

## ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

УДК 621.313.32

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ В ТОРЦЕВІЙ ЗОНІ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

**О.Г. Кенсицький**<sup>1</sup>, докт. техн. наук, **В.А. Крамарський**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, **К.О. Кобзар**<sup>3</sup>,  
канд. техн. наук, **Д.І. Хвалін**<sup>4\*</sup>, асп.

1, 2, 4 – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, м. Київ-57, 03680, Україна  
e-mail: [denis\\_h@bigmir.net](mailto:denis_h@bigmir.net),

3 – Державне підприємство «Завод «Електроважмаш»,  
пр. Московський, 299, м. Харків, 61089, Україна

*За допомогою польової математичної моделі досліджено розподіл електромагнітного поля і температури в торцевій частині статора турбогенератора в режимах навантаження у разі різного коефіцієнта потужності, у тому числі в режимі споживання реактивної потужності. Розрахунок проведено не тільки на поверхні, але й в усій торцевій зоні генератора, а також всередині крайніх і основних пакетів осердя. Наведено результати дослідження розподілу магнітної індукції в кінцевій частині машини. Визначено середні та максимальні значення температури для крайніх пакетів осердя статора, натискних пальців, електромагнітного екрана та натискної плити. Також показано перерозподіл максимальної магнітної індукції і температури у разі зміни режимів. Бібл. 9, рис. 6, табл. 2.*

**Ключові слова:** турбогенератор, торцева зона, електромагнітне поле, температура.

Актуальність, важливість і невирішеність проблеми підвищення надійності торцевої зони (ТЗ) статорів турбогенераторів (ТГ) підтверджуються багатьма публікаціями на цю тему та різноманітним технічним рішенням, що застосовуються провідними світовими виробниками устаткування. Розподіл електромагнітного поля та відповідно втрат і нагрівань елементів ТЗ у сукупності визначає надійність та ресурс електричної машини (ЕМ) в експлуатації. Нагріванням крайніх пакетів осердя статора обмежуються рівень споживання реактивної потужності ТГ у режимах недозбудження, а також граничне значення активного навантаження та припустима тривалість асинхронного режиму у разі втрати збудження. Існують численні дослідження електромагнітного поля ТЗ ЕМ на дво- і квазітривимірних моделях [1-5, 6], але на сьогодні мало досліджень, побудованих на комплексних математичних моделях спільного розрахунку електромагнітного поля та теплообмінних процесів у торцевій частині статора.

**Метою роботи** є визначення розподілу електромагнітного поля і температури в елементах ТЗ статора турбогенератора в експлуатаційних режимах у разі різних коефіцієнтів потужності. Дослідження виконано за допомогою квазітривимірної моделі, в якій у порівнянні з відомими на сьогодні [4, 5] математично точно враховано струми та геометрію лобових частин обмотки статора та, що найсуттєвіше, режим навантаження ТГ. При цьому розроблена модель відрізняється взаємопов'язаним тепловим розрахунком і відносною простотою програмної реалізації.

Розглянуті закономірності розподілу електромагнітного поля та нагрівань ТЗ серійного ТГ типу ТГВ-500 [7] з боку турбіни, де магнітне поле не спотворюється впливом струмів з'єднувальних шин і виводів (як це має місце з боку контактних кілець). Розрахунки виконано для трьох режимів номінального активного навантаження при різних коефіцієнтах потужності ( $\cos \varphi = 0,85$  – режим 1, номінальний;  $\cos \varphi = 1,0$  – режим 2 та  $\cos \varphi = -0,95$  – режим 3, недозбудження). При цьому враховуються фактична геометрія елементів ротора й статора, анізотропія та насичення заліза осердя статора.

Не зупиняючись на детальному описі алгоритму побудови моделі, наведемо основні принципи її реалізації [2].

Спочатку розглядається двовимірний 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 у загальному випадку має такий вигляд:

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

де  $\omega$  – кутова частота;  $\sigma$  – питома електропровідність;  $\nabla$  – оператор Гамільтона;  $\mu_0$  – проникність вакууму;  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність;  $J_{z\text{стоп}}^e$  – густина сторонніх струмів, що задана у перерізах обмоток статора та збудження;  $e_z$  – орт.

