

## РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ БЛОКА «СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР – ОБЪЕДИНЕННЫЙ РЕГУЛЯТОР ПОТОКА МОЩНОСТИ»

*И.С. Егоров, М.Е. Гольдштейн*

Рассмотрен альтернативный способ регулирования напряжения и реактивной мощности энергоблоков электростанции, основанный на применении объединенного регулятора потоков мощности (ОРПМ) в качестве элемента связи синхронного генератора с нагрузкой. Такой способ позволяет упростить систему возбуждения синхронного генератора и повысить его надежность. В программном комплексе MATLAB Simulink рассмотрены возможности управления таким блоком в нормальных режимах. При этом синхронный генератор принят с нерегулируемым током возбуждения, а блок работает на активно-индуктивную нагрузку. Исследованы особенности регулирования напряжения на выводах блока посредством ОРПМ при неизменном режиме работы генератора. Приведены векторные диаграммы для исходного режима при отключенном ОРПМ, а также и при введенном в работу ОРПМ при вариациях режима блока. Изменение напряжения блока осуществляется путем регулирования амплитуды входного сигнала блока ШИМ системы управления последовательным преобразователем. По результатам экспериментов в программном комплексе построено семейство регулировочных характеристик блока, по которым определяется диапазон возможных значений изменения напряжения блока. Приведенные зависимости позволяют определить и необходимые значения параметров ОРПМ, применяемого совместно с синхронным генератором с нерегулируемой системой возбуждения и являющегося основным средством регулирования напряжения на нагрузке.

*Ключевые слова:* моделирование в MATLAB, объединенный регулятор потоков мощности, синхронный генератор.

В современных условиях развития электроэнергетики России при высоком уровне износа и недостаточно высоких темпах модернизации оборудования важной является задача повышения надежности и экономичности работы синхронных генераторов и электростанций в целом. Самой дорогостоящей и в то время самой ненадежной системой синхронного генератора является его система возбуждения. Поэтому актуальным является поиск альтернативных способов регулирования напряжения и реактивной мощности электростанции. Одним из решений этой задачи является известный способ подключения синхронного генератора к энергосистеме через вставку постоянного тока на базе преобразователей напряжения [1]. Другим техническим решением, направленным на упрощение системы возбуждения синхронного генератора и повышение его надежности, может быть применение ОРПМ совместно с синхронным генератором с нерегулируемой системой возбуждения [2, 3]. ОРПМ подключается непосредственно к выводам статора синхронного генератора (рис. 1, а) и выполняет функции регулирования напряжения и создания или потребления реактивной мощности блока. Аналогичные функции ОРПМ успешно реализуются на подстанциях энергосистем [4–8].

Рассмотрим возможности такого блока СГ – ОРПМ, при этом синхронный генератор с нерегулируемым током возбуждения, и блок работает на активно-индуктивную нагрузку (см. рис. 1, а).

Векторная диаграмма для исходного режима при отключенном ОРПМ ( $\Delta U = 0$ ,  $I_{\text{ПН}2} = 0$ ) приведена на рис. 1, б. Здесь  $x$  – индуктивное сопротивление статорной обмотки генератора (активными потерями в генераторе пренебрегаем);  $E$  – ЭДС генератора, которая является величиной неизменной, так как рассматривается генератор с нерегулируемой системой возбуждения. Предположим, что нагрузка блока выросла. При этом ток увеличивается от значения  $I_1$  до  $I_2$ . В результате напряжение на нагрузке  $U_{\text{Н}1}$  уменьшается до значения  $U_{\text{Н}2}$  (см. рис. 1, б). С целью поддержания постоянной величины напряжения на нагрузке с помощью ОРПМ вводится напряжение  $\Delta U$  (рис. 1, в). ОРПМ может генерировать реактивную мощность с помощью преобразователя ПН2, работающего в режиме СТАТКОМ, и этим частично или полностью покрывать реактивную нагрузку блока. Он вместе с преобразователем ПН1 также входит в контур циркуляции регулируемой части активной мощности блока [2, 4, 7]. Напряжение  $\Delta U$  можно регулировать как по величине, так и по фазе. Необходимое значение  $\Delta U$  определяется из соотношения, полученного из векторной диаграммы:

$$\dot{E} = \dot{U}_{\text{Н}} + \dot{I}_{\Gamma}x + \Delta\dot{U},$$

следовательно:

$$\Delta\dot{U} = \dot{U}_{\text{Н}} + \dot{I}_{\Gamma}x - \dot{E},$$

с учетом работы ПН2, получаем:

$$\Delta\dot{U} = \dot{U}_{\text{Н}} + (\dot{I}_{\text{Н}} - \dot{I}_{\text{ПН}2})x - \dot{E}.$$

