УДК 681.51.001.57

М.В. Филиппов, Б.В. Кавалеров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

К ВОПРОСУ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ГАЗОТУРБИННЫМИ МИНИ-ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ

Рассматриваются возможности совершенствования локальных электрических сетей с газотурбинными мини-электростанциями на базе технологии *Smart Grid*. Потенциальные возможности такой модернизации открывают хорошие перспективы создания высоконадежных, гибких, активно-адаптивных систем электроснабжения. С другой стороны, с точки зрения организации таких электрических систем газотурбинные мини-электростанции являются удобным инструментом их формирования и конфигурирования. Показано, что на основе газотурбинных генерирующих модулей малой и средней мощности возможно строить локальные системы электроснабжения различного назначения в конфигурации потребителя с учетом обеспечения надежности и прочих принимаемых в расчет ограничений. На основе обзора и изучения сложившейся ситуации в статье определяются задачи дальнейших исследований в выбранном направлении.

Ключевые слова: система электроснабжения, газотурбинная установка, система управления, Smart Grid.

M.V. Philippov, B.V. Kavalerov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

VALUE OF LOCAL SMART GRIDS WITH GAS-TURBINE MINI-POWER PLANTS

This article is an analysis of possibility to use Smart Grid concept in modernization of local gas turbine electrical grid. Smart Grid is used to create reliable, robust, agile and adaptive electric grids. As for gas turbine it is a convenient building block and configuration tool for grids with smart management. We show that it is possible to use low and middle power output gas turbines to build local robust electrical grids suited for different purposes in customer's configuration and with many different restrictions applied. We will base our future research goals on this paper.

Keywords: electrical grid, gas turbine, energy management system, smart grid.

Введение. Хорошо известно, что газотурбинные установки (ГТУ) обладают целым комплексом свойств, которые, безусловно, обеспечивают возможности их широкого применения в наземных условиях

в качестве привода электрогенераторов. Существенно, что в нашей стране авиадвигателестроительные предприятия производят такие ГТУ на базе конвертированных авиационных двигателей. Газотурбинные электростанции (ГТЭС) на базе таких конвертированных авиационных ГТУ обладают целой совокупностью достоинств, среди них экономичность, низкая стоимость, быстрые сроки окупаемости, малая удельная масса и габариты, высокие мобильность и приемистость, короткие сроки строительства, детально отработанная технология производства, широкий диапазон климатических условий эксплуатации, практически полная автоматизация управления работой двигателя, высокий КПД использования топлива, особенно при когенерации, возможность работы на керосине, дизельном топливе, природном и попутном газе, минимальные объемы вредных выбросов в окружающую среду и др.

В то же время по-прежнему актуальны вопросы повышения качества вырабатываемой электроэнергии [1]. В связи с этим рассмотрим возможности применения элементов технологии создания активно-адаптивных сетей электроснабжения с целью улучшения характеристик локальных электросистем, содержащих мини-ГТЭС, имеются основания полагать, что применение элементов указанной технологии позволит преодолеть отдельные проблемы и повысит общий уровень интеллектуализации локальных электрических сетей.

Интеллектуализация сетей энергоснабжения. Рассмотрим современную ситуацию с созданием активно-адаптивных сетей. Умные сети электроснабжения (англ. Smart Grid) – это модернизированные сети электроснабжения, которые используют информационные и коммуникационные сети и технологии для сбора информации об энергопроизводстве и энергопотреблении, позволяющей автоматически повышать эффективность, надежность, экономическую выгоду, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии.

Впервые термин Smart Grid встречается в опубликованной группой ученых из IEEE в журнале «Computer Applications in Power, IEEE» статье «Grids get smart protection and control» [2].

Позже к термину вернулся M. Burr [3] в статье, посвященной анализу ситуации, сложившейся после аварии в энергосистеме в США и Канаде в 2003 г. Он замечает, что многие операторы, работавшие над устранением последствий аварии, признали: больше возможностей мониторинга сети помогли бы найти источник сбоя и восстановить энергосистему значительно быстрее.

