

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



УДК 621.311

DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.23

И. И. АРТЮХОВ
С. Ф. СТЕПАНОВ
А. И. ЗЕМЦОВ
Г. Н. ТУЛЕПОВА

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МИКРОСЕТИ НА ОСНОВЕ ГРУППЫ АВТОНОМНО РАБОТАЮЩИХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

TRANSIENT PROCESSES IN THE MICROGRID BASED ON A GROUP OF AUTONOMOUS
OPERATING SYNCHRONOUS GENERATORS

Современный уровень развития силовой электроники позволяет создавать микросети на основе синхронных генераторов, работающих с различными скоростями вращения вала. Управление потоками энергии в таких сетях и обеспечение заданных параметров вырабатываемой электроэнергии осуществляется с помощью преобразовательных устройств. В статье приводятся результаты исследования переходных процессов в микросети, в которой потоки энергии суммируются на шине постоянного тока. Имитационное моделирование микросети производится с помощью программного комплекса MATLAB с пакетом расширения Simulink. Показано, что для обеспечения устойчивости системы необходимо осуществлять оперативную коррекцию параметров автоматического регулятора.

Ключевые слова: микросеть, синхронный генератор, преобразование энергии, переходные процессы, имитационное моделирование

Для современного этапа развития электроэнергетики характерным является интенсивный процесс создания и развития микросетей. Этот процесс обусловлен тем, что микросети имеют ряд преимуществ по сравнению с классическими способами генерирования, передачи и распределения энергии. В микросети выработанная энергия в основном используется местными потребителями, что обеспечивает снижение потерь, связанных с передачей и распределением энергии по электрическим сетям. Надежность снабжения электроэнергией в рамках микросети обеспечить существенно легче, чем в крупных энергетических системах. Потребители энергии в микросети мо-

The current level of development of power electronics allows the creation of microgrids based on synchronous generators operating at different speeds of rotation of the shaft. The management of energy flows in such networks and the provision of the specified parameters of the generated electricity is carried out using converter devices. The article presents the results of the study of transient processes in the microgrid, in which the energy flows are summed on the DC bus. Simulation of the microgrid is performed using the MATLAB software package with the Simulink expansion pack. It is shown that to ensure the stability of the system, it is necessary to carry out an operational correction of the parameters of the automatic controller.

Keywords: microgrid, synchronous generator, power conversion, transient processes, simulation modeling

гут участвовать в процессе балансирования мощности путем регулирования своих нагрузок, генерируя, накапливая и отдавая электроэнергию в микросеть [1, 2].

Микросети могут быть построены на базе широко распространенных источников энергии, таких как дизель-генераторы, газотурбинные генераторы и т. п. В настоящее время перспективы создания микросетей рассматривают также в связи с возможностью интеграции возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая [3].

Существуют различные варианты микросетей. Они могут работать автономно или быть соединены с электросетью энергосистемы. Объединение

отдельных локальных сетей в микросеть может осуществляться как по шинам переменного, так и постоянного тока. При этом микросети постоянного напряжения имеют ряд преимуществ.

На рис. 1 показана схема микросети, которая образована путем объединения по шине постоянного тока N автономно функционирующих модулей [4]. Источником энергии в каждом модуле является синхронный генератор СГ с приводным двигателем ПД. Вал генератора k-го модуля вращается с частотой n_k , напряжение и частота имеют значения U_k, f_k .

С помощью выпрямителя AC/DC, регулятора DC/DC и сглаживающего LC-фильтра осуществляется преобразование электрической энергии переменного тока на выходе СГ в электрическую энергию постоянного тока с требуемыми параметрами. В составе модулей имеются электроприемники как постоянно, так и переменного тока промышленной частоты.

Последние получают энергию от шины постоянного тока через инвертор DC/AC, который оснащается синус-фильтром для обеспечения требуемой формы напряжения. К шине постоянного тока могут быть подключены также внешние электроприемники.

Микросеть на рис. 1 характеризуется сложной динамикой. При изменении режима работы СГ, параметров нагрузки и структуры микросети возникают переходные процессы, исследование которых может быть проведено с помощью современных программных продуктов, таких как MATLAB с пакетом расширения Simulink [5].

