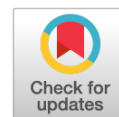


Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-635854>

EDN: WVGNTC



Методика расчёта удельных проводимостей магнитной цепи явнополюсных вентильно-индукторных машин

Е.А. Рябых, Р.А. Малеев, А.В. Акимов

Московский политехнический университет, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В последние годы большое внимание уделяется бесконтактным электрическим машинам, которые имеют достаточно высокий срок службы и не требуют ухода в эксплуатации. Широкое применение находят вентильно-индукторные машины, в частности индукторные генераторы, ввиду простоты конструкции и высокой надёжности. В данной статье рассматриваются явнополюсные вентильно-индукторные машины со звездообразным ротором, а также представлена методика расчёта магнитной цепи. Приведённый подход позволяет повысить точность моделирования процессов электромагнитного преобразования энергии, а также может быть использован при проектировании и оптимизации вентильно-индукторных генераторов для транспортных и стационарных энергетических установок.

Цель работы — представить методику расчёта магнитной цепи явнополюсных вентильно-индукторных машин.

Материалы и методы. Методика расчёта удельных проводимостей в воздушном зазоре и пазовой области с применением метода разделения переменных в ряд Фурье.

Результаты. Проведён обзор явнополюсных вентильно-индукторных машин с различными магнитными системами и конструктивным исполнением. Определены преимущества и недостатки магнитной цепи вентильно-индукторных машин и выбрана наиболее оптимальная конструкция звездообразного ротора, что обеспечивает максимальный коэффициент использования материалов.

Заключение. Представлена методика расчёта магнитного поля вентильно-индукторной машины путём определения удельных проводимостей в воздушном зазоре методом разделения переменных в ряд Фурье.

Ключевые слова: вентильно-индукторная машина; удельная магнитная проводимость; постоянные магниты; воздушный зазор.

Как цитировать:

Рябых Е.А., Малеев Р.А., Акимов А.В. Методика расчёта удельных проводимостей магнитной цепи явнополюсных вентильно-индукторных машин // Известия МГТУ «МАМИ». 2025. Т. 19, № 1. С. 410–421. DOI: 10.17816/2074-0530-635854 EDN: WVGNTC

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-635854>

EDN: WVGNTC

Design Procedure of Specific Conductivity of the Magnetic Circuit of Switched Reluctance Machines

Evgeny A. Ryabykh, Ruslan A. Maleev, Andrey V. Akimov

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: In recent years, much attention has been paid to brushless electric machines, which have a long service life and do not require maintenance in operation. Switched reluctance machines, in particular inductor alternators, are widely used due to their design simplicity and high reliability. This paper discusses salient pole type switched reluctance motors with a star-shaped rotor and presents the design procedure of a magnetic circuit as well. The proposed approach enhances the accuracy of modeling electromagnetic energy conversion processes and can also be applied in the design and optimization of switched reluctance generators for both transportation systems and stationary power installations.

AIM: To present design procedure of the magnetic circuit of salient pole type switched reluctance machines.

METHODS: The design procedure of specific conductivities in the air gap and the groove area using the method of variable separation into a Fourier series.

RESULTS: A review of salient pole type switched reluctance machines with various magnetic systems and design is carried out. The advantages and disadvantages of the magnetic circuit of switched reluctance machines are determined and the most optimal design of the star-shaped rotor is selected, which ensures maximum material utilization.

CONCLUSION: The design procedure of the magnetic field of a switched reluctance machine by means of determining the specific conductivities in air gap with the method of variable separation into a Fourier series is presented.

Keywords: switched reluctance machine; specific magnetic conductivity; permanent magnets; air gap.

To cite this article:

Ryabykh EA, Maleev RA, Akimov AV. Design Procedure of Specific Conductivity of the Magnetic Circuit of Switched Reluctance Machines. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2025;19(1):410–421. DOI: 10.17816/2074-0530-635854 EDN: WVGNTC

Submitted: 09.09.2024

Accepted: 01.06.2025

Published online: 13.07.2025

ВВЕДЕНИЕ

Современные автомобили должны обеспечивать высокий уровень комфорта, безопасности, а также надёжности работы всех его агрегатов и систем, что может быть обеспечено только путём увеличения как количества, так и качества различных электрических и электронных систем. Поэтому на автомобилях, а также других транспортных средствах наблюдается резкое возрастание количества потребителей электрической энергии, в связи с чем к генераторным установкам предъявляются высокие требования в отношении повышения их удельных показателей. Одним из способов повышения характеристик и параметров генераторов является применение различных методик расчёта как магнитных, так и электрических полей.

В настоящее время широкое применение находят различного рода бесконтактные электрические машины вследствие простоты технического обслуживания, высокой надёжности и большого срока службы. В различных отраслях техники активное применение находят вентильно-индукторные машины, в частности индукторные явнополюсные генераторы. Таким образом, материалы, изложенные в данной статье, являются актуальными и представляют практический интерес [1].

В данной работе представлена методика расчёта магнитной цепи явнополюсных вентильно-индукторных машин с учётом всех конструктивных и электрических особенностей, а также массогабаритных показателей магнитной системы. Представлен подробный расчёт удельных проводимостей в воздушном зазоре, а также пазовых проводимостей с учётом реакции якоря.

Роторы вентильно-индукторных машин могут иметь различные конструктивные исполнения, но чаще всего применяется конструкция явнополюсного ротора в виде звёздочки, которая представлена на рис. 1 и 2.

Ротор в виде звёздочки напрессовывается на вал. В случае применения постоянных магнитов используются различного рода цинковые или алюминиевые сплавы, например: ЦАМ-4 или АЛ-9. Наиболее распространённый метод установки магнитов в пазы ротора — непосредственная заливка на валу. Монтаж магнитов в пазы звездообразного ротора с применением сплава из алюминия преимущественно производится на авиационных генераторах, а заливка магнитной массы непосредственно на вал — в автотракторных.

Сплавы из алюминия и цинка имеют характерную особенность. Алюминий по сравнению с цинком имеет малое удельное сопротивление, что положительно сказывается на удельной проводимости материала и тем самым является более предпочтительным для заливки полезного объёма ротора. Для автотракторной системы электроснабжения, как правило, изготавливаются статоры с явно выраженными полюсами с целью упрощения производственного процесса и удешевления производства [2].

