

Д. І. Хвалін

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

Ефективність нового екранування крайніх пакетів осердя статора потужного турбогенератора

Ключові слова:
потужний турбогенератор,
торцева зона,
екранування,
масштабна фізична модель,
математична модель,
електромагнітне поле,
температура

На основі комплексного дослідження електромагнітних і теплових процесів шляхом математичного та фізичного моделювання доведена ефективність нового конструктивного рішення торцевої зони осердя статора потужного генератора. Запропоновано конструкцію, застосування якої забезпечує максимальне зниження температури крайнього пакета статора. З метою підвищення достовірності експериментальних даних, отриманих на основі фізичного моделювання, а також тестування побудованої математичної моделі, за допомогою останньої, налагодженої на фізичну модель, було проведено чисельні експерименти щодо дослідження ефективності екранів зубцево-пазової конфігурації. Незначна відмінність значень магнітної індукції, отриманих шляхом математичного моделювання, від експериментальних даних дозволяє зробити висновок щодо достовірності результатів. Крім цього, було проведено тепловий розрахунок для номінального режиму роботи турбогенератора типу ТГВ-500 за допомогою математичної моделі та порівняння цих результатів з експериментальними даними, отриманими на реальному генераторі аналогічного типу та потужності. Розбіжності розрахункових і експериментальних значень не перевищили 7%. Усі дані, отримані як шляхом моделювання, так і натурального експерименту, відповідають одному й тому ж турбогенератору, що в сукупності робить достовірними результати математичного моделювання, які неможливо отримати на реальному об'єкті з різних причин об'єктивного та суб'єктивного характеру.

Вступ

На сьогодні показники надійності турбогенераторів (ТГ) енергоблоків атомних електростанцій (АЕС) України, а саме наробіток до відмови та коефіцієнт готовності, не відповідають вимогам, які регламентуються міжнародними стандартами. Низька надійність генераторів є додатковим джерелом небезпеки та не-ефективного функціонування станцій в цілому. На додаток, ТГ енергоблоків АЕС західного регіону країни вимушено беруть участь у регулюванні частоти та активної й реактивної потужності в мережі та експлу-

атуються з підвищеним коефіцієнтом потужності, що погіршує економічні показники та негативно впливає на технічний стан обладнання. За оцінками, додаткові втрати енергосистеми в цілому від скорочення експлуатаційного ресурсу обладнання щорічно складають близько 2 млрд грн [1]. Одночасно вартість ремонту генератора, який працює у маневреному режимі, у 2...3 рази більша, ніж для генератора в базовому режимі.

Оскільки потужні генератори енергоблоків АЕС відрізняються високими електромагнітними, тепловими й механічними навантаженнями, то наслідки змінних режимів роботи для таких агрегатів досить

© Д. І. Хвалін, 2021

важкі. І, відповідно, відмови пов'язані з тривалим часом відновлення та великими витратами.

Так, позапланове відключення енергоблока № 3 Рівненської АЕС у 2016 році з причини пошкодження ТГ типу ТВВ-1000–2У3 завдало збитків тільки через недовиробіток електроенергії понад 50 млн USD (при ціні 0,02 USD за 1 кВт-год), що перевищує вартість самого генератора. А з урахуванням витрат на ремонтно-відновлювальні роботи цю цифру необхідно подвоювати.

Оскільки у режимах з підвищеним коефіцієнтом потужності активне навантаження генератора обмежується допустимим рівнем нагріву крайніх пакетів осердя статора, то створення нових конструктивних рішень і впровадження комплексу заходів, спрямованих на доведення експлуатаційної надійності генераторів до сучасних вимог з маневреності, є актуальним. Це вимагає розробки заходів з підвищення надійності елементів конструкції завдяки застосуванню нових підходів і сучасних наукових доробків.

Результати дослідження

У зв'язку з цим було запропоновано конструктивне рішення осердя статора електричної машини змінного струму, на яке отримано патент України [2], суть якого така. На рис. 1 показано загальноприйнятую конструкцію осердя статора потужного генератора. Осердя статора (1) набирається (шихтується) зі штампованих сегментів електротехнічної сталі (2) з пазами (3) (рис. 2), в які укладаються стержні обмотки (4). Осердя стягується натискними плитами (5) за допомогою стяжних шпильок (6) і натискних пальців (7). Між плитою та пальцями встановлюється, як правило, мідний екран (8). Крайній пакет осердя набирається в осьовому напрямку по чергово із феромагнітних (9) та високоелектропровідних сегментів (10), виконаних, наприклад, з міді, які мають також зубцево-пазову конфігурацію. Вказані високоелектропровідні сегменти набираються так, що кожний наступний шар сегментів в осьовому напрямку перекриває стики між ними. З метою підвищення механічної жорсткості осердя статора високоелектропровідний пакет (певна кількість сегментів) встановлено за феромагнітним на певній відстані δ від торця.

У статті наведено оптимізацію геометричних розмірів внутрішнього екрана, яку реалізовано шляхом варіаційних експериментів зі зміною товщини та місця розташування останнього в масиві крайнього пакета осердя статора ТГ за допомогою математично-

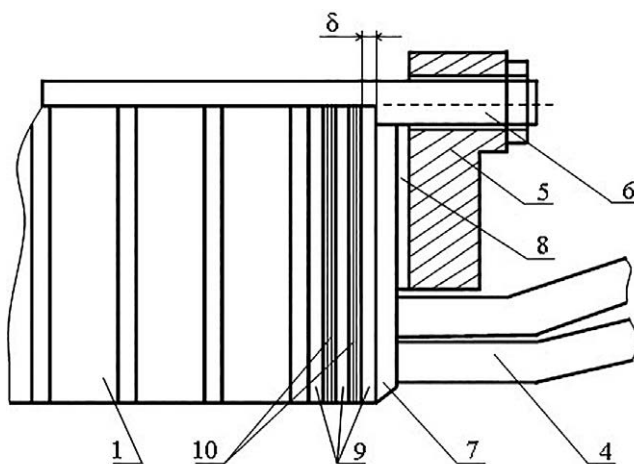


Рис. 1. Один із прикладів виконання запропонованої системи екранування осердя статора генератора

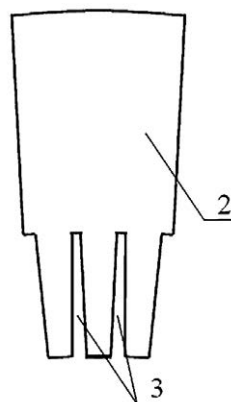


Рис. 2. Профіль сегментів осердя статора

го та фізичного моделювання, а також рекомендації стосовно подальшого використання запропонованої конструкції.

