
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.313.322-81

DOI 10.46960/2658-6754_2023_4_04

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ В ПАЗОВОЙ ЧАСТИ
ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА
С ТРАНСПОЗИЦИЕЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ПРОВОДНИКОВ****П.А. Дергачев**ORCID: 0000-0003-1631-7187 e-mail: dergachevpava@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***М.С. Венцеров**ORCID: 0009-0004-1467-8733 e-mail: ventserovms@mpei.ru

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия***В.В. Астафьев**ORCID: 0009-0004-2671-4375 e-mail: vpp@bk.ru

ООО «ЭР»

Москва, Россия

Предложен способ детального анализа электромагнитного состояния пазовой части статора турбогенератора с учетом транспозиции элементарных проводников стержня. Обмотка статора турбогенератора подвергается комплексному влиянию электромагнитных, тепловых, механических и др. факторов на протяжении всего срока эксплуатации, при этом она должна удовлетворять повышенным требованиям по надежности и долговечности, поскольку от нее напрямую зависит работоспособность всего турбоагрегата, подключенного к энергосистеме. В связи с этим обмотка статора является узлом, требующим при проектировании, эксплуатации и ремонте точного понимания происходящих в ней физических процессов. Выполнено численное моделирование пазовой части статора ТФ-63-2У3 при различных вариантах транспозиции, в том числе для стандартных углов 360° и 540°. Показано, что даже при наличии транспозиции присутствует определенная неравномерность плотности токов элементарных проводников, что приводит к возникновению дополни-

тельных электрических потерь. При этом транспозиция на 540° является более предпочтительной, поскольку обеспечивает большую равномерность распределения плотности токов, за счет чего достигается снижение электрических потерь.

Ключевые слова: транспозиция, турбогенератор, численное моделирование, электромагнитный расчет.

Для цитирования: Дергачев П.А., Венцеров М.С., Астафьев В.В. Моделирование потерь в пазовой части обмотки статора турбогенератора с транспозицией элементарных проводников // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 4-17. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_04

MODELING OF LOSSES IN STATOR WINDINGS SLOT PART OF TURBO GENERATOR WITH TRANSPOSITION OF STRANDS

P.A. Dergachev

ORCID: **0000-0003-1631-7187** e-mail: **dergachevpava@mpei.ru**
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

M.S. Ventserev

ORCID: **0009-0004-1467-8733** e-mail: **ventsevms@mpei.ru**
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

V.V. Astafjev

ORCID: **0009-0004-2671-4375** e-mail: **vpp@bk.ru**
ER LTD
Moscow, Russia

Abstract. The method of detailed analysis of electromagnetic state of slot part of turbo generator stator taking into account transposition of bar strands is proposed. It should be noted that the stator winding of turbo generator is exposed to a complex influence of electromagnetic, thermal, mechanical and other factors during the whole service life. At the same time, the winding must meet higher requirements for reliability and durability, because it directly affects the performance of the whole turbine unit, connected to the power system. Therefore, the stator winding is a unit that requires correct understanding of physical processes at all stages from designing to operating and repairing. Numerical modeling of slotted part of TF-63-2U3 stator at different transposition variants, including standard angles of 360° and 540° was performed. It is shown that even in the presence of transposition there is a certain non-uniformity of strands current density distribution, which

leads to the appearance of additional electric losses. Transposition at 540° is more preferable, since it provides more uniformity of current density distribution, at the expense of which electric losses are reduced.

Key words: transposition, turbo generator, numerical simulation, electromagnetic calculation.

For citation: P.A. Dergachev, M.S. Ventserev and V.V. Astafjev, “Modeling of losses in stator windings slot part of turbogenerator with transposition of strands”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 4-17, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_04

I. Введение

Для преобразования механической энергии турбин в электроэнергию на тепловых и атомных электростанциях применяются крупные турбогенераторы. Мощность современных турбогенераторов может достигать 2 ГВт [1]. Применяемые турбогенераторы имеют очень высокий КПД (98...99 %) [2], однако потери (даже в 1 %) приводят к тепловым нагрузкам, которые требуют специализированных систем охлаждения. Принято различать два способа охлаждения активных частей – прямой (непосредственный) и косвенный. Если речь идет об обмотке статора, непосредственное охлаждение означает, что большая часть выделяемого тепла отводится непосредственно с меди проводника при помощи хладагента, циркулирующего по внутренним каналам. В случае косвенного охлаждения весь тепловой поток проходит через корпусную изоляцию в магнитопровод статора, затем охлаждается сам магнитопровод. Для понимания важности поддержания температуры обмотки статора в допустимом диапазоне можно использовать сильно упрощенное правило (которое используется на практике): превышение температуры на $8...10^\circ\text{C}$ приводит к двукратному снижению срока службы изоляции [3, 4].

