

Проектирование генератора с магнитоэлектрическим возбуждением электростанции собственных нужд

ЗУБКОВ Ю.В., ВЛАДИМИРОВ Д.А.

Исследуется возможность применения синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов в качестве источников электрической энергии на электростанции собственных нужд газотранспортного узла. Приводится схема построения системы электроснабжения аппаратов воздушного охлаждения газа. Предложена процедура проектирования генератора собственных нужд, представленная в виде алгоритма, важными составляющими которого являются анализ электромагнитных процессов и уточненный расчет магнитных потерь в магнитопроводе и постоянных магнитах. Реализация этих шагов проектирования, с одной стороны, позволяет сформировать требования к элементной базе силовых статических преобразователей (выпрямителя и инвертора) и систем их управления и, с другой стороны, определить объемные тепловыделения в активных частях генератора для последующего расчета температурного поля. В результате исполнения описанной процедуры проектирования удалось сократить материальные и временные затраты на создание действующего образца генератора собственных нужд, максимально отвечающего требованиям технического задания.

К л ю ч е в ы е с л о в а: генератор собственных нужд, магнитоэлектрическое возбуждение, процедура проектирования, моделирование процессов

В «Концепции развития энергетики ОАО «Газпром» на основе применения собственных электростанций и энергоустановок» ставится задача обеспечения энергетической независимости промышленных и газотранспортных объектов ОАО «Газпром» [1].

Важнейшей составляющей электротехнического хозяйства газотранспортного узла является система генерирования электрической энергии и непосредственно ее источник — генератор. Как правило, электростанция собственных нужд (ЭСН) включает несколько типов источников электроэнергии. Во-первых, основной (базовый) генератор, обеспечивающий электроэнергией все технологические нагрузки объекта, сопутствующую инфраструктуру (жилпоселки, котельные и т.д.) и сторонних потребителей. Во-вторых, резервный источник, необходимый при отключении основного источника электроэнергии. В-третьих, аварийный источник для аварийного электроснабжения потребителей 1 категории, в том числе особой группы электроприемников при отключении основного или резервного источника электроэнергии.

В качестве привода для генераторов ЭСН рациональным является использование газотурбинных двигателей (ГТД), входящих в состав газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Особенно актуально это для резервных генераторов относительно небольшой мощности (малый отбор мощности ГТД

на вспомогательные нужды). Роль таких генераторов выполняют бесщеточные электрические машины с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением. В зависимости от параметров технического задания, в котором указываются: номинальные мощность, напряжение, частота вращения, требования к генерируемому напряжению (диапазону регулирования, качеству), выбирается способ создания магнитного поля в генераторе.

С развитием технологии получения высококоэрцитивных постоянных магнитов SmCO, NdFeB на основе редкоземельных элементов появилась возможность использования генераторов магнитоэлектрического возбуждения с высокой удельной мощностью и хорошими энергетическими характеристиками. По данным фирмы Vasomax [2] (см. рис. 1), предел наиболее энергоемких магнитов NdFeB по магнитной энергии составляет 485 кДж/м^3 , что не отменяет в ближайшей перспективе вероятности технологического прорыва и появления более эффективных типов ПМ.

Генераторы с магнитоэлектрическим возбуждением отличаются повышенным КПД за счет отсутствия потерь на возбуждение и меньших аэродинамических потерь из-за конструкции ротора в виде гладкого цилиндра [3, 4]; отсутствие на нем обмотки способствует повышению надежности как самого генератора, так и всей системы электроснабжения.

