

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-130-142>

УДК 621.313.322

Моделирование электромагнитного поля мощной электрической машины

Д. И. Хвалин¹⁾, О. Г. Кенсичкий²⁾, К. А. Кобзарь³⁾

¹⁾Институт проблем безопасности атомных электростанций
Национальной академии наук Украины (Киев, Украина),

²⁾Институт электродинамики Национальной академии наук Украины (Киев, Украина),

³⁾Государственное предприятие завод «Электротяжмаш» (Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. С помощью математического и физического моделирования получены сведения о распределении электромагнитного поля в торцевой зоне мощного турбогенератора. На основе сравнения осевой составляющей магнитной индукции на поверхности крайнего пакета сердечника статора масштабной физической и математической моделей с данными натурального эксперимента сделаны выводы о достоверности полученных результатов. Данные моделирования и натурального эксперимента соответствуют одному и тому же турбогенератору, что позволяет оценивать корректность построения математической модели. Показано, что физическое моделирование дает возможность оценить закономерности распределения электромагнитного поля (без получения точных количественных показателей) и может использоваться для качественного сравнения эффективности различных конструктивных решений торцевой зоны статора. Однако такие модели не нашли широкого применения, поскольку для формирования содержательных и достаточно подробных выводов относительно параметров и характеристик объекта требуется проведение многочисленных исследований, конструкции торцевой зоны мощных генераторов сложны, а вычисление трехмерных моделей является трудоемким и даже при современной компьютерной технике связано с рядом упрощающих факторов. При математическом моделировании применен последовательный логический переход от простой модели центральной части машины к более сложной модели торцевой зоны с использованием предварительных результатов, что позволяет получить данные о распределении электромагнитного поля в сложных областях. С помощью специализированного программного обеспечения создана достаточно гибкая в плане модификации отдельных составляющих модель, характеризующаяся доступностью, наглядностью и неограниченными возможностями для экспериментирования, в том числе прогнозирования ситуаций, которые ранее не встречались или могут дать непредсказуемый результат.

Ключевые слова: турбогенератор, математическая модель, масштабная физическая модель, торцевая зона, крайний пакет сердечника статора, лобовая часть обмотки, поток рассеяния, электромагнитное поле

Для цитирования: Хвалин, Д. И. Моделирование электромагнитного поля мощной электрической машины / Д. И. Хвалин, О. Г. Кенсичкий, К. А. Кобзарь // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 2. С. 130–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-130-142>

Адрес для переписки
Кенсичкий Олег Георгиевич
Институт электродинамики
Национальной академии наук Украины
просп. Победы, 56,
03057, г. Киев, Украина
Тел.: +38 044 366-26-25
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.: +38 044 366-26-25
ied1@ied.org.ua

Simulation of Electromagnetic Field of a Powerful Electrical Machine

D. I. Hvalin¹⁾, O. H. Kensytskyi²⁾, K. O. Kobzar³⁾

¹⁾Institute for Safety of Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),

²⁾Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),

³⁾State Enterprise Plant Electrotiyazhmash (Kharkov, Ukraine)

Abstract. With the aid of mathematical and physical simulation the electromagnetic field distributions in the end zone of a powerful turbogenerator has been obtained. On the basis of the comparison of the axial component of the magnetic induction on the surface of the extreme package of the stator core of the large-scale physical and mathematical models with the data of the field experiment, conclusions are drawn about the reliability of the results obtained. The data of the simulation and the field experiment correspond to the same turbogenerator, which makes it possible to evaluate the correctness of the construction of the mathematical model. It is shown that physical modeling makes it possible to evaluate the regularities of the distribution of the electromagnetic field (without obtaining accurate quantitative indicators) and can be used for qualitative comparison of the effectiveness of various design solutions of the end zone of the stator. However, such models have not become widely used, since numerous studies are required to form meaningful and sufficiently detailed conclusions about the parameters and characteristics of the object, the design of the end zone of high-power generators is complex, and the calculation of three-dimensional models is time-consuming and even with modern computer technology is associated with a number of simplifying factors. In mathematical modeling, a sequential logical transition is applied from a simple model of the central part of the machine to a more complex model of the end zone using preliminary results, which makes it possible to obtain data on the distribution of the electromagnetic field in complex areas. With the help of specialized software, a model has been created that is quite flexible in terms of modifying individual components, characterized by accessibility, visibility and unlimited possibilities for experimentation, including predicting situations that have not previously occurred or can give unpredictable results.

