

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНЕШНЕГО ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА КАК ОБОБЩЕННОГО ПАРАМЕТРА, ХАРАКТЕРИЗУЮЩЕГО СОСТОЯНИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

**Поляхов Н. Д., Приходько И. А., Рубцов И. А.**

*ФГБ ОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)» Россия (197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5), e-mail: ndpol@mail.ru*

---

**В работе предложен оригинальный метод определения внешнего индуктивного сопротивления эквивалентного синхронного генератора, замещающего электростанцию в схеме «станция – линия – шины». Подобное эквивалентирование допустимо, поскольку при экспериментальной оценке устойчивости электростанций, примыкающих к энергосистеме, при разработке и наладке систем регулирования возбуждения наиболее определяющим является общее одночастотное движение исследуемых агрегатов относительно мощных энергообъединений. Схема электрических соединений заменяется линией с внешним индуктивным сопротивлением, и использование эквивалентной схемы обуславливает необходимость его определения. Метод определения внешнего индуктивного сопротивления дает дополнительную информацию об угле нагрузки генератора и о внешнем угле нагрузки, что также может использоваться в целях управления и настройки параметров стабилизатора (регулятора) возбуждения.**

---

Ключевые слова: энергосистема, внешнее индуктивное сопротивление, система регулирования возбуждения.

## **METHOD OF THE DEFINITION OF EXTERNAL INDUCTIVE REACTANCE OF SYNCHRONOUS GENERATOR AS THE GENERALIZED PARAMETER, WHICH CHARACTERIZES THE STATE OF THE POWER SYSTEM**

**Polyakhov N. D., Prikhodko I. A., Rubtsov I. A.**

*Saint-Petersburg State Electrotechnical “LETI”, Saint-Petersburg, Russia (197376, Saint-Petersburg, Prof. Popova str. 5), e-mail: ndpol@mail.ru*

---

**In the work is proposed the original method of determining external inductive reactance of the equivalent synchronous generator, which replaces power station in the scheme “station – line – bus”. A similar equivalenting is permissible, since, according to experimental studies, with the evaluation of the stability of the power stations, which adjoin the power system, with development and adjustment of the control systems of excitation most determining is the general single-frequency motion of the aggregates relative to power combines being investigated. The scheme of electrical connections is substituted by line with external inductive reactance and the use of an equivalent diagram specifies the need for its determination. The method of determining external inductive reactance gives additional information about the angle of the load of generator and about the exterior angle of load, which also can be used for purposes of control and tuning of the parameters of the excitation stabilizer.**

---

The keywords: power system, external inductive reactance, the control system of the excitation.

Задача выбора оптимальных параметров автоматического регулятора возбуждения (АРВ) синхронного генератора (СГ), работающего в энергосистеме, эффективно решается на основе эквивалентной схемы «станция – линия – шины» [1], [4]. Такое эквивалентирование допустимо, так как, согласно экспериментальным исследованиям, при оценке устойчивости электростанций, примыкающих к энергосистеме, при выборе и наладке систем регулирования возбуждения в большинстве случаев определяющим является общее одночастотное движение агрегатов относительно мощных энергообъединений. В результате этого вывода в [4] предложена схема замещения энергообъединения шинами неизменного по фазе напряжения, расположенного в центре электрических качаний. Схема электрических

соединений заменяется линией с внешним индуктивным сопротивлением  $x_{вн}$ . Использование эквивалентной схемы и является причиной его определения.

Метод определения  $x_{вн}$  на основе измерения напряжения, суммарных активной и реактивной мощностей электростанции также изложен в [4]. Недостатком метода является необходимость реализации двух установившихся режимов станции для идентификации. В приборе фирмы АВВ [5] « $x_{вн}$ - идентификатор» при оценке предполагаемого значения  $x_{вн}$ , наряду с напряжением и мощностями, используется информация о внешнем угле нагрузки (угле между векторами напряжения станции и сети). На основе определенного значения  $x_{вн}$ , а также измеренных активной мощности и частоты напряжения, формируются параметры адаптивного стабилизатора. Недостатки метода фирмы АВВ: невозможность точного определения внешнего угла нагрузки; необходимость значительного возмущения во внешней сети для идентификации; сложность оценки погрешности вычислений.