В 1980 г. автоматическое считывание показаний счетчиков было использовано для отслеживания потребления энергии крупных клиентов и превратилось в интеллектуальный счётчик 1990-х гг., который сохраняет информацию о том, как электроэнергия использовалась в разное время дня [4, 5]. Американское агентство *Bonneville Power Administration* расширило исследования умных сетей датчиками, способными проводить очень быстрый анализ аномалий качества электроэнергии в очень больших географических масштабах. В 2000 г. на базе этих разработок была создана первая система измерений на широких площадях (WAMS). Так, изначально рекламный термин «Smart Grid» вырос до глобальной концепции будущей электроэнергетики.

Остановимся на вопросах стандартизации. Существуют две широкоизвестных попытки стандартизировать требования к разработке умных сетей электроснабжения: европейская [6] и американская [7].

Во многом эти подходы схожи, и из множества мнений (не только стандартов) можно сформулировать основные цели, которые преследует внедрение умных сетей:

1. Повышение надежности электроснабжения потребителей и безотказности работы энергосистем.

2. Повышение эффективности расхода энергоресурсов с сохранением требуемых параметров качества электрической энергии.

3. Улучшение экологической обстановки благодаря увеличению доли использования нетрадиционных источников энергии (экологически более чистый процесс производства электрической энергии).

4. Повышение доступности сети для новых пользователей, причём в качестве новых подключений к глобальной сети могут выступать пользовательские генерирующие источники, в том числе ВЭИ с нулевым или пониженным выбросом CO_2.

Существует и открытый вариант стандарта – *OpenADR*. Разработка стандарта инициирована Национальной лабораторией им. Лоуренса в Беркли (LBNL). Предпосылка создания первого варианта стандарта – ликвидация последствий калифорнийского энергетического кризиса 2002 г.

Стандартом управляет альянс *OpenADR*. Среди основателей альянса сама Национальная лаборатория им. Лоуренса в Беркли, компания «Сименс», «Honeywell». Вклад в развитие стандарта внесло много компаний, в том числе *Google*, *Toshiba*, *Fujitsu*, *Hitachi* и *Philips*.

В Китае *OpenADR* используется при модернизации технологий компанией *Honeywell* совместно с Государственной электросетевой корпорацией Китая и Китайской академией наук. В Великобритании, г. Брэкнелл, успешно применена реализация стандарта при модернизации сети, сократившей пиковое потребление электроэнергии на 45 %. В США компании *Southern California Edison* и *Honeywell* получили от Департамента энергетики грант на 11 млн долларов для реализации проекта, базирующегося на *OpenADR*.

Компоненты умной сети. Возможно, время для обсуждения целостной концепции *Smart Grid* еще не пришло, поскольку такие проекты по модернизации электроэнергетики рассчитаны на долгий период времени. В [8] отмечается, что термин за историю развития претерпел множество изменений. Но уже можно обсуждать отдельные компоненты концепции, используя устоявшуюуся терминологию:

1. Системы генерации. Современные экологические проблемы и прогнозируемый дефицит органических видов топлива стимулирует развитие альтерантивных источников электроэнергии, всегда считавшихся нестабильными, а потому требующими более сложной системы управления. Количество этих источников будет расти, и подключаться к сети они должны в различных точках. Генерирующие мощности станут более распределенными, чем концентрированными.

2. Электрические сети. Существующие электрические сети состоят из радиальных линий с односторонним потоком энергии. *Smart Grid* подразумевает использование закольцованных электрических сетей, не имеющих иерархической структуры и позволяющих соединять в одну сеть большое количество маломощных источников и единичных мощных станций.

3. Системы мониторинга и учета. Многотарифные микропроцессорные счетчики, способные выполнять расчеты, связываться с другими аналогичными счетчиками, способные накапливать информацию и передавать ее по сети практически применяются в электроэнергетике уже давно.

4. Системы самодиагностики. Накопленные знания о законах старения электрической изоляции, тенденциях изменения химического состава масла силовых трансформаторов, известные свойства частичных разрядов в твердой, жидкой и газообразной изоляциях, а также вакууме помогают при разработке более точных средств самодиагностики сети.

