

УДК 621.311, 681.5

Применение вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации*

Ю.Н. БУЛАТОВ¹, А.В. КРЮКОВ²

¹ 665709, РФ, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: bulatovyura@yandex.ru

² 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения; РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: and_kryukov@mail.ru

В последнее время возрастают требования к функционированию электроэнергетических систем, направленные на повышение надежности электроснабжения потребителей, качества электроэнергии и энергоэффективности. Реализация этих требований осуществляется на основе целенаправленного внедрения технологий интеллектуальных сетей (Smart Grid), которые позволяют наиболее рационально использовать энергетические ресурсы.

Концепция Smart Grid предусматривает создание развитой системы автоматического управления режимами ЭЭС на базе активных устройств и установок распределенной генерации (РГ), для эффективной работы которых необходимо решение задачи оптимальной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов, входящих в состав этих установок.

В статье приведено описание методики применения вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов для согласованной настройки АРВ и АРЧВ генераторов применительно к установке РГ, работающей в системе электроснабжения железной дороги. Показана эффективность применения технологии вейвлет-преобразования для выделения шума регулятора, используемого при идентификации и получении с помощью частотных передаточных функций экспериментальной структурно-математической модели установки РГ. Предлагаемый адаптивный ГА позволяет достаточно быстро решать задачу поиска оптимальных коэффициентов регулирования АРВ и АРЧВ, в том числе и с учетом их взаимного влияния. Описанные в работе алгоритмы реализованы на языке MATLAB в специализированном программном комплексе, предназначенном для идентификации ЭЭС и оптимизации настроек АРВ и АРЧВ генераторов.

Результаты компьютерного моделирования, полученные на модели СЭЖД с установками РГ в MATLAB, показывают эффективность предлагаемой методики, обеспечивающей необходимый запас устойчивости и хорошее демпфирование электромеханических колебаний в системе.

* Статья получена 13 января 2016 г.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, установки распределенной генерации, вейвлет-преобразование, идентификация, оптимизация настроек автоматических регуляторов, генетические алгоритмы, автоматический регулятор возбуждения, автоматический регулятор частоты вращения, согласованная настройка

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-2-7-22

ВВЕДЕНИЕ

В ведущих странах мира предъявляются высокие требования к электроэнергетическим системам (ЭЭС), направленные на повышение эффективности, надежности электроснабжения потребителей и качества электроэнергии. Реализация этих требований осуществляется путем масштабного внедрения технологий интеллектуальных сетей (Smart Grid), которые позволяют наиболее рационально использовать энергетические ресурсы. В России концепция Smart Grid развивается в направлении создания интеллектуальных ЭЭС с активно-адаптивными сетями [1] и предполагает повышение эффективности управления режимами, надежности и живучести за счет формирования развитой системы автоматического управления, построенной с использованием интеллектуальных технологий, а также на основе применения установок распределенной генерации (РГ) и активных устройств для регулирования режимов. Эти установки и устройства могут объединяться в сетевые энергетические кластеры, связанные с основной сетью ЭЭС с помощью вставок постоянного тока [2].

Установки РГ, работающие в составе сетевых энергетических кластеров, могут использовать следующие источники энергии:

- солнечные батареи, ветрогенерирующие установки, топливные элементы и т. д.;
- малые ТЭЦ, работающие на основе газотурбинных и парогазовых технологий;
- низконапорные и безнапорные малые ГЭС.

Технологии РГ могут применяться для снятия пиковых нагрузок, стабилизации напряжения и частоты, снижения потерь электроэнергии. Их применение особенно эффективно в сетях с пониженным качеством электроэнергии, например, в системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД). В таких системах имеется возможность использования недогруженных паровых котельных для выработки дополнительных объемов электроэнергии с помощью синхронных и асинхронизированных генераторов, приводимых во вращение паровыми винтовыми или роторными объемными машинами.

В сетевом энергетическом кластере, в составе которого имеются синхронные генераторы, могут возникать переходные процессы, сопровождающиеся колебаниями напряжения и частоты. Для стабилизации указанных параметров используются системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ), от настройки которых зависит качество демпфирования возникших колебаний. Согласованное действие АРВ и АРЧВ особенно эффективно в пиковых и аварийных ситуациях. Поэтому при настройке систем АРВ и АРЧВ следует учитывать их взаимосвязь. Проведенные исследования на модели СЭЖД с установками РГ [2] показали, что согласованно настроенные АРВ и АРЧВ позволяют улучшить демпферные

свойства системы, повысить качество электроэнергии и надежность электроснабжения потребителей.

Ниже рассматривается методика применения вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов (ГА) в предлагаемой авторами методике согласованной настройки АРВ и АРЧВ генераторов установок РГ.

1. МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ПРИ СОГЛАСОВАННОЙ НАСТРОЙКЕ АРВ И АРЧВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

На рис. 1 показан обобщенный алгоритм оптимальной настройки АРВ и АРЧВ генераторов установки РГ, включающий следующие этапы:

- идентификация объекта управления с использованием вейвлет-преобразования для выделения шума регуляторов;
- оптимизация настроек регуляторов с помощью ГА;
- оценка запаса устойчивости.

Этап идентификации (рис. 1) предполагает получение математического описания исследуемой системы в виде характеристического полинома, для чего предлагается использовать метод непараметрической идентификации, предложенный в работе [3]. Согласно этому методу, для получения частотных передаточных функций каналов основных и перекрестных связей генератора на базе априорной информации о процессе находятся отношения соответствующих спектров выходных и входных сигналов системы автоматического регулирования, которая представляется двухсвязной и имеет два выходных параметра – частоту вращения ротора ω и напряжение генератора U_g , два входных – сигналы управления турбиной и возбуждением, поступающие от АРВ и АРЧВ (рис. 2).

