

Обобщенная модель магнитоэлектрического генератора с проводящей защитной оболочкой статора*

Саттаров Р.Р., Зиганшин Т.Р.

Уфимский государственный нефтяной технический университет
г. Уфа, Российская Федерация

sattar.rb@gmail.com

Аннотация. Одним из направлений развития электроэнергетики является большее использование возобновляемых источников энергии. При этом особенности процесса преобразования энергии предъявляют специфические требования к конструкциям электрических генераторов, например, для погружных электростанций необходимы устойчивые к действию морской воды и влаги генераторы. В статье представлен трехфазный магнитоэлектрический синхронный генератор с защищенным проводящей оболочкой статором для поплавковых волновых электростанций. Представлен подход к моделированию и разработана обобщенная динамическая модель. Действие статорной проводящей защитной оболочки учитывается эквивалентной сосредоточенной трехфазной обмоткой. На основе разработанной динамической математической модели могут быть исследованы характеристики синхронных генераторов с проводящими защитными оболочками и электроэнергетической системы на его основе в установившемся нормальном и переходный аварийных режимах. Полученная динамическая модель может быть использована при анализе генераторов без защитных оболочек для учета действия вихревых токов в магнитопроводе статора.

Ключевые слова: магнитоэлектрический генератор, проводящая защитная оболочка, экранированный статор, обобщенная электрическая машина, преобразования Парка, вихревые токи.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время растет интерес к возобновляемым источникам электрической энергии (ВИЭ). Одним из перспективных направлений является малая гидро- и приливная энергетика [1, 2]. В гидро- и поплавковых электростанциях электрический генератор может быть полностью или частично погруженным в воду [3-5]. В таких электростанциях наиболее целесообразно использовать трехфазные синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов, что повышает их надежность и уменьшает затраты на обслуживание [2, 6].

Для защиты активных материалов от воздействия водной среды в генераторах гидро- и поплавковых электростанций применяют конструкционные диэлектрические и немагнитные материалы. Однако в ряде случаев, возможно только использование металлических проводящих защитных оболочек, которые для цилиндрических машин часто представляют собой медные, титановые или алюминиевые гильзы. Электрические машины с защитными оболочками находят применение в атомной энергетике, химической

промышленности и нефтяной отрасли [7]. Экранированные электрические генераторы и двигатели могут использоваться в авиационных двигателях более электрических самолетов [8].

Очевидно, что наличие проводящей защитной оболочки-экрана, в том числе из непроводящих и немагнитных материалов, будет влиять на энергетические и рабочие характеристики защищаемых генераторов и двигателей. Для анализа действия вихревых токов в проводящих защитных оболочках электрических генераторов используются сложные модели на основе полевых методов расчета – как аналитических [3, 6, 9] так и численных [10, 11]. Однако эти методы целесообразно использовать уже на этапе решения задач проектирования генераторов, связанных с выбором материала, геометрии защитной оболочки, вопросов его тепловой и механической прочности и т.п. В случае исследования режимов генератора и системы электроснабжения на его основе такой подход приводит к вычислительным сложностям.

В традиционных синхронных генераторах (СГ) используются короткозамкнутые (КЗ) роторные обмотки для демпфирования колебаний при отклонениях частоты от синхронной. Классическая модель синхронных генераторов, в которых учитывается действие короткозамкнутых успокоительных обмоток или контуров в теле массивного ротора, широко известна [9]. В некоторых случаях для уменьшения чрезмерных индукционных токов в толще постоянных магнитов и в магнитопроводе ротора используется экранирующий цилиндр [10]. В данной работе, развивается математическая модель синхронного генератора с постоянными магнитами и статором, защищенным проводящей оболочкой. Такой защищенный трехфазный СГ может найти применение в поплавковых электростанциях [4]. Предлагаемая модель является достаточно общей и также может быть использована для анализа переходных и установившихся режимов в герметичных синхронных двигателях.

Далее статья организована следующим образом. В первом разделе обсуждаются основные допущения и эквивалентная модель генератора. Во втором разделе описывается математическая модель генератора в фазных координатах. В третьем разделе представлена модель генератора во вращающейся системе координат d, q . В заключении обсуждаются основные результаты.

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice, <https://peami.su-ieee.ru>.

1. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА С ЗАЩИЩЕННЫМ РОТОРОМ

Выбор метода моделирования. Для исследования электрических машин с проводящими экранами могут быть использованы либо методы теории цепей (макромодели), либо полевые методы (микромодели) [12-14].

