

ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MATLAB

Саттаров Р.Р.¹, Гарафутдинов Р.Р.²

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

²Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

garafutdinov_r_r@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** В настоящее время ввод в эксплуатацию электростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с применением инверторов получает широкое распространение. Однако эти электростанции не участвуют в поддержании устойчивости энергосистемы при аварийных возмущениях, так как отключаются технологическими защитами при возникновении возмущения. В будущем, когда электростанции на основе ВИЭ получат широкое распространение обеспечение возможности их участия в поддержании устойчивости позволит существенно повысить надежность энергосистемы. Предварительную оценку эффективности участия в поддержании устойчивости необходимо выполнять путем компьютерного моделирования. **ЦЕЛЬ.** Реализовать возможность участия электростанций на основе ВИЭ в обеспечении надежной и устойчивой работы энергосистемы, а также реализовать возможность выполнения предварительной оценки эффективности предлагаемого метода. **МЕТОДЫ.** В данной работе предлагается применение технологии виртуального синхронного генератора для реализации возможности участия электростанций на основе ВИЭ в обеспечении надежности и устойчивости энергосистемы. Также предлагается способ моделирования виртуального синхронного генератора в программном комплексе Matlab. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложена технология виртуального синхронного генератора, которая с использованием инвертора, накопителя электрической энергии и соответствующей системы управления может обеспечить повышение динамической устойчивости энергосистемы. Предложен способ моделирования виртуального синхронного генератора в программном комплексе Matlab. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что построенная модель виртуального синхронного генератора эффективна, сохраняет устойчивость системы и обеспечивает корректное управление инвертором, вследствие чего параметры электрической сети поддерживаются в допустимых пределах. Полученная компьютерная модель может использоваться в дальнейших исследованиях. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Технология виртуального синхронного генератора позволяет воспроизводить в инверторе инерционный и демпфирующий отклик традиционного синхронного генератора, а предложенная компьютерная модель поможет оценить эффективность применения данной технологии при внедрении в энергосистему.

Ключевые слова: виртуальный; синхронный; генератор; инвертор; устойчивость; солнечные; электростанции; ВИЭ; компьютерное моделирование; Matlab.

Для цитирования: Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. Применение виртуального синхронного генератора в энергосистемах и его моделирование в программном комплексе Matlab // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 55-67. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-55-67.

APPLICATION OF VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR TECHNOLOGY IN POWER SYSTEMS AND ITS MODELING IN THE MATLAB SOFTWARE PACKAGE

Sattarov¹ R.R., Garafutdinov² R.R.

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

²Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

garafutdinov_r_r@mail.ru

Abstract: Currently, the commissioning of power plants based on renewable energy sources (RES) using inverters is becoming widespread. However, these power plants do not participate in maintaining the stability of the power system during emergency disturbances, since they are switched off by technological protections when a disturbance occurs. In the future, when power plants based on renewable energy sources become widespread, ensuring the possibility of their participation in maintaining sustainability will significantly increase the reliability of the energy system. A preliminary assessment of the effectiveness of participation in maintaining sustainability should be carried out through computer modeling. **THE PURPOSE:** To realize the possibility of participation of RES-based power plants in ensuring reliable and sustainable operation of the power system, as well as to realize the possibility of performing a preliminary assessment of the effectiveness of the proposed method. **METHODS.** In this paper, the application of virtual synchronous generator technology is proposed to realize the possibility of participation of RES-based power plants in ensuring the reliability and sustainability of the power system. Also, a method of modeling the virtual synchronous generator in Matlab software package is proposed. **RESULTS.** The technology of virtual synchronous generator is proposed, which with the use of inverter, electric energy storage and appropriate control system can provide the increase of dynamic stability of power system. A method of modeling the virtual synchronous generator in Matlab software package is proposed. The results obtained allow us to conclude that the constructed model of a virtual synchronous generator is efficient, maintains the stability of the system and ensures correct control of the inverter, as a result of which the parameters of the electrical network are maintained within acceptable limits. The resulting computer model can be used in further research. **CONCLUSION.** The technology of virtual synchronous generator allows to imitate in the inverter the inertial and damping characteristics of the traditional synchronous generator, and the proposed computer model will help to evaluate the effectiveness of this technology when implemented in the power system.

Keywords: virtual; synchronous; generator; inverter; stability; solar; power plants; RES; computer simulation; Matlab.

For citation: Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. Application of virtual synchronous generator technology in power systems and its modeling in the Matlab software package. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (2): 55-67. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-55-67.

Введение (Introduction)

На сегодняшний день развитие силовой электроники нашло применение практически в каждой отрасли, и электроэнергетика не исключение. Большое количество электростанций на основе возобновляемых источников энергии имеют в своем составе полупроводниковый преобразователь [1]. Как правило, такие электростанции имеют небольшую относительно традиционных электростанций мощность, при этом совокупность маломощных электростанций в энергосистеме влияет на ее устойчивость [2].

Одной из важнейших задач развития энергосистем является обеспечение ее устойчивости при различных аварийных возмущениях. Нарушение устойчивости крупной энергосистемы сказывается на всех ее потребителях и влечет за собой множество негативных последствий (экономических, социальных и др.). Тяжелые последствия указанных аварий вынуждают задуматься об обеспечении устойчивости уже на стадии проектирования электрических сетей путем разработки и применения мер по повышению устойчивости. [3]. Вопросы повышения устойчивости значительно повлияли на проектируемые схемы выдачи мощности электростанций, проекты развития электрических сетей, в том числе к вводимым в последние годы электростанциям на основе ВИЭ [4].

Данная статья посвящена исследованию применения технологии виртуального синхронного генератора (ВСГ) в электроэнергетических системах. В рамках статьи был описан основной принцип работы ВСГ, а также структурная схема управления ВСГ.