Оскільки осереддя статора набране з листів високолегованої холоднокатаної електротехнічної сталі завтовшки 0,5 мм, то вихровими струмами від радіально спрямованого потоку можна знехтувати. Отже, магнітне поле центральної частини ТГ у декартовій системі координат задовольняє рівнянню Пуассона:

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

Рівняння (2) доповнюється однорідною граничною умовою (ГУ) першого роду, що відображає згасання поля за межами розрахункової області на лінії зовнішньої поверхні ярма статора:

$$A_z|_G = 0. \quad (3)$$

В обмотці статора прийнята симетрична система фазних струмів

$$\begin{cases} i_A = I_m \sin(\omega t + \beta) \\ i_B = I_m \sin(\omega t + \beta - 120^\circ) \\ i_C = I_m \sin(\omega t + \beta + 120^\circ), \end{cases} \quad (4)$$

де  $I_m$  – їх амплітуда;  $\beta$  – кутове зміщення осі, вздовж якої діє магніторушійна сила (МРС) трифазної обмотки статора, і поздовжньої осі ротора  $d$ .

Кут  $\beta$  визначається за формулою

$$\beta = 90^\circ + \theta + \varphi, \quad (5)$$

де  $\theta$  – кут навантаження машини;  $\varphi$  – фазовий зсув між напругою та струмом статора.

Кут навантаження  $\theta$  можна знайти з виразу [7]

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{I_s \cos \varphi}{(U_s / x_d) \pm I_s \sin \varphi}, \quad (6)$$

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

Фазний струм, у свою чергу, визначається як

$$I_s = \frac{P_u}{m U_s \cos \varphi}. \quad (7)$$

Струм збудження підбирається за методикою [1]. З векторної діаграми ТГ (рис. 1) випливає, що електрорушійна сила (ЕРС) фази обмотки якоря від результуючого магнітного потоку дорівнює

$$\dot{E}_\delta = \dot{U}_s + \dot{I}_s (r_1 + jx_{\sigma a}). \quad (8)$$

На векторній діаграмі позначено:  $E_f$  – ЕРС, що наводиться полем обмотки збудження;  $\dot{I}_s r_1$  – падіння напруги на активному опорі;  $j\dot{I}_s x_d = j\dot{I}_s (x_{ad} + x_{\sigma a})$  – падіння напруги на синхронному індуктивному опорі;  $x_{ad}$  – індуктивний опір реакції якоря за поздовжньою віссю.

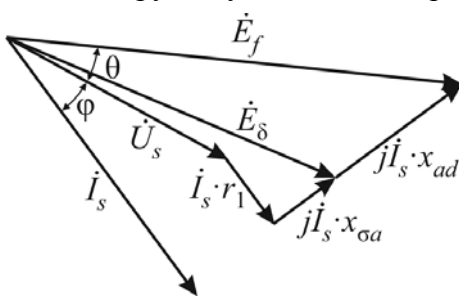


Рис. 1

Діюче значення ЕРС фази обмотки якоря розраховується як

$$E = \pi \sqrt{2} f_s \Psi_\Phi, \quad (9)$$

де  $\Psi_\Phi = \frac{2s_{nl}I_s}{S_{\text{Пл}}} \int_{S_q} A_z \cdot ds$  – магнітне потокозчеплення фази обмотки якоря, яке складається з

потокозчеплень  $q$  послідовно з'єднаних котушок і знаходиться способом інтегрування ВМП за сумарною площею поперечного перетину сторін усіх котушок фази  $S_q$ , що мають струми одного напрямку.

Для заданого режиму роботи, який визначається величинами струму статора  $I_s$  та коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi$ , послідовними наближеннями підбирається такий струм збудження  $i_f$ , при якому величини ЕРС, розраховані польовим методом за допомогою формули (9) та за рівнянням (8), співпадають у межах заданої похибки. Величини струмів у обмотках статора та ротора й кута  $\beta$  задаються відповідно до режиму навантаження генератора.

Вихідні дані, розраховані за (5)...(7) та відповідно до [1], наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Номер режиму	Статор							Ротор
	$I_{\text{сф}}$ , кА	$P$ , МВт	$Q$ , Мвар	$S$ , МВА	$\cos \varphi$	$\theta$ , °	$\beta$ , °	$I_f$ , А
1	17	500	310	588	0,85	36,7	158,5	5090
2	14,43	500	0	500	1,0	54	144	3598
3	15,19	500	-164	526	-0,95	68,3	140,1	3020

На рис. 2 показано миттєвий розподіл магнітної індукції (МІ) та ВМП у центральній зоні ТГ на момент часу  $t = 0,02$  с (що відповідає одному повному оберту ротора): рис. 2, а, б, в відповідають режимам 1, 2, 3. Відтінком кольору показано рівні МІ відповідно до наведеної шкали.

