



КЕНСИЦЬКИЙ О.Г., докт. техн. наук,
ХВАЛІН Д.І., аспірант, Інститут електродинаміки НАН України
КОБЗАР К.О., канд. техн. наук,
 Державне підприємство "Завод "Електроважмаш"

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СПІЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛІВ ТОРЦЕВОЇ ЗОНИ ПОТУЖНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

На квазітривимірній польовій математичній моделі проведені дослідження розподілу електромагнітного поля та втрат у елементах торцевої зони турбогенератора, результати яких використані як вихідні дані для визначення максимальних нагрівів окремих вузлів осердя статора. Отриманий розподіл поля і нагрівів не тільки на поверхні, а й усередині конструктивних елементів кінцевої зони. Запропонована модель спільного розрахунку електромагнітного поля і теплообмінних процесів у торцевій зоні турбогенератора дозволяє визначити нагрів вузлів в різних режимах навантаження, у тому числі із споживанням реактивної потужності, а також оцінити ефективність новітніх конструктивних рішень.

К л ю ч о в і с л о в а: турбогенератор, торцева зона, магнітне поле, температурне поле.

З підвищенням лінійного навантаження у торцевій зоні (ТЗ) потужного турбогенератора (ТГ) зростають втрати, і при невеликому її конструктивному виконанні та недостатньому охолодженні локальні (місцеві) нагрів окремих елементів і вузлів можуть перевищувати гранично допустимі значення (наприклад, 120 °С для пакетів осердя статора).

На сьогодні опублікована велика кількість робіт, спрямованих на вивчення електромагнітного поля в ТЗ ТГ [2–5, 11] за допомогою двовимірних і квазітривимірних математичних моделей. Але всі вони не дають уявлення про рівень температур конструктивних елементів ТЗ, адже саме нагрів є обмежуючим фактором рівнів як активного, так і реактивного навантаження, особливо в режимах експлуатації ТГ із споживанням реактивної потужності. В таких умовах особливої актуальності набуває створення математичних моделей спільного розрахунку електромагнітного поля і теплообмінних процесів у ТЗ ТГ в різних режимах навантаження, що може бути ефективним інструментом оцінки нових конструктивних і технологічних рішень.

У роботі запропонована квазітривимірна математична модель спільного розрахунку електромагнітного поля та теплообмінних процесів у ТЗ

потужного ТГ. Квазітривимірною моделлю займає проміжне положення між двовимірним і тривимірним рішеннями і побудована на чисельних розрахунках у поперечному та поздовжньому перетинах ТГ, взаємопов'язаних за допомогою комплексу граничних умов (ГУ). Математично строго враховується режим роботи ТГ шляхом застосування системи реально розподілених струмів лобових частин обмоток статора і ротора. Магнітне поле описане не тільки на поверхні деталей і вузлів, але й в усій ТЗ, включаючи крайні та основні пакети осердя статора. Врахована фактична геометрія ротора й статора, анізотропія фізичних властивостей сталі, дискретність зубцево-пазової структури та реальне насичення осердя статора [4, 5].

У якості об'єкта дослідження розглянутий серійний ТГ ТГВ-500, основні параметри якого наведені у Табл. 1.

ТГ ТГВ-500 у аксіальному напрямку складається з трьох частин — центральної та двох кінцевих. Осердя статора, шихтоване з високолегованої холоднокатаної електротехнічної сталі завтовшки 0,5 мм марки Е330, набране з 138 пакетів. Два крайніх пакети, завтовшки 20 мм кожен, розділені п'ятиміліметровими радіальними вентиляційними каналами. Пакети, починаючи з третього, мають товщину 40 мм. Зубці двох крайніх пакетів виконані

Таблиця 1. Основні параметри ТГ ТГВ-500

Найменування параметра	Значення	Найменування параметра	Значення
Номинальний режим навантаження:		Кількість паралельних гілок обмотки:	
- активна потужність P_n , МВт	500	- статора a_s	2
- струм статора I_{sn} , кА	17	- ротора a_r	1
- напруга обмотки статора U_{sn} , кВ	20	Число послідовних витків обмотки:	
- струм збудження i_{fn} , А	5120	- статора w_1	8
- коефіцієнт потужності $\cos \phi$	0,85	- ротора w_2	48
Частота f , Гц	50	Число активних провідників в пазу:	
Число пар полюсів	1	- статора s_{n1}	2
Діаметр розточки статора D_1 , м	1,32	- ротора s_{n2}	5/3
Діаметр ротора D_2 , м	1,12	Значення опорів, в.о.:	
Довжина осердя статора l_s , м	6,2	- активний обмотки статора r_1	0,001364
Повітряний проміжок між статором і ротором, мм	100	- головний індуктивний x_d	1,91
		- розсіювання обмотки статора x_{ca}	0,218

