

М.М. Заблодський, Донбаський державний технічний університет

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ
І ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ В ЕЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНІЧНОМУ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕНЕРГІЇ**

Заблодський М.М.

Математичне моделювання електромагнітних і теплових полів в електротепломеханічному перетворювачі енергії

Наведено результати теоретичних досліджень, отримано залежності, що описують розподіл електромагнітних і теплових полів в електротепломеханічному перетворювачі енергії.

Ключові слова: електротепломеханічний перетворювач енергії, електромагнітне поле, теплове поле, метод скінченних елементів.

Заблодский Н.Н.

Математическое моделирование электромагнитных и тепловых полей в электротепломеханическом преобразователе энергии.

Приведены результаты теоретических исследований, получены зависимости, которые описывают распределение электромагнитных и тепловых полей в электротепломеханическом преобразователе энергии.

Ключевые слова: электротепломеханический преобразователь энергии, электромагнитное поле, тепловое поле, метод конечных элементов.

Створення енергозберігаючих технологій переробки сировини в нафтохімічній, чорнометалургійній і сільськогосподарській галузях промисловості є актуальним завданням, оскільки існуючі технології побудовані на енергоємних видах устаткування з низьким значенням ККД і використанні як енергоносіїв природного газу й нафтопродуктів, зростання цін на які роблять ці технології економічно недоцільними. Ефективним може стати створення електротепломеханічних перетворювачів (ЕТМП) технологічного призначення, що передбачають структурну, функціональну й теплову інтеграцію.

Аналіз вітчизняних і зарубіжних досліджень та розробок показує, що при проектуванні електромеханічних перетворювачів з масивним ротором основна

увага надається електромагнітним розрахункам пристроїв з внутрішнім масивним ротором, що працює в режимах малих ковзань [1, 2]. Аналіз процесів ведеться для сталих теплових режимів при незмінній температурі навколишнього середовища. Більш того, масивний ротор у цих конструкціях не має контакту з сировиною, яка в технологіях з ЕТМП виконує роль охолоджуючого й навантажуючого середовища, що переробляється. Взаємний вплив електромагнітних, теплових і механічних процесів, що відбуваються в ЕТМП, складність конструкції активної зони й нелінійність фізичних характеристик його матеріалів вимагають використання методів теорії поля для отримання достовірних результатів при розрахунковому аналізі робочих характеристик і режимів роботи ЕТМП. Особливе значення для ЕТМП має облік взаємного впливу електромагнітних і теплових процесів, що відбуваються в активній зоні перетворювача.

Тому потрібно дослідити розподіл електромагнітних і теплових полів в електротепломеханічному перетворювачі енергії.

Сформулюємо узагальнену математичну модель (ММ) ЕТМП. Узагальненість ММ полягає в тому, що вона заснована на використанні загальних фундаментальних рівняннях ланцюгів обмоток ЕТМП, рівнянь фізичних полів у його активній зоні і рівнянь руху рухомої частини. Така модель у цілому віддзеркалює всю сукупність фізичних процесів, що відбуваються в ЕТМП, незалежно від типу й конструктивного виконання перетворювача. Надалі як конкретний приклад побудови ММ розглядатимемо найперспективніший для практичного використання двомодульний ЕТМП, що складається з двох робочих модулів: рухового і гальмівного. Проте побудована модель легко поширюється на інші ЕТМП з довільною кількістю модулів.

При побудові ММ ЕТМП приймемо такі основні спрощуючі припущення:

1. Взаємопов'язані електромагнітний і тепловий процеси в руховому модулі відбуваються незалежно від аналогічних процесів у гальмівному модулі ЕТМП. Взаємний вплив модулів урахується при формуванні сумарного

електромагнітного моменту, діючого на загальний ротор перетворювача, за допомогою складання електромагнітних моментів модулів.

2. Для аналізу електромагнітного й теплового полів ЕТМП використовуються двовимірні польові моделі в межах поперечного перетину кожного з модулів ЕТМП.

Узагальнена ММ взаємопов'язаних електромагнітних, теплових і механічних процесів в ЕТМП репрезентується такими рівняннями й математичними виразами. Умови електричної рівноваги контурів обмоток статорів модулів ЕТМП описуються такими диференціальними рівняннями:

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{r}_k \mathbf{i}_k + \frac{d\psi_k}{dt}, \quad (1)$$

де $\mathbf{u}_k, \mathbf{i}_k, \mathbf{r}_k, \psi_k$ – відповідно напруга, струм, активний опір і повне магнітне потокозчеплення обмотки статора,

k – індекс модуля ($k = 1$ для рухового модуля, $k = 2$ – для гальмівного).

Повні потокозчеплення, що входять у (1), знаходяться після розрахунку електромагнітного поля.

У якості визначальної функції електромагнітного поля використали векторний магнітний потенціал \vec{A}_z . Відповідно до другого прийнятого припущення польовий аналіз виконали в межах двовимірної розрахункової області, що віддзеркалює поперечний перетин модуля ЕТМП. Приклад такої області показаний на рисунку 1.

Для обліку різних умов охолодження верхньої ділянки ротора, який інтенсивно охолоджується повітрям, і нижньої ділянки, що занурена в сипкий матеріал, область зовнішнього ротора ЕТМП реперезентована двома підобластями 1 і 1'. Внутрішній статор ЕТМП містить пази з трифазною обмоткою й аксіальними вентиляційними каналами. Для ЕТМП з іншими даними в конфігурації розрахункової області виконуються відповідні зміни.

