

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 004.8, 621.3.07

## МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКАМИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Ю.Н. БУЛАТОВ \*, А.В. КРЮКОВ \*\*,\*\*\*

\* Братский государственный университет

\*\* Иркутский государственный университет путей сообщения

\*\*\* Иркутский национальный исследовательский технический университет

*В настоящее время осуществляется переход электроэнергетики на новую технологическую платформу, которая основывается на концепции интеллектуальных электрических сетей (smart grid). Важными элементами таких сетей являются установки распределённой генерации, в том числе реализованные на основе возобновляемых источников энергии. Централизованная система управления многочисленными установками распределённой генерации становится неэффективной из-за необходимости передачи больших потоков информации в центр для принятия решения. Повышение эффективности управления возможно путем использования периферийных систем, реализованных на основе агентного подхода.*

*В статье предложена структура мультиагентной системы управления (МАСУ) мощностью установок распределённой генерации, реализованных на основе турбогенераторов. Описаны основные функции агентов, образующих диалоговую сеть. Приведена система дифференциальных уравнений, описывающих процессы в системе электроснабжения с установками распределенной генерации.*

*В среде имитационного моделирования AnyLogic разработана модель предлагаемой МАСУ. Результаты моделирования показали положительные эффекты, достигаемые при наличии МАСУ, продемонстрировали адаптивность системы к изменяющимся условиям и применимость мультиагентных технологий при создании активно-адаптивных сетей интеллектуальных систем электроснабжения.*

*Ключевые слова: интеллектуальные системы электроснабжения, мультиагентная система управления, установки распределённой генерации, моделирование.*

## Введение

Задачи интеллектуального управления и распределённого взаимодействия в динамических системах привлекают в последнее время внимание всё большего числа исследователей [1, 2], что связано с широким применением мультиагентных технологий в различных областях, например, при ликвидации перегрузок в сетях связи, в задачах выравнивания групп спутников, при управлении движением мобильных роботов и др. В энергетике мультиагентные технологии находят применение при создании информационных систем, разработке среды для переговоров участников рынка электроэнергии, в задачах обработки телеинформации при оценивании состояния электроэнергетических систем (ЭЭС) [3...6]. Это связано с переходом электроэнергетики на новую технологическую платформу, которая основывается на концепции интеллектуальных электрических сетей (*smart grid*), обозначенной в России как интеллектуальные электроэнергетические системы с активно-адаптивной сетью (ИЭЭС ААС) [3]. Эта концепция предусматривает наличие развитой системы автоматического управления, построенной с использованием интеллектуальных технологий, а также широкое применение в электрических сетях активных устройств для регулирования режимов.

Важными элементами ИЭЭС ААС являются установки распределённой генерации (РГ), в том числе реализованные на основе нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Централизованная система управления многочисленными установками РГ становится неэффективной из-за необходимости передачи больших потоков информации в центр для принятия решения. Решение этой проблемы возможно путём использования периферийных систем управления на основе агентного подхода.

В статье предложена структура мультиагентной системы управления (МАСУ) установками распределённой генерации, реализованными на основе турбогенераторов.

**Характеристика мультиагентных систем.** Мультиагентные технологии позволяют реализовать принципиально новый подход к решению задач управления интеллектуальными энергосистемами и системами электроснабжения с установками распределённой генерации. В отличие от классических подходов, состоящих в поиске детерминированных алгоритмов для поиска наилучшего решения проблемы, в мультиагентных технологиях такое решение находится в результате взаимодействия большого числа программно-аппаратных модулей (агентов).

Мультиагентная система управления может быть определена как система, включающая несколько взаимодействующих интеллектуальных агентов, обладающих следующими характеристиками [3...6]:

- автономность, заключающаяся в том, что агенты, хотя бы частично, являются независимыми;
- ограниченность представления: у каждого из агентов нет полной информации об объекте управления и внешней среде, так как объект настолько сложен, что полное знание о нём не имеет практического значения для агента;
- децентрализация: отсутствуют агенты, осуществляющие управление всем объектом.

В мультиагентных системах могут проявляться свойства самоорганизации и сложного поведения даже при простых стратегиях действий отдельных агентов.

Применение МАСУ в электроэнергетике позволит сформировать распределённую систему управления реального времени, реализующую взаимодействие персонала ИЭЭС ААС с автоматизированными и автоматическими комплексами на основе программно-аппаратных интеллектуальных агентов.