5. Системы передачи данных между объектами. В [6] приводятся аргументы за использование стека протоколов IP при передачи данных в умных сетях.

6. Модернизированная релейная защита [9, 10].

Крупные исследовательские программы. Исследования, проводимые в связи с разработкой умных сетей, как правило, направлены на выделение лучших методологий. Задача исследовательских групп – облегчить модернизацию систем электроснабжения и снизить риски тех, кто будет заниматься воплощением стандартов *Smart Grid*.

IntelliGrid – исследовательская программа, проводимая *EPRI*. Цель программы – объединить лучшие методологии реализации умных сетей и предоставить консультационные услуги для предприятий, осуществляющих модернизацию.

Grid 2030 – видение Американского института «следующих 100 лет электроснабжения». В рамках исследования подготовлен набор рекомендаций для правительства США о необходимых шагах по реализации современной и надежной системы энергоснабжения.

Modern Grid Initiative – совместная работа Департамента энергии США и Национальной технологической лаборатории энергетики, а также частных предприятий, ученых и заинтересованных по модернизации и интеграции в существующую сеть энергогенерации Соединенных Штатов.

GridWise – программа Департамента энергии США по инвестиции в современные способы стандартов передачи данных, архитектур систем для применения при разработке и внедрении умных сетей. Программа также поддерживает инициативы и форумы федерального уровня.

GridWorks – программа Департамента энергии США, направленная на повышение надежности систем энергообеспечения за счет повышения надежности ключевых компонентов, таких как проводники, подстанции, инвестиций в разработку сверхпроводных систем, выдерживающих высокие температуры, новых способов передачи и хранения энергии.

Критика интеллектуализации сетей электроснабжения. Идея умного управления сетями вызвала много вопросов и споров. Критиков беспокоит уровень контроля, который получат элементы новых сетей:

– чрезмерная ответственность отдельных элементов вследствие децентрализации;

– проблема защиты от вмешательства в различные элементы системы, этот вопрос касается всех информационных систем, но даже огромный опыт в вопросах безопасности не устраняет рисков;

– уменьшение прозрачности расчетов для потребителя – большая точность при расчетах исключает необходимость в фиксированных тарифах, но делает расчет потребления сложным для рядового пользователя;

– вмешательство в частную жизнь детальными отчетами о потреблении электроэнергии.

Мировой опыт внедрения. Проведенные исследования и составленные исследовательскими лабораториями отчеты показывают значительное снижение расходов на выработку электроэнергии. Компания «Сименс» предоставила отчет, согласно которому Европа может сэкономить до 45 млрд евро в следующие десять лет, если модернизирует системы энергоснабжения [12].

Первым коммерчески успешным проектом был *Telegestore*, созданный в Италии компанией *Enel S.p.A. of Italy*. Примечательно, что компания пользовалась только собственно разработанными счетчиками, собственным программным обеспечением иполностью отвечала за интеграцию решения.

США, Китай, Мексика объявили о готовности увеличивать финансирование программ по развитию умных сетей электроснабжения. В Ирландии модернизация сетей и появление «умных счетчиков» получили сильную поддержку от потребителей, и государство продолжает инвестиции в изучение умных сетей.

Из-за высокой цены изменений в огромных существующих системах энергоснабжения в «гонку умных электросетей» включились и менее развитые страны. Согласно [13] Китай, Индия и Бразилия названы пионерами в области внедрения умных сетей энергоснабжения.

Российская практика внедрения. В октябре 2011 г. ОАО «Фортум» (российское подразделение финской энергетической корпорации *Fortum*) и дочерняя Уральская теплосетевая компания начали реализацию в Челябинске крупномасштабного проекта по созданию уникальной для России кольцевой схемы централизованного теплоснабжения города. Традиционная радиальная схема (как в энерго-, так и в теплоснабжении) не позволяет максимально использовать возможности комбинирования выработки источников, переключать нагрузку с одно-

го источника на другой и обеспечивать оптимальную загрузку всех источников. Кольцевая схема позволяет рационально использовать топливо и максимально загружать наиболее эффективные мощности. Подобные тенденции в изменениях топологии сети есть и в разработках по интеллектуализации электрических сетей.

