УДК 621.313.8
DOI: 10.34031/ES.2026.3.05

Секция
Электроэнергетика и электротехника

РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР ЧИСЛА ПАЗОВ СТАТОРА ШЕСТИФАЗНОГО СИНХРОННОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.

Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС, Санкт-Петербург

Аннотация

В статье обоснован рациональный выбор числа пазов статора шестифазной обмотки высокоскоростного магнитоэлектрического турбогенератора. В программе развития Арктической зоны Российский Федерации одним из перспективных направлений ее реализации считается атомная энергетика на основе атомных станций малой мощности с электрической мощностью до 30 МВт. При использовании комбинированного производства тепловой и электрической энергии (когенерационной технологии) перспективным является использование высокоскоростных синхронных турбогенераторов с возбуждением от постоянных магнитов. Установлено, что статорную обмотку таких машин предпочтительно делать шестифазной в виде комбинации двух трехфазных обмоток со сдвинутыми на 30 электрических градусов магнитными осями, и что величины токов установившихся коротких замыканий зависят от числа пазов обмотки статора. Показано, что наилучший результат соответствует выбору числа пазов Z по предложенной зависимости его от постоянной величины, определяемой геометрическими размерами, номинальными и обмоточными данными электрической машины, а также от числа эффективных проводников в пазу N и допустимого значения магнитной индукции в зубце B_z. Выбор рекомендуемого числа пазов практически в два раза снижает значения установившихся токов коротких замыканий по сравнению с альтернативными вариантами и рекомендуется для проектирования шестифазных обмоток турбогенераторов.

Ключевые слова: *высокоскоростной генератор, постоянные магниты, шестифазная обмотка, Арктическая зона, когенерационная технология.*

RATIONAL CHOICE OF THE STATOR SLOTS NUMBER FOR A SIX-PHASE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS TURBOGENERATOR

Victor Antipov, Andrey Grozov, Anna Ivanova

Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre «Kurchatov Institute» - Institute of Silicate Chemistry (NRC «Kurchatov Institute» - PNPI – IChS), St. Petersburg

Abstract

The paper deals with the rational choice of the stator slots number of a six-phase winding for a high-speed permanent magnet turbogenerator. In the program for the development of Russian Federation Arctic zone, nuclear energy based on nuclear low-power plants with an electric capacity of up to 30 MW is considered one of the promising areas for its implementation. When using combined heat and electric energy production (cogeneration technology), the use of high-speed synchronous permanent magnet turbogenerator is promising. It has been established that it is preferable to make the stator winding of such machines six-phase in the form of a combination of two three-phase windings with their magnetic axes shifted by 30 electrical degrees, and that the magnitude of the currents of steady-state short circuits depends on the number of slots of the stator winding. It has been shown that the best result corresponds to selecting the number of slots Z according to the proposed dependence on a constant value determined by the geometric dimensions, rated and winding data of the electrical machine, the number of effective conductors in the slot N, and the permissible value of the tooth flux density B_z. The choice of recommended slots number reduces

the steady-state short-circuit current value by almost half compared to alternative options and is recommended for designing six-phase turbogenerators windings.

Keywords: *high-speed generator, permanent magnets, six-phase winding, Arctic zone, cogeneration technology.*

Введение

Шестифазные статорные обмотки, представляющие собой комбинацию двух трехфазных обмоток со сдвинутыми относительно друг друга их магнитными осями на 30 электрических градусов, применяются для турбогенераторов большой мощности. Такая конструкция позволяет снизить электродинамические нагрузки на статорные обмотки (в частности, такая конструкция статорных обмоток использована для турбогенераторов ТВВ-1200-2 Костромской ГРЭС [1]).

В настоящее время активно ведутся работы по исследованию многофазных обмоток. Так, в публикации [2] приводятся результаты исследований и рассматриваются вопросы, связанные с расчетами индуктивных сопротивлений многофазных обмоток. Работа [3] посвящена исследованию влияния пространственных гармоник электромагнитных полей на дополнительные потери. Работы [4, 5] исследуют переходные процессы в электрических машинах с шестифазными обмотками статоров.

Турбогенераторы типа ТЗВ-1200-2АУ3, имеющие шестифазную статорную обмотку, состоящую из двух независимых трехфазных обмоток со сдвинутыми друг относительно друга на 30 электрических градусов магнитными осями, успешно эксплуатируются на атомных электростанциях.

