

Научная статья

УДК 621.313.322

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31207>



Е.Ф. Кади-Оглы<sup>1</sup> ✉, Н.В. Коровкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> «Турбинные технологии ААЭМ», Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ВАРИАНТНОГО РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ТОКОВ, ПОТЕРЬ И ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ В СТЕРЖНЕВОЙ ОБМОТКЕ ЯКОРЯ С КОСВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ЦЕПНО-ПОЛЕВОЙ ПОСТАНОВКИ**

*Аннотация.* В данной статье представлены результаты вариантного расчета потерь и индуктивных сопротивлений рассеяния в пазовых частях стержневых обмоток якоря электрических машин переменного тока с косвенным охлаждением, выполненного на основе решения задачи магнитного поля переменных токов методом конечных элементов в плоской постановке с учетом электрической цепи. Используемая методика учитывает конструкцию и транспозицию элементарных проводников стержней по длине пазовой части якоря, расположение стержней в пазах якоря, особенности пазовой геометрии машин с косвенным охлаждением и схему соединения обмотки якоря. Основана на спрямленной модели электрической машины, которая позволяет упростить задачу без значительной потери точности решения. Для параметров обмоток обобщенной электрической машины в статье представлены зависимости потерь в стержнях обмотки, коэффициентов добавочных потерь (Фильда) и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния от размеров элементарных проводников и геометрических размеров пазов. Проведен анализ влияния изменения данных параметров на энергетические и динамические характеристики машины. Сопоставление полученных результатов дает предпосылки к выполнению поиска оптимальных размеров пазовой геометрии.

*Ключевые слова:* электрическая машина, обмотка якоря с косвенным охлаждением, транспозиция элементарных проводников, моделирование магнитного поля переменных токов, моделирование процессов в элементарных проводниках обмотки якоря, цепно-полевая постановка, потери, индуктивные сопротивления рассеяния, спрямленная модель электрической машины.

*Для цитирования:*

Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Результаты вариантного расчета магнитного поля, токов, потерь и индуктивности рассеяния в стержневой обмотке якоря с косвенным охлаждением электрической машины переменного тока на основе цепно-полевой постановки // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 85–96. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31207>



*E.F. Kadi-Ogly<sup>1</sup> ✉, N.V. Korovkin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> “Turbine Technology AAEM”, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ [e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com](mailto:e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com)

## RESULTS OF VARIANT CALCULATIONS OF MAGNETIC FIELD, CURRENTS, LOSSES, AND LEAKAGE REACTANCE IN THE BAR-TYPE ARMATURE WINDING OF INDIRECTLY COOLED AC ELECTRICAL MACHINE BASED ON FIELD-CIRCUIT FORMULATION

**Abstract.** The article presents the results of variant calculations of magnetic field, currents, losses, and leakage reactances in the slot parts of bar-type armature winding of indirectly cooled AC electrical machines performed on the base of finite element analysis of AC magnetic field problem in a 2D formulation considering electric circuit. The implemented method accounts for the design and transposition of the strands of the bars along the length of the armature slot part, the location of the bars in the armature slots, the features of the indirectly cooled machine slot geometry and the diagram of armature winding connections. The method is based on straighten model of generalized electrical machine, which allows to simplify the problem without considerable loss of the solution accuracy. For the parameters of the windings of a generalized electrical machine, the article presents the dependences of losses in the winding bars, coefficients of stray losses (Field factors) and slot leakage reactances on the dimensions of the strands and geometric dimensions of the slots. An analysis of the impact of parametric variations on the efficiency and dynamic characteristics of the machine is carried out. A comparison of the obtained results provides prerequisites for searching for the optimal dimensions of slot geometry.

**Keywords:** electrical machine, armature winding with indirect cooling, strand transposition, AC magnetic field simulation, simulation of processes in strands of the armature winding, field-circuit formulation, losses, leakage reactances, straighten model of an electrical machine.

### *Citation:*

Kadi-Ogly E.F., Korovkin N.V., Results of variant calculations of magnetic field, currents, losses, and leakage reactance in the bar-type armature winding of indirectly cooled AC electrical machine based on field-circuit formulation, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 85–96, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31207>

**Введение.** Важную роль при проектировании современных электроэнергетических машин играют электромагнитные параметры, которые являются ключевыми для формирования энергетических показателей и обеспечения номинальных и переходных характеристик оборудования энергоблоков электрических станций [1–3]. Они определяют экономичность и надежность оборудования, уровень капиталовложений в реализацию проектной части машинных залов, влияют на выбор электрического оборудования и вспомогательных систем, себестоимость технического обслуживания и эксплуатации. Поэтому задача оценки данных параметров и построения их зависимостей при вариации конструкции ключевых узлов на основании современного опыта численного анализа магнитных полей электрических машин является актуальной.