Методы теории цепей нашли самое широкое применение к анализу электрических машин и электромеханических преобразователей и позволяют получать физически наглядные и достаточно просто интерпретируемые результаты для установившихся и динамических режимов [9, 13]. Недостатком этих моделей являются принципиальная их неточность при анализе машин с распределенными параметрами [3, 15].

Полевые методы нашли широкое применение при анализе электромеханических преобразователей с распределенной вторичной средой, например, асинхронных двигателей с полым или массивным роторами, вихретоковых тормозов и муфт. Возможности анализа полевыми методами существенно возросли с появлением метода конечных элементов (МКЭ) и программных комплексов на его основе. Однако, в настоящее время в большинстве случаев использование динамических моделей на основе полевых микромоделей ограничиваются сложностью и излишней детализацией получаемых результатов, которые затрудняют физическую интерпретацию полученных результатов и их использование для принятия проектных решений [14].

Возможны гибридные модели, когда часть элементов электрической машины моделируется на основе микромоделей, а другая часть – на основе макромоделей [6]. Однако наиболее целесообразно использовать классический подход, когда полевые микромодели используются для получения основных параметров электрических машин, а для исследования их установившихся и динамических режимов, а также комплексов и систем на основе электрических машин, используются макромодели. В этом случае, анализ моделей может проходить относительно быстро и при минимальных вычислительных ресурсах, что особенно важно при реализации современных интеллектуальных методов управления энергосистемами [14].

Модель генератора. При реализации модели можно использовать обычные общепринятые допущения, погрешности от использования, которых либо незначительны, либо могут быть учтены в практических задачах [9, 13]. На рис. 1 представлена однопериодная (двухполюсная) модель СГ с защищенным статором с симметричной трехфазной обмоткой. Представленная схема, имеет на статоре защитную проводящую оболочку и распределенную трехфазную обмотку, что делает ее непригодной для построения быстрой и вычислительно-эффективной модели СГ. Поэтому необходимо получить модель СГ, в которой действие проводящей защитной оболочки было бы учтено элементами с сосредоточенными параметрами.

Замена проводящей защитной оболочки эквивалентными сосредоточенными обмотками.

При математическом моделировании асинхронных и синхронных машин используется замена короткозамк-

нутых роторных обмоток двумя эквивалентными короткозамкнутыми контурами [9, 13]. При эквивалентной замене обмоток необходимо, чтобы энергетические соотношения не изменялись. Это позволяет определить параметры эквивалентных контуров исходя из неизменности активных потерь и энергии полей рассеяния. В рассматриваемом случае, проводящая оболочка неподвижна и магнитное поле реакции обмотки статора в установившемся режиме бежит относительно него. В результате в оболочке возбуждаются токи, которые создают свое бегущее магнитное поле, которое неподвижно относительно поля статора. Подробный расчет токов и поля защитной оболочки может быть осуществлен на основе теории поля и аналогичен расчету электромеханических преобразователей с полым проводящим ротором [16].

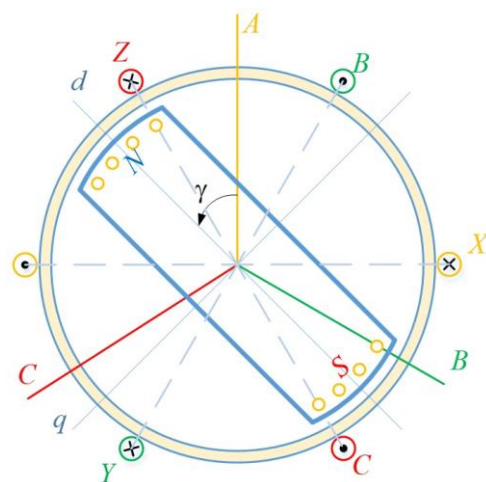


Рис. 1. Схема трехфазного магнитоэлектрического СГ с защитной проводящей оболочкой на статоре

Однако, при анализе генератора в составе электроэнергетической системы, процессы в защитной оболочке не представляют интереса, и должно быть учтено только их

влияние на статорные цепи. В $\varepsilon - u_{CS} = \frac{d\lambda_{CS}}{dt} + R_S i_{CS}$.om

случае, действие проводящей защитной оболочки может быть представлено введением некоторых фиктивных короткозамкнутых обмоток, которые создают эквивалентную волну МДС. В общем случае, бегущую волну МДС можно создать многофазной системой, однако наиболее удобным будет количество фаз, соответствующее количеству фаз обмотки статора. Таким образом, проводящая защитная оболочка статора может быть представлен сосредоточенной трехфазной обмоткой [10, 12, 17]. Параметры эквивалентной обмотки и могут быть определены из равенства основной гармоники волны МДС. При наличии защитных проводящих оболочек или короткозамкнутых успокоительных или пусковых обмоток на роторе, их действие также может быть учтено двумя эквивалентными короткозамкнутыми контурами [9, 18].