Для выполнения исследования была разработана компьютерная модель упрощенной электрической сети, которая состоит из солнечной электростанции, ЛЭП выдачи мощности солнечной электростанции и потребителей. Построенная сеть работает изолированно. После чего в схеме управления инвертором был реализован

алгоритм ВСГ. Также приведены результаты расчетов на разработанной компьютерной модели и выполнен анализ полученных результатов.

Применение технологии ВСГ может обеспечить участие электростанций на основе ВИЭ в повышении устойчивости энергосистемы, что в будущем при широком распространении таких электростанций обеспечит надежную и устойчивую работу энергосистем.

Целью исследования является реализация возможности участия электростанций на основе ВИЭ в обеспечении надежной и устойчивой работы энергосистемы, а также реализовать возможность выполнения предварительной оценки эффективности применения ВСГ в электроэнергетических системах.

Научная значимость исследования заключается в разработке цифровой математической модели в среде MATLAB. Математическая модель разработана для исследования динамической устойчивости энергосистемы при внедрении в нее электростанций ВИЭ с применением ВСГ. Разработанная математическая модель в будущем может использоваться как основа для дальнейших всесторонних исследований влияния ВСГ на динамическую устойчивость при работе в составе энергосистем.

Научная новизна исследования заключается в разработке математической модели, которая, в отличие от приведенных в научной литературе, обладает большой гибкостью и позволяет путем изменения параметров элементов адаптировать разработанную математическую модель под особенности любой электрической сети, а разнесение основных функций модели по разным блокам дает возможность заменять и модернизировать их отдельно от остальных функций системы управления.

Практическая значимость исследования заключается в том, что использование результатов, полученных в настоящей работе, может послужить отправной точкой при дальнейших исследованиях, что в последствии позволит реализовать возможность участия электростанций ВИЭ в повышении динамической устойчивости энергосистем.

Литературный обзор (Literature Review)

Подробное описание ВСГ приведено в работах [5,6]. Авторы статьи уделили большое внимание теории ВСГ, в основе которого лежит уравнение движения ротора синхронного генератора, а также возможные варианты их реализации.

Классификация существующих алгоритмов ВСГ наиболее наглядно представлена в работе [7]. Авторы разделили существующие алгоритмы ВСГ на следующие группы: алгоритмы, основанные на модели синхронного генератора, основанные на уравнении качания и основанные на связи мощности и частоты.

В алгоритме управления, относящегося к первой группе, используется математическая модель синхронного генератора. Недостатком первой группы алгоритмов является сложность дифференциальных уравнений синхронной машины.

В алгоритмах управления, относящихся ко второй группе вместо полной модели синхронной машины, используются уравнения качаний, что также приводит к сложностям при их решении.

Третья группа алгоритмов управления является наиболее упрощенной, однако, при наличии нескольких таких объектов в энергосистеме возникают неустойчивые колебания.

Авторы в работе [8] выделяют системы управления на основе ВСГ в следующие группы: управляемые по напряжению и управляемые по току, а также приводят особенности работы каждой группы систем управления. В своей статье авторы приходят к выводу, что система, управляемая по току, не во всех случаях обеспечивает корректное управление, поэтому система, управляемая по напряжению, более предпочтительна.

Чаще всего в работах рассматривается применение ВСГ в слабых распределительных сетях [9,10] с возможностью отделения на изолированную работу при аварийных ситуациях [11,12], а также рассматриваются дополнительные методы обеспечения надежности. Так, в работах [13,14] авторы предлагают совместить ВСГ с накопителем электрической энергии для обеспечения надежности электроснабжения потребителей при отделении их на изолированную нагрузку.

Способы моделирования ВСГ в программных комплексах приведены в работах [15-17]. Основная сложность при моделировании ВСГ заключается в настройке коэффициентов инерции и степени демпфирования, так как при выборе указанных значений учитываются свойства электрической сети, к которой подключается ВСГ.

Влияние электростанций ВИЭ с применением ВСГ на динамическую устойчивость электрической сети при работе совместно с традиционными синхронными генераторами требует углубленных исследований.

Виртуальный синхронный генератор (Virtual Synchronous generator)

В России исторически сформировалась традиционная структура генерирующих мощностей, которая в большинстве своем включает в себя генераторы с относительно

большой единичной мощностью, что в свою очередь влечет за собой и большую инерцию вращения и кинетическую энергию. В случае возникновения аварии в энергосистеме высокая кинетическая энергия роторов генераторов «поддерживает» энергосистему, сохраняя ее устойчивость. В дополнение к высоким значениям инерции роторов синхронные генераторы имеют демпфирующую функцию, что помогает демпфировать колебания частоты в энергосистемах [18]. При сохранении текущих темпов развития ВИЭ в будущем доля электростанций на основе ВИЭ в общей величине установленной мощности будет расти и будет сопоставима с мощностью генераторов на традиционных электростанциях. При этом, из-за отсутствия вращающихся масс электростанции ВИЭ не будут вносить вклад в повышение устойчивости энергосистемы (при текущих системах управления) [19,20]. Таким образом, аварийные возмущения в энергорайонах с большой долей электростанций ВИЭ будут значительно тяжелее, чем в энергорайонах с малой долей электростанций ВИЭ.

Однако, если добавить к инвертору накопитель энергии, тогда возможно реализовать алгоритм ВСГ путем перенастройки системы управления инвертором [21,22]. В результате электростанции ВИЭ могут вести себя как традиционный генератор в течение некоторого времени и вносить свой вклад в повышение устойчивости энергорайона [23].

ВСГ имеет возможность имитировать инерционные свойства традиционных синхронных генераторов ограниченный период времени с помощью дополнительно реализованных алгоритмов управления, тем самым давая традиционно построенным системам регулирования, устройствам противоаварийного управления и релейной защите достаточно времени для возвращения параметров электрической сети в область допустимых значений, тем самым повышая предел устойчивости энергосистемы [24].