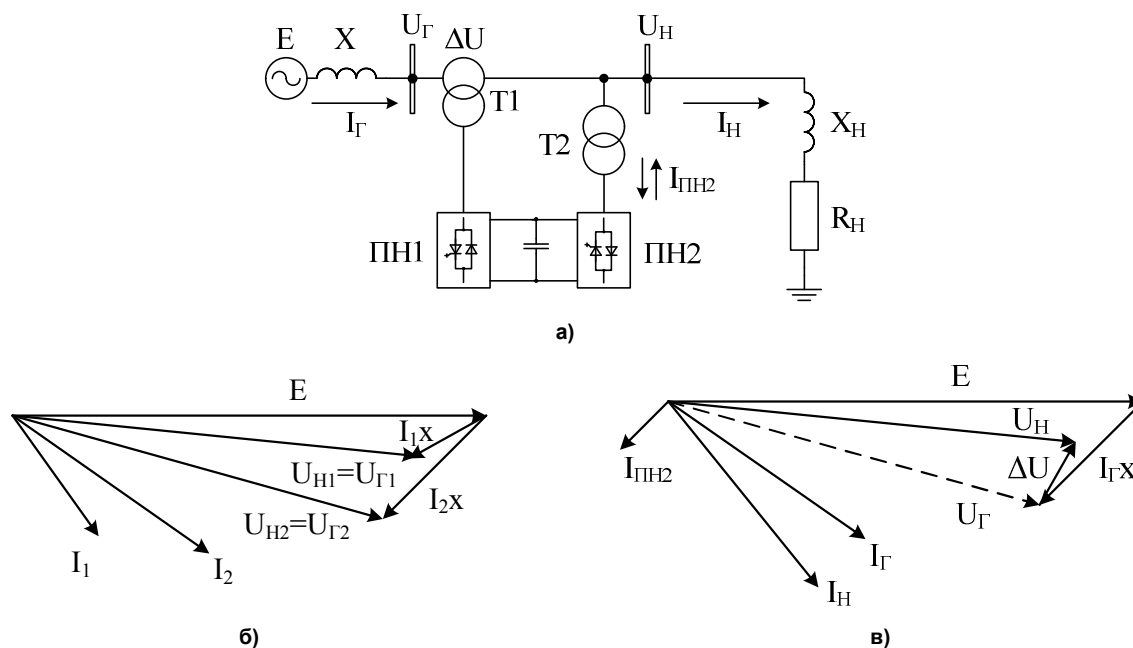


Рис. 1. Схема энергоблока (а), векторная диаграмма при увеличении нагрузки без регулирования (б) и с регулированием напряжения посредством ОРПМ (в)

Работоспособность блока проверена на модели, построенной в MATLAB Simulink (рис. 2, а). Изменение напряжения преобразователей напряжения осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [1, 4, 7].

ШИМ позволяет управлять средним значением напряжения на выходе преобразователя путём изменения скважности импульсов, управляющих GTO-тиристором или IGBT-транзистором. Регулировка напряжения, подаваемого ПН1 на последовательный трансформатор, осуществляется путем изменения амплитуды и фазы входного сигнала блока ШИМ. Регулировочная характеристика для ПН1, представляющая зависимость величины выходного напряжения от амплитуды входного сигнала, приведена на рис. 2, б.

Из рис. 2, б видно, что преобразователь ПН1 является линейным звеном в диапазоне изменения коэффициента модуляции  $0 < Km < 1$ . При  $Km > 1$  регулировочная характеристика становится нелинейной. Коэффициент модуляции характеризует амплитуду входного сигнала ШИМ, пропорционального напряжению на выводах статора генератора. По регулировочной характеристике определяется диапазон возможных значений амплитуды  $\Delta U$ . Таким образом, увеличение напряжения на нагрузке осуществляется путем увеличения амплитуды входного сигнала блока ШИМ системы управления преобразователем ПН1. Однако возможен случай, когда потребуются не увеличение, а снижение напряжения до значений меньших, чем напряжение генератора. В этом случае следует изменить фазу входного сигнала блока ШИМ, чтобы в результате вектор выходного напряжения ПН1 стал противоположно направленным вектору

напряжения статора генератора. Тогда результирующий вектор, т. е. вектор напряжения на нагрузке, уменьшится [3, 7].