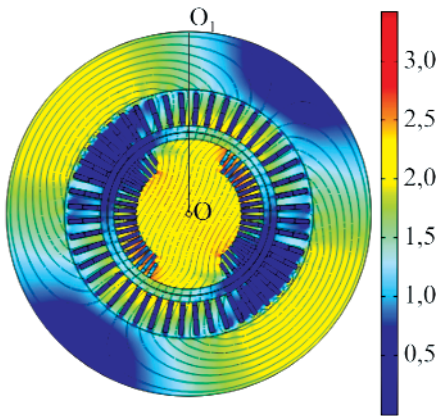


Рис. 1. Розподіл електромагнітного поля в центральній зоні статора і ротора ТГ в режимі номінального навантаження

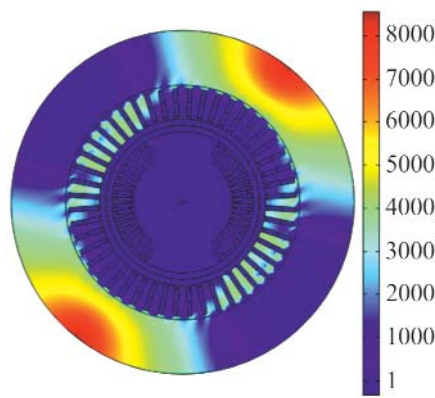


Рис. 2. Розподіл магнітної проникності в центральній зоні статора і ротора ТГ в режимі номінального навантаження

