

## ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОБЛОКА, ВКЛЮЧАЮЩЕГО синхронный генератор с нерегулируемым возбуждением и объединенный регулятор потоков мощности

*И.С. Егоров, М.Е. Гольдштейн*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск*

По результатам исследований на имитационной модели в среде MATLAB Simulink определено распределение потоков мощности в энергоблоке, включающем синхронный генератор с нерегулируемым возбуждением и объединенный регулятор потока мощности (ОРПМ). Получены взаимосвязи параметров основного оборудования объединенного регулятора потока мощности, а также параметров режима его элементов и нормируемого диапазона изменения режимов энергосистемы.

*Ключевые слова:* мощность, синхронный генератор, объединенный регулятор потоков мощности.

### Актуальность вопроса

Недостаточное быстродействие и невозможность отдельного регулирования напряжения и реактивной мощности синхронных генераторов (СГ) с тиристорными системами возбуждения, низкая надежность этих систем [1] приводят к поиску альтернативных решений, одним из которых является приведенный на рис. 1 энергоблок, включающий СГ с нерегулируемым возбуждением и объединенный регулятор потока мощности (ОРПМ) [2–6]. Этот энергоблок расширяет области применения СГ с нерегулируемым возбуждением. Такие генераторы имеют высокую надежность и наиболее низкую себестоимость, они проще в эксплуатации. В частности, к ним относятся и генераторы с постоянными магнитами [5]. ОРПМ, являясь бесконтактным устройством, также имеет высокую надежность. Работа энергоблока на активно-индуктивную нагрузку в автономной энергосистеме рассмотрена в работах [2–4]. При параллельной работе энергоблока с энергосистемой, как и при работе на автономную нагрузку, функции регулирования напряжения и создания и потребления реактивной

мощности перекладываются на ОРПМ [6]. Регулирование посредством ОРПМ при параллельной работе с энергосистемой по сравнению с регулированием возбуждения СГ повышает динамические свойства энергоблока, ускоряя изменение режимов энергосистемы. Для проектирования таких энергоблоков, настройки их регуляторов необходимы данные о взаимосвязи режимов энергосистемы, диапазонов регулирования активной и реактивной мощности и напряжения энергоблока с параметрами его элементов.

### Исследование взаимосвязи параметров энергоблока и режимов энергосистемы

Исследование выполнено на имитационной модели в среде MATLAB Simulink. Регулирование напряжения энергоблока при его работе в энергосистеме (см. рис.1) производится вводом с помощью трансформатора Т1 добавочного напряжения  $\Delta U$ , фаза которого  $\rho$  может изменяться от нуля до 360 град. эл. по отношению к фазе напряжения СГ. Амплитуда этого напряжения варьируется в пределах, ограниченных параметрами трансформато-

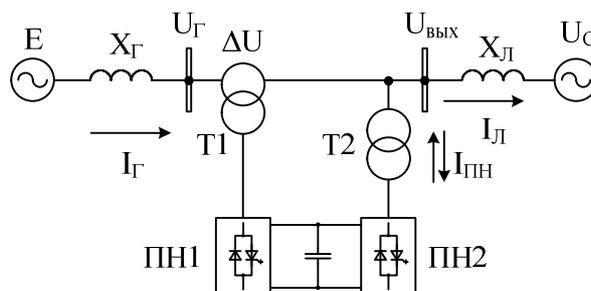


Рис. 1. Схема включения в сеть энергоблока «Синхронный генератор – ОРПМ»

