

Научная статья

УДК 621.3

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31202>



Е.Ю. Кочеткова, А.А. Лебедева, Т.Г. Миневич ✉, *А.Н. Модулина*

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

✉ minevich_tg@spbstu.ru

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ ЛОБОВОЙ ЧАСТИ ОБМОТКИ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА (АСГ) НА ОСНОВЕ МЕТОДА СКАЛЯРНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Аннотация. Рассматривается построение трехмерной расчетной модели магнитного поля на основе замены вихревого поля токов потенциальным полем магнитных зарядов. Метод позволяет ввести в расчетной области, включая области, занятые током, обобщенный скалярный потенциал. Предложенный метод позволяет учитывать разнообразие и сложность конструкции электротехнического устройства, что показывает практический пример построения квазипотенциальной модели, содержащей различные виды фиктивных магнитных зарядов, заменяющих реальные токи. Модель сформирована для расчета магнитного поля, создаваемого секцией лобовой части обмотки асинхронизированного синхронного генератора. Численную реализацию задачи расчета магнитного поля предлагается выполнить вариационным способом с применением метода конечных элементов. Минимизация функционала осуществляется на множестве значений скалярного магнитного потенциала в узлах, являющихся вершинами объемных элементов. Результаты расчета магнитного поля предполагается использовать для дальнейшего расчета индуктивности рассеяния лобовых частей обмоток ротора.

Ключевые слова: магнитное поле, обобщенный скалярный потенциал, лобовая часть, асинхронизированный синхронный генератор, индуктивность рассеяния.

Для цитирования:

Кочеткова Е.Ю., Лебедева А.А., Миневич Т.Г., Модулина А.Н. Расчет индуктивности рассеяния лобовой части обмотки асинхронизированного синхронного генератора (АСГ) на основе метода скалярного потенциала // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 18–28. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31202>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31202>*E.Y. Kochetkova, A.A. Lebedeva, T.G. Minevich* ✉, *A.N. Modulina*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia✉ minevich_tg@spbstu.ru

CALCULATION OF THE LEAKAGE INDUCTANCE OF THE WINDING END PART OF AN ASYNCHRONIZED SYNCHRONOUS GENERATOR (ASG) BASED ON THE SCALAR POTENTIAL METHOD

Abstract. The construction of a three-dimensional calculation model of a magnetic field based on replacing the eddy field of currents with a potential field of magnetic charges is considered. The method allows introducing a generalized scalar potential in the calculation domain, including areas occupied by current. The proposed method allows taking into account the diversity and complexity of the design of an electrical device, which is shown by a practical example of constructing a quasi-potential model containing various types of fictitious magnetic charges replacing real currents. The model is formed to calculate the magnetic field generated by a section of the frontal part of the winding of an asynchronous synchronous generator. Numerical implementation of the problem of calculating the magnetic field is proposed to be performed by a variational method using the finite element method. Minimization of the functional is carried out on a set of values of the scalar magnetic potential at nodes that are vertices of volumetric elements. The results of the magnetic field calculation are supposed to be used for further calculation of the leakage inductance of the end parts of the rotor windings.

Keywords: magnetic field, generalized scalar potential, end part, asynchronous synchronous generator, leakage inductance.

Citation:

Kochetkova E.Y., Lebedeva A.A., Minevich T.G., Modulina A.N., Calculation of the leakage inductance of the winding end part of an asynchronous synchronous generator (ASG) based on the scalar potential method, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 18–28, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31202>

Введение. Значительное число электротехнических и электроэнергетических задач связано с исследованием электромагнитных полей. Разнообразие и сложность форм деталей конструкции современных электротехнических устройств, увеличение электромагнитных нагрузок, а также все более жесткие требования, предъявляемые к точности электромагнитных расчетов, приводят к необходимости трехмерной постановки задачи расчета электромагнитного поля для очень широкого круга проблем: определение параметров заземляющих устройств и создаваемых ими электромагнитных полей [1, 2], моделирование электромагнитного поля вокруг подземных кабелей [3], оптимизация толщины и формы экранов, ослабляющих внешнее магнитное поле [4], расчет магнитного поля электрической машины [5, 6], особенно в торцевой зоне электрической машины, где поле имеет трехмерный характер [7–11].

