

Научная статья

УДК 621.313.322

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31205>



Е.Ф. Кади-Оглы¹  , Н.В. Коровкин²

¹ «Турбинные технологии ААЭМ», Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ТОКОВ, ПОТЕРЬ И ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ В СТЕРЖНЕВОЙ ОБМОТКЕ ЯКОРЯ С КОСВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ СПРЯМЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Аннотация. В статье изложена методика расчета распределения магнитного поля, токов, потерь и индуктивных сопротивлений рассеяния в пазовой зоне стержневых обмоток якоря машин переменного тока с косвенным охлаждением, основанная на моделировании магнитного поля переменных токов методом конечных элементов в плоской постановке с учетом электрической цепи. Используемая методика учитывает транспозицию элементарных проводников стержней по длине пазовой части, расположение стержней в пазу статора, особенности пазовой геометрии машины и схему соединения обмотки якоря, что дает возможность моделировать различные режимы работы обмотки. Она реализована на основании спрямленной модели обобщенной электрической машины, которая позволяет упростить задачу без значительной потери точности решения. Сравнительный анализ результатов расчета показывает приемлемость предлагаемой методики, а методика может быть рекомендована при расчете различных режимов, потерь и индуктивных сопротивлений транспонированных обмоток переменного тока при проектировании и анализе электрических машин переменного тока с косвенным охлаждением.

Ключевые слова: электрическая машина, обмотка якоря с косвенным охлаждением, транспозиция элементарных проводников, магнитное поле переменных токов, элементарные проводники, цепно-полевая постановка, потери, индуктивные сопротивления рассеяния, спрямленная модель электрической машины.

Для цитирования:

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. 57–69. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31205>



E.F. Kadi-Ogly¹  , N.V. Korovkin²

¹ “Turbine Technology AAEM”, St. Petersburg, Russia;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

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

Abstract. The paper describes a calculation method for the distribution of the 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 method of AC magnetic field modeling in a 2D formulation considering electric circuit. The implemented method accounts for the transposition of the strands of the bars along the length of the slot part, the location of the bars in the stator slot, the features of the machine slot geometry and the diagram of armature winding connections, giving the opportunity to simulate different conditions of the winding operation. The method is based on straighten model of generalized electrical machine, which allows to simplify the problem without considerable loss of the solution accuracy. A comparative analysis of the calculation results demonstrates the acceptability of the proposed method. This method could be recommended for calculating various modes, losses and inductive reactances of transposed AC windings in the design and analysis of electrical machines with indirect cooling.

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

Citation:

Kadi-Ogly E.F., Korovkin N.V., 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) 57–69, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31205>

Введение. Исследование электромагнитных процессов, основанных на анализе магнитных полей в активных частях крупных электрических машин, является актуальной задачей при конструировании современного электроэнергетического оборудования [1–3]. Наиболее важными при этом являются процессы в пазовых частях стержневых обмоток якорей, которые являются ключевыми с точки зрения энергетических и нагрузочных характеристик машины. Ряд фундаментальных работ отечественных и зарубежных авторов [4–6] базируется на анализе данных процессов аналитическими методами расчета. Современный этап развития электротехники характеризуется популярностью методов по решению данных задач в трехмерной постановке [7, 8, 10]. Однако методы расчета, основанные на исследовании магнитных полей переменного тока в плоской постановке с учетом электрической цепи, не утратили своей актуальности. Такие постановки являются значительно проще трехмерных, что важно при проведении многовариантных расчетов и оптимизационных исследований.

Целью настоящей работы являются оценка и выбор параметров режимов работы стержневых обмоток якоря мощных электрических машин с косвенным охлаждением, где базовой задачей является разработка методологии данных исследований.



В данной статье изложена методика расчета распределения магнитного поля, токов потерь и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния в пазовых частях стержневых обмоток якоря электрических машин переменного тока с косвенным охлаждением, которая основана на моделировании магнитного поля переменных токов методом конечных элементов в плоской постановке с учетом электрической цепи [11–13]. Методика учитывает конструкцию и транспозицию элементарных проводников стержней по длине пазовой части, расположение стержней в пазах якоря, особенности пазовой геометрии машины с косвенным охлаждением и схему соединения обмотки якоря. Она основана на спрямленной модели электрической машины, которая позволяет упростить задачу без значительной потери точности решения [13].

