

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46>

УДК 621.313.322

## Математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и нагревов торцевой зоны мощного турбогенератора

О. Г. Кенсницкий<sup>1)</sup>, Д. И. Хвалин<sup>1)</sup>, К. А. Кобзарь<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт электродинамики Национальной академии наук Украины (Киев, Украина),

<sup>2)</sup>Государственное предприятие завод «Электротряжмаш» (Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2019  
Belarusian National Technical University, 2019

**Реферат.** Разработана квазитрехмерная полевая математическая модель электромагнитного поля и теплообменных процессов в торцевой зоне мощного турбогенератора. Модель занимает промежуточное положение между дву- и трехмерными решениями и построена на численных расчетах в поперечном и продольном сечениях турбогенератора, взаимосвязанных при помощи комплекса граничных условий. На первом этапе рассматривается двумерная полевая модель электромагнитного поля поперечного сечения центральной зоны турбогенератора. Затем с учетом распределения поля в центральной части моделируется магнитное поле в продольном сечении. Учитывая симметрию машины вдоль осевого и радиального направлений, расчетная область торцевой зоны рассматривается в виде половины сечения ротора вдоль его оси и сечения зубца сердечника статора в тангенциальном направлении (по окружности). Принимая полученное в режиме нагрузки машины распределение электромагнитных параметров как исходные данные, определены тепловые потери в элементах и узлах торцевой зоны. В результате решения совместной задачи расчета электромагнитного поля и теплообменных процессов получено распределение нагревов не только на поверхности, но и внутри конструктивных деталей концевой зоны. В частности, установлено, что максимальная температура 97,3 °С имеет место в зубцовой зоне крайнего пакета сердечника статора. Это объясняется совместным воздействием основного радиального поля, аксиального потока рассеяния лобовых частей обмотки статора и ротора, а также «выпучиванием» части основного потока из воздушного зазора. Кроме того, эффект экранирования нажимной плиты является причиной локальной концентрации поля в зубцовой зоне крайнего пакета. Представленная модель позволяет уже на стадии проектирования оценить эффективность конструктивных решений по формированию торцевой зоны статора турбогенератора для разных режимов нагрузки машины, в том числе для режимов потребления реактивной мощности.

**Ключевые слова:** турбогенератор, математическая модель, сердечник статора, нажимная плита, торцевая зона, ротор, лобовая часть обмотки, поток рассеяния, электромагнитное поле, потери, температура

**Для цитирования:** Кенсницкий, О. Г. Математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и нагревов торцевой зоны мощного турбогенератора / О. Г. Кенсницкий, Д. И. Хвалин, К. А. Кобзарь // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 1. С. 37–46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46>

---

### Адрес для переписки

Кенсницкий Олег Георгиевич  
Институт электродинамики  
Национальной академии наук Украины  
просп. Перемоги, 56  
03057, г. Киев, Украина  
Тел.: +38 044 456-01-51  
ied1@ied.org.ua

### Address for correspondence

Kensytskyi Oleh H.  
Institute of Electrodynamics  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
56 Peremogy Ave.,  
03057, Kyiv, Ukraine  
Tel.: +38 044 456-01-51  
ied1@ied.org.ua

---

## The Mathematical Model of Coupling Calculation the Electromagnetic Field and Heats of End Zone Powerful Turbogenerator

O. H. Kensitytskyi<sup>1)</sup>, D. I. Hvalin<sup>1)</sup>, K. O. Kobzar<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),

<sup>2)</sup>State Enterprise Plant Electrotyazhmash (Kharkov, Ukraine)