Схемы замещения по продольной оси шестифазного неявнополюсного синхронного генератора, трехфазные обмотки которого сдвинуты на 30 электрических градусов друг относительно друга, приведены в российском национальном стандарте ГОСТ Р 52735-2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ».

В конце 1990-х годов многофазные приводы расширили область своего применения на судостроение, транспорт [6], авиастроение [7], крупную промышленность [8, 9] и ветроэнергетику [10, 11].

Отметим существенные преимущества многофазных обмоток:

– увеличение количества фаз приводит к снижению фазных токов;

– при использовании многофазных обмоток эффективно сглаживаются пульсации крутящего момента;

– магнитное поле в машинах с такими обмотками имеет более равномерное распределение, что приводит к снижению уровня добавочных потерь;

– разделение многофазных обмоток на независимые группы, где магнитные оси каждой из них сдвинуты на определенный угол друг отрносительно друга, приводит к повышению отказоустойчивости электрических машин.

Целью настоящей работы является снижение токов короткого замыкания шестифазного магнитоэлектрического турбогенератора за счет рационального выбора числа пазов обмотки статора.

Материалы и методы

Объектом исследования является высокоскоростной синхронный шестифазный магнитоэлектрический турбогенератор мощностью 4500 кВт, напряжением 3150 В и частотой вращения 18000 мин$^{-1}$, предназначенный для установки на тепловых и атомных станциях в Арктической зоне Российской Федерации [12].

Электромагнитный расчет выполнен при внутреннем диаметре статора 300 мм для сравнения трех вариантов числа пазов статора (36, 48 и 72). Обмотка для всех вариантов двухслойная с числом пар параллельных ветвей, равным 2, числом эффективных проводников в пазу, равным 4 или 2, сокращением шага обмотки 0,833. Постоянные магниты марки N45H, воздушный зазор 14 мм и толщина бандажного цилиндра 12 мм обеспечивают тангенциальные напряжения в бандажном цилиндре на уровне σ_t=1150 МП.

Основные геометрические размеры (в миллиметрах) и данные выбранных для исследования вариантов машины сведены в табл. 1, а расположение эффективных проводников обмотки в пазах статора представлено на рис. 1.

Таблица 1

Основные размеры и данные вариантов исполнения турбогенератора 4500 кВт

Параметр при числе пазов	36	48	72
Мощность , кВт	4500	4500	4500
Напряжение, В	3150	3150	3150
Ток, А	264,5	264,5	264,5
Частота вращения, мин$^{-1}$	18000	18000	18000
Внутренний диаметр, D_i	300	300	300
Полная длина, l_δ	2150	2050	2150
Воздушный зазор, δ	14	14	14
Размеры паза, $h_p \times b_p$	45,0×21,4	46,8×14,8	29,6×10,4
Высота ярма, h_j	86	103	Ā
Число пазов на полюс и фазу, q	3	4	6
Число последовательных витков в фазе, w	6	8	6
Число элементарных проводников в эффективном, c	3	3	3
Размер элементарного проводника, $b_{Cu} \times h_{Cu}$	6,3×1,25	6,0×1,4	6,0×1,4
Диаметр ротора, D_r	296	296	296
Высота магнита, h_m	10	10	15
Ширина магнита, b_m	309	309	309
Поток, $\Phi_{\delta 0}$, Вб	0,351	0,241	0,450
Индукция в зазоре, $B_б$, Тл	0,458	0,368	0,559
Индукция в зубце, B_z,Тл	1,998	2,950	2,036
Индукция в ярме, Bj, Тл	0,939	1,005	1,052
Плотность тока в обмотке, j_a, А/мм^2	5,44	6,02	5,44
Линейная нагрузка, A, А/см	269	467	202
КПД, η, о.е.	0,9871	0,9822	0,9858