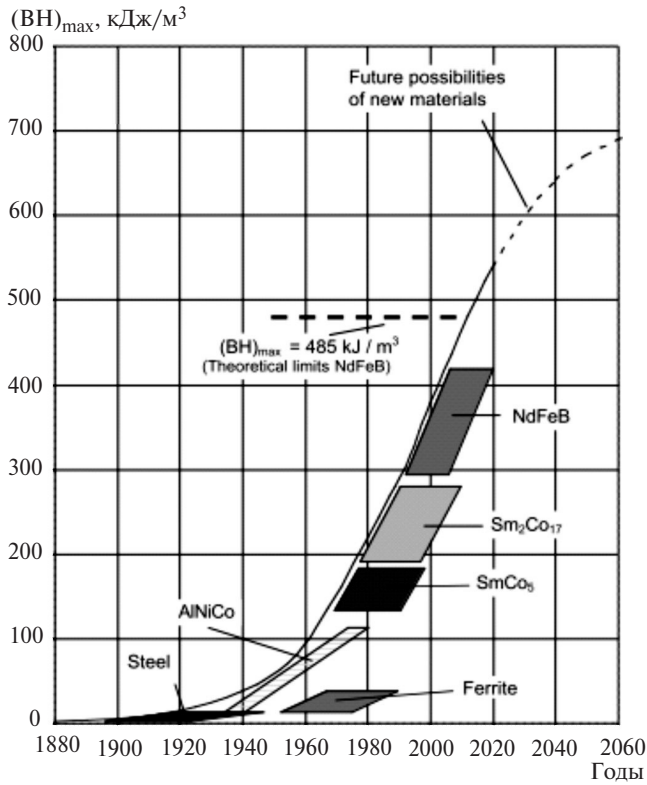


Рис. 1. Энергетические параметры современных ПМ

До недавнего времени серьезной была проблема стабилизации напряжения таких генераторов из-за невозможности регулирования магнитного поля по цепи возбуждения. На современном этапе развития элементной базы силовой электроники указанные трудности в основном преодолены. Регулирование напряжения при изменении нагрузки и частоты вращения привода осуществляется применением пассивных или активных выпрямителей с последующим преобразованием выпрямленного напряжения в переменное требуемого качества посредством инвертора [5]. Функциональная схема системы электроснабжения (СЭС) с указанным способом

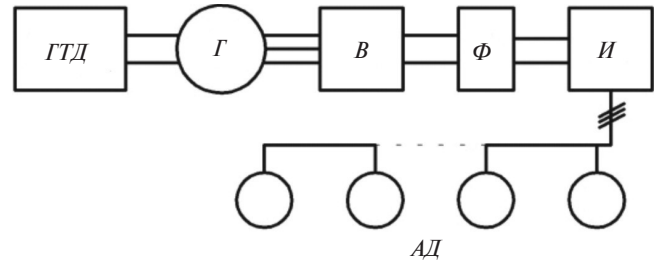


Рис. 2. Схема СЭС: ГТД – газотурбинный двигатель; Г – генератор; В – выпрямитель; Ф – фильтр; И – инвертор, АД – нагрузка (привод АВО газа)

регулирования выходного напряжения приведена на рис. 2. Блоки В, Ф, И могут быть заменены преобразователем частоты на основе ШИМ.

Алгоритм проектирования генератора. Важной задачей, которую приходится решать в процессе разработки генератора собственных нужд (ГСН), является сокращение материальных и временных затрат на создание действующего натурного образца изделия, максимально отвечающего требованиям технического задания. Для решения этой задачи в статье предлагается алгоритм проектирования и анализа характеристик ГСН (рис. 3).

Содержание шагов 1, 2 алгоритма базируется на теории магнитных цепей, что достаточно полно отражено в публикациях отечественных и зарубежных исследователей [6, 7] и не требует дальнейшего углубленного пояснения.

Шаг 3 предполагает выбор способа расположения постоянных магнитов на роторе и определение их размеров. Этот вопрос подробно исследован в [8, 9], и на основании анализа требований по удельной мощности и перегрузочной способности, предъявляемых к ГСН, выбрана конструкция индуктора с V-образными ПМ, расположенными в сердечнике из магнитомягкой стали (рис.4). Такое расположение ПМ обеспечивает хорошие энергетические характеристики генератора и менее под-