Известные работы отечественных и зарубежных авторов [4–6] базируются на анализе данных процессов аналитическими методами расчета. Современный этап развития науки в большей степени характеризуется применением методов по решению задач в трехмерной постановке [7–9,

11]. Вместе с тем методики расчета магнитных полей переменного тока, базирующиеся на двумерной [17, 18] и двумерной цепно-полевой постановках [12–15], не утратили своей актуальности ввиду их значительной простоты по сравнению с трехмерными, что важно при проведении многовариантных расчетов и оптимизационных исследований в достаточно короткие сроки на более низких мощностях ЭВМ.

В данной статье представлены результаты вариантного расчета потерь в стержневых обмотках якоря (пазовой части) и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния электрических машин переменного тока с косвенным охлаждением. Расчет выполнен на основе моделирования магнитного поля переменных токов методом конечных элементов в плоскопараллельной (двумерной) цепно-полевой постановке [12–15]. Используемая методика учитывает особенности конструкции и транспозиции элементарных проводников по длине исследуемой области стержней, их расположение в сердечнике якоря, структуру «выкладки» пазов электрических машин с косвенным охлаждением, а также схему соединения обмотки якоря [15]. Она основана на спрямленной модели электрической машины, которая позволяет упростить задачу без значительной потери точности решения [14].

#### Формулировка задачи и математическая модель расчета магнитного поля

В качестве базы для построения методики принята задача магнитного поля переменных токов, в основе которой лежат уравнения Максвелла во временной области. Для их решения использован метод комплексных переменных, где функции являются комплексными отображениями гармонически изменяющихся величин с частотой  $f$  [12–15].

В двумерной плоскопараллельной постановке  $(x, y)$  задача сформулирована в символах комплексного значения векторного магнитного потенциала (все величины, кроме параметров сред, являются комплексными):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - j\omega\gamma A = -\delta_{ext}, \quad (1)$$

где  $A$  – векторный магнитный потенциал;  $\delta_{ext} = \gamma E$  – вектор плотности стороннего тока;  $\delta_{eddy} = j\omega\gamma A$  – вектор плотности вихревого тока;  $\mu$  – тензор магнитной проницаемости среды;  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость среды;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $f$  – частота тока;  $j$  – мнимая единица.

В методике приняты допущения, применяемые для спрямленной модели электрической машины переменного тока с косвенным охлаждением обмотки якоря [15].

Расчеты выполнены на основе обобщенной электрической машины. Данная машина имеет не отнесенные к конкретной машине эквивалентные параметры, конструктивные и физические характеристики, применимые к якорям крупных электрических машин переменного тока косвенным охлаждением и многофазными стержневыми обмотками [1, 2]. Число элементарных проводников в верхнем и нижнем стержнях принято одинаковым, но в практике мощных электрических машин с косвенным охлаждением обмотки якоря и глубокими пазами число проводников в верхнем стержне может приниматься больше, чем в нижнем. Это может быть учтено в методике при расчете конкретного типа машины. Элементы выкладки паза и их размеры (прокладки и клинья) приняты в соответствии с рекомендациями [1, 2], толщина корпусной изоляции – в соответствии с [16]. Параметры обобщенной электрической машины, принятые при вариантном расчете неизменными [15], представлены в табл. 1.

При выборе параметров стержней якоря электрических машин специалисты задают их сечение, исходя из обеспечения плотности тока без учета вытеснения тока в элементарных проводниках

Таблица 1

Параметры обобщенной электрической машины

Table 1

Parameters of generalized electrical machine

Параметр	Величина	Размерность
Номинальное напряжение, $U_n$	10,5	кВ
Номинальный ток, $I_n$	1050	А
Соединение обмотки	звезда	
Частота переменного тока	50	Гц
Число фаз обмотки якоря, $m$	3	
Число пазов якоря, $Z_1$	12	—
Число пар полюсов, $2p$	2	—
Укорочение обмотки	5/6	—
Число витков фазы обмотки, $w$	2	—
Число стержней в пазу, $S_n$	2	—
Число параллельных ветвей обмотки, $a$	2	—
Число элементарных проводников в стержне, $G$	12	—
Транспозиция пазовой части стержней	360	градусы
Диаметр расточки якоря, $D_1$	198	мм
Внешний диаметр якоря, $D_1'$	378	мм
Воздушный зазор, $\delta$	10	мм
Длина пазовой части якоря, $L_z$	1200	мм