Сравнительный анализ результатов расчета конструкции обобщенной электрической машины переменного тока показывает приемлемость предлагаемой методики, которая может быть рекомендована при расчете потерь и индуктивных сопротивлений транспонированных обмоток якоря при проектировании и анализе электрических машин с косвенным охлаждением.

Постановка задачи

Данная методика основана на решении задачи магнитного поля переменных токов на базе уравнений Максвелла в комплексных переменных, где функции представляют собой комплексные отображения гармонически изменяющихся величин с постоянной частотой f [11–13].

В плоской постановке (x, y) задача формулируется в символах комплексного векторного магнитного потенциала:

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

где A – комплексный векторный магнитный потенциал; $\delta_{ext} = \gamma E$ – комплексный вектор плотности стороннего тока; $\delta_{eddy} = j\omega\gamma A$ – комплексный вектор плотности вихревого тока; μ – тензор магнитной проницаемости среды (в общем случае зависит от координат и напряженности магнитного поля); γ – удельная электрическая проводимость среды (в общем случае зависит от температуры, а в трехмерной постановке – от направления координат); $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; j – мнимая единица.

В методике приняты допущения, применяемые для спрямленной модели обобщенной электрической машины переменного тока [13] с учетом обоснованных рекомендаций [12]. Кроме того, принимается допущение об однородности сердечника якоря – не учитывается его неоднородность по длине, определяемая изоляцией листов электротехнической стали и радиальными вентиляционными каналами. При необходимости это может быть учтено незначительной корректировкой методики [1, 2].

Построение математической модели

Параметры обобщенной электрической машины

Для разработки настоящей методики принята модель электрической машины переменного тока, имеющая обобщенные эквивалентные параметры, не отнесенные к конкретной машине, но учитывающие основные конструктивные и физические соотношения, применимые к якорям электрических машин переменного тока с многофазными стержневыми обмотками и косвенным охлаждением [1, 2]. Расчеты выполнены на основе обобщенной машины, которая имеет параметры, представленные в табл. 1.

Размеры поперечного сечения якоря обобщенной электрической машины приняты в соответствии с обоснованными положениями [12], размеры элементарных проводников – в соответствии

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	
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
Высота паза якоря, h_n	49	мм
Ширина паза якоря, b_n	26	мм
Ширина элементарного проводника стержня, a_{np}	10	мм
Высота элементарного проводника, b_{np}	1,5	мм
Диаметр расточки якоря, D_1	198	мм
Внешний диаметр якоря, D_1'	378	мм
Воздушный зазор, δ	10	мм
Длина пазовой части якоря, L_z	1200	мм

с ГОСТ 22301-77 (актуализирован 06.04.2015), сечение стержней, количество элементарных проводников, элементы выкладки паза и их размеры (прокладки и клинья), размеры пазов и зубцов статора – в соответствии с рекомендациями [1, 2], толщина корпусной изоляции – в соответствии с [14]. Число проводников в верхнем и нижнем стержнях принимается одинаковым, но в практике высокоиспользованных генераторов с косвенным охлаждением обмотки якоря число проводников в верхнем стержне может приниматься больше, чем в нижнем. Этот факт не является определяющим в настоящей работе, но может быть учтен в методике.

Особенности построения спрямленной модели

Для построения спрямленной модели принятые положения [13], что ширина модели соответствует длине окружности расточки якоря обобщенной машины πD_1 ; размеры пазов якоря соответствуют обобщенной машине, ширина зубца якоря соответствует его размеру на уровне расточки статора. Учитывается, что геометрические размеры пазов якоря и расположение в них элементарных проводников, а также их геометрия определяют распределение в них токов и удельных потерь [1, 2]. Количество сечений равно числу элементарных проводников стержней, транспонированных отдельно.