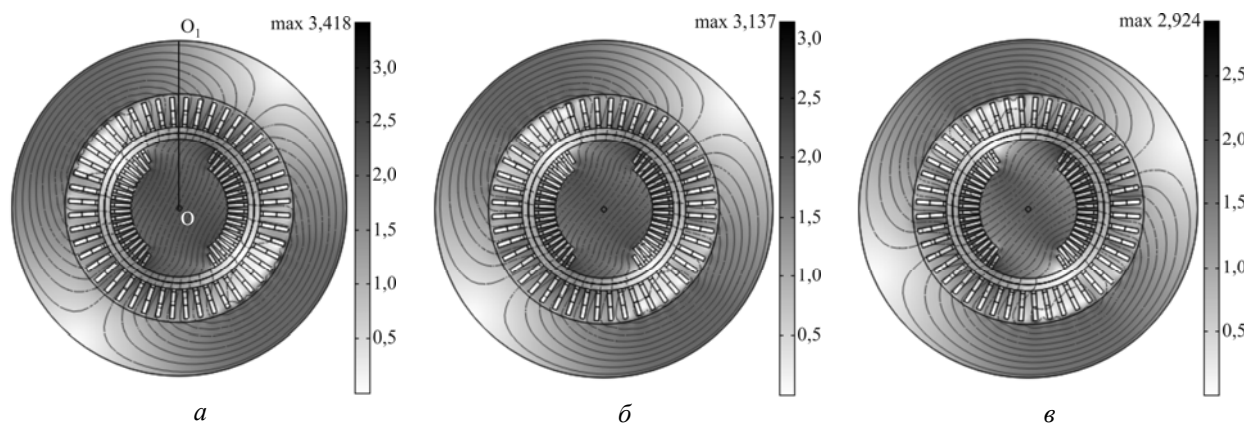


Рис. 2

Оскільки натискна плита, натискні пальці та мідний екран є областями протікання вихрових струмів, проводимо електромагнітний розрахунок у цих областях. Густина струму для кожного елемента розрахункової області дорівнює

$$J^e = -j\omega\sigma_e A^e + J_{\text{зстор}}^e. \quad (10)$$

Згідно з теорією електричних машин [7, 8] розрахуємо середні втрати на вихрові струми від радіального потоку у відповідних областях.

Маючи розподіл поля у центральній частині, переходимо до моделювання магнітного поля у поздовжньому перетині. З урахуванням симетрії вздовж осевого та радіального напрямків машини, розрахункова область ТЗ обрана у вигляді половини перерізу ротора вздовж його осі та перетину зубця осердя статора у тангенціальному напрямку (за колом) [6]. Цей перетин співпадає з прямокутною координатною площиною  $XU$  і є площиною симетрії ротора (на рис. 2 вона проходить по радіусу  $OO_1$ ).

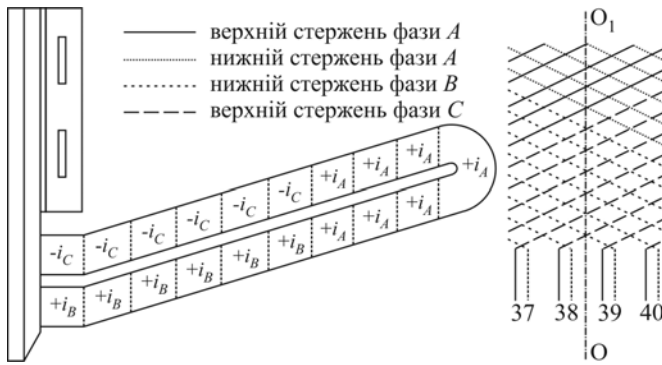


Рис. 3

хрові струми, наведені від аксіальних магнітних потоків лобових частин обмоток. Вплив режиму навантаження ТГ враховується завданням величин струмів в обмотках статора та ротора, кута  $\beta$  і ГУ.

Одночасно задається розподіл магнітної проникності за радіусом  $OO_1 - \mu|_{OO_1}$ , яка змінюється відповідно до насичення відрізків магнітопроводу основним магнітним потоком.