Основной принцип работы ВСГ (The basic principle of the VSG)

Принцип ВСГ основан на воспроизведении динамических свойств реального синхронного генератора на электростанциях с ВИЭ с применением инверторов. Динамические свойства синхронных генераторов обеспечивают возможность регулировки активной и реактивной мощности, зависимости частоты сети от частоты вращения ротора, эффекта вращающейся массы и демпфирования обмоток. Это достигается за счет активного регулирования мощности инвертора в обратной пропорции к частоте вращения ротора [25].

ВСГ включает в себя систему из следующих элементов: инвертор, алгоритм управления инвертором и накопителя электрической энергии (рис. 1). Система регулирует выдачу мощности инвертора в энергосистему, тем самым демпфируя колебания частоты так, как это делает традиционный синхронный генератор [26,27]. В связи с тем, что ВСГ должен иметь возможность в любое время увеличивать выдачу или уменьшать выдачу мощности, накопитель электрической энергии должен всегда иметь резерв на загрузку и разгрузку для компенсации недостатка или избытка энергии при аварийных ситуациях [28].

Для лучшего понимания структуры ВСГ на рис.1 проведена аналогия солнечной электростанции с применением ВСГ с традиционным генератором тепловой электростанции.

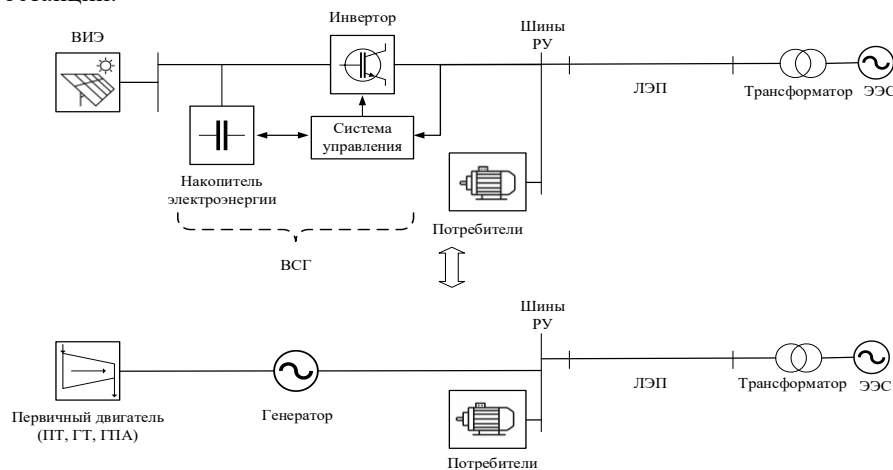


Рис. 1. Структура ВСГ и аналогия между солнечной электростанцией и традиционной электростанцией с синхронным генератором

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 1. The structure of the VSG and the analogy between a solar power plant and a traditional power plant with a synchronous generator

Согласно рисунку 1, аналогия между инвертором и синхронным генератором может быть описана в следующем виде [29]:

- фотоэлектрические установки выполняют функции паровой (газовой) турбины;
- система накопления энергии и инвертор моделируют вращающуюся инерцию турбины и генератора;
- алгоритм управления моделирует электромеханические преобразования энергии традиционного синхронного генератора [30].

В качестве основного элемента ВСГ используется уравнение качания синхронного генератора, которое имеет вид [3]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_r), \quad (1)$$

где D - коэффициент демпфирования, J - момент инерции ротора, T_m - электромагнитный момент генератора, T_e - механический момент генератора, ω - угловая частота сети и ω_r - заданная угловая частота.

Для имитации электромагнитных характеристик синхронного генератора для ВСГ электрическое уравнение статора синхронного генератора может моделироваться без учета электромагнитной взаимосвязи между статором и ротором и может быть выражено как [23]:

$$\begin{aligned} L_s \frac{di_a}{dt} &= e_a - v_a - Ri_a; \\ L_s \frac{di_b}{dt} &= e_b - v_b - Ri_b; \\ L_s \frac{di_c}{dt} &= e_c - v_c - Ri_c, \end{aligned} \quad (2)$$

где L_s - индуктивность статора, $v_{a(b,c)}$ - напряжение в точке подключения, $e_{a(b,c)}$ - электродвижущая сила, R - сопротивление статора.

Для расчета опорной фазы и частоты модулирующего сигнала контур активной мощности ВСГ имитирует первичное регулирование частоты, демпфирование и инерцию синхронного генератора. В качестве основного элемента ВСГ используется уравнение качания синхронного генератора, которое имеет вид [3]:

$$P_m - P_e = \left(J \frac{d\omega}{dt} + D(\omega - \omega_r) \right) \omega, \quad (3)$$

где P_m - входная мощность инвертора (исходная мощность источника), P_e - выходная электрическая мощность инвертора. Для поддержания скорости ВСГ равной частоте сети важную роль играет виртуальный коэффициент демпфирования [23].

Математическое уравнение для контура активной мощности ВСГ, включая простой регулятор ВСГ, можно получить из (3):

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D(\omega - \omega_r). \quad (4)$$

Уравнение для контура реактивной мощности ВСГ позволяет определить необходимый уровень ЭДС E_r [3]:

$$K \frac{dE_r}{dt} = Q_m - Q_e + k_q (V_r - V), \quad (5)$$

где K - коэффициент инерции реактивной мощности и напряжения контура реактивной мощности, Q_m - заданная реактивная мощность, Q_e - выходная реактивная мощность;

k_q – коэффициент снижения реактивной мощности и напряжения; V – амплитуда выходного напряжения, а V_r – амплитуда номинального напряжения [31].