В сентябре 2013 г. компании ОАО «БЭСК» и ООО «Сименс» объявили о начале сотрудничества. Цель совместной работы – модернизация электросетевого комплекса г. Уфы. Одна из первостепенных задач – внедрение элементов умных сетей. По заявлению представителей ООО «Сименс», модернизация снизит уровень потерь электрической энергии более чем в два раза. Ранее ООО «Сименс» предоставило отчет о потенциале модернизации российской энергетической системы. Отчет подготовлен в рамках совместного проекта Мюнхенского технического университета и ООО «Сименс» по изучению энергосистем разных стран мира.

Газотурбинные мини-электростанции и *Smart Grid.* Мини-электростанции являются гибкими энергетическими модулями, на основе которых могут строиться локальные системы электроснабжения с применением технологии *Smart Grid*. Микропроцессорные системы управления такими ГТЭС открывают возможности достижения самых амбициозных целей интеллектуализации. В то же время мобильность модульной структуры таких систем позволяет решать различные оптимизационные задачи обеспечения надежности электроснабжения, повышения качества вырабатываемой электроэнергии, снижения издержек и др. Современные компьютерные средства моделирования и оптимизации являются удобным инструментом решения задач по разработке новых алгоритмов и методик.

Покажем, каким образом может решаться одна из задач по поиску оптимальной структуры локальной системы электроснабжения (рисунок).

Для моделирования взаимодействия элементов локальной системы электроснабжения разработан алгоритм, основанный на решении уравнений связи в векторно-матричной форме и использовании метода узловых напряжений (как менее трудоемкого в сравнении с методом контурных токов) [14].

Принцип формирования уравнений базируется на условии инвариантности граничных переменных, согласно которому в общем для элементов узле в произвольный момент времени каждая скалярная граничная переменная, определяемая в одном элементе, тождественно равна

себе самой, определенной в любом другом из этих элементов, а алгебраическая сумма векторных граничных переменных при тех же условиях равна нулю. Токи являются векторными граничными переменными (так как они обладают направлением), напряжения – скалярными граничными переменными. Дальнейшие выводы покажем на примере.

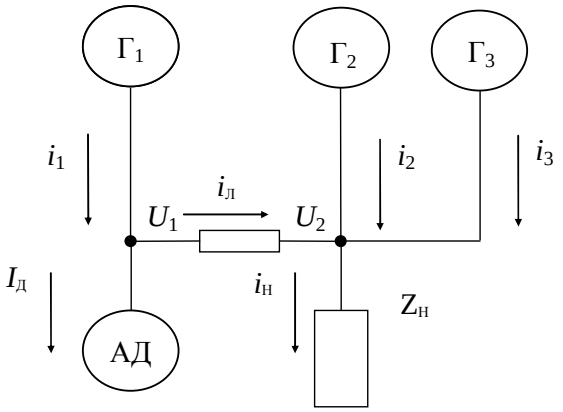

Рис. Структурная схема системы электроснабжения: Г – генераторы, АД – асинхронные двигатели, *i* –токи, *U* – узловые напряжения

Для системы на рисунке уравнения связи в соответствии с изложенным будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_{Д} + \mathbf{I}_{Л}, \\ \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_{Л} + \mathbf{I}_3 = \mathbf{I}_{Н}, \\ \mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_{Г1} = \mathbf{U}_{АД}, \\ \mathbf{U}_2 = \mathbf{U}_{Г2} = \mathbf{U}_{Г3} = \mathbf{U}_{Н}. \end{cases} \quad (1)$$

Каждый ток и напряжение представлены двухмерными векторами (проекциями на оси *d* и *q*). Первые два уравнения системы (2) соответствуют первому закону Кирхгофа. Аналогично составляются уравнения связи и для более сложных структурных схем.