На рис. 3 показано напрямки миттєвих фазних струмів  $i_A, i_B, i_C$  лобової частини обмотки статора для режиму навантаження та частину схеми обмотки, вздовж якої проходить переріз  $OO_1$  (для наочності фази показані різними лініями).

Струми лобової частини обмотки статора (рис. 3) менші за прийняті струми системи (4) у  $\sqrt{2}$  рази, оскільки прийнято, що лобові частини відігнуті у середньому на  $45^\circ$ . Тобто вони є діючими значеннями фазних струмів з відповідним кутом  $\beta$ .

У результаті отримані розподіли магнітного поля в ТЗ ТГ у режимах навантаження при різних значеннях  $\cos \phi$  (рис. 4 а, б, в відповідають режимам 1, 2, 3 табл. 1).

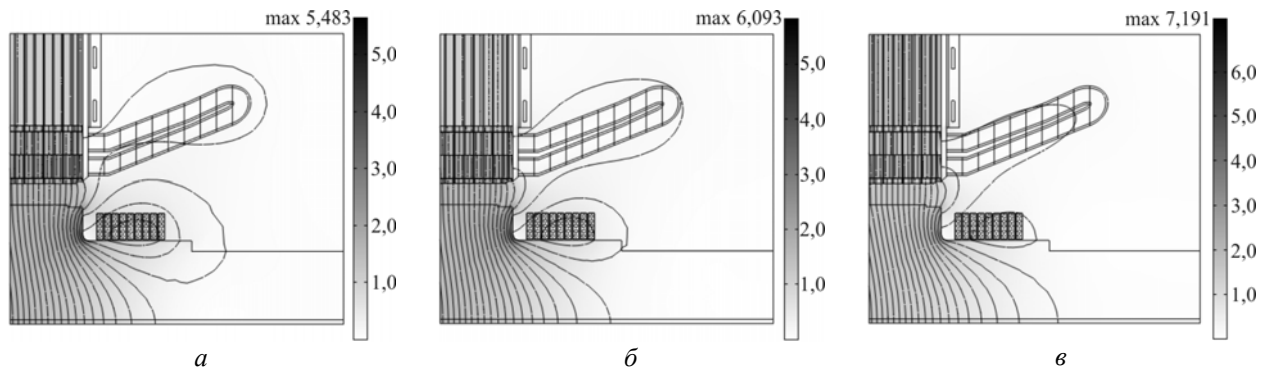


Рис. 4

Приймаючи отримані результати розрахунків електромагнітного поля як джерело теплових втрат, моделюємо теплообмінні процеси у ТЗ ТГ. Рівняння для двовимірного температурного поля має вигляд

$$\nabla(-k\nabla T) = Q, \quad (11)$$

де  $k$  – теплопровідність;  $T$  – температура;  $Q$  – питомі об'ємні теплові втрати.

Турбогенератор, що розглядається, має радіальну систему вентиляції. Холодний водень, температура якого відповідно до Інструкції з експлуатації прийнята  $40^\circ\text{C}$ , подається у радіальні канали між пакетами осердя та проміжки між натискними пальцями і плитою з боку зазору з подальшим рухом у бік спинки осердя. Коефіцієнти тепловіддачі теплообмінних поверхонь елементів конструкції та вентиляційних каналів задані відповідно до результатів попередніх досліджень [7, 9].

У результаті отримуємо розподіл температур у ТЗ ТГ: рис. 5 а, б, в відповідають режимам 1, 2, 3. На рис. 6 а, б, в відповідно для наочності показано розподіл нагрівань двох крайніх пакетів, натискного пальця, мідного екрана та натискної плити.

Так, за допомогою розробленої моделі були отримані розподіл і параметри магнітного поля та нагрівань для окремих елементів і вузлів ТЗ у різних режимах навантаження ТГ.