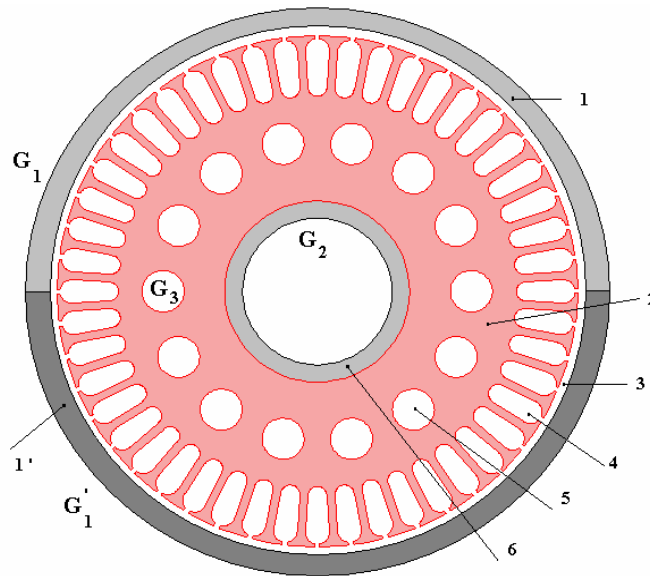


Рис.1. Поперечний перетин ЕТМП:

- 1, 1' – ділянки зовнішнього ротора, 2 – внутрішній статор,
 3 – повітряний зазор, 4 – напівзакриті пази статора,
 5 – аксіальні вентиляційні канали, 6 – порожнистий вал статора

При аналізі двовимірного поля в поперечному перетині ЕТМП у декартовій системі координат векторний магнітний потенціал має тільки одну осьову складову $\vec{A}(x, y, t) = \vec{e}_z A_z(x, y, t)$, вектор швидкості дорівнює $\vec{v} = \vec{e}_x v_x + \vec{e}_y v_y$ і рівняння (1) переписується у вигляді:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} - \gamma \frac{\partial A_z}{\partial t} - \gamma \left(v_x \frac{\partial A_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_{z \text{ стор}}, \quad (2)$$

де μ, γ – магнітна проникність і електропровідність ділянок середовища в межах розрахункової області;

$J_{\text{стор}}$ – значення густини струму, викликані сторонніми ЕРС;

\vec{v} – швидкість руху електропровідного тіла відносно джерела магнітного поля.

Відмінна від нуля електропровідність матеріалу задається тільки в масивному роторі ЕТМП. При цьому півкільця ротора 1 і 1' можуть мати різні

значення електропровідності. Це дозволяє досліджувати вплив несиметрії параметрів ротора, викликаних різним нагріванням окремих його ділянок. Для шихтованих сердечників статора приймається $\gamma = 0$. Хоча вихрові струми в листах шихтованих магнітопроводів існують, вони практично не впливають на характер розподілу поля в активній зоні машини. Дія цих струмів враховується тільки при розрахунку ККД. Тому для області статора справедливе рівняння Пуассона:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -J_{z \text{ стор}} \quad (3)$$

Джерела поля - стороння густина струмів – задається в перетині пазів статора відповідно до схеми обмотки статора. Зокрема, якщо в пазах, у яких лежать провідники фази „А”, задається амплітудне значення густини струму J_{\max} , то в пазах з провідниками фаз „В” і „С” задається $-J_{\max} / 2$ і т.д. Величина еквівалентної густини струму в пазу статора розраховується по наступному виразу:

$$J_{\max} = I \sqrt{2} w_{\Pi} / S_{\Pi}, \quad (4)$$

де I – діюче значення струму обмотки статора;

w_{Π} – число послідовно сполучених елементарних провідників у пазу;

S_{Π} – площа перетину паза статора.

У виразі (4) не враховується перетин пазової ізоляції, але повна НС паза залишається незмінною.

Для обертального руху ротора лінійні швидкості в кожній точці ротора виражаються через кутову частоту обертання ротора ω_R . При цьому складові швидкості дорівнюють $v_x = \omega_R y$, $v_y = \omega_R x$, де x, y - координати довільної точки ротора.

По відомій функції векторного магнітного потенціалу на підставі співвідношення $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ легко знайти складові вектора магнітної індукції:

$$B_x = \partial A_z / \partial y, B_y = -\partial A_z / \partial x \quad (5)$$

Аналіз сталих режимів роботи ЕТМП при величинах, що гармонійно змінюються в часі, проводиться за допомогою методу комплексних амплітуд. При цьому рівняння (2) набуває такого вигляду:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial y^2} - j\omega_1 \gamma \dot{A}_z - \gamma \omega_R \left(y \frac{\partial \dot{A}_z}{\partial x} - x \frac{\partial \dot{A}_z}{\partial y} \right) = -\dot{J}_{z \text{ стор}}, \quad (6)$$

де ω_1 – кутова частота струмів обмотки статора.

Рівняння (2) або (6) доповнюються граничними умовами – значенням векторного магнітного потенціалу або його нормальної похідної на зовнішніх межах розрахункової області, що відображає активну зону ЕТМП [3]. Такими межами для ЕТМП є зовнішня поверхня масивного ротора $G_1 + G_1'$ і внутрішня поверхня валу статора G_2 . Звичайно на цих поверхнях задаються однорідні граничні умови першого роду:

$$A(x, y, t) |_{G_1 + G_1', G_2} = 0 \quad (7)$$

Завдання граничної умови (7) еквівалентне ухваленню припущення про відсутність магнітних потоків розсіяння в зовнішній простір через дані межі.