**Структура МАСУ установок распределённой генерации.** При использовании МАСУ в электроэнергетике необходимо учитывать специфику работы электрооборудования и индивидуально подходить к разработке МАСУ отдельных объектов. Например, при широком использовании установок распределённой генерации, находящихся в различных точках сети, должен быть предусмотрен агент-координатор, согласовывающий работу агентов отдельных установок РГ. В качестве такого агента может выступать виртуальная электростанция (*Virtual Power Plant – VPP*) [6], объединяющая различные установки РГ, находящиеся в разных точках сети. Это позволит осуществить надёжную интеграцию установок РГ в существующие централизованные системы электроснабжения.

В предлагаемой МАСУ установок РГ (рис.1) агенты должны иметь следующий базовый набор свойств:

- активность – способность к организации и реализации воздействий на объект управления и другие агенты;
- реактивность – восприятие состояния объекта через датчики и другие агенты на основе их сообщений;
- автономность – относительная независимость от окружающей среды, а также наличие «свободы воли» у некоторых агентов, обуславливающей собственное поведение;
- общительность, обеспечиваемая развитыми протоколами коммуникации и позволяющая отдельному агенту решать свои задачи совместно с другими агентами;
- целенаправленность, предполагающая наличие собственных источников мотивации.

Условия реализации агентом определённого поведения создают специальные устройства (рецепторы), которые воспринимают воздействия внешней среды и исполнительные органы (эффекторы), действующие на среду, а также процессор, включающий блок обработки информации и память. В предлагаемой системе в качестве рецепторов используются датчики, а также измерители и анализаторы показателей качества электроэнергии. Эффекторами являются программируемые контроллеры, реализующие автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ) генераторов, входящих в состав установок РГ. Процессор МАСУ представляет собой сервер сбора, обработки и хранения информации<sup>1</sup>, откуда конкретный агент в случае сбоя может получить необходимые данные.

В предлагаемой МАСУ основные агенты обладают свойством взаимозаменяемости и в случае сбоя отправляют соответствующее сообщение другим агентам, что обеспечивает живучесть системы.

Основные функции агентов предлагаемой МАСУ и их связей (рис. 1), образующих диалоговую сеть можно сформулировать так:

1. *Агент-координатор (виртуальная электростанция)* подаёт команды агентам задания мощности (АЗМ) в виде графиков нагрузок агрегатов, а также принимает сообщения от АЗМ и агентов диагностики установок РГ, в соответствии с которыми может корректировать свои задания. Агент-координатор, выступающий в виде виртуальной электростанции, может иметь внутренние агенты:

- *агент прогнозирования*, осуществляющий прогноз электропотребления и потерь мощности в сети;
- *агент оптимизации генерации*, осуществляющий выбор оптимальной загрузки установок РГ по критериям обеспечения заданного напряжения и частоты в узлах сети;

---

<sup>1</sup> Эта информация включает следующие сегменты: структура МАСУ, измеренные параметры установок РГ, функции и задачи агентов, база знаний и т.д.

– агент рынка электроэнергии, участвующий в формировании тарифов и осуществляющий возможность использования мощности установок РГ вне VPP.