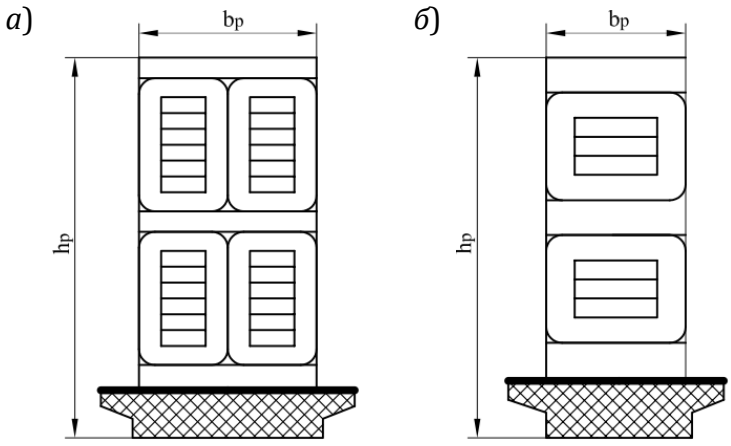


Рис. 1. Расположение эффективных проводников в пазу: *а) N*=4, *б) N*=2

Далее рассмотрим режимы короткого замыкания – режим установившегося шестифазного короткого замыкания и режим установившегося короткого замыкания первой системы при разомкнутой второй.

Для установившихся режимов уравнения генератора, записанные в осях *d* и *q* существенно упрощаются [4], поскольку производные от потокосцеплений равны нулю, а от угла γ равны 1.

В режиме установившегося шестифазного короткого замыкания продольные токи постоянны i_{d1}=const, i_{d2}=const, поперечные токи отсутствуют $I_{q1}=I_{q2}=0$, а напряжения имеют нулевые значения $U_{d1}=U_{d2}=U_{q1}=U_{q2}=0$.

Относительная величина установившегося продольного тока короткого замы определяется уравнением

$$I_{d1} = \frac{1}{X_{\sigma 11} + 2X_{\sigma 12} + 2X_{ad}}. \quad (1)$$

В режиме установившегося трехфазного короткого замыкания первой системы при разомкнутой второй величина установившегося продольного тока равна

$$I_{d1} = \frac{U_{q2}}{X_{\sigma 12} + X_{ad}}, \quad (2)$$

поскольку для обеих систем продольные напряжения и поперечные токи имеют нулевые значения, а для второй системы равны нулевым значениям величины поперечного напряжения и продольного тока $U_{d1} = U_{d2} = U_{q1} = 0$ и $I_{d2} = I_{q1} = I_{q2} = 0$.

Расчетная оценка составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора, основанная на классических представлениях с учетом конструктивных особенностей распределения шестифазной обмотки по пазам статора, выполнена по [5].

Индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси

$$x_{ad} = 2\pi f L_{a\delta} k_d. \quad (3)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния $x_\sigma = x_{\sigma 11} + x_{\sigma 12}$, равно сумме собственного $x_{\sigma 11}$ и взаимного $x_{\sigma 12}$ рассеяния.

Индуктивное сопротивление рассеяния состоит из четырех оставляющих: пазового рассеяния ($\lambda_п$), лобового рассеяния ($\lambda_л$), рассеяния по коронкам зубцов ($\lambda_к$) и дифференциальное рассеяние ($\lambda_д$):

$$x_\sigma = 4\pi\mu_0 f \frac{w^2}{pq} l_\delta \left(\lambda_п + \lambda_л + \lambda_к + \lambda_д\right). \quad (4)$$

Индуктивное сопротивление взаимного рассеяния трехфазных составляющих $x_{\sigma 12}$ учитывает только взаимоиндукцию между стержнями для пазов, содержащих стержни различных трехфазных систем. Число таков пазов на полюс и фазу равно (6 – 6β)*q.* Дополнительно учитывается рассеяние из-за сдвига по фазе токов стержней на α=30°.

$$x_{\sigma 12} = 4\pi\mu_0 f \frac{w^2}{pq} l_x \left(\lambda_{п12} + \lambda_{л12} + \lambda_{к12} + \lambda_{д12}\right). \quad (5)$$

Необходимые для расчетов индуктивности и взаимоиндуктивности определяются следующим образом:

– индуктивность, соответствующая магнитному потоку, пересекающему воздушный зазор

$$L_{a\delta} = \frac{4}{p\pi^2} \frac{\mu_0}{k_\mu \delta k_\delta} w_1^2 k_{w1}^2 \tau l_\delta ; \quad (6)$$

– взаимоиндуктивности между одноименными фазами трехфазных систем

$$m_{a1a2} = m_{b1b2} = m_{c1c2} = \frac{L_{a\delta}}{2} ; \quad (7)$$

– взаимоиндуктивности между разноименными фазами трехфазных систем

$$m_{a1b2} = m_{b1c2} = m_{c1a2} = -\frac{L_{a\delta}}{2} , \quad (8)$$

где p – число пар полюсов, k_μ – коэффициент насыщения, μ_0 – магнитная проницаемость, δ – воздушный зазор, k_δ – коэффициент воздушного зазора, w_1 – число витков фазы, τ – полюсное деление, l_δ – активная длина статора.