Як об'єкт дослідження розглянуто серійний ТГ типу ТГВ-500 потужністю 500 МВт (державне підприємство «Завод «Електроважмаш» м. Харків) [3]. В осьовому напрямку ТГ складається з трьох частин — центральної та двох кінцевих. Осердя статора, шихтоване з високолегованої холоднокатаної електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм марки Е330, має 138 пакетів. Два крайні пакети товщиною 20 мм кожен розділені п'ятиміліметровими радіальними вентиляційними каналами. 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 — 16 мм, друга — 8 мм. Тобто зубцева зона на торці має три сходинки. Немагнітні сталеві натискні плити мають геометрію плоского кільця з двома кільцевими каналами для охолодження водою, що циркулює. Під натискними плитами встановлені мідні екрани та немагнітні сталеві пальці.

Вибір типу ТГ обумовлений такими факторами: система охолодження генератора (обмотки статора та ротора охолоджуються водою, сталь статора — воднем) є ефективною і перспективною, сьогодні на електричних станціях України працюють ТГ з водяним охолодженням обмотки статора, загальна потужність яких складає більше 60 % від установленної електричної потужності всіх електричних станцій; наявність експериментальних даних [3, 4], що, з однієї сторони, дозволяє перевірити достовірність електромагнітного та теплового розрахунків, а з іншої — спростити тепловий розрахунок завдяки відомим коефіцієнтам тепловіддачі [3, 4]; наявність масштабної фізичної моделі (ФМ) кінцевої частини ТГ цього типу та потужності.

Хоча моделювання розглянуто на прикладі ТГ з воднево-водяним охолодженням, яке знайшло у свій час переважне розповсюдження у практиці світового турбогенераторобудування, отримані результати та розроблені рекомендації здебільшого можуть бути розповсюджені й на генератори подібних параметрів з іншими системами охолодження.

Коротко можливості ФМ можна сформулювати так.

Масштабна ФМ кінцевої зони потужного ТГ розрахована та виготовлена відповідно до відомих положень теорії подібності електромагнітних процесів у провідних середовищах [5], які встановлюють основні масштабні співвідношення між моделлю та оригіналом. Для квазістаціонарного поля у лінійному ізотропному середовищі критерій подібності має вигляд:

$$m_{\mu} m_{\sigma} m_l^2 m_f = 1, \quad (1)$$

де m_{μ} , m_{σ} , m_l , m_f — масштаби магнітної проникності, електропровідності, лінійних розмірів і частоти відповідно.

Оскільки ФМ виконана у порівнянні з оригіналом менших розмірів ($m_l < 1$), частота струму живлення порівняно з частотою оригіналу підвищується.

Для досліджуваної моделі прийняті масштаби $m_l \approx 1/3,5$, $m_f \approx 12$, $m_{\sigma} = 1$.

Як перше наближення умова $m_{\mu} = 1$ придатна для немагнітних натискних пальців та плити, а також областей з великим насиченням, де зміна величини $\mu(H)$ відносно невелика.

Масштаб m_l деяких областей моделі відмінний від $1/3,5$, оскільки для окремих вузлів моделі використовувалися готові деталі певних розмірів (сегменти активної сталі статора та ротора підібрані зі штамповок листів двополюсного асинхронного двигуна). Тобто у цьому випадку спостерігається порушення геометричної подібності, оскільки активне залізо мо-

делі виготовлено з листів сталі E21 товщиною 0,35 мм, а залізо оригіналу — з листів сталі E330 товщиною 0,5 мм; і за умов моделювання товщина листа ФМ повинна бути 0,2 мм.

За частоти струму близької до 600 Гц буде забезпечено досить близьке співвідношення для подібності полів:

$$m_l^2 \cdot m_f = 1 \quad (m_{\mu} = 1, m_{\sigma} = 1). \quad (2)$$

Для моделювання ТГ ($m_l < 1$) придатні статичні моделі, які не вміщують обертових частин. Однак у статичній моделі можуть бути виконані умови подібності електромагнітних процесів в одній із областей (статора чи ротора). У досліджуваній моделі виконано умови наближеної подібності для електромагнітного поля тільки в області статора. В області ротора поле не моделюється.

Масштабна ФМ виконана у вигляді статора з трифазною обмоткою, кінцева частина вміщує лобові частини обмотки статора, декілька кінцевих крайніх пакетів активного заліза осердя статора, натискні плити та пальці (рис. 3). Нерухомий ротор виконано з тієї ж сталі, що й осердя статора. Натискні плита та пальці виготовлені зі сталі IX18H9T (як і в оригіналі). Конструкція моделі суттєво спрощена: ротор виконано у вигляді суцільного беззубцевого циліндру, відсутні вал та обмотка ротора, підшипниковий щит і корпус підшипника.



Рис. 3. Масштабна фізична модель кінцевої зони турбогенератора

Необхідно відмітити, що моделювання на ФМ переважно дозволяє оцінити характер розподілу поля, але обмежується неможливістю отримання необхідної точності. Однак для проведення досліджень

якісного порівняння ефективності різноманітних конструктивних рішень торцевої зони статора масштабна ФМ замінює експеримент у природі, що має велике практичне значення для потужних ТГ.