Материалы и методы (Materials and methods)

На основании вышеизложенного авторами был разработан способ моделирования ВСГ в программном комплексе Matlab.

Расчетная компьютерная модель состоит из:

- Источника постоянного напряжения, моделирующего ВИЭ;
- Инвертора;
- Схемы управления инвертором, реализующей алгоритм ВСГ;
- Модели ЛЭП;
- Двух нагрузок, одна из которых подключена постоянно, а другая подключается через 0,4 секунды после начала моделирования. Данное решение требуется для моделирования небаланса нагрузки в системе;
- Измерительных приборов.

Расчетная модель приведена на рисунке 2.

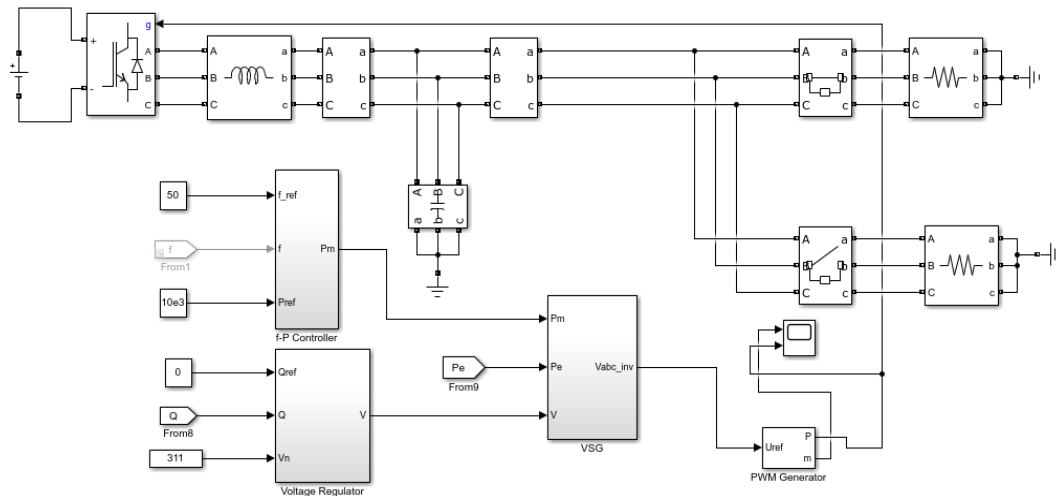


Рис.2. Расчетная модель в программном комплексе Matlab

Fig.2. Calculation model in the Matlab

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В приведенной схеме реализация принципа ВСГ выполнена в схеме управления [32]. Для этого авторами были разработаны следующие блоки:

- Регулятор активной мощности и частоты (f-P Controller);
- Регулятор напряжения (Voltage Regulator);
- Блок, моделирующий инерционные свойства синхронного генератора (VSG).

Для формирования сигналов переключения ключей инвертора использовался имеющийся в библиотеке Matlab Simulink блок ШИМ-генератор (PWM Generator). Вышеуказанные блоки формируют собой схему управления инвертором.

Регулятор активной мощности и частоты приведен на рис. 3.

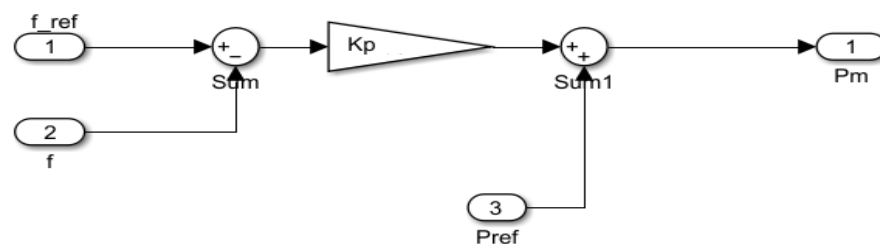


Рис. 3. Регулятор активной мощности и частоты

Fig. 3. Active power and frequency controller

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Регулятор отслеживает отклонение заданной частоты от фактической и, при расхождении, формирует сигнал ошибки. Полученная ошибка складывается с заданной активной мощностью, и результирующая активная мощность передается на блок, моделирующий инерционные свойства синхронного генератора.

Регулятор напряжения приведен на рисунке 4.

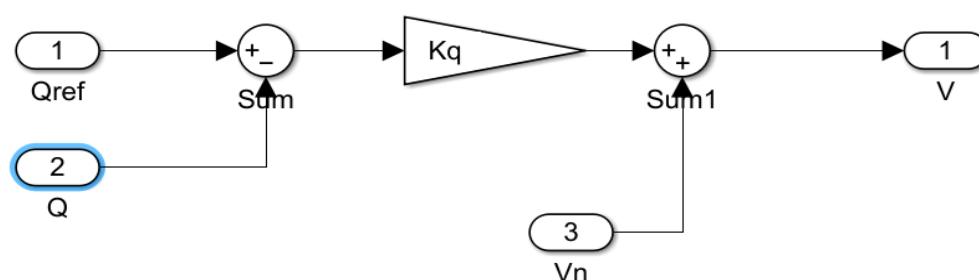


Рис. 4. Регулятор напряжения

Fig. 4. Voltage regulator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Блок, моделирующий инерционные свойства синхронного генератора основан на уравнении движения ротора синхронного генератора (3) и приведен на рисунке 5.