Схема имитационной модели для исследования переходных процессов в микросети с двумя модулями показана на рис. 2. Силовая часть микросистемы представлена блоками Subsystem (рис. 3), каждый из которых моделирует СГ с преобразователями AC/DC и DC/DC в виде двухполюсника, имеющего ЭДС

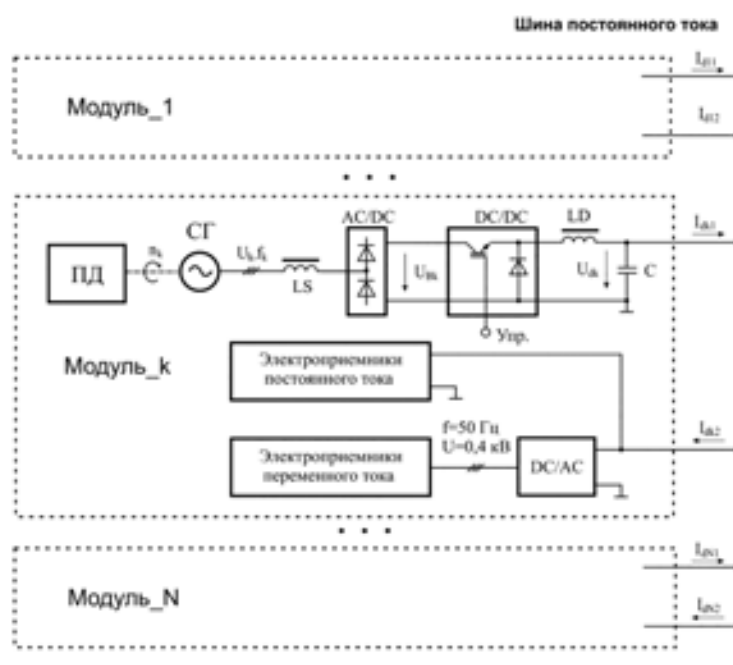


Рис. 1. Схема микросети на основе группы синхронных генераторов

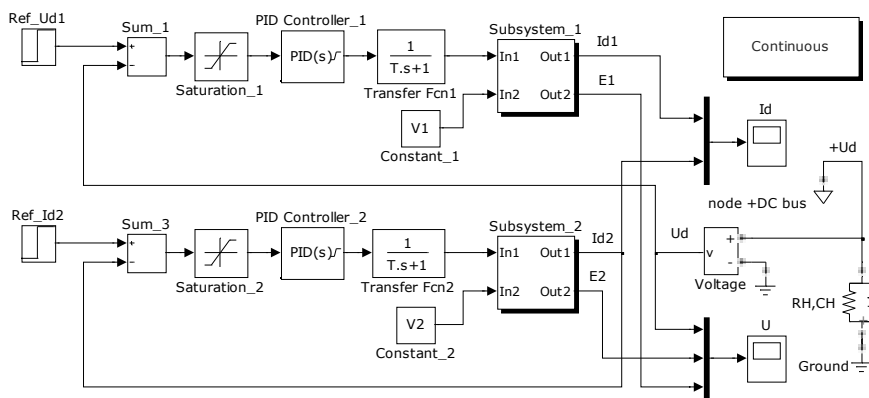


Рис. 2. Схема имитационной модели

E_{dk} и внутреннее сопротивление R_{sk} . Правомерность такого подхода обоснована в [6–8] и других работах. Кроме того, принято допущение о представлении преобразователя DC/DC аperiodическим звеном первого порядка в предположении о том, что управление силовым ключом преобразователя осуществляется с достаточно высокой частотой [9].

Основу блока Subsystem составляет управляемый источник напряжения (блок Controlled Voltage Source), который включен последовательно с резистором RS и диодом (Diode), обеспечивающим однопольный характер выходного тока модуля. Резистор RS моделирует внутреннее сопротивление источника энергии, которое при углах коммутации, не превышающих $\pi/3$, рассчитывается по формуле

$$R_{sk} = \frac{3}{\pi} \omega L_{ok} + 2 \cdot R_{ok}, \quad (1)$$

где ωL_{ok} , R_{ok} – соответственно индуктивное и активное сопротивление на входе выпрямителя.

