

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СТАБИЛИЗАЦИИ СИСТЕМ АРВ И АРЧВ ПО НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Разработан алгоритм непараметрической идентификации электроэнергетической системы (ЭЭС) с учётом взаимосвязанности систем автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и автоматического регулирования частоты вращения (АРЧВ) турбогенератора. Описана процедура определения оптимальной настройки систем АРВ и АРЧВ с использованием генетического алгоритма, по которой получены оптимальные значения коэффициентов стабилизации рассматриваемой регулируемой ЭЭС.

**Ключевые слова:** автоматический регулятор возбуждения, автоматический регулятор частоты вращения, электроэнергетическая система, непараметрическая идентификация, оптимизация.

Взаимодействие каналов управления генератором и турбиной очевидно и особенно усиливается в пиковых и аварийных ситуациях, но на практике сложилось так, что при традиционных алгоритмах настройки автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и автоматических регуляторов частоты вращения (АРЧВ) подсистемы генератора и турбины рассматриваются развязанными, т.е. локальными. В то же время ещё более 20 лет назад в своих работах профессор В.А. Веников указывал на необходимость именно взаимосвязанного управления: «...аварийное регулирование турбин даёт существенный эффект лишь в том случае, если оно осуществляется в тесной взаимосвязи с регулированием возбуждения турбогенератора. Поэтому необходимо одновременное согласование управления возбуждения турбогенератора и механической мощности его турбины от одного комплексного управляющего устройства» [1]. Особенно необходимость учёта явлений взаимосвязанности и взаимовлияния процессов в энергоблоках проявляется при согласованном управлении группой турбогенераторов

электростанций. В связи с этим рассмотрение взаимного влияния систем АРВ и АРЧВ генераторов необходимо при определении оптимальной настройки и повышении устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС).

В силу всего сказанного авторами была разработана методика настройки взаимосвязанных систем АРВ и АРЧВ [2]. Согласно этой методике систему «турбина-генератор» с АРВ и АРЧВ в виде отдельного блока на электростанции нужно представлять как многосвязную, имеющую два входных воздействия, поступающих от регуляторов, и, в общем случае, две регулируемые величины – частоту вращения ротора  $\omega_r$  и напряжение генератора  $U_r$  (рис.1). На рисунке обозначены передаточные функции: генератора  $W_r$ , турбины  $W_T$ , возбудителя  $W_B$ , автоматического регулятора частоты вращения  $W_{АРЧВ}$ , автоматического регулятора возбуждения  $W_{АРВ}$ .

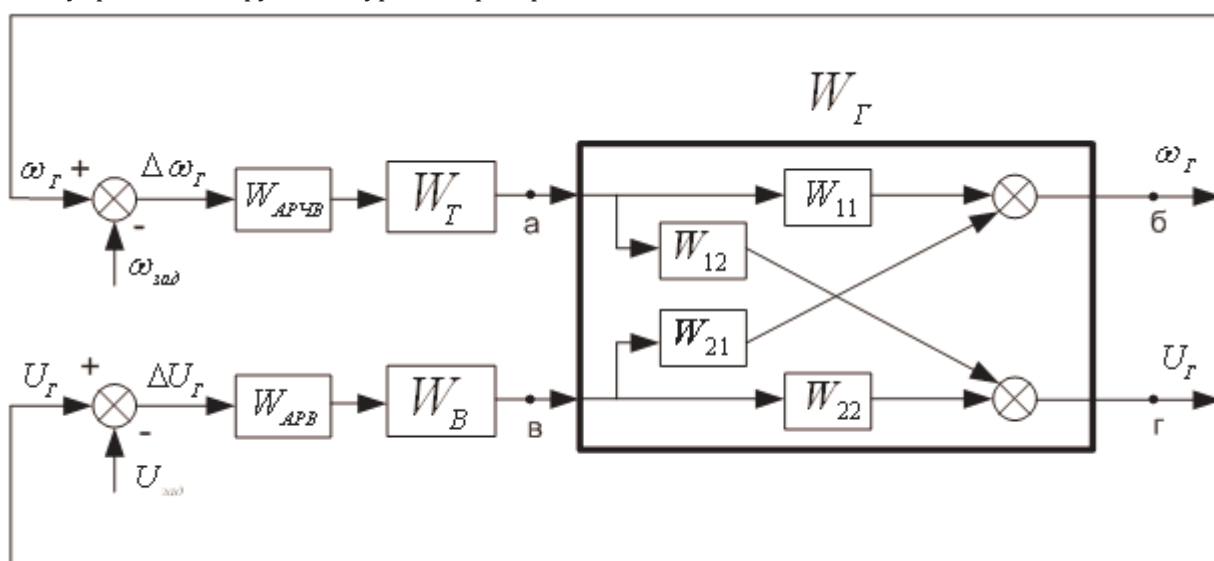


Рис. 1 Структурное представление регулируемой системы «турбина-генератор»

