

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.11

УДК 621.311.238:681.511.2-047.58

Б.В. Кавалеров, И.Р. ЗиятдиновПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ПОСТРОЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Построение математических моделей синхронного генератора, работающего автономно на активно-индуктивную нагрузку, рассматривается как важный этап для обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии. **Цель:** разработка модели синхронного генератора, учитывающей внутренние перекрестные связи между ее переменными как части более общей математической модели с перспективой дальнейшего проектирования системы автоматического управления синхронного генератора, обеспечивающей поддержание заданного напряжения и регулирование мощности генератора при работе с сетью. Задача решается **методом** идентификации модели по экспериментальным данным, которые получены двумя путями: на лабораторной установке и на математической модели, построенной на основе учета физики процессов в синхронном генераторе. **Результаты:** строится новая модель, чтобы при сохранении заданной точности добиться повышения быстродействия расчетов, а также для того, чтобы проанализировать внутренние связи между переменными в моделируемой системе. Структура уравнений выбирается в ходе исследований. Модель строится с учетом априорной информации. Экспериментальные данные формируются при изменениях напряжения обмотки возбуждения и частоты вращения генератора и используются для последующей оценки области адекватности полученных моделей. Проводится сравнительный анализ результатов, полученных расчетным и экспериментальным путями на 6 МВт и 370 Вт синхронном генераторе. Проверется гипотеза о том, что статические значения, полученные по моделям синхронного генератора разных мощностей, учитывающих физику процесса, в относительных единицах должны быть близки. Данное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в соответствии с исследовательским проектом № 19-48-590012.

Ключевые слова: синхронный генератор, моделирование, сравнительный анализ.

B.V. Kavalеров, I.R. Ziyatdinov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE SYNCHRONOUS GENERATOR STATIC MODELS CONSTRUCTION BY EXPERIMENTAL DATA

The construction of mathematical models of a synchronous generator autonomously operating for an active inductive load is considered an important step to ensure the required indicators of the quality of electricity. The **purpose** of the research is to create a synchronous generator model that takes into account the internal cross-connections between its variables as part of a more general mathematical model with the prospect of further designing a synchronous generator automatic control system that maintains a given voltage and regulates the generator power when working with the power grid. The problem is solved by identifying the model using experimental data obtained in two ways: on a laboratory setup and on a mathematical model built on the basis of taking into account the physics of processes

in a synchronous generator. **Results:** a new model is being built in order to maintain the computational speed while maintaining the specified accuracy, and also to analyze the internal relationships between the variables in the simulated system. The structure of the equations is chosen in the course of research. The model is built taking into account a priori information. Experimental data are generated when the excitation winding voltage and the generator speed are changed and are used to further evaluate the adequacy of the obtained models. A comparative analysis of the results obtained by calculation and experimental ways on 6 MW and 370 W synchronous generator is carried out. The hypothesis is verified that the static values obtained from the models of a synchronous generator of different powers, taking into account the physics of the process, in relative units should be close. The reported study was funded by RFBR, project number 19-48-590012.

Keywords: synchronous generator, modeling, comparative analysis.

Введение. Синхронные электрогенераторы широко применяются для производства электроэнергии на электростанциях различной мощности и различной конструкции. При этом главным назначением электрогенератора является обеспечение потребителя электроэнергией требуемого качества. При автономной работе электрогенератора на выделенную нагрузку (без мощной сети) необходимо обеспечивать поддержание напряжения и частоты за счет воздействия на электрогенератор. Известно, что основным методом воздействия на напряжение электрогенератора является изменение тока возбуждения, а основным методом воздействия на электрическую частоту такого генератора является изменение вращающего момента первичного двигателя [1, 2]. Также хорошо известно, что кроме основных методов воздействия имеются внутренние перекрестные связи между переменными электрогенератора. Выявлению этих внутренних перекрестных связей и изучению их влияния с помощью построения соответствующих математических моделей и посвящена настоящая статья. Задачам идентификации и построения моделей синхронного генератора посвящены работы как ученых-классиков (В.А. Веников, А.В. Башарин и др.), так и более современных исследователей (Х.Н. Расулзода, А.А. Татевосян и др.). Предлагаемый подход позволяет упростить и обосновать математическую модель синхронного генератора.