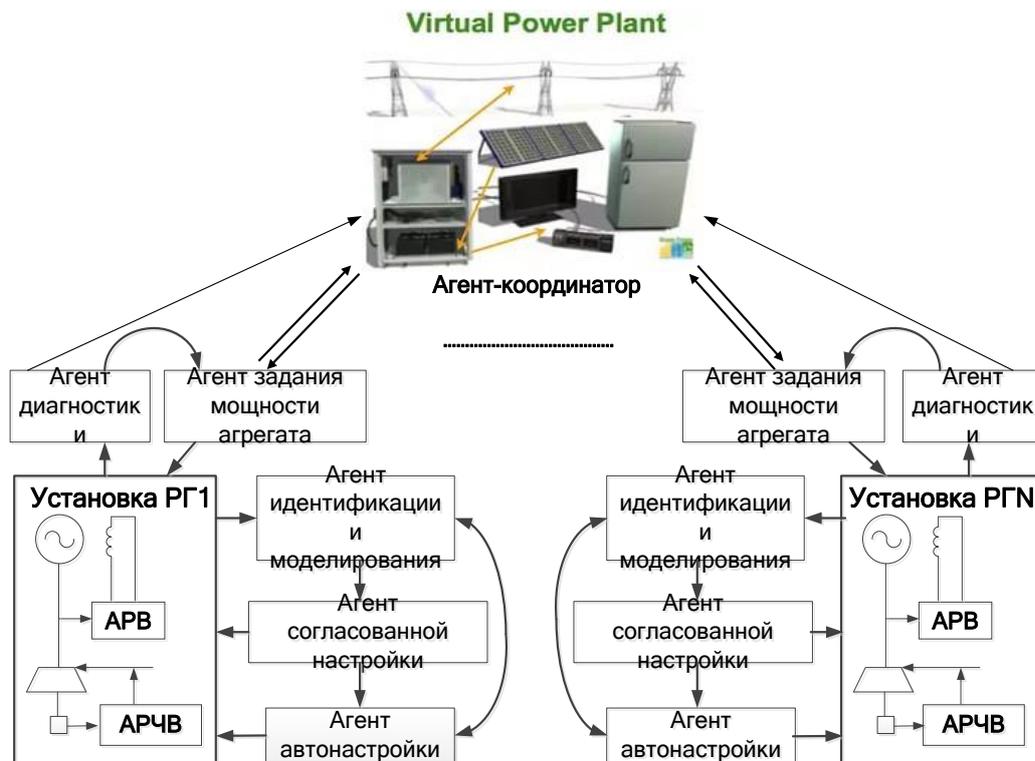


Рис. 1. Структура МАСУ установками РГ, находящимися в разных узлах сети: АРВ – автоматический регулятор возбуждения; АРЧВ – автоматический регулятор частоты вращения

2. *Агент диагностики* выполняет непрерывную диагностику агрегата с использованием нейронных сетей. Посылает сообщения агенту-координатору и АЗМ в случае выхода диагностируемых параметров за допустимые пределы.

3. *Агент задания мощности* принимает команды от агента-координатора и воздействует на механизм управления турбиной, а также в случае необходимости корректирует задание, сообщая об этом агенту-координатору: «не могу выполнить задание, провожу корректировку». Агент задания мощности принимает сообщения от агента диагностики и ограничивает мощность агрегата.

4. *Агент идентификации и моделирования* (АИМ) при изменении режима работы агрегата выполняет процедуру идентификации с использованием вейвлет-преобразования для выделения шума регуляторов [7] и построения виртуальной модели агрегата для текущего режима, а также для моделирования, с целью определения оптимальных настроек АРВ и АРЧВ, и для проверки необходимости изменения текущих настроек АРВ и АРЧВ.

5. *Агент согласованной настройки* использует модель, полученную агентом идентификации и моделирования для определения оптимальной согласованной настройки АРВ и АРЧВ генератора для текущего режима с использованием процедуры генетического алгоритма [7...13] и передаёт полученные значения коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ агенту автонастройки, а в случае сбоя последнего – непосредственно программируемым контроллерам агрегата.

6. *Агент автонастройки*, использующий технологии нечётких систем управления, накапливает базу знаний настроек АРВ и АРЧВ для различных режимов работы агрегата [14, 15], проверяет эти настройки на виртуальной модели с помощью агента идентификации и моделирования и, в случае получения положительного эффекта, изменяет текущие настройки АРВ и АРЧВ.

Формальное описание МАСУ установок РГ можно представить в виде кортежа:

$$MASM = \{ AF, E, P, S \},$$

где  $AF$  – семейство агентов;  $E$  – вектор множества состояний окружающей среды;  $P$  – вектор-функция восприятия;  $S$  – вектор-функция изменения состояния (поведения).

Предлагаемая МАСУ позиционируется в качестве самоорганизующейся системы со способностью агентов инициировать диалог по результатам анализа не предписанной заранее ситуации, работая в условиях неопределённости.

**Моделирование МАСУ установок РГ.** За последнее десятилетие было разработано более ста программных платформ, использующих агентное моделирование, среди которых можно выделить систему *AnyLogic* [16], сочетающую в себе все основные виды имитационного моделирования:

- системную динамику, позволяющую на основе дифференциальных уравнений разработать динамическую модель объекта управления с регуляторами;
- дискретно-событийное (процессное) моделирование, учитывающее возможности появления событий, кардинально влияющих на алгоритм работы МАСУ, и позволяющее моделировать процессы передачи информации;
- агентное моделирование, позволяющее исследовать поведение агентов и выявлять, как оно определяет поведение всей системы в целом.

Предлагаемая МАСУ установок РГ, оснащенных турбогенераторами с АРВ и АРЧВ, находящимися в различных точках сети, была реализована в виде модели в системе *AnyLogic*. Структура модели установки РГ с АРВ и АРЧВ, разработанная с помощью библиотеки системной динамики платформы *AnyLogic*, показана на рис. 2. На рис. 2 окружностями обозначены динамические переменные, которые могут изменяться в процессе моделирования. Квадратами обозначены так называемые накопители, позволяющие реализовать процесс дифференцирования. Численные значения этих параметров представлены для исходного установившегося режима.

