

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО СИНХРОННОГО МНОГООБМОТОЧНОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

Д.А. Котин, И.А. Иванов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>, d.kotin@corp.nstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7189-8178>, i.a.ivanov@corp.nstu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть существующие способы использования электромеханических преобразователей для электроснабжения автономного потребителя. Провести сравнительный анализ электромеханических преобразователей, сценариев и условий их использования при электроснабжении автономного потребителя. Разработать предложения по устранению недостатков в существующих моделях синхронных генераторов с целью увеличения управляемости ими. Провести разработку математического описания синхронного генератора с магнитоэлектрическим возбуждением от постоянных магнитов однофазного типа с упрощенной конструкцией в качестве универсального примера функционирования всей предложенной линейки синхронных генераторов. Провести математическое моделирование генератора для подтверждения рассматриваемого способа регулирования генерируемых параметров, таких как ток и напряжение, без необходимости изменения скорости вращения вала генератора. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применялся метод описания электрической машины в dq-системе координат с использованием многообмоточного описания машины, для подтверждения предложенного способа регулирования использовалось математическое моделирование в среде SimInTech. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности эксплуатации различных электромеханических преобразователей для электроснабжения автономного потребителя, указаны условия применения того или иного типа архитектуры системы электроснабжения в связке с электромеханическими преобразователями. Предложена линейка синхронных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением с целью улучшения управляемости ими, а именно, возможностью регулирования выходных генерируемых параметров. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Использование предложенных синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов позволит производить дополнительное регулирование генерируемых параметров. Данный способ даст возможность полностью или частично исключить дополнительную полупроводниковую преобразовательную технику, благодаря чему снизит потери при преобразовании электрической энергии. При чем существует возможность регулировать генерируемые ток и напряжение дискретно в два раза увеличив одну из этих величин. Выбранный способ регулирования зависит от конструкции генератора.

Ключевые слова: Синхронные генераторы; постоянные магниты; автономный потребитель; microgrid, SimInTech; многообмоточные генераторы.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, финансировалась РФФИ, Сириусским университетом науки и технологий, ОАО «РЖД» и Образовательным фондом «Талант и успех», проект № 20-38-51007.

Для цитирования: Котин Д.А., Иванов И.А. Использование однофазного синхронного многообмоточного генератора с постоянными магнитами для электроснабжения автономного потребителя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 29-38. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-29-38.

USING OF A SINGLE-PHASE SYNCHRONOUS MULTI-WINDING GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS FOR THE POWER SUPPLY OF AN AUTONOMOUS CONSUMER

DA. Kotin, IA. Ivanov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>, d.kotin@corp.nstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7189-8178>, i.a.ivanov@corp.nstu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the existing ways of using electromechanical converters for power supply of an autonomous consumer. Conduct a comparative analysis of electromechanical converters, scenarios and conditions for their use in the power supply of an autonomous consumer. To develop a proposal to eliminate the shortcomings in existing models of synchronous generators in order to increase their controllability. To develop a mathematical description of a synchronous generator with magnetoelectric excitation from permanent magnets of a single-phase type with a simplified design as a universal example of the functioning of the entire proposed line of synchronous generators. Carry out mathematical modeling of the generator proposed for consideration in order to confirm the proposed method of regulating the generated parameters, such as current and voltage, without the need to change the generator shaft rotation speed. *METHODS.* When solving the problem, the method of describing an electric machine in a dq-coordinate system using a multi-winding description of the machine was used; to confirm the proposed control method, mathematical modeling with the SimInTech environment was used. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, considers the features of the operation of various electromechanical converters for power supply of an autonomous consumer, indicates the conditions for the use of one type or another of the architects of the power supply system in conjunction with electromechanical converters. A line of synchronous generators with magnetoelectric excitation is proposed in order to improve their controllability, namely, the ability to regulate the output generated parameters. *CONCLUSION.* Using of the proposed synchronous generators with excitation from permanent magnets will allow for additional regulation of the generated parameters, thereby allowing either completely or partially to exclude additional semiconductor converting equipment, thereby reducing losses during the conversion of electrical energy. Moreover, it is possible to regulate the generated current and voltage discretely by two times increasing one of these values, this method of regulation depends on the design of the generator.