Известно, что отказы обмотки статора, связанные с некачественной изолировкой, перегревом, замыканиями между проводниками, дефектами бандажирующих систем и т.д., являются одной из наиболее распространенных причин отказов всего агрегата [5, 6]. Применение турбогенераторов высокой мощности выгодно с точки зрения удельных капиталовложений, однако при их проектировании упомянутые проблемы требуют особого внимания. Разработка машин повышенной мощности с воздушным охлаждением также представляет большой интерес ввиду упрощения и удешевления эксплуатации, однако ключевой проблемой является повышенная разрядная активность в пазовой и лобовой частях, способная привести к разрушению корпусной изоляции и замыканиям [7]. На сегодняшний день максимальная мощность машин с воздушным охлаждением находится на уровне 350 МВт в России [8] и 500 МВА за рубежом [9].

Необходимо отметить, что обмотка статора является одним из наименее надежных и наиболее важных узлов синхронной электрической машины в целом [10]. Поскольку фаза обмотки состоит из большого числа стержней, измерение, мониторинг и анализ неисправностей на ранней стадии сильно затруднены. Незначительные по размерам повреждения могут быстро развиваться, приводить к коротким замыканиям и к серьезным авариям. Таким образом, методики анализа состояния обмотки статора (как при проектировании, так и при эксплуатации) имеют важное практическое значение.

Помимо детальной оптимизации системы охлаждения, необходимо минимизировать сами потери. Для эффективного их снижения в обмотке статора отдельные стержни делают из набора изолированных проводников с транспозицией этих проводников в пазовой части (в последнее время используют транспозицию и в пазовой, и в лобовой частях).

При протекании переменного тока по проводнику плотность тока в проводнике перераспределяется в силу собственного магнитного поля и магнитного поля от соседних проводников с токами, что характеризуется глубиной проникновения электромагнитного поля и связано с наложением индуцированной напряженности электрического поля от изменяющихся магнитных полей. Для выравнивания распределения плотности тока по сечению стержня его разделяют на изолированные проводники с их последующей транспозицией. Неоднородность индуцированной напряженности электрического поля по высоте паза и от магнитного поля, создаваемого токами в стержнях, увеличивает неоднородность плотности токов в них. Таким образом, параметры транспозиции (угол транспозиции, количество и размеры проводников) влияет на эффективность снижения потерь. Надежные оценки значений потерь могут быть получены только на основе трехмерных численных моделей. Практическая значимость результатов моделирования связана с применением оптимальных параметров транспозиции для снижения потерь как в новых турбогенераторах, так и при их ремонте с заменой обмотки статора.

Основными видами транспозиции в пазовой части являются транспозиция на 360° , при которой каждый проводник занимает все возможные положения в пазу один раз, и транспозиция на 540° , при которой каждый проводник занимает все возможные положения в пазу полтора раза. Дополнительно может выполняться транспозиция в лобовых частях на 90° , 180° и 360° .

В [11, 12] подробно рассмотрен характер влияния способа плетения на степень снижения потерь. В приведенном анализе, а также в используемых на сегодняшний день методиках проектирования принято, что при углах 360° и 540° потери, вызванные полем пазового рассеяния, снижаются до

нуля. Для дальнейшего исследования необходимо построение трехмерных моделей стержней для более полного понимания происходящих в них процессов и возможности дальнейшей оптимизации геометрии с целью минимизации потерь. Численное моделирование является эффективным инструментом для анализа физических процессов, происходящих в активной зоне турбогенератора, что подтверждается растущим числом работ, посвященных данной теме [13-15].