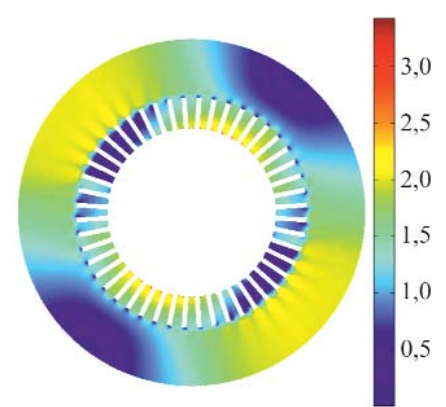


Рис. 3. Розподіл МІ в осерді статора ТГ в режимі номінального навантаження

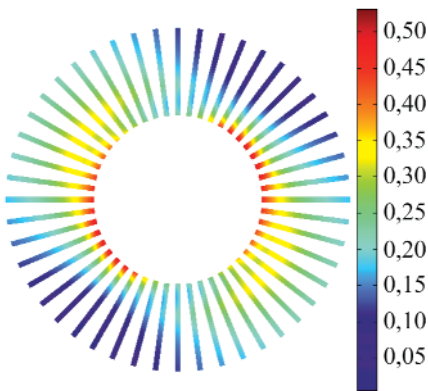


Рис. 4. Розподіл МІ у натискних пальцях ТГ в режимі номінального навантаження

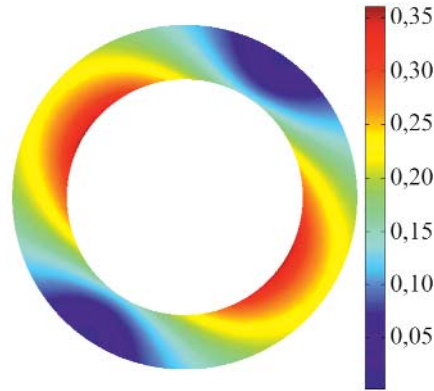


Рис. 5. Розподіл МІ у натискній плиті ТГ в режимі номінального навантаження

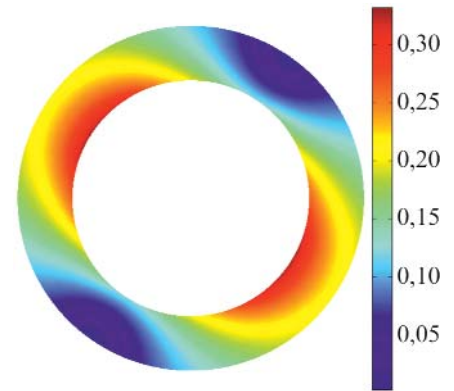


Рис. 6. Розподіл МІ у мідному екрані ТГ в режимі номінального навантаження

скороченими. На першому ступені скорочення зубців складає 24 мм, на другому пакет виконаний у вигляді двох сходинок скорочення: перша – на 16 мм, друга – на 8 мм. У 48 пазах статора розміщена трифазна двошарова стержнева обмотка. Натискні фланці виготовлені із поковок немагнітної сталі у вигляді плоских кілець. Під натискними фланцями встановлені мідні екрани та немагнітні пальці, а у самому фланці для охолодження передбачено два кільцеві канали, по яким циркулює вода.

Модель відповідає реальним розмірам ТГ в цілому, а також його окремих вузлів. Для кожного

вузла задані фізичні параметри матеріалу, з якого він виготовлений. Для феромагнетиків побудовані відповідні криві намагнічування.

Нижче наведені результати розрахунків для ТЗ генератора зі сторони турбіни для режиму номінального навантаження при номінальній швидкості обертання ротора (3000 об/хв). Сторона турбіни вибрана тому, що тут магнітне поле не спотворюється впливом струмів з'єднувальних шин і виводів (як це має місце на стороні контактних кілець) [6].

На першому етапі розрахунку розглядається

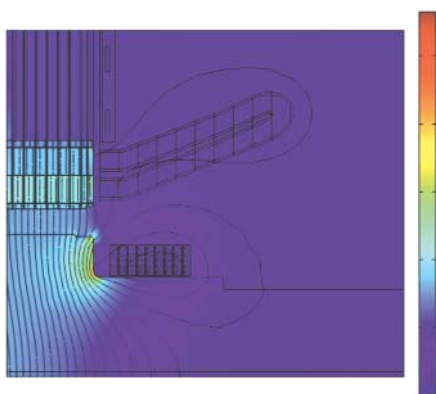


Рис. 7. Розподіл електромагнітного поля в ТЗ ТГ при номінальному навантаженні

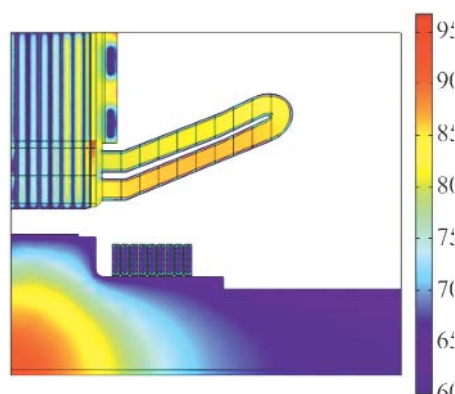


Рис. 8. Розподіл температури в ТЗ ТГ при номінальному навантаженні

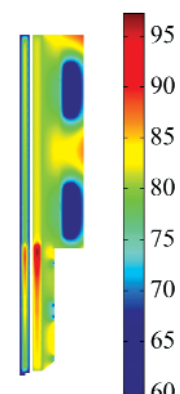


Рис. 9. Розподіл температури в області два крайніх пакета – натискний палець – екран – натискна плита"



двовимірна польова модель електромагнітного поля поперечного перерізу центральної зони ТГ. Рівняння для двовимірного магнітного поля відносно аксіальної складової векторного магнітного потенціалу (ВМП) A_z у розрахунковій області має вигляд [2]:

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

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

Рівняння (1) доповнюється однорідною ГУ першого роду $A_z = 0$, що відображає затухання поля за межами розрахункової області.

В обмотці статора прийнято симетричну систему фазних струмів

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin(\omega t + \beta) \\ i_B = I_m \sin(\omega t + \beta - 120^\circ) \\ i_C = I_m \sin(\omega t + \beta + 120^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

де I_m – їх амплітуда; β – кутове зміщення осі, вздовж якої діє магніторушійна сила (МРС) трифазної обмотки статора по відношенню до поздовжньої осі ротора d .

Кут β – визначається як [2]

$$\beta = 90^\circ + \theta + \varphi, \quad (3)$$

де θ – кут навантаження машини; φ – кут фазового зсуву між напругою та струмом статора.