С учетом этих преобразования, может быть составлена схема СГ с защищенным статором (рис. 2).

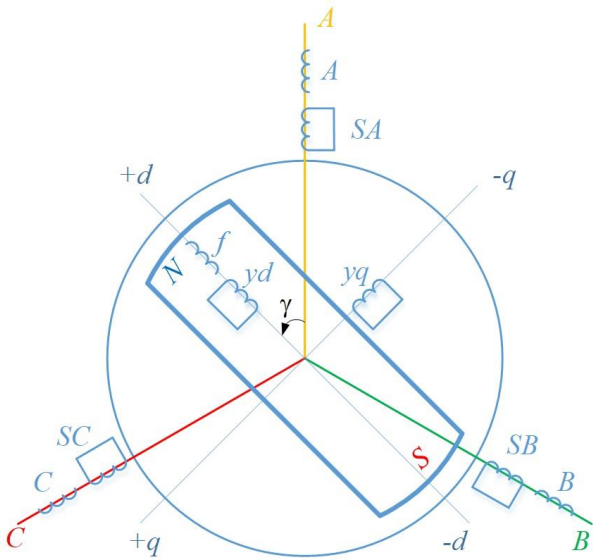


Рис. 2. Обобщенная модель СГ с КЗ эквивалентными контурами, соответствующими защитной оболочке и короткозамкнутым обмоткам на роторе

2. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Динамическая модель обобщенного СГ с КЗ эквивалентными контурами будет включать в себя уравнения напряжения для фазных обмоток статора, уравнения напряжения эквивалентных контуров проводящей оболочки, а также уравнения роторных контуров. Действие постоянных магнитов может быть учтено введением эквивалентной обмотки возбуждения, приведенной к обмотке статора [19, 20]. Также для упрощения далее не учитывается наличие проводящих демпферных контуров на роторе, при необходимости они могут быть учтены по [9, 13].

Уравнения напряжений. Для обмоток статора:

$$\begin{aligned} -u_{AS} &= \frac{d\lambda_{AS}}{dt} + R_S i_{AS}, \\ -u_{BS} &= \frac{d\lambda_{BS}}{dt} + R_S i_{BS}, \\ -u_{CS} &= \frac{d\lambda_{CS}}{dt} + R_S i_{CS}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\lambda_{AS}, \lambda_{BS}, \lambda_{CS}$ – потокосцепления соответствующих фаз; i_{AS}, i_{BS}, i_{CS} – фазные токи; R_S – активное сопротивление обмоток статора.

Для трех короткозамкнутых контуров, эквивалентных защитную оболочку:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{d\lambda_{AP}}{dt} + R_P i_{AP}, \\ 0 &= \frac{d\lambda_{BP}}{dt} + R_P i_{BP}, \\ 0 &= \frac{d\lambda_{CP}}{dt} + R_P i_{CP}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\lambda_{AP}, \lambda_{BP}, \lambda_{CP}$ – потокосцепления соответствующих фаз короткозамкнутых контуров; i_{AP}, i_{BP}, i_{CP} – фазные токи в эквивалентной короткозамкнутой обмотке; R_P – активное сопротивление контуров, заменяющих защитную оболочку.

В случае возбуждения от постоянных магнитов можно принять, что в эквивалентной обмотке возбуждения ток поддерживается неизменным $i_f = \text{const}$ [19] или принять неизменным потокосцепление обмоток статора с полем постоянных магнитов $\psi_f = \text{const}$ [20, 21].

Потокосцепления определяются при допущении о линейности магнитной цепи генератора [13]. Потокосцепления обмоток статора содержат три составляющие: потокосцепление с обмотками якоря, потокосцепления с эквивалентными короткозамкнутыми обмотками статора и потокосцепления с полем постоянных магнитов. Для фазы А, например, потокосцепление будет:

$$\lambda_{AS} = \lambda_{ASS} + \lambda_{ASP} + \lambda_{ASf}.$$

Используя допущение о линейности магнитной цепи, потокосцепления фаз статора можно представить как

$$\lambda_{AS} = (L_{ASAS} i_{AS} + L_{ASBS} i_{BS} + L_{ASCS} i_{CS}) + (L_{ASAP} i_{AP} + L_{ASBP} i_{BP} + L_{ASCP} i_{CP}) + (L_{ASf} i_f)$$

$$\lambda_{BS} = (L_{BSAS} i_{AS} + L_{BSBS} i_{BS} + L_{BSCS} i_{CS}) + (L_{BSAP} i_{AP} + L_{BSBP} i_{BP} + L_{BSCP} i_{CP}) + (L_{BSf} i_f)$$

$$\lambda_{CS} = (L_{CSAS} i_{AS} + L_{CSBS} i_{BS} + L_{CSCS} i_{CS}) + (L_{CSAP} i_{AP} + L_{CSBP} i_{BP} + L_{CSCP} i_{CP}) + (L_{CSf} i_f)$$

Аналогичные выражения можно записать и для потокосцеплений эквивалентных короткозамкнутых обмоток.