Keywords: Synchronous generators; permanent magnets; stand-alone consumer; microgrid; SimInTech; multi-winding generators.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund «Talent and success», project number 20-38-51007.

For citation: Kotin DA, Ivanov IA. Using of a single-phase synchronous multi-winding generator with permanent magnets for the power supply of an autonomous consumer. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1): 29-38. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-29-38.

Введение

В современной электроэнергетической отрасли все чаще и чаще обращаются к построению системы электроснабжения по принципу «Умной сети» (*Smart-grid*). Данная тенденция также затронула и системы электроснабжения автономного потребителя и получила название «Микро-сети» или *Micro-grid (MG)*. Принцип сети, построенной по архитектуре *MG*, базируется на энергоэффективном потреблении и генерации электрической энергии из локальных или местных источников энергии, которые находятся непосредственно рядом с потребителем. Использование локальных источников энергии для электроснабжения потребителя получило название – распределённая генерация (РГ) [1, 2], которая включает в себя как возобновляемые источники энергии (ВИЭ), так и традиционные источники энергии. Примером традиционных источников

энергии является сжигание разных видов топлив. Таким образом, можно сказать, что современная система электроснабжения автономного потребителя строится по архитектуре MG с использованием РГ [3], при чем источники энергии выбираются из лёгкости доступа к ним и просты в обслуживании устройств преобразования любого типа энергии в электрическую.

В качестве устройств, преобразующих первичную энергию в электрическую, могут выступать как полупроводники, так и электромеханические преобразователи (ЭМП), т.е. электрическая машина, работающая в режиме генератора.

Так в качестве ЭМП при РГ часто рассматривают машины переменного тока. Это связано прежде всего с тем, что их легче обслуживать по сравнению с машинами постоянного тока и проще транспортировать электроэнергию от генерирующей единицы к потребителю. Так распространение получили асинхронные машины с короткозамкнутым ротором (АМКР), асинхронизированная синхронная машина (АСМ) и синхронная машина с постоянными магнитами (СМПМ), которые используются в системе выработки электроэнергии, использующей ВИЭ.

В большинстве случаев выбор электрической машины зависит от мощности автономного потребителя, на основании которой происходит выбор архитектуры схемы построения системы электроснабжения. Так для электроснабжения мощного потребителя используют АСМ, подключая ее непосредственно на параллельную работу с потребителем и/или с основной системой электроснабжения [4, 5]. Синхронизация генерируемого напряжения с напряжением сети происходит за счет использования полупроводниковых преобразователей, которые позволяют регулировать как частоту вращения магнитного поля ротора, но также и величину потокосцепления машины, тем самым позволяя регулировать генерируемые параметры без изменения скорости вращения машины.

Маломощный потребитель или маломощная группа генерирующих устройств может иметь промежуточную общую шину постоянного напряжения, что позволяет использовать электрические машины без непосредственной синхронизации частоты вращения поля машины с частотой напряжения сети потребителя [5, 6]. Это позволяет использовать в качестве электрических генераторов, такие как АМКР и СМПМ. У данных типов машин отсутствует возможность напрямую регулировать частоту выходного напряжения без изменения скорости вращения магнитного поля. Также у них отсутствует возможность регулирования величины выходного напряжения без изменения скорости вращения магнитного поля машины. Таким образом, за счет использования промежуточной шины постоянного тока можно синхронизировать полученное напряжение, как по уровню, так и по частоте напряжения с параметрами сети [7, 8] с использованием полупроводниковой техники.

Рассмотрим систему электроснабжения автономного маломощного потребителя. Как было сказано выше, в данной системе электроснабжения наибольшее применение нашли АМКР и СМПМ. В связи с условиями эксплуатации, а именно, необходимостью высокой степени автономности, чаще всего используют СМПМ. Это вызвано тем, что для СМПМ в генераторном режиме работы в отличие от АМКР не требуются дополнительные устройства создания реактивной мощности. Например, конденсаторные батареи для обеспечения генераторного режима работы, что возможно благодаря магнитоэлектрическому возбуждению машины от постоянных магнитов, находящихся на роторе СМПМ [9-12].