Такое представление системы «турбина–генератор» позволяет проводить идентификацию с применением разработанного алгоритма [3], где используется аппарат дискретного преобразования Фурье и определять характеристический полином, в котором учитываются все возможные электромеханические составляющие переходных процессов в генераторах на электростанциях. Всё это даёт возможность оптимизировать коэффициенты стабилизации АРВ и АРЧВ с учётом их взаимного влияния. Для этого предлагается снимать входные и выходные сигналы нескольких режимов, чтобы получить необходимое количество уравнений, равному числу неизвестных.

Предположим, что передаточные функции АРВ, АРЧВ, турбины и возбудителя известны. Тогда необходимо определить лишь матричную передаточную

функцию генератора  $W_G = \begin{vmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{vmatrix}$ . Обозначим че-

рез  $y_1, y_2$  – спектры входных сигналов, а  $x_1, x_2$  – спектры выходных сигналов. На рис.1 показаны точки снятия сигналов (точки а, б, в, г), отношение спектральных характеристик которых позволяет выявить необходимые комплексные передаточные функции основных каналов и перекрёстных связей. В частности, в рассматриваемой системе достаточно снять спектры входных и выходных сигналов для двух режимов, отличающихся подачей белого шума в точку а – 1 режим, в точку в – 2 режим (рис. 1), и получить в итоге две системы уравнений:

$$\begin{aligned} \text{1 режим: } & \begin{cases} x_1 = W_{11} \cdot y_1 + W_{12} \cdot y_2, \\ x_2 = W_{21} \cdot y_1 + W_{22} \cdot y_2 \end{cases} ; \\ \text{2 режим: } & \begin{cases} x'_1 = W_{11} \cdot y'_1 + W_{12} \cdot y'_2, \\ x'_2 = W_{21} \cdot y'_1 + W_{22} \cdot y'_2. \end{cases} \end{aligned}$$

Из этих четырёх уравнений определяются комплексные передаточные функции основных каналов  $W_{11}, W_{22}$  и перекрёстных связей  $W_{12}, W_{21}$  генератора в виде набора вещественных и мнимых частотных характеристик (ВЧХ и МЧХ).

Предлагаемый алгоритм непараметрической идентификации многосвязных систем был опробован на созданной в среде MATLAB двухсвязной системе. В результате программной реализации описанного алгоритма была получена абсолютно достоверная модель в виде набора частотных характеристик.

Для того чтобы применить описанный алгоритм непараметрической идентификации к ЭЭС с целью определения оптимальных коэффициентов каналов стабилизации АРВ и АРЧВ генераторов, необходимо априори знать рабочий диапазон частот элементов ЭЭС. При этом, опираясь на ре-

зультаты собственных исследований, проводимых на созданной ранее модели ЭЭС в MATLAB [4], а также на подход, основанный на оценке динамических свойств системы по нерегулярным колебаниям углов роторов генераторов [5], авторы пришли к выводу, что модель системы в диапазоне частот собственных колебаний отражает в себе все динамические свойства, обусловленные постоянно текущими в ЭЭС электромеханическими переходными процессами в результате реакции на постоянно меняющиеся по каким-либо причинам нагрузки и генерацию активной мощности. В этом случае частоту собственных колебаний генераторов электростанций в системе, которая зависит от синхронизирующих мощностей и постоянных механической инерции можно определять следующим образом [6. С. 46]:

$$f_{\text{соб}} = \frac{\sqrt{P_c \omega_{\text{ном}} / \tau_J}}{2\pi}, \quad (1),$$

где  $P_c = \frac{E_q \cdot U}{X_d} \cdot \cos \delta_0$  – синхронизирующая мощ-

ность генератора, о.е.;  $\omega_{\text{ном}}$  – номинальная частота вращения ротора генератора, рад/с;  $\tau_J$  – постоянная механической инерции машины, с.