Теоретическое обоснование расчетного метода

Метод, который основан на применении обобщенного скалярного магнитного потенциала u_m , эффективен с точки зрения экономии вычислительного времени и требуемой памяти [12, 13]. Этот метод позволяет ввести в рассматриваемой области магнитного поля, включая

области, занятые токами, обобщенный скалярный потенциал u_m , что существенно уменьшает объем численных расчетов по сравнению, например, с методами, использующими векторный магнитный потенциал. В основе метода лежит эквивалентность поля линейных электрических токов и двойных слоев магнитных зарядов. Однако способ эквивалентной замены токов магнитными зарядами позволяет рассчитать поле вне зоны токов. Внутри зоны токов искомая напряженность магнитного поля \vec{H} представляется в виде суммы двух составляющих:

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_p,$$

где \vec{H}_0 – вихревая составляющая, $\vec{H}_p = -\text{grad } u_m$ – потенциальная составляющая.

Вектор \vec{H}_0 определяется по заданному распределению вектора плотности тока \vec{J} :

$$\text{rot } \vec{H}_0 = \vec{J}.$$

Задав \vec{H}_0 , рассчитывают объемные плотности ρ зарядов источников потенциального поля из условия $\text{div } \mu \vec{H} = 0$:

$$\text{div } \mu \vec{H}_p = -\text{div } \mu \vec{H}_0 = \rho,$$

где μ – магнитная проницаемость среды.

В некоторых точках, где имеют место разрывы \vec{H}_0 или μ и $\rho = \infty$, вводят в рассмотрение поверхностную дивергенцию, определяющую поверхностную плотность магнитных зарядов σ :

$$\text{div } \mu \vec{H}_0 = -\sigma.$$

Поверхностная дивергенция равна разности нормальных составляющих вектора индукции по обе стороны поверхности.

Задав источники потенциального поля, переходят к решению уравнения Пуассона относительно u_m :

$$\text{div } \mu \text{grad } u_m = -\rho - \sigma \delta_s,$$

где $\sigma \delta_s$ – обобщенная функция¹, называемая простым слоем на поверхности s с плотностью σ .

Решив уравнение Пуассона относительно u_m , затем вычисляют $\vec{H}_\Pi = -\text{grad } u_m$ и определяют искомое поле \vec{H} .

Реализация метода

Рассмотренный способ расчета магнитного поля путем представления его потенциальным полем магнитных зарядов может быть применен для решения актуальных практических задач, в частности – определения индуктивности рассеяния лобовой части обмотки электрической машины со специфическими конструкционными особенностями, а именно с большой длиной лобовой части обмотки. Примером такой машины может служить асинхронизированный синхронный генератор (АСГ). Данная задача требует рассматривать поле как трехмерное, поскольку конфигурация торцевой зоны и характер распределения магнитного поля весьма сложны. Лобовое рассеяние ввиду сложного пространственного расположения лобовых частей обмоток и влияния стали почти не поддается теоретическому расчету, что делает необходимыми разработку

¹ Владимиров В.С., Жаринов В.В. Уравнения математической физики. М: Физматлит, 2008. 400 с.

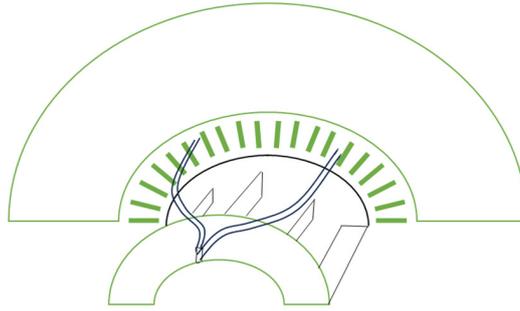


Рис. 1. Расчетная область торцевой зоны

Fig. 1. Calculated area of the end zone

и использование численного алгоритма расчета поля и индуктивности рассеяния лобовой части обмотки. Ее величина представляет собой существенный интерес при проектировании новых электрических машин. Определенное упрощение задачи может быть достигнуто благодаря конструктивным особенностям конкретной машины. Так, при расчете поля торцевой зоны АСГ, являющейся четырехполюсной машиной, допустимо разделить торцевую зону плоскостью симметрии, и тогда область расчета будет включать в себя половину торцевой зоны (рис. 1).

