

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ОПТИМИЗАЦИИ  
КОЭФФИЦИЕНТОВ СТАБИЛИЗАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ  
ВОЗБУЖДЕНИЯ**

*В работе приводится описание разработанного авторами в интегрированной среде MATLAB программного комплекса, позволяющего проводить пассивную идентификацию электроэнергетической системы (ЭЭС) и оптимизацию коэффициентов стабилизации автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) генераторов.*

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, идентификация, автоматический регулятор возбуждения, программный комплекс.

**Введение.**

В современных условиях функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) являются актуальными вопросы регулирования напряжения и реактивной мощности, оптимального распределения загрузки параллельно работающих генераторов электростанций с целью повышения пропускной способности линий электропередачи и обеспечения надежности электроснабжения потребителей.

Основными средствами повышения запасов статической устойчивости, обеспечения отсутствия самораскачивания и улучшения демпфирования электромеханических колебаний в ЭЭС являются автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) синхронных генераторов. Параллельно развитию АРВ большое внимание уделялось разработке методов и алгоритмов их настройки. С 70-х годов XX века исследования были направлены на применение таких подходов к решению задачи повышения устойчивости ЭЭС, при которых математическое описание формируется на базе экспериментальных данных [1-3].

Однако следует отметить, что используемые в [1-3] экспериментальные модели не учитывают все особенности идентификации объектов, замкнутых по каналам стабилизации. В частности, при идентификации ЭЭС по частям не учитывается взаимосвязь подсистем в момент

эксперимента. В связи с этим необходима разработка новых методов идентификации сложных, многосвязных и многомерных систем, каковыми являются современные ЭЭС. Кроме этого, для обеспечения устойчивой работы электростанций ЭЭС за счет выбора оптимальных настроек АРВ генераторов необходимо учитывать действие других регуляторов, влияющих на статическую колебательную устойчивость ЭЭС, к которым в первую очередь относятся автоматические регуляторы частоты вращения (АРЧВ) турбины.

Для решения описанных проблем предлагается разработанный авторами в интегрированной среде MATLAB программный комплекс, позволяющий проводить пассивную идентификацию ЭЭС и оптимизацию коэффициентов стабилизации АРВ с учетом АРЧВ [4].

**Описание программного комплекса.**

Программный комплекс имеет Windows-ориентированный интерфейс и состоит из следующих модулей: модуль определения рабочего частотного диапазона и параметров математической модели ЭЭС; модуль оценки адекватности экспериментальной математической модели ЭЭС; модуль оптимизации коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций; модуль анализа устойчивости ЭЭС.

---

\* - автор, с которым следует вести переписку.

В программном комплексе имеется возможность осуществлять оптимизацию коэффициентов регулирования систем АРВ и АРЧВ как по отдельности, так и с учетом их взаимного влияния, для чего в главном окне необходимо выбрать соответствующий метод настройки (рис. 1).

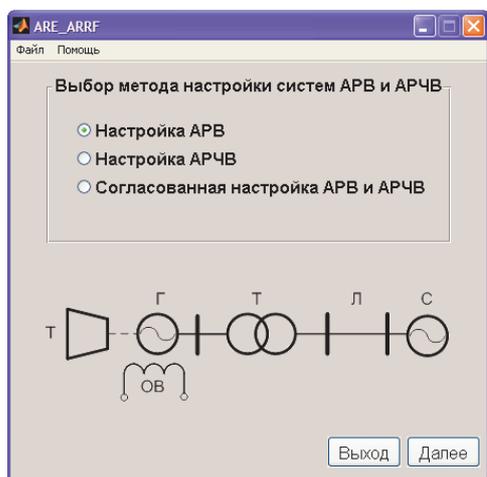


Рис. 1. Главное окно программного комплекса.

Для определения рабочего частотного диапазона и параметров математической модели исследуемой ЭЭС используется метод, подробное описание которого дано в [5]. Для этого необходимо в соответствующем окне заполнить поля исходных данных (рис. 2).

