

ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГБЛОКОВ «СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР – ОРПМ» ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЯ В СХЕМАХ ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

М.Е. Гольдштейн¹, И.С. Егоров²

¹Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск,

²АО «Концерн Росэнергоатом» филиал «Белооярская АЭС», г. Заречный

Основным способом регулирования напряжения и реактивной мощности электростанций является изменение тока возбуждения их синхронных генераторов (СГ). При этом требуются сложные системы возбуждения, способные обеспечить необходимую глубину регулирования. Кроме того, быстродействие такого регулирования сдерживается большой постоянной времени контура возбуждения. Одним из альтернативных способов регулирования является применение энергоблоков, включающих синхронные генераторы с нерегулируемой системой возбуждения и объединенные регуляторы потоков мощности (ОРПМ). В программном комплексе MATLAB Simulink создана имитационная модель, с помощью которой проведен анализ быстродействия регулирования режимных параметров таких энергоблоков, проведено сравнение с регулированием тиристорными системами возбуждения. Также проведен опыт для реальных изменений величин напряжения при коротком замыкании в схеме соответствующей реальной. Показано, что энергоблоки «Синхронный генератор – ОРПМ» позволяют реализовать регулирование величины напряжения с высоким быстродействием, что позволяет существенно увеличить гибкость и адаптивность управления режимными параметрами в схемах выдачи мощности электростанций.

Ключевые слова: моделирование, объединенный регулятор потоков мощности, синхронный генератор, регулирование напряжения.

Введение

Обычно регулирование напряжения и реактивной мощности электростанций выполняется путем изменения тока возбуждения синхронных генераторов. При этом применяются тиристорные системы возбуждения, стоимость которых существенна, а надежность ниже, чем у других систем генератора. Быстродействие такого регулирования ограничено, так как сдерживается большой постоянной времени контура возбуждения. Ранее для регулирования напряжения и реактивной мощности электростанции была показана возможность применения энергоблоков, выполненных по схеме «Синхронный генератор (СГ) с нерегулируемым возбуждением – объединенный регулятор потоков мощности (ОРПМ)» [1, 2]. Результаты исследований [1, 3, 4] подтвердили, что такие блоки обладают большим спектром функциональных возможностей и позволяют отказаться от управляемых систем возбуждения СГ, передав функции регулирования блока входящему в его состав ОРПМ, а также увеличить глубину и быстродействие регулирования по сравнению с традиционными способами. Кроме того, появляется возможность раздельного регулирования активной, реактивной мощности и напряжения генератора [4]. Поэтому анализ быстродействия регулирования режимных параметров таких энергоблоков является важным этапом определения перспектив их применения. Анализ проводится методом математического

моделирования. В качестве инструмента моделирования используется программный комплекс MATLAB Simulink. Параметры элементов схем замещения рассматриваемой модели соответствуют параметрам оборудования, применяемого на электростанциях.

Схема комплекса «СГ с нерегулируемым возбуждением – ОРПМ – энергосистема»

Рассмотрим работу энергоблока «СГ – ОРПМ» в энергосистеме (рис. 1). Выдача мощности блока выполнена посредством двух параллельных линий с промежуточным отбором мощности P_1, Q_1 и P_2, Q_2 . Регулирование напряжения блока осуществляется вводом с помощью трансформатора Т1 добавочного напряжения ΔU , фаза которого ρ по отношению к фазе напряжения СГ может изменяться от 0 до 360 эл. град. Амплитуда этого напряжения ограничивается параметрами трансформатора Т1 и преобразователя ПН1. В результате выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ блока является векторной суммой двух напряжений: напряжения на выводах статора СГ – U_{Γ} и напряжения ΔU последовательной обмотки трансформатора Т1. Получаемая таким образом область регулирования $U_{\text{вых}}$ ограничена окружностью, показанной на векторной диаграмме (рис. 2). Преобразователь ПН2, связанный с шинами электростанции через трансформатор Т2, обеспечивает генерацию или потребление реактивной мощности (в зависимости от режима энергосистемы)