В основу модели заложена следующая система уравнений в относительных единицах:

1) уравнение движения ротора турбогенератора:

$$\frac{d\Delta\omega(t)}{dt} = \frac{1}{T_J} \left[ P_{\Gamma}(\omega_0 + \Delta\omega(t)) - \frac{E_q(i_f) U_G}{x_G} \sin(\delta_0 + \Delta\delta) \right],$$

где  $T_j$  – постоянная инерции турбогенератора;  $P_{\Gamma}$  – механическая мощность (момент) турбины;  $E_q$  – ЭДС генератора;  $U_G$  – напряжение генератора;  $x_G$  – сопротивление генератора;  $\omega_0$  – синхронная частота вращения ротора;  $\delta_0$  – значение угла нагрузки (угла между напряжением и ЭДС генератора) при установившемся режиме;

2) уравнение напряжения на шинах генератора:

$$\dot{U}_G = \dot{E}_q - jI_G x_G,$$

где  $I_G$  – ток генератора;

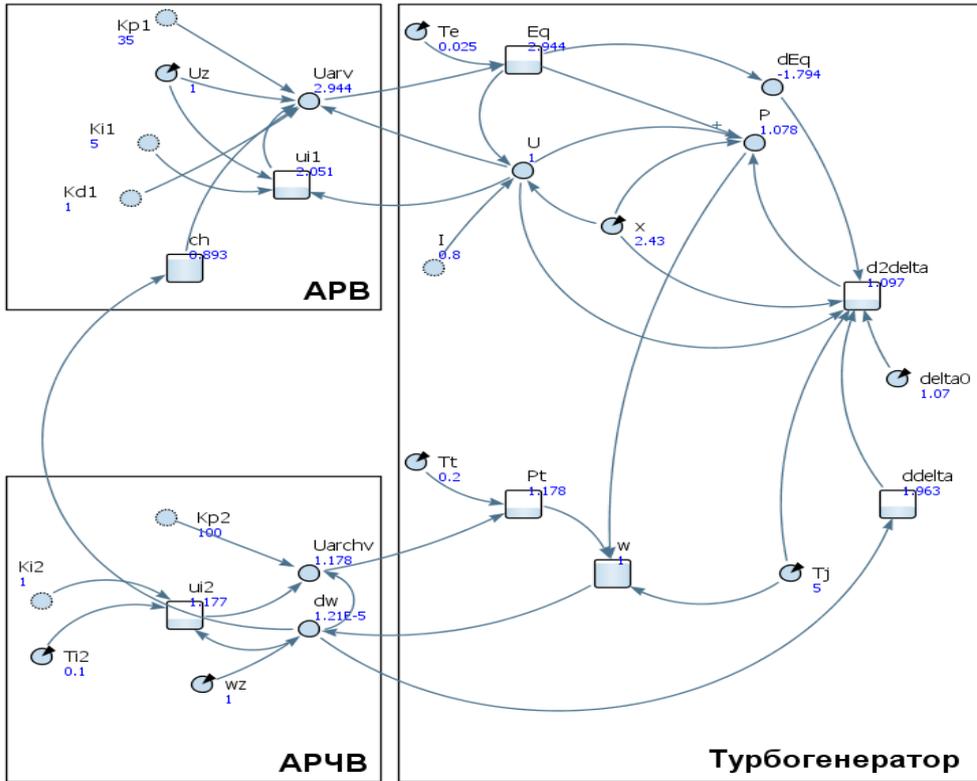


Рис. 2. Структура модели установки РГ с АРВ и АРЧВ в AnyLogic

3) уравнение возбудителя генератора:

$$\frac{dE_q}{dt} = \frac{1}{T_e} (U_{\text{АРВ}} - E_q),$$

где  $T_e$  – постоянная времени обмотки возбуждения;  $U_{\text{АРВ}}$  – управляющий сигнал АРВ;

4) уравнение турбины:

$$\frac{dT_T}{dt} = \frac{1}{T_T} (U_{\text{АРЧВ}} - T_T),$$

где  $T_T$  – постоянная времени турбины;  $U_{\text{АРЧВ}}$  – управляющий сигнал АРЧВ;

5) уравнения, определяющие отклонение угла нагрузки дельта:

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{x_G \cdot T_J} \left[ -\Delta E_q U_G \sin(\delta_0) - \frac{d \Delta \delta}{dt} x_G D - \Delta \delta \right], \quad \frac{d \Delta \delta}{dt} = \Delta \omega,$$

где  $\Delta \delta$  – малое изменение угла нагрузки;  $D$  – демпферный момент;