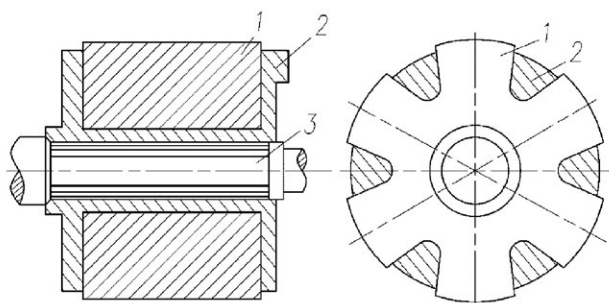


Рис. 1. Общий вид ротора с явнополюсной магнитной системой: 1 — железо ротора; 2 — магнитная заливка; 3 — вал.

Fig. 1. General view of the rotor with a single-pole magnetic system: 1: rotor iron; 2: magnetic fill; 3: shaft.

Характерными особенностями данной конструкции являются её простота и технологичность. Для крепления постоянных магнитов применяется заливка, выполняемая из различных сплавов, например, алюминиевых или цинковых. Крепление с помощью алюминиевого сплава применяется в самолётных генераторах (рис. 2), а непосредственная заливка магнита на вал — в тракторных (рис. 3) [3]. При заливке алюминиевым сплавом по сравнению с цинковым уменьшается вес ротора, так как алюминиевый сплав имеет меньшее удельное сопротивление. Двенадцатиполюсные звездообразные роторы применяются реже, так как большее число полюсов приводит к худшему использованию материала и, как следствие, усложняют процесс заливки магнитного материала. В настоящее время выпускаются генераторы, имеющие шестиполюсную звёздочку (см. рис. 3) при 12 пазах на статоре. В этом случае между ЭДС соседних катушек статора получается сдвиг по фазе на 90, что позволяет использовать этот генератор как двухфазный [4].

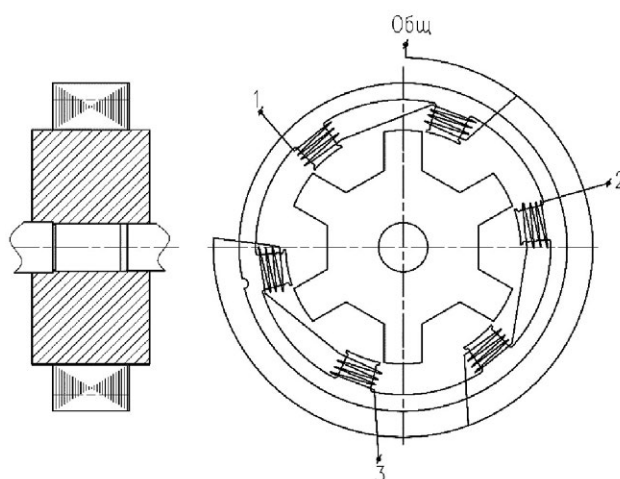


Рис. 2. Общий вид ротора и схема соединения обмоток статора: 1, 2, 3 — концы фазных обмоток.

Fig. 2. General view of the rotor and the connection diagram of the stator windings: 1, 2, 3: the ends of the phase windings.

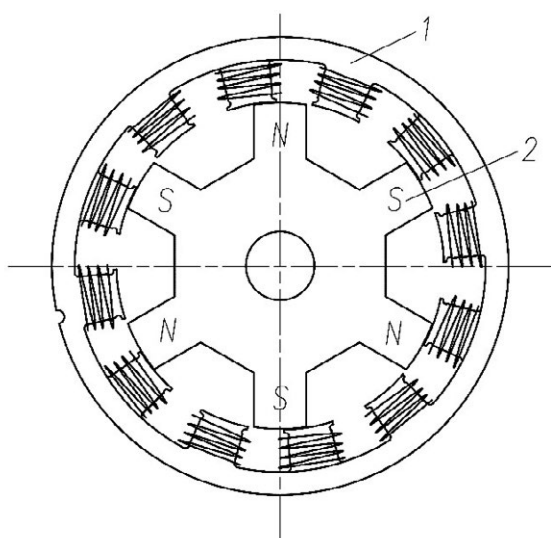


Рис. 3. Поперечный разрез магнитной цепи автотракторного генератора мощностью 0,18 кВт: 1 — железо статора; 2 — звездообразный магнит.

Fig. 3. Transverse section of the magnetic circuit of an automotive tractor alternator with a power of 0.18 kW: 1: stator iron; 2: star-shaped magnet.

Наибольшее распространение получили шестиполюсные роторы, что доказано путём многочисленных теоретических и экспериментальных исследований [5].

Конструктивно в роторе применяется заливка алюминиевым сплавом, в котором устанавливаются составные магниты, которые изображены на рис. 4 и 5.

К числу недостатков такой конструкции следует отнести технологические проблемы при намагничивании. Кроме того, распределение напряжённости и индукции магнитного поля оказывается в значительной степени неравномерно распределёнными. Спинка же звёздочки может явиться только лишь балластным участком, не увеличивающим общей магнитной энергии магнита. При этом снижается коэффициент использования материалов [6].

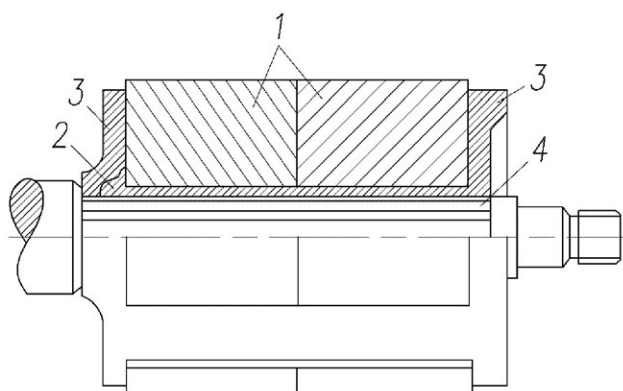


Рис. 4. Конструкция ротор с постоянными магнитами: 1 — магниты; 2 — втулка; 3 — заливка из алюминия; 4 — вал.