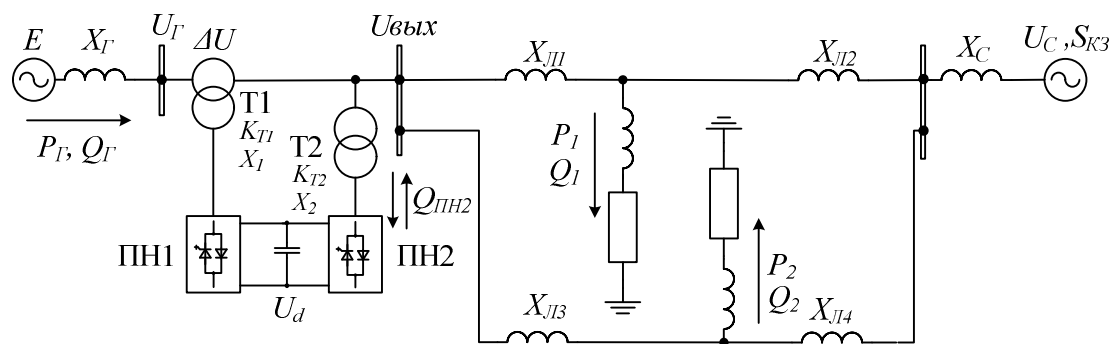


Рис. 1. Схема энергоблока «СГ – ОРПМ», работающего в энергосистеме

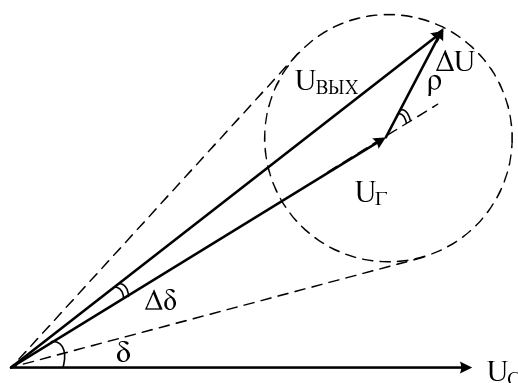


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений энергоблока «СГ – ОРПМ» при его работе на сеть бесконечной мощности для установившихся режимов

в узле подключения блока, а также создает контур для протекания активной мощности между преобразователями ПН1 и ПН2 [2, 5, 6].

Высокое быстродействие регулирования (доли миллисекунд) такого энергоблока обеспечивается запираемыми тиристорами типа GTO, а также IGCT, или транзисторами типа IGBT, на основе которых построены преобразователи ПН1 и ПН2, а также сочетанием быстродействующего импульсно-фазового регулирования угла δ с широтно-импульсной модуляцией вентилей при регулировании величины напряжения ПН1 [1, 2, 5, 6].

Исследование быстродействия регулирования напряжения энергоблоков «СГ – ОРПМ»

В отличие от типовых энергоблоков, в энергоблоках «СГ – ОРПМ» изменяется способ воздействия на выходное напряжение блока. Для оценки быстродействия такого энергоблока рассмотрим изменение его режимных параметров при его работе в энергосистеме (см. рис. 1). Параметры элементов схемы, приведенные к напряжению 15,75 кВ, следующие: генератор $P_{ном} = 220$ МВт, $U_{ном} = 15,75$ кВ выдает только активную мощность, так как в исследуемой схеме его ток возбуждения не регулируется и принят соответствующим выдаче генератором только номинальной активной мощности. ЛЭП $l_{Л1} = l_{Л3} = 30$ км,

$l_{Л2} = l_{Л4} = 45$ км введены только их реактивными сопротивлениями, соответственно $X_{Л1} = X_{Л3} = 12$ Ом и $X_{Л2} = X_{Л4} = 18$ Ом. Промежуточные отборы мощности на ЛЭП: $P_1 = 20$ МВт, $Q_1 = 15$ МВАр, $P_2 = 20$ МВт, $Q_2 = 15$ МВАр. Остальная мощность 180 МВт передается в систему, напряжение которой $U_C = 14$ кВ и мощность короткого замыкания $S_{КЗ} = 500$ МВА.