II. Моделирование электромагнитного состояния стержня при нагрузке

Моделирование выполняется с применением программного пакета для численного анализа *COMSOL Multiphysics*.

В качестве объекта исследований был выбран турбогенератор ТФ-63-2У3 (активная мощность 63 МВт, частота вращения 3000 об/мин, с косвенным воздушным охлаждением обмотки статора). Построены две расчетные модели – 2D-модель, используемая для расчета поля в сечении активной зоны агрегата (рис. 1), и 3D-модель, позволяющая более детально оценить эффекты в пазовой части, связанные с транспозицией (рис. 2).

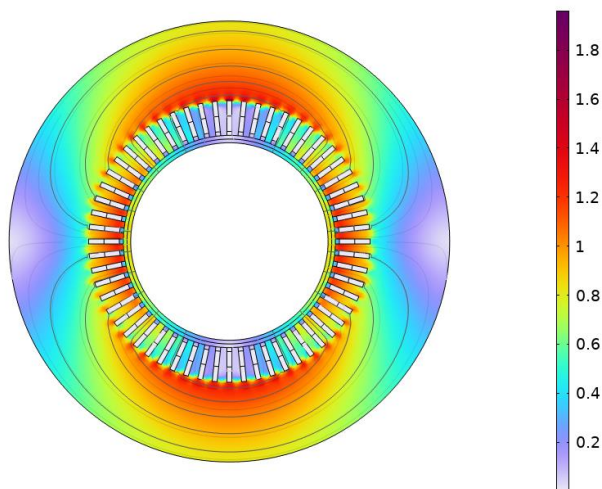


Рис. 1. 2D-модель активной зоны турбогенератора ТФ-63-2У3 (холостой ход). Цветовая шкала отражает распределение модуля вектора магнитной индукции B , Тл

Fig. 1. 2D-model of the active domain of turbo generator TF-63-2U3 (idling). The color scale reflects the distribution of the magnetic induction vector B , T

В двумерной модели реальный ротор заменен на гармонически распределенную по внутренней поверхности функцию векторного магнитного потенциала A_z , вращающуюся при изменении времени аналогично вращению ротора. Используемая функция A_z получена из предварительного расчета модели с реальным ротором. Такой подход позволяет значительно сократить время расчета за счет снижения числа степеней свободы и отсутствия необходимости перестроения сетки при повороте ротора.

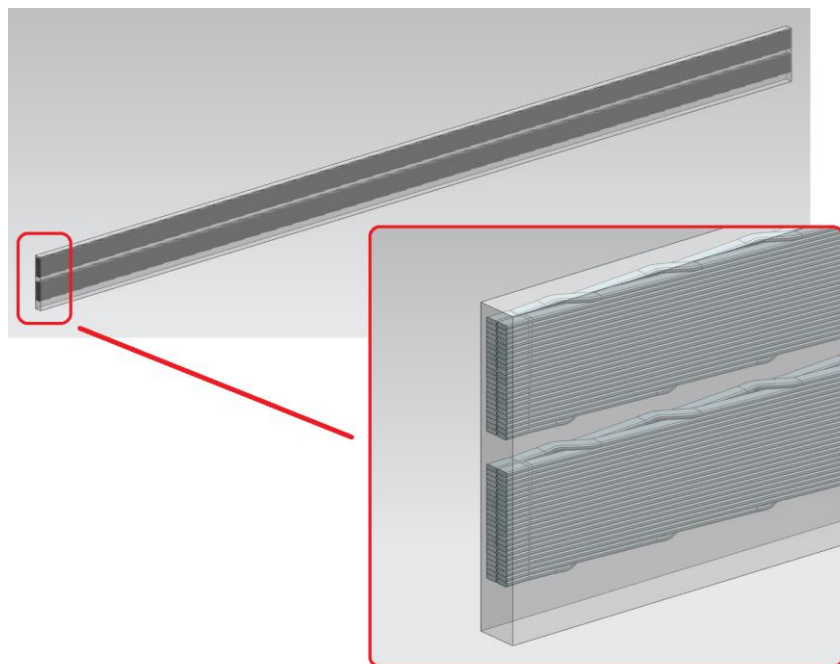


Рис. 2. 3D-модель пазовой части стержня обмотки статора ТФ-63-2У3 с учетом транспозиции элементарных проводников