Описание эксперимента. Для построения моделей электрогенератора методом идентификации необходимы экспериментальные данные [3–9]. Вначале получим экспериментальные данные с помощью математической модели синхронного электрогенератора, которая учитывает физику процессов в генераторе с общепринятыми допущениями на основе уравнений Парка [10]. Модель реализована в составе программного моделирующего комплекса КМЭС, разработанного в ПНИПУ для моделирования газотурбинных электростанций [11]. Ге-

нератор работает на выделенную активно-индуктивную нагрузку и приводится во вращение газотурбинной установкой (ГТУ).

При моделировании принимались следующие номинальные данные СГ: $P = 6000$ кВт, $U = 6300$ В, $n = 3000$ об/мин, $I = 687$ А, $I_f = 200,17$ А. Параметры генератора: $R_{\text{статор}} = 0,0249$ Ом, $R_{\text{ротор}} = 1,499$ Ом. Параметры нагрузки: $R = 800$ Ом, $X = 100$ Ом.

Первоначально устанавливается напряжение возбуждения генератора U_f в заданное значение, при этом угловая скорость электрогенератора ω также свободно задается. Производится расчет установившегося режима, и записываются полученные данные.

Построение статической модели с учетом априорной информации. Для повышения точности модели и расширения области ее адекватности поставлена задача максимально использовать априорную информацию о модели синхронного генератора [12–20]. Такой априорной информацией являются известные уравнения Парка [1, 10], построенные с учетом физики процессов в электрогенераторе. Запишем уравнения СГ и нагрузки, преобразовав уравнения Парка к матричному виду для статического режима (1,2). Значение переменных возьмем из табл. 1, в которой указаны данные статического режима синхронного генератора совместно с номинальными данными, определяющими параметры эксперимента (из предыдущего раздела). Первые 5 точек получены для небольших изменениях U_f и ω . Следующие 5 точек получены при больших изменениях U_f и ω и используются для последующей оценки области адекватности полученных моделей.

Таблица 1

Значения статического режима синхронного генератора, экспериментальные данные для ближних (с 1 по 5) и удаленных точек (с 6 по 10)

Параметры	№ эксперимента				
	1	2	3	4	5
U_f , В	157,22	100	157,22	200	157,22
ω , об/мин	3000	3000	2500	3000	3500
U , В	6291,99	4002,03	5244,91	8004,06	7338,39
Параметры	№ эксперимента				
	6	7	8	9	10
U_f , В	300	300	400	50	50
ω , об/мин	1000	1500	500	5000	4000
U , В	4006,8	6008,41	2671,93	3330,81	2666,356

Выразим статорные токи СГ через статорные напряжения и напряжение возбуждения:

$$\begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{r}{r^2 + \omega^2 x_d x_q} & -\frac{\omega x_d}{r^2 + \omega^2 x_d x_q} \\ \frac{\omega x_q}{r^2 + \omega^2 x_d x_q} & \frac{r}{r^2 + \omega^2 x_d x_q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_d \\ U_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\omega x_d}{r^2 + \omega^2 x_d x_q} \\ -\frac{r}{r^2 + \omega^2 x_d x_q} \end{pmatrix} \omega x_{ad} \frac{U_f}{r_f}. \quad (1)$$

Аналогично поступим с уравнением активно-индуктивной нагрузки:

$$\begin{pmatrix} I_{nd} \\ I_{nq} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{r_n}{r_n^2 + \omega^2 x_n^2} & -\frac{\omega x_n}{r_n^2 + \omega^2 x_n^2} \\ \frac{\omega x_n}{r_n^2 + \omega^2 x_d x_q} & \frac{r_n}{r_n^2 + \omega^2 x_n^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{nd} \\ U_{nq} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Вычтем из уравнения (1) уравнение (2), при этом учитываем, что, $I = I_n$, $U = U_n$. Тогда сможем получить следующие уравнения для проеций статорного напряжения:

$$\begin{aligned} U_d &= a_{11} U_f + a_{12} \omega^2 U_f + a_{13} \frac{\omega^3 + 1}{\omega^4 + \omega^2 + 1} \cdot U_f, \\ U_q &= a_{21} \omega U_f + a_{22} \omega^3 U_f + a_{23} \frac{\omega^3 + 1}{\omega^4 + \omega^2 + 1} \cdot U_f, \end{aligned} \quad (3)$$