Для проверки работоспособности модели, созданной в среде MATLAB Simulink, выполнен ряд опытов мгновенного ввода напряжения ΔU , создаваемого ПН1. Одновременно оценивалось и быстродействие изменения напряжения $U_{ВЫХ}$ на выходе блока. В этих опытах СГ выдает активную мощность 40 МВт. Осциллограммы данных опытов приведены на рис. 3. В момент времени 18 с (рис. 3, а) инициируем резкий рост напряжения $U_{ВЫХ}$ до величины, вдвое превышающей значение в предыдущем режиме. При этом угол $\rho = 0$, что обеспечивает наиболее эффективное регулирование напряжения. Как следует из «осциллограмм», требуемый уровень напряжения достигается за один период 0,02 с. Далее задаем следующий алгоритм: после повышения напряжения в момент 18 с снижаем напряжение в момент 19 с и затем на 20-й секунде возвращаемся к исходному состоянию (рис. 3, б). Все вариации напряжения осуществляются изменением величины напряжения ΔU , при этом ЭДС генератора остается неизменной,

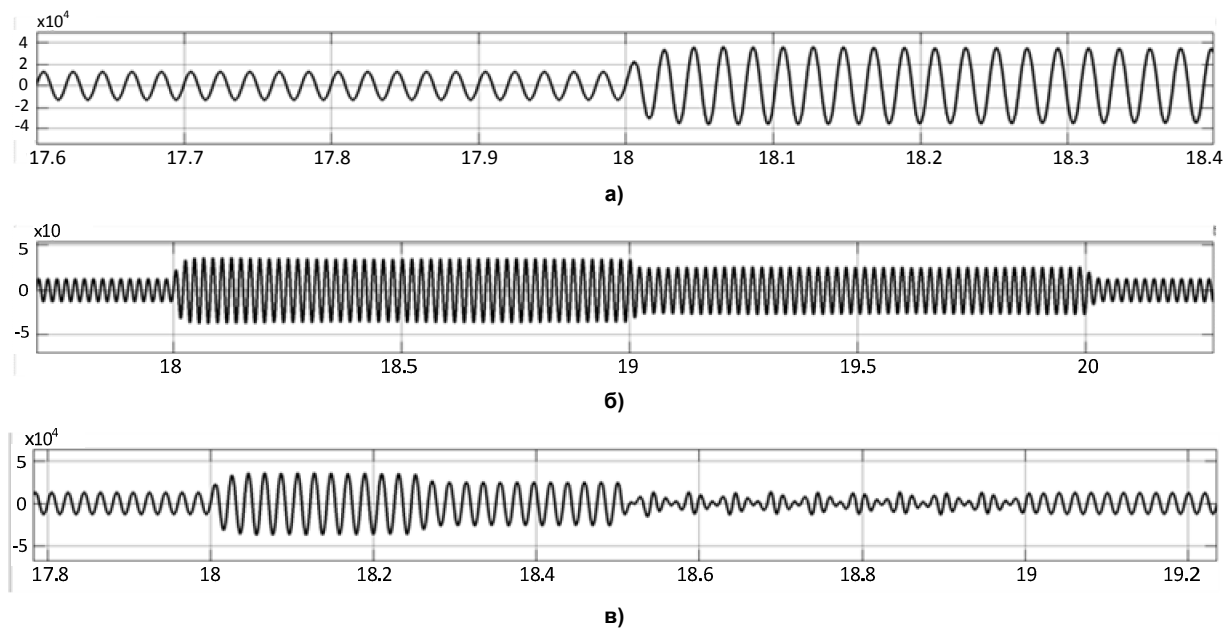


Рис. 3. Временные диаграммы напряжения на выходе энергоблока $U_{\text{вых}}$, полученные в MATLAB Simulink при регулировании с помощью ОРПМ

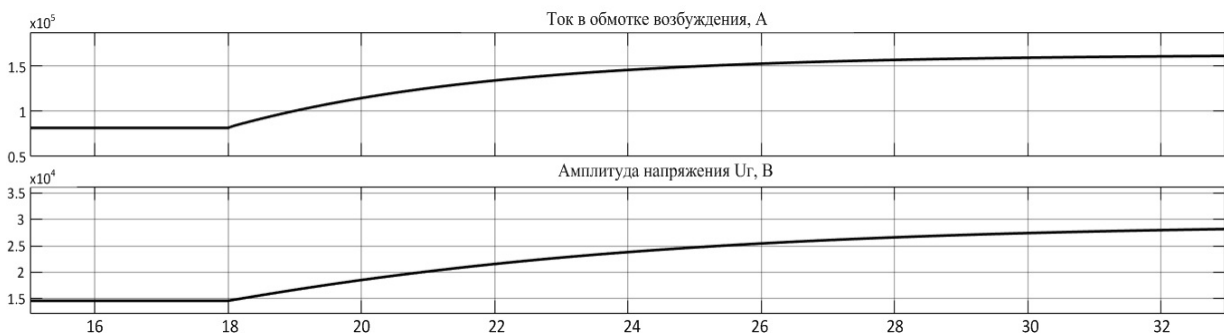


Рис. 4. Временные диаграммы синхронного генератора, полученные в MATLAB Simulink при форсировке напряжения