Fig. 2. 3D model of slot part of stator winding bar TF-63-2U3 taking into account transposition of strands

Для оценки распределения полей на холостом ходу достаточно использовать стационарное решение при различных положениях ротора. По результатам расчета обнаруживается неравномерность распределения поля в пазу статора, которая влечет за собой неравномерность индуцированных ЭДС в элементарных проводниках. В дальнейшем удобнее всего продолжать работать с векторным магнитным потенциалом A_z , поскольку его

функции имеют более гладкий вид (следовательно, проще аппроксимируются), чем функции магнитной индукции B (рис. 3).

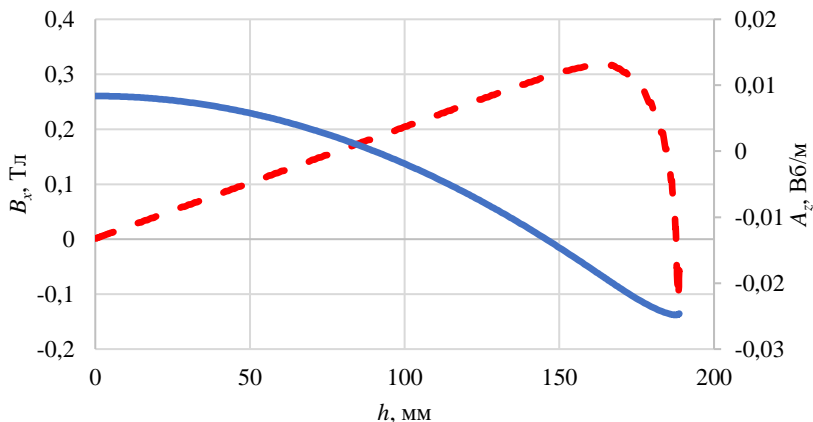


Рис. 3. Распределение величин поля B_x (пунктирная линия) и A_z (сплошная линия) по высоте паза статора

Fig. 3. Distribution of B_x (dashed line) and A_z (solid line) field values along the stator slot height

Полученные зависимости распределения A_z по границам паза аппроксимируются подходящей функцией (обычно это полиномы 2-го – 4-го порядков либо экспоненциальные функции) и задаются в трехмерную модель на стенки паза в качестве граничных условий. Трехмерная модель решается в частотной области (т.е. с использованием комплексного анализа гармонически изменяющихся во времени величин [16]). По результатам расчета определяются индуцированные ЭДС в выбранных элементарных проводниках, расположенных на разной высоте паза. На рис. 4 приведено сравнение ЭДС при наличии транспозиции на 360° и при ее отсутствии. На графике (рис. 4) можно наблюдать эффект снижения неравномерности ЭДС при наличии транспозиции, что подтверждает эффективность ее применения для снижения потерь.

При моделировании режима нагрузки распределение поля в пазу, очевидно, изменится, поэтому необходимо вернуться к 2D-модели. Моделирование работы генератора при нагрузке возможно путем реализации нестационарного расчета, однако это занимает определенное количество времени. Альтернативным способом является моделирование в частотной области. Время расчета при такой постановке сокращается на порядок, а в постобработке сразу получается установившееся решение с учетом ЭДС и индуцированных токов. Более того, интересующие величины получаются в

комплексной форме, что упрощает их передачу в трехмерную модель (которая, как было сказано выше, также решается в частотной области).