где $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}$ – это коэффициенты, которыми заменены сложные соотношения параметров (активных и индуктивных сопротивлений). В этом случае становится возможным записать:

$$\begin{aligned} (U_d) &= (a_{11} \quad a_{12} \quad a_{13}) \begin{pmatrix} U_f \\ \omega^2 \cdot U_f \\ \frac{\omega^2 + 1}{\omega^4 + \omega^2 + 1} \cdot U_f \end{pmatrix}, \\ (U_q) &= (a_{21} \quad a_{22} \quad a_{23}) \begin{pmatrix} \omega U_f \\ \omega^3 U_f \\ \frac{\omega^3 + \omega}{\omega^4 + \omega^2 + 1} \cdot U_f \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

Упростим полученную систему уравнений (4):

$$(U_d) = (a_{11} \ a_{12} \ a_{13}) \cdot \begin{pmatrix} U_f \\ \omega^2 \cdot U_f \\ \frac{U_f}{\omega^2} \end{pmatrix}, \quad (U_q) = (a_{21} \ a_{22} \ a_{23}) \cdot \begin{pmatrix} \omega U_f \\ \omega^3 U_f \\ \frac{U_f}{\omega} \end{pmatrix} \quad (5)$$

или упростим в большей степени, отбросив обратную зависимость от ω :

$$(U_d) = (a_{11} \ a_{12}) \cdot \begin{pmatrix} U_f \\ \omega^2 U_f \end{pmatrix}, \quad (U_q) = (a_{21} \ a_{22}) \cdot \begin{pmatrix} \omega U_f \\ \omega^3 U_f \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Далее для уравнений (6) методом наименьших квадратов выполним идентификацию, задавшись напряжениями и угловой скоростью из табл. 1. При этом используются проекции статорного напряжения на оси d и q , их непосредственно вычисляет комплекс КМЭС. Результатом идентификации будут являться коэффициенты a в уравнениях (6). Идентификация выполняется в относительных единицах.

Проверим точность идентификации. Для этого зададимся напряжениями возбуждения и угловой скоростью и, используя найденные коэффициенты a , рассчитаем проекции статорного напряжения, а по ним – напряжение статора $U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$ и сравним его с экспериментальным. Построим графики для ближних и для дальних точек по табл. 1.

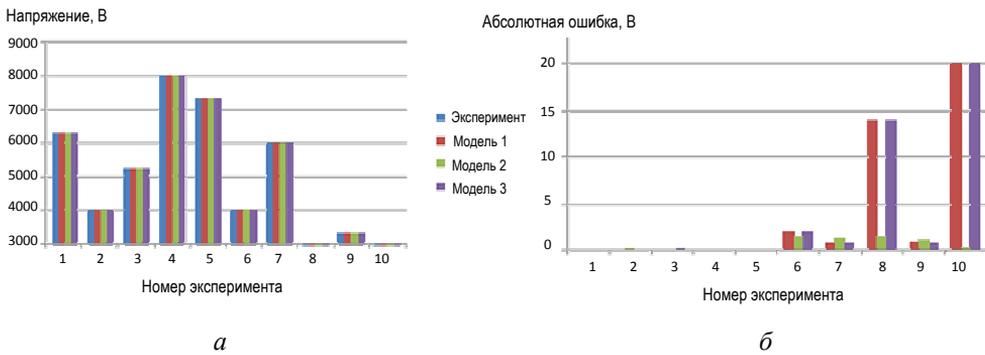


Рис. 1. Результаты эксперимента: *а* – напряжения для ближних и удаленных точек модели 1, 2, 3, где модель 1 построена по уравнению 4, модель 2 – по уравнению 5, модель 3 по уравнению 6; *б* – абсолютная ошибка напряжения модели 1, 2 и 3

Все три модели дают близкий результат. Но ближе всего к экспериментальным данным находится модель 2. Как видно из рис. 1, адекватность всех моделей очень высока (погрешность менее 0,5 %).