Далее принимается допущение о существовании производных граничных токов в любой момент времени:

$$\begin{cases} p\mathbf{I}_1 = p\mathbf{I}_{Д} + p\mathbf{I}_{Л}, \\ p\mathbf{I}_2 + p\mathbf{I}_{Л} + p\mathbf{I}_3 = p\mathbf{I}_{Н}. \end{cases} \quad (2)$$

Математическая модель взаимодействия структурных элементов строится подстановкой в уравнения производных граничных токов (2)

векторов производных токов из уравнений соответствующих элементов в форме Парка–Горева, например для синхронного генератора:

$$\begin{cases} U_d = -\Psi_q\omega - d\Psi_d/dt - I_d r; \\ U_q = \Psi_d\omega - d\Psi_q/dt - I_q r; \\ U_f = d\Psi_f/dt + I_f r_f; \\ 0 = d\Psi_D/dt + I_D r_D; \\ 0 = d\Psi_Q/dt + I_Q r_Q; \\ d\omega/dt = \dfrac{1}{T_J}(M_T - M); \\ d\gamma/dt = \omega; \\ d\delta/dt = \omega - \omega_0; \\ M = \Psi_d I_q - \Psi_q I_d. \end{cases} \tag{3}$$

Но вначале следует учесть, что оси *d*, *q* вращаются вместе с ротором конкретного генератора. На рисунке генераторов три, следовательно, в этом случае будут три системы отсчета, три системы осей *d*, *q*. По этой причине нужно согласовывать системы отсчета генераторов с помощью матриц преобразований:

$$\mathbf{C}_{ij} = \begin{pmatrix} \cos\delta_{ij} & -\sin\delta_{ij} \\ \sin\delta_{ij} & \cos\delta_{ij} \end{pmatrix}, \tag{4}$$

где δ_{ij} – угол между одноименными осями роторов генераторов *i* и *j*. Заметим, что индексы уматриц согласования координат $\mathbf{C}_{ij}$ соответствуют не номерам узлов, а номерам генераторов, поскольку именно число генераторов в системе определяет число систем отсчета переменных. При этом система (1) преобразуется к виду

$$\begin{cases} \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_Д + \mathbf{C}_{12}\mathbf{I}_Л, \\ \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_Л + \mathbf{C}_{23}\mathbf{I}_3 = \mathbf{I}_Н, \\ \mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_{Г1} = \mathbf{U}_{АД}, \\ \mathbf{U}_2 = \mathbf{U}_{Г2} = \mathbf{C}_{23}\mathbf{U}_{Г3} = \mathbf{U}_Н, \end{cases} \tag{5}$$

а система (2) к виду

$$\begin{cases} p\mathbf{I}_1 = p\mathbf{I}_Д + \mathbf{C}_{12}p\mathbf{I}_Л + \dot{\mathbf{C}}_{12}\mathbf{I}_Л, \\ p\mathbf{I}_2 + p\mathbf{I}_Л + \mathbf{C}_{23}p\mathbf{I}_3 + \dot{\mathbf{C}}_{23}\mathbf{I}_3 = p\mathbf{I}_Н, \end{cases} \tag{6}$$

где матрицы

$$\dot{\mathbf{C}}_{ij} = \begin{pmatrix} -\dot{\delta}_{ij}\sin\delta_{ij} & -\dot{\delta}_{ij}\cos\delta_{ij} \\ \dot{\delta}_{ij}\cos\delta_{ij} & -\dot{\delta}_{ij}\sin\delta_{ij} \end{pmatrix}. \qquad (7)$$

Для схемы (см. рисунок) выражения элементов в форме (1) будут иметь вид:

– генератор 1: $p\mathbf{I}_1 = -\mathbf{A}_1\mathbf{U}_1 - \mathbf{B}_1\mathbf{I}_1 - \mathbf{H}_1$;
– генератор 2: $p\mathbf{I}_2 = -\mathbf{A}_2\mathbf{U}_2 - \mathbf{B}_2\mathbf{I}_2 - \mathbf{H}_2$;
– генератор 3: $p\mathbf{I}_3 = -\mathbf{A}_3\mathbf{U}_3 - \mathbf{B}_3\mathbf{I}_3 - \mathbf{H}_3$;
– линия связи: $p\mathbf{I}_Л = \mathbf{A}_Л(\mathbf{C}_{21}\mathbf{U}_1 - \mathbf{U}_2) - \mathbf{B}_Л\mathbf{I}_Л$;
– асинхронный двигатель: $p\mathbf{I}_Д = \mathbf{A}_Д\mathbf{U}_Д - \mathbf{B}_Д\mathbf{I}_Д$;
– статическая нагрузка $p\mathbf{I}_Н = \mathbf{A}_Н\mathbf{U}_Н - \mathbf{B}_Н\mathbf{I}_Н$.