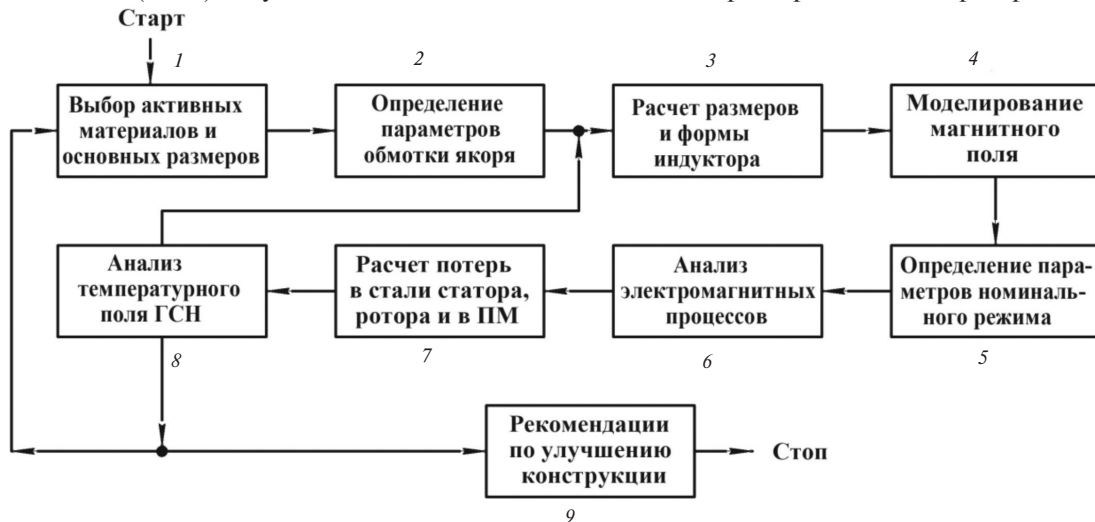


Рис. 3. Алгоритм проектирования ГСН

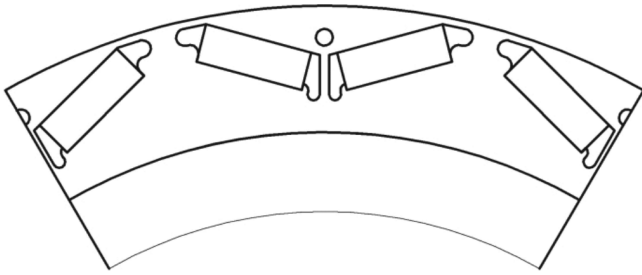


Рис. 4. Фрагмент индуктора ГСН

вержено размагничиванию внешним полем в аварийных режимах работы (короткие замыкания) и при длительных перегрузках [10]. Кроме того, при высоких значениях частоты вращения оно позволяет обеспечить прочность индуктора без применения специальных бандажей и, следовательно, не требует увеличения немагнитного зазора между статором и ротором. Это дает возможность выбирать высокоэерцитивные ПМ более низкого энергетического класса и, соответственно, стоимости.

Шаг 4 является основным для определения интегральных параметров и индуктивностей по продольной и поперечной осям. В результате численного расчета полей возбуждения и реакции якоря определяются коэффициенты формы поля, полюсного перекрытия, индуктивные сопротивления реакции якоря [11]. Причем моделирование ведется с учетом нелинейности магнитных свойств стали.

Шаг 5. На этом этапе с использованием векторной диаграммы токов и напряжений генератора при известных значениях и характере нагрузки рассчитывается угол сдвига между магнитными осями полей индуктора и якоря, необходимого при моделировании нагрузочного режима работы.

Особое внимание в данной работе уделено *шагам 6, 7* алгоритма проектирования. Эти этапы весьма важны для определения критериев по выбору элементной базы выпрямителя, фильтра, инвертора, а уточненный расчет тепловыделений в активных частях ГСН обеспечит адекватную оценку теплового состояния генератора.

Анализ электромагнитных процессов. Моделирование электромагнитных процессов проводилось с использованием специализированного программного обеспечения Ansys Maxwell. Технические данные и размеры прототипа:

Номинальная мощность P_H , кВт	370
Номинальное напряжение U_H , В	380
Номинальная частота вращения n_H , об/мин	5300
Максимальная частота вращения n_{max} , об/мин	5565
Внешний диаметр статора D_a , мм	400
Внутренний диаметр статора D_i , мм	303
Активная длина l_i , мм	260
Размер зазора δ , мм	1,5

Толщина ПМ h , мм	10
Ширина ПМ b , мм	25
Материал ПМ	N38H
Материал сердечников (эл. техн. сталь)	2412

На рис. 5 показаны зависимости ЭДС якоря от времени при минимальном, номинальном и максимальном значениях частоты вращения в режиме холостого хода.