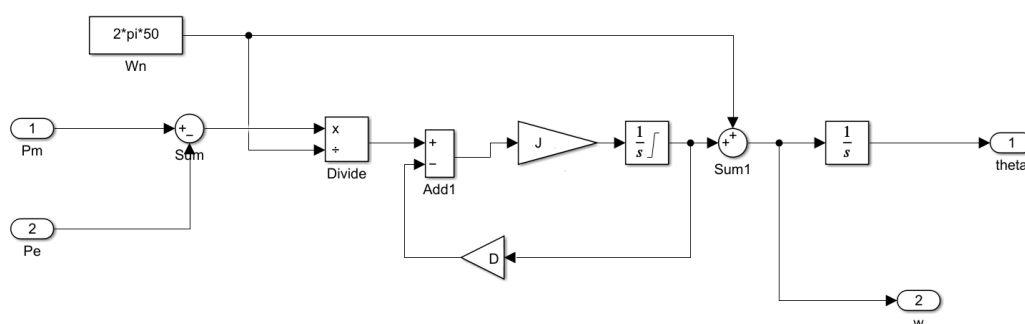


Рис. 5. Блок, моделирующий инерционные свойства синхронного генератора

Fig. 5. A block simulating the inertial properties of a synchronous generator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Основные параметры вышеописанных блоков компьютерной модели приведены в таблице.

Таблица
Table

Основные параметры блоков компьютерной модели
Main parameters of computer model blocks

Наименование параметра	Значение параметра
Регулятор активной мощности и частоты (f-P Controller)	
Номинальная частота, Гц	50
Номинальная активная мощность, Вт	1000
Коэффициент усиления K_p , о.е.	10000
Регулятор напряжения (Voltage Regulator)	
Номинальное напряжение (фазное), В	311
Номинальная активная мощность, вар	0
Коэффициент усиления K_q , о.е.	0.0001
Блок, моделирующий инерционные свойства синхронного генератора (VSG)	
Момент инерции J , о.е.	0,5
Коэффициент демпфирования D , о.е.	20

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В приведенной расчетной модели применены некоторые упрощения, а именно отсутствует накопитель электрической энергии, который необходим для выдачи дополнительной энергии или ее приема (в зависимости от сложившегося аварийного режима) при моделировании инерционных и демпфирующих свойств синхронного генератора. Вместо генерации ВИЭ и накопителя электрической энергии применен источник постоянного напряжения. Моделирование генерации ВИЭ и накопителя электрической энергии будет выполняться в рамках расширения расчетной модели в будущем.

Разработанная математическая модель обладает большой гибкостью и позволяет адаптировать ее под условия различных электрических сетей, а разнесение основных

функций модели по разным блокам дает возможность заменять и модернизировать их отдельно от остальных функций системы управления.

Для проверки работоспособности построенного алгоритма ВСГ проведено компьютерное моделирование по оценке возможности сохранения устойчивости сети при аварийном небалансе мощности, а именно резкое увеличение нагрузки и последующее снижение нагрузки до начальной величины.

Моделирование проводилось по следующему сценарию:

- 1) Пуск моделирования;
- 2) Возникновение аварийного небаланса мощности в сети (увеличение нагрузки) при $t=0,4$ с;
- 3) Возникновение повторного аварийного небаланса мощности (снижение нагрузки до начальной величины) при $t=0,8$ с.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Результаты моделирования приведены на рисунках 6, 7 и 8.

Из графика изменения напряжения (рис. 6) следует, что напряжение поддерживается инвертором на постоянном уровне.

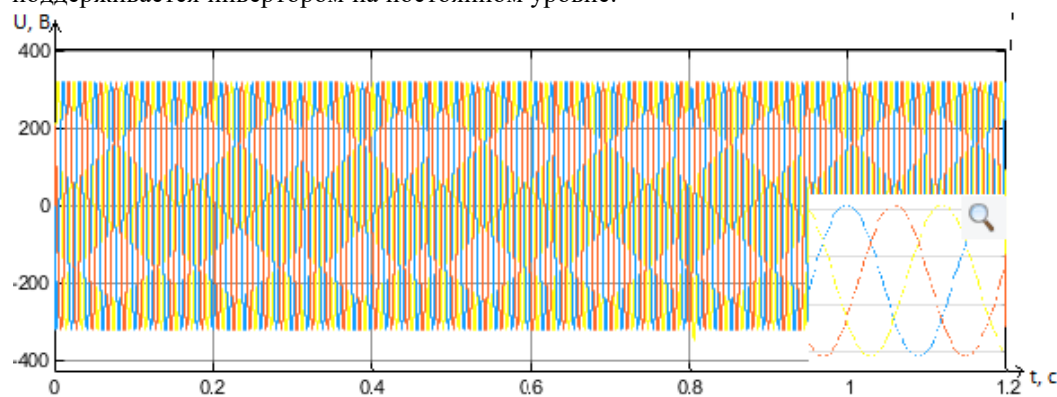


Рис. 6. График зависимости напряжения на выходе инвертора от времени

Fig. 6. Graph of the dependence of the voltage at the output of the inverter on time

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из графика изменения тока (рис. 7) видно, что инвертор реагирует на возникновение небалансов в сети (резкое увеличение/снижение потребления).

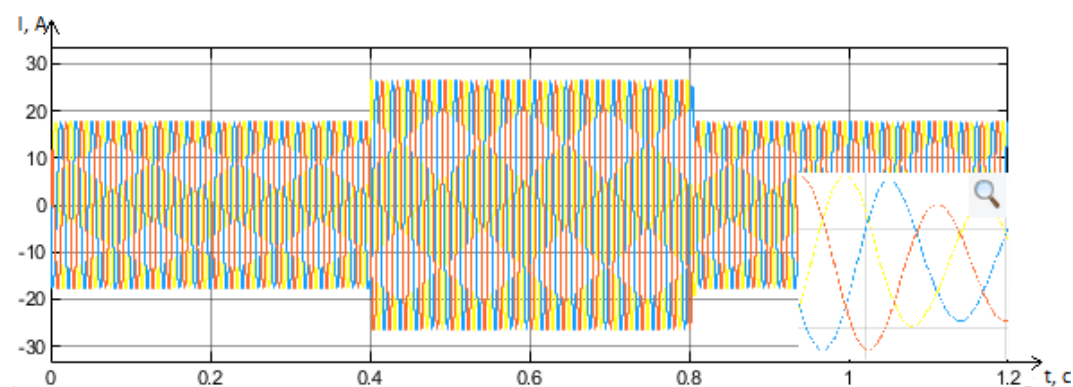


Рис. 7. График зависимости тока на выходе инвертора от времени

Fig. 7. Graph of the dependence of the current at the output of the inverter on time

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из графика изменения частоты (рис. 8) видно, что отклонения частоты при возникающих небалансах незначительны.

