

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406

УДК 621.311:017

Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID

М. И. Фурсанов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Проанализированы структура, схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID (интеллектуальных электрических сетей). Показано, что новые условия функционирования электроэнергетики, повышение требований к ее технологическому состоянию и надежности в большинстве стран предопределили переход к реструктуризации электрических сетей на базе новой инновационной структуры SMART GRID. Приведены определения, различные атрибуты и признаки SMART GRID в наиболее развитых странах, в том числе и в Беларуси. Установлено, что существующие и перспективные схемные и конструктивные решения, позволяющие автоматизировать процесс управления режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID, весьма разнообразны. Наиболее распространенными в распределительных сетях в настоящее время являются источники распределенной генерации (турбины внутреннего сгорания, ветроустановки, фотоэлектрические установки, мини-ГЭС и т. д.). Проанализированы состояние схем и проблемы информационной наблюдаемости традиционных городских электрических сетей Объединенной энергетической системы Беларуси и показано, что в условиях SMART GRID большинство задач управления режимами, характерных для традиционных распределительных сетей 6–10 и 0,38 кВ, теряют свою актуальность. Поэтому в статье сформулированы и представлены основные направления развития автоматической системы управления режимами SMART GRID.

Ключевые слова: структура, городские электрические сети, SMART GRID, схема, конструкция, информация, режим, управление, направление развития

Для цитирования: Фурсанов, М. И. Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 5. С. 393–406. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406

Адрес для переписки

Фурсанов Михаил Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-82
elsyst@tut.by

Address for correspondence

Fursanov Mikhail I.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
elsyst@tut.by

Circuit-Design Solutions and Information Support of City Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID

M. I. Fursanov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The structure, circuit-design solutions and information support of the city electric networks in the conditions of the SMART GRID have been analyzed. It is demonstrated that the new conditions of functioning of electric power engineering, increasing demands for its technological state and reliability in most countries determined the transition to a restructuring of electrical networks to be based on the SMART GRID (intelligent power networks) innovative new structure. The definitions of the SMART GRID, its various attributes and characteristics in most developed countries including Belarus are presented. It is revealed that the existing and future circuit and constructive solutions that can automate the process of managing modes of urban electric networks under the SMART GRID conditions are manifold. At present, the most common in distribution networks are the sources of distributed generation (combustion turbines, wind turbines, photovoltaic installations, mini-hydro, etc.). The patterns and problems of information traceability of a traditional urban networks of the unified energy system of Belarus have been analyzed, and it is demonstrated that in the conditions of the SMART GRID most of the problems of the control mode that are characteristic for traditional distribution networks 6–10 kV and 0.38 kV, lose their relevance. Therefore, the present article presents and features the main directions of development of automatic control modes of the SMART GRID.

Keywords: structure, urban electric networks, the SMART GRID, circuit, design, information, mode, control, direction of the development

For citation: Fursanov M. I. (2017) Circuit-Design Solutions and Information Support of City Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 393–406. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406 (in Russian)

Введение

Городские электрические сети являются основным компонентом системы электроснабжения любого города, который осуществляет распределение электроэнергии по территории города с помощью городских (в основном кабельных) сетей 6–10 кВ и содержит трансформаторные подстанции (ТП) и линии, соединяющие центры питания (ЦП) с ТП и ТП между собой, а также распределительные сети до 1000 В, питающие потребителей электрической энергии [1]. При этом сети 35–110 кВ и выше называются электроснабжающими, а сборные шины 6–10 кВ питающих подстанций – центрами питания городских сетей.

В Республике Беларусь электроснабжение городов выполняют городские районы электрических сетей, а в Минске – Минские кабельные сети (МКС), в структуру которых входят 18 централизованных служб и отделов и шесть электросетевых районов. На балансе МКС 22 питающие подстанции 110/0,4 кВ, четыре подстанции 35/10/6 кВ и 1897 ТП. Общая протяженность воздушных и кабельных линий составляет 6345 км, включая 14000 участков распределительных сетей 6 (10) кВ.

Фрагмент городской электрической сети, приведенный на рис. 1, состоит из: двух питающих подстанций 35–110 кВ («Юго-Запад» и «Петровщина») с двумя сборными шинами 6–10 кВ (ЦП1 и ЦП2); трех распределительных линий (фидеры 302, 404 и 611); трех понижающих подстанций 10/0,38 кВ (ТП 2930, 2941 и 2725); сети 0,38 кВ, подключенной к абонентской ТП 2725, и двух источников распределенной генерации: Г1 – на шинах 10 кВ ТП 2930 и Г2 – на шинах 10 кВ ТП 2725.

