

МУЛЬТИФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ТОРЦЕВІЙ ЗОНІ ПОТУЖНОГО ГЕНЕРАТОРА

ХВАЛІН Денис Ігорович 

канд. техн. наук, учений секретар
Інститут проблем безпеки атомних електростанцій

УКРАЇНА

Анотація: Показано переваги побудови математичних моделей у програмному середовищі COMSOL Multiphysics. Найсуттєвішою перевагою є можливість вирішувати мультифізичні задачі, що дозволяє створювати комплексні (взаємопов'язані) моделі. Представлено алгоритм, математичний опис і розв'язок задачі визначення розподілу електромагнітного поля та температури у торцевій зоні осердя статора потужного турбогенератора у разі застосування чисельного методу. Використано підхід для аналізу теплових процесів у торцевій зоні осердя статора турбогенератора послідовного логічного переходу від простої моделі електромагнітного поля в активній частині машини до більше складних моделей кінцевої зони з використанням попередніх результатів у наступних, що дозволяє отримати рішення для визначення розподілу температури в складних областях. Математична модель відрізняється від тих, що використовуються та відомі на сьогодні, більше повним урахуванням фізико-технічних факторів і достовірністю результатів розрахунку за умов простоти програмної реалізації.

ВСТУП.

Чисельне вирішення системи диференціальних рівнянь, які описують фізичні процеси у кінцевій зоні турбогенератора, можна здійснити у дво- або тривимірній постановці. Двовимірний варіант дозволяє врахувати геометричну структуру конструкції, але тільки в певному перерізі. Варіант тривимірної постановки описує об'ємну структуру конструкції, але з причини надмірної складності розв'язування необхідно спрощувати або навіть ігнорувати низку факторів, які впливають на рішення.

Під час розрахунку магнітних полів електричних машин класичної конструкції (асинхронних, синхронних, постійного струму) тривимірні

розрахунки є занадто трудомісткими, довготривалими й не виправдовують витрат порівняно з двовимірними розрахунками [1]. Рішення такого типу ще рідкі, оскільки, з однієї сторони, вимагають високої кваліфікації дослідників, колосальної підготовчої роботи та тривалих комп'ютерних розрахунків, а з іншої – навіть за умов використання сучасної комп'ютерної техніки ці рішення все одно пов'язані з низкою спрощень і не надають достовірного уточнення результатів. На додаток, досвід досліджень і розробок свідчить: необхідний результат можна отримати за допомогою двовимірних і квазітривимірних польових моделей [2, 3, 4].

Якщо порівнювати зарубіжні та вітчизняні видання, присвячені моделюванню фізичних процесів у торцевій зоні генератора, можна впевнитись в основних перевагах квазітривимірних моделей. Ці моделі є компромісним варіантом, який займає проміжне положення між двовимірним і тривимірним рішеннями. Він ґрунтується на розрахунках магнітного поля в поперечному та поздовжньому перетинах генератора, які взаємопов'язані між собою за допомогою комплексу граничних умов.

Не дивлячись на велику кількість розробок присвячених розрахунку поля у торцевій зоні, вони значно відрізняються одна від одної. Ця відмінність обумовлена різним вибором теоретичних моделей кінцевої зони, математичним описом системи струмів лобових частин обмоток, методами рішення задачі. Складність цієї проблеми є причиною застосування низки припущень під час постановки задачі, придатних в одних випадках і непридатних в інших, у результаті чого одержані рішення часто надто наближено описують закономірності розподілу магнітного поля.

Все це свідчить про необхідність удосконалювання методів розрахунку поля у кінцевій зоні потужної електричної машини з метою підвищення їхньої точності.

ВИБІР ПРОГРАМНОГО ПАКЕТА ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.

Моделювання – це відтворення процесів, які відбуваються у реальному об'єкті або системі шляхом їхньої штучної імітації.

Розрізняють аналітичне та імітаційне моделювання. Під час аналітичного моделювання вивчаються математичні (абстрактні) моделі

реального об'єкта у вигляді алгебраїчних, диференціальних та інших рівнянь, а також тих, що передбачають здійснення однозначної обчислювальної процедури, яка приводить до їхнього точного рішення. Водночас аналітичне моделювання може бути проведене і без комп'ютера, однак, для цього від дослідника вимагається відмінне володіння відповідним математичним апаратом. Під час імітаційного моделювання досліджуються математичні моделі у вигляді алгоритмів комп'ютерних програм, які відтворюють функціонування досліджуваної системи шляхом послідовного виконання великої кількості елементарних операцій. Імітаційне моделювання більше доступне та здебільшого не вимагає такого глибокого знання математики, як аналітичне [5].

Останнім часом у зв'язку з інтенсивним створенням обчислювальної техніки під час дослідження фізичних процесів природних і технічних систем широкий розвиток отримало саме імітаційне моделювання, яке переважно проводиться із застосуванням методу скінченних елементів, як найбільше перспективному. Здійснюється воно з використанням комп'ютерів, тому називається також комп'ютерним моделюванням.

Комп'ютерне моделювання є одним з ефективних методів вивчення складних систем. Комп'ютерні моделі простіше та зручніше аналітичних, вони дозволяють проводити так звані обчислювальні експерименти за умов, коли реальні експерименти провести проблематично або взагалі неможливо з причини фінансових і фізичних перешкод, або ж можуть надати непередбачуваний результат (наприклад, вибух). Логічність і формалізованість комп'ютерних моделей дозволяють виявити основні фактори, які визначають властивості об'єкта, що вивчається, зокрема, дослідити відгук фізичної системи на зміну її параметрів, початкових умов або впливів на цю систему. Надалі такі моделі можуть використовуватися для прогнозування ситуацій, які не зустрічалися раніше [6].

На сьогодні створені усі умови для застосування методу скінченних елементів у практиці розрахунків і проектування електричних машин. Зокрема, розроблено зручні програмно-обчислювальні комплекси з метою його комп'ютерної реалізації. Серед найбільше відомих розробок, які отримали міжнародне визнання, необхідно особливо відзначити комплекси FEMLAB, ANSYS, MAXWEL, COMSOL.

COMSOL Multiphysics [7] – це потужне інтерактивне середовище для моделювання та розрахунків методом скінченних елементів більшості

наукових та інженерних задач на основі диференціальних рівнянь. Цей програмний пакет дозволяє розширювати стандартні моделі, які використовують одне диференціальне рівняння (прикладний режим), і мультифізичні моделі для розрахунку зв'язаних між собою фізичних явищ. Розрахунок у цьому середовищі не потребує глибокого знання математичної фізики та методу скінченних елементів. Це можливо завдяки вбудованим фізичним режимам, де коефіцієнти диференціального рівняння у частинних похідних задаються у вигляді величин зрозумілих фізичних властивостей і умов, таких як теплопровідність, теплоємність, густина та інших, залежно від обраного фізичного розділу. Перетворення цих величин у коефіцієнти математичних рівнянь відбувається автоматично.

Блок Multiphysics вміщує настроювальні шаблони, за допомогою яких можна моделювати майже будь-яку комбінацію взаємозв'язаних фізичних явищ, які відбуваються одночасно у складних технічних пристроях.

Крім цього, значною перевагою COMSOL Multiphysics є наявність спеціального модуля для обертових електричних машин, а також потужна візуалізація та можливість проводити нестандартне моделювання різноманітних фізичних процесів.

Тому побудова математичної моделі здійснюється у програмному пакеті COMSOL Multiphysics з використанням електромагнітного та теплового модулів, що надає можливість комплексно розглядати досліджуваний об'єкт.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Як об'єкт дослідження розглянутий серійний турбогенератор типу ТГВ-500 потужністю 500 МВт (Державне підприємство завод «Електроважмаш» міста Харків). Цей вибір обумовлено такими факторами: система охолодження генератора (обмотки статора та ротора охолоджуються водою, сталь статора – воднем) є ефективною і перспективною, сьогодні на електричних станціях України працюють турбогенератори з водяним охолодженням обмотки статора, загальна потужність яких складає більше 60 % від установленної електричної потужності всіх електричних станцій; наявність експериментальних даних, що, з однієї сторони, дозволяє перевірити достовірність електромагнітного та теплового розрахунків, а з іншої – спростити тепловий розрахунок завдяки відомим коефіцієнтам тепловіддачі [8, 9,

10]; наявність фізичної масштабної моделі кінцевої зони турбогенератора аналогічного типу та потужності.

АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ.

Урахування взаємного зв'язку електромагнітних і теплових процесів є актуальним не тільки для достовірного розрахунку параметрів електричної машини, але й під час удосконалення елементів її конструкції. Тому у низці важливих випадків необхідний сумісний аналіз електромагнітного та теплового полів машини з урахуванням їхнього взаємного впливу [3].

Алгоритм побудови математичної моделі показано на прикладі розрахунку електромагнітного поля та температури у торцевій зоні серійного турбогенератора типу ТГВ-500 за умов номінального навантаження.

На рис. 1 наведена конструкція цього генератора.