При формулировке граничных условий для скалярного магнитного потенциала особое внимание следует уделить поверхности, отделяющей активную зону машины от торцевой зоны, так как она несплошная из-за зазора между ротором и статором и, кроме того, она пересекается витками обмотки. Однако если зазор мал (в АСГ он не превышает 5 мм), то влиянием зазора можно пренебречь и считать граничную поверхность между активной и торцевой зонами сплошной. Поскольку материал статора и ротора ферромагнитный, то на этой границе скалярный магнитный потенциал принимает постоянное (нулевое) значение. Возмущение магнитного поля вблизи зубцов можно не учитывать, так как поле этого возмущения слабо сцепляется с витками роторной обмотки.

Чтобы рассчитать индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора, необходимо рассчитать элементарные потокосцепления взаимной индукции Ψ_{q1} с каждой секцией q от тока одной секции I . Таким образом, достаточно рассмотреть магнитное поле, создаваемое током одной секции обмотки. Пренебрежение эффектом насыщения стали при рассмотрении поля только одной секции не сказывается в данном случае на точности расчетов, поскольку даже при малых значениях магнитной проницаемости стали силовые линии практически перпендикулярны ферромагнитным поверхностям. Таким образом, если не интересоваться полем внутри стальных частей (что и имеет место при расчете индуктивности рассеяния обмотки, находящейся в воздухе), то с точки зрения граничных условий на поверхности стали насыщение стали не имеет значения.

Формирование расчетной модели при определении магнитного поля в торцевой зоне зависит от того, в какой форме будут представлены токоведущие части. Можно строить модель для спрямленной машины. Тем не менее учет конечного радиуса кривизны обмотки обеспечивает большую точность модели. Важным параметром, который учитывается при построении модели, является шаг обмотки, определяющий расстояние между активными сторонами секции. В рассматриваемой машине это расстояние достаточно велико (около 70 геометрических градусов), поэтому кривизна обмотки при построении модели должна быть учтена.

Построение расчетной модели секции основывается на замене ее витком, целиком расположенным в торцевой зоне. Такой подход соответствует методу зеркальных изображений. Считая

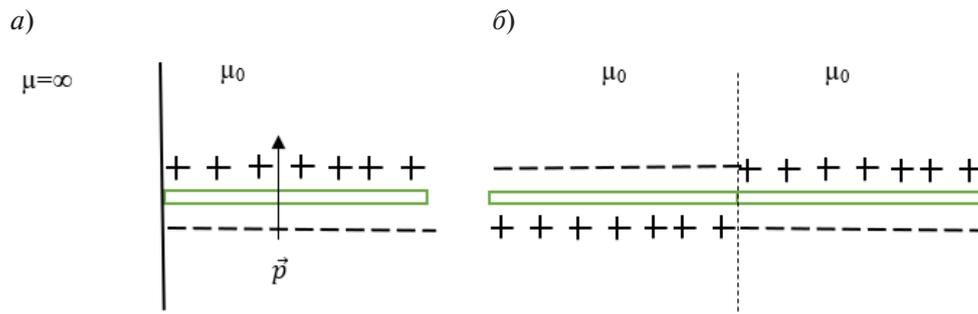


Рис. 2. Расчетная модель сечения (а) и ее представление в методе зеркальных изображений (б)

Fig. 2. Computational model of the section (a) and its representation in the mirror image method (b)

в первом приближении виток бесконечно тонким, ток витка i можно заменить (рис. 2а) натянутым на виток двойным слоем зарядов [14, 15] с моментом

$$\vec{p} = \mu_0 i \vec{n},$$

где \vec{n} – вектор единичной к поверхности двойного слоя нормали.

Согласно методу зеркальных изображений, ферромагнитная среда ротора и статора заменяется на воздушную среду, в которой появляется зеркальное отражение витка: двойной слой магнитных зарядов противоположной полярности (рис. 2б). Как видно из рис. 2б, в области границы раздела сред имеет место компенсация зарядов реального витка и витка-отражения. Вследствие этого двойной слой зарядов, имитирующий виток, не соприкасается с поверхностью границы раздела, что позволяет задавать на поверхности однородное граничное условие I рода.

Для более точного расчета магнитного поля сечения обмотки ротора необходимо учитывать ее конечные размеры и достаточно сложную форму лобовой части сечения. Виток, заменяющий сечение, разделен на четыре составные части (рис. 3): 1 – верхний стержень, 2 – нижний стержень, 3 – соединительная часть (головка), 4 – токовая лента, бесконечно тонкая в осевом направлении, замыкающая ток витка. Учитывая конфигурацию стержней обмотки, для расчета поля \vec{H}_0 выбирается цилиндрическая система координат, ось z которой совпадает с осью машины.