Ряд индуктивных коэффициентов будет постоянными, а часть зависит от положения ротора. Так как для возбуждения используются постоянные магниты, магнитная проницаемость которых близка к единице, то, для упрощения дальнейших выкладок, приближенно можно принять, что магнитные проводимости по продольной и поперечной осям одинаковые. В целом такое допущение верно для генераторов с поверхностным расположением постоянных магнитов [19, 21]. Тогда индуктивности и взаимные индуктивности статорных обмоток будут постоянными [13].

Индуктивности статорных обмоток:

$$L_{ASAS} = L_{BSBS} = L_{CSCS} = L_m + L_{1\sigma}$$

$$L_{ASBS} = L_{ASCS} = L_{BSCS} = L_m \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{L_m}{2}$$

Здесь $L_m = \frac{4\mu_0}{p\pi^2} (w_1 k_{o1})^2 \frac{k_d \tau l_\delta}{k_\delta \delta}$, и величина воздушного зазора определяется с учетом толщины защитной оболочки и магнитов [13].

3. УРАВНЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Уравнения для комплексных изображающих векторов. Используем результирующие комплексные функции (изображающие векторы), которые во вращающейся системе определяются, например, для тока статора, следующим образом [13, 21]

$$-\tilde{U}_{S(d,q)} = \frac{d\tilde{\lambda}_{S(d,q)}}{dt} + j\omega\tilde{\lambda}_{S(d,q)} + R_S \tilde{I}_{S(d,q)},$$

$$0 = \frac{d\tilde{\lambda}_{P(d,q)}}{dt} + j\omega\tilde{\lambda}_{P(d,q)} + R_P \tilde{I}_{P(d,q)}.$$

В вещественных координатах, для фазной обмотки статора во вращающейся системе координат d, q

$$-u_{ds} = \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega\lambda_{qs} + R_S i_{ds},$$

$$-u_{qs} = \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega\lambda_{ds} + R_S i_{qs}. \quad (3)$$

Для обмоток эквивалентных защитной оболочке

$$0 = \frac{d\lambda_{dp}}{dt} - \omega\lambda_{qp} + R_p i_{dp},$$

$$0 = \frac{d\lambda_{qp}}{dt} - \omega\lambda_{dp} + R_p i_{qp}. \quad (4)$$

Потокоцепления статорных обмоток по продольной и поперечной осям

$$\lambda_{ds} = L_{1s} i_{ds} + L_{1m} i_{dp} + L_{1m} i_{f},$$

$$\lambda_{qs} = L_{1s} i_{qs} + L_{1m} i_{qp},$$

$$\lambda_{dp} = L_{1m} i_{ds} + L_{1p} i_{dp} + L_{1m} i_{f},$$

$$\lambda_{qp} = L_{1m} i_{qs} + L_{1p} i_{qp}. \quad (5)$$

Эквивалентные защитные короткозамкнутые контуры могут быть исключены из полученной системы уравнений, что приведет к типовой модели синхронной машины [20, 21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен подход к моделированию электрических генераторов с защищенным проводящей оболочкой статором и получена обобщенная динамическая модель магнитоэлектрического генератора с защищенным статором, которая может быть использована для быстрой и эффективных расчетов переходных и установившихся режимов в системах управления. Полученная обобщенная математическая модель позволяют установить наиболее общие свойства электрических генераторов с защищенным статором. Эти результаты могут быть распространены на различные типы электромеханических преобразователей с экранирующими оболочками. В частности, предложенный подход позволяет получить динамическую модель для анализа установившихся и переходных режимов в электроприводах на основе экранированных синхронных и асинхронных двигателей. С другой стороны, предложенный подход может быть обобщен для учета конечной проводимости материала статора и отражения потерь на вихревые токи в динамических обобщенных моделях неэкранированных электрических машин.

Кроме того, эту модель можно рассматривать как частный случай многофазной электрической машины, а именно как симметричный шестифазный генератор в аварийном режиме с тремя закороченными обмотками.