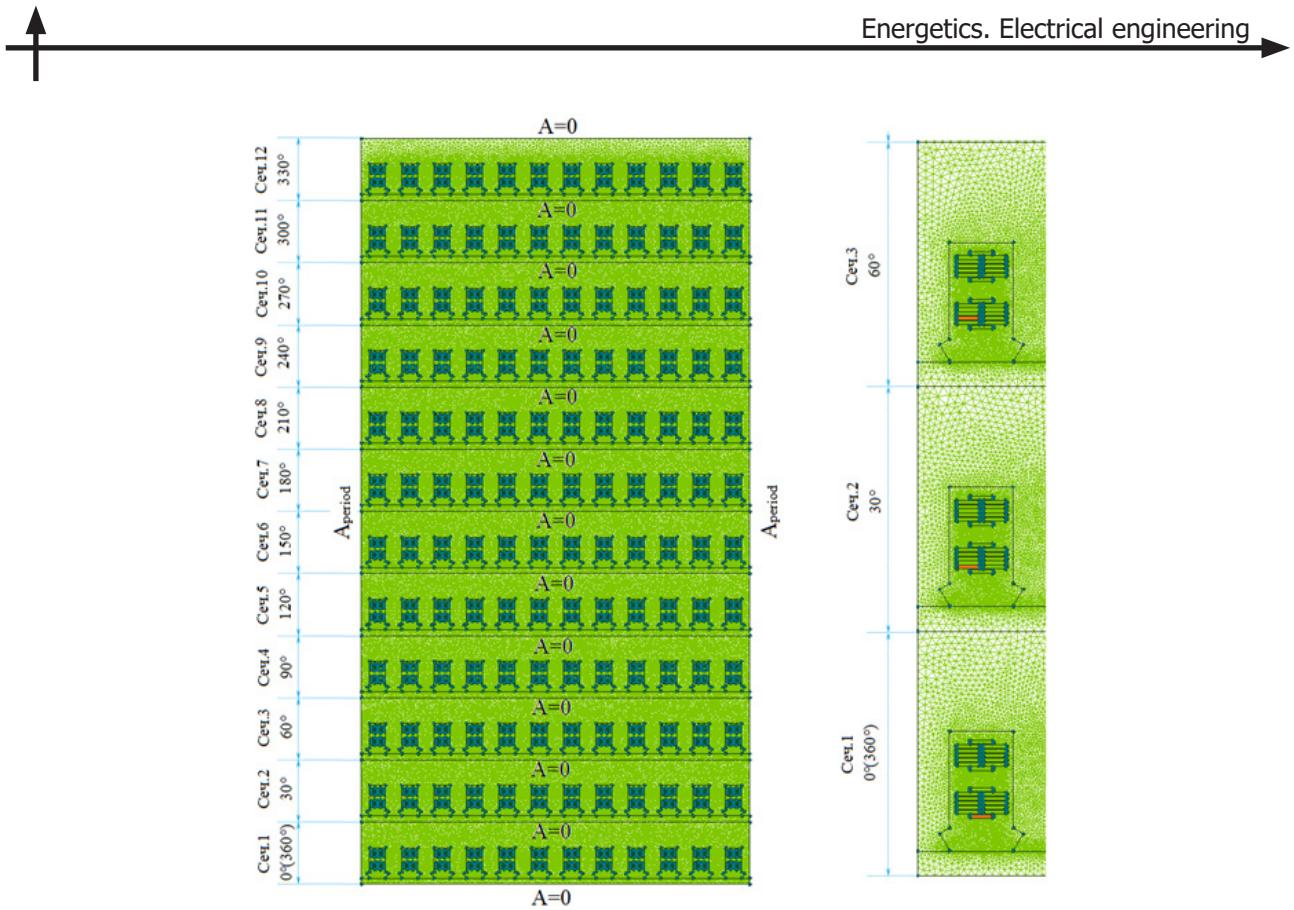


Рис. 1. Геометрическая модель и конечно-элементная дискретизация поперечного сечения спрямленной электрической машины переменного тока с многофазной стержневой обмоткой якоря с косвенным охлаждением

Fig. 1. Geometrical model and finite-element meshing of cross section of AC electrical machine with indirectly cooled multiphase armature winding

Построение конечно-элементной модели спрямленной машины с подключенной электрической цепью

Конечно-элементная модель данной задачи (рис. 1) включает 12 сечений. Каждое сечение дискретно моделирует участок, на котором определенные проводники в пределах своего стержня занимают положение в пазу в зависимости от их перемещения по длине якоря машины при транспозиции ($0, 30^\circ, \dots, 360^\circ$). В правой части рис. 1 показано расположение элементарного проводника при переходе с одного положения в другое при его транспозиции по длине стержня на участках транспозиции 0° – 60° . 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 (A_{period}).