Предлагаемая модель системы «турбина–генератор» при использовании в качестве АРЧВ пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, а в качестве АРВ – микропроцессорного АРВ сильного действия, также реализующего ПИД закон, может быть представлена следующими частотными передаточными функциями, обозначенными на рис. 2:

$W_{\text{АРЧВ}}$ – частотная передаточная функция АРЧВ, определяемая по выражению

$$W_{\text{АРЧВ}} = \left(k_p + \frac{k_i}{0,1j\omega} + \frac{jk_d\omega}{j\omega + 1} \right) \frac{1}{0,01j\omega + 1}, \quad (1)$$

где k_p, k_i, k_d – искомые коэффициенты настройки АРЧВ;

W_T – частотная передаточная функция турбины, для паровой турбины без учета промежуточного перегрева пара можно принять

$$W_T = \frac{1}{0,2j\omega + 1};$$

W_{APB}^{ω} – частотная передаточная функция канала APB по частоте:

$$W_{APB}^{\omega} = \frac{1 + 0,5j\omega}{0,5j\omega} \left(\frac{2k_{0\omega}j\omega}{(2j\omega + 1)(0,02j\omega + 1)} + \frac{0,05k_{1\omega}j\omega}{0,05j\omega + 1} \right); \quad (2)$$

W_{APB}^U – частотная передаточная функция канала APB по напряжению:

$$W_{APB}^U = \frac{1 + 0,5j\omega}{0,5j\omega} \left(k_{0u} - \frac{0,02k_{1u}j\omega}{0,06j\omega + 1} \right), \quad (3)$$

где k_{0u} , k_{1u} , $k_{0\omega}$ и $k_{1\omega}$ – коэффициенты настройки каналов APB;

W_B – частотная передаточная функция возбудителя (для тиристорной

системы возбуждения можно принять $W_B = \frac{1}{0,001j\omega + 1} \times \frac{1}{0,025j\omega + 1}$);

W_{Γ} – матричная передаточная функция генератора.



Рис. 1. Алгоритм оптимальной настройки APB и APЧВ генераторов установки РГ

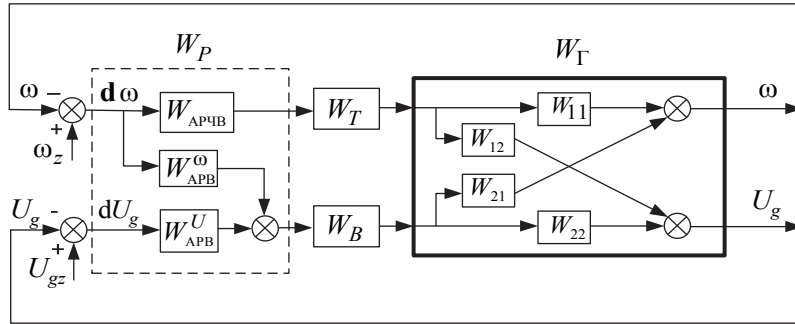


Рис. 2. Структура системы автоматического регулирования «турбина–генератор»

Таким образом, предлагаемая процедура идентификации предполагает составление характеристического полинома замкнутой регулируемой системы «турбина–генератор» по следующему выражению:

$$D^M(j\omega) = \det [E + W_{об}(j\omega)W_p(j\omega)],$$

где E – единичная матрица; $W_{об}(j\omega)$ – матричная передаточная функция объекта регулирования, которую предлагается определять экспериментально; $W_p(j\omega)$ – матричная передаточная функция регулятора, учитывающая взаи-

мосвязь АРВ и АРЧВ:
$$W_p(j\omega) = \begin{bmatrix} W_{АРЧВ}(j\omega) & W_{АРВ}^{\omega}(j\omega) \\ 0 & W_{АРВ}^U(j\omega) \end{bmatrix}.$$

Для получения точных частотных передаточных функций объекта регулирования при идентификации целесообразно использовать тестовые широкополосные сигналы. Так как вмешательство в процесс эксплуатации систем электроснабжения нежелательно, то предлагается использовать подход, в котором тестовое воздействие осуществляется на основе выделенного с помощью вейвлет-преобразования шума регулятора [3].

Вейвлет-преобразование, позволяющее осуществлять локализацию сигнала как по частоте, так и по времени, можно представить следующим образом [4]:

$$W(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt,$$

где $f(t)$ – исходный сигнал; $\psi(t)$ – вейвлет, принятый за базисный; τ – сдвиг; s – масштаб; t – время.

При вейвлет-анализе сигнал раскладывается на составляющие, представляющие сглаженный сигнал и колебания, определяемые детализирующими коэффициентами, которые обрабатываются при выделении шума. В реальных системах амплитуды шумов меньше амплитуд основного сигнала. Поэтому для удаления шума можно сделать нулевыми значения коэффициентов, которые не превышают заданное пороговое значение. Выбор порогового уровня определяет качество шумоподавления, которое оценивается в

виде отношения сигнал / шум. Оптимальное значение уровня порога можно найти с помощью критерия Штейна [5].