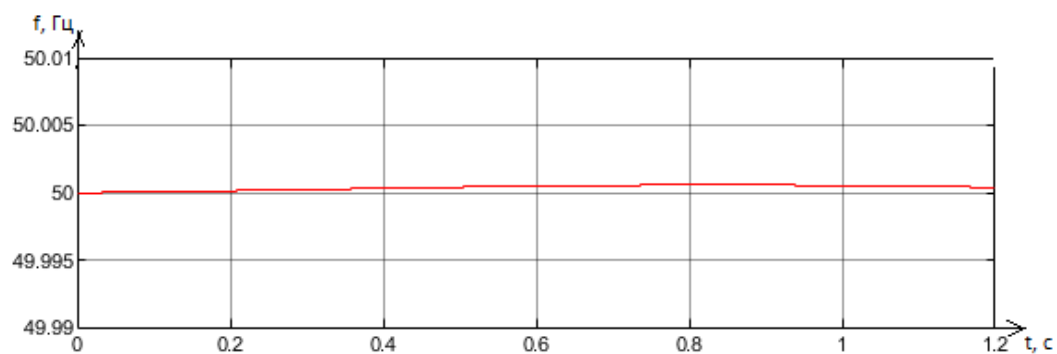


Рис. 8. График зависимости напряжения на выходе инвертора от времени *Fig. 8. Graph of the dependence of the voltage at the output of the inverter on time*

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author*

Из полученных в ходе моделирования графиков видно, что напряжение на выходе инвертора при возникновении аварийного небаланса мощности поддерживается на постоянном уровне (рис. 6). Ток на выходе инвертора увеличивается в момент наброса нагрузки и снижается в момент сброса нагрузки (рис.7), поддерживая частоту на постоянном уровне (рис.8) и обеспечивая потребность в электроэнергии. При этом отклонение частоты от заданных 50 Гц незначительно.

На основании полученных результатов моделирования можно сделать вывод о том, что построенная модель ВСГ эффективна, сохраняет устойчивость системы и обеспечивает корректное управление инвертором, вследствие чего параметры электрической сети поддерживаются в допустимых пределах.

Заключение (Conclusions)

Технология ВСГ может обеспечить участие электростанций на основе ВИЭ в повышении устойчивости энергосистемы, что в будущем при широком распространении таких электростанций обеспечит надежную и устойчивую работу энергосистем. Вклад в повышение устойчивости электрической сети реализуется путем имитации в инверторе инерционных и демпфирующих характеристик традиционного синхронного генератора, что повышает устойчивость энергосистемы и позволяет эффективно внедрять большое количество электростанций с использованием инверторов.

Полученная компьютерная модель в дальнейшем может использоваться в исследовании влияния электростанций ВИЭ с ВСГ на устойчивость в электрической сети с традиционными электростанциями, а также влияние на устойчивость при увеличении количества ВИЭ с ВСГ в электрической сети.

Литература

1. Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. Технология виртуального синхронного генератора для повышения устойчивости энергосистем // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. науч.-техн. конф./Нижегород. гос. техн.ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2021. – 435 с.
2. Шерязов С.К., Исенов С.С., Исаков Р.М., и др. Основные типы ветротурбин-генераторов в системе электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т.23. № 5. С. 24-33.
3. Cheema K.M. A comprehensive review of virtual synchronous generator // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 120.
4. Chen M., Zhou D., Blaabjerg F. Modelling, implementation, and assessment of virtual synchronous generator in power systems //Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2020. – Т. 8. – №. 3. – С. 399-411.
5. 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, 2011, pp. 1498-1505.
6. Зацаринная Ю.Н., Реутин Г.В., Курилов С.С., и др. Прогнозирование выработки электроэнергии фотоэлектрической станции методами машинного обучения. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25. № 3. С. 81–92.
7. Бурмейстер М. В., Булатов Р. В., Блинова К. А. Применение систем виртуальной инерции для улучшения качества переходных процессов в электроэнергетических системах // Фёдоровские чтения — 2021 : LI международная научно-практическая конференция с элементами

научной школы, Москва, 17–19 ноября 2021 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2021. – С. 318-324.

8. Аскарлов А.Б., Суворов А.А., Андреев М.В., Гусев А.С. К вопросу о современных принципах управления возобновляемыми источниками энергии на основе виртуального синхронного генератора. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. № 41. С. 5-30.

9. Mallemaci V., Mandrile F., Rubino S. et al. A comprehensive comparison of Virtual Synchronous Generators with focus on virtual inertia and frequency regulation //Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 201. pp. 107516.

10. Sang W., Guo W., Dai S., et al. Virtual synchronous generator, a comprehensive overview //Energies. 2022. Vol. 15. N17. pp. 6148.

11. Kong, X., Pan, J., Gong, X., et al. Emulating the features of conventional generator with virtual synchronous generator technology: an overview // The Journal of Engineering, 2017. Vol. 13, pp. 2135–2139.

12. Сардалов Р.Б., Ельмурзаев А.А., Дебиев М.В., и др. Перспективы развития традиционной и нетрадиционной энергетики Чеченской Республики. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23 № 4. С. 134-144.