Расчет составляющих вектора \vec{H}_0 для участков 1 и 2 (рис. 3) производится интегрированием вектора плотности тока витка \vec{J} от левой граничной поверхности верхнего стержня l_0 (рис. 4) в направлении $d\vec{l} = r \cdot \vec{e}_\phi d\phi$. При этом $H_0 = H_{0r}$. Поскольку участки 1 и 2 отличаются по координате r , то образуется теневая область поля вектора \vec{H}_0 . Для минимизации области, в которой $H_0 \neq 0$, на правых граничных поверхностях участков 1 и 2 вводятся фиктивные поверхностные токи [15]. На рис. 4 они показаны для участка 1 (для верхнего стержня): противоположный току витка добавочный ток плотности $\vec{j}_{d1} = H_{0r}$ и компенсирующий его ток плотности $\vec{j}_{k1} = -\vec{j}_{d1}$. Для участка 2 (для нижнего стержня) вводятся, соответственно, добавочный ток плотности \vec{j}_{d2} и компенсирующий его ток плотности $\vec{j}_{k2} = -\vec{j}_{d2}$. Поскольку $\frac{\partial H_0}{\partial r} = 0$, то объемный магнитный заряд в рассматриваемой области не образуется².

На верхней S_{v1} и нижней S_{n1} поверхностях стержня 1 (рис. 4) нормальная составляющая вектора \vec{H}_0 (обозначенная H_{0r}) претерпевает скачок, что ведет к появлению простых слоев заряда плотности $\sigma = \pm \mu_0 H_{0r}$ на указанных поверхностях. При расчете \vec{H}_0 в участке 3 (рис. 3)

² Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. СПб: Питер, 2003. 463 с.

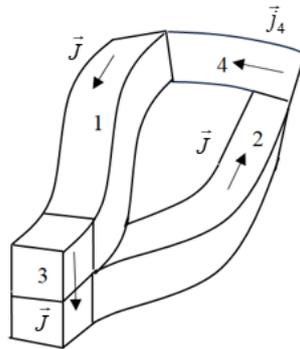


Рис. 3. Составные части витка: 1 – верхний стержень, 2 – нижний стержень, 3 – соединительная часть (головка), 4 – токовая лента, бесконечно тонкая в осевом направлении, замыкающая ток витка
 Fig. 3. Components of the coil: 1 – the upper rod, 2 – the lower rod, 3 – the connecting part (head), 4 – the current tape, infinitely thin in the axial direction, closing the current of the coil

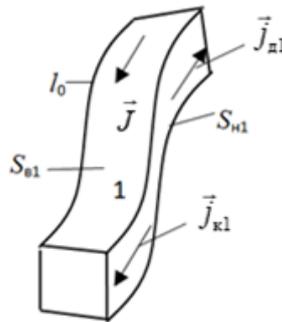


Рис. 4. Фиктивные поверхностные токи для верхнего стержня
 Fig. 4. Fictitious surface currents for the upper rod

с учетом направления вектора плотности тока $J = J_r$ (рис. 3) и направления интегрирования $d\vec{l} = r \cdot \vec{e}_\varphi d\varphi$ имеем $H_0 = H_{0z}$. Объемные заряды в участке 3 отсутствуют, поскольку $\frac{\partial H_0}{\partial z} = 0$, но на граничных поверхностях участка 3, перпендикулярных оси z , появятся простые слои зарядов плотностью $\sigma = \pm \mu_0 H_{0z}$. Для ограничения области, где составляющая H_{0z} отлична от нуля, по аналогии с участками 1 и 2, добавляются поверхностный ток плотности $\vec{j}_{д3}$ и компенсирующий ток $\vec{j}_{к3} = -\vec{j}_{д3}$. На участке 4 ток витка замыкается посредством поверхностного тока плотности \vec{j}_4 (рис. 3). Поверхностные токи $\vec{j}_{к1}$, $\vec{j}_{к2}$, $\vec{j}_{к3}$ и \vec{j}_4 заменяются двойными слоями магнитных зарядов, след поверхностей которых в сечении обмотки, перпендикулярном оси z , изображен на рис. 5а, а след в сечении, перпендикулярном оси r , – на рис. 5б.