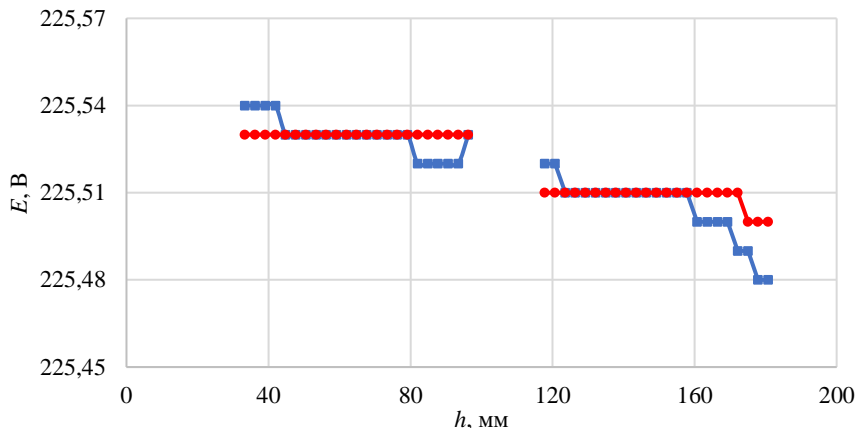


Рис. 4. Сравнение индуцированных ЭДС в элементарных проводниках, расположенных на различной высоте паза:
 ■ – при отсутствии транспозиции; ● – при транспозиции

Fig. 4. Comparison of induced EMF in elementary conductors located at different slot heights:
 ■ – without transposition; ● - with transposition

В трехмерной модели, помимо задания поля на границах, необходимо также учесть напряжение, подводимое к рассматриваемому стержню из сети. В постобработке можем получить как сосредоточенные параметры токов каждого элементарного проводника (на рис. 5 приведено сравнение токов в проводниках, расположенных на разной высоте паза, при наличии транспозиции на 360° и при наличии транспозиции на 540°), так и паттерны плотности тока (рис. 6). Очевидно, что транспозиция на 540° позволяет достичь большей равномерности токов, чем на 360° . Верхний график (рис. 5) соответствует действительным значениям, нижний соответствует мнимым значениям. Суммарное значение токов проводников сходится с фазным током из 2D-модели (4,1 кА), при этом можно наблюдать различную степень неравномерности токов в проводниках, вследствие чего различается величина суммарных электрических потерь в проводниках (3576 Вт при 360° и 3158 Вт при 540°).

Важно отметить, что предложенные трехмерные модели являются высокоаспектными (поскольку длина пазовой части заметно больше ее ширины и высоты), что вкпе со сложной геометрической структурой транс-

позиции приводит к необходимости использования сложной сетки с большим числом степеней свободы (около 5-8 млн). Это обуславливает высокие требования к оперативной памяти используемого компьютера (не менее 256 Гб). Возможной альтернативой является использование т.н. «проволочной» модели, в которой элементарные проводники моделируются в виде бесконечно тонких «проволок» (рис. 7).

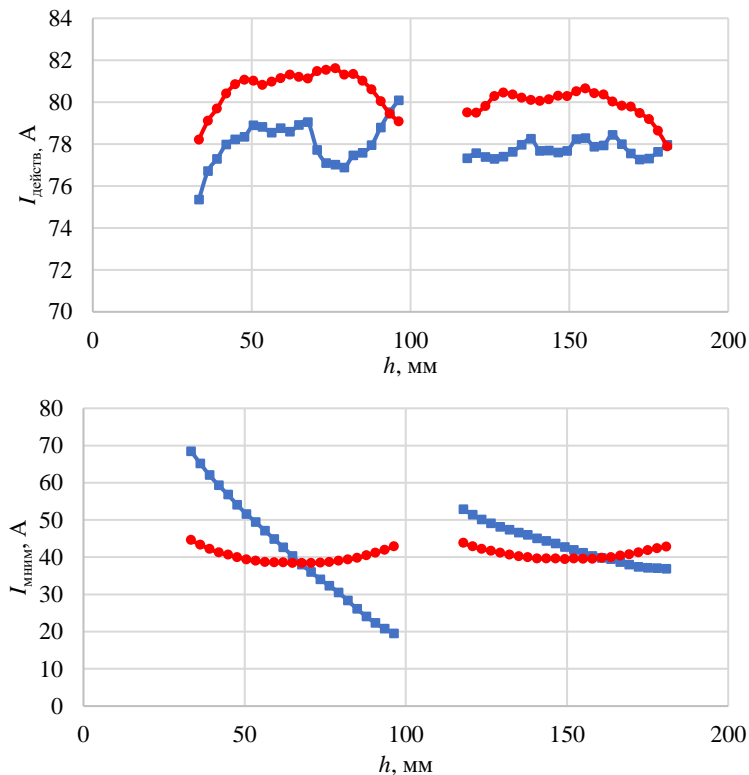


Рис. 5. Сравнение токов в проводниках, расположенных на разной высоте паза при транспозиции:

■ – на 360° ; ● – на 540°

Fig. 5. Comparison of currents in strands located at different height of the slot with transposition:

■ – at 360° ; ● – at 540°

При работе с твердыми телами можно использовать встроенные функции программы, позволяющие автоматически рассчитывать сосредоточенные параметры для каждого проводника. При работе с одномерными «проводами» функционал несколько ограничивается, однако можно записать для каждого проводника уравнение вида [17]:

$$U = I \cdot R - \frac{d\psi}{dt},$$

где U – подводимое напряжение, I – ток проводника, R – активное сопротивление проводника, ψ – потокосцепление, учитывающее как внешнее поле (поля возбуждения и поле от соседних проводников), так и собственное поле проводника:

$$\psi = \int_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l},$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал.

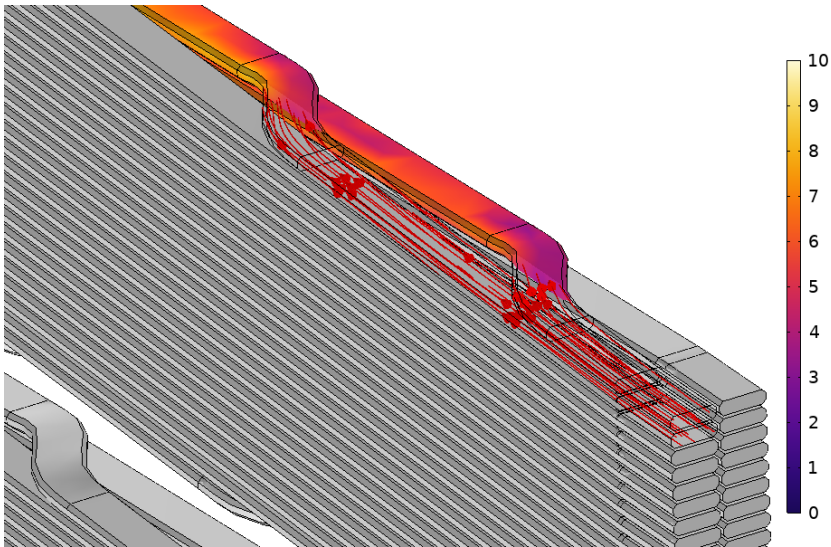


Рис. 6. Картина плотности тока J , представленная в виде цветовой карты (шкала значений модуля плотности тока в A/mm^2) и в виде силовых линий плотности тока

Fig. 6. Current density picture J , presented as a color map (scale of current density modulus values in A/mm^2) and as current density power lines

Такая модель значительно сокращает требования к оперативной памяти (можно использовать компьютер с 8 Гб ОЗУ), при этом она также позволяет получить сосредоточенные и распределенные параметры. Однако подобные упрощения исключают возможность оценки некоторых эффектов (например, «скин-эффект» в сечении проводника).

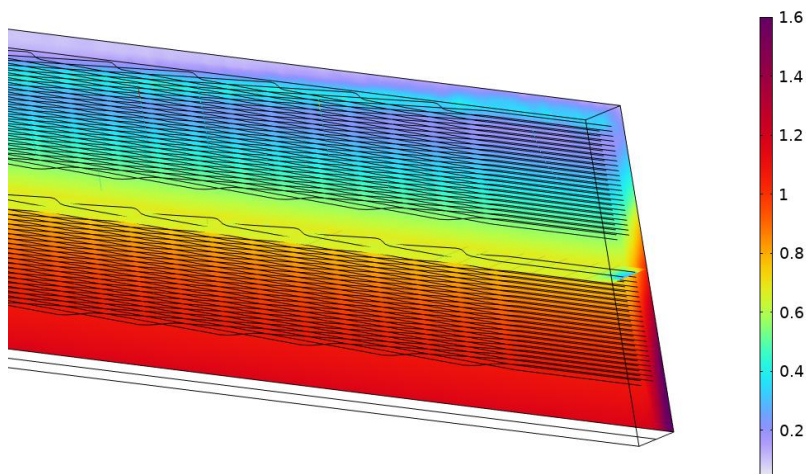


Рис. 7. Упрощенная 3D-модель стержня с транспозицией. Цветовая шкала отражает распределение модуля вектора магнитной индукции B , Тл

Fig. 7. Simplified 3D model of the bar with transposition. The color scale reflects the distribution of the modulus of the magnetic induction vector B , T

Предложенная методика может быть использована для оптимизации стержней новых турбогенераторов и для оптимизации стержней турбогенераторов при капитальном ремонте с целью повышения надежности за счет снижения тепловых нагрузок и как следствие снижения рабочих температур.