Для вимірювання аксіальної (осьової) складової магнітної індукції B_z на поверхні листів заліза статора використовувались датчики індукції, які є плоскими безкаркасними котушками, що встановлені на планках. Через відсутність теплової подібності моделі та оригіналу вимірювання температури не проводилося.

Так, у роботах [6, 7] наведені результати експериментальних досліджень ефективності екранів зубцево-пазової конфігурації. Отримані залежності аксіальної складової магнітної індукції B_z від певної послідовності чергування товщини та матеріалу систем екранування зубцево-пазових сегментів і місця розташування їх в осерді статора. Доведено, що на відміну від існуючих такі екрани захищають не лише ярмо осердя статора, але й найбільш нагріту зону крайніх пакетів осердя — зубці. За критерієм максимального зменшення B_z , яка є причиною підвищеного нагріву зубців, визначено оптимальну конструкцію системного екрана та місце його розташування у масиві крайнього пакета (відстань δ від торця осердя статора, див. рис. 1). Обґрунтовано ідею структурного електромагнітного екранування, в основі якої застосування феромагнітних (залізо статора) й електропровідних елементів рівної товщини, а також експериментально показано, що для будь-яких інших відношень товщини елементів екранування стає менш ефективним.

Результати експериментальних досліджень пристроїв екранування на масштабній ФМ дозволили одержати базу даних, необхідну для чисельного розрахунку електромагнітного поля та розподілу температури за допомогою математичної моделі (ММ).

Оскільки для формування змістовних й достатньо докладних висновків щодо параметрів і характеристик об'єкта потрібне проведення значної кількості варіаційних розрахунків, а також з причини складності конструкції кінцевої зони потужних ТГ і дуже великої обчислювальної трудомісткості тривимірних моделей, які навіть за умов використання сучасної комп'ютерної техніки пов'язані з низкою спрощень, такі моделі не знайшли широкого застосування [8]. Тому використано підхід для аналізу теплових процесів у торцевій зоні осердя статора ТГ послідовного логічного переходу від рішення простої моделі електромагнітного поля в активній частині машини

до більш складних моделей кінцевої зони з використанням попередніх результатів у наступних, що дозволяє отримати рішення для визначення розподілу температури в складних областях. Використання спеціалізованого програмного пакета [9] дозволило розробити достатньо гнучку ММ у плані модифікації окремих її складових, що дозволяє досліднику сконцентруватися на досягненні поставленої мети, а не вирішувати утилітарні завдання.

ММ спільного розрахунку електромагнітного поля та температури в торцевій зоні статора ТГ дозволяє математично строго враховувати режим роботи шляхом задання системи реально розподілених струмів лобових частин обмоток статора й ротора [10, 11]. Вона побудована на чисельних розрахунках у поперечному та поздовжньому перетинах ТГ, взаємопов'язаних за допомогою комплексу граничних умов. Розрахункова область охоплює всю торцеву зону статора, включаючи крайні та основні пакети. Водночас враховуються реальна геометрія елементів ротора й статора, анізотропія та насичення осердя статора. 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.

Основні принципи реалізації ММ такі.

Спочатку розглядається двовимірна польова модель електромагнітного поля поперечного перерізу центральної зони ТГ. Рівняння для двовимірного магнітного поля відносно аксіальної складової векторного магнітного потенціалу A_z у розрахунковій області має вигляд [10, 11]:

$$j\omega\sigma A + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times A) = J_{z\text{стор}}^e e_z, \quad A = A_z e_z, \quad (3)$$

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.

Оскільки пакети статора набрані з листів високолегованої холоднокатаної електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм, то вихровими струмами від радіально спрямованого потоку можна знехтувати. Таким чином, магнітне поле центральної частини ТГ у декартовій системі координат задовольняє рівнянню Пуассона:

$$\nabla(\nabla A_z) = -\mu J_{z\text{стор}}^e. \quad (4)$$

Рівняння (4) доповнюється однорідною граничною умовою першого роду, що відображає згасання поля на лінії зовнішньої поверхні ярма статора

$$A_z = 0. \quad (5)$$

В обмотці статора прийнято симетричну систему фазних струмів

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin(\omega t + \beta) \\ i_B = I_m \sin(\omega t + \beta - 120^\circ), \\ i_C = I_m \sin(\omega t + \beta + 120^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

де I_m — їхня амплітуда; β — кутове зміщення осі, вздовж якої діє магніторухлива сила трифазної обмотки статора відповідно до поздовжньої осі ротора d .

Кут β визначається за формулою

$$\beta = 90^\circ + \theta + \varphi, \quad (7)$$

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

Кут навантаження θ знаходиться відповідно до виразу

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{I_s \cos \varphi}{(U_s / x_d) \pm I_s \sin \varphi}, \quad (8)$$

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

Величини струмів в обмотках статора та ротора й кута β задаються відповідно до режиму роботи генератора.

Маючи розподіл поля у центральній частині, моделюється магнітне поле у поздовжньому перетині ТГ. З урахуванням симетрії вздовж осьового та радіального напрямків, розрахункова область торцевої зони обрана у вигляді перерізу ротора вздовж його поздовжньої осі та перетину одного зубця осердя статора у тангенціальному напрямку. Цей перетин співпадає з прямокутною системою координат і є площиною симетрії ротора.

Рівняння для двовимірного поля в прямокутній системі координат відносно складової векторного магнітного потенціалу A_z , яка є тангенціальною складовою у розрахунковій області, має вигляд (3). Необхідна структура силових ліній магнітного поля формується за допомогою комплексу граничних умов для векторного магнітного потенціалу та напруженості магнітного поля, що встановлюються для зовнішніх меж області [10].

