. Слід підкреслити, що зазначений серійний СТА-1200 спроектований з використанням традиційних підходів і методик без строгого урахування взаємного впливу фізичних процесів різної природи (електромагнітних і тепловентиляційних).

З огляду на умови функціонування двигуна – розташування в обмеженому підвагонному просторі на колісній парі локомотиву, наявність бруду, пилу і вологи, робота в різних швидкісних режимах – до нього висуваються жорсткі вимоги щодо мінімальних габаритних розмірів, захищеності від негативного впливу навколишнього середовища тощо. СТА-1200 відноситься до форсованих ЕМ з високим рівнем використання активних матеріалів. Надалі за результатами дослідження показано, що використання результатів моделювання, отриманих у процесі застосування КМММ, дає змогу суттєво покращити масо-габаритні і енергетичні показники серійного СТА-1200.

Математична модель. Сформулюємо КМММ для *усталених* електромагнітного, теплового і вентиляційного процесів, які відповідають номінальному режиму роботи зазначеного АД згідно з його паспортних даних та безпосередньо обумовлюють вибір його конструктивних параметрів.

З метою отримання найбільш достовірних результатів електромагнітні та теплові процеси докладно досліджувати в рамках теорії поля. Щодо просторової розмірності, то аналіз поля можна виконати як у двовимірному (2D), так і тривимірному (3D) наближенні. Очевидно, що 2D-аналіз є більш простим і має помірні вимоги щодо необхідних обчислювальних ресурсів. Тому з урахуванням особливостей конструкції СТА-1200 за умови, що достовірність результатів 2D-аналізу залишається достатньою, застосування двовимірних моделей є пріоритетним підходом до моделювання. 3D-аналіз необхідно застосовувати у разі суттєвого прогнозованого зниження достовірності результатів моделювання у разі використання 2D-моделей.

Будемо вважати, що усі електромагнітні величини (струми, функції поля) змінюються у часі за синусоїдним законом, що уможливило використання під час аналізу методу комплексних амплітуд. У разі необхідності вплив вищих гармонік розглядається окремо.

Електромагнітне і температурне поле аналізуються у 2D наближенні у поперечному перерізі активної зони АД. Аналіз поля ведеться для сталого асинхронного режиму роботи за номінального ковзання s . Оскільки осердя статора і ротора є шихтованими, впливом вихрових струмів в листах шихтовки на розподіл поля можна знехтувати. Електромагнітне поле відносно комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу \underline{A}_z описується в декартових координатах наступним рівнянням:

$$\frac{\partial^2 \underline{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{A}_z}{\partial y^2} - j\omega_1 s \mu(T) \gamma(T) \underline{A}_z = -\mu(T) \underline{J}_{zcm}, \quad (1)$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1$ – кутова частота струму статора; s – ковзання ротора; $\mu(T)$ – магнітна проникність; $\gamma(T)$ – електропровідність, J_{zcm} – густина сторонніх струмів. Величини $\mu(T)$ і $\gamma(T)$ в загальному випадку залежать від температури T . Температурна залежність електропровідності для більшості металів близька до лінійної та описується формулою

$$\gamma(T) = \gamma_0 / (1 + \alpha \Delta T), \quad (2)$$

де γ_0 – електропровідність за початкової температури T_0 ; α – температурний коефіцієнт електричного опору; $\nabla T = T - T_0$ – зміна температури. Зміна величини $\mu(T)$ від температури є менш суттєвою. Магнітна проникність різко зменшується у разі нагрівання до температури 600...700 °С, коли руйнується доменна структура феромагнітної сталі (точка Кюрі), але в ЕМ такі температури не спостерігаються. Разом з тим у ряді експериментальних робіт, наприклад [5], показано, що в межах діапазону помірних температур, які характерні для ЕМ, магнітна проникність може змінюватися на 10...15%, що робить доцільним урахування температурної залежності $\mu(T)$. Для урахування нелінійної залежності магнітної проникності від магнітної індукції величина магнітної проникності в кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні магнітопроводи, визначається у процесі розв'язання рівняння (1) ітераційним методом за заданими кривими намагнічування. Електропровідність задається в пазах обмотки ротора, в яких розташовані електропровідні стрижні. Електропровідність в пазах статора приймається рівною нулю, але при цьому в пазах у відповідності до схеми обмотки задається стороння густина струмів, яка для різних фаз визначається за формулами

$$\begin{aligned} J_{Acm} &= I_m u_{\Pi} / S_{\Pi}, \\ J_{Bcm} &= I_m u_{\Pi} [\cos(-2\pi/3) - j \sin(-2\pi/3)] / S_{\Pi}, \\ J_{Ccm} &= I_m u_{\Pi} [\cos(-4\pi/3) - j \sin(-4\pi/3)] / S_{\Pi}, \end{aligned} \quad (3)$$