так как его ток возбуждения не изменяется. Высокое быстродействие при регулировании напряжения позволяет реализовать и более сложные алгоритмы. Так на рис. 3, в показано изменение напряжения: в момент 18 с увеличение напряжения до $2U_{\text{вых}}$, затем в момент 18,25 с снижение до $1,7U_{\text{вых}}$ в 18,25 с и затем в момент 18,5 с дальнейшее понижение до $0,5U_{\text{вых}}$ и возврат к исходному $U_{\text{вых}}$ в момент времени 19 с.

Следует отметить, что глубина регулирования определяется максимально возможными значениями ΔU , которые в свою очередь, как правило, ограничиваются параметрами основного оборудования ОРПМ (преобразователей и трансформаторов). Стоит подчеркнуть, что значение угла ρ будет влиять только на соотношение активной и реактивной мощностей, протекающих через трансформаторы. При этом значение полной мощности изменяться не будет, т. е. диапазон возможных значений ρ не влияет на параметры оборудования и составляет $0 \dots 360$ эл. град. [2], что позволяет

управлять не только величиной, но и фазой выходного напряжения блока.

Следует заметить, что время изменения напряжения блока во всех опытах не превышало 0,02 с, а за одну секунду удалось изменить напряжение четыре раза (рис. 3, в). Это показывает возможность регулирования напряжения блока в режиме реального времени протекания переходных процессов в энергосистеме и позволяет создавать быстродействующие адаптивные системы противоаварийной автоматики.

В энергоблоках на базе СГ с тирсторными системами возбуждения такое быстродействие недостижимо. В традиционных энергоблоках функция регулирования напряжения возложена на систему возбуждения синхронных генераторов. Быстродействие изменения напряжения такой системы, с одной стороны, определяется быстродействием системы возбуждения, которое сегодня при микропроцессорном управлении не превышает 10–20 мс. Но, с другой стороны, в гораздо боль-