**Abstract.** A quasi-three-dimensional field mathematical model of the electromagnetic field and heat transfer processes in end zone of a powerful turbogenerator has been developed. A model is the intermediate version between two-dimensional and three-dimensional solutions and is based on the numeral calculations in transversal and longitudinal sections of turbogenerator, interconnected by a complex of boundary conditions. On the first stage, a two-dimensional field model of the electromagnetic field in transversal section of central zone of a turbogenerator is considered. Then, taking into account the field distribution in central part, the magnetic field in longitudinal section is simulated. In response to the symmetry of the machine along axial and radial directions, the calculation area of end zone is considered as a half of the rotor section along its axis and the section of the stator core tooth in the tangential direction (circumferentially). Having taken the distribution of electromagnetic parameters obtained in the load mode of the machine as the initial data, the thermal losses in the elements and nodes of the end zone are determined. As a result of solving the joint problem of calculating the electromagnetic field and heat exchange processes, the distribution of heating has been obtained not only on the surface, but also inside the structural parts of the end zone. In particular, it has been found that the maximum temperature of 97.3 °C takes place in the tooth area of the end package of the stator core. This is explained by the combined effect of the main radial field, the axial leakage flux of the frontal portions of the stator and rotor windings, as well as by the “buckling” of a portion of the main flux out of the air gap. In addition, the pressure plate shielding effect is the cause of local field concentration in the toothed zone of the end package. The presented model makes it possible as early as at the design stage to evaluate the efficiency of design solutions for the formation of the end zone of the turbogenerator stator for different load modes of the machine, including the modes of consumption of reactive power.

**Keywords:** turbogenerator, mathematical model, stator core, press plate, end zone, rotor, windings frontal portion, leakage flux, electromagnetic field, losses, temperature

**For citation:** Kensitytskyi O. H., Hvalin D. I., Kobzar K. O. (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.* 62 (1), 37–46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46> (in Russian)

### Введение

С повышением линейной нагрузки в торцевой зоне (ТЗ) мощного турбогенератора (ТГ) возрастают потери. При неудачном ее конструктивном исполнении и недостаточном охлаждении локальные (местные) нагревы отдельных элементов и узлов могут превышать предельно допустимые значения (например, 120 °C для стали пакетов сердечника статора).

Опубликовано немало работ, направленных на изучение электромагнитного поля в ТЗ ТГ [1–5] с помощью двумерных и квазитрехмерных математических моделей. Но все они не дают представления об уровне температур конструктивных элементов ТЗ, ведь именно нагрев является ограничивающим фактором уровней как активной, так и реактивной

нагрузки, особенно в режимах эксплуатации ТГ с потреблением реактивной мощности. В таких условиях особую актуальность приобретает создание математических моделей совместного расчета электромагнитного поля и теплообменных процессов в ТЗ ТГ в разных режимах нагрузки, которые могут быть эффективным инструментом оценки новых конструктивных и технологических решений.

Авторами предложена квазитрехмерная математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и теплообменных процессов в ТЗ мощного ТГ. Квазитрехмерная модель занимает промежуточное положение между дву- и трехмерными решениями и построена на численных расчетах в поперечном и продольном сечениях ТГ, взаимосвязанных с помощью комплекса граничных условий [3, 4]. Математически строго учитывается режим работы ТГ путем использования системы реально распределенных токов лобовых частей обмоток статора и ротора. Магнитное поле описано не только на поверхности деталей и узлов, но и во всей ТЗ, включая крайние и основные пакеты сердечника статора. Учтены фактическая геометрия ротора и статора, анизотропия физических свойств стали и реальное насыщение сердечника статора.

### Основная часть

В качестве объекта исследования рассмотрен серийный турбогенератор типа ТГВ-500, параметры которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры турбогенератора типа ТГВ-500  
Main parameters of a turbogenerator of TGV-500 type

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Номинальный режим нагрузки: – активная мощность $P_n$ , МВт – ток статора $I_{сн}$ , кА – напряжение обмотки статора $U_{сн}$ , кВ – ток возбуждения $i_{вн}$ , А – коэффициент мощности $\cos\varphi$	500	Количество параллельных ветвей обмотки: – статора $a_s$ – ротора $a_r$	2
			1
	5120	Число последовательных витков обмотки: – статора $w_1$ – ротора $w_2$	8
			48
0,85			
Частота $f$ , Гц	50	Число активных проводников в пазу: – статора $s_{n1}$ – ротора $s_{n2}$	2
Количество пар полюсов	1		5/3
Диаметр расточки статора $D_1$ , м	1,32	Значение сопротивления, в. о.: – активного обмотки статора $r_1$ – главного индуктивного $x_d$ – рассеивания обмотки статора $x_{ca}$	0,001364
Диаметр ротора $D_2$ , м	1,12		1,91
Длина сердечника статора $l_s$ , м	6,2		0,218
Воздушный зазор между статором и ротором, мм	100		

Турбогенератор ТГВ-500 в аксиальном направлении состоит из трех частей – центральной и двух концевых. Сердечник статора, шихтованный из высоколегированной холоднокатаной электротехнической стали тол-