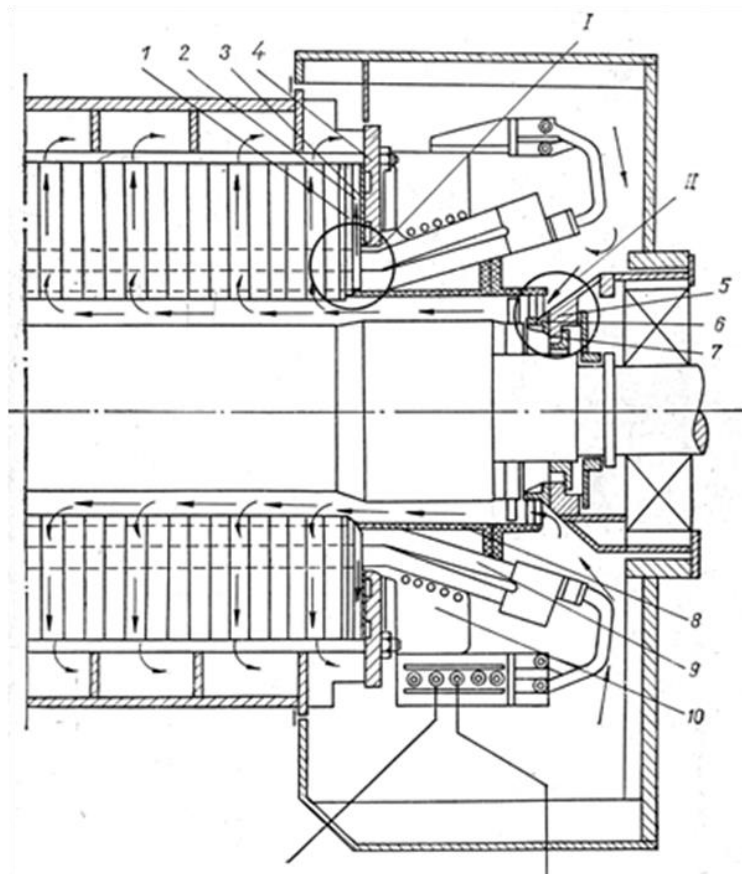


Рис. 1. Конструкція торцевої зони турбогенератора типу ТГВ-500

1 – крайній пакет осердя статора; 2 – натискний палець; 3 – мідний екран;

4 – натискна плита; 5 – корпус підшипника; 6 – газонапрямний апарат;

7 – масло-ущільнююче кільце; 8 – газорозподільний циліндр; 9 – обмотка статора;

10 – кронштейн для кріплення цієї обмотки

Обмотки статора та ротора охолоджуються дистиллятом, осердя статора – воднем. У торцевій зоні осердя статора з метою захисту спинки крайнього пакета й посилення екранування між натискною плитою та натискними пальцями встановлене плоске мідне кільце товщиною 10 мм. Немагнітна стальна натискна плита має геометрію плоского кільця з двома кільцевими каналами для охолодження водою.

В аксіальному (осьовому) напрямку турбогенератор складається з трьох частин – центральної та двох кінцевих. Осердя статора вміщує 138 шихтованих пакетів, набраних із листів високолегованої холоднокатаної електротехнічної сталі марки Е330 товщиною 0,5 мм. Два крайніх пакети, кожен товщиною 20 мм, розділені радіальними вентиляційними каналами, кожен з яких має товщину 5 мм. Пакети, починаючи з третього, мають товщину 40 мм. Зубці двох крайніх пакетів виконані вкороченими. На першому ступені вкорочення зубців складає 24 мм, на другому – пакет виконаний у вигляді двох сходинок: перша – на 16 мм, друга – на 8 мм. Тобто зубцева зона на торці має три сходинки. У 48 пазах статора розміщена трифазна двошарова стержнева обмотка.

Основні параметри генератора наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Основні параметри турбогенератора типу ТГВ-500

Найменування параметра	Значення
Номинальний режим навантаження:	
- активна потужність P_n , МВт	500
- струм статора I_{SH} , кА	17
- напруга обмотки статора U_{SH} , кВ	20
- струм збудження i_{fn} , А	5120
- коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0,85
Частота f , Гц	50
Число пар полюсів	1
Діаметр розточки статора D_1 , м	1,32
Діаметр ротора D_2 , м	1,12
Довжина осердя статора l_s , м	6,2
Повітряний проміжок між статором та ротором, мм	100
Кількість паралельних гілок обмотки:	
- статора a_s	2
- ротора a_r	1
Число послідовних витків обмотки:	
- статора w_1	8
- ротора w_2	48

Продовження табл. 1

Найменування параметра	Значення
Число активних провідників в пазу: - статора S_{n1} - ротора S_{n2}	2 5/3*
Значення опорів, в.о.: - активний обмотки статора r_1 - головний індуктивний χ_d - розсіювання обмотки статора $\chi_{\sigma\sigma}$	0,001364 1,91 0,218

Примітка. * – н'ять витків у пазах, окрім чотирьох пазів з трьома витками (ці пази прилягають до великих зубців).

За допомогою редактора програмно-обчислювального комплексу COMSOL Multiphysics 3.5a шляхом виконання довгої та складної послідовності геометричних операцій побудовано розрахункову область математичної моделі, яка відповідає реальним розмірам турбогенератора у цілому, а також його окремих вузлів. Розрахункова область охоплює всю торцеву зону (позначення 1–4, 9, рис. 1), включаючи крайні й основні пакети осердя статора. Найбільша увага приділяється зоні I, а зона II під час розрахунків ігнорується, оскільки не має вирішального впливу на нагрів зони I. Враховуються реальна геометрія елементів ротора й статора, а також анізотропія та насичення осердя статора. Для кожного вузла задані фізичні параметри матеріалу, з якого він виготовлений. Для феромагнетиків побудовані відповідні криві намагнічування [11].

Надалі наведені результати розрахунку для кінцевої частини генератора зі сторони турбіни при номінальній швидкості обертання ротора (3000 об/хв). Цей вибір обумовлений відсутністю спотворення електромагнітного поля під впливом струмів з'єднувальних шин і виводів (як це спостерігається на стороні контактних кілець) [8].

Під час електромагнітного розрахунку польовими методами приймаються такі характерні для конструкцій електричних машин припущення [3]:

– відсутні струми діелектричного зміщення $\partial \vec{D} / \partial t = 0$;

– відсутні складові струмів перенесення $\rho \vec{v}_p = 0$ і струмів, обумовлених рухом поляризованого діелектрика $\text{rot}(\vec{D} \times \vec{v}) = 0$; струми такої фізичної природи в електричних машинах не виникають;

– в активних елементах електричної машини індукційного типу не

виникають концентрації нерухомих у просторі та незмінних у часі вільних електричних зарядів.

Під час відповідного вибору активізуються модуль Rotating Machinery, підрозділ Rotating Perpendicular Currents.

Модель враховує рух ротора відносно статора. Обертання моделюється за допомогою техніки Moving mesh (ale) (сітки, що рухається), яка дозволяє задавати переміщення кінцевоелементних сіток під час моделювання повороту (обертання) ротора. У цій моделі об'єднано нерухому та рухому системи в один прикладний режим. Центральна частина поперечного перерізу моделі (ротор і частина повітряного проміжку) обертається відносно нерухомого статора. Ротор розглядається у обертовій системі координат нерухомій відносно ротора, а статор у нерухомій глобальній системі координат. Обертання ротора відносно статора враховується через граничні умови в зазорі, тобто проміжок між ротором і статором є внутрішньою перехідною зоною. Інтерполяційні рівняння зв'язку на межі моделей забезпечують неперервність рішення у глобальній системі координат, яка зв'язана зі статором. Обертання сітки задається рівнянням трансформації:

$$\begin{cases} dx = \cos(2\pi nt) \cdot X - \sin(2\pi nt) \cdot Y - X \\ dy = \sin(2\pi nt) \cdot X + \cos(2\pi nt) \cdot Y - Y \end{cases} \quad (1)$$

де dx , dy – переміщення згідно з координатами x і y , відповідно; X , Y – координати початкових точок.

Таким чином, вираз у дужках є певним кутом (у радіанах), а час t – параметром, за допомогою якого таке настроювання дозволяє виконувати логічний поворот ротора на кут $(2\pi nt)$ відносно початкового положення. Для цього необхідно виконати статичний розрахунок, тобто розглядається одне фіксоване положення ротора та фіксовані значення струмів в обмотках (при $t=0$), і результати якого надалі застосовані як початкові умови з метою імітації динамічного ефекту (або, точніше, проведення параметричного розрахунку).

У рішенні задачі встановлюються слабкі обмеження, що дозволяє виконати умову передачі потоку через межу між ротором і статором.

Спочатку розглядається двовимірна польова модель електромагнітного поля поперечного перерізу центральної (активної) зони турбогенератора. Рівняння для двовимірного магнітного поля

відносно аксіальної складової векторного магнітного потенціалу A_z в розрахунковій області (рис. 2) у загальному випадку має такий вигляд:

$$j\omega\sigma A + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \times A) = J_{z\text{стор}}^e e_z, \quad A = A_z e_z, \quad (2)$$

де ω – кутова частота; σ – питома електропровідність; ∇ – оператор Гамільтона; μ_0 – проникність вакууму; μ_r – відносна магнітна проникність; $J_{z\text{стор}}$ – густина сторонніх струмів, що задана у перерізах обмоток статора та збудження; e_z – орт.

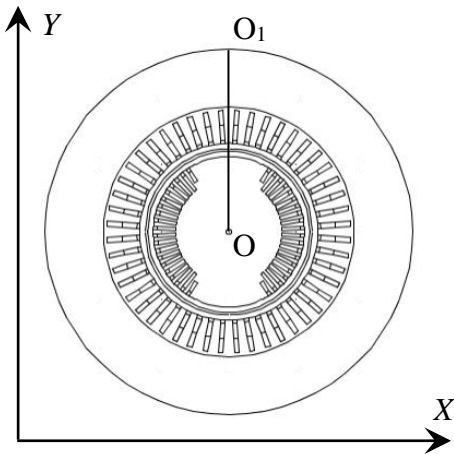


Рис. 2. Розрахункова область центральної зони турбогенератора

Однією з основних задач побудови моделі є вибір системи координат, в якій розглядаються електромагнітні процеси. Однак, вибір тієї чи іншої системи координатних осей, зрозуміло, не впливає на реальні фізичні процеси, які відбуваються у машині, а є тільки способом їхнього описання.

Найбільша ефективність від використання векторного магнітного потенціалу досягається під час розв'язання двовимірних польових задач з такою орієнтацією системи координат, у разі якої струми обмоток напрямлені уздовж однієї з її осей [3].

До таких задач відноситься, наприклад, клас задач щодо аналізу поля у поперечному перетині активної зони електричної машини. Осі X і Y декартової системи координат під час розв'язання таких задач розміщують у поперечному перетині активної зони машини, а вісь Z напрямляють уздовж її поздовжньої осі. За такої орієнтації системи координат струми обмоток протікають тільки уздовж осі Z , а векторний магнітний потенціал також має одну просторову (осьову) складову.