Приняв фазу вектора ЭДС равной нулю, из векторной диаграммы (рис. 3) определим необходимые значения амплитуды и фазы вектора  $\Delta U$ . Здесь  $\delta_H$  – фаза вектора напряжения на нагрузке;  $\rho$  – фаза вектора  $\Delta U$ ;  $\varphi$  – угол сдвига между током и ЭДС генератора. Из диаграммы (см. рис. 3) получаем систему уравнений, решение которой позволяет определить величину и фазу вектора  $\Delta U$ :

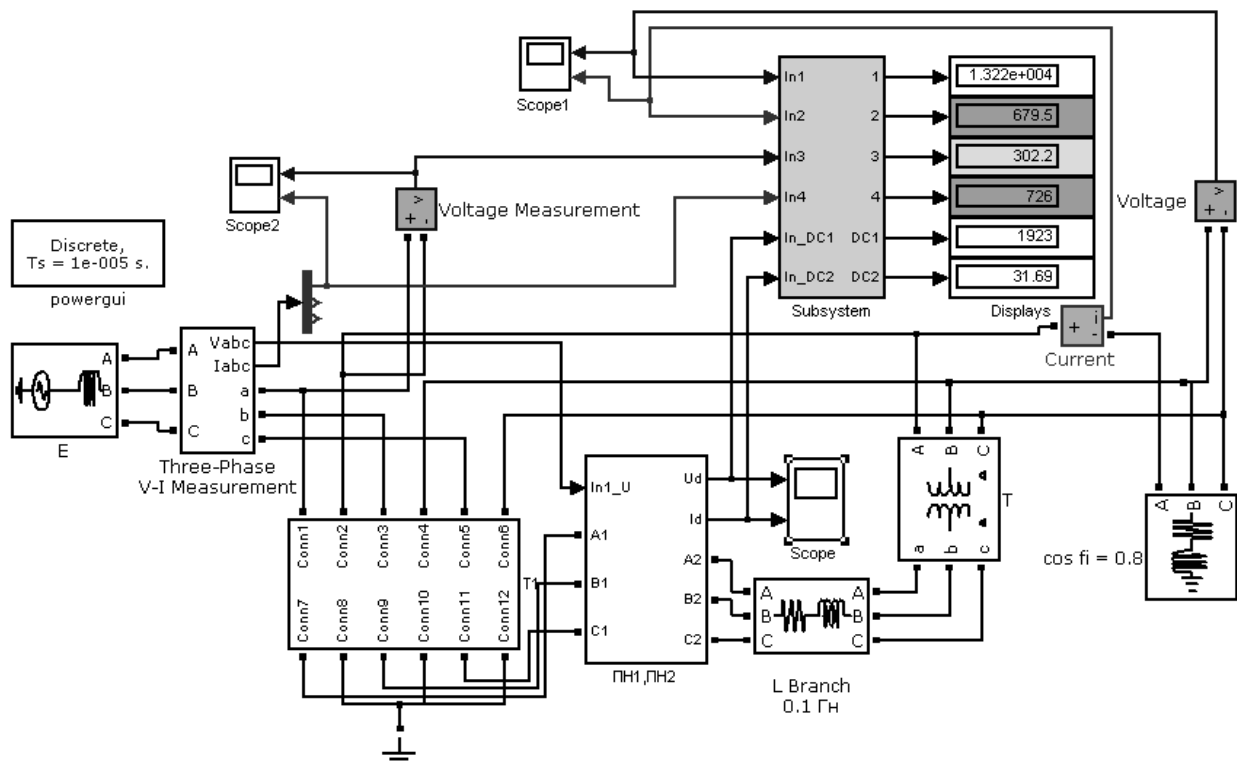
$$\begin{cases} \Delta U \cos \rho = U_H \cos \delta_H - E + Ix \sin \varphi; \\ \Delta U \sin \rho = Ix \cos \varphi - U_H \sin \delta_H; \end{cases}$$

$$\rho = \arctg \left( \frac{Ix \cos \varphi - U_H \sin \delta_H}{U_H \cos \delta_H - E + Ix \sin \varphi} \right);$$