щиной 0,5 мм марки E330, набран из 138 пакетов. Два крайних пакета, толщиной 20 мм каждый, разделены пятимиллиметровыми радиальными вентиляционными каналами. Пакеты, начиная с третьего, имеют толщину 40 мм. Зубцы двух крайних пакетов выполнены укороченными. На первой ступени укорочение зубцов составляет 24 мм, на второй пакет выполнен в виде двух ступенек укорочения: первая – на 16 мм, вторая – на 8 мм. В 48 пазах статора размещена трехфазная двуслойная стержневая обмотка. Нажимные фланцы изготовлены из поковок немагнитной стали в виде плоских колец. Под нажимными фланцами установлены медные экраны и немагнитные пальцы, а в самом фланце для охлаждения предусмотрены два кольцевых канала, по которым циркулирует вода.

Модель отвечает реальным размерам ТГ в целом, а также его отдельных узлов. Для каждого узла заданы физические параметры материала, из которого он изготовлен. Для ферромагнетиков построены соответствующие кривые намагничивания.

Ниже приведены результаты расчетов для ТЗ генератора со стороны турбины для режима номинальной нагрузки при номинальной скорости обращения ротора (3000 об/мин). Сторона турбины выбрана потому, что здесь магнитное поле не искажается влиянием токов соединительных шин и выводов (как это имеет место на стороне контактных колец) [6].

На первом этапе расчета рассматривается двумерная полевая модель электромагнитного поля поперечного сечения центральной зоны ТГ. Уравнение для двумерного магнитного поля относительно аксиальной составляющей векторного магнитного потенциала (ВМП)  $A_z$  в расчетной области имеет вид

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

где  $\omega$  – угловая частота;  $\sigma$  – удельная электропроводность;  $\nabla$  – оператор Гамильтона;  $\mu_0$  – проницаемость вакуума;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;  $J_{\text{стор}}^e$  – плотность сторонних токов, заданная в сечениях обмоток статора и возбуждения;  $e_z$  – орт.

Уравнение (1) дополняется однородным граничным условием первого рода  $A_z = 0$ , отображающим затухание поля за границами расчетной области.

В обмотке статора принята симметричная система фазных токов:

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

где  $I_m$  – амплитуда фазных токов;  $\beta$  – угловое смещение оси, вдоль которой действует магнитодвижущая сила (МДС) трехфазной обмотки статора, по отношению к продольной оси ротора  $d$ .

Угол  $\beta$  определяется как [1]

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

где  $\theta$  – угол нагрузки машины;  $\varphi$  – то же фазного смещения между напряжением и током статора.

В соответствии с [6] угол нагрузки  $\theta$  можно определить из выражения

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

где «+» – соответствует режиму перевозбуждения турбогенератора, «-» – режиму недозабуждения.

В результате расчетов получены следующие результаты.

Мгновенное распределение магнитной индукции и ВМП в определенный момент времени в центральной зоне (в данном случае  $t = 0,02$  с, что соответствует одному полному обороту ротора) представлено на рис. 1. Оттенками цвета показаны уровни магнитной индукции в соответствии с приведенной шкалой. Распределение магнитной проницаемости статора и ротора ТГ представлено на рис. 2 (максимальное значение составляет 8542 в ярме статора).

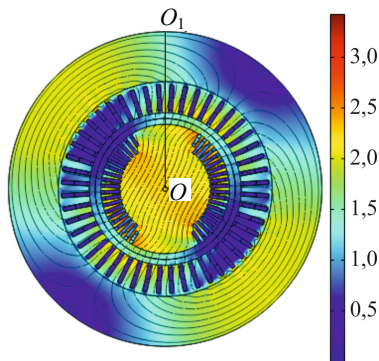


Рис. 1. Распределение электромагнитного поля в центральной зоне статора и ротора в режиме номинальной нагрузки

Fig. 1. Electromagnetic field distribution in the central zone of a stator and a rotor in the mode of rated load

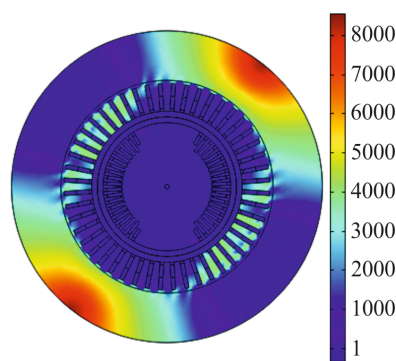


Рис. 2. Распределение магнитной проницаемости в центральной зоне статора и ротора в режиме номинальной нагрузки