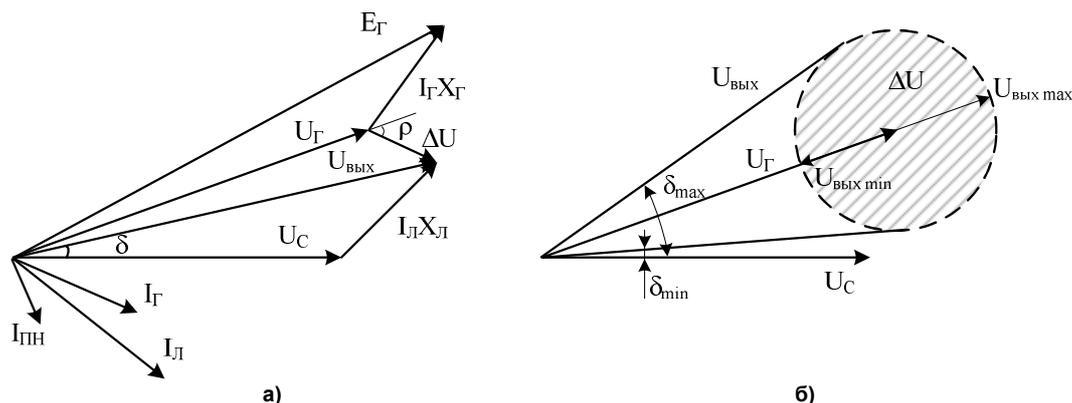


Рис. 2. Векторные диаграммы энергоблока «СГ – ОРПМ»: а – при работе на сеть бесконечной мощности; б – при регулировании  $U_{\text{ВЫХ}}$  и  $\delta$

ра Т1 и преобразователя ПН1. Выходное напряжение комплекса  $U_{\text{ВЫХ}}$  является векторной суммой двух напряжений: напряжения на выводах статора СГ –  $U_{\text{Г}}$  и напряжения  $\Delta U$  сетевой обмотки трансформатора Т1. Преобразователь ПН2, связанный с шинами электростанции через трансформатор Т2, обеспечивает генерацию или потребление реактивной мощности (в зависимости от режима энергосистемы) в точке подключения блока, а также создает контур для протекания активной мощности между преобразователями ПН1 и ПН2 [2–4, 7]. Векторная диаграмма токов и напряжений для одного из режимов этой схемы приведена на рис. 2, а.

Величина выдаваемой в сеть мощности определяется как [1]

$$P = \frac{U_{\text{ВЫХ}} U_{\text{С}} \sin \delta}{X_{\text{Л}}},$$

где  $U_{\text{С}}$  – напряжение на шинах системы бесконечной мощности;  $X_{\text{Л}}$  – индуктивное сопротивление звена передачи;  $\delta$  – угол между вектором напряжения на шинах системы бесконечной мощности и вектором выходного напряжения комплекса.

При изменениях режима энергоблока в энергосистеме регулирование выдаваемой в сеть мощности производится изменением величин  $U_{\text{ВЫХ}}$  и  $\delta$ . ОРПМ может работать в режиме регулятора величины или фазы напряжения энергоблока, а также осуществлять комплексное регулирование, воздействовать на  $U_{\text{ВЫХ}}$  и  $\delta$  одновременно. Область возможных значений напряжений показана на векторной диаграмме рис. 2, б, регулирование величины и фазы напряжения возможно, соответственно, в диапазонах  $U_{\text{ВЫХ min}} \dots U_{\text{ВЫХ max}}$  и  $\delta_{\text{min}} \dots \delta_{\text{max}}$ . Предельные значения ограничиваются только параметрами трансформаторов и преобразователей. Применение преобразователей, построенных на базе современных тиристорных типа ГТО или транзисторов типа IGBT, позволяет получать необходимые параметры  $\Delta U$  и  $\rho$  с высокой точностью и быстродействием. Их величины устанавливаются регуляторами.

В результате исследований, проведенных на имитационной модели в среде MATLAB Simulink, получено семейство зависимостей  $\delta(\Delta U)$  и  $U_{\text{ВЫХ}}(\Delta U)$  для разных значений  $\rho$  (рис. 3). Для регулирования  $\delta$  наиболее эффективными являются режимы с  $\rho = \pm 90$  град. эл., а для регулирования  $U_{\text{ВЫХ}}$  режим с  $\rho = 0$ . Кроме того, исследованы взаимосвязи активной мощности  $P$  и угла  $\delta$  в различных режимах энергоблока (рис. 4). На рис. 4 точка  $0(P_0, \delta_0)$  соответствует исходному режиму с незадействованным ОРПМ ( $\Delta U = 0, U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{Г}}$ ).