Величина напряжения блока Controlled Voltage Source задается сигналом, который формируется путем перемножения сигналов на информационных входах блока Subsystem. На один вход через блок Transfer Fcn поступает управляющий сигнал от регулятора (блок PID Controller), на другой – константа, численно равная напряжению на выходе преобразователя AC/DC в режиме холостого хода. В результате на выходе блока Controlled Voltage Source формируется напряжение, соответствующее ЭДС двухполосника:

$$E_{dk} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot \gamma \cdot C_E \cdot \Phi_k \cdot n_k, \quad (2)$$

где C_E – постоянная для каждой электрической машины величина; Φ_k – основной магнитный поток; n_k – частота вращения вала СГ; γ – коэффициент заполнения широтно-импульсной модуляции (ШИМ) преобразователя DC/DC.

К блоку Controlled Voltage Source через сглаживающий дроссель, имеющий индуктивность LD и активное сопротивление RD, подключена нагрузка модуля в виде параллельно соединенных резистора R и конденсатора C.

Силовые выходы блоков Subsystem подключены к контактам +DC bus и Ground, образующим шину постоянного тока. К этим контактам присоединена также внешняя нагрузка микросистемы, которая моделируется параллельно соединенными резистором RH и конденсатором CH.

Первый модуль является ведущим и работает в режиме стабилизации напряжения на шине постоянного тока. Для этого сигнал с измерителя напряжения (блок Voltage) подается на инверсный вход элемента сравнения, на прямой вход которого поступает сигнал от задатчика напряжения (блок Ref_UD1). Разница сигналов обрабатывается регулятором (блок PID Controller) до тех пор, пока напряжение на шине постоянного тока не достигнет заданного значения.

Второй модуль (ведомый) спустя некоторое время после включения первого модуля должен

входить в режим стабилизации выходного тока. Для этого образован контур обратной связи с задатчиком в виде блока Ref_ID2.

На рис. 4 показаны результаты моделирования микросети со следующими параметрами:

- внутреннее сопротивление источников – 0,1 Ом;
- эквивалентное сопротивление нагрузки – 3 Ом;
- суммарная емкость конденсаторов – 6600 мкФ;
- индуктивности и активные сопротивления сглаживающих дросселей – 1 мГн и 0,01 Ом соответственно.

Постоянные времени блоков Transfer Fcn составили 0,1 с.

Настройки регуляторов показаны в таблице.

Наименование регулятора	Коэффициенты регуляторов		
	пропорц. KP	интегр. KI	дифф. KD
PID Controller_1	0,002	0,014	0
PID Controller_2	0	0,05	0

Сценарий развития событий предполагался следующий. Приводные двигатели СГ вращают их валы с такой скоростью, что напряжения на выходах выпрямителей равны 500 В. Вначале запускается первый модуль и выходит в режим стабилизации напряжения на шине постоянного тока на уровне 300 В. Через 2 секунды запускается второй модуль и должен выйти в режим стабилизации тока на уровне 40 А.

Из графиков на рис. 4 видно, что первая стадия переходного процесса развивается успешно. Коэффициенты регулятора первого модуля подобраны так, что напряжение на шине постоянного тока выходит на заданный уровень без перерегулирования. Однако после того как поступает команда на запуск второго модуля и через некоторое время ЭДС E_{d2} этого модуля сравнивается с ЭДС E_{d1} первого модуля, возникают автоколебания, сопровождающиеся поочередным включением и отключением модулей.

Для устранения этого явления предложено уменьшать коэффициент передачи второго регулятора в тех режимах, когда разность ЭДС модулей становится меньше заданной величины. Схема имитационной модели микросети с корректором коэффициента передачи в контуре стабилизации тока показана на рис. 5. В схему модели введены блоки Summator_3, Divide, Math Fuction, Gain_3, которые реализуют функцию

$$A = K_3 \cdot \left(\frac{E_{d1} - E_{d2}}{E_{d1}} \right)^2, \quad (3)$$

где K_3 – коэффициент, задаваемый в настройках блока Gain_3.