Не зважаючи на те, що для опису електромагнітного поля в цьому випадку потрібна тільки одна проекція векторного магнітного потенціалу, проте таке поле є двовимірним, оскільки для опису вектора магнітної індукції у поперечному перетині необхідно мати дві його проекції. Складові вектора магнітної індукції у декартовій системі координат визначаються через векторний магнітний потенціал за такими співвідношеннями:

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}, B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}. \quad (3)$$

Далі розраховується модуль вектора магнітної індукції

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}, \quad (4)$$

який використовується під час знаходження проникності за відомою залежністю для сталі марки E330 [11].

Через магнітну індукцію (3) і (4) можуть бути визначені складові та модуль напруженості магнітного поля:

$$H_x = \frac{B_x}{\mu}, H_y = \frac{B_y}{\mu}, H = \frac{B}{\mu}. \quad (5)$$

Оскільки осердя статора набране (шихтоване) з листів (сегментів) високолегованої холоднокатаної електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм, то вихровими струмами від радіально спрямованого потоку можна знехтувати. Крім цього, розрахунок додаткових втрат у крайніх пакетах статора генератора з прийнятною для практики точністю можна виконувати тільки від осьової складової магнітної індукції [12, 13]. Отже, магнітне поле центральної частини турбогенератора у декартовій системі координат задовольняє рівнянню Пуассона й, у цьому випадку, розглядається відома модель електромагнітного поля центральної (активної) зони машини [3, 14, 15]:

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_{z\text{стоп}}. \quad (6)$$

Такий підхід дозволяє істотно заощадити обчислювальні витрати під час розв'язання задачі.

Рівняння (6) доповнюється однорідною граничною умовою першого роду (Magnetic Insulation), що відображає затухання поля за межами розрахункової області на лінії зовнішньої поверхні ярма статора (рис. 2):

$$A_z|_G = 0 \quad (7)$$

та умовою неперервності (Continuity) магнітного потоку на внутрішніх границях.

Фаза обмотки статора складається з двох груп стержнів у відповідних фазних зонах, напрямки струму в яких протилежні. Під час розподілу обмотки у пазах враховуються полюсне ділення, число пазів на полюс і фазу, крок обмотки та коефіцієнт вкорочення.

В обмотці статора прийнято симетричну систему фазних струмів [16]:

$$\begin{cases} i_A = I_m \cos(\omega t + \beta) \\ i_B = I_m \cos(\omega t + \beta - 120^\circ), \\ i_C = I_m \cos(\omega t + \beta + 120^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

де $I_m = \sqrt{2}I_{sas}$ – їхня амплітуда; $I_{sas} = I_s/a_s$ – діюче значення струму стержня та фазного струму; β – кутове зміщення осі, вздовж якої діє магніторушійна сила трифазної обмотки статора відповідно до поздовжньої осі ротора d .

Густина сторонніх струмів, що задана у перерізах обмоток статора та збудження, знаходиться таким чином

$$\begin{cases} J_{Aзстоп} = i_A s_{n1} / S_{\Pi 1} \\ J_{Bзстоп} = i_B s_{n1} / S_{\Pi 1} \\ J_{Cзстоп} = i_C s_{n1} / S_{\Pi 1} \\ J_f = i_f s_{n2} / S_{\Pi 2} a_r \end{cases} \quad (9)$$

де $S_{\Pi 1}$, $S_{\Pi 2}$ – площа перетину паза статора та ротора, відповідно.

Для отримання сильних магнітних полів у великих об'ємах застосовують багатовиткові котушки. Магнітні системи, які конструюються на їхній основі, як правило, є повільними, оскільки час протікання струму в них обчислюється десятками мілісекунд. Розміри перерізу обмоткового проводу за таких умов складають кілька міліметрів. Тому під час аналізу таких котушок можна нехтувати поверхневим ефектом в обмотці, приймаючи густина струму рівномірно розподіленою вздовж перерізу проводу. Це дозволяє під час розрахунку магнітного поля використовувати стаціонарне рівняння для векторного магнітного потенціалу, а відносно повільно змінний в обмотці струм також дозволяє спростити підхід до розрахунку. Отже, густина струму за виразом (9) має усереднене значення, яке відрізняється від реальної густини струму в провідниках обмотки на величину коефіцієнта заповнення міддю. Також не враховуються особливості розподілу провідників обмотки у пазу, наявність пазової та виткової ізоляції витків і вентиляційних каналів. Як показали численні дослідження [3], врахування цих особливостей під час розрахунків майже не впливає на точність результатів, але істотно ускладнює сітку скінченних елементів.

На рис. 3 показано просторову діаграму магніторушійних сил турбогенератора. Оскільки максимуми цих сил зсунуті відносно максимумів густини струмів обмоток на кут 90° , то ця ж діаграма правдива для лінійної густини струмів обмоток. З діаграми випливає, що комплексний вектор магніторушійної сили збудження \dot{F}_f зміщений у просторі відносно комплексного вектора результуючої магніторушійної сили генератора за умов навантаження F_l на кут θ , а відносно комплексного вектора магніторушійної сили реакції якоря F_s – на кут β . Тому з останнього, якщо в певний момент часу максимум лінійної густини струму ротора знаходиться в точці D , то максимум лінійної густини струму статора буде в точці E . Кут β визначається за формулою

$$\beta = 90^\circ + \theta + \varphi, \quad (10)$$

де θ – кут навантаження машини; φ – фазовий зсув між напругою та струмом статора.

Кут навантаження θ можна визначити з виразу [8]

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{I_s \cos \varphi}{(U_s / x_d) \pm I_s \sin \varphi}, \quad (11)$$

де I_s , U_s – фазні струм і напруга статора, відповідно; x_d – головний індуктивний опір; знак «плюс» відповідає режиму перезбудження генератора, «мінус» – недозбудження.

Величини струмів в обмотках статора та ротора й кута β задаються відповідно до режиму роботи турбогенератора – холостий хід, коротке замикання, навантаження тощо [16].

Вихідні дані, розраховані згідно з (8)–(11) для позиції ротора на рис. 2 в момент часу $t=0$, наведено у табл. 2 та 3 (у табл. 3 позначення J_{fml} відповідає густині струму збудження у пазах, які прилягають до великих зубців).

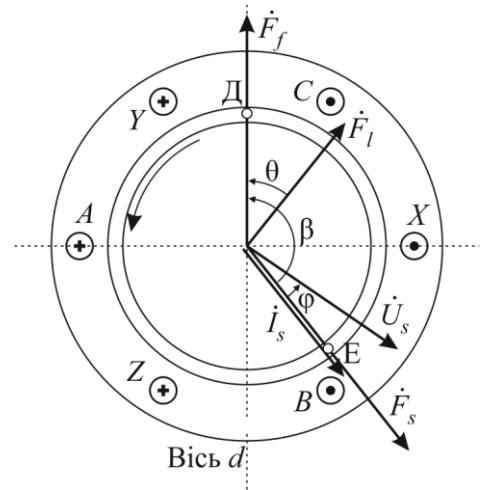


Рис. 3. Просторова діаграма магніторушійних сил турбогенератора

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку турбогенератора типу ТГВ-500

Статор							Ротор
$I_{\text{сп}}, \text{кА}$	$P, \text{МВт}$	$Q, \text{МВар}$	$S, \text{МВА}$	$\cos \varphi$	$\theta, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	$i_f, \text{А}$
17	500	310	588	0,85	36,7	158,5	5090

Таблиця 3

Вихідні дані для розрахунку турбогенератора типу ТГВ-500

Статор						Ротор	
$i_A,$	$i_B,$	$i_C,$	$J_{A\text{статор}},$	$J_{B\text{статор}},$	$J_{C\text{статор}},$	$J_{\text{final}},$	$J_f,$
А	А	А	А/мм ²	А/мм ²	А/мм ²	А/мм ²	А/мм ²
-11184	9407,6	1776,8	-2,8	2,35	0,44	7,6	8,5

Задаються властивості матеріалів для кожної розрахункової підобласті та джерел поля. Для деяких матеріалів є можливість ввести параметри з бібліотеки через кнопку Load.

Після задання властивостей і граничних умов формується сітка скінченних елементів. Для дрібних елементів сітки система автоматично виконає згущення, але якщо необхідно у будь-якій частині системи ще більше згустити сітку, можна натиснути кнопку Refine selection і вказати необхідну область. У двовимірному стаціонарному режимі можна будувати найдрібнішу сітку – швидкість обчислення на сучасних комп'ютерах все одно буде прийнятною. Водночас необхідно пам'ятати, що розмір кінцевого елемента повинен бути у декілька разів меншим товщини пограничного шару, інакше рішення може бути нестабільним. Тому рекомендується будувати сітку такої густоти, щоби між будь-якими двома границями було не менше десяти кінцевих елементів [17].

У цій задачі побудована сітка вміщує 62280 граничних елементів, що покривають межі розрахункової області.

Після настройки параметрів зон розрахункової області у прикладному режимі розрахунку розподілу векторного магнітного потенціалу у нерухомій і неоднорідно-рухомій системі статор-ротор, а також внесення необхідних змінень для додаткових складових моделі натискається кнопка Solve або пункт меню Solve-Solve Problem, що

запускає розв'язувальний пристрій з поточними налаштуваннями.

Після розрахунку налагоджуються параметри діалогового вікна Subdomain Settings прикладного режиму Moving mesh (ale). У зонах статора вмикається режим No displacement, а в зонах ротора вмикається режим Prescribed displacement. У рядок редагування dx записується $X*\cos(\text{ugol})-Y*\sin(\text{ugol})-X$; у рядок редагування dy записується $X*\sin(\text{ugol})+Y*\cos(\text{ugol})-Y$. Таке налаштування дозволяє виконувати логічний поворот ротора на кут ugol (у радіанах) відносно початкового положення ротора. Кнопка Restart або пункт меню Solve-Restart перезапускає розв'язувальний пристрій, використовуючи поточні значення як початкові.

За таких умов саме рівняння Пуассона не залежить від часу, його розв'язок визначається миттєвими значеннями джерел поля – струмами в обмотках і геометрією розрахункової області, яка змінюється внаслідок зміни координат ротора.