Рассмотрим режимы  $\rho = 0$  и  $\rho = 180$  град. эл. В этих режимах  $\delta = \delta_0$ , и напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  можно регулировать в наибольшем диапазоне от  $U_{\text{ВЫХ min}}$  до  $U_{\text{ВЫХ max}}$ , получая граничные точки 1 и 2 области изменения активной мощности, выдаваемой энергоблоком. С увеличением  $\rho$  до 90 град. эл. увеличивается диапазон для регулирования  $\delta$  и снижается диапазон изменения напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Наибольшее значение  $\delta$  (точка 3) получается для значения  $\rho = 90$  град. эл. При этом значение  $U_{\text{ВЫХ}}$  изменяется незначительно и будет больше  $U_{\text{Г}}$ . Наименьшее возможное значение  $\delta$  (точка 4) соответствует  $\rho = -90$  град. эл. При этом величина напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  такая же, как для  $\rho = 90$  град. эл. Получаем, что значения мощности  $P$  будут ограничены кривой 4–1–3. С увеличением  $\rho$  больше 90 град. эл. растет и диапазон возможных значений  $U_{\text{ВЫХ}}$ , однако, в этом случае  $U_{\text{ВЫХ}}$  будет меньше  $U_{\text{Г}}$  и, следовательно, величина выдаваемой мощности в этом случае снижается. Чем ближе  $\rho$  к 180 град. эл., тем сильнее можно снизить мощность. Таким образом, получаем кривые 3–2 и 2–4. Аналогичным образом получаем кривые 2–4 и 4–1. В итоге формируем область 1–2–3–4 возможных значений активной мощности и углов  $\delta$ . Приведенные зависимости позволяют выявить необходимые значения  $\rho$  и  $\Delta U$  для ОРПМ, применяемого совместно с СГ с нерегулируемой системой возбуждения.

Сформировав диапазон возможных значений  $\rho$  и  $\Delta U$ , перейдем к определению параметров основного оборудования, и, прежде всего, параметров транс-

## Электроэнергетика

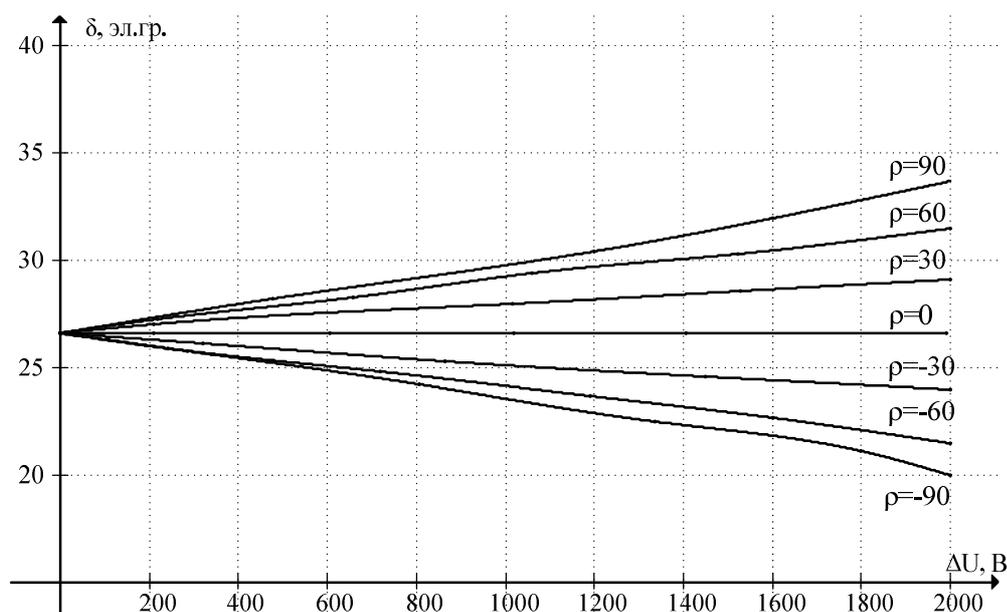
форматоров и преобразователей ОРПМ. Сначала найдем мощность трансформаторов Т1 и Т2 и преобразователей ПН1 и ПН2. Значения активной мощности для трансформаторов (и преобразователей) одинаковы, и определяются на основе данных [1, 7, 8] как

$$P_{ПН1} = \frac{\Delta U U_{\text{ВЫХ}} \sin(\delta - \delta_0 + \rho)}{X_{Т1}},$$