Проверка статической модели на лабораторной установке. Серия экспериментов проводилась на лабораторном стенде (рис. 2), где используется синхронный генератор типа IMM71B4Y2 мощностью 370 Вт при постоянном значении активной нагрузки в 200 Ом. При моделировании принимались следующие номинальные данные СГ: $U = 380$ В, $n = 1370$ об/мин, $I = 1,37$ А, $I_f = 1$ А. В процессе эксперимента изменялся ток возбуждения от 20 до 80 В и частота вращения генератора. В табл. 2 представлены значения напряжения генератора, напряжения обмотки возбуждения, частоты вращения генератора, тока возбуждения и тока генератора.



Рис. 2. Внешний вид лабораторного стенда

Таблица 2

Значения статического режима синхронного генератора стенда

Параметры	№ эксперимента						
	1	2	3	4	5	6	7
U_f , об/мин	20	30	40	50	60	70	80
ω , об/мин	1618	1590	1553	1501	1447	1388	1323
U_{Γ} , В	60,3	88,2	114,2	140,7	162,8	182	195,1
I_{Γ} , А	0,173	0,252	0,325	0,4	0,462	0,516	0,553
I_f , А	0,38	0,55	0,75	0,92	1,1	1,27	1,4

Выдвинем гипотезу о том, что статические значения, полученные по моделям синхронного генератора, учитывающие физику процесса из табл. 1, и синхронного генератора на лабораторной установке в относительных единицах близки. Основанием этому является известная близость в относительных единицах характеристик холостого хода электрогенераторов различной мощности. Поэтому на основании экспериментальных данных из табл. 2 и значений коэффициентов a_{ij} , ранее найден-

ных для модели (5), найдем расчетные значения U по формуле (7) и сравним статические значения экспериментальных и расчетных данных (рис. 3). Все расчеты проводились в относительных единицах.

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = \sqrt{\left(a_{11}U_f + a_{12}U_f\omega^2 + \frac{a_{13}U_f}{\omega^2}\right)^2 + \left(\left(a_{21}U_f\omega + \frac{a_{22}U_f}{\omega} + a_{23}U_f\omega^3\right)\right)^2}. \quad (7)$$

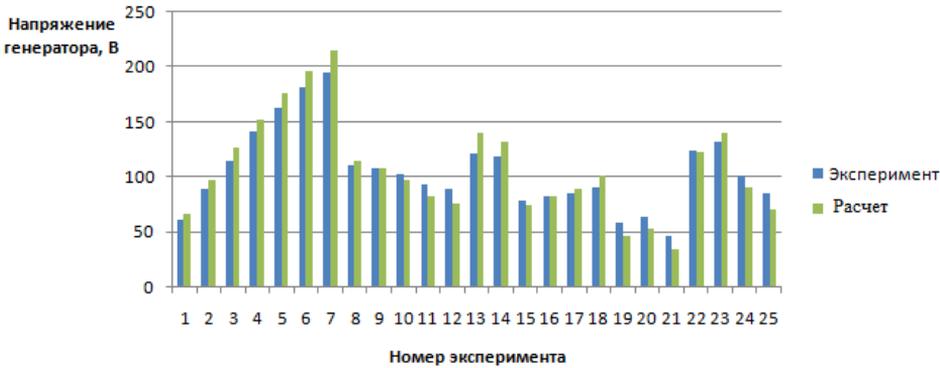


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных значений напряжения генератора

Коэффициенты модели, полученные на КМЭС для генератора 6 МВт, оказались достаточно приемлемыми и для маломощного стендового генератора 370 Вт. Причем (и это оказалось достаточно неожиданным, поскольку различия и в мощности, и в конструкции обоих генераторов велики) результаты моделирования дают хорошую точность. Делаем вывод, что при построении модели подтвердился факт, что в относительных единицах генераторы близки.

Выводы. В результате проведенных исследований построены модели для статического режима работы синхронного электрогенератора на активно-индуктивную нагрузку. Выявлены внутренние перекрестные связи в моделях электрогенератора (4)–(6). Предложенные модели в дальнейшем планируется использовать при автоматическом регулировании напряжения синхронного генератора и его частоты при изменении активно-индуктивной нагрузки генератора в автономном режиме его работы. Научная новизна полученных результатов и их практическая значимость заключаются в создании и обосновании оригинальных моделей, предназначенных для идентификации статических режимов синхронных генераторов, а также в подтверждении гипотезы

о допустимости использования полученных моделей для генераторов, мощность которых существенно различается.

Библиографический список

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник для спец. электроэнергетич. вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.