Окремо розв'язується задача розподілу вихрових струмів від аксіальних магнітних потоків лобових частин обмоток. Оскільки ротор обертається синхронно з полем, відмінна від нуля електропровідність задається в пакетах осердя статора, натискному пальці, електропровідному екрані та натискній плиті.

На останньому етапі, приймаючи отримані результати розрахунків електромагнітного поля як джерело теплових втрат, вирішується задача теплообміну.

Проводиться спрощений тепловий розрахунок, який, з однієї сторони, не потребує великого об'єму роботи, а з іншої — може надати правильну оцінку теплового стану окремих частин машини [11]. Застосування наближених методів розрахунку допустимо для типових конструкцій і схем охолодження [12]. За таких умов загальноприйнятий розділений розгляд теплового стану статора та ротора, оскільки їхній вплив один на одного в цьому аспекті невеликий [11–15].

Рівняння для двовимірного стаціонарного температурного поля в прямокутній системі координат має вигляд:

$$\nabla(-k \nabla T) = Q, \quad (9)$$

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

Коефіцієнти тепловіддачі торцевих поверхонь та вентиляційних каналів задані згідно з рекомендаціями [3, 4]. Температура холодного газу прийнята 40°C . Параметри охолодження незмінні для всіх варіантів торцевої зони ТГ, що розглядаються.

З метою перевірки достовірності розробленого алгоритму розрахунку температурного поля було виконано розрахунок і співставлення отриманих значень нагріву торцевої зони ТГ 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 [3, 4]. Експериментальні дані відповідають сталому нагріву крайнього пакета осердя статора ТГ зі сторони турбіни в перетині 1/8 ширини пакета від торця вздовж осі машини. Отримана розбіжність розрахункових й експериментальних значень температурного поля не перевищує 7% (табл. 1), що свідчить про високу достовірність застосованих підходів і припущень та можливість використання ММ для інженерних цілей.

За допомогою побудованої ММ проведено оптимізацію геометричних розмірів внутрішнього екра-

Таблиця 1. Результати розрахунку та експериментальні дані сталого нагріву крайнього пакета осердя статора турбогенератора типу ТГВ-500

Джерело інформації	Температура, °С			
	Зубець			Ярмо
	Коронка	Середина	Основа	Середина
Номинальний режим ($P = 495$ МВт, $\cos\phi = 0,848$)				
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

на шляхом проведення варіаційних розрахунків зі зміною товщини та місця розташування останнього в масиві крайнього пакета осердя статора ТГ. Виконується розрахунок для одного з варіантів торцевої зони, результати якого обираються як еталонні з метою порівняння та паралельного перерахунку під час зміни конструкції шляхом виконання певної послідовності геометричних операцій.

Оскільки ефективність різних варіантів конструкції торцевої зони визначається за допомогою порівняння максимальної та середньої температури крайнього пакета осердя статора, далі наведено тільки результати теплового розрахунку.

Під час дослідження виявлено такі закономірності. З віддаленням від торця осердя в осьовому напрямку в межах крайнього пакета нагрів внутрішнього екрана збільшується зі зниженням його ефективності, а на певній відстані це зниження має різку зміну з одночасним зменшенням температури екрана. Водночас ефективність екрана зменшується з причини підігріву крайнього пакета самим екраном. На додаток, збільшення товщини мідного пакета більше підвищує його температуру, ніж властивості екранування. Але ефективність екранування підвищується не за рахунок збільшення його товщини, а завдяки застосуванню декількох більш тонких екранів.

На рис. 4 наведено отриманий за допомогою ММ розподіл температури посередині крайнього пакета $T_{\text{пак}}$ осердя статора вздовж радіуса R генератора під час застосування внутрішнього структурного екрана для номінального режиму роботи. З метою зручності запису прийняті деякі скорочення, наприклад, позначення Ст 4 — М 4 — Ст 4 — М 4 — Ст 4 відповідає

розміщенню структурного екрана типу сталевий сегмент товщиною 4 мм — мідний, товщиною 4 мм і т. д., останній — ближче до торця магнітопроводу статора.

Ефективність екрана (зниження температури крайнього пакета) максимальна під час застосування феромагнітних (залізо статора) й електропровідних пакетів рівної товщини. Для будь-яких інших співвідношень товщини елементів екрана його ефективність зменшується. Це корелює з експериментальними дослідженнями [7] на масштабній ФМ кінцевої зони аналогічного ТГ.

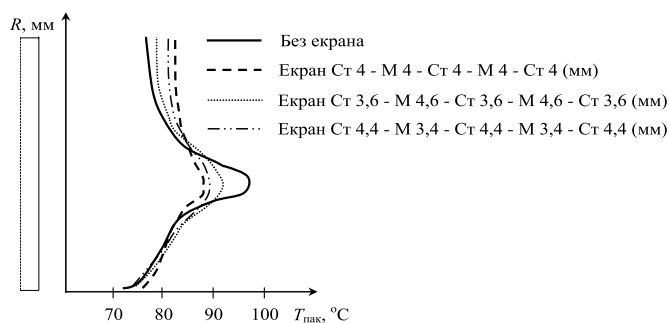


Рис. 4. Розподіл температури посередині крайнього пакета за умови розміщення структурного екрана

3 точки зору надання системі (крайній пакет з внутрішнім екраном) механічної жорсткості першим і останнім від торця магнітопроводу статора необхідно розміщувати феромагнітний пакет (умова 1). Унаслідок радіальної симетричності структури екранування та її затискання сталевими пакетами з обох боків така система набуває цілісності. На додаток, товщина всіх пакетів, як феромагнітних, так і мідних, має бути однаковою (умова 2). Оскільки крайній пакет ТГ типу ТГВ-500 має товщину 20 мм, то аби одночасно виконати дві умови, товщина усіх феромагнітних і мідних пакетів повинна бути 4 мм (надалі — оптимальний екран). Усі інші комбінації товщини не задовольняють або першій, або другій умові.