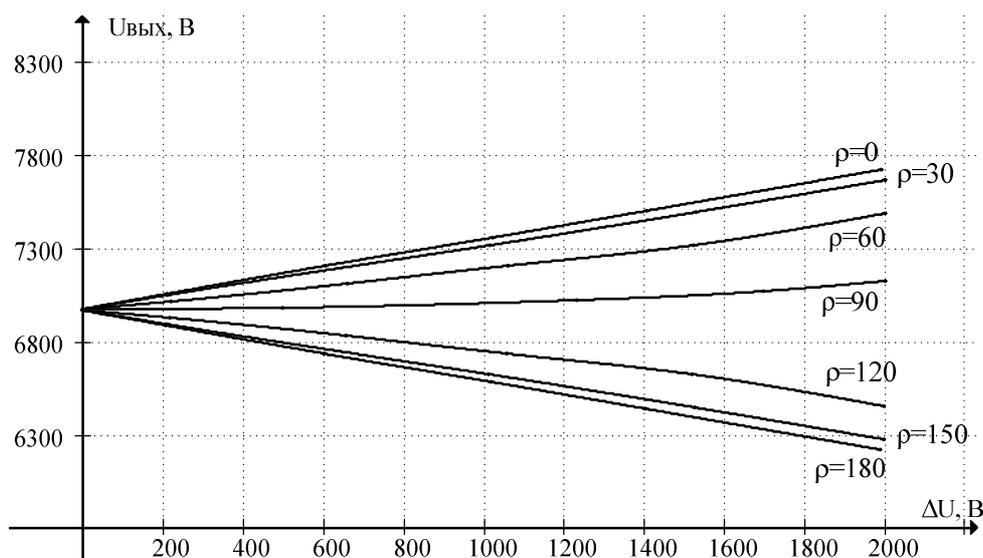
где  $X_{Т1}$  – индуктивное сопротивление последовательной обмотки трансформатора Т1;  $\delta_0$  – угол между вектором напряжения на шинах системы бесконечной мощности и вектором напряжения на выводах статора генератора.

Составляющая реактивной мощности Т2, определяющая в основном и его полную мощность и токи фаз преобразователя ПН2, зависит от нормируемого диапазона генерируемой или потребляемой энергоблоком реактивной мощности, который, в свою очередь, определяется режимами энергосистемы. Величина реактивной мощности трансформатора Т1 и генерируемая преобразователем ПН1 находится как [7–9]

$$Q_{ПН1} = \frac{\Delta U U_{\text{ВЫХ}} \cos(\delta - \delta_0 + \rho)}{X_{Т1}} - \frac{\Delta U^2}{X_{Т1}}.$$



а)



б)

Рис. 3. Семейство характеристик для разных значений  $\rho$ :  
а –  $\delta(\Delta U)$ ; б –  $U_{\text{ВЫХ}}(\Delta U)$

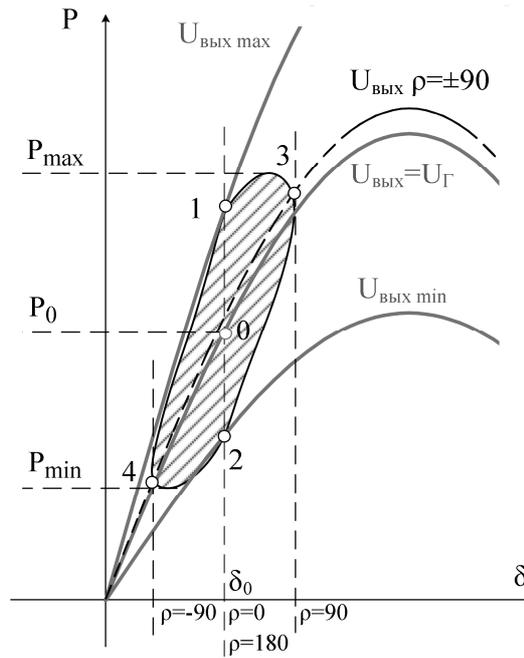


Рис. 4. Область возможных значений активной мощности  $P$ , выдаваемой энергоблоком, и соответствующих углов  $\delta$  между векторами напряжений  $U_{\text{вых}}$  энергоблока и  $U_C$  системы