Відповідно до [6] кут навантаження θ дорівнює

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{I_s \cos \varphi}{(U_s / x_d) \pm I_s \sin \varphi}, \quad (4)$$

де знак "плюс" відповідає режиму перезбудження ТГ, "мінус" – недозбудження.

В результаті розрахунків отримані наступні результати. На Рис. 1 показаний миттєвий розподіл магнітної індукції (МІ) та ВМП у певний момент часу в центральній зоні (у даному випадку $t = 0,02$ с, що відповідає одному повному обороту ротора). Відтінками кольору показані рівні МІ у відповідності з приведеною шкалою. На Рис. 2 приведений розподіл магнітної проникності статора та ротора ТГ, максимальне значення становить 8542 і має місце у ярмі статора.

На Рис. 3 можна побачити, що максимальне значення МІ в осерді статора при номінальному навантаженні має місце у коронках зубців і складає 3,4 Тл, розподіл електромагнітного поля симетричний вздовж лінії результуючої МРС (Рис. 1). На Рис. 4 наведений розподіл МІ у натискних пальцях. Він та-

кож є симетричним, однак, під дією електромагнітного поля статора, напрямок результуючої відхиляється. Величини МІ у натискних пальцях нижчі, і максимальне значення складає 0,53 Тл.

Натискна плита та мідний екран є немагнітними, плита встановлена перед екраном, тому розподіл електромагнітного поля в них співпадає. Максимальні значення МІ становлять 0,36 Тл і 0,33 Тл, відповідно (Рис. 5 і 6). Оскільки мідний екран знаходиться за плитою, аксіальна складова магнітного потоку в ньому менша.

Маючи розподіл поля у центральній частині, переходимо до другого етапу розрахунку – моделювання магнітного поля у поздовжньому перетині ТГ. З врахуванням симетрії вздовж осевого та радіального напрямків, розрахункова область ТЗ обрана у вигляді половини перерізу ротора вздовж його осі та перетину зубця осердя статора у тангенціальному напрямку (по колу) [11]. Цей перетин співпадає з прямокутною координатною площиною і є площиною симетрії ротора (на Рис. 1 вона проходить по радіусу OO_1).

Рівняння для двовимірного поля відносно складової ВМП A_z , яка є тангенціальною складовою у розрахунковій області, має вигляд (1). Необхідна структура силових ліній магнітного поля формується за допомогою комплексу ГУ для ВМП, що встановлюються для зовнішніх меж області [2].

Оскільки поздовжній перетин ТГ проходить по поздовжній осі ротора d (Рис. 1), то значення густини струму лобової частини обмотки ротора відповідає заданому струму збудження (Табл. 1). Після розрахунку отримуємо розподіл магнітного поля в ТЗ ТГ типу ТГВ–500 при номінальному навантаженні (Рис. 7).

Маючи розподіл електромагнітного поля в областях протікання вихрового струму, можна отримати значення ВМП A^e для кожного елемента розрахункової області. Густина вихрового струму визначається як

$$J^e = -j\omega\sigma_e A^e + J_{\text{зстор}}^e. \quad (5)$$

Відповідно до [6, 9] розрахуємо середні втрати на вихрові струми у відповідних областях.

Отримавши розподіл втрат по елементам ТЗ, переходимо до третього етапу дослідження – моделювання теплообмінних процесів у кінцевій частині ТГ.

Рівняння процесу теплообміну у двовимірній постановці має вигляд:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = Q, \quad (6)$$

де ρ , C_p , k – коефіцієнти теплофізичних характеристик



тик матеріалів: густина, теплоємність при постійному тиску і теплопровідність, відповідно; T — температура; Q — питомі об'ємні теплові втрати.

ТГ-500 має радіальну систему вентиляції, при якій холодний водень (із розрахунковою температурою $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) подається у радіальні канали та проміжки між натискними пальцями зі сторони зазору з подальшим рухом у сторону спинки. Коefіцієнти тепловіддачі теплообмінних поверхонь задаємо відповідно до [6, 8].

В результаті отримуємо розподіл температур в ТЗ ТГ при номінальному навантаженні (Рис. 8). На Рис. 9 показаний розподіл нагрівів двох крайніх пакетів, натискного пальця, мідного екрана та натискної плити.

Максимальна температура ($97,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) спостерігається в зубцевій зоні крайнього пакета біля дна паза. Це пояснюється тим, що окрім радіального поля зубцева зона навантажена аксіальним потоком, створеним МРС лобових частин обмотки статора, розсіюванням лобових частин обмотки ротора, а також "витисканням" частини основного потоку із повітряного проміжку. До того ж, причиною локальної концентрації аксіальної складової поля біля дна паза є ефект екранування поля натискною плитою (Рис. 7).