2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат; Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

3. Газизова О.В., Соколов А.П., Малафеев А.В. К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электроснабжения сложной конфигурации // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 1(38).

4. Расулзода Х.Н., Сафаралиев М.Х., Юнусов Р.М. Исследование динамических характеристик синхронного генератора // Труды Третьей науч.-техн. конф. молод. ученых Уральского энергетич. ин-та. – Екатеринбург, 2018. – С. 189–192.

5. Татевосян А.А., Андреева Е.Г. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование синхронного генератора с постоянными магнитами // Промышленная энергетика. – 2019. – № 4. – С. 20–28.

6. Никитенко Г.В., Коноплев Е.В., Салпагаров В.К. Исследование работы синхронного генератора с двухконтурной магнитной системой // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. – 2019. – С. 168–172.

7. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М. Моделирование и исследование гидроагрегатов малых ГЭС с частотно-управляемыми синхронными генераторами с постоянными магнитами // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2016. – № 2.

8. Рамадан А., Елистратов В.В. Моделирование режимов работы сетевой ветроэнергетической установки с синхронным генератором на постоянных магнитах // Электричество. – 2019. – № 7. – С. 11–21.

9. Кавалеров Б.В., Зиятдинов И.Р., Бахирев И.В. Исследование адаптивного управления газотурбинной электроэнергетической установкой при пуске соизмеримого по мощности асинхронного двигателя // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12–1. – С. 49–57.

10. Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем: моногр. / В.М. Винокур, Б.В. Кавалеров, А.Б. Петроченков, М.Л. Сапунков. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 299 с.

11. Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети «КМЭС»: св-во о регистр. программы для ЭВМ № 2011611839 / А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов [и др.]. Дата регистр. 28.02.2011. Бюл. № 24.

12. Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator / A. Rolan [et al.] // 2009 IEEE international symposium on industrial electronics. – IEEE, 2009. – P. 734–739.

13. Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration / M. Yin [et al.] // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. – IEEE, 2007. – P. 1–6.

14. Sakimoto K., Miura Y., Ise T. Stabilization of a power system with a distributed generator by a virtual synchronous generator function // 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. – IEEE, 2011. – P. 1498–1505.

15. Hansen A.D., Michalke G. Modelling and control of variable-speed multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbine // Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology. – 2008. – Vol. 11. – No. 5. – P. 537–554.

16. Jadric I., Borojevic D., Jadric M. Modeling and control of a synchronous generator with an active DC load // IEEE transactions on Power Electronics. – 2000. – Vol. 15. – No. 2. – P. 303–311.

17. Karrari M., Malik O.P. Identification of physical parameters of a synchronous generator from online measurements // IEEE transactions on energy conversion. – 2004. – Vol. 19. – No. 2. – P. 407–415.

18. Control of a hybrid excitation synchronous generator for aircraft applications / N. Patin [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55. – No. 10. – P. 3772–3783.

19. Mielczarski W., Zajackowski A.M. Nonlinear field voltage control of a synchronous generator using feedback linearization // Automatica. – 1994. – Vol. 30. – No. 10. – P. 1625–1630.

20. Nilsson N.E., Mercurio J. Synchronous generator capability curve testing and evaluation // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – Vol. 9. – No. 1. – P. 414–424.

References

1. Venikov V.A. Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh [Transient electromechanical processes in electrical systems]. Moscow: Vysshaia shkola, 1985, 536 p.

2. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovkii G.G. Upravlenie elektroprivodami [Electric Drive Control]. Leningrad: Energoizdat, Leningradskoe otdelenie, 1982, 392 p.

3. Gazizova O.V., Sokolov A.P., Malafeev A.V. K voprosu ucheta nasyshcheniia v matematicheskoi modeli promyshlennogo generatora dlia rascheta perekhodnykh rezhimov v sisteme elektrosnabzheniia slozhnoi konfiguratsii [To the question of taking into account the saturation and damping moments during mathematical modeling of synchronous generators]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2018, no. 1(38).

4. Rasulzoda Kh.N., Safaraliev M.Kh., Iunusov R.M. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik sinkhronnogo generatora [The study of the dynamic characteristics of a synchronous generator]. *Trudy Tret'ei nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia molodykh uchenykh Ural'skogo energeticheskogo instituta*. Ekaterinburg, 2018, pp. 189-192.