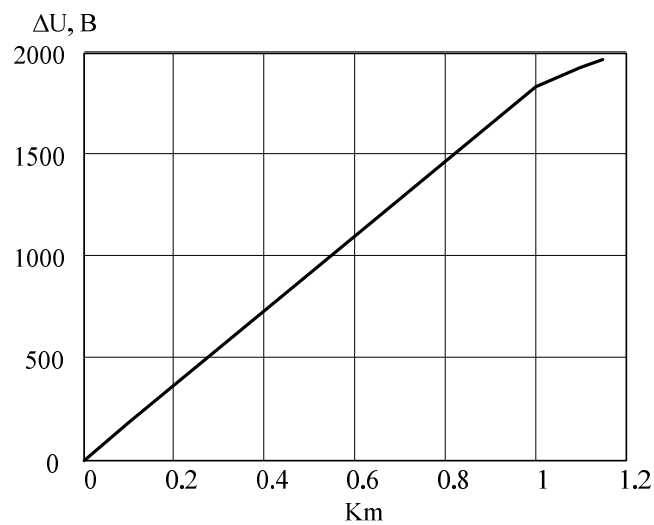
$$\Delta U = \frac{Ix \cos \varphi - U_H \sin \delta_H}{\sin \rho}.$$

Значения  $E$  и  $x$  зависят от параметров и режима работы генератора,  $I$  и  $\varphi$  определяются нагрузкой. На рис. 4 приведено семейство характеристик  $\rho(I)$  и  $\Delta U(I)$  при различных значениях  $\varphi$  при  $U_H = E$  и  $\delta_H = 5$  эл. град., из которого следует, что с увеличением нагрузки требуется большее значение  $\Delta U$  (рис. 4, б) для поддержания нормируемого напряжения на нагрузке, и, как следствие, потребуются ОРПМ большей мощности. Для режима  $U_H = E$  и  $\delta_H = 0$  эл. град., т. е. режима компенсации реактивного сопротивления генератора, будут следующие значения  $\Delta U = Ix$  и  $\rho = 90 - \varphi$ , для других значений  $U_H$  и  $\delta_H$  строятся свои характеристики  $\rho(I)$  и  $\Delta U(I)$ .

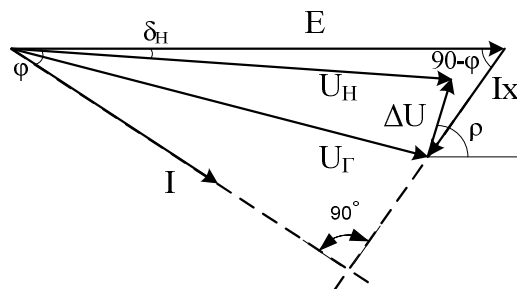
Приведенные зависимости позволяют определить необходимые значения параметров ОРПМ, применяемого совместно с синхронным генератором