6) уравнение АРВ:

$$U_{\text{АРВ}} = \Delta U_G \cdot (K_{p1} + u_{i1}) + u_{d1}, \quad \frac{du_{i1}}{dt} = \frac{K_{i1}}{T_{i1}}, \quad \frac{d \Delta \omega}{dt} = \frac{u_{d1}}{K_{d1}},$$

где  $\Delta U_G$  – отклонение напряжения генератора от заданного значения;  $K_{p1}$ ,  $K_{i1}$ ,  $K_{d1}$  – коэффициенты настройки АРВ;

7) уравнение АРЧВ:

$$U_{APЧВ} = \Delta\omega \cdot (K_{p2} + u_{i2}), \quad \frac{du_{i2}}{dt} = \frac{K_{i2}}{T_{i2}},$$

где  $K_{p2}$ ,  $K_{i2}$  – коэффициенты настройки АРЧВ.

Уравнение АРВ описывает пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор) со стабилизацией по частоте вращения ротора генератора. Данное уравнение является упрощенным аналогом модели унифицированного АРВ сильного действия (АРВ-СД). Уравнение АРЧВ описывает пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор).

Параметры турбогенератора, АРВ и АРЧВ при моделировании принимались следующими:  $T_j = 5$  с,  $x_G = 2,43$  о.е.,  $T_e = 0,025$  с,  $T_T = 0,2$  с,  $T_{i1} = T_{i2} = 0,1$  с.

Коэффициенты настройки АРВ и АРЧВ для исходного нагрузочного режима были определены методом согласованной настройки [7, 10, 11] и составили: для АРВ  $K_{p1} = 35$ ,  $K_{i1} = 5$ ,  $K_{d1} = 1$ ; для АРЧВ  $K_{p2} = 100$ ,  $K_{i2} = 1$ .

Модели агентов разрабатывались в соответствии с приведённым выше описанием их основных функций. В качестве примера на рис. 3 показана структура модели агента-координатора, определяющая алгоритм его работы. Этот агент характеризуется динамическими переменными ( $P1$  и  $P2$ ), определяющими мощности установок РГ. Алгоритм вычисления  $P1$  и  $P2$  выполняется в соответствии с диаграммой его состояний (*statechart*) через агенты прогнозирования, оптимизации генерации и рынка электроэнергии. Координатор может изменять своё состояние и задания по мощности для установок РГ при получении сообщений от других агентов. Для этого он оснащён портами связи (*port*, *port1*) и сетью (*connections*, *agentLink*). Элемент *event* имитирует появление какого-либо события<sup>2</sup>, кардинально изменяющего поведение агентов МАСУ (рис. 3).

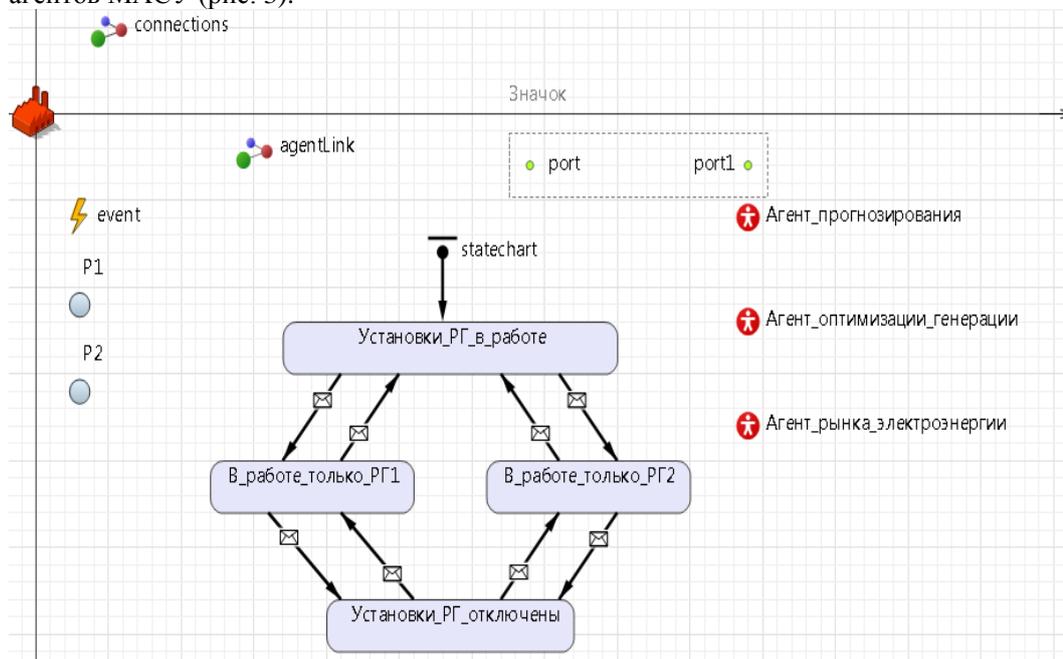


Рис. 3. Структура модели агента-координатора

<sup>2</sup> Например, срабатывание устройств релейной защиты или значительное ухудшение показателей качества электроэнергии.