При вирішенні нестационарного польового рівняння (2) необхідно задати початкові умови – значення функції, що відшукується, у середині області в початковий розрахунковий момент часу t_0 :

$$A(x, y, z, t) |_{t=t_0} = A_0(x, y, t_0). \quad (8)$$

При аналізі характерних для ЕТМП динамічних процесів, наприклад, пуску, звичайно задається однорідна початкова умова $A_0(x, y, t_0) = 0$.

Для визначення індукованої в роторі густини струму може бути використаний такий вираз, що витікає з першого рівняння системи рівнянь Максвелла:

$$J_z = \text{rot}_z H = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) \quad (9)$$

Після розрахунку поля векторного магнітного потенціалу нескладно знайти повне магнітне потокозчеплення всіх фаз обмотки статора за таким виразом [4]:

$$\Psi_k = \frac{2I_a w_{II}}{S_{II}} \int_{S_A} \mathbf{A}_z \cdot d\mathbf{s}, \quad (10)$$

де S_A – площа інтегрування, що складається з сумарної площі поперечного перетину сторін усіх послідовно сполучених котушок фази, які мають струми одного напрямку;

I_a – активна довжина статора.

У кожній точці ротора питомі втрати розраховуються за виразом:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{J}_z^2 / \gamma(T), \quad (11)$$

де електропровідність заліза ротора в кожній його точці залежить від температури T згідно із законом:

$$\gamma(T) = \gamma_0 / (1 + \alpha T), \quad (12)$$

де γ_0 – електропровідність „холодного” ротора,

α – температурний коефіцієнт.

Диференціальне рівняння теплового поля в приватних похідних щодо температури T має такий вигляд [5]:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \mathbf{Q} \quad (13)$$

де λ, c, ρ – відповідно теплопровідність, теплоємність і густина матеріалу;

\mathbf{Q} – питомі теплові втрати, що розраховуються за виразом (11).

Взаємозв'язок рівнянь електромагнітного й теплового полів виявляється у взаємному впливі температури, електропровідності, густини вихрових струмів і питомих теплових втрат, який віддзеркалюється у виразах (9), (11), (12). Так, як і для рівняння електромагнітного поля, для рівняння (13) задаються граничні й початкові умови. Вибір граничних умов обумовлений особливостями системи вентиляції ЕТМП. При побудові ММ припустили, що основна теплопередача в

навколишнє середовище ЕТМП теплової енергії, яка виділилася в активних елементах, здійснюється шляхом конвективного теплообміну між нагрітою поверхнею й потоком охолоджуючого повітря. Такий теплообмін відбувається відповідно до закону Ньютона – Ріхмана, а на відповідній межі задається гранична умова третього роду [5]:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{G_1, G_2, G_3} = -\frac{\alpha}{\lambda} (T - T_0) \quad (14)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі,

T_0 – температура охолоджуючого повітря.

Гранична умова (14) задається на верхній частині зовнішньої межі ротора G_1 , на внутрішній поверхні порожнистого валу статора G_2 і на поверхнях G_3 аксіальних вентиляційних каналів, виконаних у сердечнику статора. Теплообмін на нижній частині поверхні ротора G'_1 , яка стикається з сипким матеріалом, що транспортується, має складну фізичну природу. З фізичної точки зору найадекватнішим є припущення про передачу всіх джоульових втрат сипкому матеріалу, що виділилися в нижній половині ротора, у вигляді теплового потоку через поверхню G'_1 . Цьому припущенню відповідає гранична умова другого роду, яка задає середню величину теплового потоку на межі розрахункової області G'_1 :

$$q|_{G'_1} = \frac{1}{R_{2H}} \int_{S'} Q ds = \frac{1}{R_{2H}} \int_{S'} [J_z^2 / T(\gamma)] ds, \quad (15)$$

де R_{2H} – зовнішній радіус ротора,

S' – область інтегрування.

Така умова часто застосовується при розрахунках високотемпературних печей. Умова (15) також обумовлює взаємозв'язок електромагнітної й теплової задач.

Рівняння руху ротора ЕТМП з урахуванням силової дії обох модулів представляється рівнянням механічної рівноваги моментів:

$$J \frac{d\omega_R}{dt} = M_{\text{ЭМ1}} - M_{\text{ЭМ2}} - M_C, \quad (16)$$

де J – момент інерції ротора;

$M_{\text{ЭМ1}}$, M_C – відповідно електромагнітні моменти, що створюються першим (руховим) і другим (гальмівним) модулем і механічний момент опору навантаження.

Електромагнітні моменти модулів визначаються за наслідками розрахунку електромагнітного поля. Найефективнішим методом розрахунку електромагнітних моментів, який був використаний у цій роботі, є метод тензора магнітного натягнення [4]. Відповідно до цього методу електромагнітний момент розраховується інтеграцією тангенціальної складової вектора тензора магнітного натягнення T_τ за таким виразом:

$$M_{\text{ЕМ}} = 2 \cdot p \cdot F_\tau \cdot R_\delta = 2 \cdot p \cdot R_\delta \int_0^\tau T_\tau \cdot dl = \frac{2 \cdot p \cdot R_\delta}{\mu_0} \int_0^\tau B_n \cdot B_\tau dl, \quad (17)$$

де F_τ , T_τ – тангенціальні складові електромагнітної сили й тензора магнітного натягнення;

R_δ – радіус повітряного зазору;

B_n , B_τ – нормальна й тангенціальна складові магнітної індукції в повітряному зазорі;

p – число пар полюсів;

τ – полюсний розподіл. Для симетричної конструкції моменти всіх полюсів однакові, і тому інтегрування ведеться в повітряному зазорі вздовж довжини одного полюсного розподілу.