Сам крайній пакет необхідно розглядати як одну структуру, тобто структурний екран, за максимальної ефективності якого буде відбуватися й екранування другого пакета від торця осердя статора.

Як приклад показано розподіл температурного поля торцевої зони за умов номінального навантаження ТГ для трьох варіантів конструкції крайнього пакета: без внутрішнього екрана (базова конструкція 1); у випадку розміщення посередині крайнього пакета мідного екрана товщиною 6 мм (конструкція 2) та оптимального екрана (конструкція 3).

На рис. 5 показано розподіл температурного поля в торцевій зоні конструкції 1 ТГ. З рис. 5 можна побачити, що максимальна температура ($96,95^{\circ}\text{C}$) фіксується у зубцевій зоні крайнього пакета (корінь зубця). Це пояснюється тим, що крім радіального поля зубцева зона навантажена аксіальним потоком, створеним магніторушійною силою лобових частин обмотки статора, розсіюванням лобових частин обмотки ротора, а також «витисканням» частини основного потоку з повітряного проміжку. Водночас ефект екранування поля натискною плитою є причиною його локальної концентрації саме в корні зубців. Розподіл нагріву натискної плити обумовлений наявністю каналів з охолоджувальною водою. Однак вони ефективні лише в локальній близькості і на нагрів мідного екрана суттєво не впливають. Натискні пальці знаходяться у найнесприятливіших умовах, оскільки частково розміщені у зубцевій зоні, де магнітне поле особливо інтенсивне. Нагрів натискних пальців характеризується значною нерівномірністю вздовж довжини: від $25\dots 30^{\circ}\text{C}$ у зоні екрана до $35\dots 45^{\circ}\text{C}$ в області зубців. Поверхня пальців, повернута до плити, має температуру на $10\dots 15^{\circ}\text{C}$ вищу, ніж поверхня, що повернута до осердя. На стороні осердя температура поверхні пальців уздовж усієї зони контакту з пакетами незначно відрізняється від значення температури для торцевої поверхні осердя. З віддаленням від зубцевої зони крайніх пакетів з максимальною температурою у бік спинки осердя температура різко зменшується з причини дії екранування натискної плити та мідного екрана. Температура також зменшується з наближенням до повітряного проміжку. Розподіл температури в пакетах, віддалених від торця осердя, досить рівномірний уздовж довжини осердя та у радіальному напрямку.

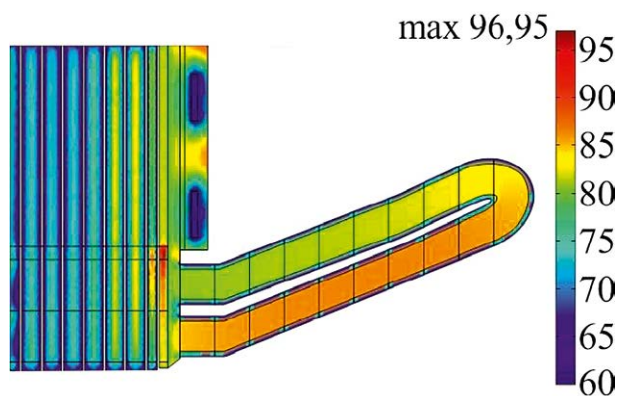


Рис. 5. Розподіл температури в торцевій зоні конструкції 1 турбогенератора за умов номінального навантаження

На рис. 6 показано температурне поле в торцевій зоні конструкції 2 ТГ. Для цієї конструкції максимальна температура фіксується у внутрішньому мідному екрані в зоні кореня зубця та складає $89,4^{\circ}\text{C}$. Тобто така конструкція крайнього пакета осердя статора дозволяє зменшити його максимальний нагрів на $8,12\%$.

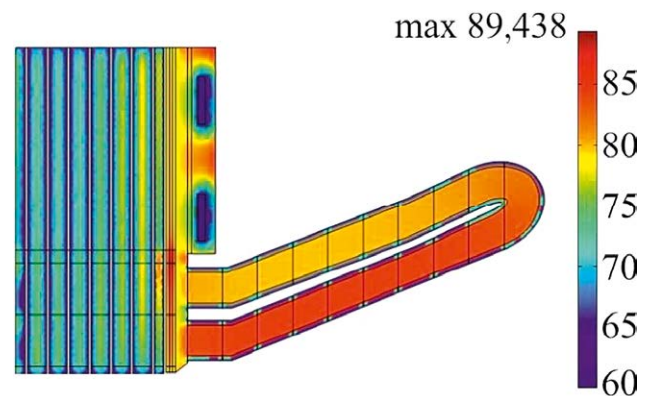


Рис. 6. Розподіл температури в торцевій зоні конструкції 2 турбогенератора за умов номінального навантаження

На рис. 7 представлено розподіл температурного поля в торцевій зоні конструкції 3 ТГ. З рис. 7 можна побачити, що максимальна температура фіксується у середньому феромагнітному елементі та складає $87,8^{\circ}\text{C}$. Така конструкція крайнього пакета дозволяє зменшити його нагрів на $9,8\%$, але за умов більшої витрати міді порівняно з конструкцією 2.