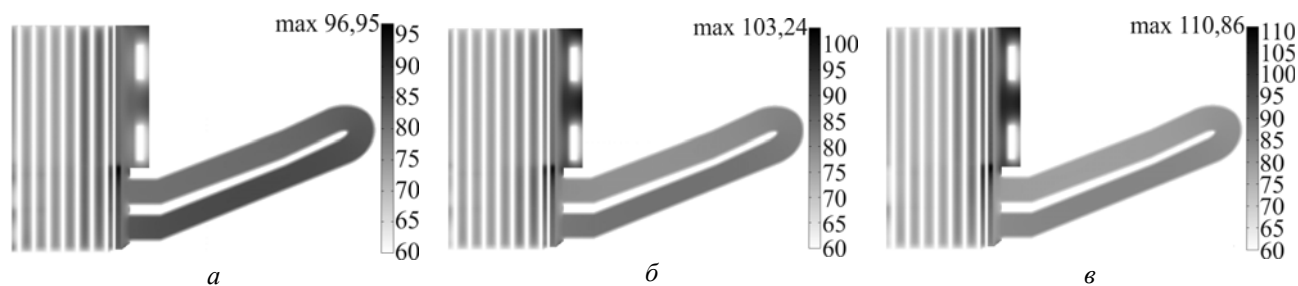


Рис. 5

За результатами досліджень можна зазначити таке.

Найбільше зростання індукції в зубцях у разі переходу від режиму 1 до 3 спостерігається у коронках зубців (на 30 %), дещо менше – у середній частині (на 20 %). В ярмі біля дна паза індукція збільшується на 70 %.

У разі номінального активного навантаження та переходу від режиму 1 до 2 поле в усіх елементах ТЗ у середньому збільшується на 10 %. 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.

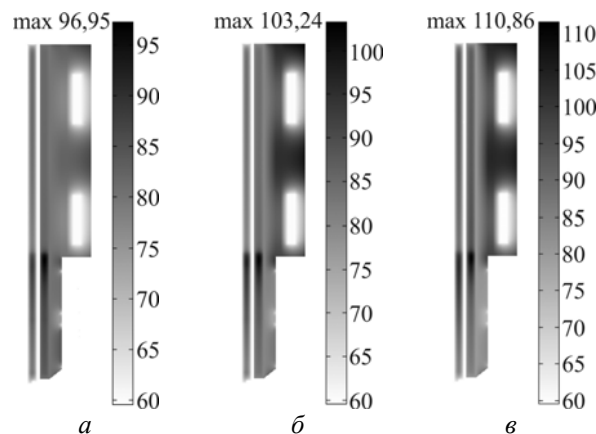


Рис. 6

Результуюче аксіальне поле в ТЗ є геометричною сумою всіх складових, що обумовлює його залежність від режиму навантаження генератора (в тому числі за  $\cos \phi$ ). У режимах перебудження аксіальна складова поля від струму лобових частин обмотки статора має знак, протилежний знаку поля від результуючої МРС, і поле у зубцевій зоні послаблюється. У разі недозбудження відповідні складові співпадають і поле підсумовується, підвищуються втрати й нагрівання зубцевої зони крайніх пакетів [8]. До того ж причиною локальної концентрації аксіальної складової поля в області біля дна паза є ефект екранування поля натискною плитою (рис. 4).

В області «натискний палець – крайній пакет» з переходом у режим недозбудження індукція зростає майже на 35 %. У другому та третьому пакетах осердя це зростання помітно менше, а у шостому пакеті взагалі відсутнє. Вздовж осі генератора аксіальна складова МІ змінюється за експонентою з максимумом у першому пакеті та згасанням з віддаленням від торця осердя. Підвищення цієї складової МІ в перших двох пакетах обумовлене додаванням магнітного потоку, що обтікає натискну плиту. Найбільші збільшення індукції спостерігаються у коронках зубців (до 2,4 Тл) та в ярмі поблизу області дна паза (до 2,0 Тл). У спинці осердя індукція не перевищує 1,2 Тл, що пояснюється екрануючим впливом натискної плити. Характер розподілу магнітного поля в зоні сходинок крайніх пакетів осердя статора у разі різного навантаження ТГ показує, що у режимі 3 найбільше значення аксіальної складової індукції (1,15...1,2 Тл) спостерігається у торця сходинок першого пакета.

Співвідношення абсолютних максимальних та середніх температур ( $^{\circ}\text{C}$ ) елементів кінцевої частини осердя ТГ для різних режимів навантаження зведені до табл. 2.

У номінальному режимі навантаження максимальна температура ( $97,3^{\circ}\text{C}$ ) спостерігається в зубцевій зоні крайнього пакета в області біля дна паза.