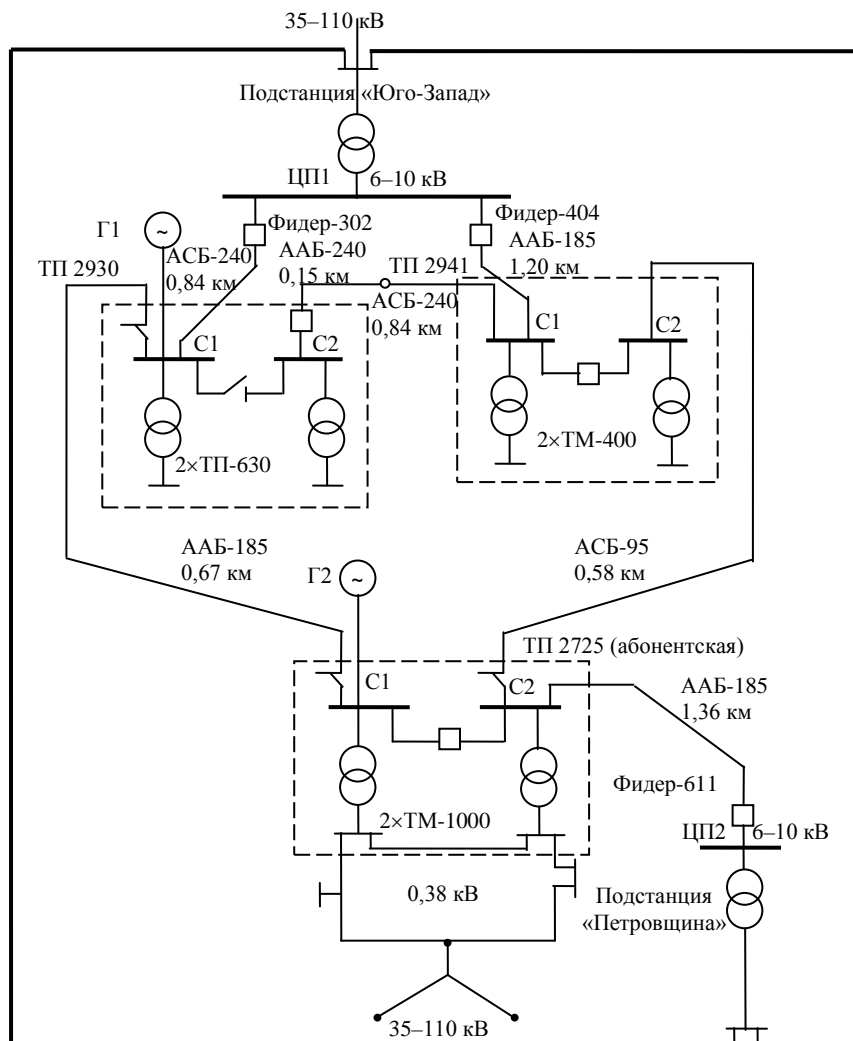


Рис. 1. Фрагмент городской электрической сети

Fig. 1. A fragment of city electric network

Для анализа и оптимизации режимов традиционных городских сетей 6–10 кВ на кафедре «Электрические системы» БНТУ разработан и в Беларуси повсеместно эксплуатируется универсальный промышленно-вычислительный комплекс GORSR [2]. Основными его функциями явля-

ются: создание модели электрической сети в реальном времени и решение основных технических задач эксплуатации городских сетей – расчет и анализ режима, оптимизация точек разреза, оценка чувствительности максимальных токовых защит, расчет и анализ емкостных токов замыкания на землю и зарядных токов и т. д. К приоритетным направлениям данного комплекса относятся: использование различных баз данных, разработанных на платформах СУБД, FoxPro, MS-Access, Paradox, Oracle и других, а также графическое представление схем сетей и результатов расчета режима, в основу которого положено определение потокораспределения в кабельных линиях с двусторонним питанием, что в современных условиях реструктуризации городских электрических сетей не актуально и требует совершенствования.

Новые условия функционирования электроэнергетики, повышение требований к технологическому состоянию отрасли, надежности систем в большинстве развитых стран предопределили переход к реструктуризации электрических сетей энергосистем на базе инновационной организационной структуры SMART GRID (интеллектуальных электрических сетей). При этом реструктуризация подразумевает не только обновление основных производственных фондов, текущих и инвестиционных активов электрических сетей (проводников, трансформаторов, средств измерения и передачи информации, коммутационных аппаратов, паспортизации...), но и обеспечение энергетической (и экологической) безопасности и эффективности (энергетической и экономической) за счет нового типа сетей – «интеллектуальной» энергетики.