(сторонняя плотность тока  $\delta_{ext}$  в уравнении (1)), которая в первом приближении определяет тепловую нагрузку якоря  $AS \cdot \delta_{ext}$ , где  $AS$  — линейная токовая нагрузка [1, 2]. Величина плотности тока выбирается, исходя из типа системы охлаждения, и для высоковольтных обмоток якоря с косвенным охлаждением она принимается не выше 3 А/мм<sup>2</sup>.

В настоящей работе расчеты выполнены на основании вариации размеров элементарных проводников в стержнях якоря обмотки при обеспечении необходимого уровня плотности тока в стержне  $\delta_{ext} \leq 3$  А/мм<sup>2</sup>. Высота  $a$  и ширина  $b$ , а также радиусы закругления на углах сечения проводников выбирались из ряда рекомендованных ГОСТ 22301-77 (актуализирован 06.04.2015). Высота  $h_n$  и ширина паза  $b_n$  обмотки якоря рассчитаны с учетом постоянства параметров, приведенных в табл. 1, с рекомендациями [1, 2, 15, 16]. Перечисленные параметры представлены в табл. 2. Геометрический пример изменения конфигурации пазов от варианта к варианту представлен на рис. 1.

**Конечно-элементная модель спрямленной машины с подключенной электрической цепью**

Конечно-элементная модель данной задачи построена на основе методики, описанной в [12, 15]. При этом принято, что ширина модели определяется длиной окружности расточки якоря обобщенной машины  $\pi D_1$ ; размеры пазов варьируются в зависимости от варианта (в соответствии с табл. 1 и 2); ширина зубца якоря определяется разницей между зубовым шагом  $t_1 = \frac{\pi D_1}{Z_1}$ , который остается постоянным, и шириной паза якоря  $b_n$ . Число расчетных

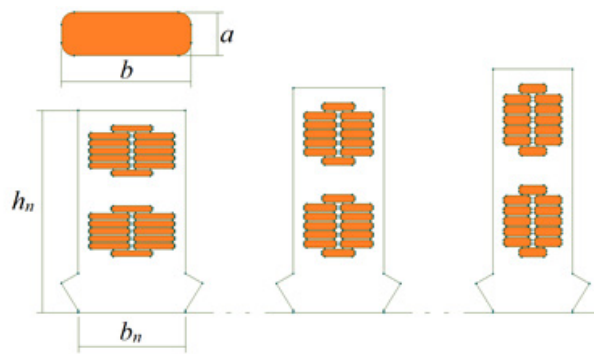


Рис. 1. Геометрический пример изменения конфигурации пазов

Fig. 1. Geometrical example of slot structure modification

Таблица 2

## Параметры конфигурации пазов обмотки якоря

Table 2

## Parameters of slots structure of armature winding

№ п/п	$a$ , мм	$b$ , мм	$S_{\text{пр}}$ , мм <sup>2</sup>	$\delta_{\text{ext}}$ , А/мм <sup>2</sup>	$b_n$ , мм	$h_n$ , мм
1	1,5	10	14,79	2,96	26	49
2	1,6	9,5	14,99	2,92	25	50,4
3	1,7	9	14,94	2,93	24	51,8
4	1,8	8,5	14,94	2,93	23	53,2
5	1,9	8	14,84	2,95	22	54,6
6	2	7,5	14,64	2,99	21	56
7	2,12	7,1	14,69	2,98	20,2	57,68
8	2,24	6,7	14,65	2,99	19,4	59,36

сечений соответствует количеству элементарных проводников, которые транспонируются отдельно в рамках одного стержня.

Конечно-элементная модель задачи для варианта № 1 (табл. 2) представлена на рис. 2.