Электрическая цепь осуществляет связь между сечениями, моделируя электрическое соединение между элементарными проводниками, расположенными в различных сечениях. Переходы при транспозиции элементарных проводников в рамках одного стержня происходят дискретно. На рис. 2 представлена электрическая цепь одной фазы обмотки, где:

$U^{(+)}_{1, 1, 1}, \dots, U^{(+)}_{n, k, m}, X^{(+)}_{1, 1, 1}, \dots, X^{(+)}_{n, k, m}$ – элементы фаз обмотки статора (в соответствии с правилами звезды U, V, W, X, Y, Z);

$+(-)$ – обозначение верхнего (нижнего) стержня в пазу, последовательно соединенного с стержнем $-(+)$;

$1, m$ – номера проводников в стержне, начиная с расположенного на верхней их части в сечении 1 ($0^\circ(360^\circ)$) (см. рис. 1). Всего проводников – G ;

$1, k$ – число последовательных витков в фазе обмотки якоря;

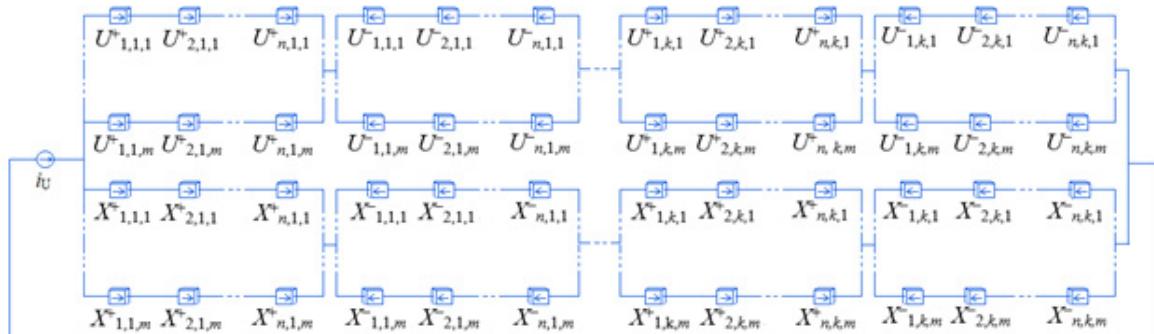


Рис. 2. Электрическая цепь одной фазы обмотки якоря

Fig. 2. Electrical circuit of armature winding single phase

$1, n$ – номер сечения, определяемый углом транспозиции и количеством элементарных проводников в стержне.

Направление стрелок на элементах цепи указывает на их положительное или отрицательное подключение, что позволяет учесть направление тока в конкретном элементе модели, моделируя, что в диаметрально расположенных элементах витка обмотки направление токов противоположное.

На рис. 3 представлена электрическая цепь, сопряженная с конечно-элементной моделью и реализованная в программном комплексе ELCUT [9].

В данной модели электрическая цепь представляет собой 3 фазы, в каждой из которых содержится 1152 элемента, соединенных:

- последовательно в каждой ветви. Количество соответствует числу сечений – участков транспозиции с шагом 30° ;
- параллельно в составе стержня. Количество соответствует числу проводников в стержне;
- последовательно в составе фазы. Количество соответствует числу витков в фазе;
- параллельно в составе обмотки. Количество соответствует числу параллельных ветвей обмотки.

Фазы обмотки статора соединены в звезду и питаются от источников тока, которые имеют следующие параметры:

$$i_U = I_{\text{h}} \sqrt{2} \cos(\omega t); \quad i_V = I_{\text{h}} \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \quad i_W = I_{\text{h}} \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right).$$

Номер каждого проводника строго «привязан» к конкретному проводнику, обладающему заданными свойствами и расположенному в пространстве модели в определенном месте.