Но как было сказано выше, данные генераторы не имеют возможности регулировать генерируемые параметры непосредственно за счет машины. Для решения данной проблемы авторами были предложены и разработаны модифицированные синхронные генераторы с постоянными магнитами.

Материалы и методы

Для решения проблемы возможности регулирования выходных параметров СМПМ, работающей в режиме генератора для электроснабжения автономного потребителя, был разработан ряд синхронных генераторов с различной конфигурацией. Они будут отличаться друг от друга количеством обмоток на статоре и различным количеством фаз выходного напряжения. Данная линейка позволяет разработать системы электроснабжения объекта с любым числом фаз, а по причине того, что многообмоточную конфигурацию обмоток статора можно регулировать выходные параметры генерируемого тока и напряжения. Поскольку была разработана широкая линейка генераторов, рассмотрим принцип их работы, получения их математического описания и исследования их математических моделей на простом примере однофазного

генератора с упрощенной конструкцией.

Однофазный генератор с упрощённой конструкцией, представленный на рисунке 1, имеющий на статоре две обмотки ($L1$, $L2$), расположенные территориально диаметрально противоположно друг другу и постоянный магнит на валу.

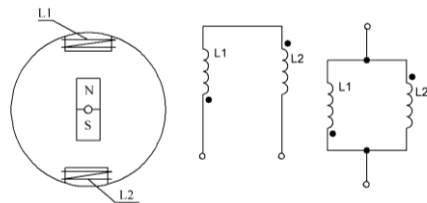


Рис. 1. Генератор с упрощенной конструкции

Fig. 1. Generator with simplified design

При последовательно-встречном соединении обмоток статора (рисунок 1) создается двойное напряжение на выходе генератора, полученное путем сложения наводимых ЭДС на обмотках генератора.

Наведение напряжения происходит по периодическому закону на каждой обмотке, а, следовательно, генерируемое напряжение можно тоже записать в периодическом виде:

$$u_{обмi} = U_{mi} \sin \omega t ,$$

где $u_{обмi}$ – напряжение на i -той обмотке статора, U_{mi} – амплитуда i -того напряжения,

Обмотки статора расположены относительно друг друга строго на 180° , а за счет специального их соединения, последовательно-встречное напряжение, наводимое в них, всегда имеет одинаковое направление. Следовательно, суммарное значение напряжения определяется формулой:

$$u_{\Sigma} = u_{обм1} + u_{обм2} = U_{m1} \sin(\omega t) - U_{m2} \sin(\omega t + 180) ,$$

где u_{Σ} – суммарное генерируемое напряжение.

Кроме того, обмотки статора имеют одинаковое конструктивное исполнение, следовательно, создаваемые ими действующие значения напряжений будут равны. Согласно вышесказанному, суммарное напряжение можно определить как:

$$u_{\Sigma} = 2U_{m1} \sin(\omega t) = 2u_{обм1} .$$

Тогда суммарная генерируемая мощность определяется по формуле:

$$S_{\Sigma} = i u_{\Sigma} = 2u_{обм1} i = 2S_{обм1} ,$$

где i – генерируемый ток, $S_{обмi}$ – генерируемая мощность одной обмоткой статора, S_{Σ} – суммарная генерируемая мощность.

Так согласно формуле, определяющей полную мощность, происходит увеличение создаваемой мощности в два раза по сравнению с мощностью выдаваемой одной обмоткой.

Обмотки статора данного генератора могут быть соединены параллельно-сонаправленно, что приведёт к увеличению значения вырабатываемого тока. Этот процесс будет описываться следующим образом:

$$i_{обмi} = I_{mi} \sin \omega t ,$$

где $i_{обмi}$ – ток на i -той обмотке статора, I_{mi} – амплитуда i -того тока,

Поскольку обмотки статора соединены параллельно-сонаправленно, то будет происходить сложение токов по формуле,

$$i_{\Sigma} = i_{обм1} + i_{обм2} = I_{m1} \sin(\omega t) - I_{m2} \sin(\omega t + 180) ,$$

где i_{Σ} – суммарное значение генерируемого тока.