Предлагаемая процедура выделения шума регулятора с помощью вейвлет-преобразования включает следующие этапы:

1) выбирается базовый вейвлет и уровень разложения N ; формируется вейвлет-разложение сигнала $f(t)$ до уровня N ;

2) для каждого уровня задается порог и осуществляется обработка детализирующих коэффициентов;

3) производится вейвлет-реконструкция, использующая первоначальные аппроксимирующие коэффициенты уровня N и модифицированные детализирующие коэффициенты уровней $1 \dots N$;

4) выделяется шум сигнала, который используется для идентификации: $f_v(t) = f(t) - f_w(t)$, где $f_w(t)$ – полезная составляющая сигнала, получаемая в результате вейвлет-преобразования; $f_v(t)$ – шум.

На рис. 3 показана эффективность применения технологии вейвлет-преобразования для выделения шума регулятора, используемого при идентификации: исходный сигнал регулятора, содержащий шум; скейлингграмма исходного зашумленного сигнала регулятора, неровности контурных линий которой указывают на наличие шума; выделенный полезный сигнал и шум регулятора. В качестве базового использовался вейвлет Добеши.

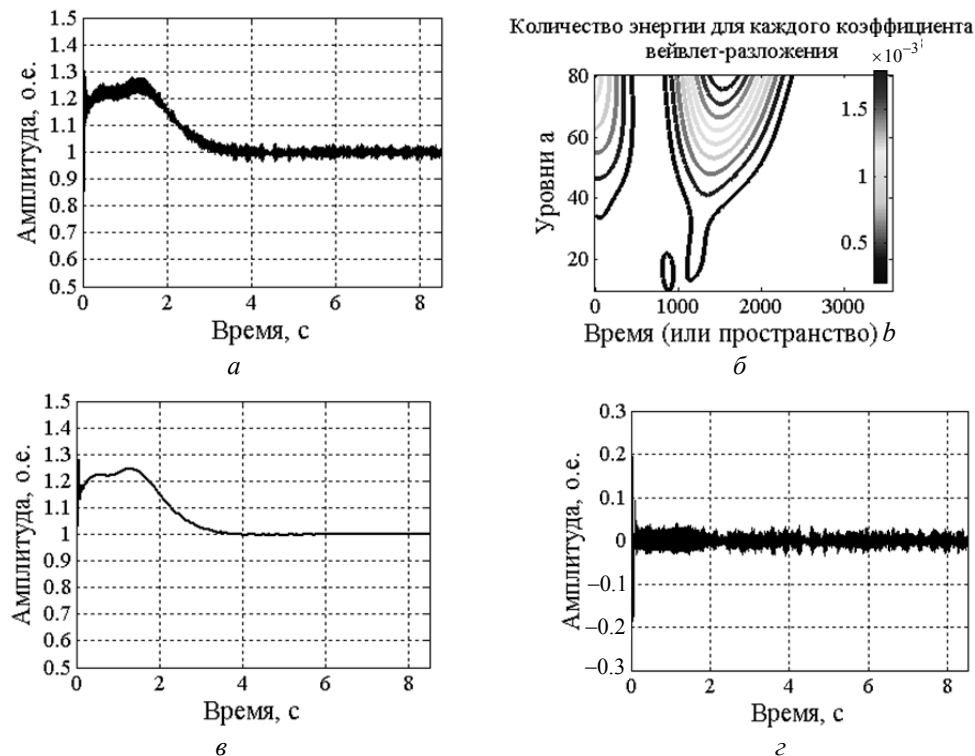


Рис. 3. Выделение шума регулятора с помощью технологии вейвлет-преобразования: а – исходный сигнал регулятора с шумом; б – скейлингграмма исходного зашумленного сигнала регулятора; в – выделенный полезный сигнал; г – шум регулятора

Следующий этап предлагаемой методики предполагает определение оптимальных настроек АРВ и АРЧВ генератора установки РГ. В качестве критерия оптимизации предлагается использовать следующий функционал [3]:

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

где $e(j\omega) = D^{\text{ж}}(j\omega) - D^{\text{м}}(j\omega)$ – рассогласование между желаемым и модельным наборами коэффициентов характеристических полиномов; ω – текущее значение частоты из диапазона $[0; \Omega]$, определяющего «полосу пропускания» системы. В качестве желаемых полиномов могут использоваться полиномы Баттерворта или др.

В связи с тем, что величина рассогласования $e(j\omega) = \text{Re}_e(\omega) + j\text{Im}_e(\omega)$ является комплексной, возникают затруднения при минимизации функционала (4). Поэтому целесообразно использовать линейную свертку:

$$J = \frac{1}{2} J_{\text{Re}} + \frac{1}{2} J_{\text{Im}} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где J_{Re} , J_{Im} – критерии, отвечающие близости годографов в областях действительных и мнимых значений.

Критерии J_{Re} и J_{Im} формируются так:

$$\begin{aligned} J_{\text{Re}} &= \int_0^{\Omega} (\text{Re } D^{\text{ж}}(\omega) - \text{Re } D^{\text{м}}(\omega))^2 d\omega, \\ J_{\text{Im}} &= \int_0^{\Omega} (\text{Im } D^{\text{ж}}(\omega) - \text{Im } D^{\text{м}}(\omega))^2 d\omega. \end{aligned} \quad (6)$$

Минимизируемый функционал имеет большое число локальных экстремумов, поэтому поиск глобального минимума в представленной задаче целесообразно выполнять с помощью генетического алгоритма, представляющего процедуру поиска оптимума, основанную на механизмах естественного отбора и наследования. Основная идея ГА впервые была предложена Дж. Холландом в 1975 г. [6]. Дальнейшее развитие эта идея получила в работах его учеников Гольдберга и Де Йонга [7, 8].