В предлагаемом методе вычисления  $x_{вн}$  требуется знание активной и реактивной мощностей электростанции, а также активной составляющей тока статора генератора. Вычисление  $x_{вн}$  системы «станции – линия – шины» по измерениям электрических величин дает возможность уточнения параметров модели синхронного генератора и соответственной перенастройки параметров системных стабилизаторов АРВ синхронных генераторов (рис.1) с целью поддержания необходимого демпфирования электромеханических колебаний.

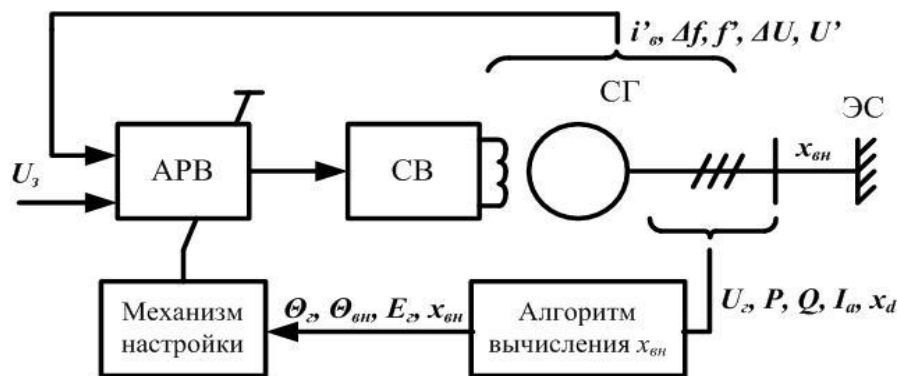


Рис. 1

Наряду с общепринятыми обозначениями, дополнительно указаны: СВ – система возбуждения; ЭС – энергосистема;  $U_з$  – напряжение задания.

В качестве механизма настройки параметров системного стабилизатора под обновленное значение  $x_{вн}$  может быть использована соответствующим образом построенная таблица соответствия « $x_{вн}$  /параметры АРВ».

Представленный метод оценивания  $x_{вн}$  дает дополнительную информацию об угле нагрузки генератора и о внешнем угле нагрузки, что также может использоваться в целях настройки параметров стабилизатора возбуждения.

Приняты следующие допущения [3]: используется упрощенная математическая модель внешнего движения эквивалентного генератора станции в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2; активные сопротивления генератора и линии полагаются равными нулю; синхронный генератор – неявнополюсный.

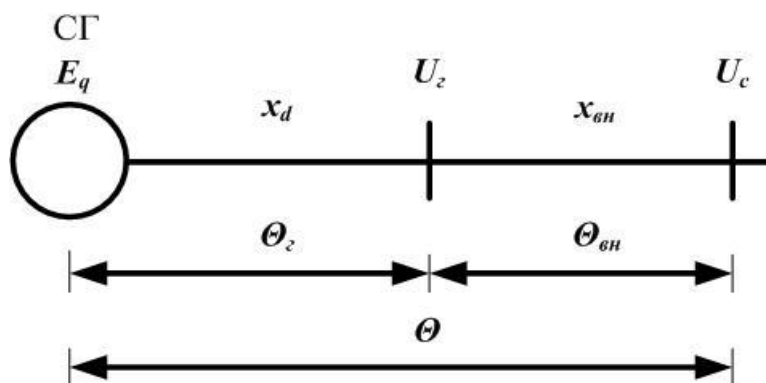


Рис. 2

Известными считаются: напряжение генератора  $U_{Г}$ ; активная  $P$  и реактивная  $Q$  мощности эквивалентного генератора, замещающего электростанцию; активная составляющая тока статора  $I_a$  (или напряжение сети  $U_c$ ). Внешнему индуктивному сопротивлению  $x_{вн}$ , согласно рис. 2, соответствует внешний угол нагрузки  $\Theta_{вн}$ , для которого составлены тригонометрические уравнения  $a \cos \Theta_{вн} + b \sin \Theta_{вн} = c$ ;  $a \sin \Theta_{вн} + b \cos \Theta_{вн} = c$ , где  $a, b, c$  – параметры уравнений, подлежащие определению.