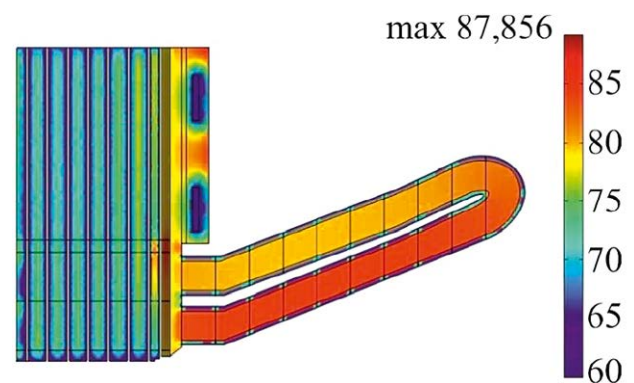


Рис. 7. Розподіл температури в торцевій зоні конструкції 3 турбогенератора за умов номінального навантаження

З метою підвищення достовірності отриманих шляхом фізичного моделювання експериментальних даних, а також тестування побудованої ММ, за допомогою останньої були проведені чисельні експерименти щодо дослідження ефективності зубцево-пазових екранів. Для цього, використовуючи вбудований у COMSOL Multiphysics 3.5a

редактор, уже побудована розрахункова область ММ кінцевої зони ТГ типу ТГВ-500 шляхом певної послідовності геометричних операцій була змінена на геометрію масштабної ФМ цього генератора. Кожному вузлу задані фізичні параметри матеріалу, з якого він виготовлений. Для сталі E21 побудована відповідна крива намагнічування.

Оскільки масштабна ФМ кінцевої зони ТГ не передбачає теплову подібність оригіналу, розрахунок розподілу температури не виконувався.

На рис. 8 показаний розподіл магнітного поля у поздовжньому розрізі ФМ синхронного генератора типу ТГВ-500.

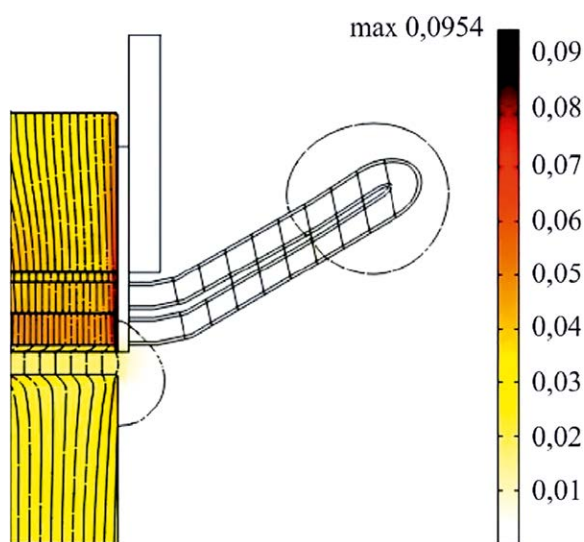


Рис. 8. Розподіл електромагнітного поля у поздовжньому перерізі масштабної фізичної моделі турбогенератора

На рис. 9 і 10, як приклад, показано залежності аксіальної складової магнітної індукції B_z (мТл) у середній частині зубців за умови встановлення на поверхні крайнього листа осердя статора різних систем екранування, отримані на фізичній та математичній моделях, відповідно (де N — номер листа, на якому вимірювалась індукція).

З аналізу отриманих на математичній і фізичній моделях результатів можна констатувати таке. Максимальні відхилення значень аксіальної складової магнітної індукції фіксуються для точок з найменшими значеннями індукції та не перевищують 20...25%, а середні значення — 11%. Це можна пояснити похибкою вимірювання, наприклад, затисканням вимірювального датчика, помилкою експериментальних даних, як самого датчика, так і мілівольметра. Це відхилення більше проявляється для менших значень магнітної індукції, тобто в місцях з найбільшою віро-

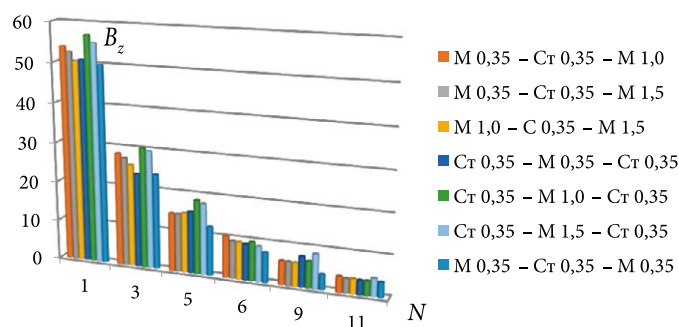


Рис. 9. Аксіальна складова індукції в середній частині зубців (за результатами фізичного моделювання)

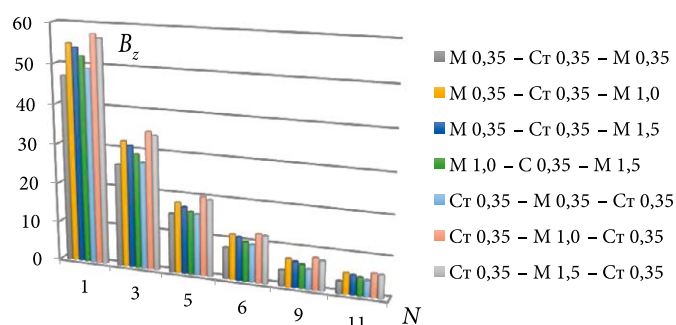


Рис. 10. Аксіальна складова індукції в середній частині зубців (за результатами математичного моделювання)

гідністю зростання похибки вимірювання. Одночасно шляхом порівняння результатів математичного моделювання та експериментальних даних, отриманих на реальному об'єкті (табл. 1), показано, що їхня розбіжність не перевищує 7%. Все це у сукупності робить достовірними результати комплексного дослідження за допомогою фізичного та математичного моделювання, які неможливо отримати на реальному об'єкті з різних причин об'єктивного та суб'єктивного характеру.