Решению задач оптимизации настроек автоматических регуляторов с помощью ГА посвящены работы, направленные на реализацию различных модификаций ГА [9–11] и применение известных вариантов ГА для настройки систем автоматического регулирования [12–16], а также на исследование эффективности ГА и улучшение его поисковых свойств [11, 17]. Отличие данной работы заключается в том, что ГА применяется для решения задачи согласования настроек АРВ и АРЧВ генераторов установок РГ, а также в использовании предлагаемого адаптивного ГА.

Эффективность применения ГА в оптимизационных задачах электроэнергетики определяют следующие его особенности [2, 18]: легкая програм-

мируемость; отсутствие необходимости в вычислении производных целевой функции; поиск решения не из единственной точки, а из некоторой популяции; быстрая генерация достаточно «хороших» в смысле оптимальности решений и др.

Следует отметить, что при неудачном задании начального приближения может значительно увеличиться время поиска глобального оптимума. Для решения этой проблемы в работе [3] предлагается адаптивный генетический алгоритм. Классический ГА применительно к задаче оптимизации настроек АРВ и АРЧВ генераторов установок РГ может быть представлен схемой, приведенной на рис. 4.

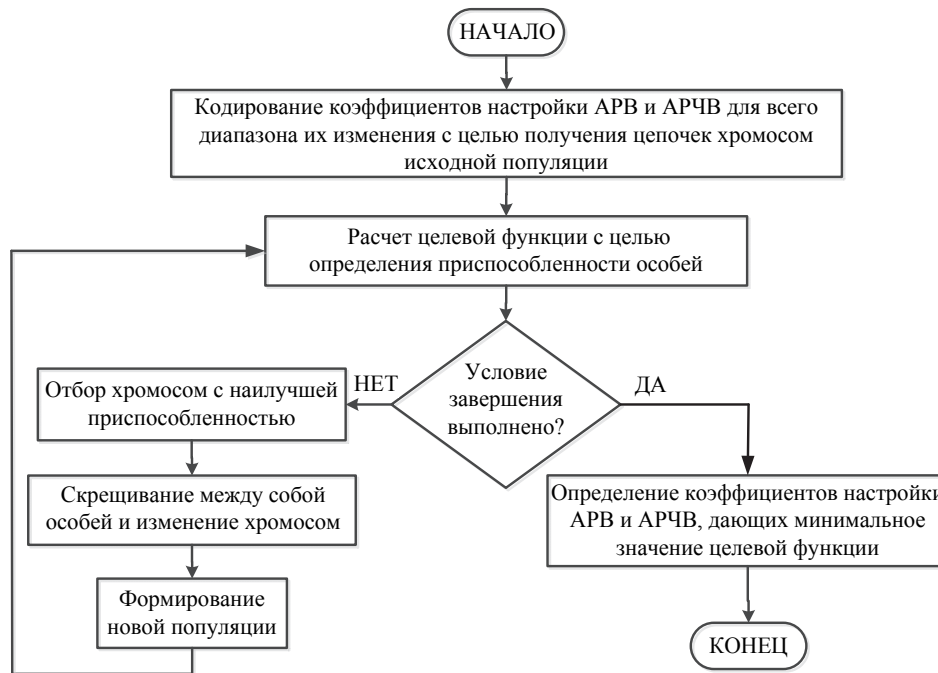


Рис. 4. Блок-схема классического генетического алгоритма применительно к задаче оптимизации настроек АРВ и АРЧВ турбогенераторов установок РГ

Среди систем, реализующих ГА с современными операторами селекции, кроссовера и мутации, можно выделить программу Flex Tool пакета Genetic Algorithm, входящего в систему MATLAB. Flex Tool взаимодействует со средой MATLAB, что дает большие возможности по использованию ГА при разработке своих собственных приложений.

Выбор метода кодирования является важным этапом применения ГА для поиска оптимальных коэффициентов настройки регуляторов и может влиять на быстродействие и точность результата. Применяемый в данной работе ГА, реализованный в системе MATLAB, использует метод вещественного кодирования, при котором отдельный ген представляет собой один из искомых параметров в виде вещественного числа, а их совокупность – хромосому в виде возможного набора коэффициентов настройки регуляторов. Из цепочки хромосом случайным образом формируются особи и определяется исходная популяция.

В настоящее время исследователи ГА предлагают различные методы отбора, кроссовера и мутации [19, 20], среди которых необходимо отметить следующие: турнирный отбор; элитные методы отбора, гарантирующие «выживание» лучших членов популяции; двухточечный и равномерный кроссовер и др.

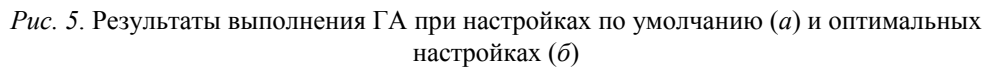
Как показали исследования, результаты которых представлены в работе [3], определение исходной популяции, вероятности кроссоверной доли (вероятности скрещивания) и алгоритма мутации для целевой функции (4) оказывает большое влияние на конечный результат и может приводить к неоднозначному решению и большим затратам процессорного времени. Кроме того, поскольку ГА является стохастическим, то в итоге его применения к одной и той же задаче оптимизации могут иметь место различающиеся результаты.