де I_m – амплітуда струму в фазі обмотки статора; u_{Π} – число послідовно з'єднаних провідників в пазу статора; S_{Π} – площа перерізу паза статора.

Рівняння (1) доповнюється граничною умовою – значенням векторного магнітного потенціалу на границі розрахункової області. На зовнішній границі осердя статора задається однорідна гранична умова першого роду, що означає відсутність магнітних потоків розсіювання через ярмо статора

$$A|_{G_1} = 0. \quad (4)$$

Індукована в електропровідних елементах ротора густина струму визначається на підставі першого рівняння Максвелла наступним виразом:

$$\underline{J}_z = (\partial \underline{B}_y / \partial x - \partial \underline{B}_x / \partial y) / \mu_0, \quad (5)$$

де складові магнітної індукції знаходяться після розрахунку векторного магнітного потенціалу

$$\underline{B}_x = \partial \underline{A}_z / \partial y, \quad \underline{B}_y = \partial \underline{A}_z / \partial x. \quad (6)$$

Питомі (об'ємні, Вт/м³) втрати потужності в стрижнях обмотки ротора визначаються так

$$Q_2(x, y) = |\underline{J}_z(x, y)|^2 / \gamma(T). \quad (7)$$

Втрати потужності в обмотці статора і магнітопроводі АД знаходяться традиційним методом за заданих активному опорі і струмах в фазах обмотки статора та відомих величинах магнітної індукції в магнітопроводі. Зокрема втрати в обмотці статора знаходяться за формулою

$$q_1 = 3I_1^2 r_1(T), \quad (8)$$

де $r_1(T)$ – активний опір фази обмотки статора; I_1 – діюче значення струму в фазі статора. Температурна залежність опору для більшості металів описується формулою

$$r_1(T) = r_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (9)$$

де r_0 – електричний опір за початкової температури T_0 ; α – температурний коефіцієнт електричного опору; $\nabla T = T - T_0$ – зміна температури. Знаючи об'єм провідників обмотки статора V_1 , знаходять питомі втрати потужності в обмотці статора

$$Q_1 = q_1 / V_1. \quad (10)$$

Втрати в шихтованих ярмі і зубцях статора знаходяться за емпіричними формулами [2, 6]

$$q_a = p_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} k_a B_a^2 m_a, \quad q_z = p_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} k_z B_z^2 m_z, \quad (11)$$

де k_a, k_z – коефіцієнти, що враховують нерівномірності розподілу магнітного потоку в ярмі і зубцях статора та технологічні фактори: $k_a=1,6\dots 1,7$; $k_z=1,8\dots 1,9$; B_a, B_z – усереднені значення магнітної індукції в ярмі і зубцях статора; m_a, m_z – маса ярма і зубців статора; $p_{1/50}$ – питоме значення втрат за індукції 1 Тл і частоті 50 Гц, яке наведено у довідковій літературі. Знаючи об'єм ярма V_a і зубців V_z статора, знаходять усереднені питомі (Вт/м³) втрати потужності

$$Q_{a1} = q_a / V_a, \quad Q_{z1} = q_z / V_z. \quad (10)$$

У разі необхідності можуть бути враховані інші види втрат: в осерді ротора, додаткові (поверхневі, пульсаційні тощо). Таким чином задаються повні питомі втрати в АД

$$Q(x, y) = Q_1 + Q_2 + Q_{a1} + Q_{z1}. \quad (12)$$

Кожна складова втрат локалізована в межах підобласті, яку займає відповідний елемент конструкції.

Теплове поле АД описується стаціонарним диференціальним рівнянням теплопровідності. В декартових координатах у двовимірній постановці рівняння записується у наступному вигляді:

$$\lambda(T) \left[\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} \right] = -Q(x, y), \quad (13)$$

де $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності (Вт/м · град). Для більшості матеріалів залежність коефіцієнта теплопровідності від температури наближено можна вважати лінійною

$$\lambda(T) = \lambda_0 (1 + \beta \Delta T), \quad (14)$$

де β – стала, яка визначається дослідним шляхом.