Величина момента двойного слоя зарядов изменяется по линейному закону:

- на отрезке ab $p = \mu_0 j_{к1} (r - r_{01})$, где r_{01} – координата поверхности $S_{н1}$;
- на отрезке cd $p = -\mu_0 j_{к2} (r - r_{02})$, где r_{02} – координата поверхности $S_{н2}$;
- на отрезке ef $p = \mu_0 j_4 r (\varphi - \varphi_0)$, где φ_0 – координата левой поверхности нижнего стержня;
- на отрезке mn $p = -\mu_0 j_{к3} (z - z_0)$, где z_0 – координата граничной поверхности сечения.

На линиях bc и fm момент сохраняет постоянное значение: $p = \mu_0 i$, где i – ток сквозь сечение стержня.

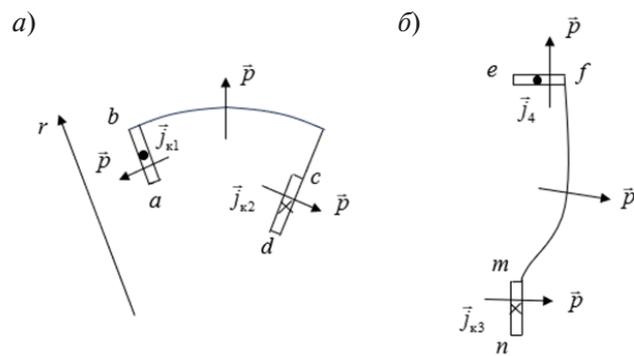


Рис. 5. Следы поверхностей двойных слоев магнитных зарядов в сечениях: перпендикулярном оси z (а), перпендикулярном оси r (б)

Fig. 5. Traces of surfaces of double layers of magnetic charges in sections: perpendicular to the z -axis (a), perpendicular to the r -axis (b)

Таким образом, построена квазипотенциальная модель магнитного поля торцевой зоны машины, создаваемого одной секцией обмотки. Компактное расположение магнитных зарядов в модели и отсутствие объемных зарядов являются ее достоинством и упрощают расчет магнитного поля и последующий расчет индуктивности рассеяния лобовой части обмотки.

Для численного решения уравнения Пуассона рекомендован метод конечных элементов, имеющий ряд достоинств: возможность аппроксимирования любой границы с высокой степенью точности; возможность варьирования размеров объемных элементов, что важно при расчете неоднородных полей; обеспечение автоматического выполнения условия непрерывности искомой величины и ее производных на поверхностях соседних элементов; возможность точного учета физических свойств среды (магнитная проницаемость, наличие заряда) в исследуемой области; возможность повышения точности решения за счет использования конечных элементов более высоких порядков, что имеет значение при исследовании полей в случае сильной неоднородности поля.

Цель расчета магнитного поля методом конечных элементов заключается в получении значений скалярного магнитного потенциала u_m , удовлетворяющих уравнению Пуассона, в узлах разбиения области расчета. Вариационный подход к решению уравнения Пуассона с граничными условиями Дирихле или Неймана состоит в нахождении минимума энергетического функционала $I(u_m)$ – интегральной величины, связанной с физическим процессом и пропорциональной энергии поля, заключенной в объеме расчетной области v [15]:

$$I(u_m) = \int_v 0,5 \hat{\mu} (\text{grad } u_m)^2 dv - \int_v \rho u_m dv - \int_v \sigma u_m ds,$$

где s – поверхность с поверхностной плотностью зарядов σ , $\hat{\mu}$ – тензор магнитной проницаемости среды.

Функционал достигает экстремума при совпадении потенциала u_m с решением уравнения Пуассона. Минимизация функционала осуществляется на множестве узловых значений потенциала.

Рассмотренная квазипотенциальная модель использовалась при расчете трехмерного стационарного магнитного поля в торцевой зоне АСГ и индуктивности рассеяния лобовой части отдельно взятой секции фазы обмотки. Индуктивность рассеяния, определенная в предположении, что витки весьма тонкие, хорошо согласуется с оценочным значением индуктивности, полученным по практическим методикам (0,3 мГн). Индуктивность, рассчитанная по результатам расчета

поля витка конечного размера, существенно меньше и составляет 0,09 мГн. Это позволяет сделать вывод о необходимости учета размеров сечения секции при расчете индуктивности рассеяния обмоток с определенными геометрическими особенностями (отношение размеров сечения к расстоянию между прямым и обратным стержнями секции превышает 0,1).