Подставим уравнения элементов в систему (6) и перенесем напряжения в левую часть с учетом равенств напряжений узла (5):

$$\begin{cases} (\mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_Д + \mathbf{C}_{12}\mathbf{A}_Л\mathbf{C}_{21})\mathbf{U}_1 - \mathbf{C}_{12}\mathbf{A}_Л\mathbf{U}_2 = \\ \quad = -\mathbf{B}_1\mathbf{I}_1 - \mathbf{H}_1 + \mathbf{B}_Д\mathbf{I}_Д + \mathbf{C}_{12}\mathbf{B}_Л\mathbf{I}_Л - \dot{\mathbf{C}}_{12}\mathbf{I}_Л, \\ (\mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_Л + \mathbf{A}_Н + \mathbf{C}_{23}\mathbf{A}_3\mathbf{C}_{32})\mathbf{U}_2 - \mathbf{A}_Л\mathbf{C}_{21}\mathbf{U}_1 = \\ = -\mathbf{B}_2\mathbf{I}_2 - \mathbf{H}_2 - \mathbf{B}_Л\mathbf{I}_Л + \mathbf{B}_Н\mathbf{I}_Н - \\ - \mathbf{C}_{23}\mathbf{B}_3\mathbf{I}_3 + \mathbf{C}_{23}\mathbf{H}_3 - \dot{\mathbf{C}}_{23}\mathbf{I}_3. \end{cases} \qquad (8)$$

Преобразуем систему матричных уравнений (8) к более наглядной форме:

$$\begin{pmatrix} -\mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{C}_{12} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{1} & -\mathbf{1} & \mathbf{1} & -\mathbf{C}_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_Д & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_Л & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_Н & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{21} & -\mathbf{1} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{C}_{32} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} -\mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{C}_{12} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{1} & -\mathbf{1} & \mathbf{1} & -\mathbf{C}_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\mathbf{B}_1\mathbf{I}_1 - \mathbf{H}_1 \\ -\mathbf{B}_Д\mathbf{I}_Д \\ -\mathbf{B}_Л\mathbf{I}_Л \\ -\mathbf{B}_2\mathbf{I}_2 - \mathbf{H}_2 \\ -\mathbf{B}_Н\mathbf{I}_Н \\ -\mathbf{B}_3\mathbf{I}_3 - \mathbf{H}_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dot{\mathbf{C}}_{12} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\dot{\mathbf{C}}_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_Д \\ \mathbf{I}_Л \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_Н \\ \mathbf{I}_3 \end{pmatrix}. \qquad (9)$$

Представим последнее уравнение в компактной форме:

$$\mathbf{M}\,\mathbf{G}\,\mathbf{M}^T\mathbf{U} = -\mathbf{M}\,\mathbf{W} - \dot{\mathbf{M}}\,\mathbf{I}\,, \qquad (10)$$

где обозначено: **G** – блочная матрица проводимостей ветвей (элементов), образующих систему; **W** – вектор, полученный из правых частей уравнений элементов в форме (1); **U** – вектор искомых напряжений узлов, **I** – вектор токов ветвей.

Более подробно остановимся на матрице **M**. Из теории графов известна матрица инцидентности. Она отображает топологию графа. Можно видеть, что матрица **M** обладает свойствами матрицы инцидентности, она отображает структуру системы электроснабжения и направление протекания токов, принятое за стандартное. В том случае, если ток протекает в обратном направлении, его знак меняется на противоположный, т.е. здесь нет ограничений на направление протекания токов. Но в отличие от матрицы инцидентности матрица **M** – клеточная. Каждая клетка матрицы имеет размерность два. Это или единичная матрица $\mathbf{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, или нулевая $\mathbf{0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, или матрица преобразования координат (4).