Fig. 4. The design of the rotor with permanent magnets: 1: magnets; 2: bushing; 3: aluminum casting; 4: shaft.

При отсутствии полюсных башмаков происходит значительное размагничивание ротора. Причиной этого является ток короткого замыкания, который в данном случае будет намагничивающей силой. Слабая проводимость постоянных магнитов приводит к малым показателям вихревых токов, поэтому вихревые токи слабо демпфируют намагничивающую силу ударного тока короткого замыкания (в диапазоне: 0,7–0,8 Ом·мм²/м). Значительное влияние на распределение магнитных полей оказывает реакция якоря. Для улучшения характеристик применяют демпферные системы, которые конструктивно могут иметь вид короткозамкнутых медных витков, или применяют заливку ротора алюминием. Наличие демпферной системы особенно важно для уменьшения влияния инверсного поля в однофазных машинах [1].

Во-вторых, намагничивающая сила реакции якоря, действующая несимметрично относительно оси полюсов, вызывает несимметричное размагничивание концов полюсов.

Недостатком звездообразного типа ротора является его невысокая механическая прочность. Предельные механические напряжения на разрыв сплава железо-никель-алюминий (Fe-Ni-Al) находятся в диапазоне 220–320 кг/см². Окружная скорость ротора звездообразного типа с постоянными магнитами не превышает 30–50 м/сек (применимо для сплавов ални и алнико). Допустимое механическое напряжение при двукратном или трёхкратном запасе выбирается порядка 100 кг/см².

В конструкциях со звездообразным ротором достаточно низкая индукция в воздушном зазоре (не более 0,2–0,4 вб/м²). Так как длина магнита в направлении намагничивающей силы невелика, то незначительной будет и линейная нагрузка статора, в особенности при большом числе полюсов. Низкие значения индукции B_δ и линейных нагрузок приводят к повышению удельного веса машины [7].

В силу указанных выше недостатков магнитов-звёздочек они находят применение для машин относительно небольшой мощности.

При современных новых материалах, имеющих $H_c \geq 100000$ а/м, предельная мощность генераторов со звездообразным ротором достигает 7,5 кВА при 400 Гц и $\cos \varphi = 0,8$. При большей частоте она может быть увеличена [8].

1. РАСЧЁТ УДЕЛЬНЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ

Размеры магнитной цепи изображены на рис. 5.

Зубцовый шаг статора:

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D_a}{z_1}, \text{ м}, \quad (1)$$

где D_a — диаметр расточки статора; z_1 — число зубцов статора.

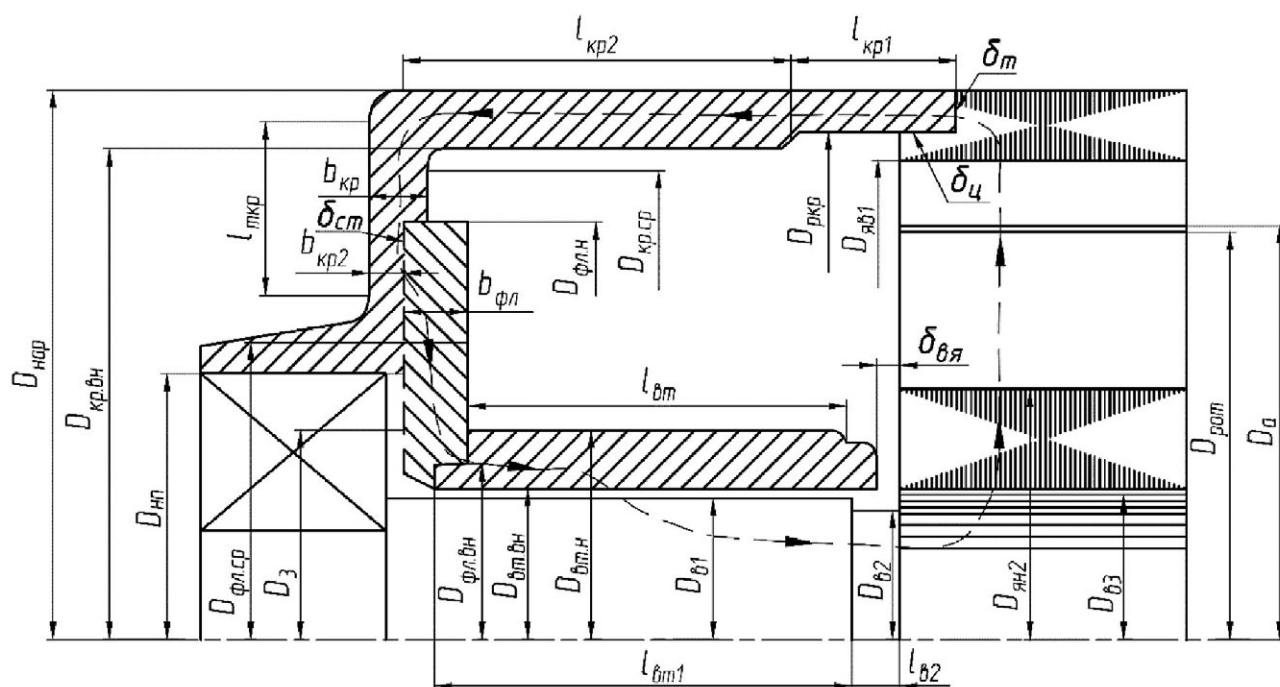


Рис. 5. Продольный разрез ротора.

Fig. 5. longitudinal section of the rotor.

Ширина паза статора:

$$b_{n1} = t_{z1} - b_{z1}, \text{ м}, \quad (2)$$

где b_{z1} — ширина зубца.

Расчёт зубцового шага ротора:

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_{я}}{z_2}, \text{ м}, \quad (3)$$

где $D_{я}$ — диаметр; z_2 — число зубцов.