Анализ результатов расчета

На рис. 4 представлены результаты расчета распределения магнитного поля при начальных фазах по переменному току 0, $\frac{\pi}{3}$ и $\frac{2\pi}{3}$ эл.град. Равномерное изменение (перемещение полюсов) распределения магнитного поля при его рассмотрении в различные моменты времени (при различных начальных фазах) иллюстрирует его перемещающийся (вращающийся) характер с частотой перемещения (вращения) $N = 60f/p$.

На рис. 5 представлена картина распределения магнитного поля и плотности тока в проводниках стержней в области первого паза первого сечения модели при начальной фазе 0 эл.град.

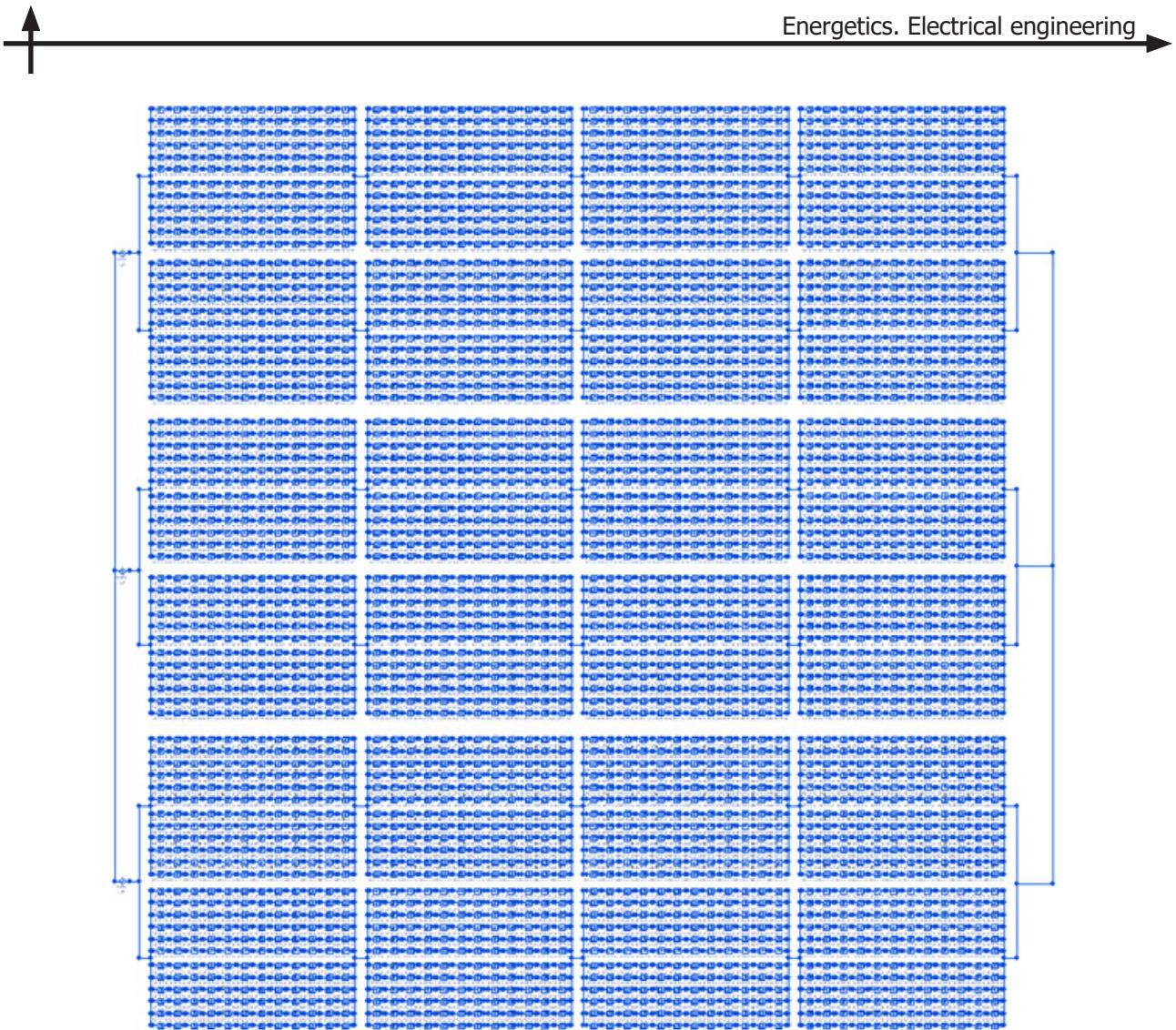


Рис. 3. Электрическая цепь модели, реализованная в программном комплексе ELCUT
 Fig. 3. Electrical circuit of the model realized in ELCUT software

