

4. *Чернухин Ю.В.* Микропроцессорное и нейрокомпьютерное управление адаптивными мобильными роботами: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТИ, 1993. – 91 с.
5. *Чернухин Ю.В.* Нейропроцессорные сети: Монография. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 439 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Чернухин Юрий Викторович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: uvche@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; профессор.

Сапрыкин Роман Владимирович – e-mail: rsaprykin@gmail.com; кафедра вычислительной техники; ведущий инженер.

Лисичкин Максим Владимирович – e-mail: mvlisichkin@gmail.com; кафедра вычислительной техники; аспирант.

Chernukhin Yuri Victorovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: uvche@tti.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371656; the department of computer science; professor.

Saprykin Roman Vladimirovich – e-mail: rsaprykin@gmail.com; the department of computer science; engineer.

Lisichkin Maxim Vladimirovich – e-mail: mvlisichkin@gmail.com; the department of computer science; postgraduate student.

УДК 620.92:681.5

Е.Ю. Косенко, А.Я. Номерчук, И.О. Шаповалов

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Задача управления такими энергосистемами, для которых характерна значительная территориальная распределенность и неоднородность, имеет большую актуальность в настоящее время. Неоднородность системы может быть связана с использованием альтернативных источников электроэнергии типа ветровых и солнечных электростанций. Предложено реализовывать управление такими энергосистемами на базе концепции Smart Grids. При этом управление должно быть распределенным, т.е. оптимизация работы сети должна производиться несколькими локальными интеллектуальными устройствами. Представлена формальная математическая модель энергосистемы с территориально распределенными источниками и потребителями различных типов. Поставлена формальная задача управления на основе оптимизации целевой функции. Введены аналитические выражения для определения затрат, связанных с экологическим воздействием на окружающую среду, потреблением и распространением энергии. Предложено и обосновано применение многоагентных систем для управления рассматриваемыми энергосистемами. Описана структура, основные особенности предлагаемой многоагентной системы и правила взаимодействия агентов энергосистемы. Приведенная структура отличается простотой благодаря введенной классификации интеллектуальных агентов.

Энергосистема; территориальная распределенность; неоднородность; Smart Grids; модель; многоагентная система; оптимизация; целевая функция.

E.Y. Kosenko, A.Y. Nomerchuk, I.O. Shapovalov

INTELLIGENT CONTROL IN HETEROGENEOUS DISTRIBUTED POWER SYSTEMS

The control problem for such grids, which are characterized by large territorial distribution and heterogeneity, has great topicality in the present. The system heterogeneity can be related to using of the alternative energy sources such as wind and solar power plants. It's proposed to implement the control of such systems on the basis of the Smart Grid concept. At the same time control should be distributed that is grid operation optimization should be implemented by the group of local intelligent controllers. The formal mathematical model of the power system with geographically distributed sources and consumers of various types is presented. The formal control task is stated on the basis of an efficiency function optimization. Analytical expressions for estimation of costs related to ecological impact, power consuming and distribution were introduced. The using of multi-agent systems for the considered power system control is proposed and justified. We described the structure, basic features of the proposed multi-agent system and energy agent interaction rules. The presented structure is simple thanks to proposed classification of intelligent agents.

Power system; territorial distribution; heterogeneity; Smart Grids; model; multi-agent system; optimization; efficiency function.

Введение. В последнее время электрические сети по всему миру подвергаются кардинальной перестройке как с точки зрения используемых источников энергии, так и с точки зрения принципов управления данными источниками. Связаны данные изменения с широким внедрением в энергосети территориально распределенных альтернативных источников энергии. Широкое внедрение альтернативных источников энергии объясняется следующими причинами: прогнозируемое истощение ископаемых источников энергии, необходимость снижать экологические последствия применения традиционных генерирующих станций и дешевизна установки и эксплуатации альтернативных источников энергии в труднодоступных районах по сравнению с традиционными. Наиболее популярными альтернативными источниками энергии являются ветроэнергетические установки, солнечные батареи, теплонасосные установки и т.д. [1].