Расчёт ширины паза ротора:

$$b_{n2} = t_{z2} - b_{z2}, \text{ м}, \quad (4)$$

где b_{z2} — ширина зубца.

$$y = \frac{\pi \cdot D_a \cdot \lambda_{\text{эл.град}}}{z_2 \cdot 360}, \text{ м}. \quad (5)$$

Удельные проводимости между поверхностями зубцов статора и ротора λ_1 .

$$\text{В зоне } 0 \leq y \leq \frac{b_{z2} - b_{z1}}{2}$$

$$\lambda_1 = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{b_{z1}}{\delta}, \text{ Гн/м}. \quad (6)$$

$$\text{В зоне } \frac{b_{z2} - b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{b_{z2} + b_{z1}}{2}$$

$$\lambda_1 = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{b_{z1} + b_{z2} - 2y}{2\delta}, \text{ Гн/м}. \quad (7)$$

$$\text{В зоне } y = \frac{b_{z2} + b_{z1}}{2} > \lambda_1 = 0.$$

Проводимости между торцом зубца статора и цилиндрической поверхностью зубца ротора λ_2 .

$$\text{а) Условие } b_{z2} < t_{z1}, \text{ Гн/м}.$$

$$\text{В зоне } 0 \leq y \leq \frac{t_{z1} + b_{z2}}{2}$$

$$\lambda_2 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(1 + \frac{b_{z2} - b_{z1} + 2y}{2\delta} \right), \text{ Гн/м}. \quad (8)$$

$$\text{В зоне } \frac{t_{z1} - b_{z2}}{2} \leq y \leq \frac{b_{z2} + b_{z1}}{2}$$

$$\lambda_2 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(1 + \frac{b_{n1}}{2\delta} \right), \text{ Гн/м}. \quad (9)$$

$$\text{В зоне } \frac{b_{z2} + b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{b_{z2} + b_{z1}}{2}$$

$$\lambda_2 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(1 + \frac{b_{n1} + 2\delta}{2y - b_{z2} - b_{z1} + 2\delta} \right), \text{ Гн/м}. \quad (10)$$

$$\text{В диапазоне } y = \frac{t_{z1} + b_{z2}}{2} \text{ и более } \lambda_2 = 0.$$

б) При $b_{z2} > t_{z1}$.

В зоне $0 \leq y \leq \frac{b_{z2} + b_{z1}}{2}$

$$\lambda_2 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(1 + \frac{b_{n1}}{2\delta} \right), \text{ ГН/м.} \quad (11)$$

В зоне $\frac{b_{z2} + b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{b_{z2} + t_{z1}}{2}$

$$\lambda_2 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(\frac{b_{n1} + 2\delta}{2y - b_{z2} - b_{z1} + 2\delta} \right), \text{ ГН/м.} \quad (12)$$

В зоне $y \geq \frac{b_{z2} + t_{z1}}{2} \quad \lambda_2 = 0$.

Расчёт проводимости в области торца зубца статора и набегающей торцевой поверхности зубца ротора λ_3 .

а) При $t_{z1} > b_{z2}$.

В зоне $0 \leq y \leq \frac{t_{z1} - b_{z2}}{2}$

$$\lambda_3 = 0,625 \cdot 10^{-6} \ln \left[1 + \frac{2(t_{z1} - b_{z2} - 2y)}{2\delta + b_{z2} - b_{z1} + 2y} \right], \text{ ГН/м.} \quad (13)$$

б) При $t_{z1} \leq b_{z2}, \lambda_3 = 0$.

Удельные проводимости между боковыми поверхностями зубцов статора и ротора λ_4 .

а) При $t_{z1} < b_{n2}$.

В зоне $\frac{b_{z1} + b_{z2}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z1} + b_{z2}}{2}$

$$\lambda_4 = 1,25 \cdot 10^{-6} \frac{2y - (b_{z1} + b_{z2})}{2\delta + 2y - (b_{z1} + b_{z2})}, \text{ ГН/м.} \quad (14)$$

В зоне $\frac{t_{z1} + b_{z2}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2}}{2}$

$$\lambda_4 = 1,25 \cdot 10^{-6} \frac{b_{n1}}{2\delta + 2y - (b_{z1} + b_{z2})}, \text{ ГН/м.} \quad (15)$$

б) При $t_{z1} > b_{n2}$.

В зоне $\frac{t_{z1} + b_{z2}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2}}{2}$

$$\lambda_4 = 1,25 \cdot 10^{-6} \frac{2y - (b_{z1} + b_{z2})}{2\delta + 2y - (b_{z1} + b_{z2})}, \text{ ГН/м.} \quad (16)$$

Удельные проводимости между торцом зубца статора и поверхностью зубца ротора λ_5 .

В зоне $0 \leq y \leq \frac{b_{z2} - b_{z1}}{2}$

$$\lambda_5 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(1 + \frac{b_{z2} - b_{z1} - 2y}{2\delta} \right), \text{ ГН/м.} \quad (17)$$

Удельные проводимости между торцом зубца статора и поверхностью зубца ротора λ_6 .

а) При $t_{z1} > b_{z2}$.

В зоне $0 \leq y \leq \frac{b_{z2} - b_{z1}}{2}$

$$\lambda_6 = 0,625 \cdot 10^{-6} \ln \left[1 + \frac{2(t_{z1} - b_{z2} + 2y)}{2\delta + (b_{z2} - b_{z1}) - 2y} \right], \text{ ГН/м.} \quad (18)$$

В зоне $\frac{b_{z2} + b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2} - t_{z1}}{2}$

$$\lambda_6 = 0,625 \cdot 10^{-6} \ln \left[1 + \frac{2b_{n1}}{2\delta + 2y - (b_{z2} - b_{z1})} \right], \text{ ГН/м.} \quad (19)$$

В зоне $\frac{t_{z2} - t_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2} - b_{z1}}{2}$

$$\lambda_6 = 0,625 \cdot 10^{-6} \ln \left[1 + \frac{2(t_{z2} - 2y - b_{z1})}{2\delta + 2y - (b_{z2} - b_{z1})} \right], \text{ ГН/м.} \quad (20)$$

б) При $t_{z1} \leq b_{z2} \quad \lambda_6 = 0$.

Удельные проводимости между поверхностью зубца статора и боковой поверхностью зубца ротора λ_7 .

а) При $b_{z1} \leq \frac{b_{n2}}{2}$.