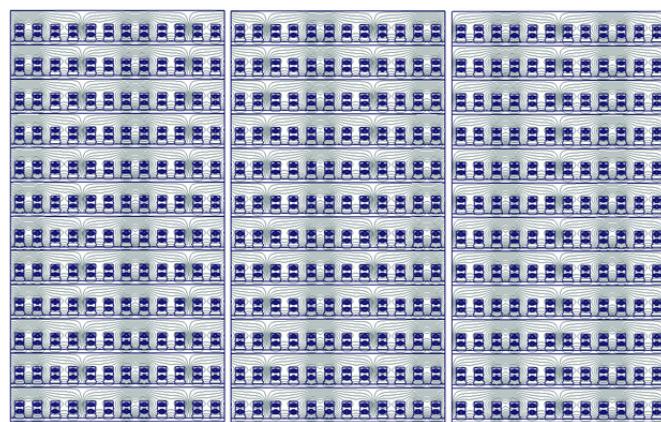


Рис. 4. Распределение магнитного поля при 0 , $\frac{\pi}{3}$ и $\frac{2\pi}{3}$ эл.град.

Fig. 4. Magnetic field pattern at 0 , $\frac{\pi}{3}$ and $\frac{2\pi}{3}$ elec.deg.

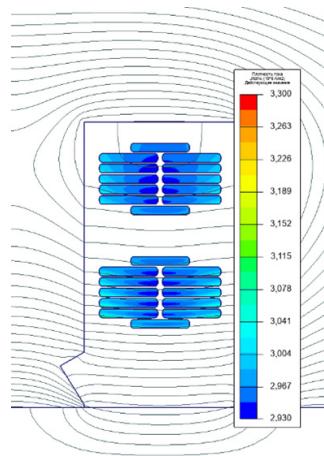


Рис. 5. Распределение плотности тока
Fig. 5. Pattern of current density

Распределение токов соответствует физическому представлению процессов в данном элементе конструкции электрической машины.

Результаты расчета показывают, что величина плотности тока находится в диапазоне 2,93–3,3 А/мм² и соответствует рекомендованным значениям [1, 2]. В пазовой зоне магнитное поле «практически» параллельно расточке статора, мгновенное значение тока в этот момент времени является максимальным в данном пазу, но распределение действующего значения токов во всех пазах одинаковое.

На рис. 6 представлены некоторые результаты расчета электрической цепи, сопряженной с конечно-элементной моделью, при начальной фазе 0 эл.град. Представлены действующее и мгновенное значения тока в фазе U , действующее значение тока через проводник $U_{1, 1, 1}^+$ и напряжения, приложенного к нему. Величина напряжения определяется параметрами каждого проводника в зависимости от его положения в пазу якоря, заданного для определенного сечения модели. Импеданс каждого проводника представляет из себя отношение комплексного значения напряжения, приложенного к каждому элементу цепи, к комплексному полному току, протекающему через него:

$$z = \dot{U}/\dot{I} = \operatorname{Re}(z) + j \operatorname{Im}(z),$$

где \dot{U} – комплексное значение напряжения, \dot{I} – комплексное значение тока, z – импеданс проводника. Действующие значения токов, протекающих в каждом k -м проводнике, равны между собой:

$$I_k = I/(a \cdot G),$$

где I – действующее значение фазного тока.

Следовательно, при $G = 12$, $a = 2$, $I = 1050$ А (табл. 1) ток через k -й проводник равен $I_k = 43,75$ А.