Обмотки статора расположены относительно друг друга строго на 180° за счет специального их соединения. Ток, наводимый в них, всегда имеет одинаковое направление. Так же, если учесть, что обмотки статора имеют одинаковое конструктивное исполнение, следовательно, создаваемое ими действующие значения тока, будут равны. Согласно вышесказанному, суммарный ток можно определить как:

$$i_{\Sigma} = 2I_{m1} \sin(\omega t) = 2i_{обм1} .$$

Тогда суммарная генерируемая мощность:

$$S_{\Sigma} = u i_{\Sigma} = 2i_{обм1} u = 2S_{обм1} ,$$

где u – генерируемое напряжение, $S_{обмi}$ – генерируемая мощность одной обмоткой статора, S_{Σ} – суммарная генерируемая мощность.

Таким образом, согласно формуле, определяющей полную мощность, происходит увеличение создаваемой мощности в два раза по сравнению с мощностью, выдаваемой одной обмоткой.

Для разработки математического описания (модели) однофазного генератора с упрощенной конструкцией разработаем электрическую модель предложенного генератора и составим для нее уравнение полного напряжения (закон Кирхгофа) и описание потокоцепления обмоток статора согласно нижеприведённому принципу [9-14].

$$-\frac{d\Psi_c}{dt} = i_c R_c + i_c Z_n,$$

$$\Psi_c = Li_1 + \mu \sum_{k=2}^n i_k.$$

Так, согласно рисунку 1, имеются две независимых обмотки на статоре по оси q и одна обмотка на роторе по оси q . Согласно вышесказанному, электрическая модель обмоток статора будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

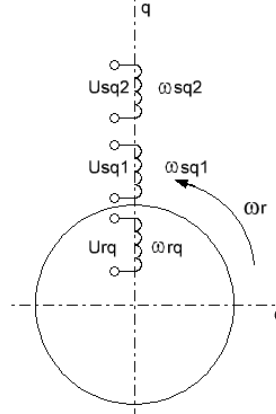


Рис. 2. Электрическая модель генератора с упрощенной конструкцией

Fig. 2. Electrical model of a generator with a simplified design

Согласно электрической модели, представленной на рисунке 2 и вышеизложенному описанию определения полного напряжения и потокоцепления, обмоток статора определяются параметры напряжения и потокоцепления для каждой обмотки [15-20]:

$$-\frac{d\Psi_{cq1}}{dt} = i_{cq1} R_{cq1} + \frac{1}{2} i_{cq1} Z_n,$$

$$\Psi_{cq1} = L_{cq1} i_{cq1} + \mu i_{cq2} - \Psi_{pq},$$

$$-\frac{d\Psi_{cq2}}{dt} = i_{cq2} R_{cq2} + \frac{1}{2} i_{cq2} Z_n,$$

$$\Psi_{cq2} = L_{cq2} i_{cq2} + \mu i_{cq1} - \Psi_{pq},$$

где Ψ_{cqi} – потокоцепление i -той обмотки,

R_{cqi} – активное сопротивление i -той обмотки статора,

i_{cqi} – ток в i -той обмотке статора,

L_{cqi} – индуктивное сопротивление i -той обмотки статора,

μ – взаимоиנדуктивность обмоток,

Ψ_{pq} – потокоцепление постоянного магнита на роторе,

Z_n – нагрузка генератора.

Если наиболее часто повторяющимся случаем работы генератора является статический режим работы, то ряд математических зависимостей потерпит видоизменение. Так механическая составляющая будет равняться нулю, т.е. момент сопротивления и развиваемый электрический момент генератора будут равны, а их разница будет равно нулю.

Так же проведём ряд преобразований в описании уравнений описывающих электромагнитные взаимодействия обмоток статора генератора, и они примут следующий вид:

$$\omega \Delta \Psi_{cq1} = i_{cq1} R_{cq1} + L_{cq1} \frac{di_{cq1}}{dt} + \frac{1}{2} U_n,$$

$$\Delta\Psi_{cq1} = \Psi_{p0} - \mu i_{cq2},$$

$$\Psi_{p0} = |\Psi_{p0}| \sin(\omega_n t + 0 \cdot \pi),$$

$$\omega \Delta\Psi_{cq2} = i_{cq2} R_{cq2} + L_{cq2} \frac{di_{cq2}}{dt} + \frac{1}{2} U_n,$$

$$\Delta\Psi_{cq2} = \Psi_{p0} - \mu i_{cq1},$$

$$\Psi_{p0} = |\Psi_{p0}| \sin(\omega_n t + 1 \cdot \pi).$$

Согласно предложенному математическому описанию, разработаем математическую модель генератора.