Розподіл нагрівань натискної плити обумовлений наявністю каналів з охолоджуючою водою. Однак во-

Таблиця 2

Елементи кінцевої зони	Режим		
	1	2	3
Крайній пакет осердя статора	97/82	103/85	111/91
Натискні пальці	85/75	92/84	99/87
Електромагнітний екран	86/83	93/89	104/99
Натискна плита	91/79	100/87	108/95

ни ефективні лише в локальній близькості і на нагрівання мідного екрана суттєво не впливають. Натискні пальці знаходяться у найбільш несприятливих умовах, оскільки частково розміщені у зубцевій зоні, де магнітне поле особливо інтенсивне. Нагрівання натискних пальців характеризується значною нерівномірністю вздовж довжини: від 25...30 °С у зоні екрана до 35...45 °С в області зубців. Поверхня пальців, яка повернута до плити, має температуру на 10...15 °С вищу, ніж поверхня, що повернута до осердя. З боку осердя температура поверхні пальців уздовж всієї 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 внаслідок екрануючої дії натискної плити та мідного екрана температура різко зменшується. Температура також зменшується у разі наближення до зазору. Аксиальна складова МІ в зоні коронки зубців сягає 0,7...0,75 Тл (торець сходинки першого пакета), однак ця зона інтенсивно охолоджується газом, що циркулює в зазорі. Розподіл температури в пакетах, віддалених від торця осердя, досить рівномірний уздовж довжини осердя та у радіальному напрямку.

У разі переходу від режиму 1 до 2 значення температури у зубцевій зоні підвищуються в середньому на 7...10 °С, а в області ярма залишаються майже незмінними.

Нагрівання області «натискна плита – екран – натискний палець – крайній пакет» різко підвищується при переході в емнісний квадрант навантаження (рис. 6). Можна зазначити, що у другому пакеті осердя температура зі зміною  $\cos \phi$  підвищується незначною мірою, а у шостому пакеті зовсім не залежить від  $\cos \phi$ , що обумовлено відповідним розподілом МІ. Характерна різка нерівномірність розподілу втрат за висотою пакета. У разі збільшення коефіцієнта потужності (у разі постійного активного навантаження) вплив струму обмотки збудження на рівень втрат у крайньому пакеті зменшується, однак при цьому різко підвищуються потоки розсіювання лобових частин обмотки статора. У результаті це є ще однією причиною зміщення максимуму нагрівання в область біля дна пазу. Розрахунки показують, що рівень нагрівання підпазової зони у режимі 3 на 20...25 °С вищий, ніж коронки. Максимальна температура зубцевої зони в області біля дна паза крайнього пакета осердя становить 111 °С, натискної плити – 108 °С, натискного пальця – 99 °С, що відповідає результатам натурних випробувань ТГ [7]. Аксиальна складова МІ в зоні коронки зубців сягає 1,15...1,2 Тл (торець сходинки першого пакета), однак ця зона інтенсивно охолоджується газом, що циркулює в зазорі, і температура тут невисока.

З наведеного можна зробити висновок, що нагрівання елементів ТЗ ТГ є нерівномірним. Це обумовлено аналогічним розподілом втрат та наявною схемою охолодження. Максимальні значення температури в окремих елементах майже втричі більші середнього.

**Висновки.** 1. Запропонована математична модель з задовільною для вирішення практичних задач достовірністю дає змогу розраховувати розподіл електромагнітного поля і температури в основних елементах конструкції торцевої частини статора ТГ у різних режимах навантаження. Що робить можливим на стадії проектування потужного обладнання оцінювати ефективність тих або інших варіантів конструктивного виконання як окремих вузлів, так і машини в цілому.

2. Розроблена модель на відміну від тих, що на сьогодні відомі та широко використовуються, відрізняється детальним урахуванням фізико-технічних факторів у разі відносної простоти програмної реалізації.

3. Результати моделювання відповідають загальному уявленню щодо перебігу електромагнітних і теплових процесів у ТЗ потужного ТГ.

1. Васьковський Ю. М. Польовий аналіз електричних машин. Київ: НТУУ «КПІ», 2007. 191 с.
2. Кенсицький О.Г., Хвалін Д.І. Електромагнітне поле у торцевій зоні турбогенератора при зміні реактивного навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2018. №1. С. 62–68.
3. Кенсицький О.Г., Хвалін Д.І. Квазітривимірна модель електромагнітного поля у торцевій зоні турбогенератора. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 48. С. 59–64.
4. Мильх В.И., Высочин А.И. Принципы расчета магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора в различных режимах его работы. *Електротехніка і електромеханіка*. 2010. № 3. С. 17–22.
5. Мильх В.И., Полякова Н.В. Численные расчёты магнитных полей в торцевой зоне турбогенераторов. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2015. № 5 (1114). С. 3–11.