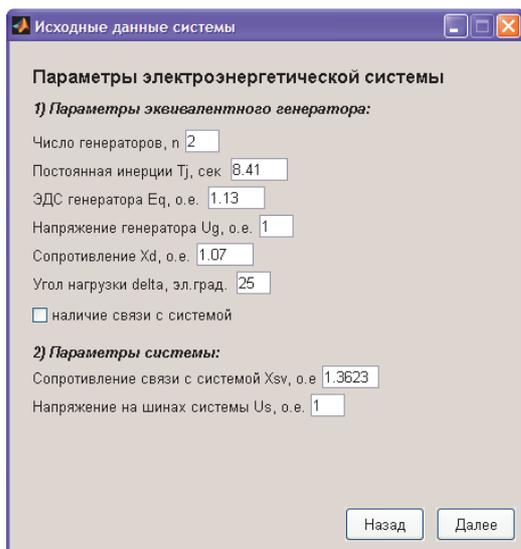


Рис. 2. Окно ввода исходных данных.

Следующий этап формирования математической модели ЭЭС предполагает ввод в программу параметров объекта, полученных экспериментально. Например, для идентификации эквивалентной системы «турбина-генератор» в качестве исходных выборок используются значения частоты вращения ротора генератора, значения напряжения на его зажимах, значения частоты вращения турбины или ее механической мощности, а также значения выходной ЭДС возбуждателя генератора. Все эти параметры вводятся в относительных единицах для установившегося режима работы ЭЭС.

В алгоритме идентификации используется аппарат дискретного преобразования Фурье, с помощью которого определяется комплексная передаточная функция ЭЭС  $W(j\omega)$  [6]. Для получения достаточно точных оценок динамики системы целесообразно использовать тестовые широкополосные сигналы. В качестве таких сигналов обычно используются случайные либо псевдослучайные сигналы. С другой стороны, поскольку нарушение нормального процесса эксплуатации крайне нежелательно в ЭЭС, реализованная в программном комплексе методика идентификации ориентируется на пассивный подход, при котором в качестве тестового воздействия на систему используется выделенный с помощью вейвлет-преобразования шум регулятора [7].

Частотные характеристики, полученные с помощью выделенного шума регулятора, как правило, оказываются весьма «изрезанными». Поэтому, чтобы получить более достоверную оценку, в программном комплексе предусмотрена возможность проводить сглаживание эмпирической оценки комплексной передаточной функции системы, основанное на применении весовых окон [8], для чего требуется ввести коэффициент сглаживания, определяющий обратную величину ширины окна (рис. 3).

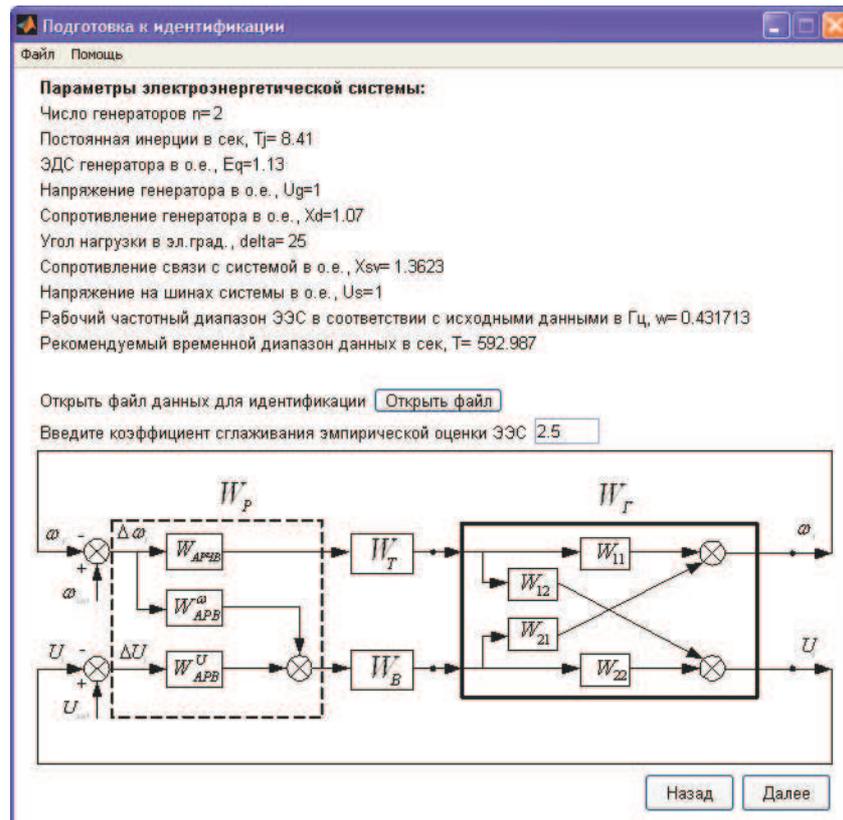


Рис. 3. Окно подготовки к идентификации.