Литература

1. Rhinefrank K. Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy // *Renew. Energy*. Elsevier. – 2006. – vol. 31, № 9.
2. Темеев А.А. Производство и электроэнергия и водород за счет мирового океана / А.А. Темеев, Н.Н. Куртина, С.А. Темеев // Академия энергетики. 2010. № 4 (36).
3. Саттаров Р.Р. Анализ режима холостого хода в экранированном торцевом синхронном генераторе с высококоэффициентными постоянными магнитами / Р.Р. Саттаров, Т.Р. Зиганшин // *Электротехнические комплексы и системы*. – 2019. – Т. 15, № 1.
4. Темеев С.А. Динамическая модель механического привода модуля поплавковой волновой электростанции:

дис. на соиск. канд. наук. – Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, 2010.

5. Темеев А.А. Динамическая модель поплавкового преобразователя энергии волн / А.А. Темеев, О.С. Сладков, С.А. Темеев // *Теплоэнергетика*. – 2008. – № 12.

6. Sattarov R.R. Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator for Float Buoy Type Wave Energy Converters / R.R. Sattarov, T. Ziganshin // *Dyn. Syst. Mech. Mach.* – IEEE, 2019.

7. Писаревский А. Электромеханические устройства для привода герметичных насосов // *Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2006. – №1.

8. Madonna V. Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities / V. Madonna, P. Giangrande, M. Galea // *IEEE Trans. Transp. Electrification*. – 2018. – vol. 4, no. 3.

9. Сипайлов Г.А. Электрические машины (специальный курс). – М.: Высшая школа, 1987.

10. Polinder H. Modelling a PM machine with shielding cylinder / H. Polinder, M.J. Hoesjmakers // *IEEE Conf. Publ. IEE*. – 1999. – no. 468.

11. Иванов-Смоленский А.В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин, А.И. Власов. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

12. Лопухина Е.М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики. – М.: Высшая школа, 1988.

13. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том 2: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004.

14. Wu T. Fast reduced functional models of electromechanical actuators for more-electric aircraft power system study // *Proceedings of 2008 SAE Power System Conference*. – 2008.

15. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Ленинград: Энергия, 1970

16. Sattarov R.R. Electromechanical transients in passive suspension systems with eddy current dampers // *9th International Conference on Power Drives Systems, ICPDS 2016 - Conference Proceedings*, 2016.

17. Лопухина Е.М. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ / Е.М. Лопухина, Г.А. Семенчукова. – М.: Высш. школа, 1980

18. Вольдек А.И. Электрические машины. – Ленинград: Энергия, 1974.

19. Балагуров В.А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

20. Kim S.-H. Electric motor control: DC, AC, and BLDC motors. – Amsterdam: Elsevier, 2017.

21. Wang L. PID and predictive control of electrical drives and power converters using MATLAB®/Simulink. – Singapore: Wiley-IEEE Press, 2014.

The Generalized Model of a Magnetolectric Generator with a Conductive Stator Shell

Sattarov R.R., Ziganshin T.R.
Ufa State Petroleum Technological University
Ufa, Russian Federation
sattar.rb@gmail.com

Abstract. One of the directions of development of the electric power industry is the greater use of renewable energy sources. At the same time, the features of the energy conversion process impose specific requirements on the design of electrical generators, for example, for submersible power plants, generators that are resistant to the action of seawater and moisture are required. The article presents a three-phase magnetolectric synchronous generator with a stator protected by a conductive shell for float wave power plants. A modeling approach is presented and a generalized dynamic model is developed. The action of the stator conductive containment is taken into account by the equivalent lumped three-phase winding. Based on the developed dynamic

mathematical model, the characteristics of synchronous generators with conductive protective shells and an electric power system based on it in steady-state normal and transient emergency modes can be investigated. The obtained dynamic model can be used in the analysis of generators without protective shells to take into account the action of eddy currents in the stator magnetic circuit.

Keywords: synchronous PM generator, conductive protecting shell, shielded stator, generalized electric machine, Park transformations, eddy currents.

Библиографическое описание статьи

Саттаров Р.Р. Обобщенная модель магнитоэлектрического генератора с проводящей защитной оболочкой статора / Р.Р. Саттаров, Т.Р. Зиганшин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т.10, №4. – С. 43-47. DOI: 10.24892/RIJIE/20230409

Reference to article

Sattarov R.R., Ziganshin T.R. The generalized model of a magnetolectric generator with a conductive stator shell, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.4, pp. 43-47. DOI: 10.24892/RIJIE/20230409