III. Заключение

Предложен способ детального анализа электромагнитного состояния стержня обмотки статора турбогенератора с учетом текущего режима работы турбогенератора.

Приведены результаты моделирования состояния стержня турбогенератора ТФ-63-2У3 с учетом транспозиции проводников, показана неравномерность токов при нагрузке. Показано, что транспозиция на 540° позволяет достичь более равномерного распределения токов и, как следствие, бо-

лее низкого тепловыделения, чем на 360°, в связи с чем является более предпочтительной (однако не всегда возможной в связи с ограниченной длиной проводника).

© Дергачев П.А., 2023

© Венцеров М.С., 2023

© Астафьев В.В., 2023

Поступила в редакцию 16.05.2023

Принята к публикации 25.05.2023

Received 16.05.2023

Accepted 25.05.2023

Библиографический список

- [1] Sedlazeck K., Richter C., Strack S., Lindholm S., Pipkin J., Fu F., Humphries B., Montgomery L. Type testing a 2000 MW turbogenerator // 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, May 03-06, 2009, Miami, FL, USA: IEEE, 2009. P. 465-470. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075247
- [2] Извеков В.И., Серихин Н.А., Абрамов А.И. Проектирование турбогенераторов. М.: Издательство МЭИ, 2005. – 440 с.
- [3] Stone G., Culbert I., Boulter E.A., Dhirani H. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. Wiley, IEEE Press Series on Power Engineering, 2014.
- [4] Мантров М.И. Расчет изоляции электрических машин. М.: МЭИ, 1964. – 111 с.
- [5] Самородов Ю.Н. Причины и последствия аварий и отказов турбогенераторов // Энергия единой сети. 2014. № 2 (13). С. 70-80.
- [6] Самородов Ю.Н. Дефекты генераторов. М.: ЗАО «Энергетические технологии», 2005. – 350 с.
- [7] Kerszenbaum I., Klempner G. Large turbo-generators: Malfunctions and symptoms. Boca Raton: CRC Press, 2016 – 586 p.
- [8] Силовые машины // Турбогенераторы. [Электронный ресурс]. URL: <https://power-m.ru/customers/thermal-power/turbogenerators/> (дата обращения 03.05.2023)
- [9] Joho R. Type-tested air-cooled turbo-generator in the 500 MVA range // CIGRE, 2000.
- [10] Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
- [11] Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: «Энергия», 1974 – 504 с.
- [12] Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А., Вартаньян Г.П., Заславский Д.И., Смотров И.А. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. Л.: «Энергия», 1967. – 895 с.
- [13] Кади-Оглы Е.Ф., Шуваев И.Н. Моделирование электромагнитного поля стержневой обмотки статора электрических машин с различными типами транспозиции

- проводников // Электрические станции. 2022. № 11. С. 46-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.1096.11.006>
- [14] Маннанов Э.Р., Филин А.Г. Тепловое состояние электрической изоляции стартовых обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27. № 2. С. 38-49. DOI: 10.18721/JEST.27203
- [15] Ryzhov V.V., Molokanov O.N., Dergachev P.A., Osipkin S.V., Kurbatova E.P., Kurbatov P.A. Three-dimensional mathematical simulation of the stator slot of a turbogenerator, including thermal modeling and flow fluid dynamics // 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Jul. 01-04, 2021, Sofia, Bulgaria: IEEE, 2021. P. 1-4. DOI: 10.1109/ELMA52514.2021.9502987
- [16] COMSOL Multiphysics // Guide to Frequency Domain Wave Electromagnetics Modeling [Электронный ресурс] URL: <https://www.comsol.com/blogs/guide-to-frequency-domain-wave-electromagnetics-modeling> (дата обращения 18.01.2023).
- [17] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.