Важными параметрами электрической машины переменного тока являются потери в обмотке, определяющие энергетические показатели машины, коэффициенты вытеснения тока (Фильда), характеризующие степень добавочных потерь в обмотке, поток рассеяния обмотки, влияющий на величины индуктивности рассеяния, переходного и сверхпереходного индуктивных сопротивлений, которые определяют токи, электромагнитные нагрузки и постоянные времена в переходных режимах работы машины.

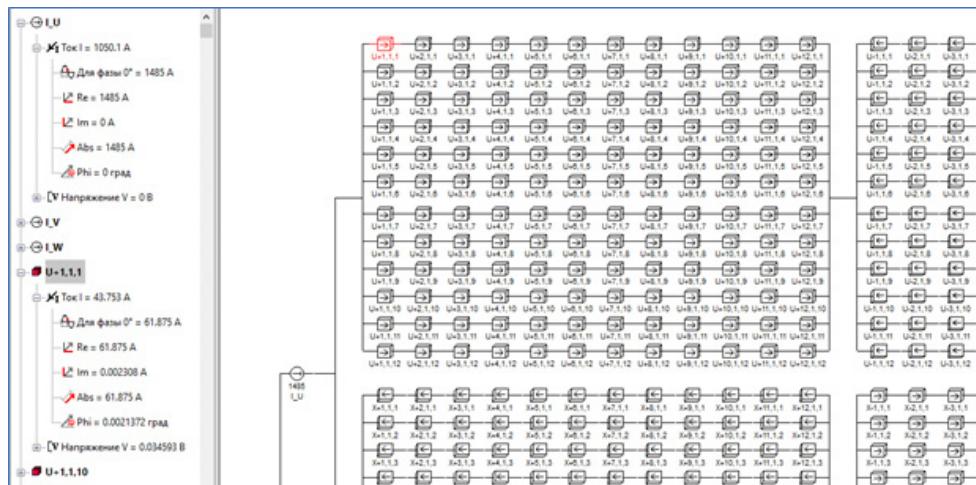


Рис. 6. Результаты расчета электрической цепи

Fig. 6. Results of electrical circuit calculation

В настоящей методике потери в обмотке якоря (мощности тепловыделения) и коэффициенты Фильда определяются на основании расчета поля и методов, описанных в [11–13].

Поток пазового рассеяния Φ_n определяется путем интегрирования через контур, заданный по высоте паза от дна паза до нижней границы модели, включающий воздушный зазор машины, с учетом глубины каждого участка, ограниченного его сечениями модели.

Величина индуктивного сопротивления пазового рассеяния равна:

$$x_n = \omega \frac{\Phi_n w G^\circ}{I} \frac{I_{\text{H}} \sqrt{3}}{U_{\text{H}}},$$

где I – текущая величина фазного тока статора.

В табл. 2 представлены результаты расчета потерь, коэффициентов Фильда и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния, полученных из расчета поля и аналитически [2] для всей обмотки якоря. Ввиду симметричности обмотки якоря результаты расчета потерь для всех пазов якоря являются одинаковыми.

Таблица 2

Потери, коэффициенты Фильда и индуктивные сопротивления пазового рассеяния обмотки якоря

Table 2

Losses, Field's coefficients and slot leakage of armature winding

Тип расчета	Тип стержней якоря	Потери, кВт		Параметр	
		P_{\sim}	P_{-}	k_{Φ}	$X_{\text{нк}}, \text{o.e.}$
Цепно-полевой метод	Верхние стержни	4,772	4,714	1,012	$0,325 \cdot 10^{-3}$
	Нижние стержни	4,730	4,714	1,003	
Аналитический метод [2]	Верхние стержни	4,752	4,714	1,008	$0,327 \cdot 10^{-3}$
	Нижние стержни	4,719	4,714	1,001	

Заключение

1. В данной статье изложена методика расчета распределения токов, потерь и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния обмотки якоря электрической машины переменного тока с косвенным охлаждением на основе спрямленной модели, реализованной в отечественном программном комплексе ELCUT [9].

2. Методика обладает рядом важных преимуществ:

— над аналитическими методами, поскольку позволяет достаточно детально учесть локальные процессы в каждом элементарном проводнике и схему их транспозиции в переделах стержней, схему соединения стержней в обмотке и особенности питания обмотки якоря;

— над современными 3D-моделями, поскольку является математически более простой с точки зрения постановки, маневренной с точки зрения реализации режимов, позволяющей получить результат в наиболее короткие сроки, что является важным при выполнении многовариантных и оптимизационных расчетов.