С целью визуализации результатов идентификации строятся частотные характеристики (рис. 4).

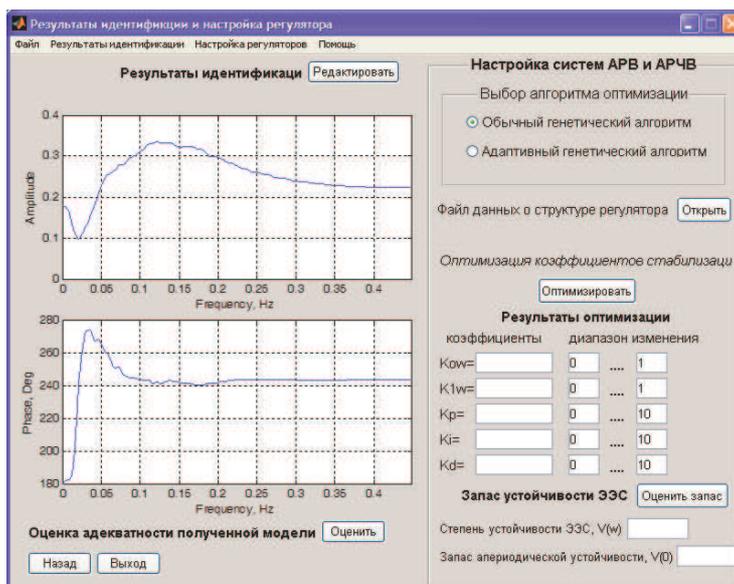
При необходимости можно провести проверку адекватности полученной модели ЭЭС, для чего необходимо:

- 1) провести повторный эксперимент на исследуемом объекте;
- 2) по аналогии с файлом исходных данных заполнить файл данных повторного эксперимента *osenska.txt*;
- 3) нажать на кнопку «Оценить» (рис. 4).

В итоге на экране монитора отображается информация о функции квадрата спектра когерентности и среднеквадратичном отклонении модели и реальной ЭЭС (рис. 5). Согласно такой оценке, для идеальной линейной связи «вход-выход» объекта во всем диапазоне частот выполняется равенство функции квадрата спектра когерентности единице. При этом в случае проведения идеального эксперимента вычислительная ошибка идентификации стремится к нулю.

Используя полученную модель ЭЭС в виде комплексной передаточной функции и данные о структуре АРВ и АРЧВ, введенные в специальном файле, открываемся при нажатии на кнопку «Открыть» (рис. 4), можно осуществлять оптимизацию коэффициентов настройки регуляторов для введенного диапазона их изменения. Для этого необходимо выбрать метод оптимизации – либо обычный генетический алгоритм (ГА), либо адаптивный ГА, и нажать кнопку «Оптимизировать». После чего программный комплекс формирует характеристический полином исследуемой ЭЭС и определяет коэффициенты настройки регуляторов, удовлетворяющих следующему критерию оптимизации [9]:

$$J = \int_0^{\Omega} e^2(j\omega) d\omega \rightarrow \min, \quad (1)$$



**Рис. 4. Результаты идентификации.**



**Рис. 5. Оценка адекватности полученной модели.**

где  $e(j\omega) = D^{\text{ж}}(j\omega) - D^{\text{м}}(j\omega)$  – рассогласование между желаемым набором значений  $D^{\text{ж}}(j\omega)$ , в качестве которого выступает полином Баттерворта, и модельным набором  $D^{\text{м}}(j\omega)$  характеристических полиномов;  $\Omega$  – «полоса пропускания» системы (рабочий частотный диапазон системы). На экране монитора при

этом отображается информация о результатах работы алгоритма оптимизации, в частности найденные коэффициенты настройки АРВ и АРЧВ, а также график изменения целевой функции в зависимости от числа поколения особей при работе генетического алгоритма (рис. 6).