Рівняння (13) є справедливим для суцільних середовищ. Як показали подальші розрахунки, з огляду на малу величину повітряного проміжку між статором і ротором, тепловіддача з поверхонь осердь статора і ротора у повітряний проміжок до охолоджуючого повітря є незначною і тому повітряний проміжок можливо представити суцільним шаром з еквівалентним малим значенням коефіцієнта теплопровідності і розглядати розрахункову зону СТА-1200 таку ж, як і під час аналізу електромагнітного поля.

На зовнішніх границях розрахункової області у тому числі на поверхнях вентиляційних каналів задаються граничні умови третього роду

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(v)(T - T_{0x}), \quad (15)$$

де $\alpha(v)$ – коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь в охолоджуюче повітря (Вт/м²град); T_{0x} – усереднена температура охолоджуючого холодоагенту, задана з урахуванням його підігріву в процесі руху уздовж охолоджуваного каналу. Коефіцієнт тепловіддачі суттєво залежить від швидкості руху v холодоагенту відносно поверхні. Його числове значення отримують експериментальними методами [3, 6, 8]. Надалі використовується приведена в роботі [2] формула для визначення коефіцієнту тепловіддачі від стінки круглого каналу до повітря, яка справедлива для конструкцій більшості ЕМ

$$\alpha(v) = 0,027\lambda \cdot a^{-0,78} \cdot d_k^{-0,22} \cdot v^{0,78}, \quad (16)$$

де $a = \lambda / C_p = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ (м}^2 \text{ с)}$ – температуропровідність повітря за 40⁰С; $\lambda = 0,0267 \text{ (Вт/м град)}$ – теплопровідність повітря за температури 40⁰С; питома теплоємність $C = 1020 \text{ Дж/кг Град}$; d_k – діаметр каналу. Для кожної охолоджуваної поверхні необхідно мати значення швидкості повітря.

Температура охолоджуваної поверхні залежить від загального об'єму (витрат) охолоджуючого повітря, яке рухається уздовж поверхні. Нагрів залежить як від швидкості руху холодоагенту, так і від розмірів (геометрії) поверхні. В загальному випадку швидкість руху v_i в i -му вентиляційному каналі виражається через витрати холодоагенту P_i у каналі і площу поперечного перерізу каналу s_i

$$v_i = P_i / s_i. \quad (17)$$

Підставляючи (17) в (16), отримаємо залежність коефіцієнтів тепловіддачі від витрат холодоагенту.

Головною задачею вентиляційного розрахунку є вибір конструкції системи вентиляції та параметрів нагнітальних елементів, які забезпечують обсяг витрат охолоджуючого холодоагенту, по-

трібний для підтримання допустимої температури усіх елементів ЕМ. Для переміщення по вентиляційній мережі необхідної кількості холодоагенту вентилятори здійснюють певну роботу, підтримуючи тиск H , необхідний для подолання опору мережі. Зазвичай вентиляційна мережа складається з послідовно та паралельно з'єднаних між собою вентиляційних каналів і порожнин різної площі перерізу. Тому характер руху холодоагенту в елементах мережі здебільшого є турбулентним. Для таких випадків справедливою є квадратична залежність тиску від витрат холодоагенту

$$H = zP^2, \quad (18)$$

де z – повний гідродинамічний (аеродинамічний) опір вентиляційній мережі.

Розрахунок вентиляційного процесу на основі рівнянь аеродинаміки (гідродинаміки) необхідний за наявності у вентиляційній системі значних за об'ємом порожнин, коли відмінність швидкості руху окремих частинок холодоагенту (поле швидкостей) суттєво впливає на процес охолодження. Але в більшості конструкцій ЕМ таких умов немає і рух холодоагенту відбувається в обмежених просторах. Наприклад, в аксіальному вентиляційному каналі у його поперечному перерізі розподіл швидкості руху холодоагенту має параболічний характер: найбільшу швидкість мають частинки у центрі каналу і найменшу – на границях, де відбувається тертя частинок з нерухомою твердою границею. Але в ЕМ ця та інші особливості руху можуть бути враховані наближеним способом, і тому з