Keywords: turbogenerator, mathematical model, scale physical model, end zone, stator core end packet, windings frontal part, leakage flux, electromagnetic field

For citation: Hvalin D. I., Kensytskyi O. H., Kobzar K. O. (2021) Simulation of Electromagnetic Field of a Powerful Electrical Machine. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (2), 130–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-130-142> (in Russian)

Введение

Одним из основных методов изучения процессов электромеханического преобразования энергии в электрических машинах является экспериментальный, позволяющий получить наиболее достоверные результаты при проведении исследований на действующих машинах в условиях электростанций. Однако специфические особенности мощных электрических машин (высокое напряжение обмоток относительно корпуса, герметизация внутренней полости машины, вибрация, большой промежуток времени между поочередными остановами машины, сложность установки необходимого режима работы (из условий эксплуатации)) накладывают определенные условия на проведение эксперимента, ограничивая круг исследователей. Таким образом, несмотря на значительное количество работ в этой области, получить экспериментальные данные на действующих машинах

весьма проблематично и они не дают полной информации о распределении поля в некоторых зонах.

Ввиду сложности проведения экспериментальных исследований целесообразно отдельные закономерности изучать на разного рода моделях. Преимущественное распространение получили математические модели (ММ), которые в своем большинстве построены на принципе соответствия дифференциальных уравнений, описывающих процессы различной физической природы. Это позволяет перенести изучение явления на модель, имеющую отличную от оригинала физическую природу.

Различают аналитическое и имитационное моделирование. В последнее время при исследовании физических процессов природных и технических систем широкое развитие получило именно имитационное моделирование, которое в большинстве случаев проводится с применением метода конечных элементов. Осуществляется оно с помощью компьютеров, поэтому называется также компьютерным моделированием.

Компьютерное моделирование – один из наиболее эффективных методов изучения сложных систем. Компьютерные модели проще и удобнее аналитических, позволяют осуществлять вычислительные эксперименты в условиях, когда проведение реальных экспериментов проблематично или вообще невозможно по финансовым и физическим причинам либо может привести к непредсказуемому результату (например, взрыву). Логичность и формализованность компьютерных моделей позволяет выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта, в частности исследовать отзыв физической системы на изменение ее параметров, начальных условий или воздействий на эту систему. В дальнейшем такие модели могут использоваться для прогнозирования ситуаций, не встречавшихся ранее [1, 2]. Преимущества объекта-заместителя заключаются в его доступности, наглядности и неограниченных возможностях для экспериментирования. Поэтому такие исследования могут проводиться с целью оптимизации любого устройства, процесса или изучения закономерностей явлений.

В то же время существующие расчетные методы анализа конструктивного исполнения торцевой зоны мощной электрической машины не всегда дают возможность в полной мере оценить ту или иную конструкцию. Это прежде всего связано с проблемой выбора и построения ММ, учитывающей с определенными допущениями сложную картину реального поля, фактическую конфигурацию деталей, наличие вторичных источников поля и т. д. Экспериментальные исследования электромагнитного поля и его параметров позволяют получить объективную информацию о состоянии нагрузки элементов конструкции концевой зоны, а также выяснить особенности электромагнитных процессов в этой области, которые затем могут использоваться для создания новых и совершенствования существующих ММ и расчетных методов.

Цель настоящей статьи – сравнение результатов математического и физического моделирования с данными натурального эксперимента. Для повы-

нения достоверности построенной ММ, а также возможности разработки рекомендаций по ее дальнейшему использованию применялся принцип соответствия моделей и реального объекта одному и тому же генератору. Поскольку масштабная физическая модель (ФМ) концевой зоны электрической машины предусматривает электромагнитное подобие оригиналу, с помощью ММ выполнялся расчет только электромагнитного поля.

В качестве объекта исследования определен серийный турбогенератор (ТГ) типа ТГВ-500 мощностью 500 МВт (завод «Электротяжмаш», г. Харьков) [3]. Этот выбор обусловлен наличием экспериментальных данных, позволяющих проверить достоверность электромагнитного расчета, и масштабной ФМ концевой части ТГ данного типа и мощности.

ММ разработана с учетом реальных габаритов элементов и узлов ТГ, а также использованных материалов. Для ферромагнетиков заданы нелинейные интерполяционные кривые намагничивания. Алгоритм построения квазитрехмерной ММ расчета электромагнитного поля торцевой зоны мощного ТГ представлен ниже [4].