Каждое из сечений моделирует «срез» по длине якоря машины, на котором определенные проводники в пределах стержня занимают положение в пазу в зависимости от их перемещения при транспозиции ( $0, 30^\circ, \dots, 360^\circ$ ). Переходы элементарных проводников в рамках одного стержня между сечениями происходят дискретно. На верхней и нижней границах каждого сечения модели устанавливается граничное условие Дирихле равенства нулю нормальной составляющей поля ( $A = 0$ ). На боковых границах модели устанавливаются периодические граничные условия (*Aperiod*).

Связь между сечениями конечно-элементной модели осуществляет «соединенная» с ней электрическая цепь, моделируя электрическое соединение между элементарными проводниками, расположенными в различных сечениях.

На рис. 3 представлена данная электрическая цепь, реализованная в программном комплексе ELCUT [11].

Цепь представляет собой 3 фазы, соединенные в звезду, в каждой из которых содержится 1152 элемента, соединенных последовательно в каждой ветви (количество соответствует числу сечений



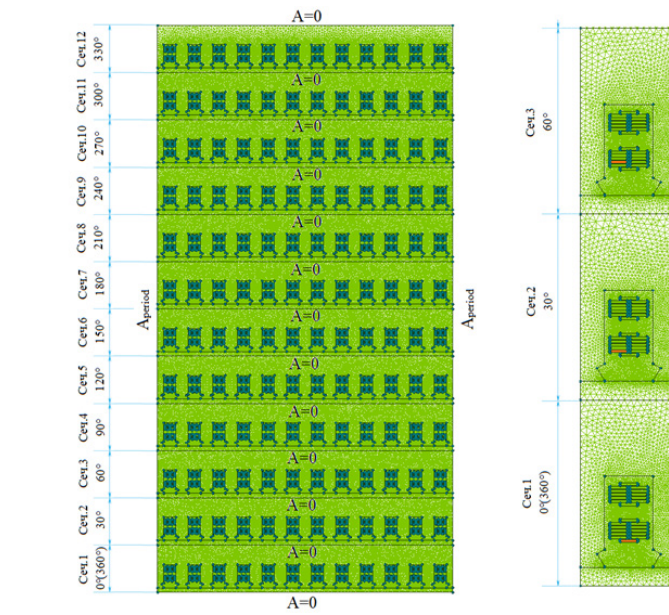


Fig. 2. Geometrical model and finite-element meshing of cross section of straighten electrical machine

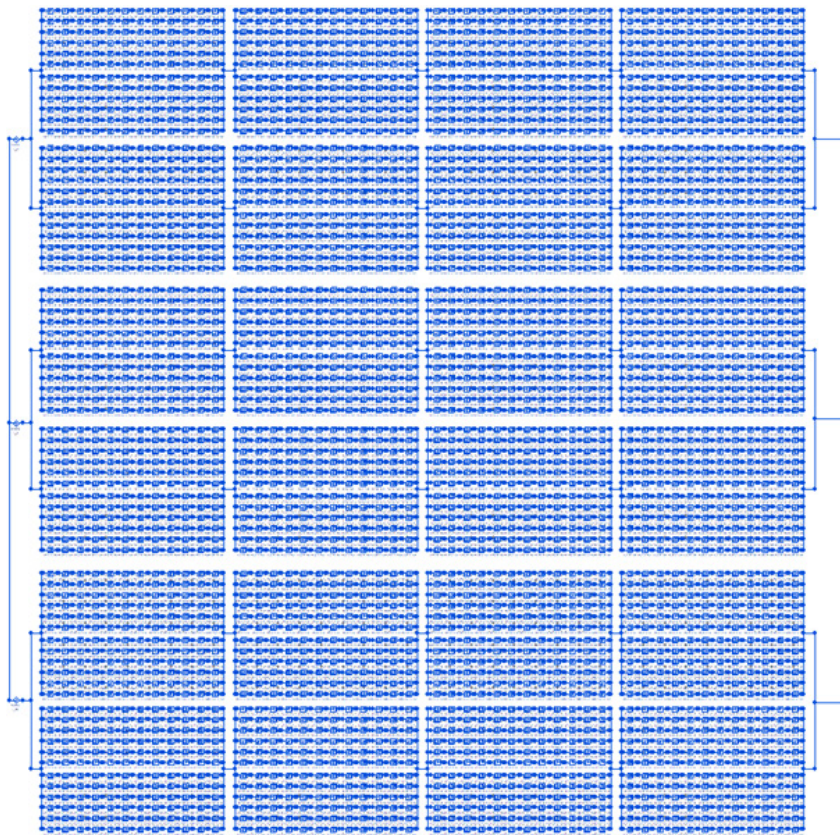


Fig. 3. Electrical circuit of the model realized in ELCUT software [10]