Fig. 2. Magnetic permeability distribution in the central zone of a stator and a rotor in the mode of rated load

Максимальное значение магнитной индукции в сердечнике статора при номинальной нагрузке наблюдается в коронках зубцов и составляет 3,4 Тл (рис. 3), распределение электромагнитного поля симметрично вдоль линии результирующей МДС (рис. 1). Распределение магнитной индукции в нажимных пальцах приведено на рис. 4.

Однако под действием электромагнитного поля статора направление линии результирующей несколько отклоняется. Величины магнитной индукции в нажимных пальцах меньше, и максимальное значение составляет 0,53 Тл.

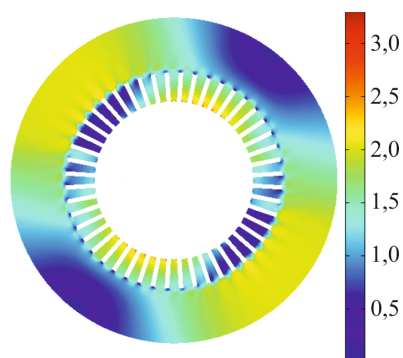


Рис. 3. Распределение магнитной индукции в сердечнике статора в режиме номинальной нагрузки

Fig. 3. Magnetic flux density distribution in the stator core in the mode of rated load

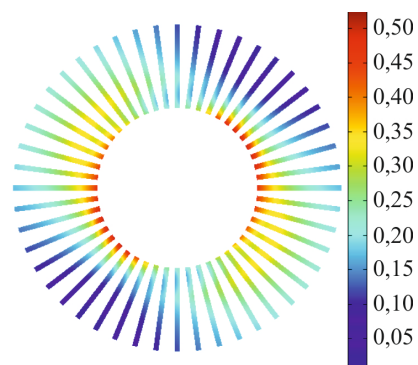


Рис. 4. Распределение магнитной индукции в нажимных пальцах в режиме номинальной нагрузки

Fig. 4. Magnetic flux density distribution in the press pins in the mode of rated load

Нажимная плита и медный экран выполнены из немагнитного материала; плита установлена перед экраном, поэтому распределение электромагнитного поля в них совпадает: максимальные значения магнитной индукции составляют 0,36 и 0,33 Тл соответственно (рис. 5, 6). Поскольку медный экран находится за плитой, аксиальная составляющая магнитного потока в нем меньше.

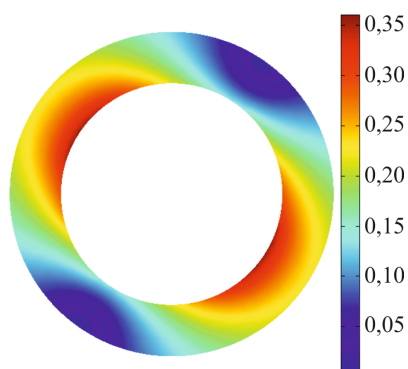


Рис. 5. Распределение магнитной индукции в нажимной плите в режиме номинальной нагрузки

Fig. 5. Magnetic flux density distribution in the press plate in the mode of rated load

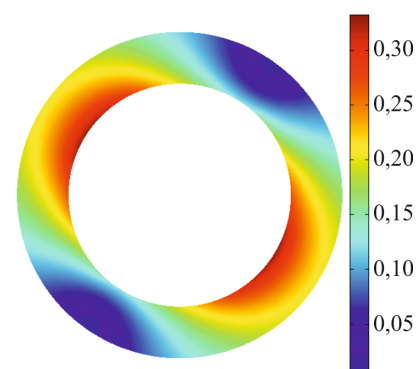


Рис. 6. Распределение магнитной индукции в медном экране в режиме номинальной нагрузки

Fig. 6. Magnetic flux density distribution in the copper shield in the mode of rated load

Имея распределение поля в центральной части, переходим ко второму этапу расчета – моделированию магнитного поля в продольном сечении ТГ. С учетом симметрии вдоль осевого и радиального направлений расчетная область ТЗ представлена в виде половины сечения ротора вдоль его оси и сечения зубца сердечника статора в тангенциальном направлении (по окружности) [5]. Это сечение совпадает с цилиндрической координат-

ной плоскостью  $rz$  и является плоскостью симметрии ротора (на рис. 1 она проходит по радиусу  $OO_1$ ).