Механічний момент навантаження обумовлений опором сипкого матеріалу й має характер, що наближається до лінійної залежності. Цей момент може бути представлений такою залежністю:

$$M_C = M_{C0} + k\omega_R, \quad (18)$$

де k – коефіцієнт навантаження;

M_{C0} – постійна складова моменту навантаження, не залежна від швидкості валу (тертя й ін.).

Практична реалізація математичної моделі ЕТМП виконана в рамках програмно-обчислювального комплексу FEMLAB 3.1. Загальний вигляд програмного інтерфейсу комплексу спільно з двома панелями установок типу Subdomain Settings показаний на рис. 2. Одна з панелей (Perpendicular Currents) відповідає установкам електромагнітної задачі, друга (Heat Transfer Conduction) – установкам теплової задачі. Для спільного вирішення взаємозв'язаних рівнянь електромагнітного і теплового полів використовувалася установка MultiPhysics. Закладена до складу комплексу FEMLAB 3.1 система опцій для констант, зв'язаних змінних, функцій і виразів забезпечують побудову оригінальної й ефективної обчислювальної технології рішення сформульованої моделі. Графічний редактор, що є в складі, дозволяє будувати розрахункові області з високим рівнем деталізації.

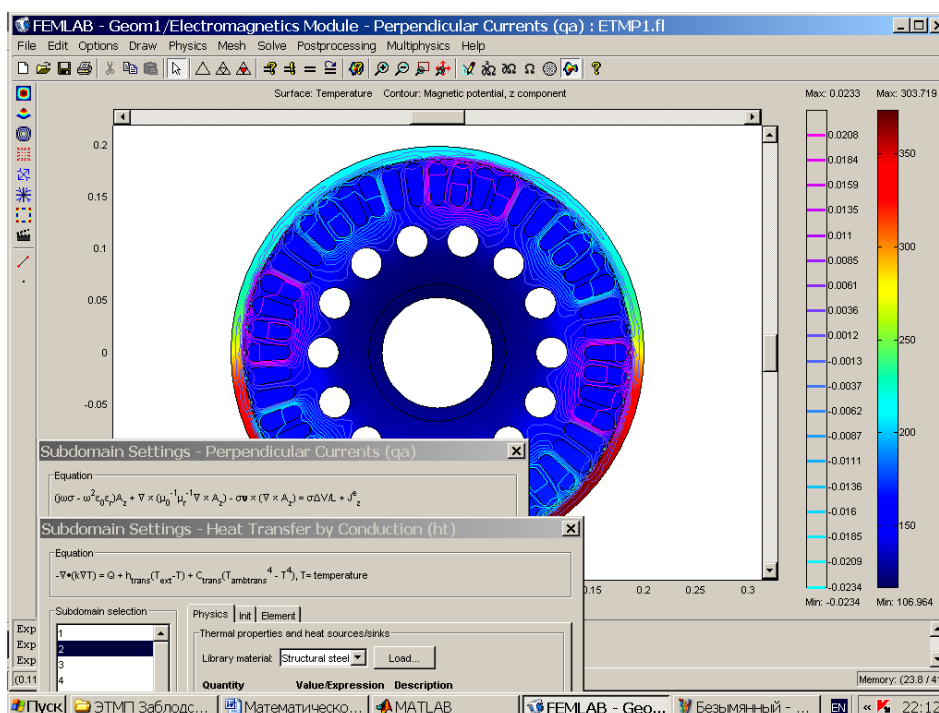


Рис.2. Програмний інтерфейс комплексу FEMLAB 3.1

Використовуючи розроблену математичну модель, здійснили аналіз і дослідження особливостей розподілу електромагнітних і теплових полів в ЕТМП.

Як об'єкт моделювання вибрали двомодульний ЕТМП з параметрами й конструктивним виконанням, характерним для широкого класу перспективних шнекових ЕТМП технологічного призначення. Висновки й результати моделювання полів і характеристик такого ЕТМП, володіючи достатньою спільністю, можуть бути поширені й на інші конструкції ЕТМП. Перетворювач має такі початкові дані.

Перший (руховий) модуль: довжина сердечника статора 500 мм; зовнішній діаметр статора 370 мм; внутрішній діаметр статора 135 мм; розміри паза статора – висота паза $h_{II} = 42$ мм, ширина шліца (відкриття паза) $b_{III} = 3,8$ мм, висота шліца 1 мм, великий і малий діаметри паза статора 17 мм, 13,5 мм; число пар полюсів 4; число ефективних провідників в пазу 24; число пазів статора 48; число паралельних гілок 2, число витків у фазі 96.

Другий (гальмівний) модуль: геометрія поперечного перетину статора ідентична першому модулю; $L_2 = 450$ мм; $u_{II2} = 30$; $w_2 = 120$, $a_2 = 2$.