У результаті математичного моделювання отримані такі дані.

На рис. 4 показаний миттєвий розподіл магнітної індукції та векторного магнітного потенціалу (ізолінії) в активній зоні турбогенератора (у цьому випадку $t = 0,02$ с, що відповідає одному повному оберту ротора, крок часового інтервалу дорівнює 1^{-4} с, тобто за один крок ротор повертається на $1,8^\circ$). Відтінками сірого кольору показані рівні магнітної індукції відповідно до приведеної шкали. На рис. 5 наведений розподіл магнітної проникності статора та ротора генератора, максимальне значення складає 8542 і спостерігається в ярмі статора.

З рис. 6 можна отримати, що максимальне значення магнітної індукції в осерді статора за умов номінального навантаження спостерігається у коронках зубців і складає 3,4 Тл, розподіл електромагнітного поля симетричний вздовж лінії результуючої магніторушійної сили (рис. 4). На рис. 7 наведений розподіл магнітної індукції у натискних пальцях. Він також є симетричним, однак, під дією електромагнітного поля статора напрямок результуючої відхиляється. Величини магнітної індукції у натискних пальцях нижчі, оскільки вони виготовлені з немагнітної сталі, та максимальне значення індукції складає 0,53 Тл.

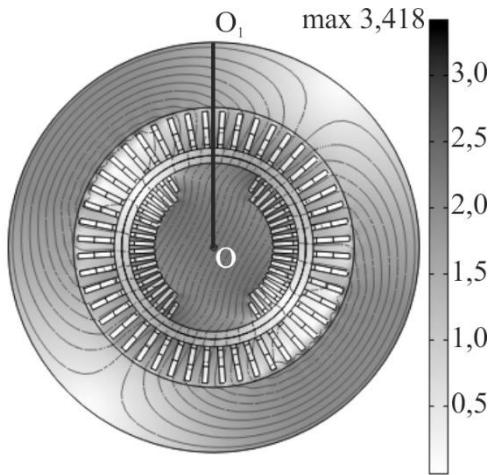


Рис. 4. Розподіл електромагнітного поля в центральній зоні статора та ротора турбогенератора за умов номінального навантаження

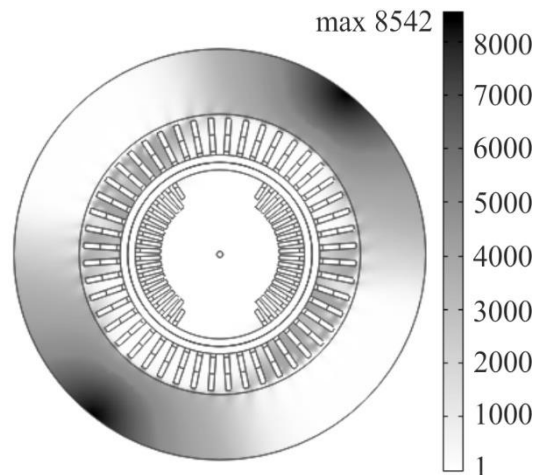


Рис. 5. Розподіл магнітної проникності в центральній зоні статора та ротора турбогенератора за умов номінального навантаження

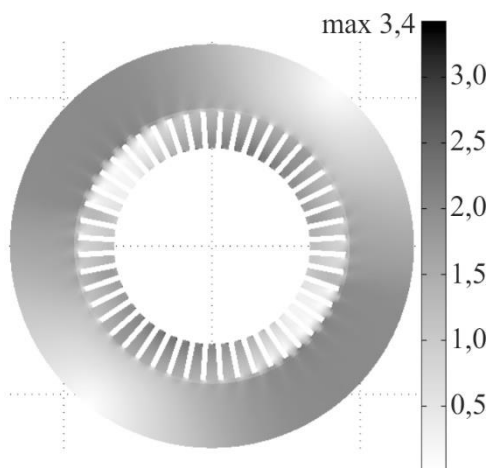


Рис. 6. Розподіл магнітної індукції в осерді статора турбогенератора за умов номінального навантаження

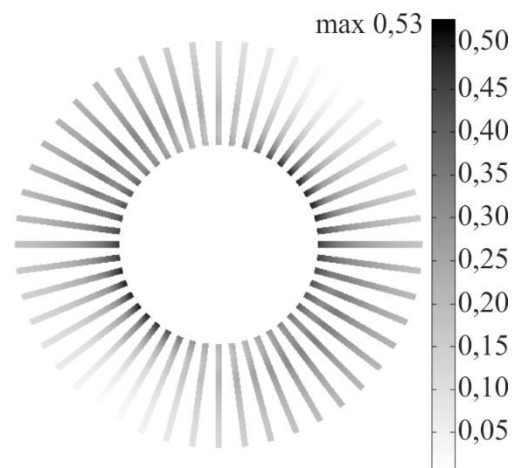


Рис. 7. Розподіл магнітної індукції у натискних пальцях за умов номінального навантаження

Натискна плита та мідний екран також є немагнітними, плита встановлена перед екраном, тому розподіл електромагнітного поля в них співпадає. Максимальні значення магнітної індукції складають 0,36 Тл і 0,33 Тл, відповідно (рис. 8 і 9).

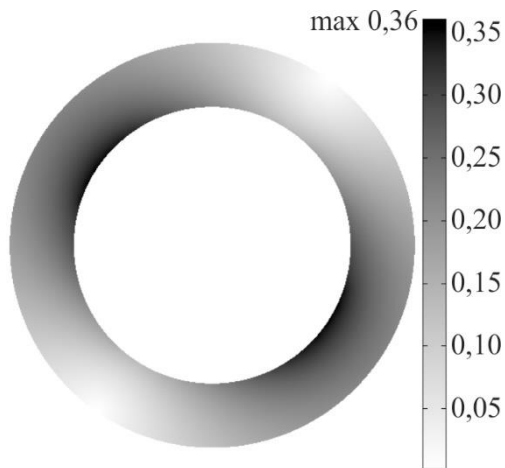


Рис. 8. Розподіл магнітної індукції у натискній плиті за умов номінального навантаження

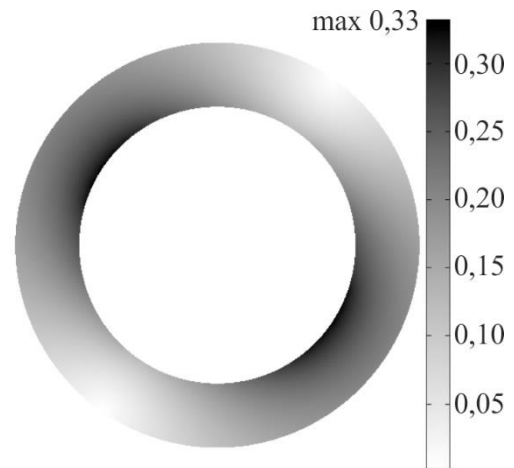


Рис. 9. Розподіл магнітної індукції у мідному екрані за умов номінального навантаження

Оскільки натискна плита, натискні пальці та мідний екран є масивними, вони є областями протікання вихрових струмів від радіального потоку. Розв'язується задача розподілу вихрових струмів у кожному елементі (Time-harmonic analysis). Для прикладу, на рис. 10 і 11 показаний розподіл густини наведеного струму від основного радіально спрямованого поля у натискних пальцях і мідному екрані. З причини високої провідності міді значення густини вихрового струму в екрані на порядок більше, ніж у немагнітних пальцях.

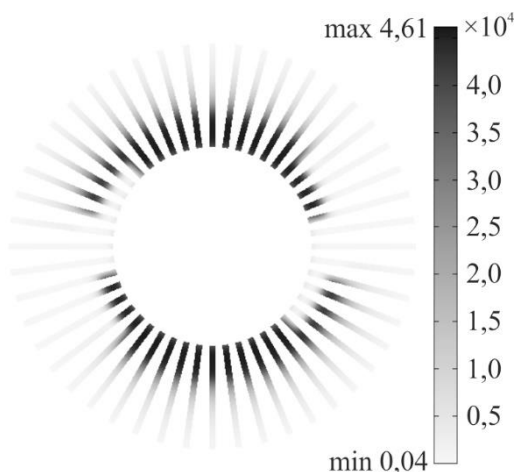


Рис. 10. Розподіл вихрового струму у натискних пальцях за умов номінального навантаження

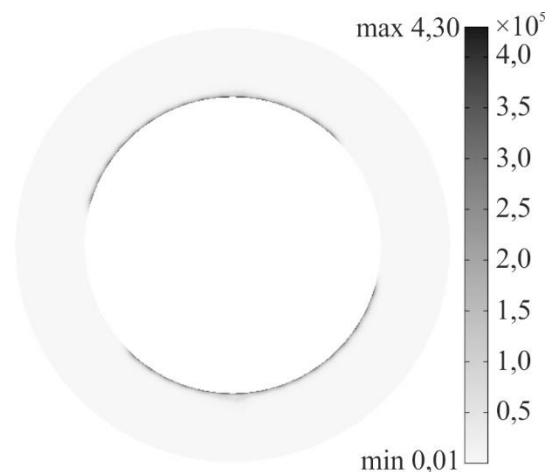


Рис. 11. Розподіл вихрового струму у мідному екрані за умов номінального навантаження

Надалі активізуються модуль AC/DC Module, підрозділ Quasi-Static Magnetic, модель Perpendicular Induction Currents, Vector Potential.

Маючи розподіл поля у центральній частині, можна перейти до моделювання магнітного поля у поздовжньому перетині турбогенератора (рис. 12). З урахуванням симетрії вздовж осьового та радіального напрямків розрахункова область торцевої зони обрана у вигляді перерізу ротора вздовж його осі та перетину одного зубця осердя статора у тангенціальному напрямку [18, 19]. Цей перетин співпадає з прямокутною координатною площиною XU і є площиною симетрії ротора (на рис. 4 вона проходить вздовж радіуса OO_1).