References

- [1] K. Sedlazeck, C. Richter, S. Strack, S. Lindholm, J. Pipkin, F. Fu, B. Humphries and L. Montgomery, “Type testing a 2000 MW turbogenerator”, in proc. *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, May 03-06, 2009, Miami, FL, USA, pp. 465-470. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075247
- [2] V.I. Izvekov, N.A. Serikhin and A.I. Abramov, *Projectirovanie turbogeneratorov: ucheb. posobie dlya vuzov [Design of turbo generators: textbook for universities]*. Moscow: MPEI Publishing House, 2005 (in Russian).
- [3] G. Stone, L. Culbert, E.A. Boulter and H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. Wiley, IEEE Press Series on Power Engineering, 2014.
- [4] M.I. Mantrov, *Raschet izolyacii elektricheskikh mashin [Calculation of Insulation of Electrical Machines]*. Moscow: MPEI, 1964 (in Russian).
- [5] Y.N. Samorodov, “The causes and consequences of accidents and failures of turbogenerators”, *Energy of Unified Grid*, vol. 2, no. 13, pp. 70-80, Apr.-May 2014.
- [6] Y.N. Samorodov, *Defecty generatorov [Defects of generators]*. Moscow: CJSC “Energeticheskie tekhnologii”, 2005 (in Russian).
- [7] I. Kerszenbaum and G. Klempner, *Large turbo-generators: Malfunctions and symptoms*. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [8] Turbogeneratory [Turbo generators]. [Online]. Available at: <https://power-m.ru/customers/thermal-power/turbogenerators/> [Accessed: May 3, 2023] (in Russian).
- [9] R. Joho, “Type-tested air-cooled turbo-generator in the 500 MVA range”, *CIGRE*, 2000.
- [10] N.L. Kuznetsov, *Nadejnost elektricheskikh mashin [Reliability of electrical machines]*. Moscow: MPEI Publishing House, 2006 (in Russian).
- [11] V.V. Dombrovsky and G.M. Khutoretsky, *Osnovy projectirovaniya elektricheskikh mashin peremennogo toka [Fundamentals of Designing Alternating Current Electrical Machines]*. Leningrad: “Energia”, 1974 (in Russian).

- [12] V.V. Titov, G.M. Khutoretsky, G.A. Zagorodnaya, G.P. Vartanyan, D.I. Zaslavsky and I.A. Smotrov, *Turbogenerator. Raschet i konstruykcia [Turbogenerators. Calculation and design]*. Leningrad: "Energiya", 1967 (in Russian).
- [13] E.F. Kadi-Ogly and I.N. Shuvaev, "Simulation of electromagnetic field of stator winding bars with different types of strands transposition", *Electrical Stations*, no. 11, pp. 46-51, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.1096.11.006>
- [14] E.R. Mannanov and A.G. Filin, "Electrical insulation thermal state of turbine generators stator windings with air-cooling", *Materials Science. Power Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 38-49, 2021. DOI: 10.18721/JEST.27203
- [15] V.V. Ryzhov, O.N. Molokanov, P.A. Dergachev, S.V. Osipkin, E.P. Kurbatova and P.A. Kurbatov, "Three-dimensional mathematical simulation of the stator slot of a turbogenerator, including thermal modeling and flow fluid dynamics", in proc. *2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Jul. 01-04, 2021, Sofia, Bulgaria, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ELMA52514.2021.9502987
- [16] Guide to Frequency Domain Wave Electromagnetics Modeling. [Online]. Available at: <https://www.comsol.com/blogs/guide-to-frequency-domain-wave-electromagnetics-modeling> [Accessed: Jan. 18, 2023].
- [17] L.A. Bessonov, *Theoreticheskie osnovy electrotekhniki: Electrichekieskie cepi [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Electrical Circuits]*. Moscow: Higher School, 1978 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дергачев Павел Андреевич, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

Pavel A. Dergachev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation.

Венцеров Михаил Сергеевич, магистрант Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

Mikhail S. Ventserev, graduate student of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation.

Астафьев Владимир Викторович, советник генерального директора ООО «ЭР», г. Москва, Российская Федерация.

Vladimir V. Astafyev, CEO advisor of the ER LTD, Moscow, Russian Federation.