Загальний для обох модулів порожнистий зовнішній ротор виконано із сталі марки Ст.3, має внутрішній діаметр $D_2 = 374$ мм, товщину 12 мм і довжину 1436 мм. Повітряний зазор між статором і ротором для кожного модуля $\delta = 2$ мм. Сполучені в трикутник фази трифазних обмоток статора харчуються фазною (лінійним) напругою 380 В.

Особливістю функціонування ЕТМП є його робота при малій частоті обертання ротора в умовах нестабільності моменту опору. Робочий діапазон ковзань ротора для рухового модуля складає $s = 0,85 \dots 0,95$, а для гальмівного – відповідно $s = 1,05 \dots 1,15$. Відомі в класичній теорії методи розрахунку механічних характеристик асинхронних машин не забезпечують необхідної точності розрахунку електромагнітного моменту ЕТМП в області великих ковзань. Такий розрахунок з точним обліком ефекту витіснення струмів у масивному роторі, нелінійної залежності магнітної проникності і впливу

температури можливий тільки методами теорії поля. При цьому реальне значення ковзання знаходиться шляхом накладення механічних характеристик модулів і опору навантаження. Далі наведено найхарактерніші й найістотніші результати моделювання ЕТМП із заданими параметрами.

На рис. 3 показана розрахункова картина електромагнітного поля в частині поперечного перетину першого модуля ЕТМП при пуску (ковзання $s = 1$).

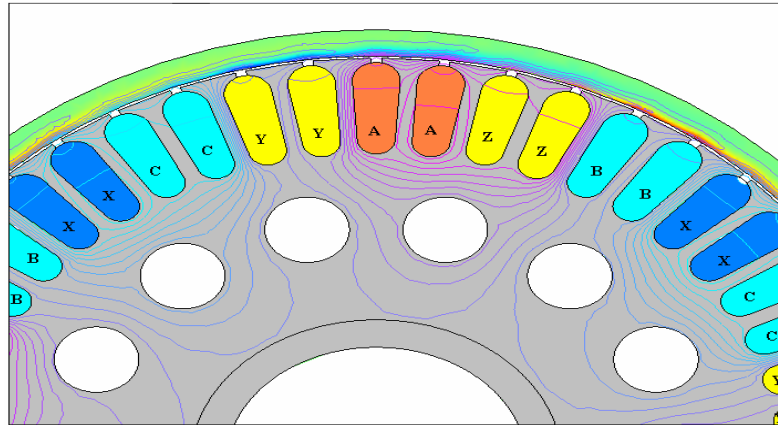


Рис.3. Картина електромагнітного поля першого модуля при пуску ЕТМП

Лініями зображені ізолінії векторного магнітного потенціалу, а фоновим зафарбовуванням різного кольору й інтенсивності – густина струмів. Максимальна густина індукованих струмів на поверхні масивного ротора при $s = 1$ досягає значення 42 А/мм^2 . При цьому спостерігається ефект „закручування” силових ліній поля, викликаний обертальним рухом магнітного поля статора щодо масивного ротора. Цей ефект обумовлений кінцевою швидкістю проникнення (дифузії) змінного електромагнітного поля в масивне електропровідне середовище. При взаємному переміщенні магнітного поля й електропровідного середовища вихрові струми на поверхні середовища та в її глибині відрізняються не тільки величиною, але й тимчасовою фазою. Це добре видно по рис. 4, на якому показано миттєвий розподіл густини вихрових струмів по глибині масивного ротора в момент пуску.

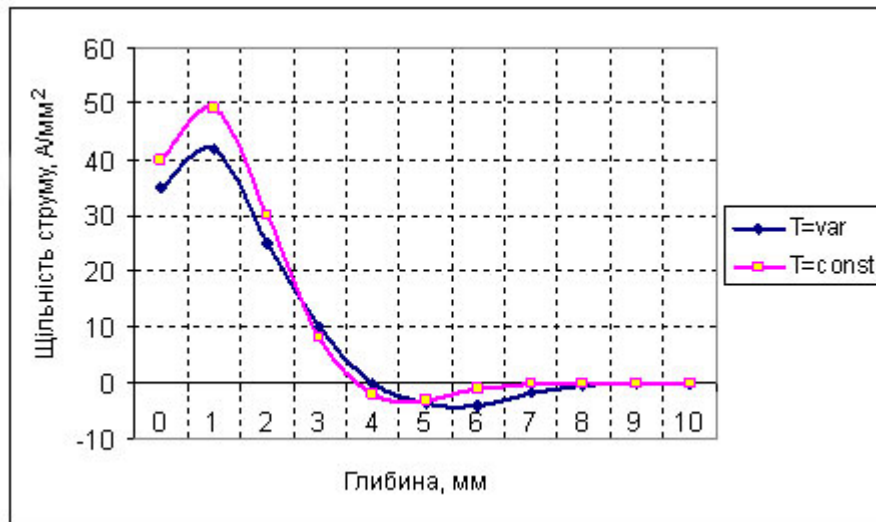


Рис.4. Розподіл густини струму по глибині масивного ротора

Дано дві криві – для холодного ротора (при температурі 40 °С) і при нагріванні ротора вихровими струмами. Повна глибина проникнення вихрових струмів у ротор при $s = 1$ складає близько 8 мм. При цьому напрям протікання струмів на різних відстанях від поверхні ротора різний. Це пов'язано з тим, що швидкість проникнення хвилі поля, що обертається, углиб ротора і швидкість її переміщення уздовж поверхні ротора сумірні.