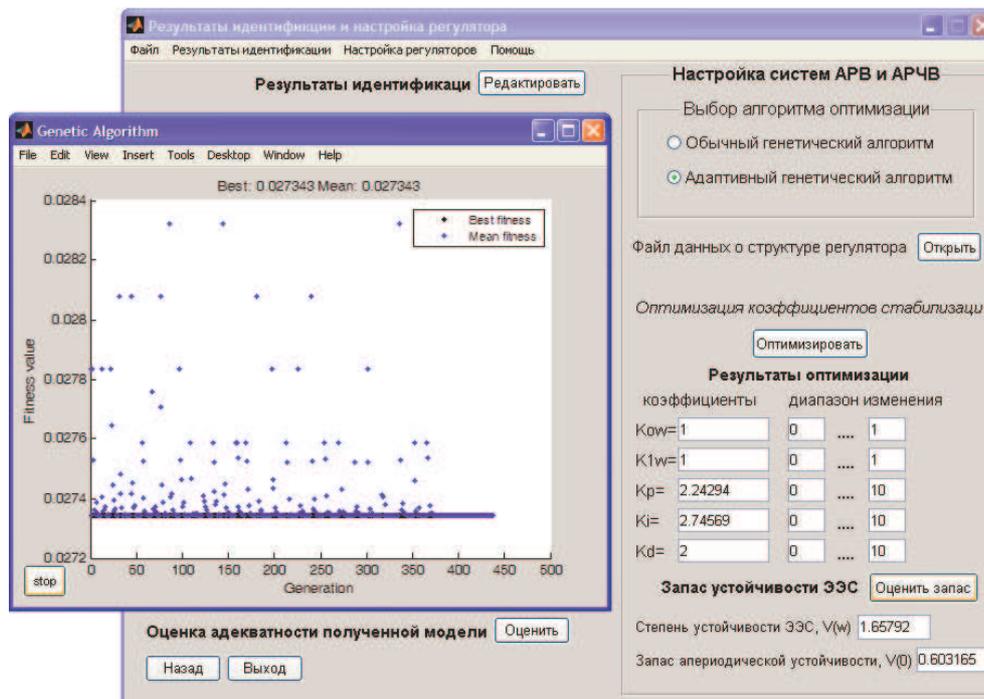


Рис. 6. Результаты поиска оптимальных коэффициентов настройки систем АРВ и АРЧВ.

Обычный ГА реализован в таких программах, как FlexTool пакета Genetic Algorithm, входящего в систему MATLAB, Evolver и других, описание которых можно найти в соответствующей литературе, например [10]. Недостатком работы обычного ГА, т. е. с опциями, предлагаемыми по умолчанию, является большая затрата компьютерного времени при поиске решения. Кроме того, поскольку ГА является стохастическим, т. е. производятся случайные выборки из начального диапазона поиска, то в итоге каждый раз получаются до некоторой степени различные результаты. В связи с этим в программном комплексе авторами реализован так называемый адаптивный ГА. Суть этого алгоритма заключается в двукратном выполнении ГА. На первом этапе для заданной целевой функции формируются диапазон поиска и начальная точка отсчета вблизи глобального решения. Затем, используя полученные на первом этапе настройки и гибридную функцию, формируется глобальное решение. При этом ГА выполняется с опциями, позволяющими быстро достичь оптимального

решения. Например, в качестве функции мутации используется адаптивный алгоритм (Adaptive feasible), а значение кроссоверной доли (Crossover fraction) устанавливается оптимальным (определяется на первом этапе алгоритма), что позволяет быстрее достичь глобального решения. Адаптивный ГА позволяет:

- 1) значительно уменьшить затраты компьютерного времени при поиске глобального решения;
- 2) увеличить точность результата при использовании гибридной функции, которая начинает процесс оптимизации с некой наиболее подходящей точки, полученной после применения ГА;
- 3) автоматизировать процесс выбора оптимальных опций для конкретной задачи.

В программном комплексе имеется возможность оценить запас устойчивости исследуемой ЭЭС при найденных коэффициентах настройки АРВ и АРЧВ. Запас устойчивости ЭЭС оценивается по показателю скорости изменения фазы характеристического годографа системы с помощью анализа кривой [6]:

$$V(\omega) = \left[ \frac{d\Phi_D(\omega)}{d\omega} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $\Phi_D(\omega)$  – фазово-частотная характеристика (ФЧХ), определяемая по частотному годографу системы  $D(j\omega)$ . При частоте, отражающей эквивалентную частоту собственных колебаний системы, характеристика (2) определяет действительную часть некоторого эквивалентного корня, по которой можно оценивать степень устойчивости системы. При этом оценка (2) при частоте, равной нулю, позволяет характеризовать удаленность системы от границы устойчивости и определять запас апериодической устойчивости ЭЭС в целом.

Разработанный программный комплекс предназначен для инженеров и научных работников, занимающихся вопросами обеспечения устойчивости ЭЭС.