Основываясь на традиционных подходах к управлению распределенными объектами [2] для территориально-распределенных энергетических систем можно применять принципы централизованного, иерархического и распределенного управления. Каждый из этих подходов имеет собственные достоинства и недостатки. Проведенный анализ [3, 4] позволил определить наиболее эффективное решение по управлению распределенными энергосетями на основе технологии Smart Grids [5].

Внедрение Smart Grid-технологий в существующие энергосети требует решения ряда задач: обеспечение безопасности функционирования новых сетей, интеграция возобновляемых источников энергии с традиционными, распределение управляющих функций между различными устройствами сети и т.д. В данной статье рассматриваются задачи управления взаимодействием отдельных элементов системы между собой.

Статья организована следующим образом: в 1-м разделе рассматривается концепция технологии Smart Grids; во 2-м разделе ставится задача управления распределенными элементами энергосистемы; в 3-м разделе описывается модель энергетической системы; в 4-м разделе описывается управление взаимодействием различных частей энергосети на основе многоагентной технологии; в заключении сформулированы выводы и перспективы дальнейших будущих исследований.

1. Концепция Smart Grids. Как показано в [6] использование технологии Smart Grid эффективно при решении следующих задач:

- ◆ высокоинтеллектуальные системы для мониторинга, интеграции и управления возобновляемыми источниками энергии, распределенными устройствами генерации и хранения энергии на основе методов искусственного интеллекта с использованием микропроцессорных систем и Internet/Intranet-технологий;
- ◆ высокоинтеллектуальные системы, ориентированные на контроль и управление параметрами электроэнергетики со стороны потребителей, управление потреблением, а также контроль нагрузки в экстремальных режимах.

Согласно [7] энергосети, построенные в соответствии с концепцией Smart Grid, позволят: синхронизировать режимы генерации и запаса электроэнергии; повысить способность к самовосстановлению сети; иметь механизмы защиты от помех и незапланированных воздействий различного рода. Все это позволит повысить эффективность использования нестабильных генерирующих агрегатов (типа ветряных энергетических установок) и будет способствовать обеспечению поставки энергии более высокого качества, уменьшению потерь, связанных с аварийными отключениями, а также будет мотивировать потребителей оценивать качество поставляемой энергии и выбирать наилучшего поставщика.

2. Задача управления. Рассматриваемая задача управления состоит в оптимизации работы неоднородной территориально распределенной энергосистемы. Оптимизация производится каждым интеллектуальным управляющим устройством, отвечающим за управление отдельной частью общей системы. Оптимизация режимов работы энергосистемы производится в соответствии с неким критерием. В качестве такого критерия принимается целевая функция, определяемая как:

$$\min \{ \sum C \} = \min \{ C_p + C_x + C_{\text{эк}} \}, \quad (1)$$

где C_p – цена распределения энергии по сети, C_x – цена управления и эксплуатации хранилищ энергии, $C_{\text{эк}}$ – условная стоимость загрязнения окружающей среды.

Цена распределения энергии пропорциональна величине потоков энергии, проходящих через отдельные узлы сети, умноженной на единицу стоимости.

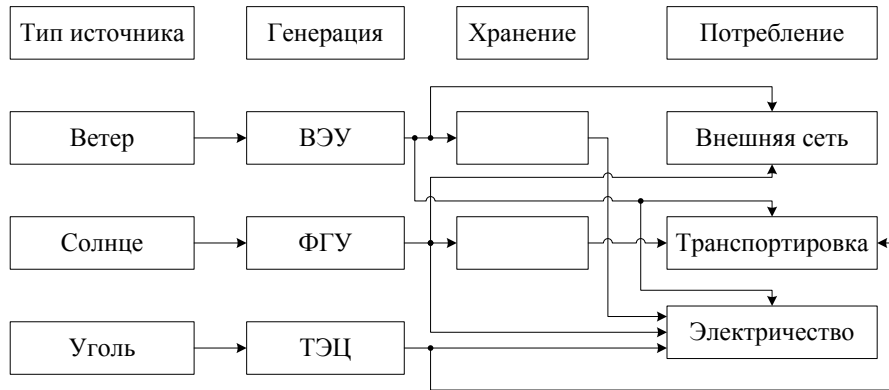
3. Модель энергосистемы. Рассмотрим территорию, на которой установлены и используются источники электрической энергии различного типа. Предполагается, что суммарная генерирующая мощность установок достаточна для удовлетворения нужд всех потребителей на данной территории. Каждая генерирующая установка подключена к сети и способна полностью обеспечить электричеством закрепленную за ней подсеть потребителей. Более того, в системе есть различные устройства для хранения электрической энергии. Модель системы, в которой электростанции каждого типа представлены в единичном экземпляре и используется дополнительный источник тепловой энергии, рассмотрена в [8]. Структура системы в общем виде представлена на рис. 1.