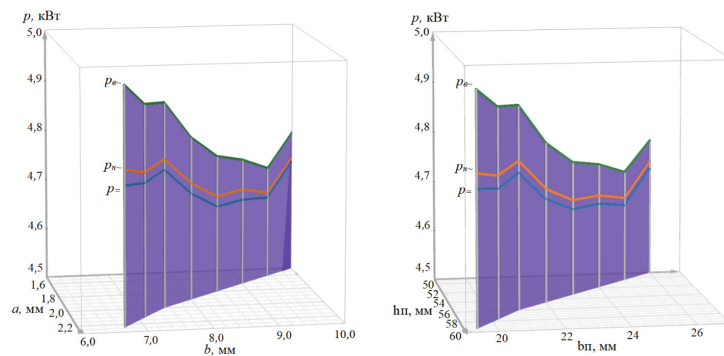


Рис. 4. Потери в обмотке якоря

Fig. 4. Losses in armature winding

— участков транспозиции с шагом  $30^\circ$ ), соединенных параллельно в составе стержня (количество соответствует числу проводников в стержне), соединенных последовательно в составе фазы (количество соответствует числу витков в фазе), соединенных параллельно в составе обмотки (количество соответствует числу параллельных ветвей обмотки). Фазы обмотки статора питаются симметрично от источников тока, которые имеют амплитудное значение  $I_n \sqrt{2} A$ .

### Результаты расчета

Целевыми параметрами в данной работе, определяемыми путем расчета поля при вариации конфигурации пазов, являются потери в обмотке якоря, коэффициенты вытеснения тока (Фильда) и индуктивное сопротивление пазового рассеяния обмотки якоря.

Потери в обмотке якоря (мощности тепловыделения) и коэффициенты Фильда определены на основании расчета поля и методов, описанных в [13–15], где коэффициент Фильда равен отношению потерь при переменном токе к потерям на постоянном.

Индуктивное сопротивление пазового рассеяния  $X_n$  определяется на основании величины потока пазового рассеяния  $\Phi_n$ , полученного путем интегрирования через контур, заданный по высоте паза от дна паза до нижней границы модели [15]. Величина индуктивного сопротивления

пазового рассеяния равна:  $X_n = \omega \frac{\Phi_n w G}{I} \frac{I_n \sqrt{3}}{U_n}$ , где  $I$  – величина действующего значения фазного тока якоря [15].

На рис. 4 представлены зависимости потерь при постоянном токе ( $p_{\pm}$ ) и потерь при переменном токе в верхнем ( $p_{+}$ ) и нижнем ( $p_{-}$ ) стержне, на рис. 5 – коэффициенты Фильда для верхних ( $k_{\Phi_{\text{в}}}$ ) и нижних стержней ( $k_{\Phi_{\text{н}}}$ ), а на рис. 6 – индуктивное сопротивление пазового рассеяния ( $X_n$ ) в зависимости от ширины и высоты элементарного проводника и ширины и высоты паза, построенные на основании расчета вариантов выкладки паза (пазовой геометрии) обобщенной машины.

Кривая изменения потерь в обмотке якоря (рис. 4) соответствует физическим представлениям, что с ростом высоты элементарных проводников стержней растут добавочные потери в обмотке якоря. Экстремальные (пиковые) величины потерь на графиках обусловлены изменением сторонней плотности тока  $\delta_{\text{ext}}$ , определяемой непостоянством сечений проводников, размеры которых определяются стандартной номенклатурой ГОСТ 22301-77. Диапазон изменения потерь в верхних стержнях составляет  $4,72 \div 4,95$  кВт, а нижних –  $4,67 \div 4,69$  кВт. При этом потери в верхних стержнях выше, чем в нижних, что также обусловлено физическим представлением, что из-за вытеснения поля из паза в сторону воздушного зазора машины число потокоцеплений верхних стержней выше, чем у нижних [1, 2, 15] (рис. 7). Омические потери (потери при постоянном токе), определяемые сторонней плотностью тока, соответствуют данным табл. 2.