**Применение и основные результаты, полученные с помощью программного комплекса.**

Применение отдельных модулей описанного программного комплекса для поиска оптимальных коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ дало хорошие результаты. В частности, при исследовании на моделях ЭЭС в среде MATLAB были определены оптимальные коэффициенты стабилизации систем АРВ и АРЧВ, позволяющие обеспечить высокие демпферные свойства и необходимый запас устойчивости [9, 11]. Кроме этого, как показали исследования, предлагаемая методика пассивной идентификации ЭЭС и настройки АРВ, используемая в программном комплексе, позволяет обеспе-

чить необходимую степень устойчивости не только относительно внешнего эквивалента системы, но и оказывает положительное влияние на внутригрупповые движения генераторов многомашинной станции [7].

Исследования, проводимые на физической модели, разработчиком которой является Инженерно-производственный центр «Учебная техника» г. Челябинска, также показали хорошие результаты применения программного комплекса. Физическая модель представляет собой автономную электрическую систему, содержащую генератор (синхронная машина), приводимый во вращение первичным двигателем – турбиной (машина постоянного тока), а также активную и индуктивную нагрузки. Изменяя напряжение на якоре машины постоянного тока, можно изменять частоту вращения ротора генератора. Измерение частоты производится с помощью специального блока через преобразователь угловых перемещений. Регулятор частоты вращения представляет собой идеальный ПИД-регулятор, реализованный в виде специальной программы. Любой сигнал модели через терминал, блок ввода-вывода цифровых сигналов и коннектор с помощью специальной многофункциональной платы для компьютеров 6025 серии E фирмы National Instruments можно получить в цифровом виде для дальнейшего использования. Исследуемая модель, структурная схема которой показана на рис. 7, может работать как в ручном, так и в автоматическом режиме управления.

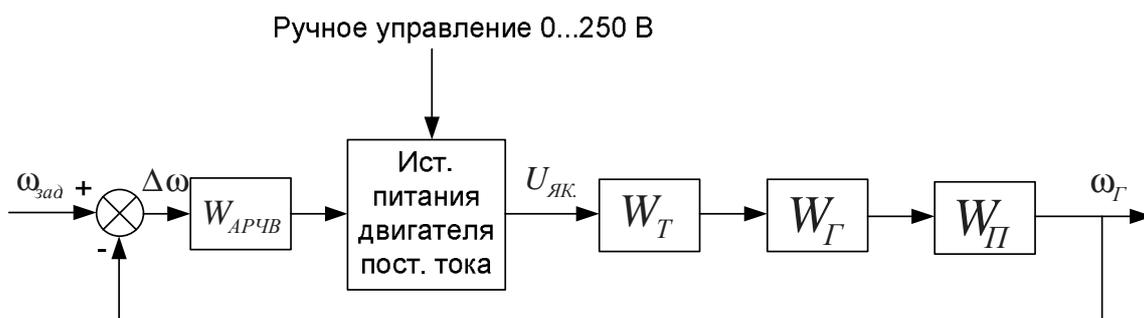


Рис. 7. Структурная схема физической модели.

Таблица 1

Степень устойчивости физической модели ЭЭС при различных настройках АРЧВ

Настройка АРЧВ	Степень устойчивости, $V(\omega_p)$	Запас аperiodической устойчивости, $V(0)$
По умолчанию ( $k_p = 0.05$ , $k_i = 0.035$ , $k_d = 0$ )	0.0437	1.1873
Оптимальная настройка ( $k_p = 1.296$ , $k_i = 0.572$ , $k_d = 0.242$ )	0.4468	2.2381

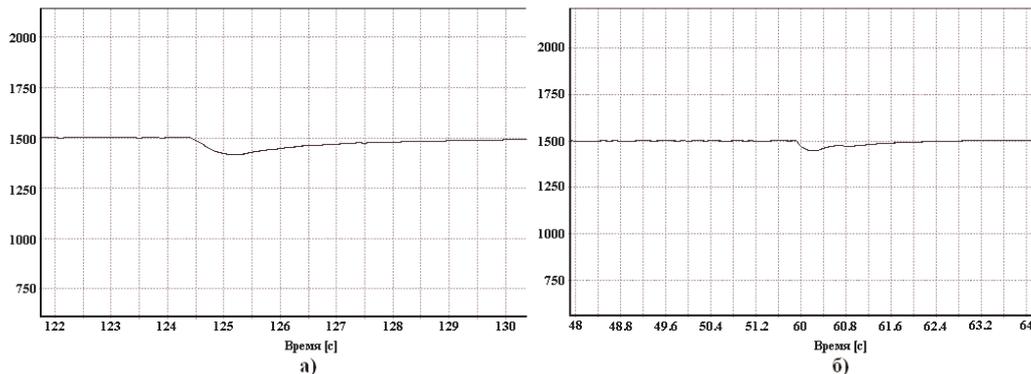


Рис. 8. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора генератора а) для настроек АРЧВ по умолчанию; б) для найденных оптимальных настроек.