Все приведенные выше сопротивления пропорциональны квадрату числа витков в фазе, следовательно для снижения токов короткого замыкания число витков в фазе $w = \frac{NZ}{2ma_1}$ должно быть максимальной.

Ограничением выступает величина индукции в зубце статора $B_Z = \frac{B_\delta t_Z}{0,93\left(t_Z - b_p\right)}$, где t_z – зубцовое деление, b_p – ширина паза статора, B_δ – индукция в воздушном зазоре $B_\delta = \frac{\Phi_{\delta 0} \cdot 10^6}{\alpha \tau l_a}$, $\Phi_{\delta 0}$ – магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{2U_l m a_1}{2\sin \pi/m \, 4,44 f N Z} . \quad (9)$$

Результаты и обсуждение

Задавшись отношением ширины паза к зубцовому делению $k=b_p/t_Z$ и используя вышеприведенные формулы, можно получить ограничение для индукции в зубце в виде

$$B_Z = \frac{A}{NZ} , \quad (10)$$

где $A = \frac{2U_l m a_1}{2\sin \pi/m \, 4,44 f \alpha \tau l_a 0,93 \cdot 0,2} = \frac{14,53 U_l a_1}{f \alpha \tau l_a}$ – постоянная, определяемая геометрическими размерами, номинальными и обмоточными данными электрической машины.

В рассматриваемом случае отношение ширины паза к зубцовому делению равно 0,8, коэффициент A=378,2, индукция в зазоре B_Z=2,0 Тл, и расчетное значение числа необходимых зубцов $Z = \frac{A}{B_Z N}$ при числе эффективных проводников в пазу N=4 составляет Z= 47,3, при N=2 соответственно Z=94,6.

Таким образом, для снижения установившихся токов короткого замыкания обмотку необходимо выполнить при Z=48 пазах статора и числе эффективных проводников в пазу N=4 (при N=2 число пазов статора будет слишком велико).

Результаты численных расчетов относительных значений индуктивных сопротивлений шестифазного генератора и установившихся токов в режимах коротких замыканий представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Абсолютные значения индуктивных сопротивлений 6-фазного генератора (Ом)

Z	X_{ad}	$X_{\sigma 11}$	$X_{\sigma 12}$	X_{σ}	X_{d}
72	1,929	0,049	0,045	0,094	2,023
48	3,445	0,103	0,098	0,201	3,646
36	2,042	0,049	0,046	0,099	2,141

Таблица 3

Относительные значения индуктивных сопротивлений и установившихся токов 6-фазного генератора в режимах коротких замыканий (о.е.)

Z	X_{ad}	$X_{\sigma 11}$	$X_{\sigma 12}$	X_{σ}	X_{d}	$I_{d1,3}$	$I_{d1,6}$
72	0,324	0,016	0,008	0,008	0,340	3,015	1,489
48	0,579	0,034	0,017	0,016	0,612	1,681	0,828
36	0,343	0,016	0,008	0,008	0,359	2,852	1,409

Для перехода к относительным единицам рассматривается шестифазный генератор в качестве эквивалентного трехфазного [4]: базисная мощность трехфазной машины $P_b = \frac{3}{2} U_b I_b$; базисный ток $I_b = 2\sqrt{2} I_n$; базисное напряжение $U_b = \sqrt{2} U_n$.

Выбор рекомендуемого числа пазов практически вдвое снижает значения установившихся токов коротких замыканий по сравнению с альтернативными вариантами.

Выводы

Теоретически установлено и расчетно подтверждено, что снижение установившихся токов короткого замыкания в шестифазной петлевой обмотке статора электрической машины, образованной из двух трехфазных обмоток, сдвинутых друг относительно друга на 30 электрических градусов, может быть достигнуто при выборе числа зубцов статора из соотношения $Z = \frac{A}{B_Z N}$, где $A = \frac{14,53 U_l a_1}{f \alpha \tau l_a}$ – постоянная величина, определяемая геометрическими размерами, номинальными и обмоточными данными электрической машины, N – число эффективных проводников в пазу, B_Z=2,0 Тл – допустимое значение индукции в зубце. Выбор рекомендуемого числа пазов практически вдвое снижает значения установившихся токов коротких замыканий по сравнению с альтернативными вариантами.