Для применения разработанной методики непараметрической идентификации, изучения процессов взаимного влияния систем АРВ и АРЧВ при определении их оптимальной настройки, созданная в MATLAB модель ЭЭС [4] была дополнена описанными в [2] моделью гидравлической турбины с учётом гидроудара и моделью электрогидравлического АРЧВ типа ЭГР-2И с ПИД-законом управления. С учётом этого, полученная в MATLAB модель ЭЭС, на которой будут проводиться все испытания показана на рис. 2. Подача нулевого сигнала на один из входов гидравлической турбины свидетельствует о том, что система работает без автоматического регулятора активной мощности (АРМ).

Таким образом, проведя идентификацию системы, изображённой на рис. 2, была получена непараметрическая модель генератора в виде набора ВЧХ и МЧХ основных каналов  $W_{11}, W_{22}$  и перекрёстных связей  $W_{12}, W_{21}$ . При этом частота собственных колебаний генератора в рассматриваемой системе в соответствии с выражением (1) составила  $f_{\text{соб}}=0,7$  Гц. Для удобства по полученным характеристикам были составлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) всех каналов и связей генератора (рис. 3).

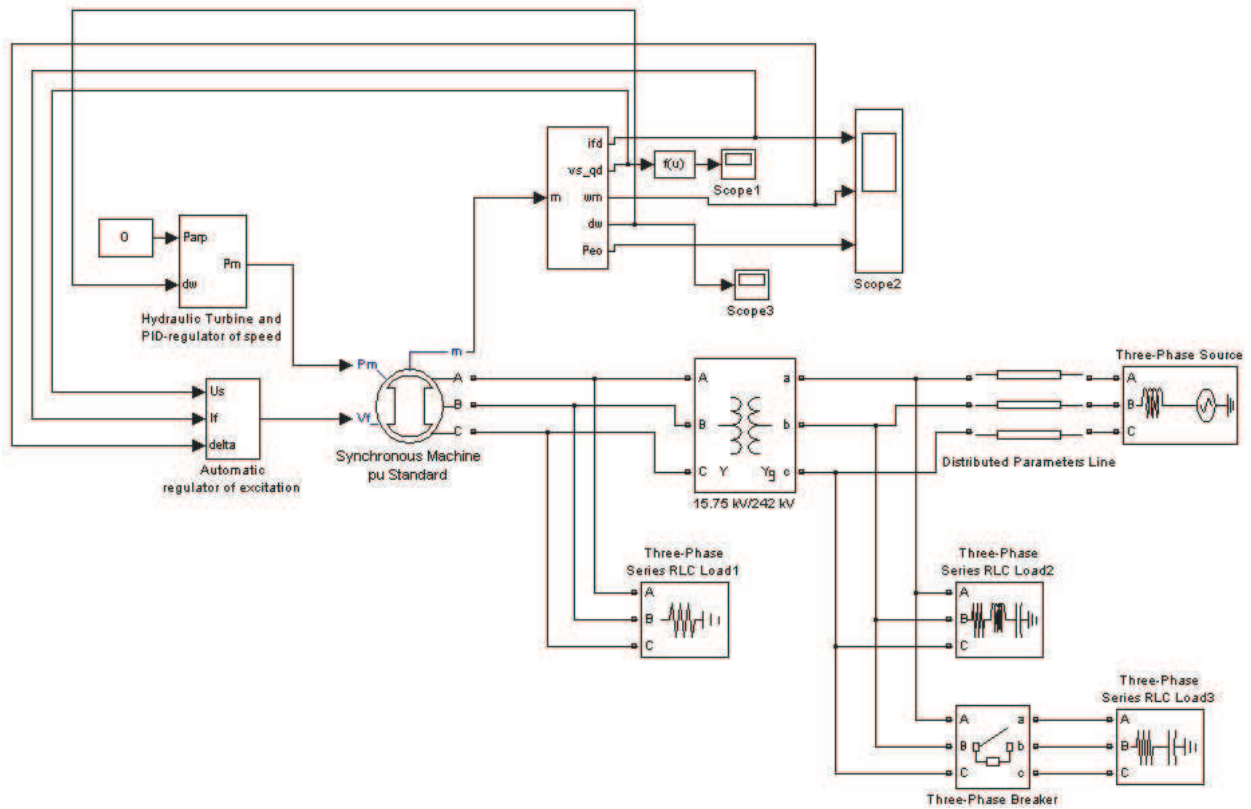


Рис. 2 Модель ЭЭС в MATLAB

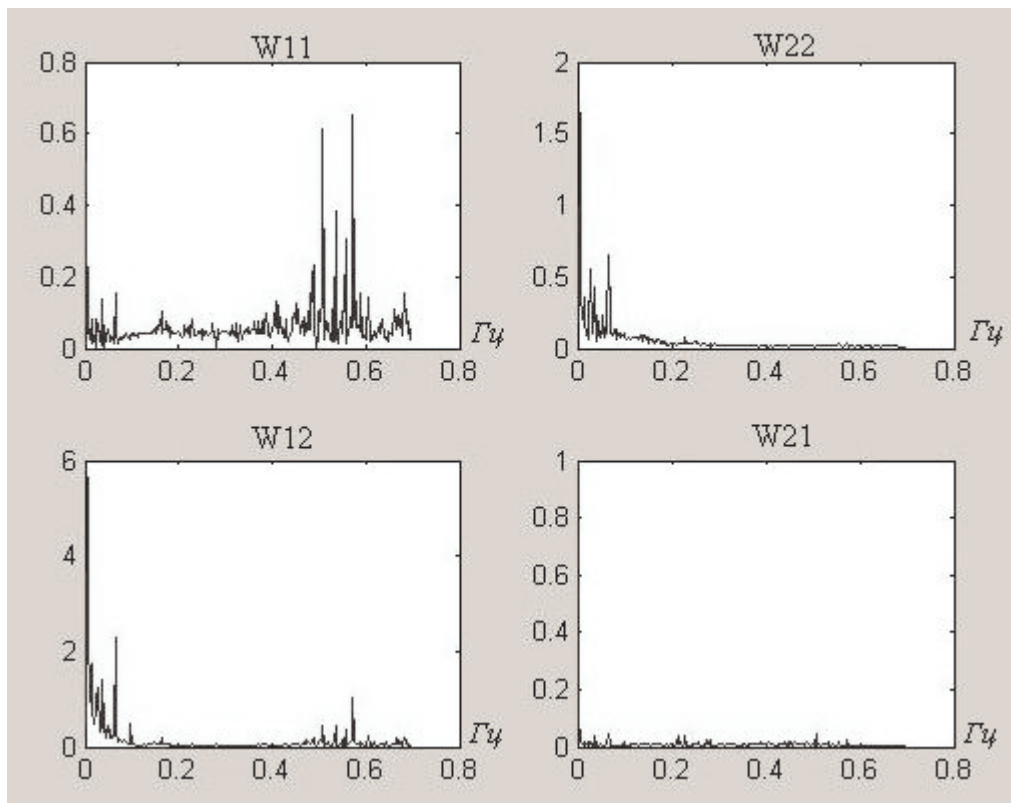


Рис. 3 Полученные АЧХ турбогенератора при идентификации