В зоне $\frac{b_{z2} - b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{b_{z2} + b_{z1}}{2}$

$$\lambda_7 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(1 + \frac{2y - b_{z2} + b_{z1}}{2\delta} \right), \text{ ГН/м.} \quad (21)$$

В пределах $\frac{b_{z2} + b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2} - b_{z1}}{2}$

$$\lambda_7 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(\frac{2\delta + 2y + b_{z1} - b_{z2}}{2\delta + 2y - b_{z1} - b_{z2}} \right), \text{ ГН/м.} \quad (22)$$

В пределах $\frac{t_{z2} - b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2}}{2}$

$$\lambda_7 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left[\frac{2\delta + b_{n2}}{2\delta + 2y - (b_{z1} + b_{z2})} \right], \text{ Гн/м. } (23)$$

б) При $b_{z1} > \frac{b_{n2}}{2}$.

В зоне $\frac{b_{z2} - b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2} - b_{z1}}{2}$

$$\lambda_7 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(1 + \frac{2y - b_{z2} + b_z}{2\delta} \right), \text{ Гн/м. } (24)$$

В зоне $\frac{t_{z2} - b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{b_{z2} + b_{z1}}{2}$

$$\lambda_7 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(1 + \frac{b_{n2}}{2\delta} \right), \text{ Гн/м. } (25)$$

В зоне $\frac{b_{z2} + b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2}}{2}$

$$\lambda_7 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left[\frac{2\delta + b_{n2}}{2\delta + 2y - (b_{z1} + b_{z2})} \right], \text{ Гн/м. } (26)$$

Удельные проводимости боковой поверхности зубца статора и боковой поверхности зубца ротора λ_8 .

а) При $b_{n2} > t_{z1}$.

В зоне $\frac{t_{z2} - t_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2} - b_{z1}}{2}$

$$\lambda_8 = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{t_{z1} - t_{z2} + 2y}{2\delta + b_{n2} - b_{z1} + t_{z2} - 2y}, \text{ Гн/м. } (27)$$

В зоне $\frac{t_{z2} - b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2}}{2}$

$$\lambda_8 = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{b_{n1}}{2\delta + b_{n2} - b_{z1} + t_{z2} - 2y}, \text{ Гн/м. } (28)$$

б) Если условия имеют вид $b_{n2} < t_{z1}$.

В зоне $\frac{t_{z2} - t_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2} - b_{z1}}{2}$

$$\lambda_8 = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{t_{z1} - t_{z2} + 2y}{2\delta + b_{n2} - b_{z1} + t_{z2} - 2y}, \text{ Гн/м. } (29)$$

В зоне $\frac{t_{z2} - b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2} - t_{z1} + b_{n2}}{2}$

$$\lambda_8 = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{b_{n1}}{2\delta + b_{n2} - b_{z1} + t_{z2} - 2y}, \text{ Гн/м. } (30)$$

В зоне $\frac{t_{z2} - b_{z1} + b_{n2}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2}}{2}$

$$\lambda_8 = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{t_{z2} + b_{n2} - b_{z1} - 2y}{2\delta + b_{n2} - b_{z1} + t_{z2} - 2y}, \text{ Гн/м. } (31)$$

Удельные проводимости между поверхностью зубца статора и поверхностью следующего зубца ротора λ_9 .

а) Если условия имеют вид $b_{n2} > b_{z1}$.

В зоне $\frac{t_{z2} - b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2}}{2}$

$$\lambda_9 = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(\frac{2\delta + b_{n2}}{2\delta + b_{n2} - b_{z1} + t_{z2} - 2y} \right), \text{ Гн/м. } (32)$$

б) Условия $b_{n1} < b_{z1}$ не рассматриваются как невозможные.

Удельные проводимости между поверхностью зубца статора и поверхностью следующего зубца ротора λ_{10} .

а) В случае $b_{n2} < t_{z1}$.

В пределах $\frac{t_{z2} - t_{z1} + b_{n2}}{2} \leq y \leq \frac{t_{z2}}{2}$

$$\lambda_{10} = 1,25 \cdot 10^{-6} \ln \left(\frac{b_{n1} + 2\delta}{t_{z2} + b_{n2} - b_{z1} - 2y + 2\delta} \right), \text{ Гн/м. } (33)$$

б) При $b_{n2} > t_{z1}; \lambda_{10}=0$

Удельные проводимости между торцами зубцов статора и ротора λ_T .

В зоне $0 \leq y \leq \frac{b_{z2} - b_{z1}}{2}$

$$\lambda_T = 1,25 \cdot 10^{-6} \frac{b_{z1}}{l_a} \ln \left(\frac{b_{n1}}{\delta} \right), \text{ Гн/м. } (34)$$

В зоне $\frac{b_{z2} - b_{z1}}{2} \leq y \leq \frac{b_{z1} + b_{z2}}{2}$

$$\lambda_T = 0,625 \cdot 10^{-6} \frac{b_{z2} + b_{z1} - 2y}{l_a} \ln \left(\frac{b_{n1}}{\delta} \right), \text{ Гн/м. } (35)$$

Суммарная проводимость

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_{10} + \lambda_T, \text{ Гн/м. } (36)$$

По результатам расчётов строится зависимость $\lambda = f(\alpha_{\text{эл.град}})$.

При $q=1$ рассчитываются проводимости эквивалентного зубца:

$$\lambda_{\text{обм}} = \lambda_{\alpha} + \lambda \left(\frac{360 \frac{z_2}{z_1} + \alpha}{z_1} \right) + \lambda \left(\frac{360 \frac{z_2}{z_1} - \alpha}{z_1} \right), \text{ Гн/м}, \quad (37)$$

для углов $\lambda = \frac{360 z_2}{z_1}$.

Разложение зависимости $\lambda = f(\alpha_{\text{эл.град}})$ в ряд Фурье.

Амплитуды соответствующих гармоник.