На первом этапе рассматривается полевая модель электромагнитного поля поперечного сечения центральной (активной) зоны ТГ, имеющей с учетом значительной осевой длины машины двумерную постановку. Уравнение для двумерного магнитного поля относительно аксиальной составляющей векторного магнитного потенциала (ВМП) A_z расчетной области (рис. 1) в общем случае имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} j\omega\sigma A + \nabla \cdot (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \cdot A) = \\ = J_{z\text{стор}}^e e_z; \quad A = A_z e_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где j – мнимая единица комплексного уравнения; ω – угловая частота; σ – удельная электропроводность; ∇ – оператор Гамильтона; μ_0 – проницаемость вакуума; μ_r – относительная магнитная проницаемость; $J_{z\text{стор}}$ – плотность сторонних токов, заданная в сечениях обмоток статора и возбуждения; e_z – орт.

Составляющие вектора магнитной индукции (МИ) в декартовой системе координат определяются через ВМП A_z согласно соотношениям:

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}; \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}. \quad (2)$$

Далее рассчитывается модуль вектора МИ

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}, \quad (3)$$

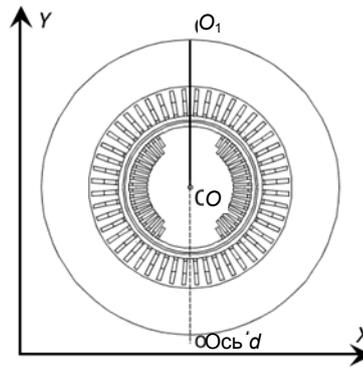


Рис. 1. Расчетная область центральной зоны турбогенератора

Fig. 1. An estimated area of the central zone of a turbogenerator

используемый при нахождении проницаемости с помощью известной зависимости для марки стали [5].

Составляющие и модуль напряженности магнитного поля определяются, используя (1), (2):

$$H_x = \frac{B_x}{\mu}; \quad H_y = \frac{B_y}{\mu}; \quad H = \frac{B}{\mu}. \quad (4)$$

Поскольку сердечник статора набран из листов высоколегированной холоднокатаной электротехнической стали толщиной 0,5 мм, вихревыми токами от радиально направленного потока можно пренебречь. Поэтому магнитное поле центральной части ТГ в декартовой системе координат удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_{\text{статор}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) дополняется однородным граничным условием первого рода, отображающим затухание поля за пределами расчетной области на линии внешней поверхности ярма статора (рис. 1):

$$A_z|_G = 0 \quad (6)$$

и условием непрерывности магнитного потока на внутренних границах.

В обмотке статора принята симметричная система фазных токов:

$$\begin{cases} i_A = I_m \cos(\omega t + \beta); \\ i_B = I_m \cos(\omega t + \beta - 120^\circ); \\ i_C = I_m \cos(\omega t + \beta + 120^\circ), \end{cases} \quad (7)$$

где I_m – амплитуда фазных токов; β – угловое смещение оси, вдоль которой действует магнитодвижущая сила трехфазной обмотки статора по отношению к продольной оси ротора d .

Угол β определяется по формуле

$$\beta = 90^\circ + \theta + \varphi, \quad (8)$$

где θ – угол нагрузки; φ – фазовый сдвиг между напряжением и током статора.

Угол нагрузки θ находится согласно выражению

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{I_s \cos \varphi}{(U_s / x_d) \pm I_s \sin \varphi}, \quad (9)$$

где I_s , U_s – фазные ток и напряжение статора соответственно; x_d – главное индуктивное сопротивление; «+» – режим перевозбуждения ТГ; «-» – режим недовозбуждения.

Плотность сторонних токов, заданная в сечениях обмоток статора и возбуждения, определяется следующим образом:

$$\begin{cases} J_{Az\text{стоп}} = i_A s_{\Pi 1} / S_{\Pi 1}; \\ J_{Bz\text{стоп}} = i_B s_{\Pi 1} / S_{\Pi 1}; \\ J_{Cz\text{стоп}} = i_C s_{\Pi 1} / S_{\Pi 1}; \\ J_f = i_f s_{\Pi 2} / S_{\Pi 2} a_r, \end{cases} \quad (10)$$

где $s_{\Pi 1}$, $s_{\Pi 2}$ – число активных проводников в пазу статора и ротора соответственно; $S_{\Pi 1}$, $S_{\Pi 2}$ – площадь сечения паза статора и ротора; i_f – ток в обмотке ротора; a_r – количество параллельных ветвей обмотки ротора.