Далее, используя полученную матричную передаточную функцию генератора, элементы которой являются наборы ВЧХ и МЧХ, можно легко получить характеристический полином регулируемой

системы. Так как рассматриваемая система является многосвязной, то характеристический полином будет определяться как детерминант знаменателя матричной передаточной функции замкнутой сис-

темы:

$$W_3(p) = \frac{W_\Gamma(j\omega)}{E + W_\Gamma(j\omega) \cdot W_p(j\omega)}, \quad (2)$$

где  $E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  – единичная матрица;

$$W_\Gamma(j\omega) = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \text{ – матричная передаточная}$$

функция турбогенератора;

$$W_p(j\omega) = \begin{bmatrix} W_{APЧВ} \cdot W_T & 0 \\ 0 & W_{APВ} \cdot W_B \end{bmatrix} \text{ – матричная}$$

передаточная функция диагонального регулятора, учитывающая передаточные функции APЧВ, APВ с неизвестными коэффициентами стабилизации, а также передаточные функции турбины и возбудителя. Если провести элементарные преобразования, то характеристический полином регулируемой ЭЭС будет выглядеть следующим образом:

$$D(j\omega) = (W_{11} \cdot W_{APЧВ} \cdot W_T + 1) \times \\ \times (W_{22} \cdot W_{APВ} \cdot W_B + 1) - \\ - W_{21} \cdot W_{APЧВ} \cdot W_T \cdot W_{12} \cdot W_{APВ} \cdot W_B \quad (3)$$