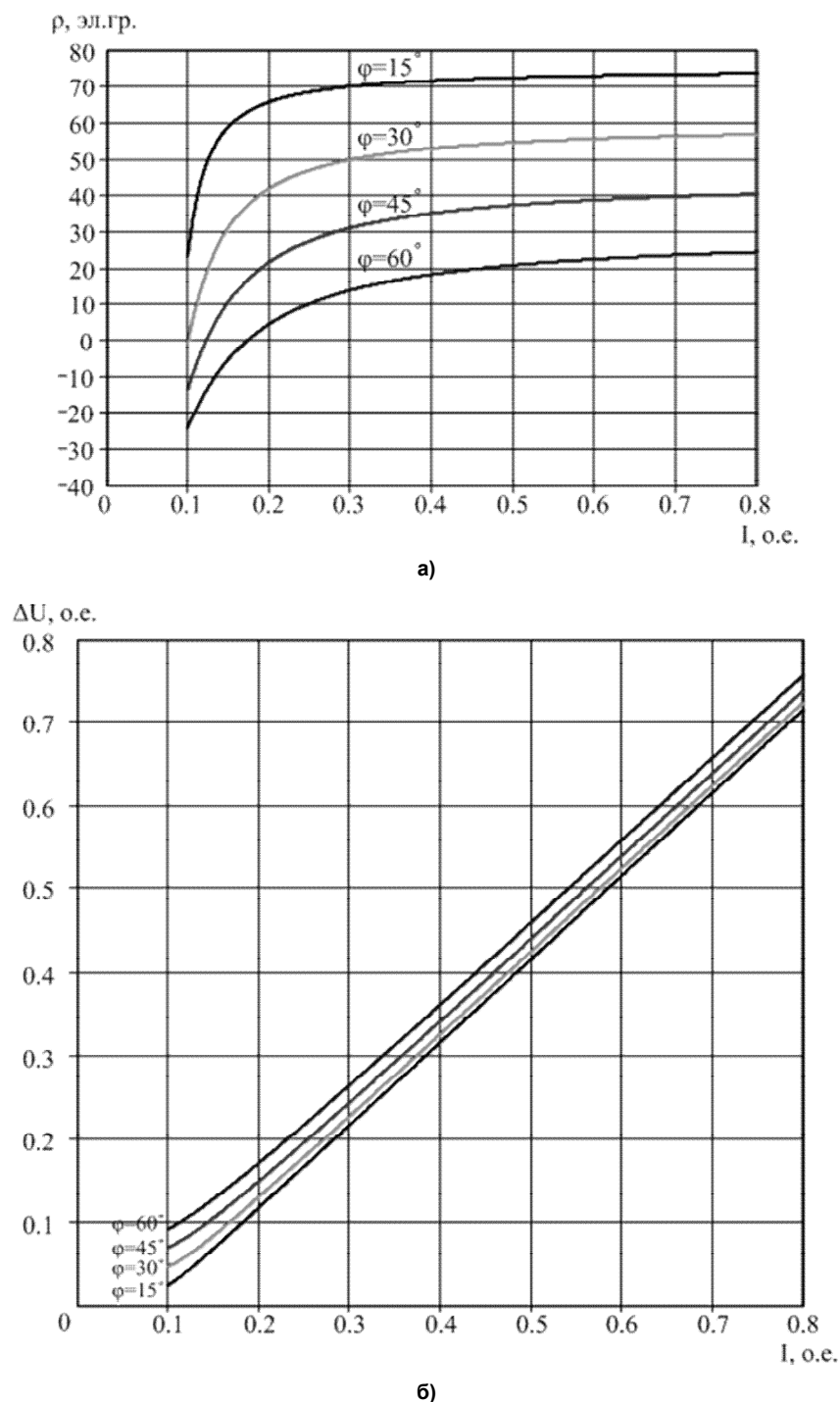


а)



б)

Рис. 2. Модель блока (в MATLAB Simulink) синхронный генератор – ОРПМ (а)  
и регулировочная характеристика преобразователя напряжения ПН1 (б)Рис. 3. Векторная диаграмма к определению амплитуды и фазы вектора  $\Delta U$



**Рис. 4. Зависимости фазы (а) и амплитуды (б) напряжения  $\Delta U$  от величины и характера нагрузки, для  $U_H = E$  и  $\delta_H = 5$  эл. гр.**

с нерегулируемой системой возбуждения и являющегося основным средством регулирования напряжения на нагрузке. Проведенный модельный эксперимент в комплексе MATLAB Simulink доказывает работоспособность схемы «Синхронный генератор – ОРПМ – нагрузка».

## Литература

1. Гольдиштейн, М.Е. Универсальная математическая модель системы с вентильными асин-

хронными связями / М.Е.Гольдиштейн, К.Ю.Филяев // *Электричество*. – 2008. – № 6. – С. 12–18.

2. Егоров, И.С. Применение элементов гибкого регулирования режимов в схемах выдачи мощности электростанций / И.С. Егоров // *Труды XIII Международной молодежной научной конференции «Интеллект и наука», г. Железногорск, 16–18 апреля 2013 г.* – Красноярск, 2013. – С. 156–158.

3. Егоров, И.С. Объединенный регулятор по-

тока мощности, как элемент связи синхронного генератора с энергосистемой / И.С. Егоров, М.Е. Гольдштейн // Наука ЮУрГУ: материалы 65-й науч. конф. Секции техн. наук: в 2 т. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ. – 2013. – Т. 2. – С. 265–268.