Первая:

$$A_1 = 0,109(a_{10} - a_{170}) + 0,104(a_{20} - a_{160}) + 0,096(a_{30} - a_{150}) + 0,085(a_{40} - a_{140}) + 0,072(a_{50} - a_{130}) + \\ + 0,0555(a_{60} - a_{120} + a_0 + a_{180}) + 0,038(a_{10} - a_{110}) + 0,0194(a_{80} - a_{100})$$

Вторая:

$$A_2 = 0,104(a_{10} + a_{170} - a_{80} - a_{100}) + 0,085(a_{20} + a_{160} - a_{70} - a_{110}) + \\ + 0,0555(a_{30} + a_{150} - a_{60} - a_{120} + a_0 + a_{180}) + 0,0194(a_{40} + a_{140} - a_{30} - a_{130}) - 0,111a_{90}$$

Третья:

$$A_3 = 0,095(a_{10} - a_{170} + a_{130} - a_{50} + a_{110} - a_{70}) + 0,0555(a_{20} - a_{160} + a_{140} - a_{40} + a_{110} - a_{80} + a_0 - a_{180}) + \\ + 0,111(a_{120} - a_{60})$$

Четвёртая:

$$A_4 = 0,085(a_{10} + a_{170} + a_{80} + a_{100}) + 0,0194(a_{20} + a_{160} + a_{70} + a_{110}) - \\ - 0,0555(a_{30} + a_{150} + a_{60} + a_{120} - a_0 - a_{180}) - 0,104(a_{40} + a_{140} + a_{50} + a_{130}) + 0,111a_{90}$$

Пятая:

$$A_5 = 0,072(a_{10} - a_{170}) - 0,0194(a_{80} - a_{160}) - 0,096(a_{30} - a_{150}) - 0,104(a_{40} - a_{140}) - \\ - 0,038(a_{50} - a_{130}) + 0,0555(a_{60} - a_{120} + a_0 - a_{180}) + 0,109(a_{70} - a_{110}) + 0,085(a_{80} - a_{100})$$

Шестая:

$$A_6 = 0,0555(a_{10} + a_{170} - a_{80} - a_{100} - a_{20} - a_{160} + a_{70} + a_{110} - a_{40} - a_{140} + a_{50} + a_{130} + a_0 + a_{180}) - \\ - 0,111(a_{30} + a_{150} - a_{120} - a_{60} + a_{90})$$

Седьмая:

$$A_7 = 0,038(a_{10} - a_{170}) - 0,085(a_{20} - a_{160}) - 0,096(a_{30} - a_{150}) + 0,0194(a_{40} - a_{140}) + \\ + 0,109(a_{50} - a_{130}) + 0,0555(a_{60} - a_{120} + a_0 - a_{180}) - 0,072(a_{70} - a_{110}) - 0,104(a_{80} - a_{100})$$

Восьмая:

$$A_8 = 0,0194(a_{10} + a_{170} + a_{20} + a_{100}) - 0,104(a_{20} + a_{160} + a_{70} + a_{110}) - \\ - 0,0555(a_{30} + a_{150} + a_{60} + a_{120} - a_0 - a_{180}) + 0,085(a_{40} + a_{140} + a_{50} + a_{130}) + 0,111a_{90}$$

Коэффициент Картера:

$$K_{\delta} = \frac{t_{z1} + 10_{\delta}}{t_{z1} - b_{z1} + 10_{\delta}}. \quad (38)$$

Приведённая величина воздушного зазора:

$$\delta' = \delta \cdot K_{\delta}. \quad (39)$$

2. РАСЧЁТ ПАЗОВЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ

Для выполнения расчёта используем геометрию статора с обмоткой, представленной на рис. 6.

Расчёт числа пазов:

$$q = \frac{z_1}{2m \cdot z_2}. \quad (40)$$

Пазовое рассеяние (для конструкции генератора с прямоугольным зубцом):

$$\lambda_{\pi} = \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{h_1}{b'_{\pi} + b''_{\pi}} + \frac{h_2}{b'_{\pi}} \right] \cdot \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right)^2 \cdot 10^{-6}, \text{ Гн/м}, \quad (41)$$

где $\alpha = \frac{360 \cdot z_2}{z_1}$ — сдвиг фаз между соседними зубцами (эл. град.).

Лобовое рассеяние:

$$\lambda_{\text{лоб}} = 0,07 \frac{1 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,05 \frac{h_{yc}}{h_k + b_k}} \cdot \frac{l_l}{l_a}, \text{ Гн/м}, \quad (42)$$

где $l_l \cong (0,6 \div 0,7) \tau$.

Дифференциальное рассеяние:

$$\lambda_{\text{диф}} = 1,35 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{t_{z2}}{q \delta'} \cdot K_{\Delta} \cdot 10^{-6}, \text{ Гн/м}, \quad (43)$$

где $K_{\Delta} = 0,2 \div 0,4$.

ЭДС рассеяния:

$$E_s = \frac{15,8 \cdot f \cdot W_{\Phi}^2 \cdot l_a \cdot I_{\Phi} (\lambda_{\pi} + \lambda_{\text{лоб}} + \lambda_{\text{диф}})}{z_2 \cdot q}, \text{ В}. \quad (44)$$

ЭДС поперечной реакции якоря:

$$E_{aq} = 2,35 f W_{\kappa}^2 \cdot \frac{z_1}{a^2 m} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \psi \cdot \lambda_{\text{обм}90^{\circ}} \cdot l_a, \text{ В}. \quad (45)$$

Максимальная проводимость:

для $q \geq 0,5$

при $\frac{t_{z2}}{2} > b_{z2}$; $\frac{t_{z2}}{2} - b_{z2} < b_{n2} \cdot \cos \beta$:

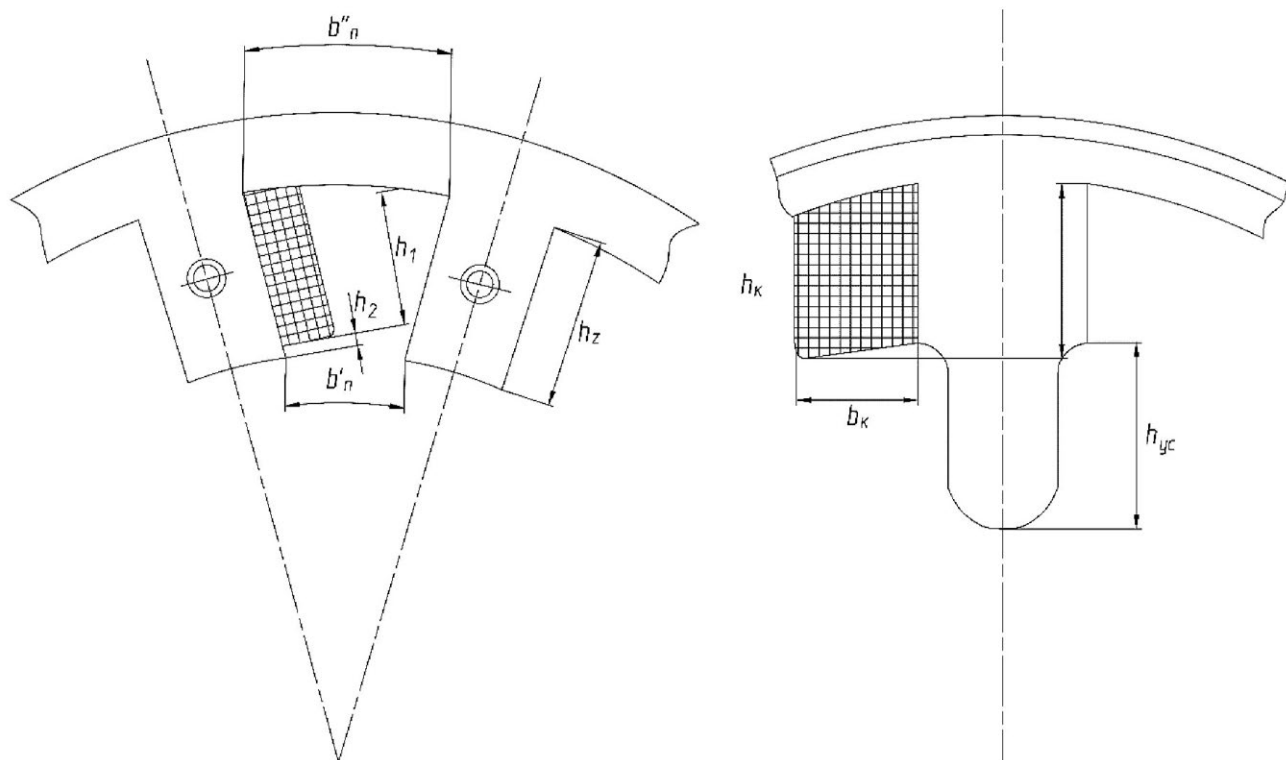


Рис. 6. Разрез статора с обмоткой.

Fig. 6. Section of the stator with winding.

$$\lambda_{\text{макс}_2} = \lambda_1 + 2\lambda_2 + 2\lambda_3', \text{ Гн/м}, \quad (46)$$

где

$$\lambda_3' = \frac{1,25 \cdot 10^{-6}}{2\beta} \cdot \ln \left[\frac{\frac{\beta}{\cos \beta} \left(\frac{t_{z_2}}{2} - b_{z_1} \right) + \delta - \beta \frac{b_{z_2} - b_{z_1}}{2}}{\beta \frac{b_{z_2} - b_{z_1}}{2} + \delta} \right],$$

Гн/м;

для $q < 0,5$

при $t_{z_2} > t_{z_1}$:

$$\lambda_{\text{макс}_2} = \lambda_1 + 2\lambda_2 + 2\lambda_3', \text{ Гн/м}. \quad (47)$$

Минимальная проводимость:

для $q \geq 0,5$

при $\frac{t_{z_2}}{2} - b_{z_1} \leq (b_{n_2} - b_{z_1}) \cdot \cos \beta$:

$$\lambda_{\text{мин}_2} = 2(\lambda_7 + \lambda_4'), \text{ Гн/м}, \quad (48)$$

$$\text{где } \lambda_4' = \frac{1,25 \cdot 10^{-6} \left(\frac{t_{z_2}}{2} - b_{z_1} \right) \frac{1}{\cos \beta}}{\beta (b_{n_2} - b_{z_1}) + 2\delta};$$

при $\frac{t_{z_2}}{2} - b_{z_1} > (b_{n_2} - b_{z_1}) \cdot \cos \beta$:

$$\lambda_{\text{мин}_2} = 2(\lambda_7 + \lambda_4 + \lambda_2'), \text{ Гн/м}, \quad (49)$$

$$\text{где } \lambda_2' = \frac{1,25 \cdot 10^{-6}}{\beta} \ln \left[\frac{\beta \left(\frac{t_{z_2}}{2} - b_{z_1} \right) \frac{1}{\cos \beta} + \delta}{\beta (b_{n_2} - b_{z_1}) + \delta} \right];$$

для $q < 0,5$

при $t_{z_2} > t_{z_1}$:

$$\lambda_{\text{мин}_2} = 2(\lambda_7 + \lambda_4 + \lambda_4), \text{ Гн/м}. \quad (50)$$

ЭДС продольной реакции якоря:

$$E_{ad} = \frac{8,1}{a^2} f \cdot \frac{z_1}{m} \cdot W_K^2 \cdot I_\phi \cdot \sin \psi \cdot \frac{l_a (\lambda_{\text{макс}_2} + \lambda_{10}) (\lambda_{\text{мин}_2} + \lambda_{\text{т180}})}{(\lambda_{\text{макс}_2} + \lambda_{\text{мин}_2} + \lambda_{\text{т0}} + \lambda_{\text{т180}})}, \text{ В}. \quad (51)$$

При $q = 1$:

$$E_{ad} = 4,7 f \frac{z_1}{m} \cdot \frac{W_K^2}{a^2} \cdot I_\phi \cdot \sin \psi \cdot l_a \frac{\lambda_{\text{обм}_0} \cdot \lambda_{\text{обм}_{180}}}{\lambda_{\text{обм}_0} + \lambda_{\text{обм}_{180}}}, \text{ В}. \quad (52)$$

Падение напряжения в активном сопротивлении статора:

$$E_a = I_\phi \cdot r_a, \text{ В}. \quad (53)$$

При выполнении расчётов по данным пунктам сначала определяются коэффициенты, стоящие в выражениях E_{aq} и E_{ad} , соответственно, перед $I_\phi \cdot \cos \psi$ и $I_\phi \cdot \sin \psi$.

После выполнения пункта (55) данного раздела рассчитываются абсолютные величины E_{aq} и E_{ad} при разных токах, напряжениях и скоростях.