Структура связей агентов в модели показана на рис.4. Агент диагностики имеет рецепторы, позволяющие измерять параметры турбогенератора, а агент задания мощности оснащён эффектором, по которому изменяется выработка активной мощности турбогенератора.

Агент идентификации и моделирования с помощью своих рецепторов фиксирует управляющие сигналы, поступающие от АРВ и АРЧВ, а также напряжение и частоту, выполняя процедуру идентификации, описанную в работах [11...15]. Агенты согласованной настройки и автонастройки через соответствующие эффекторы изменяют коэффициенты настройки АРВ и АРЧВ при изменении режима работы турбогенератора. Агенты связаны каналами передачи информации через порты и соединители, образующие сеть (рис. 4), по которой они могут передавать сообщения друг другу.

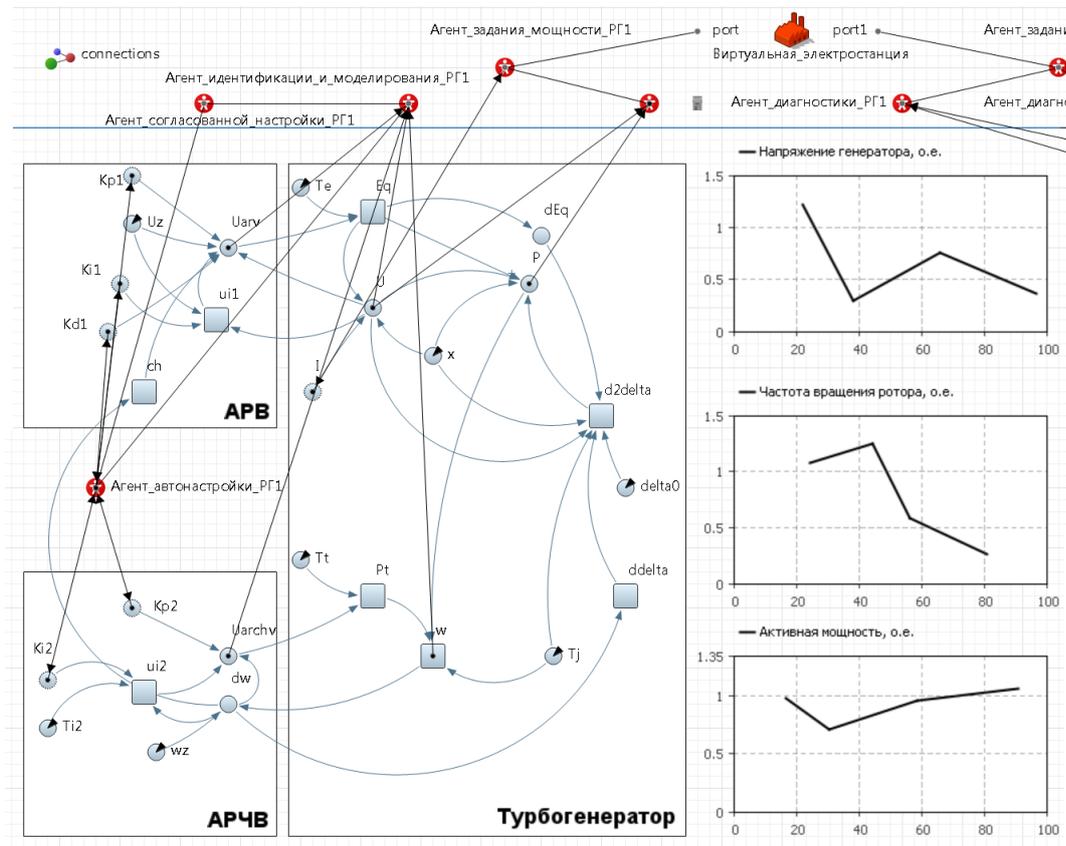


Рис. 4. Фрагмент модели МАСУ установок РГ с показанными связями агентов

С использованием разработанной модели был проведён эксперимент для оценки эффективности взаимодействия агентов при изменении мощности одной из установок РГ. При этом от агента-координатора было отправлено сообщение АЗМ об изменении генерируемой активной мощности. В результате полученных положительных ответов от агента диагностики АЗМ изменил величину активной мощности турбогенератора. На основании этого агент автонастройки провёл уточнение коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ. Результаты работы модели в виде

зависимостей от времени напряжения, частоты вращения ротора и генерируемой активной мощности представлены на рис. 5.