У результаті на поверхні ротора збуджуються струми одного напрямку, а на деякій його глибині течуть затухаючі струми протилежного напрямку. Цей ефект уже наголошувався в роботах інших дослідників, наприклад, у [6]. Проте облік його впливу на результуючий електромагнітний момент асинхронного двигуна і, зокрема, ЕТМП, виконано вперше в цій роботі.

На рис. 5 цей розподіл магнітній індукції вздовж радіальної лінії, що проходить через зубець статора.

У повітряному зазорі магнітна індукція складає близько 0,8...0,9 Тл, у ніжках зубців статора досягає значення 2 Тл, а в поверхневому шарі ротора перевищує величину 3 Тл. Ця конструкція може бути додатково оптимізована. Зокрема, розроблена польова методика дозволяє оптимізувати геометрію зубцево-пазової зони статора з метою зниження магнітної індукції в зубцях до значень 1,8...1,9 Тл.

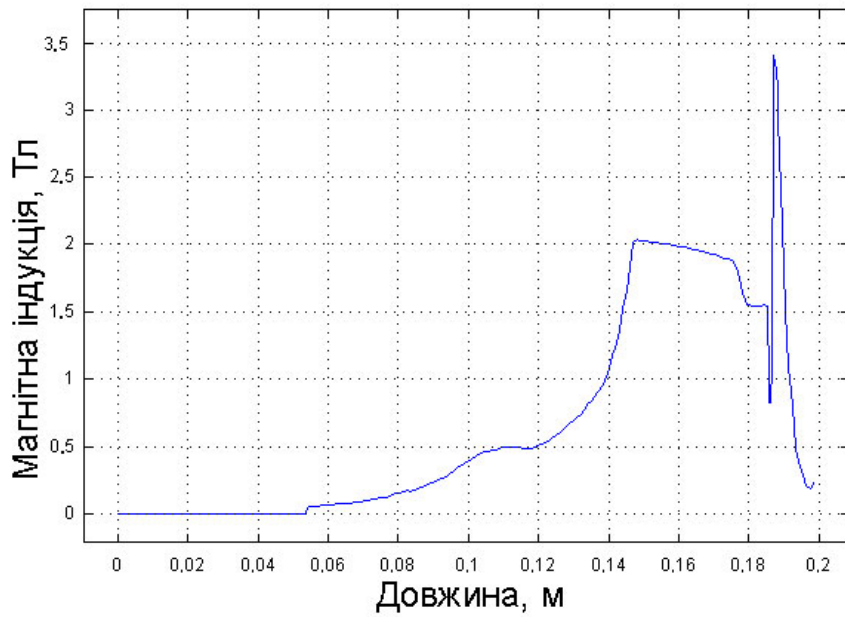


Рис.5. Розподіл магнітної індукції вздовж радіуса

Велике значення для достовірного визначення механічних і робочих характеристик ЕТМП має розрахунок його електромагнітних сил і моментів. На рисунку 6 стрілками зображений фрагмент розподілу вектора тензора магнітного натягнення $\vec{T} = \vec{\tau}T_{\tau} + \vec{n}T_n$ уздовж активної поверхні ротора. Інтегрування тангенціальної складової тензора натягнення вздовж повітряного зазора зв виразом (17) дає значення електромагнітного моменту, що відшукувався.

Розподіл тензора натягнення вздовж зазору, розмірність якого для двовимірних задач дорівнює розмірності лінійної густини сили (Н/м), має складний характер, залежний від усієї сукупності розглянутих геометричних і фізичних чинників. При цьому, як видно з рис. 6, значну величину має нормальна складова тензора натягнення, яка обумовлює радіальне притягнення зубців статора до масивного ротора.

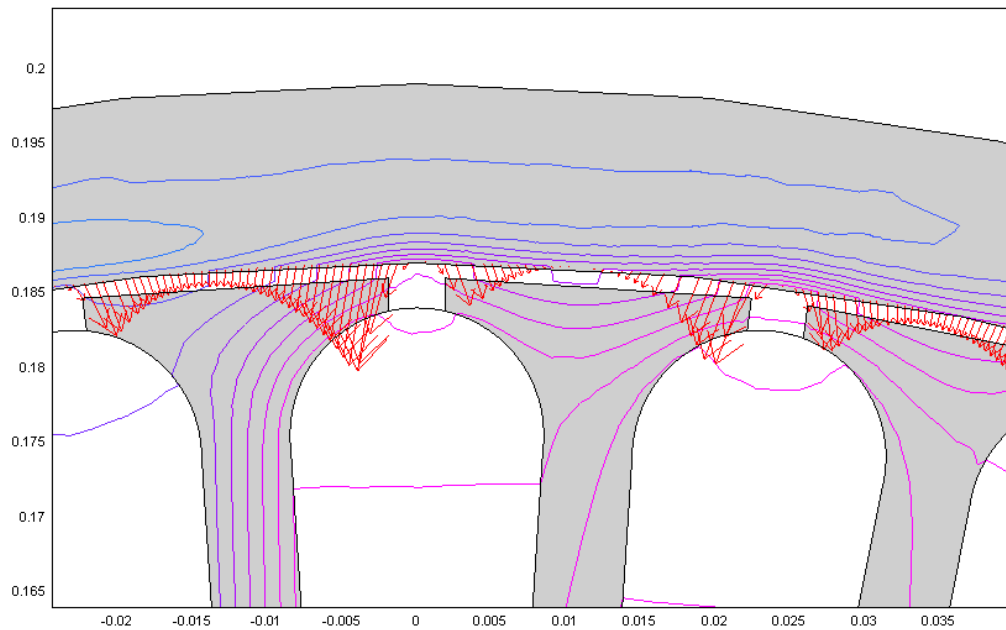


Рис.6. Фрагмент розподілу вектора тензора магнітного натягнення вздовж повітряного зазора ЕТМП