Величины токов в обмотках статора и ротора, а также угол β задаются в соответствии с режимом работы ТГ.

Решение задачи осуществляется численным методом с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics [6].

Мгновенное распределение МИ (фоновое закрашивание) и ВМП (изолинии) в момент времени $t = 0,02$ с в центральной зоне ТГ для номинального режима работы показано на рис. 2. Оттенками серого отмечены уровни фонового закрашивания в соответствии с приведенной шкалой.

На втором этапе, когда известно распределение поля в центральной зоне, проводится моделирование магнитного поля в продольном сечении ТГ (рис. 3). С учетом симметрии вдоль осевого и радиального направлений расчетная область концевой зоны выбрана в виде половины сечения ротора вдоль его оси и сечения зубца сердечника статора в тангенциальном направлении (по окружности) [7]. Это сечение совпадает с прямоугольной координатной плоскостью XU и является плоскостью симметрии ротора (на рис. 1 проходит по радиусу OO_1).

Уравнение для двумерного поля относительно 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 и напряженности поля, установленных на внешних границах $abcdef$ -области (рис. 3).

На линии bc принимается значение напряженности поля в точке O_1 (рис. 1)

$$H|_{bc} = H|_{O_1}, \quad (11)$$

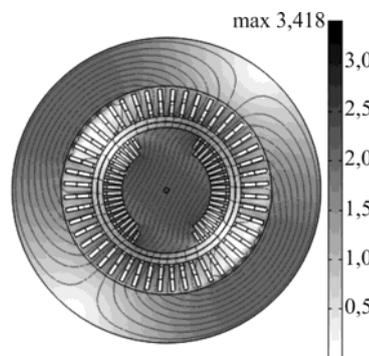


Рис. 2. Распределение электромагнитного поля в центральной зоне турбогенератора в режиме номинальной нагрузки

Fig. 2. Electromagnetic field distribution in the central zone of a turbogenerator under nominal load condition

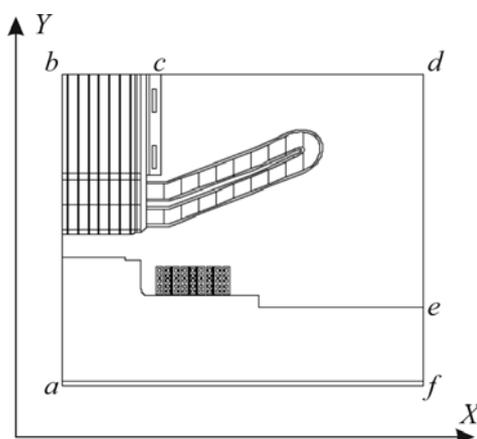


Рис. 3. Расчетная область торцевой зоны турбогенератора

Fig. 3. An estimated area of the end zone of a turbogenerator

на линии af – условие симметрии магнитного поля относительно оси ротора

$$n \times H|_{af} = 0. \quad (12)$$

Вдоль границы ab задается распределение напряженности магнитного поля, аналогичное распределению вдоль той же линии в поперечном сечении (рис. 1, линия OO_1):

$$H|_{ab} = H(r)|_{OO_1}. \quad (13)$$

Принимается, что за достаточно отдаленные границы cd , de и ef магнитное поле не выходит, поэтому на линии $cdef$ устанавливается однородное граничное условие первого рода

$$A_z|_{cdef} = 0. \quad (14)$$

Одновременно задается распределение магнитной проницаемости вдоль радиуса OO_1 – $\mu(r)|_{OO_1}$, которое изменяется в результате различного насыщения отрезков магнитопровода основным магнитным потоком. Таким образом устанавливается взаимосвязь электромагнитного поля в центральной и концевой зонах ТГ. Влияние режима нагрузки учитывается заданием величин токов в обмотках статора и ротора, угла β и граничного условия.

Важным этапом при расчете магнитного поля в концевой части ТГ является задание токов в лобовых частях обмоток. Рассматривается модель концевой зоны ТГ, позволяющая описать токи лобовой части обмотки статора со строгим учетом геометрической формы лобовых соединений и режима работы [4, 8]. Направления мгновенных фазных токов i_A , i_B , i_C лобовой части обмотки статора и фрагмент схемы этой обмотки, вдоль которой проходит сечение OO_1 , показаны на рис. 4.