Уравнение двумерного поля в цилиндрических координатах для составляющей ВМП  $A_z$ , являющейся тангенциальной составляющей в расчетной области, имеет вид (1). Необходимая структура силовых линий магнитного поля формируется с помощью комплекса граничных условий для ВМП, справедливых для внешних границ области [1].

Направления мгновенных фазных токов  $i_A$ ,  $i_B$  и  $i_C$  лобовой части обмотки статора для режима нагрузки и часть схемы этой обмотки, вдоль которой проходит сечение  $OO_1$  (для большей наглядности фазы показаны разными линиями), представлены на рис. 7.

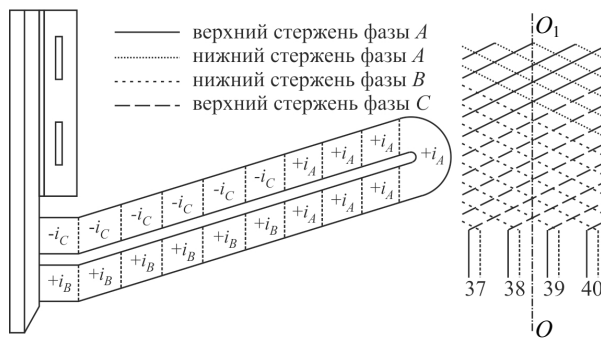


Рис. 7. Мгновенные фазные токи лобовой части обмотки статора и часть обмотки вдоль сечения

Fig. 7. Instantaneous phase currents of stator winding frontal portion and a portion of winding along a section

Поскольку продольное сечение ТГ проходит по продольной оси ротора  $d$  (рис. 1), значение плотности тока лобовой части обмотки ротора соответствует заданному току возбуждения (табл. 1). В результате получаем

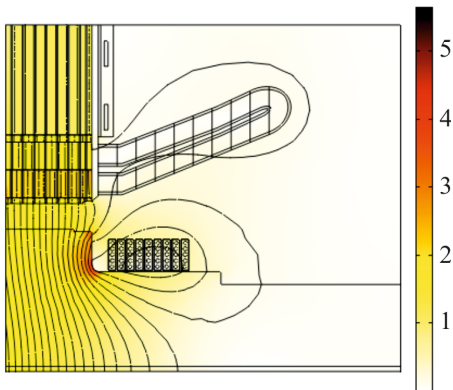


Рис. 8. Распределение электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора при номинальной нагрузке

Fig. 8. Distribution of electromagnetic field in the end zone of a turbogenerator in the mode of rated load

распределение магнитного поля в ТЗ ТГ типа ТГВ-500 при номинальной нагрузке (рис. 8).

Имея распределение электромагнитного поля в областях протекания вихревого тока, можно получить значение ВМП  $A^e$  для каждого элемента расчетной области. Плотность вихревого тока

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

Согласно [6, 7] рассчитаем средние потери на вихревые токи в соответствующих областях.

Получив распределение потерь по элементам ТЗ, переходим к третьему этапу исследования – моделированию теплообменных процессов в концевой зоне ТГ.

Уравнение процесса теплообмена в двумерной постановке имеет вид

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

где  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $k$  – теплофизические характеристики материалов: плотность, теплоемкость и теплопроводность;  $T$  – температура;  $Q$  – удельные объемные тепловые потери.

Турбогенератор ТГВ-500 имеет радиальную систему вентиляции, при которой холодный водород (с расчетной температурой 40 °С) подается в радиальные каналы между пакетами и нажимными пальцами со стороны зазора с дальнейшим движением в сторону спинки. Коэффициенты теплоотдачи теплообменных поверхностей заданы в соответствии с [6, 8].

В результате получаем распределение температур в ТЗ ТГ при номинальной нагрузке (рис. 9). Распределение нагревов двух крайних пакетов, нажимного пальца, медного экрана и нажимной плиты показано на рис. 10.