Согласно приведенной структуре в модели рассматриваются три типа генерирующих установок: солнечные батареи, ветровые парки и электростанции на твердом топливе. Отметим, что производимая электрическая энергия может быть направлена в хранилище, во внешнюю сеть или к потребителям различного рода.

Получаемая электроэнергия разделяется на электроэнергию для жилых (коммунально-бытовых) массивов и промышленных предприятий и электроэнергию для транспортных систем.

Пусть $j, j = 1, \dots, J$ – это индексы, обозначающие местоположение конкретного потребителя (коммунально-бытового или промышленного); $h, h = 1, \dots, H$ – это индексы, обозначающие местоположение элементов, постоянно меняющих свое местоположение в системе (например, элементы городского электротранс-

порта); $i, i = 1, \dots, I$ – местоположение ветряных электростанций; $k, k = 1, \dots, K$ – местоположение солнечных электростанций; $g, g = 1, \dots, G$ – местоположение электростанций, работающих на твердом топливе.



ВЭУ – ветроэнергетическая установка, ФГУ – фотогальваническая установка, ТЭЦ – электростанция, работающая на твердом топливе.

Рис. 1. Общая структура модели энергосистемы

Под местоположением при этом понимается позиция конкретного объекта в массиве объектов какого-либо класса.

Для формального описания модели системы вводятся специальные переменные: $E_{в,i}(t)$ – энергия, вырабатываемая ветровым источником энергии i на интервале времени $(t, t+1)$; $E_{с,k}(t)$ – энергия, вырабатываемая фотогальваническим источником энергии k на интервале времени $(t, t+1)$; $S_{в,i}(t)$ – величина запаса энергии, вырабатываемой ветровой энергетической установкой i ; $S_{с,k}(t)$ – величина запаса энергии, вырабатываемой фотогальванической энергетической установкой k .

Динамика изменения количества запасенной энергии в произвольном хранилище описывается следующим уравнением:

$$S(t+1) = S(t) + E_s(t) - S_s(t) - S_t(t), \tag{2}$$

где $S(t)$ – величина запаса энергии в момент времени t , $E_s(t)$ – количество энергии, поступившей в хранилище за предыдущий интервал времени, $S_s(t)$ – количество энергии, отданной потребителям за предыдущий интервал времени, $S_t(t)$ – количество энергии, отданной в перемещающиеся части системы за предыдущий интервал времени.

Через введенные переменные цена (затраты) распределения энергии по сети может быть определена следующим образом:

$$C_p = \sum_{t=0}^{T-1} (C_{p,в} + C_{p,с} + C_{p,у}), \tag{3}$$

где $C_{p,в}, C_{p,с}, C_{p,у}$ – цены распределения по сети энергии, полученной от ветровых, солнечных электростанций и электростанций, работающих на твердом топливе.

Цена (затраты) на распределение энергии от ветряных электростанций вычисляется согласно выражению:

$$C_{p,e} = \sum_{t=0}^{T-1} (E_{e,сеть}(t)C_{e,сеть}(t) + E_{e,x}(t)C_{e,x}(t) + \sum_{j=1}^J E_{e,\varepsilon,j}(t)C_{e,\varepsilon,j}(t) + \sum_{h=1}^H E_{e,m,h}(t)C_{e,m,h}(t) + \sum_{j=1}^J S_{e,\varepsilon,j}(t)CS_{e,\varepsilon,j}(t) + \sum_{h=1}^H S_{e,m,h}(t)CS_{e,m,h}(t)), \quad (4)$$