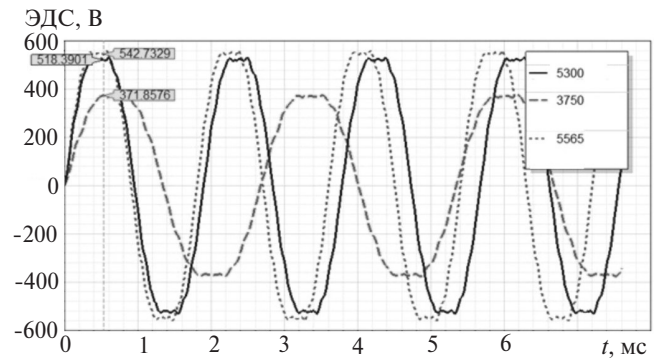


Рис. 5. Зависимость ЭДС от времени при различных значениях частоты вращения (промаркированы амплитудные значения ЭДС)

Действующее значение ЭДС (В) фазы при номинальной частоте вращения составило:

$$E_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt} = 407,7.$$

Форма ЭДС холостого хода близка к синусоидальной за исключением небольших по размаху зубцовых пульсаций.

Номинальный нагрузочный режим моделировался с учетом значения угла сдвига $\Psi = 63^\circ$ между векторами ЭДС и тока (между осями полей возбуждения и реакции якоря). Значение Ψ получено на *шаге 5* алгоритма. Характер нагрузки – активный. Результаты моделирования показаны на рис. 6.

Действующие значения фазных тока (А) и ЭДС (В) в номинальном режиме составили:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = 341; \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = 388.$$

Как видно из рис. 6,б, амплитудное значение напряжения под нагрузкой выше по сравнению с ЭДС холостого хода. Этот факт объясняется подмагничиванием сбегающего края полюса генератора полем поперечной реакции якоря, которое при такой конструкции индуктора существенно интенсивнее магнитного поля продольной реакции, что было установлено на *шаге 4*. Для исследуемого прототипа значение индуктивных сопротивлений (Ом) реакции якоря по продольной и поперечной осям: $x_{ad} = 0,71$, $x_{aq} = 1,39$, $x_{aq} \approx 2x_{ad}$.

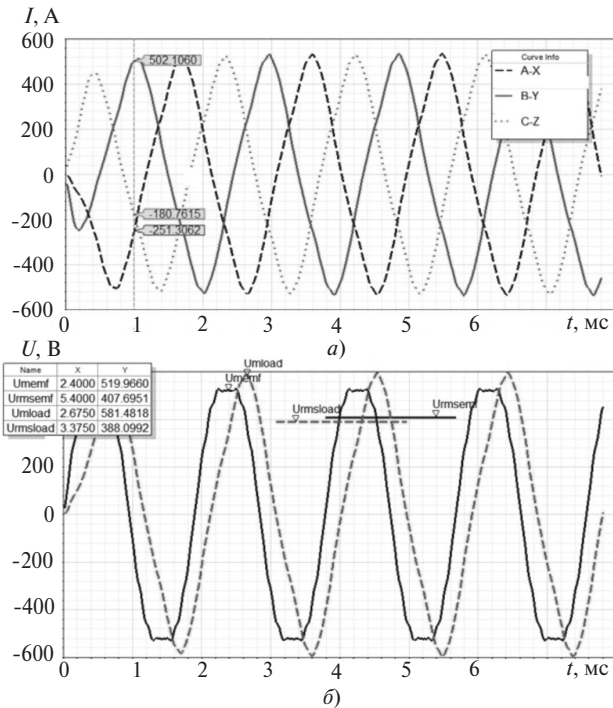


Рис. 6. Осциллограммы фазных токов (а) и напряжений (б) ГСН в нагрузочном режиме: U_{memf}, U_{mload} – амплитудные значения напряжения на холостом ходе и при нагрузке; $U_{rmsemf}, U_{rmsload}$ – действующие значения напряжения на холостом ходе и под нагрузкой

Действующее значение напряжения при номинальной нагрузке ниже на 19 В, так как сказывается преобладающее размагничивающее действие поперечной составляющей реакции якоря на протяжении полюсного деления. При этом падение напряжения на активном сопротивлении фазы обмотки весьма мало ($\Delta U_a = 2$ В).