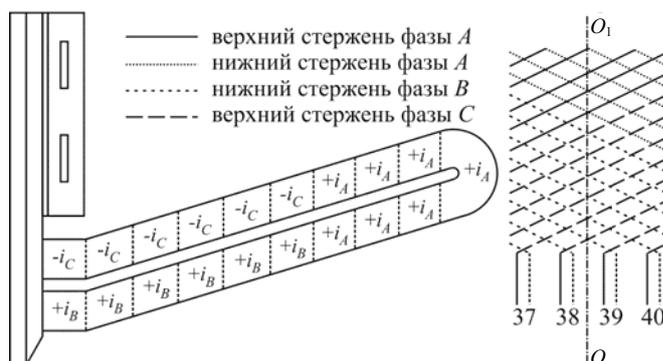


Рис. 4. Мгновенные фазные токи лобовой части обмотки статора и часть обмотки вдоль сечения

Fig. 4. Instantaneous phase currents of a stator winding frontal part and a part of winding along a section

Токи лобовой части обмотки статора (рис. 4) меньше принятых токов системы (7) в $\sqrt{2}$ раза, поскольку лобовые части отогнуты в среднем на 45° . То есть они представляют собой действующие значения фазных токов с соответствующим углом β . Так как продольное сечение ТГ проходит по продольной оси ротора d (рис. 1), значение плотности тока лобовой части обмотки ротора соответствует заданному току возбуждения (10).

Отдельно решается задача распределения вихревых токов от аксиальных магнитных потоков лобовых частей обмоток. Поскольку ротор вращается синхронно с полем, постольку отличающаяся от нуля электропроводность задана в пакетах сердечника статора, нажимном пальце, электропроводном экране и нажимной плите.

Распределение магнитного поля в концевой части ТГ при номинальной нагрузке показано на рис. 5.

С целью проверки достоверности полученных результатов, а также тестирования построенной ММ последняя после настройки на масштабную ФМ концевой части того же генератора была использована для численного расчета электромагнитного поля для номинального режима работы машины.

Масштабная ФМ (рис. 6) разработана и изготовлена в Институте электродинамики Национальной академии наук Украины [3].

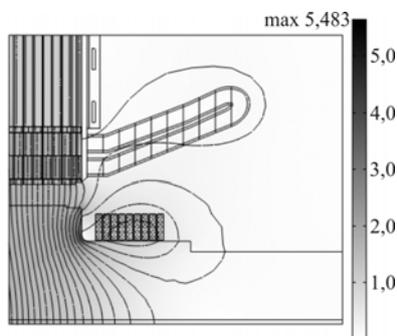


Рис. 5. Распределение электромагнитного поля в торцевой зоне турбогенератора при номинальной нагрузке

Fig. 5. Electromagnetic field distribution in the end zone of a turbogenerator under nominal load condition



Рис. 6. Масштабная физическая модель торцевой зоны генератора

Fig. 6. A scale physical model of the end zone of a turbogenerator

Коротко возможности ФМ можно сформулировать следующим образом. Масштабная ФМ концевой зоны мощного ТГ рассчитана и изготовлена в соответствии с известными положениями теории подобия электромагнитных процессов в проводящих средах [9], устанавливающих основные

масштабные соотношения между моделью и оригиналом. Для квазистационарного поля в линейной изотропной среде критерий подобия имеет вид

$$m_\mu m_\sigma m_l^2 m_f = 1, \quad (15)$$

где m_μ , m_σ – масштабные соотношения магнитной проницаемости и электрической проводимости конструктивных материалов натурального объекта и физической модели соответственно; m_l – соотношение линейных размеров; m_f – масштаб частоты.

Поскольку ФМ имеет меньшие размеры по сравнению с оригиналом ($m_l < 1$), частота тока питания по сравнению с частотой оригинала повышается.

Для исследуемой модели приняты следующие масштабные соотношения: $m_l \approx 1/3,5$; $m_f \approx 12$; $m_\sigma = 1$.

Принятое в качестве первого приближения условие $m_\mu = 1$ приемлемо для немагнитных нажимных пальцев, плиты и областей с большим насыщением, где изменение величины $\mu(H)$ относительно невелико.