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

5. Гаврилов, А.И. О регулировании режимных параметров подстанций с объединенным регулятором потока мощности / А.И. Гаврилов, И.С. Егоров // Научные труды 3-й международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». – Екатеринбург, 2012. – Т. 1. – С. 481–483.

6. Егоров, И.С. Средства регулирования режимов электрических сетей на базе силовой электроники / И.С. Егоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18, № 37 (296). – С. 135–137.

7. 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.

8. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

**Егоров Иван Сергеевич**, аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; susu-meg@mail.ru.

**Гольдштейн Михаил Ефимович**, канд. техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; susu-meg@mail.ru.

Поступила в редакцию 6 марта 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University  
Series “Power Engineering”  
2014, vol. 14, no. 3, pp. 19–24**

## **VOLTAGE REGULATION OF UNIT “SYNCHRONOUS GENERATOR – COMBINED POWER FLOW REGULATOR”**

**I.S. Egorov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, susu-meg@mail.ru,

**M.E. Goldshteyn**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, susu-meg@mail.ru

The paper considers alternative technique for regulation of voltage and reactive power of electrical power plant unit; the technique is based on using of combined power flow regulator (CPFR) as coupler of synchronous generator with load. This technique allows of simplifying excitation system of synchronous generator and enhancing reliability of the latter. Software suite MATLAB Simulink is used for analyzing potential of control of such unit in normal modes. At that, synchronous generator is taken with unregulated excitation current, and unit works for active-inductive load. We studied specifics of voltage regulation at unit terminals with CPFR at constant operation mode of generator. The paper presents vector diagrams for initial mode at deactivated CPFR, and as well at activated CPFR at variations of unit mode. Change in unit voltage is achieved with regulation of input amplitude of control system PWM unit by series converter. Results of experiment in software suite were used for construction of set of unit regulation characteristics identifying the range of possible changes in unit voltage. Presented dependences allow of finding necessary parameter values of CPFR that is used in combination with synchronous generator with unregulated excitation system, and is the main means of voltage regulation at load.

*Keywords: modeling in MATLAB, unified power flow controller, synchronous generator, adjusting characteristic.*

### **References**

1. Goldshteyn M.E., Filyaev K. Yu. [Universal Mathematical Model of the System with the Valve Asynchronous Communication]. *Electrical Technology Russia*, 2008, no. 6, pp. 12–18. (in Russ.)

2. Egorov I.S. [The Use of Elements of the Flexible Regulatory Regimes in the Scheme of Power Plants]. *Trudy XIII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii "Intellect i nauka"* [Proceedings of XIII International Youth Scientific Conference "Intelligence and Science"]. Zheleznogorsk, 2013, pp.156–158. (in Russ.)
3. Egorov I.S., Goldstein M.E. [The Combined Flow Regulator Powerfully-Sti, as an Element of Communication of the Synchronous Generator to the Power Grid]. *Nauka YuUrGU: materialy 65-y nauchnoy konferentsii. Sektsii tekhnicheskikh nauk* [Materials of the 65th Scientific Conference. Section of Technical Sciences in 2 Vol.]. Chelyabinsk, South Ural State University, 2013, vol. 2. pp. 265–268. (in Russ.)
4. Ryzhov Yu.P. *Dal'nie elektropredachi sverkhvysokogo napryazheniya: uchebnik dlya vuzov* [Long-Distance Transmission of EHV]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publ., 2007. 488 p.
5. Gavrilov A.I., Egorov I.S. [On the Regulation Regime Parameters Substations with a Combined Flow Regulator Power] *Nauchnye trudy 3-ey mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektroenergetika glazami molodezhi"* [Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference "Electric Eyes of Youth"]. Ekaterinburg, 2012, vol. 1, pp. 481–483. (in Russ.)
6. Egorov I.S. [Means for Controlling the Modes of Electrical Networks Based on Power Electronics]. *Bulletin of the South Ural State University, Ser. Power Engineering*, 2012, iss. 18, no. 37 (296), pp.135–137. (in Russ.)
7. Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York, IEEE Press, 2000. 432 p.
8. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of Electrical Devices in MATLAB SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2007. 288 p.

**Received 6 March 2014**