На рис. 7 показана временная зависимость электромагнитного момента генератора.

Электромагнитный тормозной момент, развиваемый генератором в номинальном режиме, составляет $M_{\text{э}} = 735$ Н·м, тогда электромагнитная мощность (кВт):

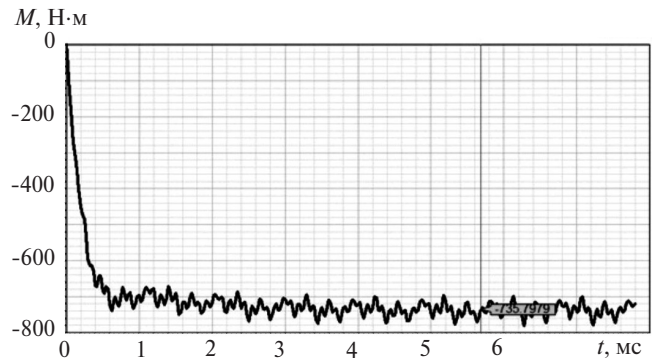


Рис. 7. Осциллограмма электромагнитного момента при номинальной нагрузке

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{э}} \omega \cdot 10^{-3} = M_{\text{ном}} \frac{2\pi n}{60} \cdot 10^{-3} = 735 \frac{2\pi \cdot 5300}{60} = 407,9.$$

Полученное в результате моделирования значение электромагнитной мощности близко к выбранному при определении главных размеров машины на шаге 1 расчетной мощности генератора ($P' = 412,9$ кВт). Расхождение не превысило 1,2%, что указывает на адекватность принятой методики при ее использовании для определения основных размеров электрических машин с магнитоэлектрическим возбуждением.

Расчет потерь в сердечниках и ПМ. Шаг 7 позволяет посредством численного моделирования определить магнитные потери в сердечниках статора, ротора и постоянных магнитах. Полученные данные в дальнейшем используются при расчете энергоэффективности генератора и анализе температурного поля ГСН. На рис. 8 представлена картина локализации потерь в сердечниках статора и ротора.

Объемные тепловыделения распределены неравномерно по сечению активной зоны генератора. Их максимальное значение наблюдается в зубцах статора. Зубцовые пульсации индукции в зазоре приводят к появлению магнитных потерь в поверх-

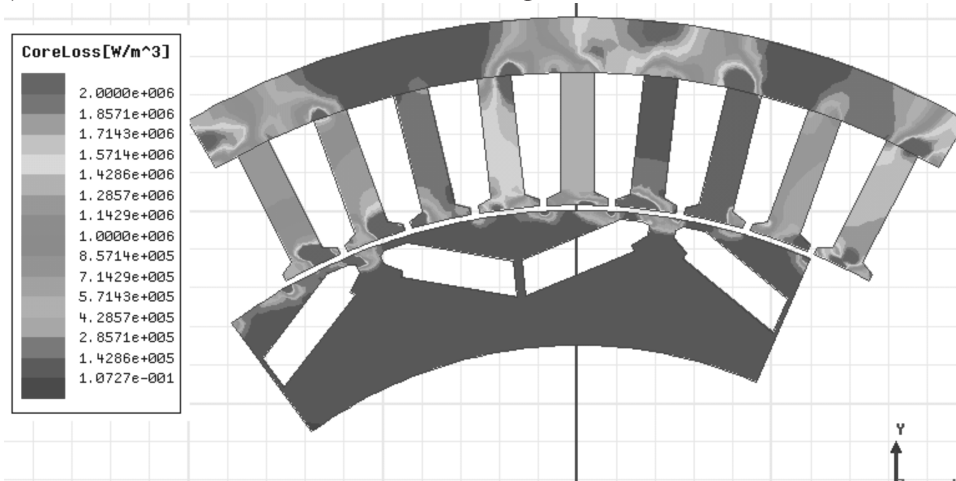


Рис. 8. Тепловыделения в магнитопроводе ГСН

ностном слое ротора, которые локализуются в основном в области «мостиков», где электротехническая сталь сильно насыщена.