Результаты

Математическое моделирование в статическом режиме ($\Delta M=0$) составлено в среде «SimInTech». Статический режим работы генератора обусловлен условием работы генератора в энергетической системе электроснабжения автономного потребителя. В таком режиме время переходного процесса электромеханического преобразователя обычно значительно ниже, чем изменение входных величин.

Согласно разработанному математическому описанию, была получена математическая модель, представленная на рисунке 3.

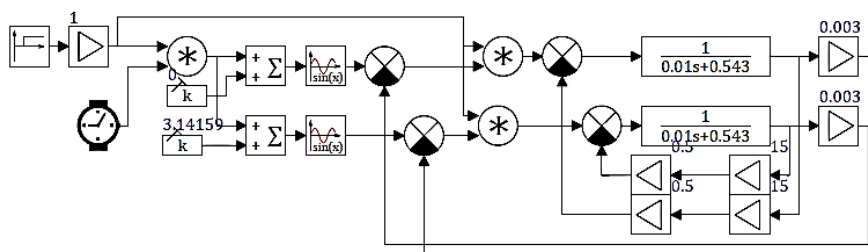


Рис. 3. Математическая модель генератор с упрощенной конструкцией

Fig. 3. Mathematical model of a generator with a simplified design

При разработке математической модели были использованы как опорные данные, так и данные синхронного генератора с постоянными магнитами PEOR132S6 фирмы VEM. Параметры, необходимые для моделирования и нагрузки активного типа, представлены в таблице ниже (при работе на активную нагрузку 15 Ом).

Параметры генератора

R_c , Ом	L_c , мГ	μ , мГ	U_n , В	I_n , А	R_n , Ом
0,547	6,91	3,03	369	29,3	15

В результате проведения математического моделирования предложенного генератора с упрощенной конструкцией были получены графики токов, протекающих через обмотки статора и выделенную нагрузку. Напряжение на каждой из обмоток (рис. 4), где кривыми красного и жёлтого цвета обозначены токи ($is1$, $is2$), создаваемые обмотками генератора, а синим и черным – наводимого напряжения на обмотках генератора ($us1$, $us2$). Также получены графики, отражающие величины генерируемого напряжения и генерируемого тока с использованием специального соединения обмоток статора. Результаты сравнимого значения с показателями обмотки генератора представлены на рис. 5 и 6.

Согласно рисункам 5 и 6, происходит увлечение генерируемых параметров, таких как генерируемое напряжение и ток. Так, используя последовательное соединение обмоток статора (рис. 5), происходит увеличение генерируемого суммарного напряжения (ug) в 2 раза (красная кривая) относительно значения ($us1$) на отдельно взятой обмотке статора (фиолетовая кривая). При использовании параллельного соединения обмоток статора (рис. 6) происходит увеличенная генерация тока (ig), протекающего в обмотках статора через нагрузку в два раза (красная кривая) относительно генерируемого тока ($is1$) одной обмотки (черная кривая).

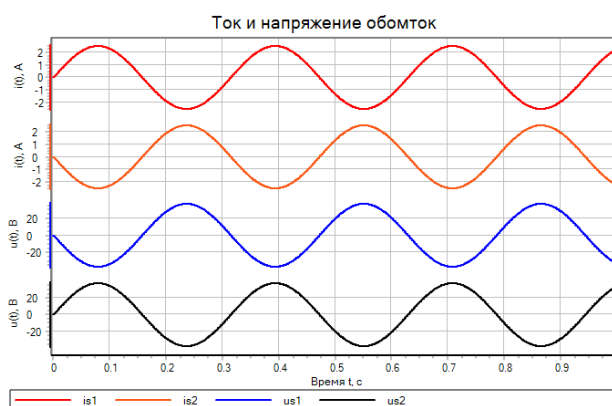


Рис. 4. Генерируемые параметры обмоток генератора *Fig. 4. Generated parameters of the generator windings*