Аналіз температурного поля ЕТМП виконувався відповідно до сформульованих вище рівнянь і граничних умов (13) – (15). При виборі значень коефіцієнтів тепловіддачі, необхідних для завдання граничних умов третього роду (14), урахувалися особливості побудови й функціонування системи вентиляції ЕТМП. У цій роботі при завданні значень α використовувалася експериментальна інформація, одержана на дослідних натурних зразках ЕТМП з аксіально-радіальною системою вентиляції. На зовнішній поверхні ротора G_1 , уздовж якої з високою швидкістю протікає охолоджуюче повітря, визначено значення коефіцієнта тепловіддачі $\alpha = 350 \dots 370$ (Вт/(м² · град)), а на внутрішній поверхні порожнистого валу статора й на поверхнях аксіальних вентиляційних каналів – значення $\alpha = 150 \dots 180$ (Вт/(м² · град)). Важливою проблемою формування розрахункової схеми було завдання адекватних умов теплообміну в робочому повітряному зазорі між статором і ротором. Попередні розрахунки показали, що аеродинамічний опір повітряного зазору заввишки 2 мм на порядок і більш перевищує аеродинамічний опір інших вентиляційних ділянок системи, і повітря через робочий зазор в аксіальному напрямі практично не проходить. Тому з достатнім рівнем достовірності область робочого

повітряного зазору можна моделювати еквівалентним шаром з малим коефіцієнтом теплопровідності, характерним для теплоізоляторів. Такій моделі відповідають умови незначного теплообміну між статором і ротором, причому відведення тепла від ротора відбувається з його зовнішньої поверхні, а від обмотки статора – через порожнистий вал і вентиляційні канали. При розрахунках бралися такі значення параметрів шару: коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\delta} = 0,05$ (Вт/(м·°C)), густина $\rho = 1,29$ (кг/м³). Для порівняння для сталі маємо $\lambda_{Fe} \approx 45 \dots 55$ (Вт/(м·°C)).

На рис. 7 показано сталий розподіл температури в поперечному перетині ЕТМП при тривалій заштибовці ротора (у режимі сталого КЗ $s = 1$) за умови, що нижня частина ротора занурена в сипкий матеріал.

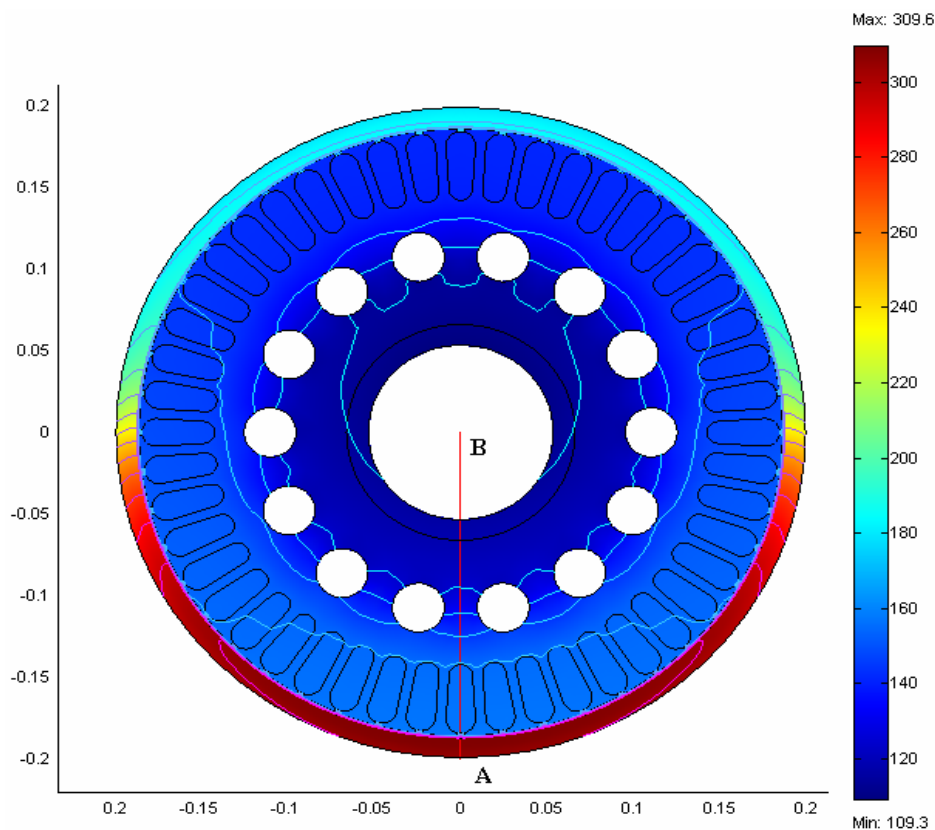


Рис.7. Сталій розподіл температури в поперечному перетині ЕТМП при заштибовці ротора

На рис. 8 дано розподіл температури вздовж показаної на цьому ж рисунку радіальної лінії АВ.