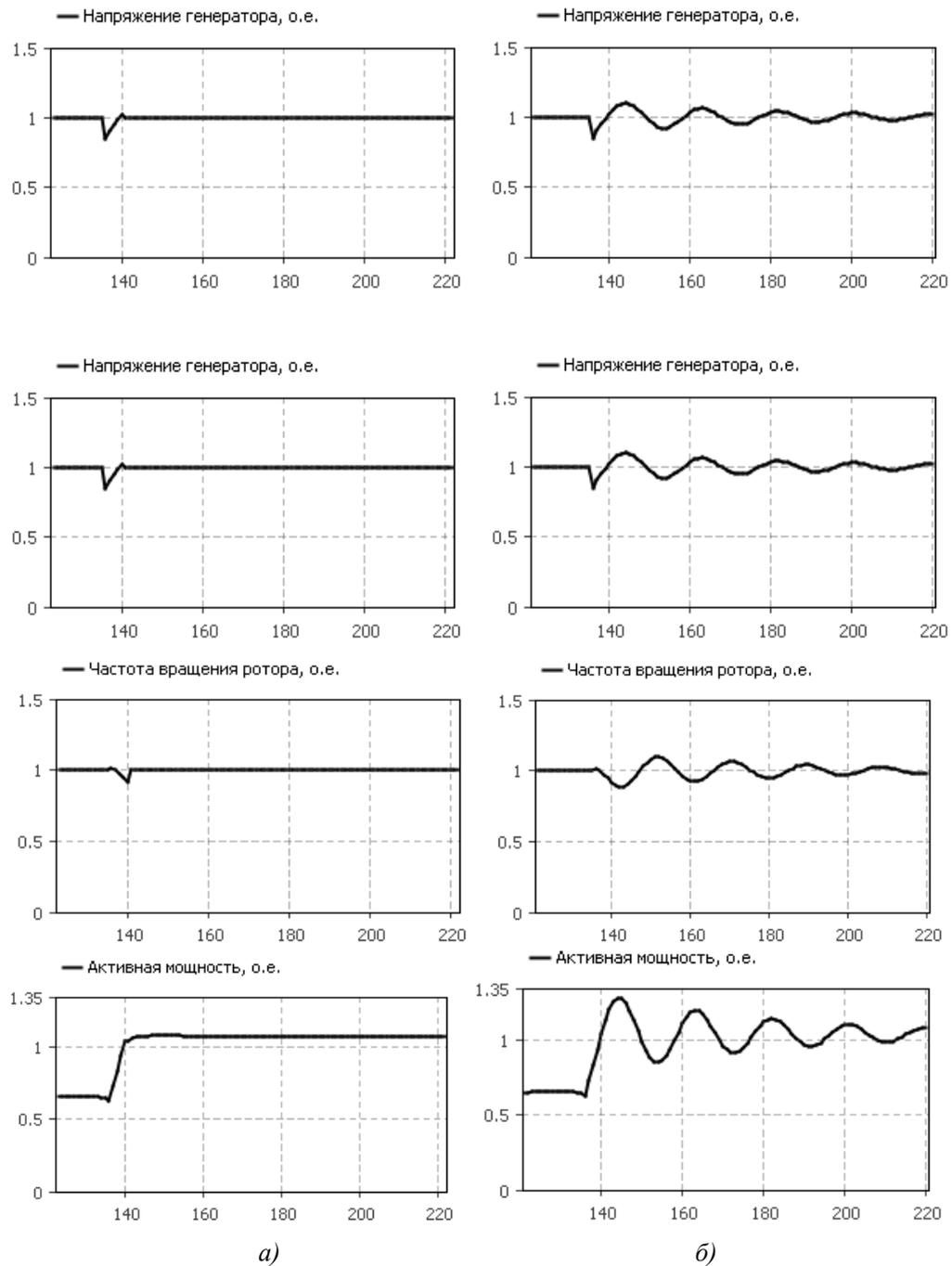


Рис.5. Изменение напряжения генератора, частоты вращения и генерируемой активной мощности при изменении нагрузки: а) при работе МАСУ и изменении коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ; б) при выведенной из работы МАСУ

Результаты моделирования показывают положительный эффект МАСУ, заключающийся в значительном снижении времени регулирования и величины перерегулирования и улучшении качества переходного процесса. Из рис. 5 видно, что изменение настроек регуляторов выполняется с некоторым запаздыванием, обусловленным ожиданием заметного изменения мощности установки РГ, заложенным в алгоритм МАСУ.