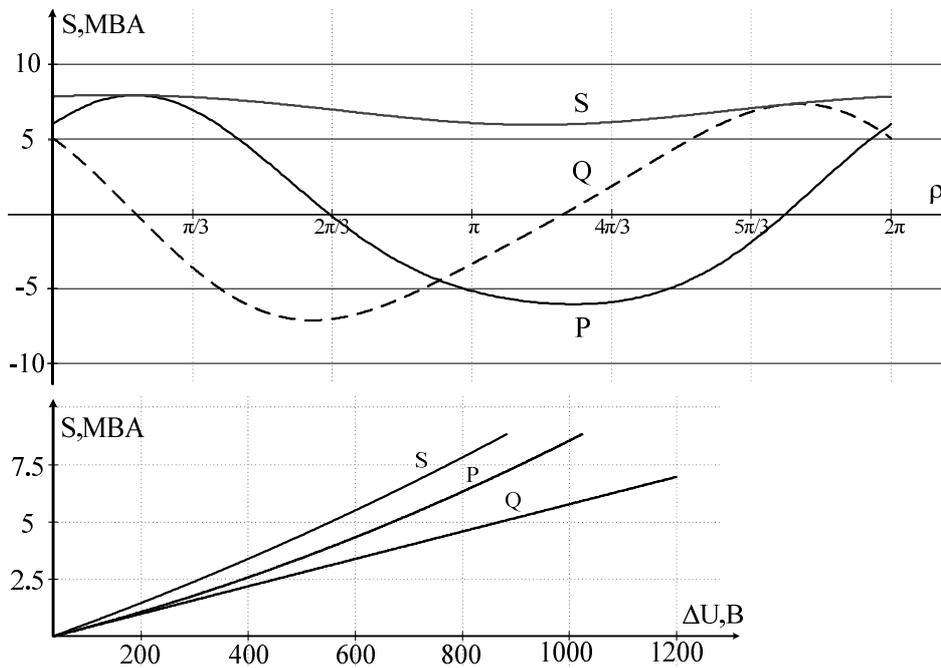


Рис. 5. Зависимости активной, реактивной и полной мощностей, протекающих через Т1 (ПН1), от значений  $\rho$  и  $\Delta U$

Используя приведенные выше выражения, построим зависимости  $P_{\text{ПН1}}(\rho)$ ,  $Q_{\text{ПН1}}(\rho)$  и  $P_{\text{ПН1}}(\Delta U)$ ,  $Q_{\text{ПН1}}(\Delta U)$ , которые позволяют определить значение полной мощности этих устройств, исходя из нормируемого диапазона значений  $\rho$  и  $\Delta U$  (рис. 5).

**Выводы**

В среде MATLAB Simulink исследована работа энергоблока, включающего СГ с нерегулируемым возбуждением и ОРПМ, в различных режимах энергосистемы. Определены взаимосвязи номинальных параметров основного оборудования энергоблока, а также параметров режима его эле-

ментов и нормируемого диапазона изменения режимов энергосистемы.

### Литература

1. Гольдштейн, М.Е. Тиристорное устройство гашения поля синхронного генератора с системой самовозбуждения / М.Е. Гольдштейн, А.В. Прокудин // *Электротехника*. – 2013. – № 10. – С. 21–27.

2. Гаврилов, А.И. Функциональные свойства электротехнического комплекса «синхронный генератор – объединенный регулятор потоков мощности» / А.И. Гаврилов, И.С. Егоров // *Научные труды 4-й международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи»*. – Новочеркасск, 2013. – Т. 1. – С. 313–316.

3. Егоров, И.С. Взаимосвязь параметров режима элементов блока синхронный генератор – объединенный регулятор потоков мощности / И.С. Егоров, М.Е. Гольдштейн // *Научные труды 5-й международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи»*. – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 227–231.

4. Егоров, И.С. Регулирование напряжения энергоблока синхронный генератор – объединенный регулятор потока мощности / И.С. Егоров, М.Е. Гольдштейн // *Электротехника: сетевой*

*электронный научный журнал*. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 59–61.

5. Герасимов, А. Дизель-генераторные электростанции. Работа при переменной частоте вращения дизеля / А. Герасимов, В. Толмачев, К. Уткин // *Новости Электротехники*. – 2005. – № 4 (34). – <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/34/13.php>

6. Гаврилов, А.И. Особенности присоединения малой генерации к электрическим сетям на основе элементов силовой электроники / А.И. Гаврилов, М.Е. Гольдштейн // *Научные труды 5-й международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи»*. – Томск, 2014. – Т. 2. – С. 514–517.

7. Рыжов, Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учеб. для вузов / Ю.П. Рыжов. – М: Издат. дом МЭИ, 2007. – 488 с.