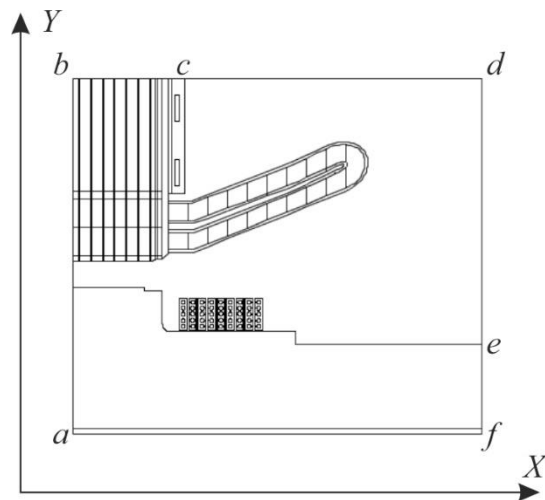


Рис. 12. Розрахункова область торцевої зони турбогенератора

Рівняння для двовимірного поля відносно складової векторного магнітного потенціалу A_z , яка є тангенціальною складовою у розрахунковій області, має вигляд (2).

Необхідна структура силових ліній магнітного поля формується за допомогою комплексу граничних умов для векторного магнітного потенціалу та напруженості поля, які встановлюються для зовнішніх меж області $abcdef$ (рис. 12).

На лінії bc можливі два варіанти граничних умов: або умова, що відображає затухання поля:

$$A_z|_{bc} = 0, \quad (12)$$

або значення напруженості магнітного поля в точці O_1 (рис. 4):

$$H|_{bc} = H|_{O_1}. \quad (13)$$

Гранична умова (12) не може бути застосована у тому випадку, якщо геометрія математичної моделі не передбачає наявності повітряних проміжків між пакетами осердя статора, як це має місце у деяких моделях, наприклад [20], що може бути виправдано для проведення електромагнітного розрахунку без подальшого моделювання теплових процесів. Приймаючи варіант граничної умови (13) більше загальним, така умова встановлюється на лінії bc , у цьому випадку $H|_{bc} = 300$ А/м.

На лінії af встановлюється умова симетрії магнітного поля відносно осі ротора (Electric Insulation), що означає рівність нулю дотичної до границі складової напруженості магнітного поля:

$$n \times H|_{af} = 0. \quad (14)$$

Вздовж межі ab задається розподіл напруженості магнітного поля, аналогічний розподілу вздовж тієї ж лінії у поперечному перетині (лінії OO_1 , рис. 13):

$$H|_{ab} = H(r)|_{OO_1}. \quad (15)$$

Приймається, що за достатньо віддалені границі cd , de та ef магнітне поле не розповсюджується, тому на лінії $cdef$ встановлюється однорідна гранична умова першого роду:

$$A_z|_{cdef} = 0. \quad (16)$$

Одночасно задається розподіл магнітної проникності вздовж радіуса OO_1 – $\mu(r)|_{OO_1}$, який змінюється внаслідок різного насичення відрізків магнітопроводу основним магнітним потоком (рис. 14).

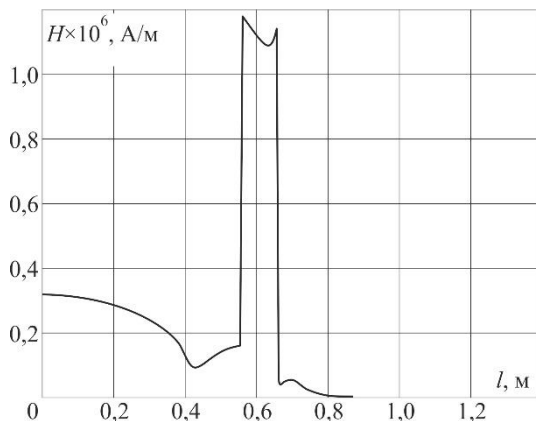


Рис. 13. Розподіл напруженості поля вздовж радіуса OO_1

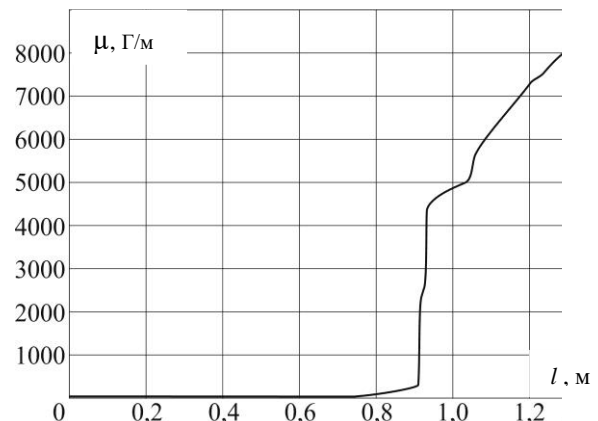


Рис. 14. Розподіл магнітної проникності вздовж радіуса OO_1

Таким чином, встановлюється взаємозв'язок електромагнітних полів у центральній і торцевій зонах турбогенератора.

Вплив режиму навантаження враховується заданням величин струмів в обмотках статора та ротора, кута β і граничних умов.

Важливим етапом на шляху розрахунку магнітного поля в торцевій зоні є задання струмів у лобових частинах обмоток. Це питання найбільше проблематичне та вирішується окремими дослідниками різними способами.

Пропонується модель торцевої зони турбогенератора, яка порівняно з тими, що використовуються та відомі на сьогодні, дозволяє математично точно описати струми лобової частини обмотки статора із строгим урахуванням геометричної форми всіх відрізків лобових з'єднань та, що найсуттєвіше, режиму роботи. На рис. 15 показано напрямок миттєвих фазних струмів i_A , i_B , i_C лобової частини обмотки статора за умов навантаження та частину схеми цієї обмотки, вздовж якої проходить переріз OO_1 , причому для більшої наочності фази показано різними лініями.

Струми лобової частини обмотки статора (рис. 15) менші за прийняті струми системи (8) у $\sqrt{2}$ рази, оскільки лобові частини відігнуті у середньому на 45° . Тобто вони мають величину діючого значення фазних струмів з відповідним кутом β .

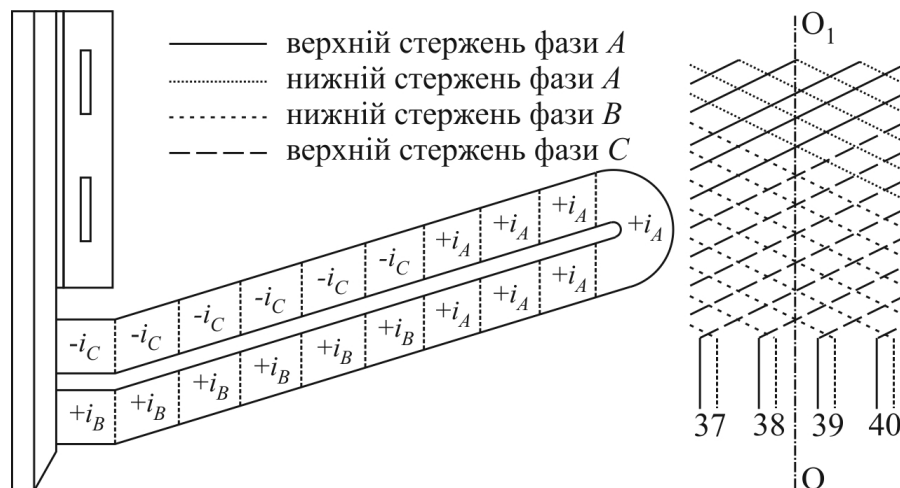


Рис. 15. Напрямок фазних струмів лобової частини обмотки статора

Оскільки поздовжній перетин турбогенератора проведено вздовж поздовжньої осі ротора d (рис. 4), то значення густини струму лобової частини обмотки ротора відповідає заданому струму збудження (табл. 3).

Електромагнітний розрахунок виконується у всій розрахунковій області.

Задаються властивості матеріалів для кожної розрахункової підобласті та джерел поля. Для деяких матеріалів є можливість ввести параметри з бібліотеки через кнопку Load.

Після задання властивостей і граничних умов формується сітка скінченних елементів. Водночас необхідно контролювати розмір елементів у підобластях провідного перерізу, який повинен бути у

декілька разів меншим глибини проникнення поля у матеріал $\Delta = \sqrt{2/(\omega\mu\gamma)}$. Мінімальний розмір елемента сітки в області скін-шару повинен бути у 3–4 рази меншим глибини проникнення поля. Для того щоби автоматично задовольнити цій умові необхідно у режимі задання граничних умов виділити лінії, які утворюють зовнішні межі перерізів. Після цього у вікні Mesh, Free mesh parameters, Boundary задати максимальне значення кінцевого елемента (maximum element size) виходячи з розрахунку $(0,2-0,3)\Delta$. Після чого можна проводити побудову сітки командою Mesh.

Побудована сітка вміщує 157868 граничних елементів, які покривають межі розрахункової області.

Після розрахунку отримуємо розподіл магнітного поля у кінцевій частині турбогенератора типу ТГВ-500 за умов номінального навантаження (рис. 16).

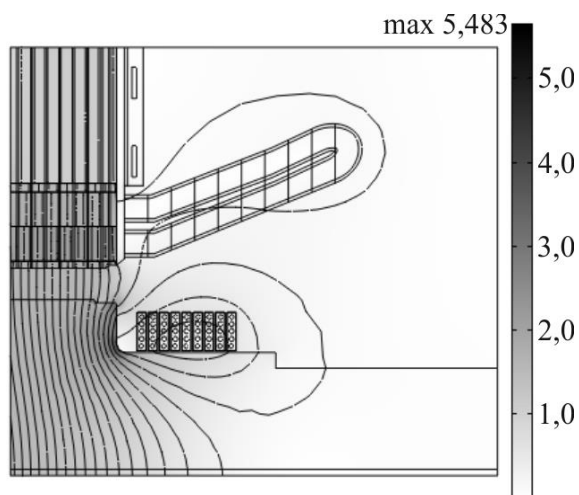


Рис. 16. Розподіл електромагнітного поля в торцевій зоні турбогенератора за умов номінального навантаження

Окремо розв'язується задача розподілу вихрових струмів (Time-harmonic analysis). Оскільки ротор обертається синхронно з полем, відмінна від нуля електропровідність задається в пакетах осердя статора, натискному пальці, електропровідному екрані та натискній плиті. Це дозволяє врахувати вихрові струми, наведені від аксіальних магнітних потоків лобових частин обмоток. На рис. 17, а, б показаний розподіл густини вихрового струму в зазначених елементах, причому рис. 17, б для наочності представлений у збільшеному масштабі.