Для получения лучших результатов работы ГА и автоматического определения семейства исходной популяции с наиболее подходящей вероятностью скрещивания и мутации предлагается использовать адаптивный алгоритм, обеспечивающий оптимальные настройки ГА для конкретной целевой функции [3, 18]. Суть этого алгоритма заключается в двукратном выполнении ГА. На первом этапе формируется диапазон поиска и начальная точка отсчета. При этом достаточно осуществить 10–100 итераций ГА в зависимости от сложности функции. Затем, на основе использования полученных на первом этапе настроек и дополнительных процедур, формируется глобальное решение. Например, конечное семейство особей, определенное на первом этапе, принимается за исходную популяцию, а в качестве функции мутации используется адаптивный алгоритм (Adaptive feasible), реализованный в программе Flex Tool, и устанавливается оптимальное значение вероятности кроссоверной доли (Crossover fraction), определенное на первом этапе алгоритма.

В предлагаемом адаптивном ГА используется турнирный метод отбора и двухточечный кроссовер, так как эти методы являются достаточно эффективными. Кроме того, для уменьшения количества итераций ГА и уточнения глобального решения после процедуры ГА применяется метод Нелдера–Мида, реализованный в системе MATLAB, который, как показали исследования, является наиболее приемлемым в задачах поиска оптимальных настроек APB и APЧВ.

Таким образом, адаптивность предлагаемого алгоритма заключается в автоматическом выборе исходной популяции, оптимального значения вероятности скрещивания и мутации для конкретной задачи. Процедура адаптивного генетического алгоритма была реализована на языке MATLAB в программном комплексе [21], позволяющем достаточно быстро находить оптимальные настройки APB и APЧВ, в том числе и с учетом их взаимного влияния.

На рис. 5 показаны результаты работы ГА с настройками по умолчанию (случайное формирование исходной популяции, вероятность скрещивания 0,8, стандартный алгоритм мутации с долей отбираемых компонентов хромосом 0,01) и предлагаемого адаптивного алгоритма при поиске оптимальных коэффициентов регулирования APB и APЧВ генератора установки РГ.



2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в системе MATLAB на модели СЭЖД, структурная схема которой показана на рис. 6. Рассматривался район электроснабжения нетяговых потребителей с установкой РГ, которая включала два синхронных генератора (по 2,5 МВ·А каждый), питающих потребителей мощностью 5 МВ·А. На рис. 7 показана схема модели рассматриваемой СЭЖД, реализованной на основе средств Simulink и SimPowerSystems.



ТП – тяговая подстанция; ЭПС – электроподвижной состав; КП – контактный провод;
ДЧ – датчик частоты вращения; ОВ – обмотка возбуждения; ТН – трансформатор напряжения;
В – выключатель

Для генераторов использовались модели синхронных машин, приводимых во вращение паровыми турбинами, которые моделировались апериодическими звеньями первого порядка с постоянной времени T_m . Для тиристор-

ного возбудителя использовалось аperiодическое звено с коэффициентом k_e , постоянной времени T_e и блоком ограничения напряжения. Принимались следующие значения параметров: $T_m = 0,2$ с; $k_e = 1$; $T_e = 0,025$ с. Для регулирования частоты и напряжения применялись модели АРЧВ и микропроцессорного АРВ с передаточными функциями (1), (2) и (3). Измерение параметров осуществлялось с помощью осциллографов и стандартных блоков для определения уровней несимметрии и гармонических искажений.