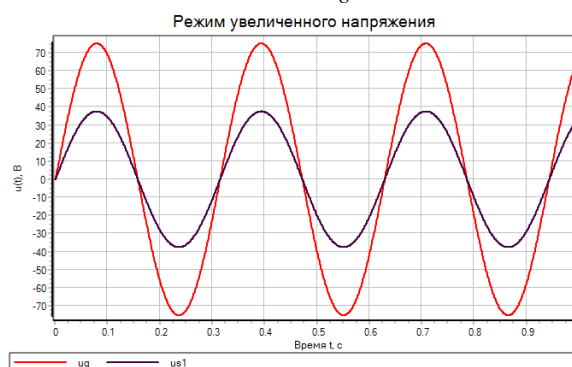


Рис. 5. Генерируемое напряжения генератора при последовательном соединении обмоток статора *Fig. 5. The generated voltage of the generator when the stator windings are connected in series*

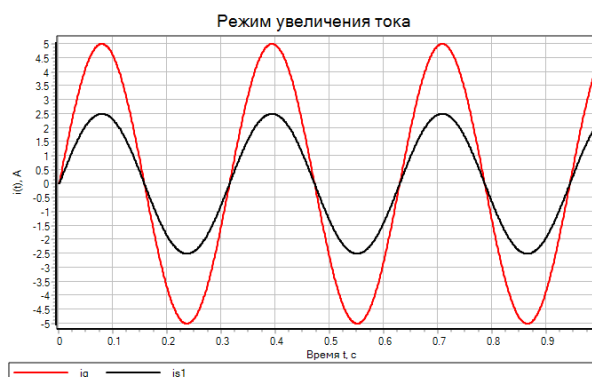


Рис. 6. Генерируемые ток генератора при параллельном соединении обмоток статора *Fig. 6. Generated generator currents when the stator windings are connected in parallel*

Обсуждение результатов

Согласно представленному алгоритму работы многообмоточного СМПС, процессу получения математического описания и математической модели при рассмотрении их а примере однофазного синхронного генератора с упрощенной конструкцией, можно получить математические описания более сложных конфигураций СМПС. А благодаря проведенному математическому моделированию, можно сказать, что предлагаемый генератор позволяет повысить управляемость энергетического комплекса, вырабатывающего электроэнергию для автономного потребителя, и граничные условия работы нескольких источников с использованием электромеханических преобразователей. Примерами таких источников энергии являются ветряные турбины, мини- и микрогидроэлектростанции, биогазовые установки и т.д. Улучшение управляемости и расширение границ рабочих условий обеспечивается возможностью

регулирования соотношений генерируемых токов и напряжений, тем самым позволяя им уменьшать объем своего потока при избытке генерируемой мощности. Уменьшая величину тока и увеличивая напряжение, которое может дополнительно регулироваться понижающим преобразователем, или при недостатке энергии уменьшать величину генерируемого напряжения, тем самым увеличивается объем генерируемого тока за счет повышения перегрузки генератора током посредством передачи его объема между обмотками, соединенными параллельно. Кроме того, генераторы расширяют границы работы генерирующего агрегата, например, работу ветрогенератора, который ограничен по скорости ветра как меньшим значением, так и максимальным значением. Это также возможно благодаря изменению соединения обмоток статора, что позволяет увеличить как нижний, так и верхний пределы рабочей скорости ветрогенератора в два раза.

Выводы

В процессе данной работы было предложено использование синхронных генераторов с постоянными магнитами со специальной конструкцией статора для электроснабжения автономных объектов малой мощности. Можно сказать, что разработанные генераторы обладают лучшими энергетическими показателями, а именно увеличенными значениями генерируемой мощности, тока и напряжения, а также улучшенными свойствами в области регулирования генерируемых параметров, таких как генерируемые ток и напряжения. Также было получено математическое описание генератора и проведен анализ полученных данных генерируемых параметров, который подтвердил указанные в статье утверждения.