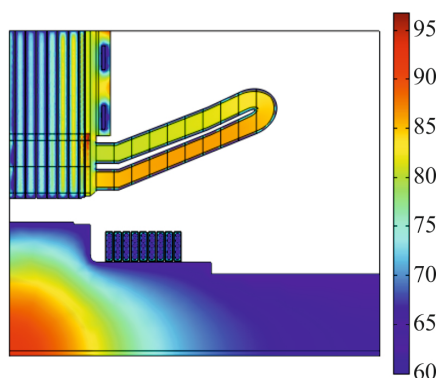


Рис. 9. Распределение температуры в торцевой зоне турбогенератора при номинальной нагрузке

Fig. 9. Temperature distribution in the end zone of a turbogenerator in the mode of rated load

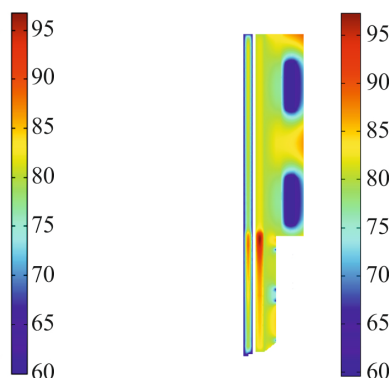


Рис. 10. Распределение температуры в области «два крайних пакета – нажимной палец – экран – нажимная плита»

Fig. 10. Temperature distribution in the area of “two end packages – press fin – shield – press plate”

Максимальная температура (97,3 °С) наблюдается в зубцовой зоне крайнего пакета в области возле дна паза. Это объясняется тем, что, кроме радиального поля, зубцовая зона нагружена аксиальным потоком, созданным МДС лобовых частей обмотки статора, рассеиванием лобовых частей обмотки ротора, а также «выпучиванием» части основного потока из воздушного зазора. К тому же причиной локальной концентрации аксиальной составляющей поля в области возле дна паза является эффект экранирования поля нажимной плитой (рис. 8).

Понятно, что распределение нагревов нажимной плиты обусловлено наличием каналов с охлаждающей водой. Однако они эффективны лишь



в локальной близости, и на нагрев медного экрана не влияют. Поверхность пальцев, обращенная к плите, имеет температуру на (10–15) °С выше, чем поверхность, обращенная к сердечнику. С отдалением от зубцовой зоны крайних пакетов с максимальной температурой в сторону спинки сердечника температура резко уменьшается ввиду экранирующего действия нажимной плиты и медного экрана. Температура также уменьшается при приближении к зазору. Аксиальная составляющая магнитной индукции в зоне коронки зубца достигает 0,70–0,75 Тл (торец ступеньки первого пакета), однако эта зона интенсивно охлаждается газом, циркулирующим в зазоре.

С учетом изложенного можно сделать вывод, что нагрев элементов ТЗ ТГ крайне неравномерен. Это определяется распределением потерь и схемой охлаждения. Максимальные значения температуры в отдельных элементах выше средних почти втрое. С целью оценки адекватности разработанного алгоритма исследования температурного поля, реализованного в среде Comsol Multiphysics [9], было выполнено сопоставление расчетных значений нагревов ТЗ ТГ типа ТГВ-500 в режиме короткого замыкания при  $I_s = 0,6I_{сн}$  с данными экспериментальных исследований [7, 8, 10]. Полученные расхождения расчетных и экспериментальных значений не превысили 7 %, что свидетельствует о применимости использованных подходов и допущений и о возможности применения разработанной модели для инженерных целей.

### ВЫВОДЫ

1. Разработана уточненная квазитрехмерная математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и теплообменных процессов в торцевой зоне мощного турбогенератора с радиальной системой вентиляции. Созданная модель в сравнении с известными отличается строгим учетом физико-технических факторов и простотой программной реализации.