8. Hingorani, Narain G. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems* / Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. – New York: IEEE Press, 2000. – 432 p. DOI: 10.1109/9780470546802

9. Xiao-Ping Zhang. *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control* / Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 383 p. DOI: 10.1007/978-3-642-28241-6

**Егоров Иван Сергеевич**, аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [egorovis@susu.ac.ru](mailto:egorovis@susu.ac.ru).

**Гольдштейн Михаил Ефимович**, канд. техн. наук., профессор, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [goldshsteinme@susu.ac.ru](mailto:goldshsteinme@susu.ac.ru).

*Поступила в редакцию 29 апреля 2015 г.*

DOI: 10.14529/power150404

## PARAMETERS OF THE ELEMENTS OF POWER UNIT, THAT CONTAINS A SYNCHRONOUS GENERATOR WITH FIXED EXCITATION AND UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER

**I.S. Egorov**, [egorovis@susu.ac.ru](mailto:egorovis@susu.ac.ru),

**M.E. Goldshstein**, [goldshsteinme@susu.ac.ru](mailto:goldshsteinme@susu.ac.ru)

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

Using the software package MATLAB Simulink the simulation model “synchronous generator with fixed excitation – unified power flow controller – the external network of infinite power” has been developed. According to the results of research work, was obtained the power flow in the power unit that contains a synchronous generator with fixed excitation and unified power flow controller (UPFC). On the basis of the data

obtained to construct the region of possible values of active power delivered power unit and the corresponding angles between the vectors of power unit voltage and voltage of the system. The methods of determining the parameters of the main equipment of the reporting unit was shown. Has been obtained the dependence of these parameters of main equipment of the unified power flow controller, as well as the mode parameters of its elements and the rated range of variation of the power system conditions. The results of the research can be applied in determining the appropriateness of the considered unit.

*Keywords:* power flow, synchronous generator, unified power flow controller.

### References

1. Goldstein M.E., Prokudin A.V. [Thyristor Quenching Field Synchronous Generator with a System of Self-Excitation]. *Russian Electric Engineering*, 2013, no. 10, pp. 21–27 (in Russ.)
2. Gavrilov A.I., Egorov I.S., [Functional Properties of Electro-Technical Complex “Synchronous Generator – Unified Power Flow Controller”]. *Nauchnye trudy 4-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Elektroenergetika glazami molodezhi”* [Proceedings of the 4th Between International Scientific Conference “Power Eyes of Youth”]. Novocherkassk, 2013, pp. 313–316. (in Russ.)
3. Egorov I.S., Goldstein M.E. [Interconnection Regime Parameters Block Elements Synchronous Generator – Unified Power Flow Controller]. *Nauchnye trudy 5-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Elektroenergetika glazami molodezhi”* [Proceedings of the 5th International Scientific Conference “Power Eyes of Youth”], Vol. 1. Tomsk, 2014, pp. 227–231. (in Russ.)
4. Egorov I.S., Goldstein M.E. [Voltage Regulation of the Power unit: Synchronous Generator – Unified Power Flow Controller]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 59–61. (in Russ.)
5. Gerasimov A., Tolmachev V., Utkin K. [Diesel Generator-of Elektrostal. Operation at a Variable Speed Diesel Engine]. *Electrical News*, no. 4 (34). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/34/13.php> (in Russ.)
6. Gavrilov A.I., Goldstein M.E. [Features Connection of Small Generation to Electric Networks on the Basis of the Elements of Power Electronics]. *Nauchnye trudy 5-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Elektroenergetika glazami molodezhi”* [Proceedings of the 5th International Scientific Conference “Power Eyes of Youth”], Vol. 2. Tomsk, 2014, pp. 514–517. (in Russ.)
7. Ryzhov Y.P. *Dal'nie elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya* [Long EHV Power]. Moscow, MPEI Publ., 2007. 488 p.
8. Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York: IEEE Press, 2000. 432 p. DOI: 10.1109/9780470546802
9. Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal. *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2006. 383 p. DOI: 10.1007/978-3-642-28241-6

Received 29 April 2015

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Егоров, И.С. Параметры элементов энергоблока, включающего синхронный генератор с нерегулируемым возбуждением и объединенный регулятор потоков мощности / И.С. Егоров, М.Е. Гольдштейн // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 26–31. DOI: 10.14529/power150404

### FOR CITATION

Egorov I.S., Goldshtein M.E. Parameters of the Elements of Power Unit, that Contains a Synchronous Generator with Fixed Excitation and Unified Power Flow Controller. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 26–31. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150404