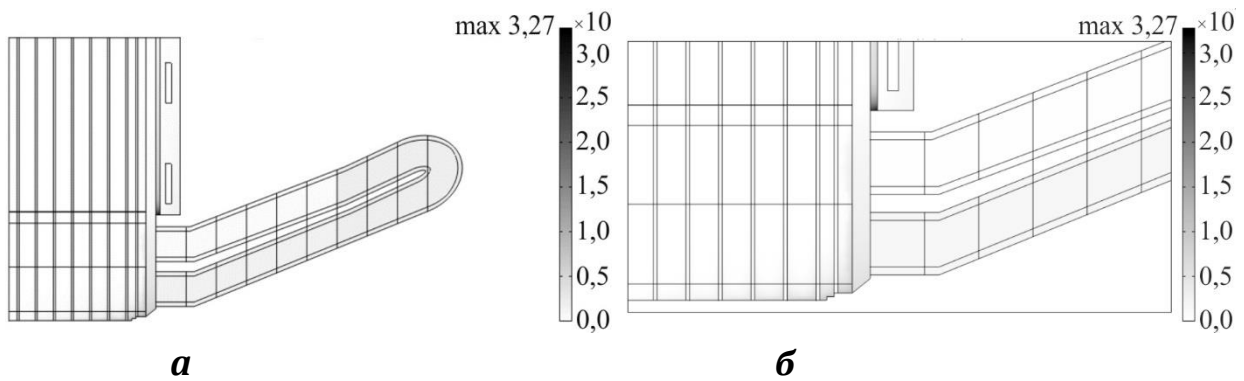


Рис. 17. Розподіл густини вихрового струму в торцевій зоні осердя статора турбогенератора за умов номінального навантаження

Під час розрахунку струмів у пакетах заліза той факт, що осердя генератора набране з окремих листів, враховується введенням еквівалентних магнітного проникнення [20, 21, 22] й електричної провідності ($\sigma = K_{Fe} \sigma$) з урахуванням коефіцієнта заповнення сталлю.

«Інформація поперечного перетину» щодо фактичної геометрії зубця, натискного пальця, екрана та плити закладена у функціях перенесення магнітного поля через граничні умови (15), тільки для останніх трьох за допомогою розподілу векторного магнітного потенціалу в кожному елементі (з рішення задачі на рис. 7–9), який встановлюються на відповідних лініях розрахункової області торцевої зони (рис. 12).

Таким чином, за допомогою розробленої моделі можна отримати розподіл й параметри магнітного поля для окремих елементів і вузлів торцевої зони за умов різних режимів навантаження турбогенератора.

До електромагнітної моделі додається тепловий модуль розрахунку. Для цього необхідно натиснути на панелі інструментів COMSOL кнопку Multiphysics, Model Navigator. У Application Mode навігатора моделей обрати модуль Heat Transfer Module, підрозділ General Heat Transfer та натиснути кнопку Add. У списку Ruling application mode навігатора моделей установити General Heat Transfer. Натиснути ОК.

Турбогенератор типу ТГВ-500 призначений для експлуатації у тривалих режимах з навантаженням, близьким до номінального. Перенавантаження зазвичай відбуваються під час порушень і різноманітних відхилень у режимах роботи енергосистеми. Як правило, від генератора вимагається короточасна робота у разі таких перенавантажень. Тому основний тепловий розрахунок виконується для

сталого стану, коли вся кількість тепла, яка виділяється у машині, відводиться охолодним середовищем. Несталі теплові режими перевіряються з метою визначення допустимих короткочасних перенавантажень турбогенератора [11, 23].

Виконується спрощений (оцінний) тепловий розрахунок, який, з однієї сторони, не потребує великого об'єму роботи, а з іншої – може надати правильну оцінку теплового стану окремих частин машини. Застосування наближених методів розрахунку допустимо для типових конструкцій і схем охолодження. За таких умов загальноприйнятій розділений розгляд теплового стану статора та ротора, оскільки їхній вплив один на одного в цьому аспекті невеликий [11, 23, 24].

Під час математичного опису стаціонарного температурного поля осердя статора у зв'язку зі складністю постановки задачі прийнято такі припущення, основані на аналізі дослідів і розрахунків [8, 10, 11, 23, 25, 26]:

- розрахункові й експериментальні дослідження нагрівання торцевої зони показали, що за умов наявності примусової вентиляції в каналах між натискною плитою та крайнім пакетом взаємним тепловим впливом натискної плити і крайнього пакета можна нехтувати та розглядати їхнє нагрівання незалежно;

- на основі виконаних досліджень нагрівання пакетів осердя статора розглядається незалежно від нагрівання обмотки статора; за умов безпосереднього охолодження обмоток тепловий розрахунок може бути значно спрощений у припущенні, що вода, яка циркулює в обмотці статора, відводить втрати, що виділяються тільки в міді; втрати ж у зубцях і спинці осердя відводяться воднем, який циркулює у радіальних вентиляційних каналах осердя, тобто теплообмін між обмоткою та іншими елементами машини відсутній і також відсутній рух тепла вздовж самої обмотки; такі спрощення дозволяють достатньо наочно оцінити температуру обмотки статора;

- для потужних генераторів з радіальною системою вентиляції кожен з крайніх пакетів осердя статора має майже автономну систему охолодження; підігрівання охолоджувального газу в умовах звичайно прийнятої у цій зоні великій витраті помітно не впливає на температуру пакетів; зокрема у [10] показано, що за умов існуючої інтенсивності охолодження торцевої зони осердя статора турбогенератора типу ТГВ-500 вплив підігрівання газу як на середній нагрів, так і максимальну

температуру пакета незначний, і не перевищує 2 %, а під час врахування підігрівання газу розрахункова максимальна температура відрізняється не більше ніж на 0,2 %; для опосередкованого впливу підігрівання охолоджувального газу, оскільки у вентиляційних каналах між крайніми пакетами осердя статора газ рухається тільки у радіальному напрямку із повітряного проміжку, у цьому ж напрямку штучно збільшується і його температура;

– під час розрахунків стаціонарного температурного поля приймається припущення щодо відсутності кондуктивного теплообміну між крайніми пакетами та деталями кріплення й пристроями екранування торцевої зони статора; нагрів системи тіл – крайнього пакета, натискних елементів і пристроїв екранування – розглядається незалежно від основної частини осердя й обмотки статора;

– в пакетах осердя статора, натискних елементах і пристроях екранування розглядається тільки радіальне температурне поле;

– температура газу в проміжку між статором і ротором збільшується з наближенням до середини турбогенератора;

– розподіл витрати газу в паралельних каналах відповідає втратам, які відводяться через ці канали, тому підігрівання газу в усіх паралельних каналах відрізняється несуттєво.

Всі ці припущення дозволили значно спростити метод розрахунку.

Приймаючи отримані результати моделювання електромагнітного поля як джерело теплових втрат, виконується розрахунок теплообмінних процесів у торцевій зоні турбогенератора. Рівняння для двовимірного стаціонарного температурного поля має вигляд:

$$\nabla(-k\nabla T) = Q, \quad (17)$$

де k – коефіцієнт теплопровідності; T – температура; Q – питомі об'ємні теплові втрати.

Автоматично в системі, яка описує передачу тепла, встановлена загальна форма системи рівнянь, яка дозволяє враховувати нелінійності. Одночасно, ця задача використовує лінійні відношення між величинами. Лінійна постановка задачі надає можливість використовувати коефіцієнтну форму системи рівнянь і зробити процес обчислення простіше.

Як зазначалося, турбогенератор, що розглядається, має радіальну систему вентиляції. Холодний водень, температура якого відповідно до

Інструкції з експлуатації прийнята 40 °С, подається у радіальні канали між пакетами осердя та проміжки між натискними пальцями, екраном і плитою зі сторони зазору з подальшим рухом у сторону спинки осердя.

Розрахунок температурного поля виконується тільки для торцевої зони осердя статора.

Геометричні розміри й електромагнітні параметри (за винятком питомої електричної провідності) ті самі, що і в електромагнітній задачі.

Необхідно врахувати, температура нагріву в інтенсивному магнітному полі може досягати критичних значень, що зумовлює підвищення питомого опору в областях з високою густиною струму, а це у свою чергу – до іншого розподілу густини струму. Це явище враховано залежністю питомої електричної провідності від температури за таким законом:

$$\sigma(T) = \frac{\sigma_0}{(1 + k_\sigma \cdot (T - T_0))}, \quad (18)$$

де σ_0 – електропровідність у разі початкової температури T_0 ; k_σ – коефіцієнт, який враховує вплив температури на електропровідність.

Для врахування в моделі залежності (18) необхідно за допомогою команди Multiphysics, Perpendicular Induction Currents, Vector Potential повернутися до електромагнітної частини задачі та задати залежність провідності у вікні редагування фізичних властивостей для усіх підобластей провідного перерізу.

Надалі задаються теплофізичні властивості матеріалів. Для деяких матеріалів є можливість ввести параметри з бібліотеки через кнопку Load. З метою врахування омичних втрат з електромагнітної задачі, у тому числі й від вихрових струмів (наведених аксіальними магнітними потоками лобових частин обмоток), у вікно вводу потужності об'ємного джерела тепла Heat Source в кожній розрахунковій підобласті прописується ім'я змінної Q_{etqa} , для врахування втрат від наведеного основним радіально спрямованим полем вихрового струму в кожному масивному елементі (натискний палець, мідний екран, натискна плита) з результатів розрахунку в поперечному перерізі генератора задається середнє значення цього струму у відповідних елементах розрахункової області поздовжнього перерізу в електромагнітній задачі й також прописується ім'я змінної Q_{etqa} у тепловій. Інші втрати в магнітопроводі статора розраховуються окремо за традиційними

залежностями, наприклад [8, 11, 23], які прописуються безпосередньо у відповідних підобластях у вікно вводу потужності об'ємного джерела тепла Heat Source та підсумовуються зі змінною Q_{emqa} .