где $E_{e,сеть}(t)$ – энергия от ветровых станций, посылаемая в сеть; $E_{e,x}(t)$ – энергия от ветровых станций, передаваемая в хранилища; $E_{e,\varepsilon,j}(t)$ – энергия от ветровых станций, передаваемая потребителю; $E_{e,\tau,h}(t)$ – энергия от ветровых станций, передаваемая в перемещающиеся части системы; $S_{e,\varepsilon,j}(t)$ – энергия из хранилища энергии, полученной от ветровых станций, передаваемая потребителю; $S_{e,m,h}(t)$ – энергия из хранилища энергии, полученной от ветровых станций, передаваемая в перемещающиеся части системы; $C_{e,сеть}(t)$, $C_{e,x}(t)$, $C_{e,\varepsilon,j}(t)$, $C_{e,\tau,h}(t)$, $CS_{e,\varepsilon,j}(t)$, $CS_{e,m,h}(t)$ – единицы стоимости осуществления соответствующих процессов.

Цена (затраты) на распределение энергии от солнечных электростанций и электростанций, работающих на твердом топливе, определяется аналогичным образом.

Цена (затраты) на использование хранилищ энергии от различных источников определяется выражением

$$C_x = \sum_{t=0}^T (S_b(t) \cdot c_b(t) + S_c(t) \cdot c_c(t)), \quad (5)$$

где $c_b(t)$, $c_c(t)$ – единицы стоимости хранения энергии, поступающей от ветровых и солнечных электростанций в момент времени t .

В качестве ограничений определим затраты, связанные с выбросами веществ, загрязняющих окружающую среду, определяются для случая, если превышен допустимый предел объемов выбросов:

$$C_{эк} = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^J C_{y,\varepsilon,j}(t) + \sum_{h=1}^H C_{y,\tau,j}(t) \right] \cdot c_{эк}(t), \quad (6)$$

где $c_{эк}(t)$ – штраф за выброс условного типа загрязнения.

При разработке более полной модели системы в рассмотрение могут быть включены дополнительные ограничения учитывающие, например, энергетический баланс, удовлетворение возникающих требований на поставку электроэнергии, размер хранилищ энергии, устойчивость энергосистемы и т.д. Математическая формулировка данных ограничений приведена в [8].

4. Решение задач управления в Smart Grid с помощью технологии многоагентных систем. Согласно [9] многоагентная система – это система, состоящая из двух или более агентов или интеллектуальных агентов. При этом многоагентная система не имеет глобальной цели, есть только частные цели отдельных агентов. Согласно [10] агент – это программная или аппаратная сущность, располагающаяся в некоторой среде, и способная самостоятельно реагировать на изменения в данной среде. В [9] понятие агента расширено понятием интеллектуального агента. Интеллектуальный агент имеет следующие характеристики: реактивность (спо-

способность реагировать на изменения во внешней среде); проактивность (способность реализовать поведение, обусловленное целью); социальность (способность взаимодействовать с другими интеллектуальными агентами).

Через процедуры переговоров автономные агенты составляют общую командную структуру и работают сообща. В этом смысле, управление территориально распределенными энергосистемами является весьма перспективной областью применения технологии многоагентных систем. Использование многоагентных систем для управления энергосетями придает управляемой системе следующие свойства: гибкость к реконфигурации, работа подсистем в асинхронном режиме, живучесть системы и т.д.

Для упрощения структуры многоагентной системы и обеспечения большей простоты в общении, все компоненты сети разделены на следующие классы в соответствии с рис. 1: генерация, потребление, хранилище и узел. Для управления энергосетью выделяются следующие базовые типы агентов: производитель, потребитель и наблюдатель. Каждому классифицированному элементу энергосистемы может быть присвоен соответствующий агент или комбинация агентов. Например, агент–производитель присваивается элементам класса генерация. А элементам класса хранилище может быть присвоен агент и типа производитель, и типа потребитель в зависимости от текущего режима работы (заряд/разряд). В любом случае, назначенные агенты договариваются для определения минимального значения целевой функции.