Оптимизацию коэффициентов APВ будем проводить только для канала регулирования по напряжению, т.е. будем определять оптимальные коэффициенты стабилизации по отклонению  $k_u$  и скорости изменения напряжения  $k_{1u}$ . Для APЧВ будем оптимизировать все три коэффициента усиления ПИД-закона управления  $k_p, k_i, k_d$ . При этом воспользуемся разработанным ранее алгоритмом [7], в основе которого заложен метод стандартных коэффициентов. Процедура оптимальной настройки систем APВ и APЧВ согласно этому методу заключается в приближении коэффициентов характеристического полинома аппроксимируемой модели к существующим стандартным формам Баттерворта, оптимально распределяя при этом корни характеристического полинома на комплексной плоскости и обеспечивая тем самым необходимую степень устойчивости системы. Определение оптимальных коэффициентов APВ и APЧВ производится путём решения задачи оптимизации с помощью генетического алгоритма (ГА), сводящего к минимуму следующий квадратичный критерий [7]:

$$J = \int_0^{\omega_{\text{свб}}} e^2(j\omega) d\omega \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $e(j\omega) = D^*(j\omega) - D^M(j\omega)$  – рассогласование между желаемым набором значений  $D^*(j\omega)$  и аппроксимирующим «модельным» набором  $D^M(j\omega)$  характеристических полиномов.

Алгоритм метода оптимизации коэффициентов регулирования APВ и APЧВ с использованием генетического алгоритма показан на рис.4.

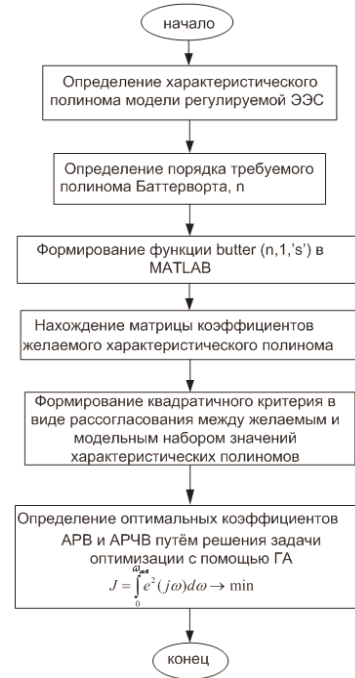
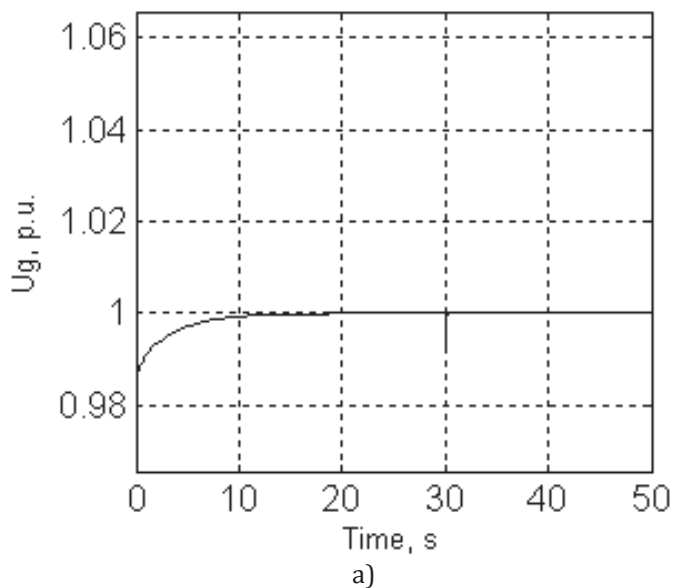


Рис. 4 Алгоритм определения оптимальных коэффициентов APВ и APЧВ

В результате работы приведённого алгоритма (рис.4) были получены следующие настроечные коэффициенты каналов регулирования APВ и APЧВ:  $k_u=86,843, k_{1u}=2,537, k_p=63,014, k_i=-2,940, k_d=-28,180$ .