6. 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.
7. Постников И.М., Станиславский Л.Я., Счастливый Г.Г. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов. Киев: Наукова думка, 1971. 360 с.
8. Титов В. В., Хуторецкий Г. М., Загородная Г.А. Турбогенераторы. Ленинград: Энергия, 1967. 895 с.
9. Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Выговский В.И. Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки. Киев: Наукова думка, 1985. 208 с.

УДК 621.313.32

**О.Г. Кенсичкий<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **В.А. Крамарский<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **К.А. Кобзарь<sup>3</sup>**, канд. техн. наук, **Д.И. Хвалин<sup>4</sup>**, асп.

1, 2, 4 – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, г. Киев-57, 03680, Украина

3 – Государственное предприятие «Завод «Электротяжмаш»,

пр. Московский, 299, м. Харьков, 61089, Украина

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ В ТОРЦЕВОЙ ЗОНЕ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА**

*С помощью разработанной полевой математической модели исследовано распределение электромагнитного поля и температуры в торцевой части статора турбогенератора в режимах нагрузки при различном коэффициенте мощности, в том числе в режиме потребления реактивной мощности. Расчет проведен не только на поверхности, но и во всей торцевой зоне генератора, а также внутри крайних и основных пакетов сердечника. Приведены результаты исследования распределения магнитной индукции в концевой части машины. Определены средние и максимальные значения температуры для крайних пакетов сердечника статора, нажимных пальцев, электромагнитного экрана и нажимной плиты. Также показано как происходит перераспределение максимальной магнитной индукции и температуры при изменении режимов.* Библи. 9, рис. 6, табл. 2.

**Ключевые слова:** турбогенератор, торцевая зона, электромагнитное поле, температура.

**O.G. Kensytskiy, V.A. Kramarskiy, K.O. Kobzar, D.I. Hvalin**

1, 2, 4 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

3 – State enterprise «Plant «Electrowazhmash»,

pr. Moskovskiy, 299, Kharkiv, 61089, Ukraine

#### **STUDY OF DISTRIBUTION THE ELECTROMAGNETIC FIELD AND TEMPERATURE IN A STATOR CORE END ZONE OF TURBOGENERATOR**

*With help a field mathematical model the distribution of electromagnetic field and temperature in a stator core end zone of turbogenerator under load conditions at a different power factor including the conditions of reactive power consumption is investigated. The calculation is carried out not only on the surface, but also in the whole generator end-zone, as well as inside the end and main core packets. Study results of distribution the magnetic induction in a machine end part are given. The average and maximum temperatures for a stator core end packets, press fingers, electromagnetic screen and press plate are determined. Redistribution of maximum magnetic induction and temperature for changes the conditions also was shown.* References 9, figures 6, tables 2.

**Key words:** turbogenerator, end zone, electromagnetic field, temperature.

1. Vaskovskiy Yu. M. The field analysis of electric machine. Kyiv: NTUU «KPI», 2007. 191 p. (Ukr)
2. Kensytskiy O.G., Hvalin D.I. The end zone turbogenerator electromagnetic field for changes the reactive load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. № 1. P. 62–68. (Ukr)
3. Kensytskiy O.G., Hvalin D.I. A quasi-three-dimensional model of electromagnetic field in the turbogenerator end zone. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2017. Vyp. 48. P. 59–64. (Ukr)
4. Milykh V. I., Vysochyn A. I. Principles of calculation the magnetic field in the end area of a turbogenerator in different operating conditions. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. 2010. № 3. P. 17–22. (Rus)
5. Milykh V. I., Polyakova N. V. Numerical calculations of the magnetic fields in a turbogenerators end region. *Vistnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «HPI»*. 2015. №5 (1114). С. 3–11. (Rus)
6. 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.
7. Postnikov I. M., Stanislavskiy L. Ya., Schastliviy G. G. Electromagnetic and thermal processes in the end parts of powerful turbogenerators. Kiev: Naukova dumka, 1971. 360 p. (Rus)
8. Titov V.V., Khutoretskiy G.M., Zagorodnaya G.A. Turbogenerators. Leningrad: Energiia, 1967. 895 p. (Rus)
9. Schastliviy G. G., Fedorenko G.M., Vygovskiy V.I. Turbo- and hydrogenerators at the variable loading graphics. Kiev: Naukova dumka, 1985. 208 p. (Rus)

Надійшла 02.07.2018

Received 02.07.2018