5. Tatevosian A.A., Andreeva E.G. Razrabotka, modelirovanie i eksperimental'noe issledovanie sinkhronnogo generatora s postoiannymi magnitami [Development, modeling and experimental research of a synchronous generator with permanent magnets]. *Promyshlennaia energetika*, 2019, no. 4, pp. 20-28.

6. Nikitenko G.V., Konoplev E.V., Salpagarov V.K. Issledovanie raboty sinkhronnogo generatora s dvukhkonturnoi magnitnoi sistemoi [Research of the work of the synchronous generator with a two-circuit magnetic system]. *Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniia energoresursov*, 2019, pp. 168-172.

7. Mustafaev R.I., Gasanova L.G., Musaev M.M. Modelirovanie i issledovanie gidroagregatov malykh GES s chastotno-upravliaemymi sinkhronnymi generatorami s postoiannymi magnitami [Modeling and research of hydraulic units of small hydropower plants with frequency-controlled synchronous generators with permanent magnets]. *Energetika. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2016, no. 2.

8. Ramadan A., Elistratov V.V. Modelirovanie rezhimov raboty setevoi vetroenergeticheskoi ustanovki s sinkhronnym generatorom na postoiannykh magnitakh [Modeling of the operating modes of a network

wind power installation with a synchronous permanent magnet generator]. *Elektrichestvo*, 2019, no. 7, pp. 11-21.

9. Kavalеров B.V., Ziatdinov I.R., Bakhirev I.V. Issledovanie adaptivnogo upravleniia gazoturbinoi elektroenergeticheskoi ustanovkoi pri puske soizmerimogo po moshchnosti asinkhronnogo dvigatel'ia [Investigation of an adaptive control algorithm with gas turbine units taking into account the dynamics of a asynchronous engine]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 12-1, pp. 49-57.

10. Vinokur V.M., Kavalеров B.V., Petrochenkov A.B., Sapunkov M.L. Matematicheskoe modelirovanie gazoturbinykh mini-elektrostantsii i mini-energосistem [Mathematical modeling of gas turbine mini-power plants and mini-power systems]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010, 299 p.

11. Petrochenkov A.B., Kavalеров B.V., Shigapov A.A. et al. Kompleks matematicheskikh modelei elektrogeneratora i elektroseti "KMES" [The complex of mathematical models of the generator and electric network "KMES"]. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlia EVM № 2011611839 (2011).

12. Rolan A. et al. Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. *2009 IEEE international symposium on industrial electronics*. IEEE, 2009, pp. 734-739.

13. Yin M. et al. Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. IEEE, 2007, pp. 1-6.

14. Sakimoto K., Miura Y., Ise T. Stabilization of a power system with a distributed generator by a virtual synchronous generator function. *8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia*. IEEE, 2011, pp. 1498-1505.

15. Hansen A.D., Michalke G. Modelling and control of variable-speed multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbine. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 2008, vol. 11, no. 5, pp. 537-554.

16. Jadric I., Borojevic D., Jadric M. Modeling and control of a synchronous generator with an active DC load. *IEEE transactions on Power Electronics*, 2000, vol. 15, no. 2, pp. 303-311.

17. Karrari M., Malik O.P. Identification of physical parameters of a synchronous generator from online measurements. *IEEE transactions on energy conversion*, 2004, vol. 19, no. 2, pp. 407-415.

18. Patin N. et al. Control of a hybrid excitation synchronous generator for aircraft applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no. 10, pp. 3772-3783.

19. Mielczarski W., Zajaczkowski A.M. Nonlinear field voltage control of a synchronous generator using feedback linearization. *Automatica*, 1994, vol. 30, no. 10, pp. 1625-1630.

20. Nilsson N.E., Mercurio J. Synchronous generator capability curve testing and evaluation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, vol. 9, no. 1, pp. 414-424.

Сведения об авторах

Зиятдинов Илья Рудольфович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: i.ziyatdinoff@mail.ru).

Кавалеров Борис Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

About the authors

Ziyatdinov Ilya Rudolfovich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student Student of the Electro technical and electromechanical department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: i.ziyatdinoff@mail.ru).

Kavalerov Boris Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, head of the department of electrical engineering and electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

Получено 06.04.2020