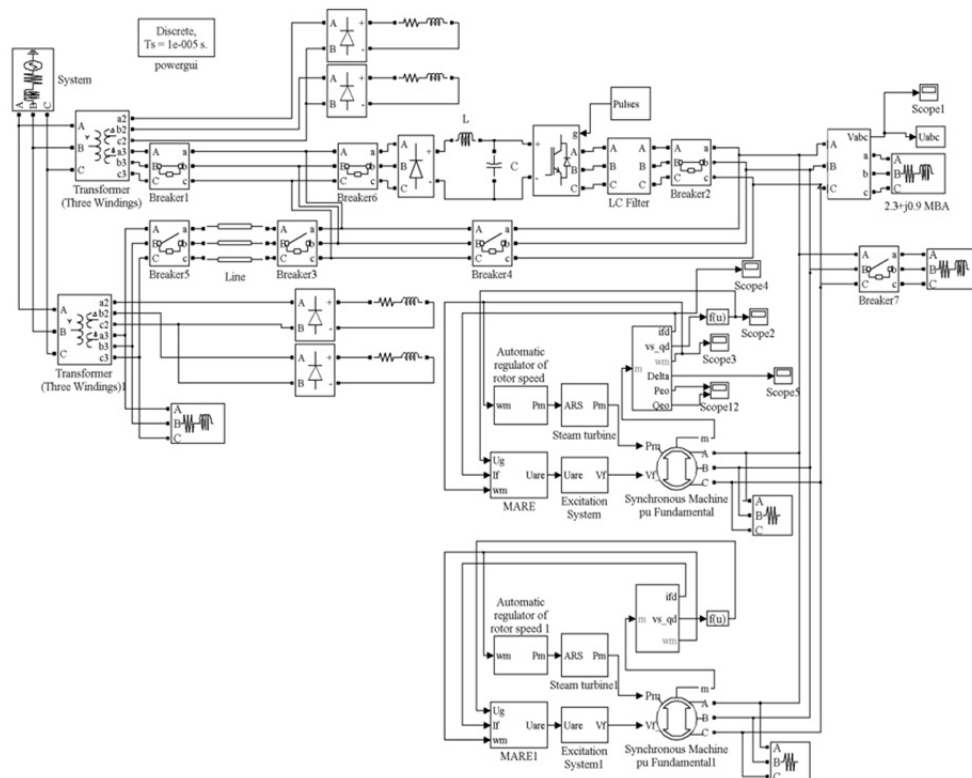


Рис. 7. Схема модели исследуемой электроэнергетической системы в MATLAB

Полученные результаты показали, что предлагаемая методика применения вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов позволяет определить оптимальную согласованную настройку АРВ и АРЧВ, обеспечивающую устойчивость системы и хорошие демпферные свойства при отключении основного питания со стороны ТП1 в момент времени 7 с, при срабатывании автоматики включения резерва (АВР) через 0,5 с и включении воздушной линии 6 кВ для питания от ТП2 (см. рис. 6). При неоптимальной настройке регуляторов система теряет устойчивость и наблюдается режим самораскачивания. Соответствующие осциллограммы частоты вращения ротора генератора установки РГ и напряжения на шинах нетягового потребителя представлены на рис. 8 и 9.

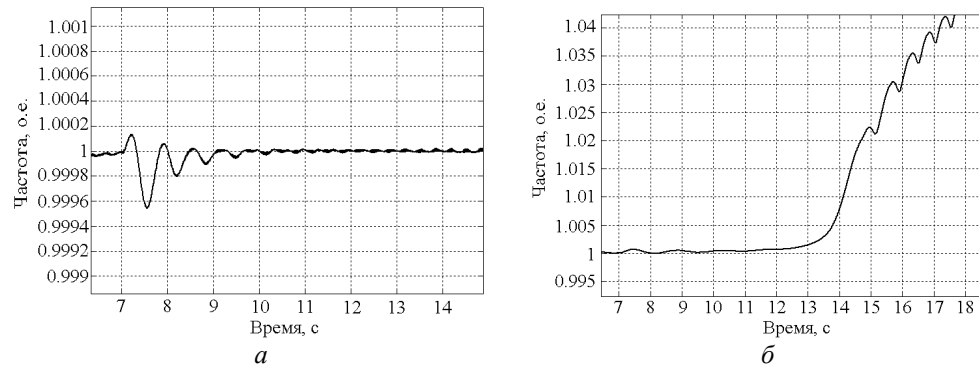


Рис. 8. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора генератора при переключении питания с ТП1 на ТП2:

a – применение АРВ и АРЧВ с оптимальными настройками; *б* – неоптимальная настройка АРВ и АРЧВ

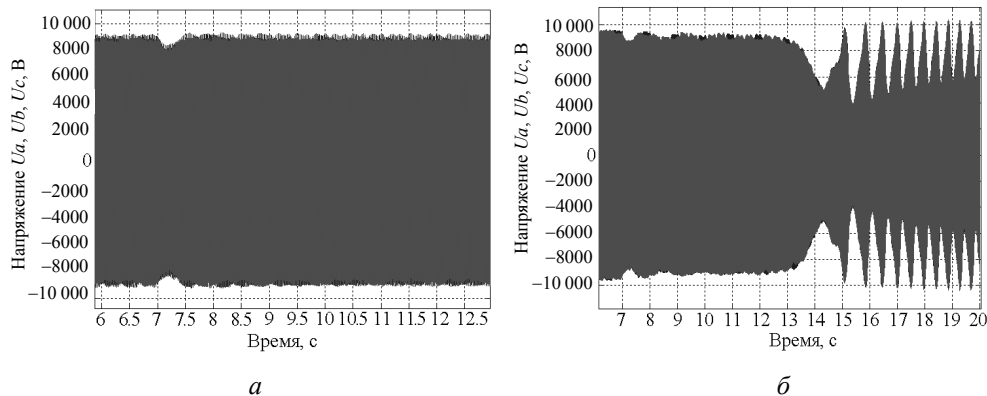


Рис. 9. Осциллограммы изменения напряжения на шинах нетягового потребителя при переключении питания с ТП1 на ТП2:

a – применение АРВ и АРЧВ с оптимальными настройками; *б* – неоптимальная настройка АРВ и АРЧВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика применения вейвлет-преобразования позволяет идентифицировать такой сложный динамический объект, как синхронный генератор установки РГ, работающей в СЭЖД, и получить экспериментально его структурно-математическую модель, описываемую с помощью частотных передаточных функций. Использование адаптивного ГА позволяет достаточно быстро решить задачу оптимизации коэффициентов настройки регуляторов установки распределенной генерации.