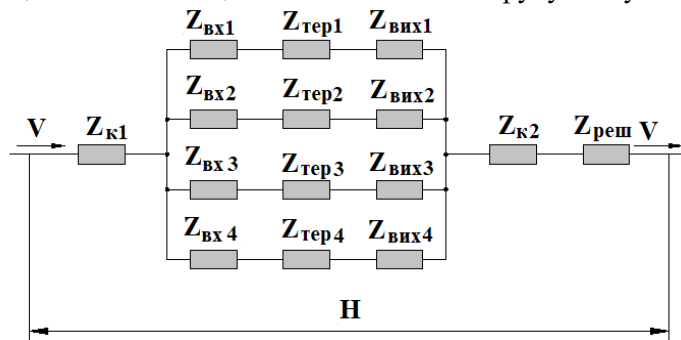


Рис. 1

урахування суттєво меншої обчислювальної складності розрахунок вентиляції ЕМ доцільно проводити на основі зосереджених схем заміщення вентиляційної системи. Для СТА-1200 схема заміщення має наступний вигляд (рис. 1). Вона містить 4 паралельні гілки, які відповідають: аксіальним каналам статора і ротора, кільцевому вентиляційному каналу навколо ярма осердя статора і повітряному проміжку між статором і ротором. На рис. 1 позначено наступні аеродинамічні опори ділянок

вентиляційної системи: $Z_{вх1} \dots Z_{вх4}$ – опори під час входу повітря в зазначені вентиляційні канали; $Z_{вих1} \dots Z_{вих4}$ – опори під час виходу повітря з зазначених вентиляційних каналів; $Z_{тер1} \dots Z_{тер4}$ – опори тертя повітря в зазначених вентиляційних каналах; $Z_{к1}, Z_{к2}$ – опори під час входу і виходу повітря в зону осердь статора і ротора; $Z_{реш}$ – опір вентиляційної решітки.

Для ланки мережі, яка складається з послідовно з'єднаних елементів, її сумарний опір дорівнює сумі опорів елементів

$$z_{носл} = \sum z_i. \quad (19)$$

Для ланки мережі, яка складається з паралельно з'єднаних елементів внаслідок нелінійності залежності (18), для сумарного опору ланки справедливим є наступний вираз:

$$1/\sqrt{z_{парал}} = \sum 1/\sqrt{z_i}. \quad (20)$$

Достовірний розрахунок опорів z_i з урахуванням особливостей руху холодоагенту по вентиляційній мережі являє складну задачу. На практиці в значній мірі використовуються експериментально отримані результати, формули для розрахунку опору z окремих елементів вентиляційної мережі наведено в літературних джерелах [3].

В рамках КМММ задля виконання вентиляційного розрахунку вхідними даними є: конструкція вентиляційної системи з заданими гідродинамічними опорами елементів вентиляційної мережі; режим роботи вентиляторів, що відображається заданим значенням загального тиску на вході у вентиляційну мережу. Розрахункове розподілення витрат холодоагенту надалі використовується у виразах (16) – (18) при завданні граничних умов (15) під час розв'язання теплової задачі.

Для електромагнітних розрахунків вхідними даними є: геометрія активної зони, обмотувальні дані обмоток статора і ротора, електропровідність і магнітна проникність активних матеріалів; величини струмів в обмотці статора; ковзання; втрати в обмотках і магнітопроводі тощо.

Для розрахунку теплового поля ЕМ задаються теплофізичні характеристики активних матеріалів. Система рівнянь і співвідношень (1) – (20) формує коло-польову КМММ сталих електромагнітних, теплових і вентиляційних процесів в СТА-1200. Причому математичний зв'язок між параметрами різних фізичних полів відображається виразами (2), (7), (9), (15) – (18).

Методологія розв'язання зазначеної КМММ базується на використанні ітераційних розрахунків, в процесі яких відбувається уточнення та узгодження значень електрофізичних і теплофізичних характеристик активних матеріалів, граничних умов, теплових втрат, розподілу температури і векторного магнітного потенціалу. Реалізація КМММ дає можливість отримати повністю узгоджену систему чисельних характеристик фізичних процесів різної природи, які відбуваються в ЕМ.