Назовем матрицу **M** матрицей структуры, поскольку она отражает структурную конфигурацию ЭЭС; в этом случае матрицы **G** и **W** отражают состав элементов структуры. Таким образом, форма записи (10) дает возможность явно учесть состав и конфигурацию структурных элементов, составляющих систему, и, следовательно, может быть использована при проведении оптимизационных исследований.

Приведенный пример показывает, что нет принципиальных сложностей учесть структуру и состав элементов системы электроснабжения при применении технологии *Smart Grid*. Задачи исследования, прежде всего, состоят в разработке алгоритмов и методик интеллектуализации на основе известного и вновь создаваемого математического аппарата с возможно более полным использованием существующих программных продуктов.

Заключение. Из проведенного обзора следует вывод, что технология *Smart Grid* перспективна, но имеется множество нуждающихся в решении вопросов. Изучение возможности использования локальных систем электроснабжения с мини-ГТЭС с применением технологии

Smart Grid представляется также перспективным. В связи с этим поставлены следующие задачи дальнейших исследований. Во-первых, необходимо разработать соответствующий математический и алгоритмический инструментарий для исследования таких систем, выявления их особенностей и возможностей решения оптимизационных задач. Во-вторых, требуется разработка структурных решений по интеллектуализации управления такими локальными системами, выбор и обоснование программных и технических средств реализации. В-третьих, запланировано проведение экспериментальных исследований с применением методов математического моделирования с целью апробации предлагаемых методик и структурных решений.

Библиографический список

1. Интеллектуализация испытаний конвертированных газотурбинных установок для электроэнергетики / Б.В. Кавалеров, В.П. Казанцев, И.А. Шмидт, А.Н. Рязанов, К.А. Один // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – № 1(47). – С. 84–88.

2. Vu K., Begovic M.M., Novosel D. Grids get smart protection and control // IEEE Computer Applications in Power, 1997, available at: http://www.cs.ucsb.edu/~chong/290N-W10/smart-grid-alg.

3. Burr M.T. Reliability demands drive automation investments / Public Utilities Fortnightly, Technology Corridor department, 2003, № 1, available at: http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor.

4. Assessment of Demand Response and Advanced Metering (Docket AD06-2-000) / Federal Energy Regulatory Commission staff report (2006-08); United States Department of Energy. – August 2006.

5. Torriti J. Demand Side Management for the European Supergrid // Energy Policy. – 2012. – Vol. 44. – P. 199–206.

6. Final report of the CEN/CENELEC/ETSI Joint Working Group on Standards for Smart Grids, available at: ftp://ftp.cencenelec.eu/CENELEC/Smartgrid/SmartGridFinalReport.pdf.

7. NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, available at: http://www.nist.gov/smartgrid/upload/NIST_Framework_Release_2-0_corr.pdf.

8. Гуревич В.И. Smart Grid: Западный вариант [Электронный ресурс]. – URL: http://relay-protection.ru/content/view/114/11.

9. Why the Smart Grid must be based on IP standards, available at: http://web.archive.org/web/20110720140344/http://blog.ds2.es/ds2blog/2009/05/why-smart-grid-must-use-ip-standards.html.

10. Intelligent protection relay system for smart grid / F. Kawano , G.P. Baber, P.G. Beaumint, K. Fakushima , T. Miyoshi , T. Shono , M. Ookubo , T. Tanaka , K. Abe , S. Umeda // Developments in Power System Protection. The 10th IET International Conference (DPSP 2010), 29 March – 1 April 2010, Manchester, 2010.

11. Su B., Li Y. Trends of smarter protection for Smart Grid // AESIEAP-2009, CEO Conference, 15–16 October, 2009, Taiwan.