Ниже приведены некоторые параметры исследуемой физической модели: 1) турбина (машина постоянного тока):  $P_{\text{ном}}=90$  Вт,  $U_{\text{як. ном}}=220$  В,  $n_{\text{ном}}=1500$  об/мин; 2) генератор (синхронная машина):  $P_{\text{ном}}=100$  Вт,  $\cos\varphi_{\text{ном}}=1$ ,  $U_{\text{ном}}=230$  В,  $n_{\text{ном}}=1500$  об/мин,  $T_j=1.97$  с,  $\delta_0=34^\circ$ ; 3) нагрузка:  $P=30$  Вт в каждой фазе,  $Q=10$  ВАр в каждой фазе.

Сравнительный анализ оптимальных настроек АРЧВ, полученных с помощью программного комплекса, и настроек, предлагаемых разработчиками модели по умолчанию, показывает повышение степени устойчивости исследуемой физической модели ЭЭС (таблица 1). Кроме этого, улучшились демпферные свойства системы, что видно из фрагментов осциллограмм изменения частоты вращения ротора генераторов после подключения дополнительной нагрузки (рис. 8).

**Выводы.** Таким образом, как показали многочисленные расчеты, разработанный программный комплекс, используя современные алгоритмы, позволяет достаточно быстро определять оптимальные

коэффициенты стабилизации систем АРВ и АРЧВ, а также оценить запас устойчивости исследуемой ЭЭС.

Разработанный программный комплекс будет полезен при реконструкции и модернизации систем АРВ и АРЧВ, анализе их влияния на устойчивую и надежную работу электростанций, а также позволит определить правила и рекомендации выбора оптимальных настроек регуляторов возбуждения в каждом конкретном режиме работы ЭЭС.

#### Литература

1. Методика координации настроек АРВ-СД в энергосистемах на основе экспериментальных данных / И. А. Груздева [и др.] // Тр. ЛПИ. 1988. № 427. С. 55-61.

2. Зеккель А. С., Есипович А. Х. Расчет колебательной устойчивости энергосистем и оптимизация настроек АРВ генераторов // Методы и программное

обеспечение для расчетов колебательной устойчивости энергосистем (ФЭО). Л., 1991. С. 36-43.

3. Особенности обработки реального сигнала при оперативном выборе настроек АРВ-СД генераторов / А. Н. Дойников [и др.] // Тр. ЛПИ. 1986. № 421. С. 32-41.

4. Оптимизация коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций (ARE&ARRF v. 1.00) / Булатов Ю. Н., Игнатьев И. В. Св. ГР № 2010615862 ; зарег. в реестре программ для ЭВМ 08.09.10. (Федер. служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам).

5. Бушуев В. В., Лизалек Н. Н., Новиков Н. Л. Динамические свойства энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.

6. Булатов Ю. Н., Игнатьев И. В. Непараметрическая идентификация системы турбина-генератор в условиях эксплуатации // Идентификация, измерение характеристик и имитация случайных сигналов (состояние, перспективы развития) : материалы конф. Новосибирск : КАНТ, 2009. С. 89–92.

7. Булатов Ю. Н., Игнатьев И. В. Модель электростанции в MATLAB для ис-

следования внутригруппового движения // Моделирование и информационные технологии : сб. науч. тр. (спец. вып.). Киев : НАН Украины, 2010. Т.1. С. 194-202.

8. Булатов Ю. Н., Игнатьев И. В. Алгоритм сглаживания эмпирической оценки комплексной передаточной функции при идентификации ЭЭС // Сб. науч. тр. ИрГУПС Иркутск, 2010. Вып. 17. С. 18-23.

9. Булатов Ю. Н., Игнатьев И. В. Оптимизация коэффициентов регулирования системы АРЧМ с использованием генетического алгоритма // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №1 (21). С. 150-153.

10. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы : пер. с польск. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 452 с.

11. Булатов Ю. Н., Игнатьев И. В. Определение оптимальных коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ по непараметрическим моделям турбогенераторов электростанций // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 3. С. 70-74.