Заключение

Рассмотренный алгоритм расчета магнитного поля на основе скалярного магнитного потенциала и векторной функции тока дает возможность использовать расчетные модели магнитного поля, содержащие все типы магнитных зарядов (источников квазипотенциального магнитного поля) в задачах, отличающихся разнообразием геометрий расчетной области и пространственного распределения токов в ней. Данный подход позволяет учитывать нелинейные и анизотропные свойства среды, определять, наряду со скалярным магнитным потенциалом, и другие характеристики поля – напряженность, магнитные потоки, что важно при решении широкого круга практических задач, для реализации которых необходим расчет трехмерного магнитного поля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Коровкин Н.В., Шишигин С.Л.** Расчетные методы в теории заземления // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. Т. 166, № 1. С. 74–79.
- [2] **Shneerson G.A., Shishigin S.L.** Features of the application of the virial theorem for magnetic systems with quasi-force-free windings, *Technical Physics*, 68 (2023) S595–S606. DOI: 10.1134/S1063784223900929
- [3] **Dubitsky S.D., Greshnyakov G.V., Korovkin N.V., Chesnokov E.A.** Electric strength test of a new and aged XPLE-insulated power cable: a Weibull statistic approach, 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2022) 1163–1166. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755588
- [4] **Canova A., Freschi F., Giaccone L., Repetto M.** Optimal design of closed multilayer magnetic shields, 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – Italy (ACES), (2017) 1–2. DOI: 10.23919/ROPACES.2017.7916413
- [5] **Demenko A.** Finite element modeling of magnetic field in electrical machines: Scalar or vector potential formulation part I: Comparative description of methods, 2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), (2016) 1–6. DOI: 10.1109/WZEE.2016.7800208
- [6] **Guo B., Djelloul-Khedda Z., Dubas F.** Nonlinear analytical solution in axial flux permanent magnet machines using scalar potential, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71 (4) (2024) 3383–3393. DOI: 10.1109/TIE.2023.3273247
- [7] **Bodrenkov E.A., Kochetkova E.Y., Lebedeva A.A., Modulina A.N.** Calculations of the magnetic fields of the end zone of the asynchronized synchronous generator (ASG) by the scalar potential method, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2021) 1245–1247. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396403
- [8] **Zheleznyak V.N., Burmistrov A.A., Korovkin N.V., Adalev A.S.** Simulation of operating condition of the equipment of the short-circuit generator package, 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon), (2024) 865–868. DOI: 10.1109/EICon61730.2024.10468512
- [9] **Jiang H.-C., He Y.-L., Tang G.-J., Xu M.-X.** A comprehensive analysis on transient electromagnetic force behavior of stator windings in turbo-generator, *Mathematical Problems in Engineering*, 2018 (1) (2018) 189609. DOI: 10.1155/2018/4189609

- [10] Lyamin A.A., Gulai S.L., Verkhovtsev D.A., Chishko S.D. Application of the method of visualization of polyharmonic vibration structures, *Power Technology and Engineering*, 54 (2021) 929–932. DOI: 10.1007/s10749-021-01308-0
- [11] Roytgarts M., Smirnov A. Turbogenerator electromagnetic analysis with changing reactive load, 20th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'22), 20 (2022) 434–437. DOI: 10.24084/repqj20.333
- [12] Park J.O., Lee J.S., Park I.H. Magnetic Field analysis of electric current in coplanar coils using equivalent permanent magnetization and magnetic scalar potential, *IEEE Access*, 12 (2024) 27556–27565. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3354060
- [13] 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: 10.18721/JEST.30201
- [14] Ishibashi K., Andjelic Z., Takahashi Y., Takamatsu T., Fukuzumi T., Wakao S. Magnetic field evaluation at vertex by boundary integral equation derived from scalar potential of double layer charge, *IEEE Transactions on Magnetics*, 48 (2) (2012) 459–462. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2174777
- [15] Демирчян К.С., Чечурин В.Л. Расчет вихревых магнитных полей на основе использования скалярного магнитного потенциала // *Электричество*. 1982. № 1. С. 7–14.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЧЕТКОВА Елена Юрьевна — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: k_ey@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2807-4688>

ЛЕБЕДЕВА Алла Анатольевна — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: alla280318@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0168-1288>