12. GridWise: The Benefits of a Transformed Energy System / L.D. Kannberg, M.C. Kintner-Meyer, D.P. Chassin, R.G. Pratt, J.G. DeSteese, L.A. Schienbein, S.G. Hauser, W.M. Warwick; Pacific Northwest National Laboratory under contract with the United States Department of Energy. – 2003. – November. – P. 25.

13. Nejad M.F. Application of smart power grid in developing countries // IEEE. – P. 427–431. doi: 10.1109/PEOCO.2013.6564586.

14. Кавалеров Б.В. Математическое моделирование в задачах автоматизации испытаний систем управления энергетических газотурбинных установок // Изв. Юго-Зап. гос. ун-та. – 2011. –№ 1. – С. 74–83.

References

1. Kavalerov B.V., Kazantsev V.P., Shmidt I.A., Riazanov A.N., Odin K.A. Intellektualizatsiia ispytanii konvertirovannykh gazoturbinnykh ustanovok dlia elektroenergetiki [Intellectualization tests converted gas turbines for electricity]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*, 2012, no. 1(47), pp. 84-88.

2. Vu K., Begovic M.M., Novosel D. Grids get smart protection and control. *IEEE Computer Applications in Power*, 1997, available at: http://www.cs.ucsb.edu/~chong/290N-W10/smart-grid-alg.

3. Burr M.T. Reliability demands drive automation investments. Public Utilities Fortnightly, Technology Corridor department, 2003, no. 1, available at: http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor.

4. Assessment of Demand Response and Advanced Metering (Docket AD06-2-000). Federal Energy Regulatory Commission staff report (2006-08). United States Department of Energy. August 2006.

5. Torriti J. Demand Side Management for the European Supergrid. *Energy Policy*, 2012, vol. 44, pp. 199-206.

6. Final report of the CEN/CENELEC/ETSI Joint Working Group on Standards for Smart Grids, available at: ftp://ftp.cencenelec.eu/CENELEC/Smartgrid/SmartGridFinalReport.pdf.

7. NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, available at: http://www.nist.gov/smartgrid/upload/NIST_Framework_Release_2-0_corr.pdf.

8. Gurevich V.I. Smart Grid: Zapadnyi variant [Smart Grid: The Western version], available at: http://relay-protection.ru/content/view/114/11.

9. Why the Smart Grid must be based on IP standards, available at: http://web.archive.org/web/20110720140344/http://blog.ds2.es/ds2blog/2009/05/why-smart-grid-must-use-ip-standards.html.

10. Kawano F., Baber G. P., Beaumint P. G., Fakushima K., Miyoshi T., Shono T., Ookubo M., Tanaka T., Abe K., Umeda S. Intelligent protection relay system for smart grid. *Developments in Power System Protection. The 10th IET International Conference (DPSP 2010), 29 March – 1 April 2010*, Manchester, 2010.

11. Su B., Li Y. Trends of smarter protection for Smart Grid. *AESIEAP-2009, CEO Conference, 15-16 October 2009,* Taiwan.

12. Kannberg L.D., Kintner-Meyer M.C., Chassin D.P., Pratt R.G., DeSteese J.G., Schienbein L.A., Hauser S.G., Warwick W.M. GridWise: The Benefits of a Transformed Energy System. Pacific Northwest National Laboratory under contract with the United States Department of Energy, 2003, November, p. 25.

13. Nejad M.F. Application of smart power grid in developing countries. *IEEE*, p. 427-431. doi: 10.1109/PEOCO.2013.6564586.

14. Kavalerov B.V. Matematicheskoe modelirovanie v zadachakh avtomatizatsii ispytanii sistem upravleniia energeticheskikh gazoturbinnykh ustanovok [Mathematical modeling in test automation control systems power gas turbines]. *Izvestiia Iugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 1, pp. 74-83.

Сведения об авторах

Филиппов Максим Владимирович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: fi-maks@yandex.ru).

Кавалеров Борис Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

About the authors

Bahirev Ivan Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is a Master's degree student at the Department of Automation Microprocessors Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: bahirevy@mail.ru).

Kavalerov Boris Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is PhD of Technical Sciences, Associate Professor, the Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

Получено 26.03.2014