Литература

1. Суслов К.В., Шушпанов И.Н., Воронцов Д.В. Использование возобновляемых источников энергии для питания собственных нужд нефтепровода. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т.20. № (1-2). С. 70-79.
2. Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Майоров Г.С. Применение мультиагентного подхода для моделирования интегрированных энергетических систем. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. №(6). С. 29-42.
3. Городнов А.Г. Построение энергоэффективных электротехнических комплексов с автономной системой электроснабжения. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. №(4). С. 64-78.
4. Савенко А.Е., Савенко П.С. Влияние постоянных времени регуляторов частоты на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных дизельных электростанциях. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. № (1).С. 36-144.
5. Золотов И.И., Шевцов А.А. Влияние потребителей электроэнергии на форму питающего напряжения автономных систем электроснабжения. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. №(1-2). С.131-140.
6. Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Югай В.В., и др. Сравнительный анализ и перспективы использования многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя стирлинга для сельских районов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. №(5). С. 3-17.
7. Фишов А.Г., Мурашкина И.С., Марченко А.И., и др. Исследование влияния электронной генерации на статическую апериодическую устойчивость электроэнергетической системы. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. №(2). С. 51-64.
8. Сафин А.Р., Ившин И.В., Грачева Е.И., и др. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. №(1). С.38-48.
9. Kotin D., Tolstobrova L., and Ivanov I. Mathematical modeling of multi-winding synchronous generators with permanent magnets for autonomous consumers, 2021 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, ACED 2021 - Proceedings, May 2021.
10. Kotin D., Ivanov I., and Shtukkert S. Modified Permanent Magnet Synchronous Generators for Using in Energy Supply System for Autonomous Consumer. Energies 2021, V. 14, no. 21. p. 7196. Nov. 2021.
11. Kotin D. and Ivanov I. New type single-phase generator for autonomous consumer. Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and

Manufacturing, ICIEAM 2020, May 2020.

12. Halina T., Ivanov I., and Stalnaya M. Sine-cosine Generator. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Oct. 2019.

13. Bulatov YuN., Kryukov AV and Nguyen V.H. Modeling a gas-turbine unit with prognostic regulators of voltage and speed. *Power engineering: research, equipment, technology*, V. 22. no. 3. pp. 60–67. Sep. 2020.

14. Ачитаев А.А., Жидков А.А., Митрофанов С.В. Исследование управляемой гибкой связи турбины и генератора микроГЭС в автономной электроэнергетической системе // *Электричество*. 2020. № 1. С. 25-31.

15. Fedorov T. Synchronous generators for traction mechanisms. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 918. no. 1. Oct. 2020.

16. Chen J., Liu M., and O'Donnell T. Replacement of Synchronous Generator by Virtual Synchronous Generator in the Conventional Power System. IEEE Power and Energy Society General Meeting. V. 2019-August, Aug. 2019.

17. Yan X., Mohamed S.Y.A., Li D., and Gadalla A. S. Parallel operation of virtual synchronous generators and synchronous generators in a microgrid. *The Journal of Engineering*. V. 2019. no. 16. pp. 2635–2642, Mar. 2019.

18. Shi Q., Wang G., Fu L., et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory. *Dianwang Jishu/Power System Technology*. V. 39. no. 3. pp. 783–790. Mar. 2015.

19. Popovski P., Veljanovski G., Arapinovski B., et al. Electromagnetic Analysis of Synchronous Generator. 2021 56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2021 - Proceedings, pp. 189–192, Jun. 2021.

20. Chen X., Zhang C., Huang Q., et al. Small signal modeling for virtual synchronous generator consistent with synchronous generator and analysis. *Dianli Zidonghua Shebei/Electric Power Automation Equipment*. V. 37. no. 11. pp. 78–85. Nov. 2017.

Авторы публикации

Котин Денис Алексеевич – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электропривода и автоматизации промышленных установок», (ЭАПУ) Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Иванов Илья Алексеевич – аспирант, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

References

1. Suslov KV, Shushpanov IN, Vorontsov DV. USE OF RENEWABLE SOURCES OF ENERGY FOR NUTRITION OF OWN REQUIREMENTS OF OIL PIPELINE. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(1-2):70-79. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-70-79>.

2. Stennikov VA, Barakhtenko EA, Mayorov GS. Application of the multiagent approach for modeling integrated energy systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):29-42. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-29-42>.