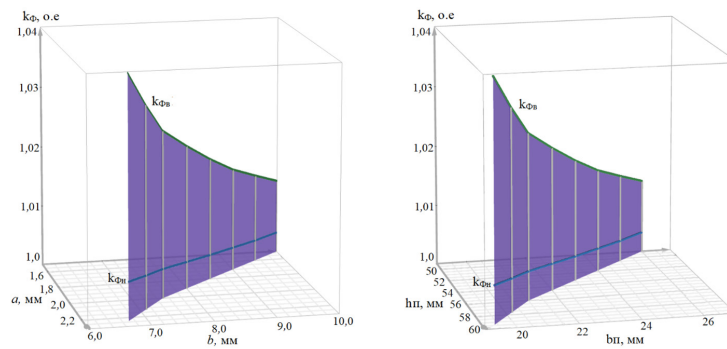


Рис. 5. Коэффициенты Фильда

Fig. 5. Field's coefficients

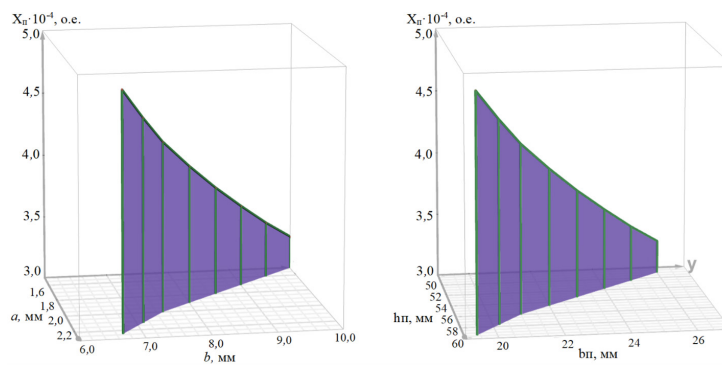


Рис. 6. Индуктивные сопротивления пазового рассеяния

Fig. 6. Slot leakage reactance

Коэффициенты Фильда описывают степень изменения добавочных потерь в обмотке при питании ее переменным током с учетом разницы числа потокоцеплений в верхних и нижних стержнях (рис. 7). Причем коэффициент Фильда верхних стержней изменяется в диапазоне  $1,012 \div 1,039$ , а нижних —  $1,003 \div 1,006$ . Меньшие значения коэффициентов Фильда соответствуют меньшей высоте элементарного проводника, а их максимальные значения — большей высоте.

Величина магнитного потока пазового рассеяния по высоте паза не является постоянной, а увеличивается в сторону воздушного зазора машины (рис. 7). Величина индуктивного сопротивления определяется результирующим значением данного потока. Поток пазового рассеяния обмотки якоря зависит от величины магнитного сопротивления паза, которое при увеличении высоты и снижении ширины паза уменьшается. Вследствие этого изменение индуктивного сопротивления, пропорционального данному потоку, имеет тот же характер. Расчетная величина индуктивного сопротивления пазового рассеяния, выполненного при вариации пазовой геометрии обобщенной машины, имеет диапазон  $(3,25 \div 4,84) \cdot 10^{-4}$  о.е.

При сопоставлении полученных результатов расчета необходимо принимать во внимание, что рост потерь при увеличении высоты элементарных проводников приводит к увеличению потерь короткого замыкания электрической машины и снижению КПД машины, но увеличение индуктивного сопротивления пазового рассеяния при увеличении высоты паза (увеличении высоты элементарных проводников) в совокупности со снижением ширины паза (уменьшением ширины элементарных проводников) снижает величину тока короткого замыкания машины. Данный факт дает первые предпосылки к выполнению поиска оптимальных размеров пазовой геометрии машины.



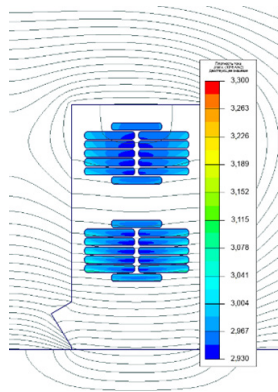


Рис. 7. Распределение магнитного поля пазового рассеяния [15]

Fig. 7. Pattern of slot leakage magnetic field [15]

### Заключение

1. В данной статье представлены результаты вариантного расчета распределения магнитного поля, токов, потерь и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния обмотки якоря электрической машины переменного тока с косвенным охлаждением на основе спрямленной модели с присоединенной электрической цепью обмотки. Расчеты выполнены для различных вариантов размеров элементарных проводников и пазовой геометрии якоря машины.