В результате проведенных расчетов с применением вейвлет-преобразования и генетического алгоритма на компьютерных моделях ЭЭС с установками РГ были получены оптимальные коэффициенты настройки АРВ и АРЧВ, обеспечивающие как необходимый запас устойчивости, так и хорошее демпфирование электромеханических колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / под ред. В.Е. Фортова, А.А. Макарова. – М.: ФСК ЕЭС, 2012. – 235 с.
2. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электро-снабжения железных дорог. – Иркутск: ИрГУПС, 2015. – 205 с.
3. Булатов Ю.Н. Методика согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов электростанций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2012. – 22 с.
4. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам: пер. с англ. – М.: РХД, 2001. – 464 с.
5. Проскуряков А.Ю., Белов А.А., Кротов Ю.А. Алгоритмы автоматизированных систем экологического мониторинга промышленных производств. – М.; Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 121 с.
6. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. – Cambridge, MA: MIT Press, 1992. – 211 p.
7. Goldberg D.E. Simple genetic algorithms and the minimal deceptive problem // Genetic Algorithms and Simulated Annealing. – Los Altos, CA: Morgan Kaufman, 1987. – Ch. 6. – P. 74–88.
8. Goldberg D.E. Genetic algorithm in search, optimization and machine learning. – Reading, MA: Addison-Wesley Longman Publ., 1989. – 322 p.
9. Saad M.S., Jamaluddin H., Darus I.Z.M. Implementations of PID-controller tuning using differential evolution and genetic algorithm [Electronic resource] // International Journal of Innovate Computing, Information and Control. – 2012. – Vol. 8, N 11. – P. 7761–7779. – Available at: <http://www.ijicic.org/ijicic-11-07073.pdf> (accessed: 06.06.2016).
10. Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of improved genetic algorithm in PID controller parameters optimization [Electronic resource] // Telkomnika. – 2013. – Vol. 11, N 3. – P. 1524–1530. Available at: <http://www.iaesjournal.com/online/index.php/TELKOMNIKA/article/viewFile/2301/pdf> (accessed: 06.06.2016).
11. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации в управлении // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 3/4 (7/8). – С. 78–85.
12. PID-controller tuning optimization with genetic algorithms in servo systems / A.Y. Jaen-Cuellar, R.de J. Romero-Troncoso, L. Morales-Velazquez, R.A. Osornio-Rios // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Vol. 10. – P. 324. – doi: 10.5772/56697.
13. Ayman A.A. PID parameters optimization using genetic algorithm technique for electrohydraulic servo control system // Intelligent Control and Automation. – 2011. – N 2. – P. 69–76. – doi: 10.4236/ica.2011.22008.
14. Slavov T., Roeva O. Application of genetic algorithm to tuning a PID controller for glucose concentration control [Electronic resource] // WSEAS Transactions on Systems. – 2012. – Vol. 11, N 7. – P. 223–233. – Available at: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/systems/2012/55-286.pdf> (accessed: 07.06.2016).
15. Дунаев М.П., Куцый Н.Н., Лукьянов Н.Д. Параметрическая оптимизация системы управления насосной станцией с помощью генетического алгоритма // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 8. – С. 194–205. – doi: 10.7463/0514.0721172.
16. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Оптимизация коэффициентов регулирования системы АРЧМ с использованием генетического алгоритма // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 1 (21). – С. 150–153.
17. Труханов К.А., Попов Д.Н. Выбор оптимальных параметров гидропривода вентилятора для системы охлаждения двигателя транспортного средства // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – № 7. – С. 91–100. – doi: 10.7463/0713.0590873.
18. Сорокин Д.В. Выбор настроек АРВ генераторов сложной энергосистемы на основе применения генетического алгоритма и методов модального анализа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2009. – 24 с.
19. Michalewicz Z. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. – 3rd rev. and extended ed. – Berlin; Heidelberg: SpringerVerlag, 1996. – 387 p.
20. Еремеев А.В. Разработка и анализ генетических и гибридных алгоритмов для решения задач дискретной оптимизации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Омск, 2000. – 16 с.

21. Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Программный комплекс для идентификации электро-энергетических систем и оптимизации коэффициентов стабилизации автоматических регуляторов возбуждения // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 4 (8). – С. 106–113.

Булатов Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент Братского государственного университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем. Имеет более 100 публикаций. E-mail: bulatovyura@yandex.ru

Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог. Имеет более 600 публикаций. E-mail: and_kryukov@mail.ru

Application of the wavelet transform and genetic algorithms for tuning automatic regulators of distributed generators*

Yu.N. BULATOV¹, A.V. KRYUKOV²

¹ *Bratsk State University, 40, Makarenko St., Bratsk, 665709, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: bulatovyura@yandex.ru*

² *Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk State Transport University, 15, Chernishevskaya St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, D.Sc.(Eng.), professor. E-mail: and_kryukov@mail.ru*

Recently, requirements on the operation of electric power systems (EPS) aimed at improving the reliability of power supply to the consumer, power quality and energy efficiency have increased. To satisfy these requirements intelligent network technologies (Smart Grid) which allow the most efficient use of energy resources have purposefully been introduced. The implementation of these requirements is based on the deliberate introduction of smart grids technologies (Smart Grid) which allow the most efficient use of energy resources.

The Smart Grid concept envisages the creation of a developed system of automatic control of EPS modes on the basis of active devices and distributed generators (DG). To provide their effective operation it is necessary to solve the problem of optimal tuning of automatic exciting regulators (AER) and automatic speed regulators (ASR) of these generators

The article describes the methods of using the wavelet transform and genetic algorithms (GA) for consistent tuning of AERs and ASRs of distributed generators operating in the railway power supply system (RPSS). It shows the efficiency of the wavelet transform technology in separating the noise of the regulator used in identification and reception as well as in obtaining the DG experimental structural and mathematical model using frequency transfer functions. The proposed adaptive GA makes it possible to solve the problem of finding optimal coefficients of AER and ASR control taking into account their cross effect. The described algorithms are implemented in the MATLAB language in a specialized software package designed for the EPS identification and optimization of AER and ASR generator settings.

The computer simulation results obtained on the RPSS model with DGs in MATLAB show the efficiency of the proposed method which provides the necessary stability margin and good damping of electromechanical oscillations in the system.

Keywords: electric power systems; distributed generators, wavelet transform, identification, optimization of automatic regulator settings, genetic algorithms, automatic exciting regulator, automatic speed regulator, harmonized settings

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-2-7-22

* Received 13 January 2016.