3. Gorodnov AG. Design of energy efficient electrotechnical complexes with an autonomous electric supply system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):64-78. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-64-78>.

4. Savenko AE, Savenko PS. Influence of time constants of frequency regulators on the amplitude of power exchange fluctuations in autonomous diesel power plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):136-144. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-136-144>.

5. Zolotov II, Shevcov AA. INFLUENCE OF ELECTRICITY CONSUMERS ON THE AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS VOLTAGE FORM. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(1-2):131-140. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-131-140>.

6. Mekhtiyev AD, Al'kina AD, Yugay VV, et al. Comparative analysis and prospects of the use of multi-fuel micro-thermal power stations on the basis of the steeling engine for rural areas. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(5):3-17. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-5-3-17>.

7. Fishov AG, Murashkina IS, Marchenko AI, et al. The study of electronic generation effect on statical aperiodic stability of electrical power system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):51-64. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-51-64>.
8. Safin AR, Ivshin IV, Gracheva EI, et al. Development of a mathematical model of an autonomous power supply source with a free piston motor on the basis of a synchronous electric returning machine with a permanent magnets. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):38-48. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-38-48>.
9. Kotin D, Tolstobrova L, Ivanov I. *Mathematical modeling of multi-winding synchronous generators with permanent magnets for autonomous consumers*. 2021 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, ACED 2021 - Proceedings, May 2021, doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462302.
10. Kotin D., Ivanov I., Shtukkert S. Modified Permanent Magnet Synchronous Generators for Using in Energy Supply System for Autonomous Consumer. *Energies* 2021;21(14):7196. Nov. 2021. doi: 10.3390/EN14217196.
11. Kotin D, Ivanov I. *New type single-phase generator for autonomous consumer*. Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, May 2020, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112062.
12. Halina T, Ivanov I, and Stalnaya M. *Sine-cosine Generator*. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Oct. 2019, doi: 10.1109/FAREASTCON.2019.8934028.
13. Bulatov YuN, Kryukov A.V, and Nguyen VH. Modeling a gas-turbine unit with prognostic regulators of voltage and speed. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(3):60-67. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-3-60-67.
14. Achitaev A.A., Zhidkov A.A., Mitrofanov S.V., et al. Studying the controlled flexible coupling of the Micro HPP Turbine and Generator Operating in a Self-Contained Electric Power System. *Elektrichestvo*.2020;1(1):25-31. doi: 10.24160/0013-5380-2020-1-25-31.
15. Fedorov T. Synchronous generators for traction mechanisms. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.2020;918(1). doi: 10.1088/1757-899X/918/1/012159.
16. Chen J., Liu M., and O'Donnell T. *Replacement of Synchronous Generator by Virtual Synchronous Generator in the Conventional Power System*. IEEE Power and Energy Society General Meeting. V. 2019-August. doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8973650.
17. Yan X, Mohamed S.Y.A, Li D, and Gadalla AS. Parallel operation of virtual synchronous generators and synchronous generators in a microgrid. *The Journal of Engineering*. 2019;2019(16):2635-2642. Mar. 2019, doi: 10.1049/JOE.2018.8644.
18. Shi Q, Wang G, Fu L, et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory. *Dianwang Jishu. Power System Technology*. 2015;39(3):783-790. Mar. 2015, doi: 10.13335/J.1000-3673.PST.2015.03.030.
19. Popovski P, Veljanovski G, Arapinovski B, et al. Electromagnetic Analysis of Synchronous Generator. 2021. 56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICESS 2021 - Proceedings, pp. 189-192, Jun. 2021. doi: 10.1109/ICEST52640.2021.9483490.
20. Chen X, Zhang C, Huang Q, et al. Small signal modeling for virtual synchronous generator consistent with synchronous generator and analysis. *Dianli Zidonghua Shebei. Electric Power Automation Equipment*. 2017;37(11):78-85. Nov. 2017, doi: 10.16081/J.ISSN.1006-6047.2017.11.013.

Authors of the publication

Denis A. Kotin - Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Ilya A. Ivanov - Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Получено 28.02.2022г.

Отредактировано 14.03.2022г.

Принято 16.03.2022г.