Результати дослідження. Практичний результат моделювання полягає в удосконаленні конструкції серійного СТА-1200. Метою удосконалення є покращення питомих масо-габаритних і енергетичних показників двигуна за його незмінних номінальних характеристиках. З цією метою проводилось моделювання двигуна за варіаціях лише зовнішнього діаметру осердя статора і діаметру вентиляційних каналів осердя статора і ротора. Діаметр ротора, величина повітряного проміжку між статором і ротором, зубцево-пазові зони статора і ротора разом з обмотками залишалися незмінними. Активна довжина двигуна, виходячи з умов його монтажу, також залишалася незмінною. Варіювання лише зазначеної обмеженої кількості конструктивних параметрів двигуна відповідає поняттю “удосконалення серійного двигуна”. Варіювання більш широкої кількості параметрів двигуна означає його перепроектування і під час застосування КМММ може вести до подальшого покращення його характеристик. Переріз активної зони серійного і оптимального удосконаленого варіантів СТА-1200 показано на рис. 2, а та 2, б, на яких також зображено картини теплових полів двигунів, а в таблиці представлено їхні основні розрахункові дані.

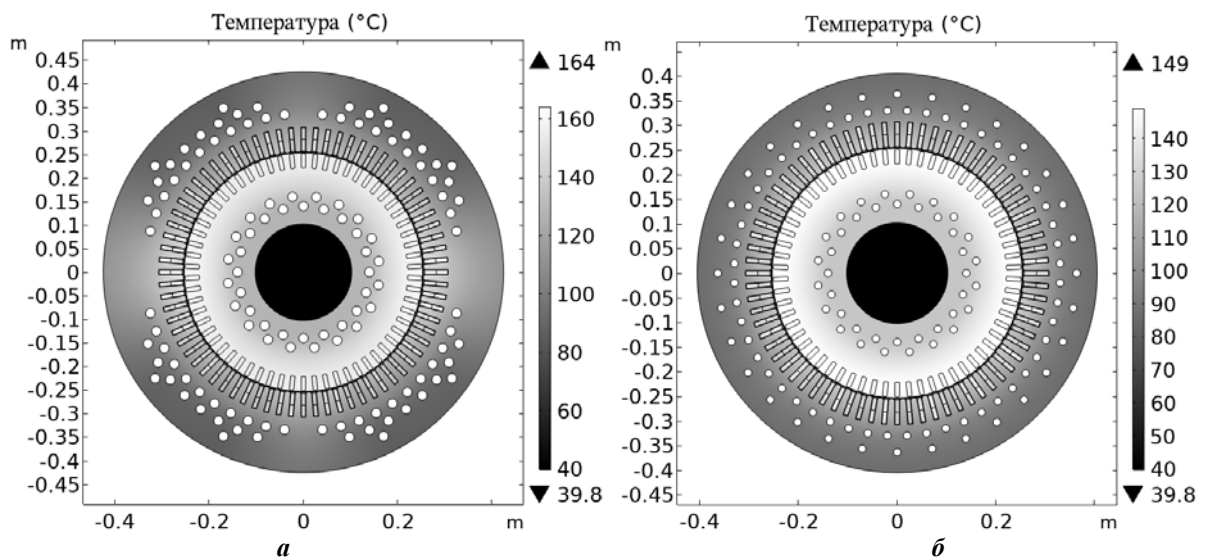


Рис. 2

Слід зазначити, на відміну від серійного СТА-1200 в удосконаленому варіанті двигуна вентиляційні канали осердя статора розташовані рівномірно по колу ярма статора. Це дало додатковий позитивний ефект, який полягає в рівномірному нагріву ярма і обмотки статора уздовж кола статора.

Порівняльний аналіз розрахункових даних в таблиці засвідчує помітні переваги удосконаленого варіанта двигуна внаслідок мультифізичного моделювання з використанням КМММ. Зокрема:

1. Зменшення висоти ярма статора за рахунок зменшення діаметру статора з 850 мм до 810 мм (на 5%) за одночасного зменшення діаметру вентиляційних каналів з 20 мм до 15 мм дало можливість збільшити магнітну індукцію в ярмі статора з 1,05 Тл до більш оптимального значення 1,44 Тл. При цьому індукція в зубцях статора і ротора і загалом коефіцієнт насичення залишається без змін.