В основе расчетов лежат известные уравнения схемы «станции – линия – шины» [2], [4].

Угол нагрузки генератора:  $\Theta_{Г} = \arctg \frac{P x_d}{U_{Г}^2 + Q x_d}$ , где  $x_d$  – индуктивное сопротивление генератора по продольной оси.

$$\text{ЭДС генератора: } E_q = \sqrt{\left(U_{Г} + \frac{Q x_d}{U_{Г}}\right)^2 + \left(\frac{P x_d}{U_{Г}}\right)^2}.$$

В вычислительном отношении метод определения внешнего угла нагрузки  $\Theta_{вн}$  основан на следующих двух алгоритмах [3]:

**Алгоритм 1.** Записываются выражения для определения активной мощности:

$$P = \frac{E_q U_c}{x_{d_\Sigma}} \sin \Theta; \quad P = U_c I_a; \quad P = \frac{U_\Gamma U_c}{x_{\text{вн}}} \sin \Theta_{\text{вн}}, \quad \text{где } \Theta - \text{ полный угол нагрузки;}$$

$\Theta = \Theta_\Gamma + \Theta_{\text{вн}}$ . После замены левых частей первого и третьего уравнений на правую часть второго и сокращения полученных уравнений на  $U_c$  получим:

$$\begin{aligned} E_q \sin \Theta &= I_a x_{d_\Sigma}, \\ U_\Gamma \sin \Theta_{\text{вн}} &= I_a x_{\text{вн}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Вычитание из первого уравнения второго дает:  $E_q \sin(\Theta_\Gamma + \Theta_{\text{вн}}) - U_\Gamma \sin \Theta_{\text{вн}} = I_a x_d$ ,

или

$$E_q \sin \Theta_\Gamma \cos \Theta_{\text{вн}} + (E_q \cos \Theta_\Gamma - U_\Gamma) \sin \Theta_{\text{вн}} = I_a x_d. \quad (2)$$

Обозначим:  $E_q \sin \Theta_\Gamma = a$ ,  $(E_q \cos \Theta_\Gamma - U_\Gamma) = b$ ,  $I_a x_d = c$ , тогда уравнение (2)

примет вид:

$$a \cos \Theta_{\text{вн}} + b \sin \Theta_{\text{вн}} = c. \quad (3)$$

В результате решения (3) определяется внешний угол нагрузки  $\Theta_{\text{вн}}$ .

**Алгоритм 2.** Используются формулы для определения активной и реактивной мощности

генератора:  $P = \frac{U_\Gamma U_c}{x_{\text{вн}}} \sin \Theta_{\text{вн}}$ ;  $Q = (U_\Gamma^2 - U_\Gamma U_c \cos \Theta_{\text{вн}}) / x_{\text{вн}}$ .

После сокращения первого уравнения на  $U_c$  и второго на  $U_\Gamma$  получим выражения для активной и реактивной составляющих тока статора:

$$I_a = U_\Gamma \sin \Theta_{\text{вн}} / x_{\text{вн}}; \quad I_r = (U_\Gamma - U_c \cos \Theta_{\text{вн}}) / x_{\text{вн}}, \quad \text{где } I_r = Q / U_\Gamma.$$

Из полученных выражений для  $I_a$  и  $I_r$  следует уравнение

$$Q \sin \Theta_{\text{вн}} / I_a + U_c \cos \Theta_{\text{вн}} = U_\Gamma \quad (4)$$

Обозначим  $Q / I_a = a$ ,  $U_c = b$ ,  $U_\Gamma = c$ , тогда уравнение (4) примет вид

$$a \sin \Theta_{\text{вн}} + b \cos \Theta_{\text{вн}} = c. \quad (5)$$

Решением (5) определяется внешний угол нагрузки  $\Theta_{\text{вн}}$ .