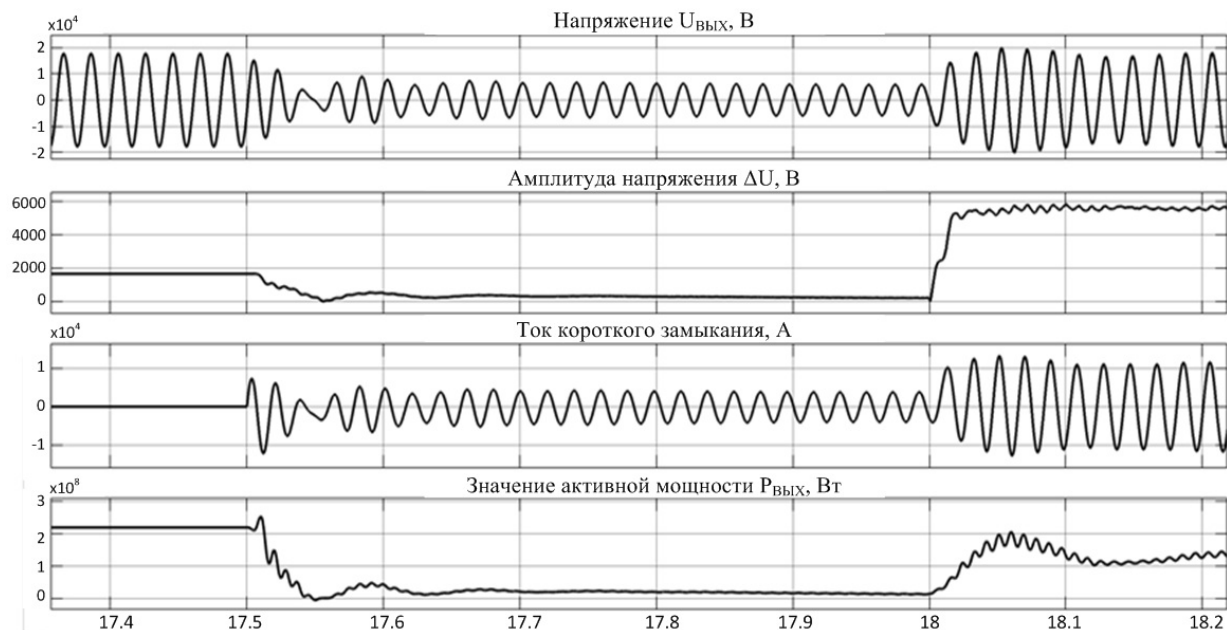


Рис. 5. Осциллограммы для опыта установившегося короткого замыкания, полученные в MATLAB Simulink

шей степени скорость изменения напряжения генератора зависит от постоянной времени его контура возбуждения, которая даже для генераторов большой мощности не ниже нескольких сотен мс (0,5 с для СГ ТГВ-500). Для генераторов меньшей мощности эта постоянная времени может быть и несколько секунд.

Для сравнения на рис. 4 приводятся «осциллограммы» изменения тока возбуждения того же синхронного генератора, для которого приведены предыдущие исследования, при быстродействии системы возбуждения 0,03 с и увеличении напряжения возбуждения в два раза. Постоянная времени его контура возбуждения 0,55 с. Из осциллограммы рис. 4 видно, что время достижения напряжением генератора двойного значения больше постоянной времени контура возбуждения и составляет несколько секунд, что существенно выше, чем для блока «СГ – ОРПМ».

Убедившись в работоспособности модели и высоком быстродействии блока, проведем эксперимент для реальных изменений величин напряжения при коротком замыкании (шунтировании) нагрузки P_1 , Q_1 и последующем форсировании напряжения на выводах блока вводом ΔU с помощью ПН1. Итак, рассмотрим работу схемы (см. рис. 1) при загрузке генератора номинальной мощностью 220 МВт, из которых 180 МВт, потребляемых системой, вводятся сопротивлением на шинах системы $R_C = 1,1$ Ом. В момент времени 17,5 с инициируем трехфазное короткое замыкание в точке подключения нагрузки P_1 , Q_1 , в результате получаем режим установившегося короткого замыкания, при этом происходит существен-

ная просадка выходного напряжения блока и выдаваемой блоком активной мощности (рис. 5). Далее в момент времени 18 с повышаем выходное напряжение блока до значений предаварийного режима путем ввода напряжения ΔU с помощью ОРПМ. На рис. 5 приведены осциллограммы для данного опыта, из которых видно, что удалось получить необходимый уровень напряжения, не смотря на установившееся трехфазное короткое замыкание, при этом также сохраняется высокий уровень быстродействия, как и в предыдущих опытах. Однако заметим, что с повышением ΔU возрастает ток короткого замыкания. Это следует учитывать при определении токов КЗ в сетях с рассматриваемыми энергоблоками.

Выводы

Разработанная в программном комплексе MATLAB Simulink имитационная модель схемы «Синхронный генератор с нерегулируемым возбуждением – объединенный регулятор потоков мощности – энергосистема» позволяет оценить функциональные возможности и быстродействие энергоблока.

Проведенные модельные эксперименты показывают, что энергоблок обладает более высоким уровнем быстродействия и большим диапазоном регулирования, чем СГ с тиристорной системой возбуждения. Это существенно увеличивает гибкость и адаптивность управления режимными параметрами в схемах выдачи мощности электростанций. Применение энергоблока позволяет использовать более дешевые и надежные синхронные генераторы с нерегулируемым возбуждением.

Литература

1. Егоров, И.С. Регулирование напряжения энергоблока синхронный генератор – объединенный регулятор потока мощности / И.С. Егоров, М.Е. Гольдштейн // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14, № 3. – С. 19–24.

2. Пат. 2581650 Российская Федерация, МПК H02P 9/14 H02P 9/30 H02J 3/18. Энергоблок с регулируемыми значениями реактивной мощности, величины и фазы напряжения / И.С. Егоров, А.И. Гаврилов, М. Е. Гольдштейн; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). – № 2015106287/07; заявл. 24.02.2015; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11. – 9 с.