2. Помітно зменшилися температури основних вузлів двигуна: обмотки статора зі 164 °C до 139 °C; обмотки ротора зі 156 °C до 149 °C; осердя статора зі 112 °C до 89 °C. Це обумовлено, в першу чергу, зменшенням діаметру вентиляційних каналів з 20 мм до 15 мм, що на перший погляд виглядає парадоксальним результатом. Дійсно, за такого зменшення діаметру витрати повітря через канали статора зменшилися з 0,75 м³/с до 0,57 м³/с, а через канали ротора – з 0,35 м³/с до 0,27 м³/с. Але при цьому з урахуванням характеристик вентилятора швидкість руху повітря в каналах збільшилася – відповідно з 28,3 м/с до 38,75 м/с для статора і з 28,28 м/с до 38,7 м/с – для ротора. Це, згідно з виразом (16), привело до зростання коефіцієнтів тепловіддачі в каналах на 35% порівняно із серійним СТА-1200 (126 Вт/(м²·°C) і 92 Вт/(м²·°C) відповідно). Зростання коефіцієнтів тепловіддачі, які фор-

ують граничну умову (15) для теплової задачі, веде до зменшення розрахункової температури. Зменшення температури обмотки ротора веде до збільшення електропровідності стрижнів ротора, що згідно з виразом (7) сприяє зменшенню втрат в роторі. Додатковим фактором, що сприяє більш інтенсивному охолодженню обмотки статора, є наближення кільцевого вентиляційного каналу до пазів статора, оскільки через кільцевий канал проходить 34% загальних витрат повітря.

3. Маса осердя статора зменшилася на 135 кг, а питома потужність двигуна зросла з 0,5 до 0,55 кВт/кг (на 11 %).

	Серійний СТА-1200	Удосконалений СТА-1200
Потужність, кВт	1200	1200
Струм обмотки статора, А	452	452
Зовнішній діаметр осердя статора, мм	850	810
Кількість вентиляційних каналів осердя статора	84	84
Кількість вентиляційних каналів осердя ротора	40	40
Діаметр вентиляційних каналів, мм	20	15
Магнітна індукція в ярмі осердя статора, Тл	1,05	1,44
Магнітна індукція в зубцях статора, Тл	2,13	2,13
Магнітна індукція в зубцях ротора, Тл	1,9	1,9
Витрата повітря через повітряний проміжок, м ³ /с	0,088	0,12
Витрата повітря через кільцевий вентиляційний канал між ярмом і станиною, м ³ /с	0,6	0,82
Витрата повітря через канали статора, м ³ /с	0,75	0,57
Витрата повітря через канали ротора, м ³ /с	0,35	0,27
Швидкість повітря в повітряному проміжку, м/с	27,4	39
Швидкість повітря в кільцевому вентиляційному каналі між ярмом і станиною, м/с	33,85	48,15
Швидкість повітря в каналах статора, м/с	28,3	38,75
Швидкість повітря в каналах ротора, м/с	28,28	38,7
Коефіцієнт тепловіддачі в кільцевому вентиляційному каналі між ярмом і станиною, Вт/(м ² ·°С)	68,4	90,5
Коефіцієнт тепловіддачі в аксіальних каналах статора, Вт/(м ² ·°С)	92,89	126,4
Коефіцієнт тепловіддачі в аксіальних каналах ротора, Вт/(м ² ·°С)	92,8	126,2
Температура обмотки статора, °С	164	139
Максимальна температура осердя статора, °С	112	89
Температура обмотки ротора, °С	156	149
Маса осердя статора, кг	1065	930
Питома потужність двигуна, кВт/кг	0,5	0,55

Висновки. 1. Розроблено комплексну мультифізичну математичну модель фізичних процесів в форсованих тягових електричних машинах, яка враховує взаємний вплив електромагнітних, теплових та вентиляційних процесів в машині та забезпечує високу достовірність результатів розрахунку.

2. Реалізація КМММ на прикладі серійного тягового асинхронного двигуна СТА-1200, який характеризується високим електромагнітним та тепловим навантаженням, дала можливість сформулювати прості, але ефективні технічні рішення щодо покращення його характеристик. Зокрема, зменшення на 5% зовнішнього діаметру осердя статора і зменшення діаметру аксіальних вентиляційних каналів з 20 мм до 15 мм дало змогу не тільки покращити питомі характеристики двигуна – його питома потужність зросла на 11%, – але й зменшити на 15 % температуру обмотки статора та покращити використання магнітопроводу статора. Досліджений приклад СТА-1200 наочно демонструє необхідність і перспективність комплексного мультифізичного моделювання форсованих електричних машин, яке забезпечує узгодженість характеристик фізичних процесів різної природи, що відбуваються в ЕМ.

1. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. К.: НТУ України «КПІ», 2007. 191с.
2. Гольдберг О.Д., Гурін Я.С., Свириденко І.С. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001. 430 с.

3. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 366 с.
4. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Наш формат, 2015. 306 с.
5. Себко В.В. Воздействие температуры на магнитную проницаемость и удельное электрическое сопротивление цилиндрического изделия. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2003. № 3. С. 44-47.
6. Циценков Д.В., Иванов О.Б., Бобров О.В., Кузнецов В.В., Артемчук В.В., Баб'як М.О. Проективання електричних машин. Дніпро: НТУ ДП, 2020. 408 с.
7. Асинхронний тяговий електродвигун СТА-1200. URL: <https://prom-ocean.com.ua/elektrodvigateli/tyagovye-elektrodvigateli/asinhronnyy-tyagovyy-dvigatel-sta-1200> (дата звернення 15.01.2024).
8. Mariusz Baranski, Andrzej Demenko, Wojciech Szlag, Wieslaw Lyskawinski. Experimental verification of temperature effects on functional parameters in a line start permanent magnet synchronous motor. *IET Science, Measurement & Technology*. 2024. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1049/smt2.12206>.

COMPLEX MULTIPHYSICS MATHEMATICAL MODEL PHYSICAL PROCESSES IN POWERFUL ELECTRIC TRACTION MACHINES

Yu.M. Vaskovskiy, D.S. Nesterenko

**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Beresteiskiy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.**

E-mail: yun157@gmail.com; denia1112222@gmail.com.

A complex coupled-field multiphysics mathematical model to describe the electromagnetic, thermal, and ventilation processes in a traction induction motor has been developed. This model takes into account the mutual influence of these processes on the characteristics of the motor, ensuring high accuracy of the simulation results, that distinguish it from existing approaches and mathematical models. The model is implemented on the example of a serially-produced motor STA-1200, with a capacity of 1200 kW, characterized by high level of electromagnetic and thermal loads, used in train locomotives. Although the design of the series-production STA-1200 was considered optimal, the application of the developed multiphysics model has allowed for additional recommendations to improve its performance by accurate considering the mutual influence of different physical processes occurring during its operation. Specifically, when operating in the same nominal operation mode, the improved motor has better specific mass-dimensional and energy characteristics compared to the serially-produced STA-1200. References 8, table 1, figures 2.

Key words: traction asynchronous motor, multiphysics mathematical model, stator winding temperature, specific weight and dimensions.

1. Vaskovskiy Y.M. Field analysis of electric machines. Kyiv: Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy KPI, 2007. 191 p. (Ukr)
2. Goldberg O.D., Gurin Ya.S., Sviridenko I.S. Design of electrical machines. Moskva: Vysshaia shkola, 2001. 430 p. (Rus)
3. Kutateladze S.S. Heat transfer and hydrodynamic resistance. Moskva: Energoatomizdat, 1990. 366 p. (Rus)
4. Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Nash format, 2015. 306 p. (Rus)
5. Sebko V.V. The effect of temperature on magnetic permeability and specific electrical resistance of a cylindrical products. *Elektrotekhnika i Elektromekhanika*. 2003. No 3. Pp. 44-47. (Rus)
6. Tsyplenkov D.V., Ivanov O.B., Bobrov O.V., Kuznetsov V.V., Artemchuk V.V., Babiak M.O. Design of electrical machines. Dnipro: NTU DP, 2020. 408 p. (Ukr)
7. Asynchronous traction motor STA-1200. URL: <https://prom-ocean.com.ua/elektrodvigateli/tyagovye-elektrodvigateli/asinhronnyy-tyagovyy-dvigatel-sta-1200> (accessed at 15.01.2024). (Ukr)
8. Mariusz Baranski, Andrzej Demenko, Wojciech Szlag, Wieslaw Lyskawinski. Experimental verification of temperature effects on functional parameters in a line start permanent magnet synchronous motor. *IET Science, Measurement & Technology*. 2024. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1049/smt2.12206>.

Надійшла 27.08.2024

Остаточний варіант 24.10.2024