Потери в отдельных стальных участках магнитопровода определялись в соответствии с [12] по зависимости

$$P_{ci} = k_i (p_0)_{1/50} B^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} M_i,$$

где k_i – поправочный коэффициент; $(p_0)_{1/50}$ – удельные потери в стали при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц для стали 2412 с толщиной листа $\Delta_{ст} = 0,5$ мм; B – амплитудное значение индукции; f – частота перемагничивания; M_i – масса (спинки статора, зубцов, сердечника ротора (без ПМ)).

На основании этой зависимости были рассчитаны коэффициенты уравнения Штейнмеца, которые использовались для определения магнитных потерь в программной среде Ansys Maxwell. Поправочный коэффициент k , учитывающий ухудшение свойств после механической обработки (штамповки) для спинки статора был принят равным 1,5, для зубцов 2. Суммарные потери в стали на вихревые токи и гистерезис в стальных участках магнитопровода составили 9,96 кВт, из них потери в спинке статора $p_a = 3355$ Вт, в зубцах $p_z = 6186$ Вт, в роторе $p_r = 419$ Вт.

Расчет магнитного поля позволил также определить потери от вихревых токов в ПМ, зависимость которых от времени показана на рис. 9.

Потери от вихревых токов в теле магнитов в установившемся номинальном режиме работы составили $p_{ПМ} = 266$ Вт. Малое значение потерь в ПМ объясняется способом расположения ПМ в индукторе. Они отделены от зазора магнитомягкой сталью, и высшие пространственные гармонические магнитного поля в зазоре в основном демпфируются массивом ротора.

Относительно большие потери в сердечниках генератора наблюдаются по причине выполнения магнитопровода из электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Для снижения этих потерь необхо-

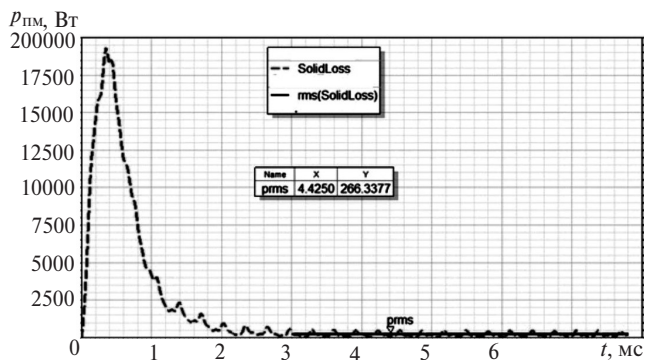


Рис. 9. Потери от вихревых токов в ПМ

димо применять стали с толщиной листа 0,35; 0,2 мм.

Шаг 8. После определения основных источников тепловыделения в активных частях ГСН проводится моделирование температурного поля генератора. В результате решения стационарной тепловой задачи распределения температуры в поперечном сечении машины определяются максимальные перегревы, соответствие используемых материалов (ПМ, изоляция) температурным ограничениям, даются рекомендации по улучшению условий охлаждения или применению материалов более высокого температурного класса.

Актуализация теоретических положений. Предложенная процедура проектирования бесщеточного генератора с магнитоэлектрическим возбуждением была использована при разработке генератора электростанции собственных нужд газоперекачивающего узла. В короткие сроки удалось создать действующий образец ГСН, полностью отвечающий требованиям по габаритам, удельной мощности, энергоэффективности. Фотографии опытного образца приведены на рис. 10.