Зрозуміло, що розподіл нагрівів натискної плити обумовлений наявністю каналів з охолоджуючою водою. Однак вони ефективні лише в локальній близькості і на нагрів мідного екрана не впливають. Поверхня пальців, яка повернута до плити, має температуру на $10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ вищу, ніж поверхня, що повернута до осердя. З віддаленням від зубцевої зони крайніх пакетів з максимальною температурою у сторону спинки осердя температура різко зменшується з причини екрануючої дії натискної плити та мідного екрана. Температура також зменшується при наближенні до зазору. Аксіальна складова МІ в зоні коронки зубця сягає $0,7\text{--}0,75\text{ Тл}$ (торець сходинки першого пакета), однак ця зона інтенсивно охолоджується газом, що циркулює в зазорі.

Із всього наведеного можна зробити висновок, що нагрів елементів ТЗ ТГ є вкрай нерівномірним, що обумовлено аналогічним розподілом втрат та наявною схемою охолодження. Максимальні значення температури в окремих елементах більше середнього майже втричі.

З метою перевірки достовірності адекватності розробленого алгоритму дослідження температурного поля, реалізованого у середовищі Comsol Multiphysics [10], було виконано співставлення розрахункових значень нагрівів ТЗ ТГ ТГВ-500 у

режимі короткого замикання при $I_s = 0,6 I_n$ із даними експериментальних досліджень [7, 8]. Отримані розбіжності розрахункових і експериментальних значень не перевищили 7% , що свідчить про адекватність застосованих підходів та припущень і про можливість використання запропонованої моделі для інженерних цілей.

Висновки

1. Розроблена уточнена квазітривимірна математична модель спільного розрахунку електромагнітного поля та теплообмінних процесів у ТЗ потужного ТГ з радіальною системою вентиляції. Створена модель у порівнянні з відомими відрізняється уточненим урахуванням фізико-технічних факторів при відносній простоті програмної реалізації.

2. Результати моделювання відповідають загальним уявленням щодо перебігу електромагнітних та теплових процесів в ТЗ потужного ТГ.

ЛІТЕРАТУРА.

1. Кенсіцький О. Г., Выговський О. В., Хвалін Д. І. Екрани зубцево-пазової конструкції в електричних машинах змінного струму // Гідроенергетика України. — 2017. — № 3–4. — С. 26–28.
2. Кенсіцький О. Г., Хвалін Д. І. Електромагнітне поле у торцевій зоні турбогенератора при зміні реактивного навантаження // Технічна електродинаміка. — 2018. — № 1. — С. 62–68.
3. Кенсіцький О. Г., Хвалін Д. І. Квазітривимірна модель електромагнітного поля у торцевій зоні турбогенератора // Праці Ін-ту електродинаміки. — 2017. — № 48. — С. 59–64.
4. Мильх В. И., Высочин А. И. Принципы расчета магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора в различных режимах его работы // Электротехника і електромеханіка. — 2010. — №3. — С.17–22.
5. Мильх В. И., Полякова Н. В. Численные расчёты магнитных полей в торцевой зоне турбогенераторов // Вісник НТУ "ХПІ". — 2015. — № 5 (1114). — С.3–11.
6. Постников И. М., Станиславский Л. Я., Счастливый Г. Г. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов. — К.: Наук. думка, 1971. — 360 с.
7. Счастливый Г. Г., Федоренко Г. М., Выговский В. И. Прибор для измерения теплоотдачи в электрических машинах и аппаратах // Электротехническая промышленность. Электрические машины. — 1978. — вып. 7. — С. 10–13.
8. Счастливый Г. Г., Федоренко Г. М., Выговский В. И. Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки. — К.: Наук. думка, 1985. — 208 с.
9. Тутов В. В., Хуторецкий Г. М., Загородная Г. А., Вартамян Г. П. и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. — Ленинград: Энергия, 1967. — 896 с.
10. Comsol Multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>
11. Fujita M., Ueda T., Tokumasu T. Eddy current analysis in the stator end structures of large capacity turbine generators // International Conference on Electrical Machines and Systems, November, 2009, Tokyo, Japan. — P. 1–6.