13. Hirase Y., Ohara Y., Bevrani H. Virtual synchronous generator-based frequency control in interconnected microgrids //Energy Reports. 2020. Vol. 6. pp. 97-103.

14. Lin C., Xiao L., Sattarov R. Power System Control of More-electric Aircraft Engine Based on Double Closed Loop Feedback. 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019, pp. 1-6.

15. Robert F., Roger C. Review of the Impacts of Distributed Generation on Distribution Protection. 2015 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC); 2015. pp. 69-74. doi: 10.1109/REPC.2015.12

16. Лукутин Б.В., Карпар Хамид А. Оптимизация энергетических балансов фотоэлектрической станции с электрохимическим и тепловым аккумулированием солнечной энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 3-13.

17. Гарафутдинов Р.Р., Саттаров, Р.Р. Моделирование усовершенствованной автоматики ограничения перегрузки оборудования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2020. Т. 20. № 1. С.30–37.

18. Sattarov R., Fedosov E., Garafutdinov R. et al., Application of PSCAD in Practical Studies of Electrical Power Engineering Student // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019, pp. 1-6.

19. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 5. С. 184-194.

20. Бурмейстер М.В., Булатов Р.В., Кочергин А.В., и др. Применение виртуальной синхронной машины для интеграции возобновляемых источников энергии в объединённые энергосистемы // Научное сообщество студентов: междисциплинарные исследования: сб. ст. по мат. LXXIV междунар. студ. науч.-практ. конф. № 15(74).

21. Колпаков А.И. Конденсаторы Electronicon для высоковольтных преобразовательных устройств // Компоненты и технологии, 2004 г. № 6. С. 22-25.

22. Abuagreb M., Allehyani M. F., Johnson B. K. Overview of Virtual Synchronous Generators: Existing Projects, Challenges, and Future Trends //Electronics. – 2022. – Vol. 11, N18. pp. 2843.

23. Zhong Q-C, Weiss G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators // IEEE Trans Industr Electron. 2010. Vol. 58, N4. pp.1259–1267.

24. Lou G.,Yang Q., Gu W., et al. An improved control strategy of virtual synchronous generator under symmetrical grid voltage sag //International Journal of Electrical Power & Energy Systems.2020. Vol. 121. pp 106093.

25. Li L., Li H., Tseng M. et al. Renewable energy system on frequency stability control strategy using virtual synchronous generator // Symmetry.2020. Vol. 12. N10. pp. 1697-1699.

26. Chen J., Liu M., Milano F. Adaptive virtual synchronous generator considering converter and storage capacity limits //CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2022. Vol. 8. N2. pp. 580-590.

27. Николаев Ю.Е., Осипов В.Н., Игнатов В.Ю. Методика расчета энергетических показателей автономного энергокомплекса, включающего ГТУ, ВЭУ и аккумуляторы электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. № 3. С. 36-43.

28. Cvetkovic I., Boroyevich D., Burgos R. et al. Modeling of a virtual synchronous machine-

based grid-interface converter for renewable energy systems integration // 2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). 2014.

29. Alsiraji H., El-Shatshat R. Comprehensive assessment of virtual synchronous machine based voltage source converter controllers // IET Generation, Transmission and Distribution 2017. Vol. 11 N.7, pp. 1762-1769.

30. Badreldien M. M., Johnson B. K. Virtual Synchronous Generator Controller for Solar Photovoltaic System. 2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference. 2021. pp. 480-485.

31. Fang H., Yu Z. Improved virtual synchronous generator control for frequency regulation with a coordinated self-adaptive method // CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2020.

32. Серебрянников, А. В., Богомолова С.А. Принципы построения инверторов в солнечных электростанциях для сброса электрической энергии в сеть // Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения : Сборник материалов I Всероссийской научной конференции, Чебоксары, 19–20 июля 2013 года. – Чебоксары: Типография "Полиграфика", 2013. – С. 100-107.

Авторы публикации

Саттаров Роберт Радиевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехники и электрооборудования предприятий» Уфимского государственного нефтяного технического университета. г. Уфа. *ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9624-965X>. E-mail: sattar.rb@gmail.com.*

Гарафутдинов Рустам Разифович – аспирант кафедры «Автоматизации технологических процессов» Уфимского университета науки и технологий. г. Уфа. *E-mail: garafutdinov_r_r@mail.ru.*

References

1. Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. Tekhnologiya virtual'nogo sinhronnogo generatora dlya povysheniya ustojchivosti energosistem. *Aktual'nye problemy elektroenergetiki*. 2021. – 435 s (In Russ).
2. Sheryazov S.K., Issenov S.S., Iskakov R.M., et al. The main types of wind turbines-generators in the power supply system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(5):24-33. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-24-33.
3. Cheema K.M. A comprehensive review of virtual synchronous generator // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 120, 2020. doi:10.1016/j.ijepes.2020.106006.
4. Chen M., Zhou D., Blaabjerg F. Modelling, implementation, and assessment of virtual synchronous generator in power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2020;8(3):399-411. doi:10.35833/MPCE.2019.000592.
5. 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*, 2011; 1498-1505, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944492.
6. Zacarinnaya Yu.N., Reutin G.V., Kurilov S.S., et al. Prediction of electricity generation from res by machine learning methods. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(3):81-92. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-81-92.
7. Burmeister M. V., Bulatov R. V., Blinova K. A. Primenenie sistem virtual'noi inertsii dlya uluchsheniya kachestva perekhodnykh protsessov v elektroenergeticheskikh sistemakh. *Fedorovskie chteniya — 2021 : LI mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s elementami nauchnoi shkoly*, Moskva, 17–19 Nov 2021. – Moscow: MEI Publ., 2021. – pp. 318-324. (In Russ.).
8. Askarov A.B., Suvorov A.A., Andreev A.S., Gusev M.V. To the Question of Modern Principles of Renewable Energy Sources Control Based on a Virtual Synchronous Generator. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Sys`s*. 2022;41:5-30. (In Russ.). doi:10.15593/2224-9397/2022.1.01.
9. Mallemaci V., Mandrile F., Rubino S. et al. A comprehensive comparison of Virtual Synchronous Generators with focus on virtual inertia and frequency regulation. *Electric Power Systems Research*. 2021;201:107516. doi:10.1016/j.epsr.2021.107516.
10. Sang W., Guo W., Dai S., et al. Virtual synchronous generator, a comprehensive overview. *Energies*. 2022;15(17). pp. 6148.
11. Kong, X., Pan, J., Gong, X., et al. Emulating the features of conventional generator with virtual synchronous generator technology: an overview. *The Journal of Engineering*, 2017;(13):2135–2139. doi:10.1049/joe.2017.0707.
12. Sardalov R.B., Elmurzaev A.A., Debiev M.V., et al. Prospects for the development of traditional and unconventional energy in the Chechen Republic. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(4):134-144. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-134-144.