Отже, комплексне теоретично-експериментальне дослідження дозволяє констатувати, що запропонований пристрій [2] працює таким чином. Під час роботи електричної машини електромагнітне поле в торцевій зоні осердя статора складається з радіального поля, аксіальних потоків лобових частин обмоток статора і ротора та частини основного потоку, «витисненої» з повітряного проміжку й пазів статора. Внаслідок високої відбивної властивості структури екранування потоки розсіювання від обмоток статора та ротора не будуть повністю проникати як у зубцеву зону, так і область ярма осердя статора. Це зменшує втрати в крайніх пакетах від аксіального потоку. Конструкція крайнього пакета електричної машини з розміщенням структурного екрана є найбільш ефективною за рахунок багаторазового відбиття від його поверхні

вказаних потоків і затухання їх під час проходження крізь товщу металу. Відбиття потоків обумовлено невідповідністю характеристик металу, в якому розміщений екран, і матеріалу самого екрана. Чим більше ця невідповідність, тим більша відмінність опорів екрана та металу й, відповідно, інтенсивніший ефект екранування. Одночасно струми в самому екрані рівномірніше розподіляються та підвищуються у верхній його частині (зоні ярма), розвантажуючи зубцеву зону. Рівномірний розподіл струмів в екрані обумовлює рівномірність розподілу струмів у залізі статора, в якому розміщений екран. Оскільки мідні сегменти шихтуються в осьовому напрямку, то основний радіально спрямований потік наводить незначні вихрові струми. За наявності ступінчатої форми крайнього пакета досягається зменшення втрат у самому екрані від магнітного потоку, який «витискається» з пазів осердя статора та повітряного проміжку машини. Таким чином, максимальна температура стане нижчою та наближеною до температури основних пакетів, але за умови збільшення середньої температури у радіальному напрямку крайнього пакета. Вирівнювання температури осердя статора в аксіальному напрямку підвищує його механічну жорсткість, особливо в динамічних режимах і одночасно не допускає зменшення механічної жорсткості шихтованого магнітопроводу статора, оскільки виключається необхідність застосування інших спеціальних заходів для зниження нагріву крайніх пакетів, наприклад, виконання шліців і глибокого скосу (дозволяє зменшити розміру скосу) та, завдяки цьому, підвищується надійність конструкції осердя статора. Це надає нові можливості роботи ТГ у позастатних режимах, які вимагає сучасна енергосистема.

Висновки

На основі комплексного дослідження електромагнітних і теплових процесів шляхом математичного та фізичного моделювання доведена ефективність нового внутрішнього екранування крайніх пакетів осердя статора потужного генератора електропровідними сегментами зубцево-пазової конфігурації з розташуванням і розподіленням їх всередині пакета, що дозволяє у номінальному режимі роботи на 9,8 % знизити максимальну температуру та зменшити радіальну нерівномірність нагріву без зниження механічної жорсткості магнітопроводу статора. Для підвищення достовірності отриманих результатів математична та масштабна фізична моделі відповідають однаковій торцевій зоні серійного генератора.

Нове конструктивне рішення торцевої зони осердя статора електричної машини змінного струму, в основі якого застосування внутрішнього екранування крайніх пакетів осердя статора, спрямоване на підвищення ефективності екрана з високою технологічністю під час його виготовлення та, в результаті, безпеки, надійності та навантажувальної здатності потужних електричних машин, у тому числі ТГ енергоблоків АЕС, а також розширення їхніх функціональних можливостей.

Список використаної літератури

1. Развитие научных засад та розробка засобів підвищення показників безвідмовності потужних турбо- і гідрогенераторів (Звіт № ДР 0214U005180). — Київ : ІЕД НАН України, 2018. — 245 с.
2. Пат 111154 Україна МПК H02K 3/42. Осердя статора електричної машини змінного струму / О. І. Титко, К. О. Кобзар, Д. І. Хвалін. — № у 2015 1257; заявл. 21.12.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 21.
3. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов / И. М. Постников, Л. Я. Станиславский, Г. Г. Счастливый. — Киев : Наукова думка, 1971. — 360 с.
4. Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки / Г. Г. Счастливый, Г. М. Федоренко, В. И. Выговский. — Киев : Наукова думка, 1985. — 208 с.
5. Физическое моделирование электрических систем / В. А. Веников, А. В. Иванов-Смоленский. — Москва-Ленинград : Госэнергоиздат, 1958. — 359 с.
6. Хвалін Д. І. Екрани зубцево-пазової конструкції в потужних синхронних генераторах / Д. І. Хвалін // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: збірник наукових праць XV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (м. Кременчук, 11–12 квітня 2017 року). — Кременчук : КрНУ, 2017. — С. 165–166.
7. Титко О. І. Експериментальні дослідження ефективності екранів зубцево-пазової конструкції статорів турбогенераторів / О. І. Титко, М. Д. Мишастий, А. І. Воронін, Д. І. Хвалін // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. — 2017. — № 46. — С. 34–42.
8. Милых В. И. Численные расчеты магнитных полей в торцевой зоне турбогенераторов / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. — 2015. — № 5 (1114). — С. 3–11.

9. COMSOL Multiphysics modeling and simulation software. — Available at: www.comsol.com.
10. Кенцицький О. Г. Електромагнітне поле у торцевій зоні турбогенератора при зміні реактивного навантаження / О. Г. Кенцицький, Д. І. Хвалін // Технічна електродинаміка. — 2018. — № 1. — С. 62–68.
11. Кенцицький О. Г. Математическая модель совместного расчёта электромагнитного поля и нагревов торцевой зоны мощного турбогенератора / О. Г. Кенцицький, Д. И. Хвалин, К. А. Кобзарь // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. — 2019. — Т. 62. — № 1. — С. 37–46.
12. Турбогенераторы. Расчет и конструкция / В. В. Титов, Г. М. Хуторецкий, Г. А. Загородная [и др.]. — Ленинград : Энергия, 1967. — 896 с.
13. Проектирование турбогенераторов / Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1987. — 256 с.
14. Liu Y. Study of three-dimensional temperature field with changed structures of air-cooled turbo generator stator / Y. Liu, C. Li, G. Fu, S. Gao, Y. Tian, Y. Zhai // International Journal of Control and Automation. — 2015. — Vol. 8. — № 5. — P. 37–42.
15. Zhou G. 3D loss and heat analysis at the end region of 4-poles 1150 MW nuclear power turbine generator / G. Zhou, L. Han, Z. Fan, Y. Liao, S. Huang // Archives of electrical engineering. — 2014. — Vol. 63. — № 1. — P. 47–61.