Масштаб m_l для некоторых областей модели отличается от $1/3,5$, так как для отдельных узлов модели использовались готовые детали определенных размеров (сегменты активной стали статора и ротора подобраны из штамповок листов двухполюсного асинхронного двигателя). То есть в данном случае имеет место нарушение геометрического подобия, поскольку активное железо модели изготовлено из листов стали Э21 толщиной 0,35 мм, а железо оригинала – из листов стали Э330 толщиной 0,5 мм; из условий моделирования толщина листа ФМ должна быть 0,2 мм.

При частоте тока около 600 Гц обеспечивается достаточно близкое соотношение для подобия полей

$$m_l^2 m_f = 1 \quad (m_\mu = 1, \quad m_\sigma = 1). \quad (16)$$

Для моделирования ТГ ($m_l < 1$) пригодны статические модели, не имеющие вращающихся частей. Однако в такой модели могут быть удовлетворены условия подобия электромагнитных процессов в одной из областей (статора или ротора). В исследуемой модели удовлетворены условия приближенного подобия для электромагнитного поля только в области статора, в области ротора поле не моделируется.

Масштабная ФМ выполнена в виде статора с трехфазной обмоткой, концевая часть которого содержит лобовые части ОС, несколько концевых крайних пакетов активного железа сердечника статора, нажимные плиту и пальцы. Шихтованный сердечник статора изготовлен из листов электротехнической стали марки Э21 толщиной 0,35 мм и стянут стяжными шпильками. Неподвижный ротор выполнен из той же стали, что и сердечник статора. Нажимная плита и пальцы изготовлены из стали 1Х18Н9Т. Конструкция модели существенно упрощена: ротор выполнен в виде сплошного гладкого цилиндра, отсутствуют вал и обмотка ротора, подшипниковый щит и корпус подшипника.

Для измерения аксиальной составляющей индукции B_z на поверхности листов железа статора использовались датчики индукции, представляющие собой плоские бескаркасные катушки, смонтированные в специальные планки.

Для численного расчета геометрия ММ концевой зоны турбогенератора типа ТГВ-500 путем определенной последовательности геометрических операций с помощью редактора, встроенного в COMSOL Multiphysics, была изменена на геометрию масштабной ФМ указанного генератора (рис. 6). Каждому элементу и узлу заданы физические параметры материала, из которого он изготовлен. Для стали Э21 построена соответствующая кривая намагничивания.

С помощью математического моделирования согласно представленному алгоритму (1)–(14) получены следующие основные результаты.

Распределение МИ и ВМП в поперечном сечении масштабной ФМ синхронного генератора типа ТГВ-500 показано на рис. 7, в продольном разрезе – на рис. 8. В качестве примера на рис. 9 представлено сопоставление распределения аксиальной составляющей МИ на поверхности крайнего пакета сердечника статора, полученного с помощью ММ концевой части исследуемого ТГ (кривая 1) и ММ, настроенной на масштабную ФМ концевой зоны аналогичного генератора (кривая 2), с данными натурного эксперимента на реальном ТГ типа ТГВ-500 [2] (обозначение «+») и на вышеупомянутой ФМ [10] (обозначение «•»).

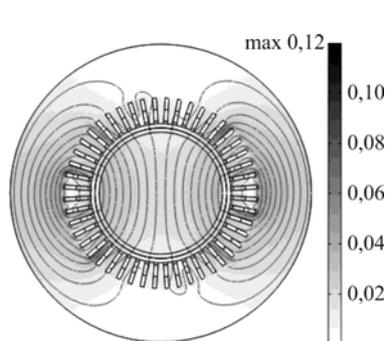


Рис. 7. Распределение электромагнитного поля в поперечном сечении физической модели турбогенератора при номинальной нагрузке

Fig. 7. Electromagnetic field distribution in the transversal sections of a physical model of a turbogenerator under nominal load condition

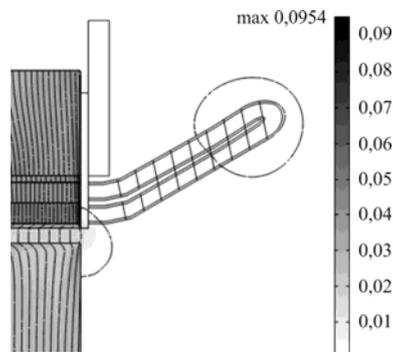


Рис. 8. Распределение электромагнитного поля в продольном сечении физической модели турбогенератора при номинальной нагрузке

Fig. 8. Electromagnetic field distribution in the longitudinal sections of a physical model of a turbogenerator under nominal load condition