13. Hirase Y., Ohara Y., Bevrani H. Virtual synchronous generator-based frequency control in interconnected microgrids. *Energy Reports*. 2020;(6):97-103. doi:10.1016/j.egy.2020.10.044.
14. Lin C., Xiao L., Sattarov R. Power System Control of More-electric Aircraft Engine Based on Double Closed Loop Feedback. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, 2019; pp. 1-6, doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950008.
15. Robert F., Roger C. Review of the Impacts of Distributed Generation on Distribution Protection. *2015 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)*. 2015. pp. 69-74. doi:10.1109/REPC.2015.12.
16. Lukutin B.V., Karrar Hameed K. Optimization of energy balances of a photovoltaic power plant with electrochemical and thermal storage of solar energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):3-13. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13.
17. Sattarov R.R., Garafutdinov R.R. Modeling Advanced Automatic Overcurrent Limiting System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020; 20(1): 30–37. (in Russ.) doi:10.14529/power200104.
18. Sattarov R., Fedosov E., Garafutdinov R. et al., Application of PSCAD in Practical Studies of Electrical Power Engineering Student // *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, 2019; 1-6, doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950001.
19. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. The study of the isolated power supply system operation with controlled distributed generation plants, energy storage units and drive load. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(5):184-194. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194.
20. Burmejster M.V., Bulatov R.V., Kochergin A.V., et al. Primenenie virtual'noj sinhronnoj mashiny dlya integracii vozobnovlyaemyh istochnikov energii v ob"edinyonnye energosistemy. *Nauchnoe soobshchestvo studentov: mezhdisciplinarnye issledovaniya: sb. st. po mat. LXXIV mezhdunar. stud. nauch.-prakt. Konf. № 15(74)* (In Russ.).
21. Kolpakov A.I. Kondensatory Electronicon dlya vysokovol'tnyh preobrazovatel'nyh ustrojstv. *Komponenty i tekhnologii*, 2004; 6: 22-25 (In Russ.).
22. Abuagreb M., Allehyani M. F., Johnson B. K. Overview of Virtual Synchronous Generators: Existing Projects, Challenges, and Future Trends. *Electronics*. 2022;11(18):2843. doi: 10.3390/electronics11182843.
23. Zhong Q-C, Weiss G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators // *IEEE Trans Industry Electron*. 2010. 58(4):1259 - 1267. doi: 10.1109/TIE.2010.2048839.
24. Lou G., Yang Q., Gu W., et al. An improved control strategy of virtual synchronous generator under symmetrical grid voltage sag. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. 121(8):106093. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106093.
25. Li L., Li H., Tseng M. et al. Renewable energy system on frequency stability control strategy using virtual synchronous generator. *Symmetry*. 2020;12(10):1697. doi:10.3390/sym12101697.
26. Chen J., Liu M., Milano F. Adaptive virtual synchronous generator considering converter and storage capacity limits. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2022.8(2). pp. 580-590.
27. Nikolaev Y.E., Osipov V.N., Ignatov V.Y. Calculation methodology of the energy indicators of an self-contained energy complex including gas turbine plants, wind-driven power plant and electric storage cell. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(3):36-43. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-36-43.
28. Cvetkovic I., Boroyevich D., Burgos R. et al. Modeling of a virtual synchronous machine-based grid-interface converter for renewable energy systems integration. *2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*. 2014. doi:10.1109/compel.2014.6877195.
29. Alsiraji H., El-Shatshat R. Comprehensive assessment of virtual synchronous machine-based voltage source converter controllers. *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2017;11(7):1762-1769. doi:10.1049/iet-gtd.2016.1423.
30. Badreldien M. M., Johnson B. K. Virtual Synchronous Generator Controller for Solar Photovoltaic System. *2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference*. 2021. pp. 480-485.
31. Fang H., Yu Z. Improved virtual synchronous generator control for frequency regulation with a coordinated self-adaptive method. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2020.
32. Serebryannikov, A. V., Bogomolova S. A. Principy postroeniya invertorov v solnechnyh elektrostanciyah dlya sbrosa elektricheskoy energii v set'. *Nanostrukturirovannye materialy i preobrazovatel'nye ustrojstva dlya solnechnyh elementov 3-go pokoleniya: Sbornik materialov I Vserossijskoj nauchnoj konferencii, Cheboksary*, 2013. pp. 100-107. (In Russ.).

Author of the publication

Robert R. Sattarov - Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9624-965X>. E-mail: sattar.rb@gmail.com.

© Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р.

Rustam R. Garafutdinov - Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
E-mail: garafutdinov_r_r@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **15.02.2024 г.**

Отредактировано **06.03.2024 г.**

Принято **13.03.2024 г.**