Для однозначного математичного опису теплового процесу необхідно задати граничні умови, що характеризують взаємодію об'єкта з навколишнім середовищем. Модуль теплопередачі системи COMSOL Multiphysics використовує таке узагальнене рівняння:

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = q_0 + h(T_{inf} - T). \quad (19)$$

Доданок $h(T_{inf} - T)$ моделює конвективний тепловий обмін з оточуючим середовищем, де h – коефіцієнт тепловіддачі, T_{inf} – температура середовища, яке оточує об'єкт.

У такому формулюванні можна задавати тепловий потік у явному вигляді величиною q_0 , а також коефіцієнтом h відносно опорної температури.

Принципово існує дві можливості моделювання цих процесів:

- використання коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні, яка омивається у разі конвекції;
- розширення моделі для описання потоків теплопередачі у флюїді.

Перший спосіб є дуже потужним і ефективним. На додаток, режим General Heat Transfer надає користувачу вбудовані функції задля використання коефіцієнтів, які описують теплопередачу. Для більшості інженерних задач використання цих коефіцієнтів є точним і чисельно ефективним модельним наближенням.

Друге наближення, яке передбачає урахування течії флюїду та перенос тепла в моделі, може бути корисним у певних випадках, коли, наприклад, з причини особливості геометрії коефіцієнти значною мірою змінюються залежно від місця на поверхні, або ж якщо необхідно знайти значення температури флюїду. У таких випадках граничні умови на поверхні розділення неперервні та не мають розриву. Однак складність моделі істотно підвищується, якщо необхідно розрахувати поле течії флюїду або його температурне поле. На додаток, істотно підвищуються вимоги до об'єму оперативної пам'яті комп'ютера, а час розрахунку значно зростає.

Надалі зосередимо увагу на першому з описаних вище двох способів, який для моделювання конвективної теплопередачі використовує коефіцієнти.

Головна складність у використанні коефіцієнтів тепловіддачі – це розрахунок або задання значень коефіцієнта h . Цей коефіцієнт залежить від самого флюїду, його властивостей, закономірності руху, температури, стану та фізичних параметрів поверхні, а також у випадку примусової конвекції – від швидкості руху флюїду [27, 28]. Крім того, на величину коефіцієнта впливає геометрична конфігурація. У цьому випадку задача вибору коефіцієнта h не розв'язується, оскільки коефіцієнти тепловіддачі теплообмінних поверхонь елементів конструкції та вентиляційних каналів для турбогенератора типу ТГВ-500 відомі з результатів попередніх досліджень [8, 9, 10].

Задання температури на поверхні об'єкта можна інтерпретувати як задання температури навколишнього середовища у разі нескінченно великої величини коефіцієнта тепловіддачі $h = \infty$. У цьому випадку різниця температури поверхні та середовища дорівнює нулю:

$$(T_{\text{inf}} - T_0) = 0. \quad (20)$$

Коефіцієнт теплопровідності k характеризує відношення між вектором густини теплового потоку q і температурним градієнтом температури в законі Фур'є:

$$\vec{q} = -k\nabla T. \quad (21)$$

У розрахунок ця величина вводиться як потужність, поділена на одиниці довжини та температури.

Умова теплоізоляції або симетрії має вигляд:

$$\vec{n} \cdot (k\nabla T) = 0. \quad (22)$$

Ця умова визначає, в яких місцях область гарно ізольована, або скорочує розмір моделі за рахунок використання переваг симетрії. Температура на одній стороні границі повинна бути рівною температурі на іншій стороні границі. Оскільки не існує відмінності температури на границі, тепло не повинно пересікати її.

Для зручності задання відомих коефіцієнтів тепловіддачі розрахункова область осердя статора (рис. 12) заздалегідь розподілена на такі зони: зубця (яка у свою чергу розподілена на зони коронки зубця, його кореня, а також зубця напроти верхнього стрижня та напроти нижнього стрижня обмотки) й ярма.

Необхідно ще раз підкреслити, що найбільша увага приділяється зоні I (рис. 1), а саме області «крайній пакет - натискний палець - мідний екран - натискна плита».

Основна теплопередача у навколишнє середовище теплової енергії, що виділилася в елементах, здійснюється шляхом конвективного теплообміну між нагрітою поверхнею та потоком охолоджуючого водню (19).

Коефіцієнти тепловіддачі ($\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$) для турбогенератора типу ТГВ-500 мають такі значення [8, 9, 10], рис. 18:

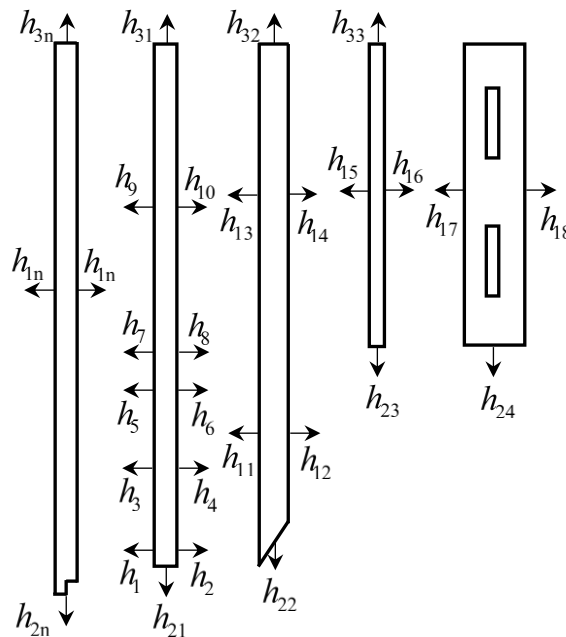


Рис. 18. Коефіцієнти тепловіддачі для турбогенератора типу ТГВ-500

– для крайнього пакета:

$$h_1 = 474; \quad h_2 = 332; \quad h_3 = h_5 = h_7 = 354; \quad h_4 = h_6 = 248; \quad h_8 = 225; \quad h_9 = 221; \\ h_{10} = 209; \quad h_{21} = 1330; \quad h_{31} = 205;$$

– для натискного пальця:

$$h_{11} = h_{12} = 280; \quad h_{13} = h_{14} = 243; \quad h_{22} = 1280; \quad h_{32} = 243;$$

– для мідного екрана:

$$h_{15} = h_{16} = h_{23} = 280; \quad h_{33} = 243;$$

– для натискної плити:

$$h_{17} = 280; \quad h_{18} = 200; \quad h_{24} = 384;$$

– усереднене значення для інших пакетів:

$$h_{1n} = 241; \quad h_{2n} = 1000; \quad h_{3n} = 200.$$

Встановлюємо граничну умову (20) в таких зонах розрахункової області:

- температура води, що циркулює в охолоджувальних каналах натискної плити та лобових частинах обмотки статора: $T_{\text{inf}} = T_0 = 60$ °C.

На границі, яка проходить посередині останнього дев'ятого пакета розрахункової області, встановлюється гранична умова (22).

Задаються властивості матеріалів кожної розрахункової підобласті. Для деяких матеріалів є можливість ввести параметри з бібліотеки через кнопку Load.

Сітка скінченних елементів є однаковою як для електромагнітної, так і теплової задачі.

Не торкаючись всього різноманіття варіантів візуалізації результатів розрахунку, на рис. 19 наведено розподіл температури у торцевій зоні осердя статора турбогенератора за умов номінального навантаження.

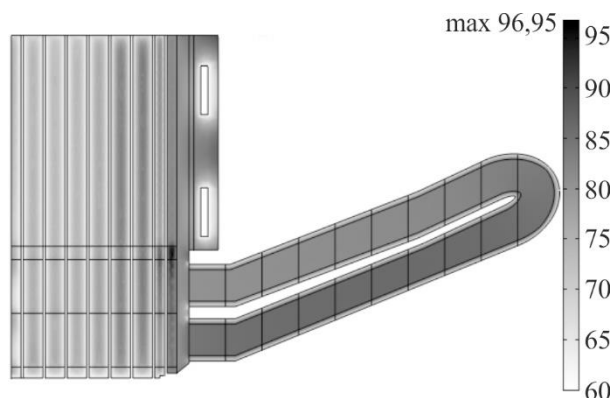


Рис. 19. Розподіл температури у торцевій зоні осердя статора турбогенератора за умов номінального навантаження

Таким чином, сформульовано замкнуту математичну модель кінцевої зони осердя статора турбогенератора типу ТГВ-500 у вигляді сукупності зв'язаних рівнянь, граничних умов і співвідношень (2)–(22). Рівняння (2)–(16) описують стаціонарне квазітривимірне електромагнітне поле у статорі та роторі, причому окремо аналізуються поля у поперечному та поздовжньому перетинах генератора, а їхня зв'язність забезпечується виконанням умови (15) і розподілом магнітної проникності вздовж перерізу $00_1 - \mu(r)|_{00_1}$. Рівняння (17) описує стаціонарний нагрів торцевої зони осердя статора з урахуванням

температурної залежності електропровідності матеріалів, причому знайдені відповідно до цієї залежності електропровідності використовуються у рівнянні (2) під час розрахунків електромагнітного поля.

Отже, розроблена математична модель є сукупністю трьох моделей, які взаємопов'язані між собою. Тобто використано підхід для аналізу теплових процесів у торцевій зоні осердя статора турбогенератора послідовного логічного переходу від рішення простої моделі розрахунку електромагнітного поля в активній частині машини до більше складних моделей розрахунків у кінцевій зоні з використанням попередніх результатів у наступних, що дозволяє отримати рішення для визначення розподілу температури в складних областях.

ПОРІВНЯННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ.