Используя полученные значения коэффициентов, было выполнено моделирование переходных процессов на модели ЭЭС в MATLAB. В результате, после подключения крупного потребителя в момент времени  $T=30$  с наблюдалась хорошая стабилизация напряжения (рис. 5а) и частоты вращения ротора генератора (рис. 5б), что говорит о хороших демпферных свойствах настроенной системы.



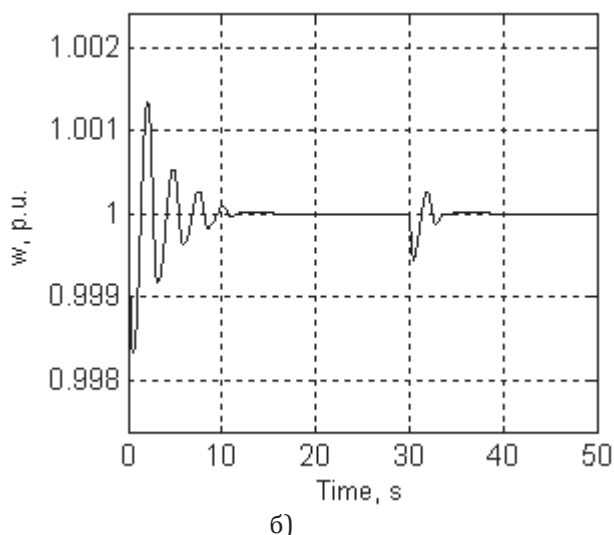


Рис. 5. Осциллограммы изменения напряжения и частоты вращения ротора турбогенератора

Таким образом, авторами был разработан и апробирован метод непараметрической идентификации ЭЭС, позволяющий получать достоверную математическую модель в виде ВЧХ и МЧХ, в диапазоне частот собственных колебаний которой отражаются все динамические свойства регулируемой ЭЭС. Кроме этого, программная реализация алгоритма позволила определить характеристический полином системы, используя который в процедуре оптимизации, были найдены оптимальные значения коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ с учётом их взаимосвязанности.

*Литература*

1. Электрические системы: Управление переходными режимами электроэнергетических систем : учебник / В. А. Веникова, Э. Н. Зуева, М. Г. Портной [ и др.] ; под ред. В. А. Веникова. – М.: Высш. школа, 1982. – 247 с.

2. Булатов, Ю.Н. Методика согласованной настройки систем АРВ и АРЧВ генератора / Ю. Н. Булатов, И. В. Игнатъев // Тр. ун-та / Брат. гос. ун-т. - Братск, 2009. – Т. 1. - С. 3 - 7. – (Сер. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири).

3. Булатов, Ю. Н. Алгоритм непараметрической идентификации ЭЭС для получения оптимальных коэффициентов стабилизации АРВ генераторов / Ю. Н. Булатов, С. А. дьяконица // Тр. ун-та / Брат. гос. ун-т. – Братск, 2009. – Т. 1. - С. 7 - 11. - (Сер. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири).

4. Булатов, Ю. Н. Моделирование автоматических регуляторов возбуждения генераторов электрических станций в среде MATLAB / Ю. Н. Булатов, И. В. Игнатъев // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ : межвуз. тем. сб. тр. / СПбГАСУ. – СПб., 2008. – Вып. 14. – С. 150-153.

5. Бушуев, В. В. Динамические свойства энергообъединений / В. В. Бушуев, Н. Н. Лизалек, Н. Л. Новиков. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 374 с.

6. Андерсон, П. Управление энергосистемами и устойчивость : [пер. с англ.] / П. Андерсен, А. Фуад ; под ред. Я. Н. Лугинского. – М.: Энергия, 1980. – 568 с.

7. Булатов, Ю. Н. Оптимизация коэффициентов регулирования системы АРЧМ с использованием генетического алгоритма / Ю. Н. Булатов, И. В. Игнатъев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование : науч. журн. / Ирут. гос. ун-т путей сообщения. – 2009. - № 1 (21). – С. 150-153.

8. Булатов, Ю. Н. Моделирование автоматических регуляторов возбуждения генераторов электрических станций в среде MATLAB / Ю. Н. Булатов, И. В. Игнатъев // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: межвуз. тем. сб. тр. / СПбГАСУ. – СПб., 2008. – Вып. 14. – С.18-24. УДК 656.072, 519.853.3