Параметр A, который управляет коэффициентом передачи в контуре стабилизации тока, с помощью блока Saturation_3 ограничивается диапазоном $A_{min} \dots 1$.

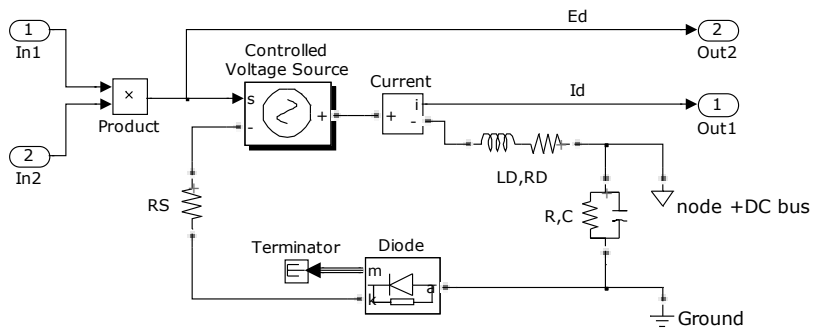


Рис. 3. Схема subsystem

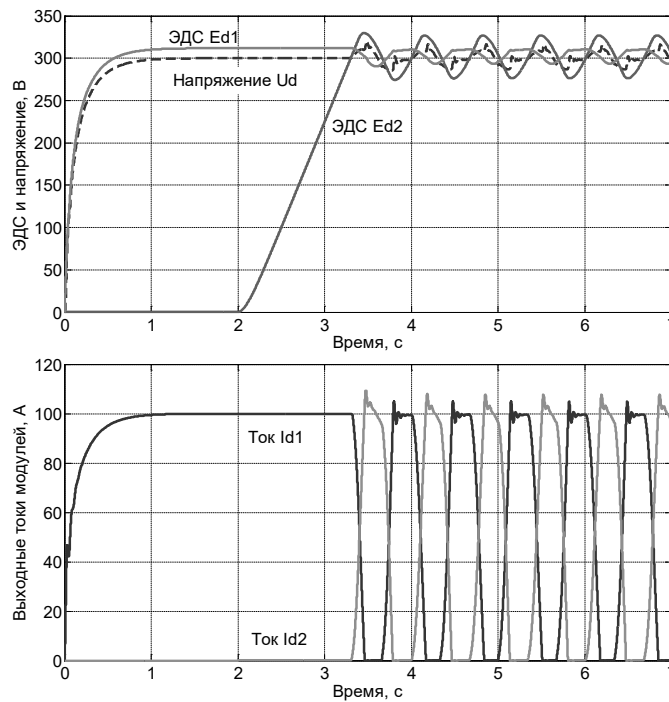


Рис. 4. Результаты моделирования переходных процессов в микросети (неустойчивый режим)

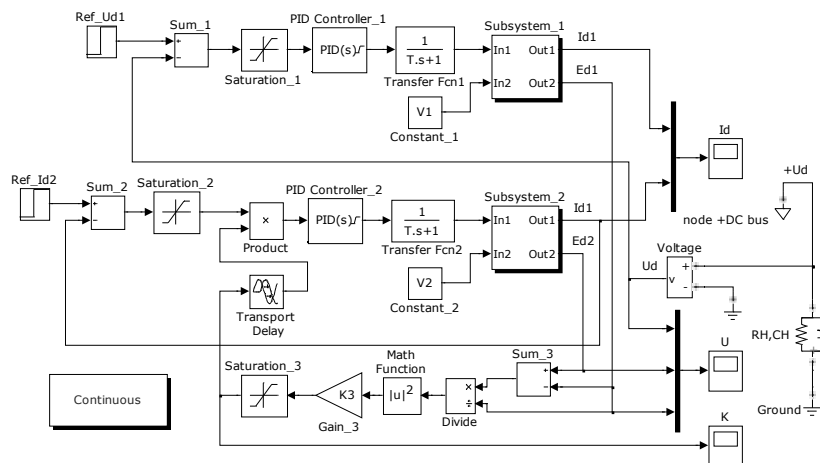


Рис. 5. Схема модели с корректором коэффициента передачи в контуре стабилизации тока