Необхідно підкреслити, що конструктивною особливістю крайніх пакетів осердя статора турбогенератора типу ТГВ-500 на відміну від пакетів активної зони, є наявність шліців (поздовжніх розрізів) у зубцях, які виконуються для зменшення втрат від вихрових струмів, створених у листах під час проникнення в них осьового потоку. Хоча математична модель не передбачає врахування шліців у зубцях крайніх пакетів осердя статора турбогенератора, але з метою перевірки достовірності розробленого алгоритму розрахунку температурного поля було виконано оцінний розрахунок і співставлення отриманих значень нагріву торцевої зони турбогенератора типу ТГВ-500 у номінальному режимі роботи та режимі короткого замикання при $I_s = 0,6I_n$, для яких є експериментальні дані з температурного поля крайнього пакета осердя статора та коефіцієнтам тепловіддачі [8, 9, 10]. Експериментальні дані відповідають сталому нагріву крайнього пакета осердя статора турбогенератора зі сторони турбіни в перетині $1/8$ ширини пакета від торця вздовж осі машини. Врахування впливу шліців у зубцях крайніх пакетів за допомогою польових методів докладно описано у працях [2, 29] й у даному контексті наводити ці алгоритми буде зайвим. З причини суттєвого розходження результатів між цими методиками (більше 30 %) та складності врахування реальної глибини проникнення (затухання) аксіальної складової магнітної індукції в осьовому напрямку крайнього

пакета за умов двовимірної постановки задачі поперечного перерізу останнього, яка «змушує» дослідника або нехтувати вказаним затуханням і обумовлює завищені результати [29], або зовсім не розглядати це питання акцентуючи увагу на розподілі вихрових струмів на поверхні одного листа (сегмента) [2], це питання потребує додаткового дослідження. Оскільки це дослідження виходить за рамки цієї роботи, вплив розсічення у зубцях крайніх пакетів на величину втрат у них враховано за допомогою аналітичного (класичного) підходу [8], коли складова втрат у зубцях від радіального поля не змінюється, а складова втрат від аксіального потоку зменшується в 4 рази. У даному випадку це можна інтерпретувати як штучне зменшення вихрового струму в зубці у два рази. За таких умов сумарні втрати у зубці зменшуються на 33 %, що добре узгоджується з існуючими класичними уявленнями щодо впливу розрізів у зубцях на величину втрат [8, 12].

Необхідно зазначити, отримані розбіжності розрахункових значень з експериментальними даними температурного поля не перевищили 7 % (табл. 4), що свідчить про високу достовірність застосованих підходів і припущень, а також можливість використання запропонованої моделі для інженерних цілей.

Таблиця 4

Результати розрахунку та експериментальні дані сталого нагріву крайнього пакета осердя статора турбогенератора типу ТГВ-500

Джерело інформації	Температура, °C			
	Зубець			Ярмо
	Коронка	Середина	Основа	Середина
Номинальний режим ($P = 495$ МВт, $\cos \varphi = 0,848$)				
Розрахунок	50,9	51,25	72,37	56,63
Дослід	-	54,90	76,20	53,70
Розбіжність, %	-	6,65	5,03	5,46
Режим короткого замикання ($I_s = 0,6I_n$)				
Розрахунок	49,15	44,7	52,97	48,17
Дослід	46,30	47,70	57,00	45,60
Розбіжність, %	6,16	6,29	7	5,64

ВИСНОВКИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Кожен дослідник у своїх розрахунках приймає певні припущення, які

мають одночасно переваги та недоліки. Розроблена математична модель відрізняється від тих, які використовуються та відомі на сьогодні, підходом до врахування руху ротора, перерізом взаємозв'язку активної частини генератора з його кінцевою зоною, математичним апаратом, комплексом граничних умов, методикою визначення кута β , математично точним урахуванням струмів і геометрії лобових частин обмотки статора та, що найсуттєвіше, режиму навантаження турбогенератора. Водночас розроблена модель дозволяє дослідити взаємопов'язані електромагнітні та теплові процеси за умов простоти програмної реалізації.

На сучасному етапі розвитку обчислювальної техніки врахувати усі фактори під час моделювання електромагнітних і теплових полів у торцевій зоні турбогенератора неможливо. Ті фактори, які враховані у запропонованій моделі, необов'язково враховувати саме так, як це вказано. Їх можна враховувати будь-яким способом за умови, що цей спосіб забезпечує коректність урахування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Мильх, В. И. & Полякова, Н. В. (2014). Численно-полевые расчеты электромагнитных параметров турбогенераторов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*, 1081 (38), 3-18.
- [2] Васьковський, Ю. М. & Титко, О. І. (2013). Математичне моделювання вихрових струмів і втрат в крайніх пакетах статора турбогенератора. *Технічна електродинаміка*, (3), 50-56.
- [3] Васьковський, Ю. М. (2007). *Польовий аналіз електричних машин*. Київ: НТУУ «КПІ».
- [4] Кенцицький, О. Г. & Хвалін, Д. І. (2017). Квазітривимірна модель електромагнітного поля у торцевій зоні турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, (48), 59-64.
- [5] Вознесенский, А. С. (2011). *Компьютерные методы в научных исследованиях. Часть 2. Компьютерное моделирование физических объектов и процессов горного производства*. Москва: МГГУ.
- [6] Хвалин, Д. И., Кенцицкий, О. Г. & Кобзарь, К. А. (2021). Моделирование электромагнитного поля мощной электрической машины. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, 64 (2), 130-142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-130-142>
- [7] *COMSOL Multiphysics Modeling and Simulation Software*. (2016). Retrieved from: <http://www.comsol.com/>
- [8] Постников, И. М., Станиславский, Л. Я. & Счастливый, Г. Г. (1971). *Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов*. Киев: Наук. думка.
- [9] Счастливый, Г. Г., Федоренко, Г. М. & Выговский, В. И. (1978). Прибор для измерения теплоотдачи в электрических машинах и аппаратах. *Электротехническая промышленность. Серия: Электрические машины*, (7), 10-13.
- [10] Счастливый, Г. Г., Федоренко, Г. М. & Выговский, В. И. (1985). *Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки*. Киев: Наук. думка.
- [11] Титов, В. В., Хуторецкий, Г. М., Загородная, Г. А. и др. (1967). *Турбогенераторы. Расчет и конструкция*. Ленинград: Энергия.

- [12] Смородин, В. И. (1991). *Экспериментальные исследования и анализ особенностей электромагнитных процессов в торцевых зонах статоров мощных турбогенераторов* (препр. № 709). Институт электродинамики АН УССР. Киев, Украина.
- [13] Кенсичький, О. Г., Хвалін, Д. І. & Кобзар, К. О. (2018). Математична модель спільного розрахунку електромагнітного та температурного полів торцевої зони потужного турбогенератора. *Гідроенергетика України*, (1-2), 32-35.
- [14] Штогрін, О. В. (2016). *Науково-технічні заходи по зменшенню пошкоджуваності статорів потужних турбогенераторів, спричинених вібрацією в торцевих зонах* (автореф. дис. ... канд. техн. наук). Одеський національний політехнічний університет. Одеса, Україна.
- [15] Кенсичький, О. Г. & Хвалін, Д. І. (2018). Електромагнітне поле у торцевій зоні турбогенератора при зміні реактивного навантаження. *Технічна електродинаміка*, (1), 62-68.
- [16] Кенсичький, О. Г. & Хвалін, Д. І. (2018). Розподіл електромагнітного поля в торцевій зоні турбогенератора при номінальному навантаженні. *Технічні вісті*, 47 (1), 48 (2), 11-14.
- [17] Потапов, Л. А. & Бутарев, И. Ю. (2011). *COMSOL Multiphysics: моделирование электромеханических устройств*. Брянск: БГТУ.
- [18] Fujita, M., Ueda, T., Tokumasu, T., Nagakura, K., Kakiuchi, M. & Otaka, T. (2009). Eddy Current Analysis in the Stator End Structures of Large Capacity Turbine Generators. *International Conference on Electrical Machines and Systems* (1-6), Nov., 2009, Tokyo, Japan. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2009.5382938>
- [19] Li, W., Guang, C. & Zheng, P. (2010). Calculation of a Complex 3-D Model of a Turbogenerator With End Region Regarding Electrical Losses, Cooling, and Heating. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, (26) 4, 1073-1080.
- [20] Милых, В. И. & Высочин, А. И. (2010). Принципы расчета магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора в различных режимах его работы. *Электротехника и электромеханика*, (3), 19-24.
- [21] Милых, В. И. & Дубинина, О. Н. (2002). Сравнительный анализ вариантов граничных условий при численном расчёте магнитного поля в концевой зоне турбогенератора методом плоско-ортогональных расчётных моделей. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки*, (5), 10-15.
- [22] Милых, В. И. & Полякова, Н. В. (2015). Численные расчеты магнитных полей в торцевой зоне турбогенераторов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*, (5), 3-11.
- [23] Хуторецкий, Г. М., Токов, М. И. & Толвинская, Е. В. (1987). *Проектирование турбогенераторов*. Ленинград: Энергоатомиздат.
- [24] Vlasenko, T. S., Hvalin, D. I. & Mystetskyi, V. A. (2019). Complex mathematical simulation of physical processes in powerful generator. *East European Scientific Journal*, 44 (4), 22-30.
- [25] Кенсичький, О. Г., Хвалін, Д. І., & Кобзарь, К. А. (2019). Математическая модель совместного расчёта электромагнитного поля и нагревов торцевой зоны мощного турбогенератора. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, 62 (1), 37-46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46>
- [26] Кенсичький, О. Г., Крамарський, В. А., Кобзар, К. О. & Хвалін Д. І. (2018). Дослідження розподілу електромагнітного поля та температури в торцевій зоні осердя статора турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, (51), 47-53.
- [27] Исаченко, В. П., Осипова, В. А. & Сукомел, А. С. (1975). *Теплопередача*. Москва: Энергия.
- [28] Михеев, М. А. & Михеева, И. М. (1977). *Основы теплопередачи*. Москва: Энергия.
- [29] Данько, В. Г., Мілих, В. І. & Поляков, І. В. (2000). Деякі проблеми турбогенераторів з повітряним охолодженням. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*, (84), 73-76.