ic flux density values obtained by means of mathematical simulation from the experimental ones allows drawing a conclusion about the reliability of result. It is shown that use of physical simulation permits investigate the appropriateness of electromagnetic field distribution without exact quantitative indices of parameters and can be applied to research the quality comparison under certain changes of model. When constructing a mathematical model, an approach was used with the help of a consecutive logic transition from a simple model of machine central part to more difficult one of end zone, using the previous results in next allows obtaining the temperature distribution in difficult areas. The heat calculation for rated load condition of turbogenerator type TGV-500 with the help of mathematical model as well as comparison of these results with experimental data for a real generator analogous type and power are made. The differences of calculated and experimental values not exceed 7%. All data obtained by means of both simulation and natural experiment are corresponded to the same turbogenerator that in total makes reliability results of mathematical simulation not obtained in a real object by various reasons of objective and subjective nature.

Keywords: powerful turbogenerator, end zone, shielding, scale physical model, mathematical model, electromagnetic field, temperature.

D. I. Khvalin

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 12, Lysogir'ska st., Kyiv, 03028, Ukraine*

A New Shielding Efficiency of Stator Core End Packets of a Powerful Turbogenerator

On the basis of complex research the electromagnetic and heat processes by means of mathematical and physical simulation, the efficiency for a new constructive solution of stator core end zone of powerful turbogenerator is proved. A design that allows maximum reducing temperature of the stator end packet is proposed. In order to increase reliability of experimental data obtained with the help of scale physical model, as well as testing of constructed mathematical model, using the latest one “adjusted” to physical model, the numerous experiments for studying effectiveness of a tooth-slot configuration shields were carried out. The small difference of magnet-

References

1. *Development of scientific bases and elaboration of means for increase the faultless indicators of powerful turbo- and hydrogenerators.* Report no. DR0214U005180. Kyiv: The Institute of Electrodynamics, NAS of Ukraine, 2018, 245 p. (in Ukr.)
2. Titko O. I., Kobzar K. O., Khvalin D. I. (2016). Pat. 111154 Ukraine. *Oserdia statora elektrychnoi mashyny zminnoho strumu* [The stator core of alternating current electrical machine]; declared 21.12.2015, published 10.11.2016. Report no. 21 (in Ukr.)
3. Postnikov I. M., Stanislavskiy L. Ya., Schastliviy G. G. (1971). *Electromagnetic and thermal processes in the end parts of powerful turbogenerators.* Kyiv: Naukova dumka, 360 p. (in Russ.)
4. Schastliviy G. G., Fedorenko G. M., Vygovskiy V. I. (1985). *Turbo- and hydrogenerators at the variable loading graphics.* Kyiv: Naukova dumka, 208 p. (in Russ.)
5. Venikov V. A., Ivanov-Smolenskiy A. V. (1958). *Physical simulation of electrical systems.* Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 359 p. (in Russ.)

6. Khvalin D. I. (2017). Ekrany zubtsevo-pazovoi konstruktсии v potuzhnykh synkhronnykh heneratorakh [The tooth-slot design shields in a powerful synchronous generators]. Proceedings of the 15th International conference of students and young researches "Electromechanical and Energy Systems, Modeling and Optimization Methods". (Kremenchuk, KrNU, April 11–12, 2017), pp. 165–166 (in Ukr.)
7. Titko O. I., Myshastyi N. D., Voronin A. I., Khvalin D. I. (2017). [Experimental studies of the effectiveness of tooth-slot design screens of turbogenerators stators]. Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy [The Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine], vol. 46, pp. 34–42 (in Ukr.)
8. Milykh V. I., Polyakova N. V. (2015). [Numerical calculations of the magnetic fields in a turbogenerators end region]. Vistnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu "HPI". Ser. Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion [Bulletin of NTU "Kharkiv Polytechnic Institute" Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion], vol. 1114, no. 5, pp. 3–11 (in Russ.)
9. Comsol Multiphysics Modeling and Simulation Software. Available at: www.comsol.com.
10. Kentsytskyi O. G., Khvalin D. I. (2018). [The turbogenerator end zone electromagnetic field under alterations of the reactive load]. Tekhnichna elektrodynamika [Technical Electrodynamics], vol. 1, pp. 62–68 (in Ukr.)
11. Kentsytskyi O. G., Khvalin D. I., Kobzar K. A. (2019). The mathematical model of coupling calculation the electromagnetic field and heats of end zone powerful turbogenerator. Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc., vol. 62, no 1, pp. 37–46 (in Russ.)
12. Titov V. V., Hutorecky G. M., Zagorodnaya G. A. et al. (1967). Turbogeneratory. Raschet i konstruktsiya [Turbogenerators. Calculation and Construction]. Leningrad: Energia Publ., 896 p. (in Russ.)
13. Hutoretsky G. M., Tokov M. I., Tolvinskaya Ye. V. (1987). Proektirovanie turbogeneratorov [Turbogenerators design]. Leningrad: Energoatomizdat, 256 p. (in Russ.)
14. Liu Y., Li C., Fu G., Gao S., Tian Y., Zhai Y. (2015). Study of three-dimensional temperature field with changed structures of air-cooled turbo generator stator. International Journal of Control and Automation, vol. 8, no. 5, pp. 37–42.
15. Zhou G., Han L., Fan Z., Liao Y., Huang S. (2014). 3D loss and heat analysis at the end region of 4-poles 1150 MW nuclear power turbine generator. Archives of electrical engineering, vol. 63, no. 1, pp. 47–61.

Надійшла 15.07.2020
Received 15.07.2020