2. Для параметров обмоток обобщенной электрической машины построены зависимости потерь в стержнях обмотки, коэффициентов добавочных потерь (Фильда) и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния от размеров элементарных проводников и геометрических размеров пазов. Представленные результаты соответствуют физическим представлениям о процессах в обмотках якоря машин переменного тока и о влиянии варьируемых параметров обмоток на характеристики машины.

3. Сопоставление полученных результатов расчета потерь в обмотке якоря и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния статора дает предпосылки к выполнению поиска оптимальных размеров пазовой геометрии машины.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974. 504 с.
- [2] Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А. и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. Л.: Энергия, 1967. 895 с.
- [3] Klemperer G., Kerzenbaum I. Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, NJ: IEEE Press, 800 p.
- [4] Haldemann J. Transposition in stator bars of large turbogenerators, IEEE Transactions on Energy Conversion, 19 (3) (2004) 553–560. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.832067>
- [5] Iseli M.A., Reichert K., Neidhöfer G. Calculation of current distribution and stray losses in arbitrarily transposed stator coils, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, 2 (1988) 47–52.
- [6] Бобков Ю.А. Метод исследования транспозиции проводников стержня обмотки статора по обобщенным схемам // Электричество. 1987. № 8. С. 55–58.
- [7] Дергачев П.А., Венцеров М.С., Астафьев В.В. Моделирование потерь в пазовой части обмотки статора турбогенератора с транспозицией элементарных проводников // Интеллектуальная электротехника. 2023. Т. 24, № 4. С. 4–17. DOI: [https://doi.org/10.46960/2658-6754\\_2023\\_4\\_04](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_4_04)

- [8] 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 17<sup>th</sup> Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), (2021) 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9502987>
- [9] Кади-Оглы Е.Ф., Шуваев И.Н. Моделирование электромагнитного поля стержней 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>
- [10] Бутырин П.А., Дубинский С.Д., Коровкин Н.В. Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля // Электричество. 2014. № 10. С. 66–71.
- [11] Zhang L., Liang Y. A new four-row integral transposition method of stator windings and circulating current loss reduction in large turbo generators, IET Electric Power Applications, 17(1) (2023) 124–133. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12259>
- [12] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов и потерь в обмотке якоря электрической машины переменного тока на основе цепно-полевой постановки // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30201>
- [13] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В., Ильин И.В. Разработка методики расчета электромагнитного поля, токов и потерь в транспонированных стержнях обмотки якоря // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2024. № 3. С. 81–95. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002331024030054>
- [14] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов и потерь в обмотке якоря электрической машины переменного тока на основе спрямленной модели // Энергетик. 2024. № 9. С. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.71527/EP.EN.2024.09.001>
- [15] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов, потерь и индуктивности рассеяния в стержневой обмотке якоря с косвенным охлаждением электрической машины переменного тока на основе спрямленной модели // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. XX–XX. DOI:
- [16] Ярошени Е.И., Пак В.М., Окнин Н.С., Погодина Ж.П. Разработка и исследование терморезистивной системы изоляции высоковольтных электрических машин // Электротехника. 1997. № 12. С. 40–45.
- [17] Selema A., Ibrahim M.N., Sergeant P. Mitigation of High-Frequency Eddy Current Losses in Hairpin Winding Machines, Machines, 10 (5) (2022) 328. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10050328>
- [18] Hebala A., Nuzzo S., Connor P.H., Volpe G., Gerada C., Galea M. Analysis and Mitigation of AC Losses in High Performance Propulsion Motors, Machines, 10 (9) (2022) 780. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10090780>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КАДИ-ОГЛЫ Евгений Федорович** — директор по электроэнергетическому оборудованию, «Турбинные технологии ААЭМ», канд. техн. наук.  
E-mail: [e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com](mailto:e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6042-8195>

**КОРОВКИН Николай Владимирович** — заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.  
E-mail: [nikolay.korovkin@gmail.com](mailto:nikolay.korovkin@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