3. Сравнительный анализ результатов расчета, выполненный для спрямленной модели якоря обобщенной электрической машины, показывает высокую эффективность и приемлемость предлагаемой методики, которая может быть рекомендована при расчете потерь транспонированных обмоток переменного тока при проектировании и анализе электрических машин переменного тока с косвенным охлаждением. Погрешность расчета между полевым и аналитическим расчетами для потерь составляет 0,4% для верхних стержней и 0,2% – для нижних, а для индуктивных сопротивлений пазового рассеяния – 0,6%.

4. Методика позволяет моделировать не только симметричные, но несимметричные и установленные аварийные режимы обмотки якоря.

Дискуссия

Развитием данной модели может являться применение методов искусственного интеллекта для диагностики стержневых обмоток на этапах окончания изготовления, промышленной эксплуатации и при возможных неисправностях. Действительно, в рамках построенной модели можно выполнять моделирование любых замыканий между элементарными проводниками в 12 точках по длине стержня и между каждой парой соприкасающихся стержней. Возможно моделирование более сложных многостержневых замыканий. Каждое из замыканий незначительно изменяет параметры обмотки, которые рассчитываются в рамках рассмотренной методики. Далее группа рассчитанных вариантов замыканий используется для тренировки нейронной сети, которая по изменению параметров способна определять наиболее вероятное место замыкания. Ожидаемые относительные изменения параметров обмоток незначительны и оцениваются нами в доли процента от номинальных значений. Для проверки качества работы нейронной сети используется другая группа замыканий, в которых в рассматриваемой постановке задачи нет недостатка. Созданная, натренированная и проверенная таким образом нейронная сеть может использоваться при эксплуатации машины. Для этого необходима следящая за изменениями эквивалентных параметров измерительная система. Так как измерениям подлежит не сама величина, а ее изменение (дифференциальное измерение), то точность фиксации изменения параметров современными вычислительными средствами может быть весьма высока. Современные измерительные процессоры обеспечивают уровень относительной погрешности дифференциальных измерений $2^{-14} \sim 7 \cdot 10^{-4}$, или менее 0,1%. Соответственно, нейронная сеть будет показывать места появления замыканий между стержнями и место по длине стержней в реальном времени. Отметим также, что обучение, тестирование, а затем и использование нейронной сети могут выполняться и на более высокой частоте, что повысит чувствительность подхода. Авторы хорошо понимают огромный объем сложной работы, стоящий между высказыванием идеи и ее реализацией, но, тем не менее, считают необходимым указать на такую перспективную возможность использования разработанной в данной статье модели.

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] Klempner 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., Венцерев 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
- [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 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), (2021) 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9502987>
- [9] Бутырин П.А., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В. Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля // Электричество. 2014. № 10. С. 66–71.
- [10] 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>
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] 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>
- [14] Ярошения Е.И., Пак В.М., Окнин Н.С., Погодина Ж.П. Разработка и исследование термореактивной системы изоляции высоковольтных электрических машин // Электротехника. 1997. № 12. С. 40–45.
- [15] 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>
- [16] 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

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

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. Klemperer, 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], Elektrичество (Electricity), 8 (1987) 55–58.
- [7] P.A. Dergachev, M.S. Ventserev, 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
- [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 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), (2021) 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9502987>
- [9] P.A. Butyrin, S.D. Dubitskii, N.V. Korovkin, The Use of Computer Modeling in Teaching the Electromagnetic Field Theory, Elektrичество (Electricity), 10 (2014) 66–71.
- [10] 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>
- [11] 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>
- [12] 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, Izvestiâ Akademii nauk SSSR. Ènergetika, 3 (2024) 81–95. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002331024030054>
- [13] 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>

[14] **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.

[15] **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>

[16] **A. Hebara, 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

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

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

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

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

Поступила: 23.01.2025; Одобрена: 19.06.2025; Принята: 27.06.2025.

Submitted: 23.01.2025; Approved: 19.06.2025; Accepted: 27.06.2025.