3. Егоров, И.С. Работа энергоблока «Синхронный генератор с нерегулируемым возбуждением – объединенный регулятор потоков мощности» при скачкообразных изменениях режимных параметров во внешней сети / И.С. Егоров, М.Е. Гольдштейн // Научные труды 6-й междуна-

родной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». – Иваново, 2015. – Т. 2. – С. 10–13.

4. Егоров, И.С. Раздельное регулирование напряжения и реактивной мощности в схемах выдачи мощности электростанций с энергоблоками «Синхронный генератор – ОРПМ» / И.С. Егоров, М.Е. Гольдштейн // Научные труды 7-й международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». – Казань, 2016. – Т. 1. – С. 53–56.

5. 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.

6. 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

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

Егоров Иван Сергеевич, инженер, АО «Концерн Росэнергоатом» филиал «Белоярская АЭС», г. Заречный; egoroff89@mail.ru.

Поступила в редакцию 7 ноября 2016 г.

DOI: 10.14529/power160405

EVALUATION OF VOLTAGE CONTROL SPEED OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR – UPFC UNITS IN POWER DISTRIBUTION SCHEMES OF POWER PLANTS

M.E. Gol'dshteyn¹, susu-meg@mail.ru,

I.S. Egorov², egoroff89@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Beloyarsk NPP of the Rosenergoatom Concern, Zarechnyy, Russian Federation

The main method of voltage and reactive power control is to change the excitation current of synchronous generators. This method requires a complex excitation system that can provide a necessary control range. In addition, response performance of such control is constrained by a long time constant of the excitation circuit. One of the alternative control methods is the use of power units including synchronous generators with a non-controlled excitation system and unified power flow controllers (UPFC). The MATLAB Simulink software package enabled research of mode control performance of such power units and comparison with the thyristor excitation systems. Furthermore, a real voltage change was analyzed at short-circuit in the power system. The synchronous generator - UPFC power units are proved to implement a high-speed voltage control, which can significantly increase flexibility and adaptability of mode control in the power distribution circuits of the power plants.

Keywords: simulation, unified power flow controller, synchronous generator, voltage control.

References

1. Egorov I.S., Gol'dshtein M.E. [Voltage Control of Synchronous Generator – Unified Power Flow Controller Unit]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2014, vol. 14, no. 3, pp.19–24. (in Russ.)
2. Egorov I.S., Gavrilov A.I., Gol'dshtein M.E. *Energoblok s reguliruemymi znacheniyami reaktivnoy moshchnosti, velichiny i fazy napryazheniya* [Power Unit with Controlled Reactive Power, Magnitude and Voltage Phase]. Patent RF, no. 2015106287/07, 2016.
3. Egorov I.S., Gol'dshtein M.E. [Operation of Synchronous Generator with Uncontrolled Excitation – Unified Power Flow Controller Unit at Sudden Disturbances in the External Network]. *6th International Scientific and Technical Conference “Power Industry: Viewpoint of the Youth”*. Ivanovo, 2015, vol. 2, pp. 10–13. (in Russ.)
4. Egorov I.S., Gol'dshtein M.E. [Independent Voltage and Reactive Power Control in the Power Distribution Schemes of Power Plants with Synchronous Generator – UPFC Unit]. *7th International Scientific and Technical Conference “Power Industry: Viewpoint of the Youth”*. Kazan, 2016, vol. 1, pp. 53–56. (in Russ.)
5. Hingorani, Narain G. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York, IEEE Press, 2000. 432 p.
6. Xiao-Ping Zhang. *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 383 p. DOI: 10.1007/978-3-642-28241-6

Received 7 November 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гольдштейн, М.Е. Оценка быстродействия энергоблоков «синхронный генератор – ОРПМ» при регулировании напряжения в схемах выдачи мощности электростанций / М.Е. Гольдштейн, И.С. Егоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 39–44. DOI: 10.14529/power160405

FOR CITATION

Gol'dshteyn M.E., Egorov I.S. Evaluation of Voltage Control Speed of the Synchronous Generator – UPFC Units in Power Distribution Schemes of Power Plants. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 39–44. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160405