## REFERENCES

- [1] **V.V. Dombrovskii, G.M. Khutoretskii**, *Osnovy proektirovaniia elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Fundamentals of designing AC electrical machines], Leningrad: Energiia, 1974. 504 p.
- [2] **V.V. Titov, G.M. Khutoretskii, G.A. Zagorodnaia et al.**, *Turbogeneratory. Raschet i konstruktsiia* [Turbogenerators. Calculation and design], Leningrad: Energiia, 1967. 895 p.
- [3] **G. Klempner, I. Kerzenbaum**, *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance*, NJ: IEEE Press, 800 p.
- [4] **J. Haldemann**, Transposition in stator bars of large turbogenerators, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19 (3) (2004) 553–560. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.832067>
- [5] **M.A. Iseli, K. Reichert, G. Neidhöfer**, Calculation of current distribution and stray losses in arbitrarily transposed stator coils, *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines*, 2 (1988) 47–52.
- [6] **Iu.A. Bobkov**, Metod issledovaniia transpozitsii provodnikov sterzhnia obmotki statora po obobshchennym skhemam [Method of studying the transposition of the conductors of the stator winding rod using generalized schemes], *Elektrichestvo* [Electricity], 8 (1987) 55–58.
- [7] **P.A. Dergachev, M.S. Ventsev, V.V. Astafjev**, Modeling of losses in stator windings slot part of turbogenerator with transposition of strands, *Smart Electrical Engineering*, 4 (2023) 4–17. DOI: [https://doi.org/10.46960/2658-6754\\_2023\\_4\\_04](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_4_04)
- [8] **V.V. Ryzhov, O.N. Molokanov, P.A. Dergachev, S.V. Osipkin, E.P. Kurbatova, P.A. Kurbatov**, Three-dimensional mathematical simulation of the stator slot of a turbogenerator, including thermal modeling and flow fluid dynamics, 2021 17<sup>th</sup> Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), (2021) 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9502987>
- [9] **E.F. Kadi-Ogly, I.N. Shuvaev**, Simulation of electromagnetic field of stator winding bars with different types of strands transposition, *Electrical Stations*, 11 (2022) 46–51. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.1096.11.006>
- [10] **P.A. Butyrin, S.D. Dubitskii, N.V. Korovkin**, The Use of Computer Modeling in Teaching the Electromagnetic Field Theory, *Elektrichestvo* (Electricity), 10 (2014) 66–71.
- [11] **L. Zhang, Y. Liang**, A new four-row integral transposition method of stator windings and circulating current loss reduction in large turbo generators, *IET Electric Power Applications*, 17 (1) (2023) 124–133. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12259>
- [12] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin**, Calculation method of magnetic field, currents and losses in the armature winding of AC electrical machine based on field-circuit formulation, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 22–34, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30201>
- [13] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin, I.V. Ilin**, Development of method to calculate the distribution of the magnetic field, currents and losses in transposed bars of armature winding, *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Energetika*, 3 (2024) 81–95. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002331024030054>
- [14] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin**, Calculation method of magnetic field, currents and losses in the armature winding of AC electrical machine on based of straighten model, *Energetik*, 9 (2024) 3–8. DOI: <https://doi.org/10.71527/EP.EN.2024.09.001>
- [15] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin**, Calculation method for magnetic field, currents, losses, and leakage reactance in the bar-type armature winding of indirectly cooled ac electrical machine based on straighten model, *Global Energy*, 31 (02) (2025) XX–XX. DOI:
- [16] **E.I. Iaroshenia, V.M. Pak, N.S. Oknin, Zh.P. Pogodina**, *Razrabotka i issledovanie termoreaktivnoi sistemy izoliatsii vysokovol'tnykh elektricheskikh mashin* [Development and research of thermosetting insulation system of high-voltage electrical machines], *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 12 (1997) 40–45.
- [17] **A. Selema, M.N. Ibrahim, P. Sergeant**, Mitigation of High-Frequency Eddy Current Losses in Hairpin Winding Machines, *Machines*, 10 (5) (2022) 328. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10050328>

[18] A. Hebala, S. Nuzzo, P.H. Connor, G. Volpe, C. Gerada, M. Galea, Analysis and Mitigation of AC Losses in High Performance Propulsion Motors, *Machines*, 10 (9) (2022) 780. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10090780>

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Evgeny F. KADI-OGLY** – *“Turbine technologies AAEM”*.

E-mail: [e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com](mailto:e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6042-8195>

**Nikolay V. KOROVKIN** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.

E-mail: [nikolay.korovkin@gmail.com](mailto:nikolay.korovkin@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

Поступила: 13.05.2025; Одобрена: 19.06.2025; Принята: 27.06.2025.

Submitted: 13.05.2025; Approved: 19.06.2025; Accepted: 27.06.2025.