Исходя из анализа полученных на математической и физической моделях результатов, можно констатировать следующее. Максимальные отклонения осевой составляющей МИ имеют место для точек с наименьшими значениями индукции и не превышают 20–25 %, среднее значение отклонения составляет 11 %. Это можно объяснить погрешностью измерения,

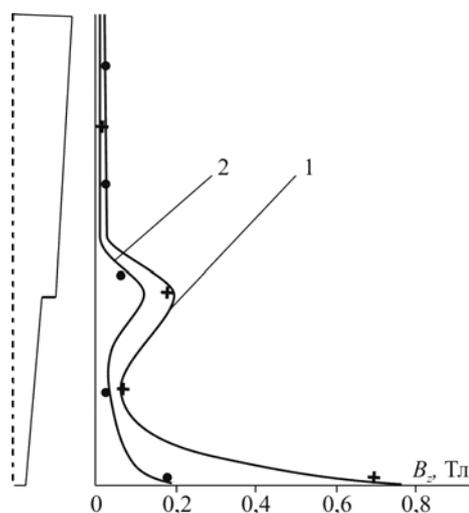


Рис. 9. Сопоставление распределения аксиальной составляющей магнитной индукции на поверхности крайнего пакета статора турбогенератора, полученного с помощью математического (кривые 1, 2) и физического (обозначение «•») моделирования, с данными экспериментальных исследований (обозначение «+»)

Fig. 9. Comparison of the obtained distribution of the axial component of magnetic flux density on the surface of the stator end packet of a turbogenerator with the aid of mathematical (curves 1, 2) and physical (marked by “•”) simulation, also with experimental data (marked by “+”)

значительно уменьшается. Хотя магнитопровод статора (особенно зубцовая зона пакетов) моделируется с заложенной погрешностью, однако при проведении качественного сравнения эффективности различных конструктивных решений торцевой зоны статора масштабная ФМ, по сути, заменяет эксперимент в натуре, что особенно ценно для крупных ТГ.

Объемная конструкция масштабной ФМ позволяет получить измерительные данные с учетом пространственных закономерностей распределения поля по тангенциальной координате, например, в различных сечениях листа статора. Но ввиду чрезмерной ее упрощенности, фактического несоответствия реальному объекту (по масштабу, материалу, возрасту (около 40 лет), себестоимости (около 20 тыс. руб. на 1978 г.)), использования устаревших и неисправных измерительных приборов, продолжительности проведения необходимых измерений, не всегда соответствующих в итоге действительности, для вариационных экспериментов имеет смысл использовать ММ, несмотря на плоское сечение модели (в данном случае два плоских сечения). При этом ММ должна быть точно настроена, достоверна и апробирована. Соблюдение данных условий осуществляется путем моделирования различных режимов работы ТГ [4, 11] и сравнения результатов с экспериментальными данными, полученными на реальном объекте.

например зажатием измерительного датчика, ошибкой показаний датчика или милливольтметра. Отклонение существенно проявляется для меньших значений аксиальной составляющей МИ, т. е. в местах с наибольшей вероятностью увеличения погрешности измерения. В то же время сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных данных, полученных на реальном объекте, показывает, что их расхождение не превышает 9%.

Сопоставление кривых 1 и 2 (рис. 9) позволяет сделать вывод, что отклонение значения масштаба m_1 для сегментов активной стали статора ФМ от расчетного составляет погрешность моделирования. Кроме того, из-за отсутствия потоков рассеяния обмотки ротора значение осевой составляющей МИ в коронке зубцов крайнего пакета ФМ

В совокупности это делает достоверными результаты ММ, которые невозможно получить на реальном объекте в силу различных причин объективного и субъективного характера.

Также отметим, что себестоимость масштабной ФМ составляет около 10 тыс. дол., тогда как стоимость персонального компьютера, на котором построена ММ и реализован численный расчет, – 400 дол.; изготовление ФМ заняло около двух лет, а реализовать ММ при наличии соответствующих опыта и навыков работы в программной среде COMSOL Multiphysics можно за несколько месяцев.

ВЫВОДЫ

1. Представленная математическая модель, отличающаяся от известных описанием токов лобовой части обмотки статора с учетом геометрической формы лобовых соединений и режима работы генератора, с удовлетворительной для решения практических задач точностью позволяет рассчитывать распределение электромагнитного поля в основных элементах конструкции концевой части машины.