REFERENCES

1. Fortov V.E., Makarov A.A., eds. *Kontsepsiya intellektual'noi elektroenergeticheskoi sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoi set'yu* [The concept of intellectual power system of Russia with actively adaptive network]. Moscow, FSK EES Publ., 2012. 235 p.
2. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. *Setevye klasteri v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog* [Network clusters in railway power supply systems]. Irkutsk, ISTU Publ., 2015. 205 p.
3. Bulatov Yu.N. *Metodika soglasovannoi nastroyki avtomaticheskikh regulyatorov vozbuzhdeniya i chastoty vrashcheniya generatorov elektrostantsii*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [The methodology of the harmonized settings of automatic controllers of excitation and speed of generator power plants. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Irkutsk, 2012. 22 p.
4. Daubechies I. *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia, PA, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 357 p. (Russ. ed.: Dobeshi I. *Desyat' lektzii po veyvletam*. Moscow, RKhD Publ., 2001. 464 p.).
5. Proskuryakov A.Yu., Belov A.A., Kropotov Yu.A. *Algoritmy avtomatizirovannykh sistem ekologicheskogo monitoringa promyshlennykh proizvodstv* [Algorithms of the automated systems of environmental monitoring industrial productions]. Moscow, Berlin, Direkt-Media Publ., 2015. 121 p.
6. Holland J.H. *Adaptation in natural and artificial systems*. Cambridge, MA, MIT Press, 1992. 211 p.
7. Goldberg D.E. Simple genetic algorithms and the minimal deceptive problem. *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*. Los Altos, CA, Morgan Kaufman, 1987, ch. 6, pp. 74–88.
8. Goldberg D.E. *Genetic algorithm in search, optimization and machine learning*. Reading, MA, Addison-Wesley Longman Publ., 1989. 322 p.
9. Saad M.S., Jamaluddin H., Darus I.Z.M. Implementations of PID-controller tuning using differential evolution and genetic algorithm. *International Journal of Innovate Computing, Information and Control*, 2012, vol. 8, no. 11, pp. 7761–7779. Available at: <http://www.ijicic.org/ijicic-11-07073.pdf> (accessed 06.06.2016)
10. Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of improved genetic algorithm in PID controller parameters optimization. *Telkomnika*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 1524–1530. Available at: <http://www.iaesjournal.com/online/index.php/TELKOMNIKA/article/viewFile/2301/pdf> (accessed 06.06.2016)
11. Sabanin V.R., Smirnov N.I., Repin A.I. Modifitsirovannyi geneticheskii algoritim dlya zadach optimizatsii v upravlenii [Modified genetic algorithm for optimal control problems]. *Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh*, 2004, no. 3–4 (7–8), pp. 78–85.
12. Jaen-Cuellar A.Y., Romero-Troncoso R. de J., Morales-Velazquez L., Osornio-Rios R.A. PID-controller tuning optimization with genetic algorithms in servo systems. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, vol. 10, p. 324. doi: 10.5772/56697
13. Ayman A.A. PID parameters optimization using genetic algorithm technique for electrohydraulic servo control system. *Intelligent Control and Automation*, 2011, no. 2, pp. 69–76. doi: 10.4236/ica.2011.22008
14. Slavov T., Roeva O. Application of genetic algorithm to tuning a PID controller for glucose concentration control. *WSEAS Transactions on Systems*, 2012, vol. 11, no. 7, pp. 223–233. Available at: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/systems/2012/55-286.pdf> (accessed 07.06.2016)
15. Dunaev M.P., Kutsyi N.N., Luk'yanov N.D. Parametricheskaya optimizatsiya sistemy upravleniya nasosnoi stantsiei s pomoshch'yu geneticheskogo algoritma [Parametric optimization of control systems pumping station by the genetic algorithms]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana – Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 8, pp. 194–205. doi: 10.7463/0514.0721172
16. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V. Optimizatsiya koeffitsientov regulirovaniya sistemy ARChM s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma [Optimization of the coefficients of control system ARFP using genetic algorithm]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technology. System analysis. Modeling*, 2009, no. 1 (21), pp. 150–153.
17. Trukhanov K.A., Popov D.N. Vybora optimal'nykh parametrov gidroprivoda ventilyatora dlya sistemy okh-lazhdeniya dvigatelya transportnogo sredstva [Selection of the optimum parameters for the hydraulic drive of a fan of the vehicle's engine cooling system]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana – Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 7, pp. 91–100. doi: 10.7463/0713.0590873

18. Sorokin D.V. *Vybor nastroek ARV generatorov slozhnoi energosistemy na osnove primeneniya geneticheskogo algoritma i metodov modal'nogo analiza*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [The choice of settings ARE generators complex power system on the basis of application of genetic algorithm and modal analysis methods. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2009. 24 p.
19. Michalewicz Z. *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. Berlin, Heidelberg, SpringerVerlag, 1996. 387 p.
20. Eremeev A.V. *Razrabotka i analiz geneticheskikh i gibridnykh algoritmov dlya resheniya zadach diskretnoi optimizatsii*. Avtoref. diss. kand. fiz.-mat. nauk [Development and analysis of genetic and hybrid algorithms for solving problems of discrete optimization. Author's abstract of PhD phys. and math. sci. diss.]. Omsk, 2000. 16 p.
21. Bulatov Yu.N., Ignat'ev I.V. Programmnyi kompleks dlya identifikatsii elektroenergeticheskikh sistem i optimizatsii koeffitsientov stabilizatsii avtomaticheskikh regulyatorov vzbuzhdeniya [Software complex for identification of electrical power systems and optimization of the coefficients of the stabilization of automatic excitation regulators]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies*, 2010, no. 4 (8), pp. 106–113.