Поскольку ключевой особенностью многоагентных систем является способность агентов общаться и взаимодействовать, определение правил общения – одна из важнейших задач. В частности, если агенты вступают во взаимодействие без контроля со стороны управляющего агента, могут возникнуть некоторые сложности. Таким образом, необходимо введение некоего механизма назначения приоритетов. В качестве такого механизма удобным представляется использование ценового критерия. Предложенная в разд. 2 целевая функция (1) строится на основе данного критерия. Агенты производители разрабатывают стоимостные величины, представленные в формулах (3–6). Агенты других типов вырабатывают собственные стоимостные величины и вступают в переговоры для выработки компромиссного ценового предложения. При данном подходе производители получают приоритет в установлении стоимости обмена энергией и решают задачи минимизации общей целевой функции. Для разрешения ситуаций, когда агенту поступают идентичные предложения, в целевую функцию (1) могут быть введены дополнительные параметры оценки эффективности энергетического обмена между элементами сети.

5. Планы будущих исследований. Поскольку на данный момент разработана математическая модель системы, выбран интеллектуальный подход к управлению, реализующий концепцию Smart Grids, и определены основные особенности реализации выбранного подхода, следующим этапом исследования является проверка работоспособности предложенных моделей и подходов. Предполагается проведение моделирования при реализации многоагентной системы на базе платформы JADE.

Выводы. В статье предложено решение задачи управления территориально распределенными неоднородными энергосистемами на базе концепции Smart Grids. Поскольку реализация Smart Grids предполагает использование интеллектуальных методов управления, предложено рассматривать систему управления как многоагентную систему. Предложена концепция системы. Приведена формальная математическая модель энергосистемы для реализации предложенных подходов к управлению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Nelson V.* Introduction to Renewable Energy. CRC Press. ISBN-13: 978-1-4398-9120-9, 2011. – 350 p.
2. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
3. *Косенко Е.Ю.* Системные аспекты оптимизации функционирования территориально распределенных энергетических систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 2 (127). – С. 232-236.
4. *Chowdhury S., Chowdhury S.P., Crossley P.* Microgrids and Active Distribution Networks. The Institution of Engineering and Technology. ISBN 978-1-84919-014-5, 2009. – 298 p.
5. *Moslehi K. and Kumar R.* A reliability perspective of the smart grid // IEEE Transactions on Smart Grid, 1(1). – 2010. – P. 57-64.
6. *Voropai N.I., Efimov D.N., Etingov P.V., Panacetsky D.A.* Emergency Control in Electric Power Systems // Preprints of the 18th IFAC world congress, 2011. – P. 1658-1664.
7. NETL, DoE (2007). A Vision for the Smart Grid, NETL Smart Grid Implementation Strategy (SGIS), URL: <http://www.netl.doe.gov/smartgrid/> (дата обращения: 14.05.2013).
8. *Minciardy R., Robba M.* Dynamic optimization for distributed energy production // Preprints of the 18th IFAC world congress, 2011. – P. 1636-1641.
9. *McArthur S., Davidson E., Catterson V., Dimeas A., Hatzigryriou N., Ponci F., and Funabashi T.* Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges // IEEE Transactions on Power Systems. – 2007. – Vol. (22). – P. 1743-1759.
10. *Wooldridge M., Jennings N.R.* Pitfalls of agent oriented development // Proceedings of 2nd Int. Conf. Autonomous Agents. –1998. – P. 385-391.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Косенко Евгений Юрьевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: ekosenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: +79045071963; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Шаповалов Игорь Олегович – e-mail: shapovalovio@gmail.com; тел.: +79508473455; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Номерчук Александр Яковлевич – e-mail: nomerchuk@gmail.com; 347922, г. Таганрог, пер. Добролюбовский, 15; тел.: +79054306539; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Kosenko Evgeniy Yuryevich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ekosenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79045071963; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; assistant professor.

Shapovalov Igor Olegovich – e-mail: shapovalovio@gmail.com; phone: +79508473455; the department of automatic control systems; assistant.

Nomerchuk Alexander Yakovlevich – e-mail: nomerchuk@gmail.com; 15, Dobrolyubovsky, Taganrog, 347922, Russia; phone: +79054306539; the department of automatic control systems; assistant professor.