Полный угол нагрузки  $\Theta = \Theta_\Gamma + \Theta_{\text{вн}}$ .

Из первого уравнения (1) следует выражение для вычисления суммарного индуктивного

сопротивления  $x_{d_\Sigma} = \frac{E_q \sin \Theta}{I_a}$ .

Индуктивное внешнее сопротивление  $x_{\text{вн}} = x_{d_\Sigma} - x_d$ .

Предложенный способ реализован с помощью Toolbox Simulink/Matlab. Уравнения (3), (5) имеют два решения, из которых выделяется требуемое. На рис. 3, 4 представлены схемы определения  $x_{вн}$  в Toolbox Simulink/Matlab.

При использовании **алгоритма 1** (рис. 3) вводятся следующие параметры: активная и реактивная мощность генератора  $P = 0,85$  о.е.,  $Q = 0,173$  о.е.; напряжение генератора

$U_{Г} = 1$  о.е. (на схеме – Ug); напряжение сети  $U_{с} = 1,014$  о.е.; индуктивное сопротивление генератора по продольной оси  $x_{d} = 1,698$  о.е.

В результате получены:

- ✓ угол нагрузки генератора  $\Theta_{Г} = 0,84$  рад. (на схемах – tetag);
- ✓ ЭДС генератора  $E_{q} = 1,938$  о.е. (на схемах – Eg);
- ✓ коэффициенты  $a = 1,4434$ ;  $b = 0,2938$ ;  $c = 1,423$ ;
- ✓ внешний угол нагрузки  $\Theta_{вн} = 0,4608$  рад. (на схемах – tetal);
- ✓ полный угол нагрузки  $\Theta = 1,3$  рад. (на схемах – teta);
- ✓ суммарное индуктивное сопротивление  $x_{d\Sigma} = 2,2284$  о.е. (на схемах – Xds);
- ✓ индуктивное внешнее сопротивление  $x_{вн} = \mathbf{0.53}$  о.е. (на схемах – XI).

При использовании **алгоритма 2** (рис. 4) вводятся такие параметры: активная и реактивная мощность генератора  $P = 0,85$  о.е.,  $Q = -0,402$  о.е.;  $U_{Г} = 1$  о.е.; активная составляющая тока  $I_{a} = 0,6334$  о.е.;  $x_{d} = 1,698$  о.е.

В результате получены:

- ✓ угол нагрузки генератора  $\Theta_{Г} = 1,354$  рад.;
- ✓ ЭДС генератора  $E_{q} = 1,478$  о.е.;
- ✓ коэффициенты  $a = -0,6347$ ;  $b = 1,342$ ;  $c = 1$ ;
- ✓ внешний угол нагрузки  $\Theta_{вн} = 0,3898$  рад.;
- ✓ полный угол нагрузки  $\Theta = 1,7438$  рад.;
- ✓ суммарное индуктивное сопротивление  $x_{d\Sigma} = 2,298$  о.е.;
- ✓ индуктивное внешнее сопротивление  $x_{вн} = \mathbf{0,6}$ .