#### **Заключение**

Результаты моделирования разработанной мультиагентной системы управления установками распределенной генерации позволяют сделать вывод об её адаптивности к изменяющимся условиям, что даёт возможность эффективно использовать данную технологию при создании активно-адаптивных сетей интеллектуальных систем электроснабжения.

#### **Summary**

*For the moment there is a change-over of electric-power industry performed to the new technology platform, which is based on the Smart Grid concept. The significant components of such grids the distributed generation plants are, including those implemented on the basis of renewable energy sources. Centralized control system of numerous distributed generation plants becomes inefficient due to the need of transfer of large communication flow to the center for taking decision. Rising up the efficiency of control is possible by the means of implementation of peripheral systems actualized on the basis of agent approach.*

*The framework of multi-agent controlling system (MACS) is proposed in the article in order to control the power of distributed generation plants, implemented on the basis of turbine-type alternatives. The major functions of the agents, forming an interactive network are described. The system of differential equations, describing the processes in electric power supply system containing distributed generation plants is represented.*

*The model of offered MACS is developed in the “AnyLogic” imitating modeling environment. The results of modeling have demonstrated positive effects achievable within the presence of MACS. The adaptability of the system against variable conditions and applicability of the multi-agent technologies during creation of electric power supply smart grids was demonstrated.*

*Keywords: electric power supply smart grids, multi-agent controlling system, distributed generation plants, modeling.*

#### **Литература**

1. Витол Э.А. Интеллектуализация техники – главный вектор современной эволюции // Философия и космология. 2013. С. 65-92.
2. Пупков К.А., Коньков В.Г. Интеллектуальные системы. М.: МГТУ, 2003. 348 с.
3. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / под ред.: Фортова В.Е. и Макарова А.А. М.: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2012. 235 с.
4. Моржин Ю.И., Шакарян Ю.Г., Кучеров Ю.Н., Воропай Н.И., Васильев С.Н., Ядыкин И.Б. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia / CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5-7 2011. Manchester, GB: IEEE, The University of Manchester, 2011. Panel session 5D. С. 1-5.
5. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 218 с.
6. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 с.

7. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Программный комплекс для идентификации электроэнергетических систем и оптимизации коэффициентов стабилизации автоматических регуляторов возбуждения // Системы. Методы. Технологии. № 4(8). 2010. С. 106–113.
8. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В., Попик В.А. Влияние согласованной настройки систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций на устойчивость электроэнергетических систем // Системы. Методы. Технологии. № 2(10). 2011. С. 85–90.
9. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Автоматические регуляторы для установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. №3 (23). –2014. С. 108-116.
10. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Согласованная настройка регуляторов установок распределенной генерации, работающих в системе электроснабжения железной дороги // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1(25). С. 94–102.
11. Булатов Ю.Н. Методика согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов электростанций: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06; [место защиты: Иркутский государственный университет путей сообщения]. Иркутск, 2012. 163 с.
12. 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.
13. Булатов Ю.Н., Попик В.А. Решение оптимизационных задач электроэнергетики с помощью адаптивного генетического алгоритма // Труды Братского государственного университета: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Т.2. Братск: Изд-во БрГУ, 2012. С. 94-99.
14. Булатов Ю.Н., Приходько М.А., Игнатъев И.В. Разработка блока автонастройки АРЧМ на основе нечёткой логики // Системы. Методы. Технологии. № 2(6). 2010. С.91–95.
15. Приходько М.А., Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Адаптивный блок согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения и частоты вращения генераторов электростанций // Труды Братского государственного университета: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Т.1. Братск: Изд-во БрГУ, 2014. С. 265-269.
16. Инструмент имитационного моделирования AnyLogic [Электронный ресурс]: сайт AnyLogic / URL // <http://www.anylogic.ru/> (дата обращения 07.12.2015).

*Поступила в редакцию*

*17 декабря 2015 г.*

**Булатов Юрий Николаевич** – канд. техн. наук, доцент Братского государственного университета (БрГУ). Тел.: 8(3953)325445. E-mail: bulatovyura@yandex.ru.

**Крюков Андрей Васильевич** – д-р техн. наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, заслуженный энергетик РБ. Академик Российской академии транспорта, член-корр. Российской инженерной академии, член-корр. академии наук высшей школы РФ. Тел.: 8(3952)628723. E-mail: and\_kryukov@mail.ru.