Заключение. Процедура проектирования генератора собственных нужд представлена в виде алгоритма, важными составляющими которого являются анализ электромагнитных процессов и уточненный расчет магнитных потерь в магнитопроводе и постоянных магнитах. Предложенная последова-

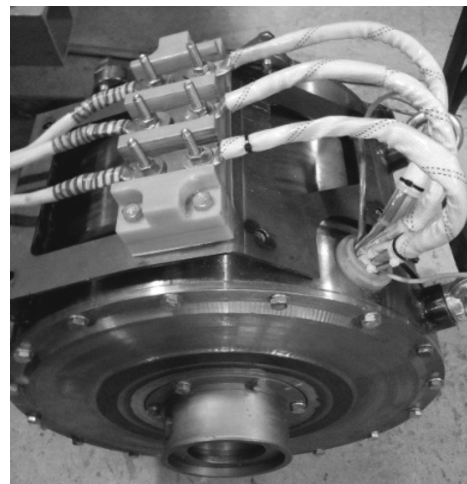


Рис. 10. Опытный образец ГСН

тельность расчета ГСН имеет следующие преимущества:

1. Моделирование электромагнитных процессов и расчет ЭДС, токов и напряжений генератора при холостом ходе и нагрузке позволяет сформировать требования к элементной базе при выборе силовых и вспомогательных компонентов полупроводниковых преобразователей системы электроснабжения собственных нужд.

2. Предложенное определение магнитных потерь в сердечниках и постоянных магнитах способствует более точному прогнозированию энергоэффективности ГСН и электростанции в целом, что помогает адекватно оценить выбор способа электроснабжения газотранспортного узла.

3. Оценка температурного поля посредством решения стационарной краевой задачи дает возможность внесения необходимой коррекции на стадии проектирования при выборе класса нагревостойкости изоляции и температурного класса высококоэрцитивных постоянных магнитов.

В результате выполнения представленной процедуры проектирования удалось сократить материальные и временные затраты на создание действующего образца генератора собственных нужд, максимально отвечающего требованиям технического задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция развития энергетики ОАО «Газпром» на основе применения собственных электростанций и энергоустановок, № 52 от 28.02.2000.

2. Arnold Magnetic Technologies [Electron. Resource] https://www.vacuumschmelze.com/Assets-Web/VACODYM-VACO-MAX-dt_12112014.pdf [Data of apple 17.04.2019]

3. Xiaohe M., Rong Su, Je T. K., Shuai W. Review of High Speed Electrical Machines in Gas Turbine Electrical Power Generation — Proc. TENCON IEEE Region 10 Conf., Nov. 2015, pp. 1–9.

4. Huang Z., Le Y. Rotordynamics Modelling and Analysis of High-Speed Permanent Magnet Electrical Machine Rotors. — IET Elec. Power Appl., 2018, vol. 12, iss. 8, pp. 1104–1109.

5. Pathmanathan M., Soong W. L. and Ertugrul N. V-и Control of Inverters Used in SPM Wind Turbine Generators. — 15th European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE), pp. 1–10, 2013.

6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1980, 928 с.

7. Gieras J. F., Wing M. Permanent Magnet Motor Technology. Design and Application. Marcel Dekker Inc., New York, Basel, 2002, 590 p.

8. Zhou L., Wu Y., Geng W. Comparative Study on Concentrated-Windings Permanent Magnet Synchronous Machines with Different Rotor Structures for Aircraft Generator Application. — 18st Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS) October 25–28, 2015, pp. 1246–1251.

9. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1985, 168 с.

10. Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В., Иванников Ю.Н., Гуляев И.В. Анализ характеристик электромеханического стартера газотурбинной установки. — Электротехника, 2019, № 7, с. 24–32.

11. Зубков Ю.В., Чеботков Э.Г. Идентификация параметров синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов методом численного моделирования магнитного поля. — Труды междунар. научно-техн. конф. (XVIII Бенардосовские чтения), 2015, с. 128–131.

12. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. М.: Энергия, 1968, 732 с.

13. Athanasopoulos K., Kastros V.I., Kappatou J.C. Electromagnetic Analysis of a PMSM with Different Rotor Topologies. — IEEE Int. Conf. of Elec. Mach., 2016, pp. 306–312.

[17.01.2020]

А в т о р ы: Зубков Юрий Валентинович — доктор техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного университета, диссертацию защитил в 2018 г.

Владимиров Денис Андреевич — магистрант Самарского государственного университета.