Информация о финансировании

Работа выполнена в рамках Госзадания Филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС (регистрационный номер темы 1024030700042-1-1.4.3).

Библиографический список

1. **Глебов И.А., Данилевич Я.Б., Хуторецкий Г.М.** Турбогенератор мощностью 1200 МВт, 3000 об/мин // Электротехника. – 1968. – № 10. – С. 9-11.
2. **Хуторецкий Г.М., Воронов Г.Г.** Схемы замещения, диаграммы и параметры шестифазных неявнополюсных генераторов в установившемся режиме // Электротехника. – 1982. – № 11. – С. 7-13.

3. **Гришин Н.В.** Уравнения режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности // Научно-технические ведомости СПбПУ. – 2016. – № 2. – С. 16-23. EDN: WFAIUJ. DOI: 10.5862/JEST.243.2.
4. **Гришин Н.В.** Схемы замещения для решения режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности // Научно-технические ведомости СПбПУ. – 2016. – №2. – С. 62-71. EDN: WFAIWH. DOI: 10.5862/JEST.243.7.
5. **Гришин Н.В.** Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора шестифазного турбогенератора предельной мощности // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Том 23, № 4. – С. 40-47. EDN: VTISXJ. DOI: 10.18721/JEST.230403.
6. **Abdel-Khalik S., Ahmed S., Massoud A. A.** Six-Phase 24 Slot-10 Pole Permanent-Magnet Machine with Low Space Harmonics for Electric Vehicle Applications // IEEE Trans. Magnetics. – 2016. – Vol. 52(6). – P. 1-10. DOI: 10.1109/TMAG.2016.2535230.
7. The Six-Phase Fault Tolerant Synchronous Generator with Permanent Magnets for Aircraft Application **/ F.R. Ismagilov, V.E. Vavilov, R.D. Karimov, K.A. Barabanov** // International Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi: IEEE, 2020. – P. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112055.
8. **Barrero F., Duran M.J.** Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines – Part I // IEEE Trans. Ind. Electronics. – 2016. – Vol. 63(1). – P. 449-458. DOI: 10.1109/TIE.2015.2447733.
9. **Barrero F., Duran M.J.** Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines – Part II // IEEE Trans. Ind. Electronics. – 2016. – Vol. 63(1). – P. 459-468. DOI: 10.1109/TIE.2015.2448211.
10. **Levi E.** Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications // IEEE Trans. Ind. Electronics. – 2008. – Vol. 55(5). – P. 1893-1909. DOI: 10.1109/TIE.2008.918488.
11. Study of multiphase superconducting wind generators with fractional-slot concentrated windings **/ J. Wang, R. Qu, Y. Liu, J. Li** // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2014. – Vol. 24(3). – P. 1-6. DOI: 10.1109/TASC.2014.2304300.
12. **Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.** Шестифазный высокоскоростной турбогенератор для децентрализованной энергетики // Электричество. – 2026. – № 4. – С. 41-49. EDN: FFWUMY. DOI: 10.24160/0013-5380-2026-4-41-49.