2. Моделирование с помощью физической модели дает возможность оценить характер распределения поля, но ограничивается невозможностью получения необходимой точности. Однако при проведении качественного сравнения эффективности различных конструктивных решений торцевой зоны статора такое моделирование, по сути, заменяет эксперимент в натуре, что особенно ценно для крупных турбогенераторов.

3. Преимущества математической модели заключаются в ее доступности, наглядности и неограниченных возможностях для экспериментирования, а также прогнозирования ситуаций, которые не встречались ранее или могут дать непредсказуемый результат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский, А. С. Компьютерные методы в научных исследованиях. Ч. 2: Компьютерное моделирование физических объектов и процессов горного производства / А. С. Вознесенский. М.: МГУ, 2011. 107 с.
2. Менжинский, А. Б. Разработка и анализ математических моделей генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. В. Суходолов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 2. С. 118–128. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-118-128>.
3. 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.
4. 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.
5. Турбогенераторы. Расчет и конструкция / В. В. Титов [и др.]. Л.: Энергия, 1967. 896 с.
6. COMSOL Multiphysics Modeling and Simulation Software [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.comsol.com/>.
7. Eddy Current Analysis in the Stator End Structures of Large Capacity Turbine Generators / M. Fujita [et al.] // International Conference on Electrical Machines and Systems, Nov., 2009. Tokyo, 2009. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2009.5382938>.

8. Кенсицкий, О. Г. Математическая модель совместного расчета электромагнитного поля и нагревов торцевой зоны мощного турбогенератора / О. Г. Кенсицкий, 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>.
9. Веников, В. А. Физическое моделирование электрических систем / В. А. Веников, А. В. Иванов-Смоленский. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. 359 с.
10. Експериментальні дослідження ефективності екранів зубцево-пазової конструкції статорів турбогенераторів / О. І. Титко [та ін.] // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. 2017. Вип. 46. С. 34–42.
11. Дослідження розподілу електромагнітного поля та температури в торцевій зоні осердя статора турбогенератора / О. Г. Кенсицький [та ін.] // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. 2018. Вип 51. С. 47–53.

Поступила 28.01.2020 Подписана в печать 14.04.2020 Опубликована онлайн 30.03.2021

REFERENCES

1. Voznesenskii A. S. (2011) *Computer Methods in Scientific Research. Part 2. Computer Simulation of Physical Objects and Processes of Mining Production*. Moscow, Moscow State Institute of Mines. 107 (in Russian).
2. Menzhinski A. B., Malashin A. N., Suhodolov Yu. V. (2018) Developing and the Analysis of Mathematical Models of Generators of Linear and Reciprocating Types with Electromagnetic Excitation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institution and Power Engineering Associations*, 61 (2), 118–128. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-118-128> (in Russian).
3. Postnikov I. M., Stanislavskii L. Ya., Schastlivyi G. G. (1971) *Electromagnetic and Thermal Processes in the End Parts of Powerful Turbogenerators*. Kiev, Naukova Dumka Publ. 360 (in Russian).
4. Kentsits'kii O. H., Hvalin D. I. (2018) The Turbogenerator End Zone Electromagnetic Field under Alteration of the Reactive Load. *Tekhnichna Elektrodynamika = Technical Electrodynamics*, (1), 62–68 (in Ukrainian).
5. 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).
6. *COMSOL Multiphysics Modeling and Simulation Software*. Available at: <http://www.comsol.com/>.
7. 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. *2009 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Nov., 2009. Tokyo. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2009.5382938>.
8. Kentsytskii 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institution and Power Engineering Associations*, 62 (1), 37–46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-37-46> (in Russian).
9. Venikov V. A., Ivanov-Smolenskii A. V. (1956) *Physical Simulation of Electrical Systems*. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 359 (in Russian).
10. Titko O. I., Myshasty N. D., Voronin A. I., Hvalin D. I. (2017) Experimental Studies of Effectiveness of Tooth-Slot Design Screens of Turbogenerator Stators. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy = Proceedings of Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine*, (46), 34–42 (in Ukrainian).
11. Kentsytskii O. H., Kramarskii V. A., Kobzar K. O., Hvalin D. I. (2018) Study of Distribution the Electromagnetic Field and Temperature in Stator Core End Zone of a Turbogenerator. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy = Proceedings of Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine*, (51), 47–53 (in Ukrainian).

Received: 28 January 2020

Accepted: 14 April 2020

Published online: 30 March 2021