Определение угла сдвига фаз ЭДС и напряжения:

$$\tan \varphi = \frac{U_\phi \cdot \sin \varphi + E_s + \frac{E_{aq}}{\cos(\varphi + \psi)}}{U_\phi \cdot \cos \varphi + E_a}, \quad (54)$$

где угол φ — для генератора, работающего на кремниевый выпрямитель, принимается равным 0.

ЭДС фазы:

$$E_{\phi} = U \cdot \cos \psi + I_{\phi} \cdot r_a \cdot \cos \psi + E_s \sin \psi + E_{ad}, \text{ В.} \quad (56)$$

Размагничивающая сила обмотки якоря:

$$F_d = 0,9 I_{\phi} \frac{W_k}{a} \sin \psi \frac{\lambda_0 + \lambda_{180}}{\lambda_0 - \lambda_{180}}. \quad (57)$$

При $q = 1$:

$$F_d = 2,1 I_{\phi} \frac{W_k}{a} \sin \psi \frac{\lambda_{\text{обм}_0} + \lambda_{\text{обм}_{180}}}{\lambda_{\text{обм}_0} - \lambda_{\text{обм}_{180}}}. \quad (58)$$

Ток фазы:

$$I_{\phi} = K (I_n + i_{\text{вмакс}}), \text{ А.} \quad (59)$$

Начальная скорость вращения при холостом ходе генератора:

$$n_{xx} = \frac{E_{\phi 0}}{E_{xx, n0}}, \text{ об/мин,} \quad (60)$$

где n_0 — скорость вращения, при расчёте характеристики холостого хода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён анализ магнитных систем с различными конструкциями звездообразного ротора с явно выраженными полюсами вентильно-индукторной машины. Определена оптимальная конструкция звездообразного ротора с шестью полюсами, что обеспечивает максимальный коэффициент использования материалов.

Представлена методика расчёта магнитного поля вентильно-индукторной машины путём определения удельных проводимостей в воздушном зазоре методом разделения переменных в ряд Фурье.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Е.А. Рябых — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений; Р.А. Малеев — экспертная оценка, утверждение финальной версии; А.В. Акимов — поиск публикаций по теме статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились

нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и достоверностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: E.A. Ryabikh: search for publications on the topic of the manuscript, writing and editing the text of the manuscript, creating images; R.A. Maleev: expert opinion, approval of the final version. A.V. Akimov: search for publications on the topic of the manuscript. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: N/A.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Ryabikh EA, Maleev RA, Shmatkov YM. "Simulation of a Single-pole Generator with Permanent Magnets", *Proceedings — 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2024;95–101. doi: 10.1109/UralCon62137.2024.10718954 (In Russ.)

2. Ryabikh EA, Maleev RA, Akimov AV. Valve inductor generators for special purpose vehicles. *Izvestia of MSTU "MAMI"*. 2023;17(3):287–294. doi: 10.17816/2074-0530-340855 (In Russ.) EDN: GXYPIB

3. Ryabykh EA, Maleev RA, Akimov AV. On the issue of contactless alternators on movable objects. *Izvestia of MSTU "MAMI"*. 2023;18(1):53–62. (In Russ.) doi: 10.17816/2074-0530-625880 EDN: LEAKNC
4. Akimov SV. *Calculation of output characteristics of automotive inductor generators*: a textbook on the course "Design of automotive electrical equipment" for students of specialty 0618. Moscow: 1987; 55.
5. Chernov AE, Akimov AV. Comparative analysis of the energy capabilities of the excitation systems of tractor generators. *Tractors and agricultural machinery*. 2017;84(1):46–53. doi: 10.17816/0321-4443-66274 (In Russ.) EDN: YRYGWL
6. Ryabykh EA. Simulation of an inductor generator with permanent magnets in an ANSYS environment // In the book: Radio electronics, electrical

engineering and power engineering. *Abstracts of the Thirteenth International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates*. 2024; 446. (In Russ.) EDN: STHQAA

7. Ryabykh EA. Development of a mathematical model of a valve inductor generator // In the book: Radio electronics, electrical engineering and power engineering. *Abstracts of the Thirty-first International Scientific and Technical Conference of Students and postgraduates*. 2025. p. 455. (In Russ.) EDN: FXBMLZ

8. Chernov AE, Akimov AV. Automated control and measuring stand for the study of automobile and bus generator sets. *Izvestiya MSTU "MAMI"*. 2014;8(1–2):5–12. doi: 10.17816/2074-0530-67630 (In Russ.) EDN: SXGXIL

ОБ АВТОРАХ

*** Рябых Евгений Александрович,**
аспирант кафедры «Электрооборудование
и промышленная электроника»;
адрес: Россия, 107023, Москва,
ул. Большая Семеновская, д. 38;
ORCID: 0000-0001-7112-1019;
eLibrary SPIN: 4843-6000;
e-mail: fczi98@bk.ru

Малеев Руслан Алексеевич,
канд. техн. наук, доцент;
профессор кафедры «Электрооборудование
и промышленная электроника»;
ORCID: 0000-0003-3430-6406;
eLibrary SPIN: 7801-3294;
e-mail: 19rusmal@gmail.com

Акимов Андрей Валентинович,
канд. техн. наук, доцент;
доцент кафедры «Электрооборудование
и промышленная электроника»;
ORCID: 0009-0002-6010-8817;
eLibrary SPIN: 8238-8598;
e-mail: a.akimov5@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Eugeny A. Ryabykh,**
postgraduate of the Electrical Equipment
and Industrial Electronics Department;
address: 38 Bolshaya Semenovskaya st, Moscow,
Russia, 107023;
ORCID: 0000-0001-7112-1019;
eLibrary SPIN: 4843-6000;
e-mail: fczi98@bk.ru

Ruslan A. Maleev,
Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor,
Professor of the Electrical Equipment
and Industrial Electronics Department;
ORCID: 0000-0003-3430-6406;
eLibrary SPIN: 7801-3294;
e-mail: 19rusmal@gmail.com

Andrey V. Akimov,
Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor,
Assistant Professor of the Electrical Equipment
and Industrial Electronics Department;
ORCID: 0009-0002-6010-8817;
eLibrary SPIN: 8238-8598;
e-mail: a.akimov5@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author