Electrichestvo, 2020, No. 6, pp. 24–30

DOI:10.24160/0013-5380-2020-6-24-30

The Design Procedure of the Magnetolectric Generator for Power Supply Consumers Own Power Plant

ZUBKOV Yury V. (Samara State Technical University, Samara, Russia) — Professor of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment Dept., Dr. Sci. (Eng.)

VLADIMIROV Denis A. (Samara State Technical University, Samara, Russia) — Master Student

This article explores the possibility of using synchronous generators with excitation from permanent magnets as a source of electric energy in power plants of the gas pipeline assembly's own needs. The scheme of constructing a power supply system for gas air-cooling apparatus is given. A design procedure for the generator of auxiliary needs is proposed, described in the form of an algorithm, the important components of which are the analysis of electromagnetic processes and an accurate calculation of magnetic losses in the steel cores and permanent magnets. The implementation of these steps makes it possible to

requirements for the elemental base of power static converters (rectifier and inverter) and their control systems on the one hand and determine volumetric heat emissions in the active parts of the generator for subsequent calculation of the temperature field on the other. As a result of the execution of the described design procedure, it was possible to reduce the material and time costs for creating a prototype that meets the requirements of the technical task as much as possible.

Key words: auxiliary generator, magnetolectric excitation, design procedure, process modeling

REFERENCES

1. **Kontseptsiya razvitiya energetiki OAO «Gazprom» na osnove primeneniya sobstvennykh elektrostantsiy i energoustanovok** (The concept of energy development of JSC Gazprom based on the use of its own power plants and power plants), No. 52 dated 28.02.2000.
2. **Arnold** Magnetic Technologies [Electron. Resource] https://www.vacuumschmelze.com/Assets-Web/VACODYM-VACO-MAX-dt_12112014.pdf [Data of apple 17.04.2019]
3. **Xiaohe M., Rong Su, Je T. K., Shuai W.** Review of High Speed Electrical Machines in Gas Turbine Electrical Power Generation — Proc. TENCON IEEE Region 10 Conf., Nov. 2015, pp. 1–9.
4. **Huang Z., Le Y.** Rotordynamics Modelling and Analysis of High-Speed Permanent Magnet Electrical Machine Rotors. — IET Elec. Power Appl., 2018, vol. 12, iss. 8, pp. 1104–1109.
5. **Pathmanathan M., Soong W. L. and Ertugrul N.** V-и Control of Inverters Used in SPM Wind Turbine Generators. — 15th European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE), pp. 1–10, 2013.
6. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** *Elektricheskiye mashiny: Uchebnik dlya vuzov* (Electric cars: Textbook for high schools). M.: Enerdiya, 1980, 928 p.
7. **Gieras J. F., Wing M.** Permanent Magnet Motor Technology. Design and Application. Marcel Dekker Inc., New York, Basel, 2002, 590 p.
8. **Zhou L., Wu Y., Geng W.** Comparative Study on Concentrated-Windings Permanent Magnet Synchronous Machines with Different Rotor Structures for Aircraft Generator Application. — 18st Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS) October 25–28, 2015, pp. 1246–1251.
9. **Ledovskiy A.N.** *Elektricheskiye mashiny s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami* (Calculation of electrical mashines). M.: Energiya, 1985, 168 p.
10. **Makarichev Yu.A., Zubkov Yu.V., Ivannikov Yu.N., Gulyayev I.V.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2019, No. 7, pp. 24–32.
11. **Zubkov Yu.V., Chebotkov E.G.** *Trudy Mezhdunarod. Nauchno-tekhn. konf. (XVIII Benardosovskiye chteniya_ – in Russ. (Proc. of Intern. Scientific, and Technical Conf. (XVIII Benardos Lectures)*, 2015, pp. 128–131.
12. **Shuyskiy V.P.** *Raschet elektricheskikh mashin* (Calculation of electrical machines). M.: Energiya, 1968, 732 p.
13. **Athanasopoulos K., Kastros V.I., Kappatou J.C.** Electromagnetic Analysis of a PMSM with Different Rotor Topologies. — IEEE Int. Conf. of Elec. Mach., 2016, pp. 306–312.

[17.01.2020]