Результаты моделирования переходных процессов в микросети при коррекции коэффициента передачи в контуре стабилизации тока представлены на рис. 6. Минимальное значение параметра $A_{\min} = 0,05$; коэффициент $K_3 = 20$. При таком значении K_3 параметр A остается равным 1 до тех пор, пока модуль относительной разницы ЭДС не станет меньше

0,22. Из графиков на рис. 6 видно, что после 3-й секунды переходного процесса за счет уменьшения параметра A скорость изменения ЭДС E_{a2} уменьшается, что приводит к устойчивости системы. Происходит заданное перераспределение нагрузки модулей: ток 1-го модуля снижается до 60 А, а ток 2-го модуля возрастает до 40 А.

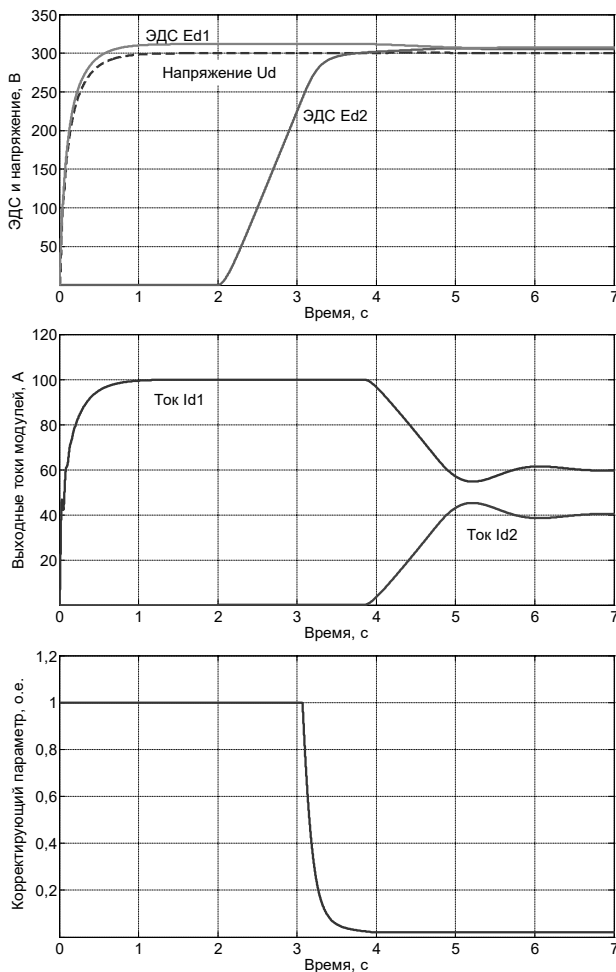


Рис. 6. Результаты моделирования переходных процессов в микросети с корректором коэффициента передачи

Выводы. 1. В настоящее время происходит интенсивный процесс создания и развития микросетей, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с классическими способами генерирования, передачи и распределения энергии. При этом современный уровень развития силовой электроники позволяет создавать микросети на основе генераторов, приводные валы которых вращаются с различными скоростями.

2. Микросеть на основе группы автономно работающих СГ характеризуется сложной динамикой. При изменении режима работы СГ, параметров нагрузки и структуры микросети возникают переходные процессы, для исследования которых необходимо применять современные программные продукты.

3. Исследование динамических режимов в микросети из двух модулей с автономно работающими СГ, проведенное с помощью программного комплекса MATLAB с пакетом расширения Simulink, показало возможность возникновения автоколебаний, которые сопровождаются поочередным включением и отключением модулей.