References

1. Glebov, I. A., Danilevich, Ya. B., & Hutoreckij, G. M. (1968). Turbogenerator moshchnost'yu 1200 MVt, 3000 ob/min [1200 MW turbogenerator, 3000 rpm]. *Ehlektrotekhnika, 10*, 9-11. [In Russian]
2. Hutoreckij, G. M., & Voronov G. G. (1968). Skhemy zameshcheniya, diagrammy i parametry shestifaznyh neyavnopolyusnyh generatorov v ustanovivshemsya rezhime [Substitution schemes, diagrams, and parameters of six-phase implicit-pole generators in steady state]. *Ehlektrotekhnika, 11*, 7-13. [In Russian]
3. Grishin, N. V. (2016). Equations for operation conditions problems of six phase turbine generators of maximum capacity. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SpbPU, 2*, 16-23. https://doi.org/10.5862/JEST.243.2 [In Russian]
4. Grishin, N. V. (2016). Equations for operation conditions problems of six phase turbine generators of maximum capacity. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SpbPU, 2*, 62-71. https://doi.org/10.5862/JEST.243.7 [In Russian]
5. Grishin, N. V. (2017). Leakage reactance in a stator of a six-phase maximum capacity turbine generator. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SpbPU, 23(4),* 40-47. https://doi.org/10.18721/JEST.230403 [In Russian]
6. Abdel-Khalik, S., Ahmed, S., & Massoud, A. (2016). A Six-Phase 24 Slot-10 Pole Permanent-Magnet Machine with Low Space Harmonics for Electric Vehicle Applications. *IEEE Trans. Magnetics*, *52(6),* 1-10. https://doi.org/10.1109/TMAG.2016.2535230
7. Ismagilov, F. R., Vavilov, V. E., Karimov, R. D., & Barabanov, K. A. (2020). The Six-Phase Fault Tolerant Synchronous Generator with Permanent Magnets for Aircraft Application. In *Proc. of International Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* (9112055). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9112055

8. Barrero, F., & Duran, M. J. (2016). Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines – Part I. *IEEE Trans. Ind. Electronics, 63(1),* 449–458. https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2447733

9. Barrero, F., & Duran, M. J. (2016). Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines – Part II. *IEEE Trans. Ind. Electronics, 63(1),* 459–468. https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2448211

10. Levi, E. (2008). Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications. *IEEE Trans. Ind. Electronics, 55(5),* 1893–1909. https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918488

11. Wang, J., Qu, R., Liu, Y., & Li, J. (2014). Study of multiphase superconducting wind generators with fractional-slot concentrated windings. *IEEE Trans. Appl. Supercond, 24(3),* 1-6. https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2304300

12. Antipov, V. N., Grozov, A. D., & Ivanova, A. V. (2026). A six-phase high-speed turbine generator for decentralized energy. *Elektrichestvo, 4*, 41-49. https://doi.org/10.24160/0013-5380-2026-4-41-49

Сведения об авторах

Антипов Виктор Николаевич, д-р техн. наук, лаборатория химических проблем энергетики, филиал федерального государственного бюджетного учреждения Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра Курчатовский институт - Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова (филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС), г. Санкт-Петербург, e-mail: bht@mail.ru, SPIN-код 1155-4240, ORCID 0000-0002-4110-0564.

Грозов Андрей Дмитриевич, научный сотрудник, лаборатория химических проблем энергетики, филиал федерального государственного бюджетного учреждения Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра Курчатовский институт - Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова (филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС), г. Санкт-Петербург, e-mail: a_grozov@mail.ru, SPIN-код 1706-2100, ORCID 0000-0003-2383-8300.

Иванова Анна Владимировна, канд. физ.-мат. наук, лаборатория химических проблем энергетики, филиал федерального государственного бюджетного учреждения Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра Курчатовский институт - Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова (филиал НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ - ИХС), г. Санкт-Петербург, e-mail: iann57@mail.ru, SPIN-код 7908-5828, ORCID 0000-0003-1307-276X.

Authors about

Viktor N. Antipov, Dr. of Tech. Sciences (DSc), Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre «Kurchatov Institute» - Institute of Silicate Chemistry (NRC «Kurchatov Institute» - PNPI – IChS), e-mail: bht@mail.ru, ORCID 0000-0002-4110-0564.

Andrey D. Grozov, Research fellow, Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre «Kurchatov Institute» - Institute of Silicate Chemistry (NRC «Kurchatov Institute» - PNPI – IChS), e-mail: a_grozov@mail.ru, ORCID 0000-0003-2383-8300.

Anna V. Ivanova, Cand. of Tech. Sciences (PhD), Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre «Kurchatov Institute» - Institute of Silicate Chemistry (NRC «Kurchatov Institute» - PNPI – IChS), e-mail: iann57@mail.ru, ORCID 0000-0003-1307-276X.

Ссылки для цитирования

Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Рациональный выбор числа пазов статора шестифазного синхронного магнитоэлектрического турбогенератора // Энергетические системы. – 2026. – № 3. – С. 38-45.

Antipov, V., Grozov, A., & Ivanova, A. (2026). Rational choice of the stator slots number for a six-phase permanent magnet synchronous turbogenerator. *Energy Systems, 3*, 38-45. https://doi.org/10.34031/es.2026.3.05