2. Результаты моделирования отвечают общим представлениям о протекании электромагнитных и тепловых процессов в торцевой зоне мощного турбогенератора.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кенсьцький, О. Г. Електромагнітне поле у торцевій зоні турбогенератора при зміні реактивного навантаження / О. Г. Кенсьцький, Д. І. Хвалін // Технічна електродинаміка. 2018. № 1. С. 62–68.
2. Кенсьцький, О. Г. Квазітривимірна модель електромагнітного поля у торцевій зоні турбогенератора / О. Г. Кенсьцький, Д. І. Хвалін // Праці Ін-ту електродинаміки Національної академії наук України. 2017. № 48. С. 59–64.
3. Милых, В. И. Принципы расчета магнитного поля в торцевой зоне турбогенератора в различных режимах его работы / В. И. Милых, А. И. Высочин // Электротехника і електромеханіка. 2010. № 3. С. 17–22.
4. 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. Т. 1114, № 5. С. 3–11.
5. Eddy Current Analysis in the Stator End Structures of Large Capacity Turbine Generators / M. Fujita [et al.] // International Conference on Electrical Machines and Systems, November, 2009. Tokyo, Japan. P. 1–6.
  6. Постников, И. М. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов / И. М. Постников, Л. Я. Станиславский, Г. Г. Счастливый. Киев: Наук. думка, 1971. 360 с.
  7. Турбогенераторы. Расчет и конструкция / В. В. Титов [и др.]. Л.: Энергия, 1967. 896 с.
  8. Счастливый, Г. Г. Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки / Г. Г. Счастливый, Г. М. Федоренко, В. И. Выговский. Киев: Наук. думка, 1985. 208 с.
  9. Comsol Multiphysics Modeling and Simulation Software [Electronic Resource]. Mode of Access: <http://www.comsol.com/>.
  10. Счастливый, Г. Г. Прибор для измерения теплоотдачи в электрических машинах и аппаратах / Г. Г. Счастливый, Г. М. Федоренко, В. И. Выговский // Электротехническая промышленность. Сер. Электрические машины. 1978. № 7. С. 10–13.

Поступила 02.05.2018 Подписана в печать 10.07.2018 Опубликовано онлайн 30.01.2019

#### REFERENCES

1. Kentsits’kii O. H., Hvalin D. I. (2018) The Turbogenerator End Zone Electromagnetic Field under Alterations of the Reactive Load. *Tekhnichna Elektrodynamika = Technical Electrodynamics*, (1), 62–68 (in Ukrainian).
2. Kentsits’kii O. H., Hvalin D. I. (2017) A Quasi-Three-Dimensional Model of Electromagnetic Field in the Turbogenerator End Zone. *Pratsi Institutu Elektrodinamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukraini* [Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine], (48), 59–64 (in Ukrainian).
3. Milykh V. I., Vysochyn A. I. (2010) Principles of Calculation the Magnetic Field in the End Zone of a Turbogenerator under Different Operating Conditions. *Elektrotehnika i Elektromekhanika = Electrical Engineering and Electromechanics*, (3), 17–22 (in Russian).
4. Milykh V. I., Polyakova N. V. (2015) Numerical Calculations of the Magnetic Fields in a Turbogenerators End Zone. *Vistnyk Natsionalnoho Tekhnichnogo Universytetu “HPI”. Zbirnyk Naukovykh Prats’. Ser. Elektrichni Mashyny ta Elektromekhanichne Peretvorennia Energiyi = Bulletins of NTU “KhPI”. Ser. Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*. Kharkov, NTU “KhPI”, 1114 (5), 3–11 (in Russian).
5. 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*. Tokyo, Japan, 1–6. <https://doi.org/10.1109/icems.2009.5382938>.
6. Postnikov I. M., Stanislavskii L. Ya., Schastlivyi G. G. (1971) *Electromagnetic and Thermal Processes in the End Zones of Powerful Turbogenerators*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 360 (in Russian).
7. Titov V. V., Hutoreckii G. M., Zagorodnaya G. A., Varatian G. P. et al. (1967) *Turbogenerators. Calculation and Construction*. Leningrad, Energia Publ. 896 (in Russian).
8. Schastlivyi G. G., Fedorenko G. M., Vygovskiy V. I. (1985) *Turbo- and Hydrogenerators at the Variable Loading Graphics*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 208 (in Russian).
9. *Comsol Multiphysics Modeling and Simulation Software*. Available at: <http://www.comsol.com/>.
10. Schastlivyi G. G., Fedorenko G. M., Vygotskii V. I. (1978) Apparatus for Heat Transfer Measurement in the Electrical Machines and Devices. *Elektrotekhnicheskaya Promyshlennost’. Ser. Elektricheskie Mashiny* [Electrical Engineering Industry. Ser. Electrical Machines], (7), 10–13 (in Russian).

Received: 2 May 2018

Accepted: 10 July 2018

Published online: 30 January 2019