4. Предложено и подтверждено численными экспериментами на имитационной модели микросети, что для обеспечения устойчивой работы системы необходимо осуществлять оперативную коррекцию параметров автоматического регулятора модуля, работающего в режиме стабилизации тока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Адомавичюс В.Б., Харченко В.В.* Особенности и проблемы построения микросетей // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Тр. междунар. науч.-техн. конф. М: ГНУ ВИЭСХ, 2012. Т. 5. С. 50–56.

2. *Лапшин С.А., Харченко В.В.* Система электроснабжения потребителей в сетях низкого напряжения с использованием различных источников энергии и управлением генерацией электроэнергии // Вестник аграрной науки Дона. 2015. № 4(32). С. 51–57.

3. *Dragicevic T., Lu X., Vasquez J.C., Guerrero J.M.* DC Microgrids – Part II: A Review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issue // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. Vol. 31, № 5. Pp. 3528 – 3549.

4. *Артюхов И.И., Степанов С.Ф., Бочкарев Д.А., Тулепова Г.Н., Земцов А.И.* Микросеть на основе группы автономно работающих синхронных генераторов // Градостроительство и архитектура. 2017. Т.7, №4. С. 127-131. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.04.22.

5. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. 288 с.

6. *Jatskevich J., Pekarek S.D., Davoudi A.* Parametric Average-Value Model of Synchronous Machine-Rectifier Systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2006. Vol. 21. Issue 1. Pp. 9 – 18. DOI: 10.1109/TEC.2005.847974.

7. *Gonzalez-Longatt F.M., Wall P., Terzija V.* / A Simplified Model for Dynamic Behavior of Permanent Magnet Synchronous Generator for Direct Drive Wind Turbines // 2011 IEEE Trondheim PowerTech. DOI: 10.1109/PTC.2011.6019425.

8. *Соловьев В. А.* Моделирование тягового генератора и стенда для его испытания // Наука и образование. 2013. № 3. DOI: 10.7463/0313.0542271.

9. *Мелешин В.И., Овчинников Д.А.* Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. 576 с.

Об авторах:

АРТЮХОВ Иван Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехнологии Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Институт энергетики и транспортных систем
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: ivart1954@gmail.com

СТЕПАНОВ Сергей Фёдорович

доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехнологии Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Институт энергетики и транспортных систем
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: stepanov460915@yandex.ru

ЗЕМЦОВ Артём Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Филиал Самарского государственного технического университета в г. Сызрани

446001, Россия, г. Сызрань, ул. Советская, 45
E-mail: artex283@mail.ru

ТУЛЕПОВА Гульсим Нуржановна

аспирант кафедры электроснабжения и электротехнологии Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Институт энергетики и транспортных систем
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
E-mail: gulsim_tulepova@list.ru

ARTYUKHOV Ivan I.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Energy Supply and Electrical Technology Chair

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
School of Energy and Transportation
410054, Russia, Saratov, Polytechnicheskaya str., 77
E-mail: ivart1954@gmail.com

STEPANOV Sergey F.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Energy Supply and Electrical Technology Chair

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
School of Energy and Transportation
410054, Russia, Saratov, Polytechnicheskaya str., 77
E-mail: stepanov460915@yandex.ru

ZEMTSOV Artem I.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Energy Supply of Industrial Enterprises Chair

Syzran Branch of Samara State Technical University
446001, Russia, Syzran, Sovetskaya str., 45
E-mail: artex283@mail.ru

TULEPOVA Gulsim N.

Postgraduate Student of the Energy Supply and Electrical Technology Chair

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
School of Energy and Transportation
410054, Russia, Saratov, Polytechnicheskaya str., 77
E-mail: gulsim_tulepova@list.ru

Для цитирования: *Артюхов И.И., Степанов С.Ф., Земцов А.И., Тулепова Г.Н.* Переходные процессы в микросети на основе группы автономно работающих синхронных генераторов // Градостроительство и архитектура. 2018. Т.8, №3. С. 124-129. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.23.

For citation: *Artyukhov I.I., Stepanov S.F., Zemtsov A.I., Tulepova G.N.* Transient Processes in the Microgrid Based on a Group of Autonomous Operating Synchronous Generators // Urban Construction and Architecture. 2018. V.8, №3. Pp. 124-129. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.23.