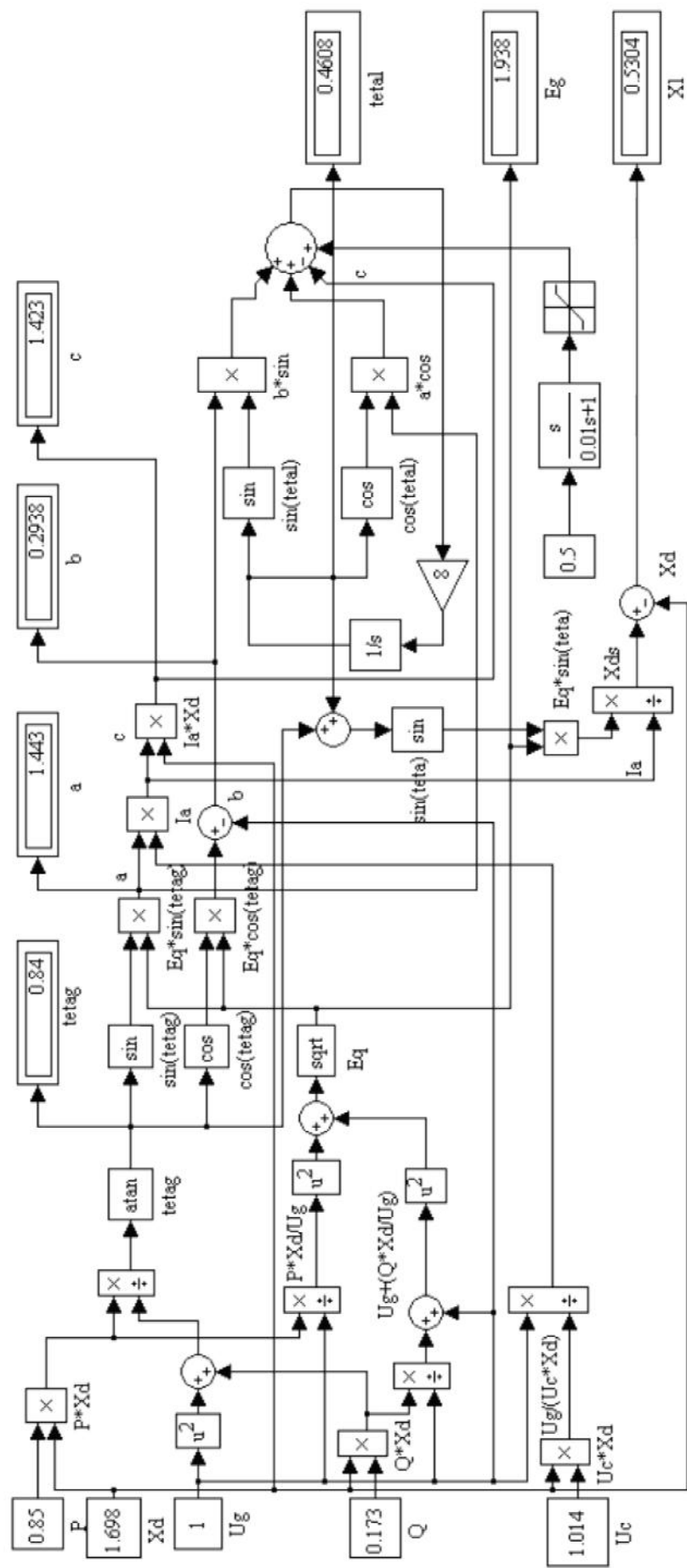


Рис. 3

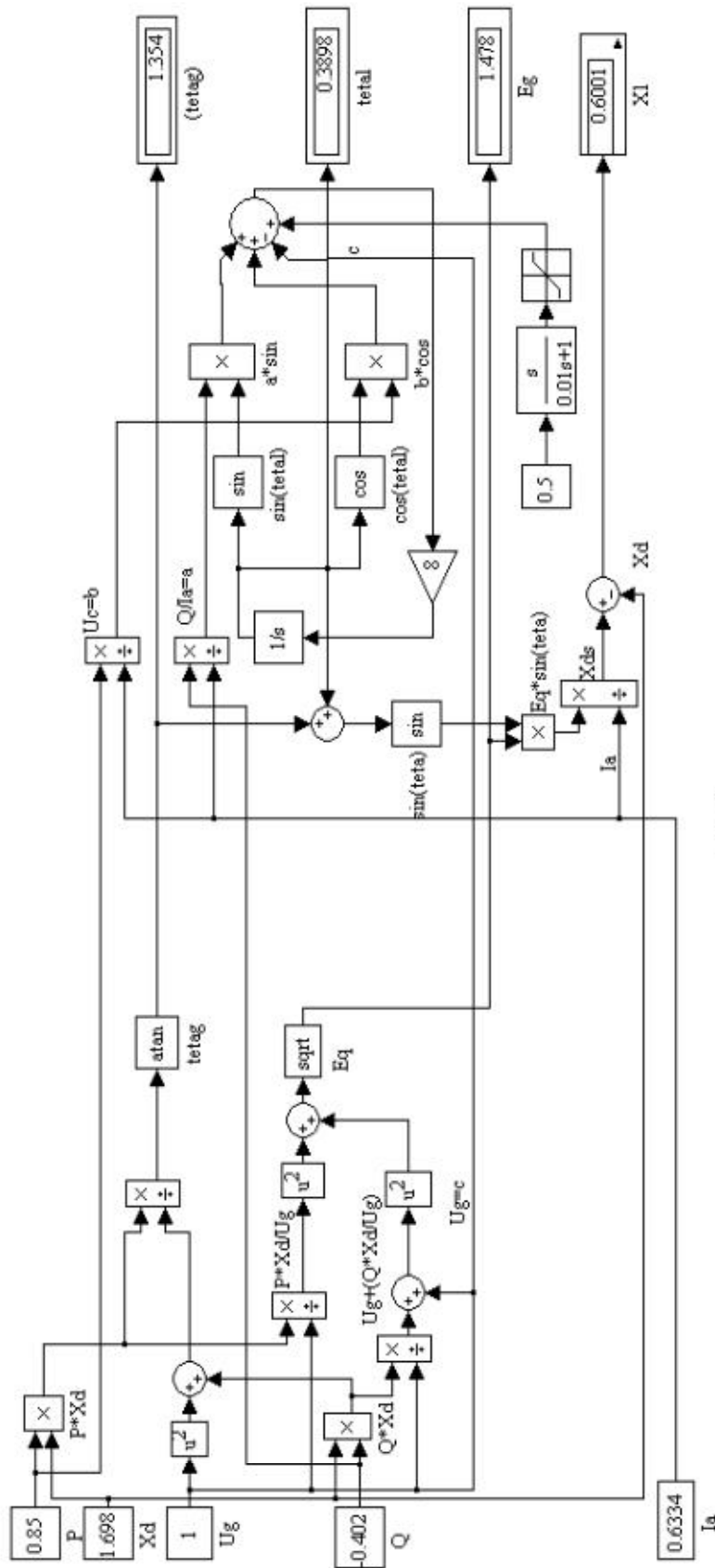


Рис. 4

Предложен простой метод определения индуктивного внешнего сопротивления синхронного генератора как обобщенного параметра, характеризующего состояние

энергосистемы. Знание внешнего индуктивного сопротивления позволяет сократить расходы на дорогостоящие измерительные эксперименты и автоматически устанавливать оптимальные значения параметров регуляторов системы возбуждения.

### Список литературы

1. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость. – М.: Энергия, 1980.
2. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.; Л.: Энергия, 1985. – 537с.
3. Приходько И. А. Алгоритм расчета индуктивного внешнего сопротивления синхронного генератора // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб., 2009. – Вып.1. – С. 41–46.
4. Юрганов А. А., Кожевников В. А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. – СПб.: Наука, 1996. – 138 с.
5. Roth A. Identifikation der Leitungsreaktanz zur Realisierung der adaptiven Schlupfstabilisierung // Brown Boveri Mitt. – 1983. – Bd 70, № 9/10. – P. 360–364.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., в рамках госконтракта № 539 от 17.05.2010.*

### Рецензенты:

Шестаков Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор ПИМаш, г. Санкт-Петербург.

Микеров Александр Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор СПбГЭТУ, г. Санкт-Петербург.