МИНЕВИЧ Татьяна Геннадьевна — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: minevich_tg@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8137-2479>

МОДУЛИНА Александра Николаевна — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: modulina@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8860-3022>

REFERENCES

- [1] N.V. Korovkin, S.L. Shishigin, Calculation methods in the grounding theory, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 1 (166) (2013) 74–79.
- [2] G.A. Shneerson, S.L. Shishigin, Features of the application of the virial theorem for magnetic systems with quasi-force-free windings, *Technical Physics*, 68 (2023) S595–S606. DOI: 10.1134/S1063784223900929
- [3] S.D. Dubitsky, G.V. Greshnyakov, N.V. Korovkin, E.A. Chesnokov, Electric strength test of a new and aged XPLE-insulated power cable: a Weibull statistic approach, 2022 Conference of Russian Young

Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2022) 1163–1166. DOI: 10.1109/EI-ConRus54750.2022.9755588

[4] **A. Canova, F. Freschi, L. Giaccone, M. Repetto**, Optimal design of closed multilayer magnetic shields, 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – Italy (ACES), (2017) 1–2. DOI: 10.23919/ROPACES.2017.7916413

[5] **A. Demenko**, Finite element modeling of magnetic field in electrical machines: Scalar or vector potential formulation part I: Comparative description of methods, 2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), (2016) 1–6. DOI: 10.1109/WZEE.2016.7800208

[6] **B. Guo, Z. Djelloul-Khedda, F. Dubas**, Nonlinear analytical solution in axial flux permanent magnet machines using scalar potential, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 71 (4) (2024) 3383–3393. DOI: 10.1109/TIE.2023.3273247

[7] **E.A. Bodrenkov, E.Y. Kochetkova, A.A. Lebedeva, A.N. Modulina**, Calculations of the magnetic fields of the end zone of the asynchronized synchronous generator (ASG) by the scalar potential method, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2021) 1245–1247. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396403

[8] **V.N. Zheleznyak, A.A. Burmistrov, N.V. Korovkin, A.S. Adalev**, Simulation of operating condition of the equipment of the short-circuit generator package, 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon), (2024) 865–868. DOI: 10.1109/EICon61730.2024.10468512

[9] **H.-C. Jiang, Y.-L. He, G.-J. Tang, M.-X. Xu**, A comprehensive analysis on transient electromagnetic force behavior of stator windings in turbo-generator, Mathematical Problems in Engineering, 2018 (1) (2018) 189609. DOI: 10.1155/2018/4189609

[10] **A.A. Lyamin, S.L. Gulai, D.A. Verkhovtsev, S.D. Chishko**, Application of the method of visualization of polyharmonic vibration structures, Power Technology and Engineering, 54 (2021) 929–932. DOI: 10.1007/s10749-021-01308-0

[11] **M. Roytgarts, A. Smirnov**, Turbogenerator electromagnetic analysis with changing reactive load, 20th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'22), 20 (2022) 434–437. DOI: 10.24084/repqj20.333

[12] **J.O. Park, J.S. Lee, I.H. Park**, Magnetic Field analysis of electric current in coplanar coils using equivalent permanent magnetization and magnetic scalar potential, IEEE Access, 12 (2024) 27556–27565. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3354060

[13] **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: 10.18721/JEST.30201

[14] **K. Ishibashi, Z. Andjelic, Y. Takahashi, T. Takamatsu, T. Fukuzumi, S. Wakao**, Magnetic field evaluation at vertex by boundary integral equation derived from scalar potential of double layer charge, IEEE Transactions on Magnetics, 48 (2) (2012) 459–462. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2174777

[15] **K.S. Demirchian, V.L. Chechurin**, Raschet vikhrevykh magnitnykh polei na osnove ispol'zovaniia skaliarnogo magnitnogo potentsiala, Elektrichestvo, 1 (1982) 7–14.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Elena Y. KOCHETKOVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: k_ey@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2807-4688>

Alla A. LEBEDEVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: alla280318@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0168-1288>

Tatiana G. MINEVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: minevich_tg@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8137-2479>

Alexandra N. MODULINA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: modulina@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8860-3022>

Поступила: 10.03.2025; Одобрена: 24.03.2025; Принята: 09.04.2025.

Submitted: 10.03.2025; Approved: 24.03.2025; Accepted: 09.04.2025.