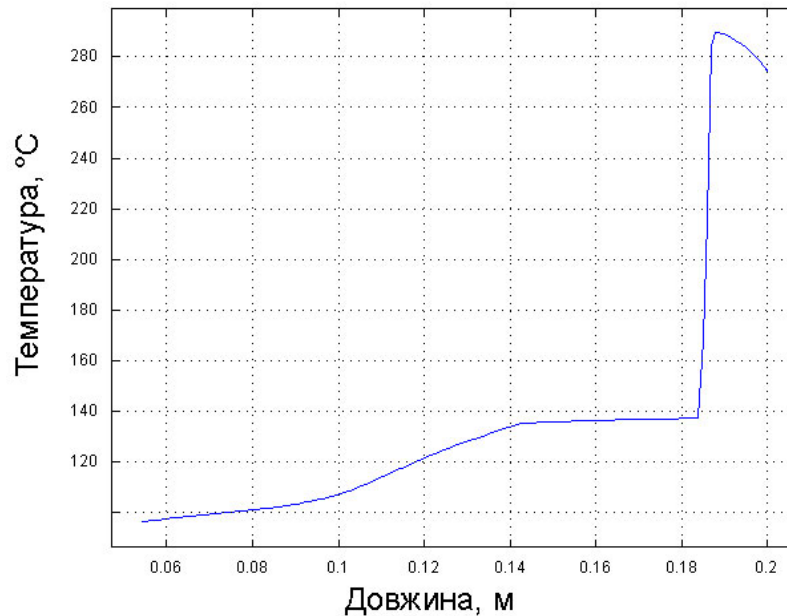


Рис.8. Розподіл температури вздовж радіуса

З репрезентованих результатів виходить, що температура в нижній частині масивного ротора досягає значення 300°C . Температура обмотки статора досягає гранично допустимих значень близько $135\text{--}140^{\circ}\text{C}$ (при температурі охолоджуючого повітря 40°C). Тому тривала заштибовка ротора є неприпустимою.

У цілому розроблена математична модель забезпечує високу достовірність результатів моделювання. Нижче в таблиці 1 для порівняння наведені експериментальні й розрахункові значення електромагнітних моментів рухового та гальмівного модулів ЕТМП у режимі КЗ ($s = 1$).

Таблиця 1

Порівняння розрахункових і експериментальних даних

Модуль	Розрахунок, M_{EM} , (Н·м).	Експеримент, M_{EM} , (Н·м).
Руховий	702	666
Гальмівний	496	452

Розбіжність розрахункових і експериментальних даних знаходиться в припустимих межах (6–10) %, що свідчить про високий рівень адекватності моделі. Деяке перевищення розрахункових значень над експериментальними обумовлено, перш за все, кінцевою довжиною активної зони модуля, вплив якої в розробленій двовимірній польовій моделі може бути врахований лише наближеними методами. Про це свідчить також той факт, що відмінність розрахункових і експериментальних значень для коротшого гальмівного модуля істотніша і складає 9,6%, а для довшого рухового модуля – 5,4%.

З вищенаведеного можна зробити такі висновки:

1. Сформульована ланцюгово-польова математична модель взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів в ЕТМП, що дозволяє аналізувати сталі й динамічні режими роботи перетворювача з урахуванням усієї сукупності основних чинників: складної конфігурації активної зони, нелінійності фізичних властивостей матеріалів, ефектів витіснення вихрових струмів у масивному роторі з урахуванням обертального характеру магнітного поля, реального нагрівання елементів конструкції, особливостей розподілу електромагнітних сил і моментів тощо.

2. За допомогою методу кінцевих елементів досліджені особливості розподілу електромагнітних і теплових полів ЕТМП у сталих режимах роботи. Установлено вплив нагріву ротора на глибину проникнення в нього вихрових струмів, ураховано вплив ефекту «закручування» силових ліній поля ротором, обумовленого обертальним характером електромагнітного поля. Установлено, що облік зміни електропровідності ротора, викликаного його нагріванням вихровими струмами, веде до зниження розрахункової амплітуди струмів на поверхні ротора на 25÷30% і збільшення глибини проникнення струмів на 35÷45%.

Література

1. **Лищенко А. И., Лесник В. А.** Асинхронные машины с массивным ротором. – Киев : Наук. думка, 1984. – 168с.

2. **Дегтярева Е. Л., Потапов Л. А.** Исследование механических характеристик электрической машины с массивным ферромагнитным ротором // Изв. вузов. Электромеханика. – 1998.– №2.– С.23–27.

3. **Брынский Е. А., Данилевич Я. Б., Яковлев В. И.** Электромагнитные поля в электрических машинах. – Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 176 с.

4. **Васьковский Ю. М.** Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії. – К. : вид-во НТУУ „КПІ”, 2003. – 164 с.

5. **Филиппов И. Ф.** Теплообмен в электрических машинах. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 255с.

6. **Васьковский Ю. Н., Дынник Л. Н.** Применение метода конечных элементов для моделирования двумерных электромагнитных полей в движущихся элементах электромеханических устройств // Изв. вузов. Электромеханика. – 1990. – №9. – С. 28–34.

Zablodsky N.N.

Mathematical simulation of the electromagnetic and thermal fields in the electric thermal mechanical transformer of energy.

It is represented results of theoretical researches, got dependences, which describe the division of the electromagnetic and thermal fields in the electric thermal mechanical transformer of energy.

Key words: electric thermal mechanical transformer of energy, electromagnetic field, thermal field, method of finite elements.