Термин SMART GRID (умные или интеллектуальные сети) официально используется с 2003 г. [3]. Однако единой трактовки этого понятия в мире до сих пор нет [3–5]. В мировой практике для определения структуры SMART GRID используются ее различные атрибуты и признаки (табл. 1).

В западных странах SMART GRID связывают, прежде всего, с интеграцией возобновляемых источников энергии с электроэнергетическими системами и формированием у электрических сетей активных и адаптивных свойств, таких как самодиагностика и самовосстановление. Также акцент делается на АСКУЭ, соединенные в единую информационную сеть и позволяющие оптимизировать расход энергии в разное время суток.

В России SMART GRID называется интеллектуальной электроэнергетической системой с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) [5–7]. Под ней понимается комплекс электрооборудования (воздушные линии передачи, трансформаторы, выключатели и т. п.), подключенный к генерирующим источникам и потребителям на новых принципах, технологиях передачи и управления процессами. Предполагается объединение на новом технологическом уровне электрических сетей, потребителей и производителей электроэнергии в единую автоматизированную систему с активно-адаптивной сетью.

Таблица 1

Признаки SMART GRID в различных странах
Features of the SMART GRID in various countries

США	Европейский союз	Россия
Способность к самовосстановлению после сбоев в подаче электроэнергии	Гибкость – способность сети подстраиваться под требования потребителей электроэнергии	Насыщенность активными элементами, позволяющими изменять топологические параметры сети
Возможность активного участия в работе сети потребителей	Доступность для подключения новых пользователей, в том числе потребительских генерирующих источников	Насыщенность датчиками, измеряющими текущие режимные параметры сети
Устойчивость к физическому и кибернетическому вмешательству злоумышленников	Надежность – способность сети гарантировать защищенность и качество поставки электроэнергии в условиях массового применения цифровых технологий	Развитые системы сбора и обработки данных, а также управления активными элементами сети и электроустановками потребителей
Обеспечение требуемого качества передаваемой электроэнергии	Экономичность – максимальное применение инновационных технологий в построении, управлении и регулировании функционированием сети	Мониторинг и управление топологическим состоянием сети, а также взаимодействием со смежными энергетическими объектами в режиме реального времени
Обеспечение синхронной работы источников генерации и узлов хранения электроэнергии	Безопасность – недопущение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды	Развитые системы автоматического анализа текущего состояния сети, построения прогнозов, поддержки принятия решений
Обеспечение появления новых высокотехнологичных продуктов и рынков		Высокое быстродействие систем информационного обмена, обработки, анализа и управления
Повышенная эффективность работы энергосистемы в целом		

ИЭС ААС России представляет собой электроэнергетическую систему нового поколения, основанную на мультиагентном принципе организации и управления ее функционированием и развитием с целью обеспечения эффективного использования всех ресурсов (природных, социально-производственных, человеческих) для надежного, качественного и эффективного электроснабжения потребителей за счет гибкого взаимодействия всех субъектов (всех видов генерации, электрических сетей и потребителей) на основе современных технологических средств и единой интеллектуальной иерархической системы управления. Важнейшая роль в ИЭС ААС отводится активно-адаптивной электрической сети как технологической инфраструктуре электроэнергетики, наделяющей интеллектуальную энергосистему принципиально новыми свойствами [6].

В Объединенной энергетической системе (ОЭС) Беларуси термин «SMART GRID» в распределительных электрических сетях определен СТП 09110.47.104–11 ГПО «Белэнерго» [8]. В соответствии с [8] SMART GRID представляет собой систему нового поколения, интегрирующую производителей, потребителей электроэнергии и электрические сети, образуя единое информационное и коммуникационное пространство. SMART GRID позволяет в реальном времени отслеживать и контролировать режимы работы всех участников процесса выработки, передачи и потребления электроэнергии, оперативно реагировать в автоматическом режиме на изменения параметров и осуществлять бесперебойное электроснабжение с максимальной экономической эффективностью при снижении влияния человеческого фактора. SMART GRID представляет собой совокупность линий электропередачи разных классов номинального напряжения, активных устройств электромагнитного преобразования электроэнергии, коммутационных аппаратов, устройств защиты и автоматики, информационно-технологических и адаптивных управляющих систем. При проектировании интеллектуальной части SMART GRID используются современные средства управления, новые системы диагностики и высокоскоростные системы передачи информации. В этом же документе SMART GRID определяется как главное направление перспективного развития распределительных электрических сетей Белорусской энергосистемы.

Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID

В настоящее время работы по построению концепции создания интеллектуальных сетей развиваются в основном в направлении их автоматизации. Это прежде всего относится к новым схемным и конструктивным решениям городских сетей (создание новой сетевой топологии с иерархической территориальной и технологической сегментацией и гибкими электросетевыми связями, обеспечивающими обмен и автоматическое регулирование и подключение мощностей; взаимодействие с любыми видами генерации, включая малые и альтернативные источники энергии, и т. д.), а также к построению единого информационного пространства, базирующегося на современных измерительных и коммуникационных технологиях. Существующие и перспективные схемные и конструктивные решения, позволяющие автоматизировать процесс управления режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID, весьма разнообразны. К схемным решениям можно отнести: широкое применение источников распределенной генерации (турбины внутреннего сгорания, фотоэлектрические установки, ветроустановки, мини-ГЭС и т. д.); сложность и объемность схем, имеющих большое количество резервных связей между распределительными пунктами 6–10 кВ, которые в нормальном режиме могут быть отключены; привязку схем перспективного развития сетей 0,4–10 кВ

к карте местности с учетом перспективного строительства или реконструкции, планируемые изменения в характере нагрузок и генерации; наличие требуемого уровня автоматизации с применением интеллектуальных устройств; содержание технических решений по увеличению пропускной способности, управляемости, надежности функционирования, эффективности и безопасной эксплуатации сетей.

Кроме того, схемы распределительных городских электрических сетей должны соответствовать определенным техническим решениям, мероприятиям и требованиям. Рекомендуемые технические решения: в сетях с преобладанием кабельных линий электропередачи рекомендуется применять двухлучевую (разных типоразмеров), а также петлевую схемы построения сети. Магистральный принцип предусматривает построение магистрали в сети напряжением 6–10 кВ от независимого источника питания (ПС 35–110/10 (6)) до точки соединения, через пункт АВР (как правило, РП или ОТП), с другой магистралью от другого независимого источника питания.

При наличии на магистралях ВЛ–10 кВ ответвлений (отпаяк) рекомендуется в целях секционирования, сетевого резервирования и в качестве отключающего аппарата применять реклоузеры (устройства с управляемым выключателем 10 кВ).

Для ответственных потребителей следует устанавливать устройство АВР-6-10 кВ в ТП и АВР-0,4 кВ, как правило, непосредственно во вводном устройстве потребителя.

На всех вновь вводимых ВЛ и КЛ напряжением 10 кВ необходимо предусматривать установку устройств регистрации аварийных режимов (индикаторов короткого замыкания) с подключением их к каналам телемеханики.

Новое строительство и реконструкцию городских сетей следует осуществлять на основе:

- выбора оптимального схемного решения построения сети города (района города) в зависимости от расположения источников питания;
- применения в кабельных сетях преимущественно кабелей 0,4–10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена и высоконадежной кабельной арматурой;
- применения (в условиях большой стесненности и при количестве кабелей (в пучке) более 20) блочных канализаций (как правило, с толстостенными полиэтиленовыми трубами) и (или) туннелей (в крупных городах);
- использования малогабаритных БКТПБ и РП в блочном исполнении с оборудованием 10 кВ на базе вакуумных (элегазовых) выключателей;
- применения на ВЛИ (в местах малоэтажной и частной застройки) многоцепных опор повышенной прочности с возможностью подвески СИП большого сечения (до 95–120 мм²);
- наличия генерирующих источников в распределительной сети.

К конструктивным можно отнести следующие решения: в трансформаторных подстанциях вместо масляных выключателей и выключателей нагрузок с механическими приводами необходима установка вакуумных выключателей нагрузок с поддержкой дистанционного управления по каналам связи устройств телемеханики.

Применение реклоузеров позволяет удаленно управлять электроснабжением потребителей и при необходимости автоматически отключать поврежденные участки сети, добиваться сокращения времени восстановления электроснабжения, снижения частоты повреждений линии и соответственно объема ремонтных работ.

Применение современного оборудования, конструкций, материалов и эффективных технологий (кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, отличающейся возможностью вертикальной прокладки и повышенной надежностью в эксплуатации; муфт из термоусаживаемого полиэтилена, обладающих более длительным сроком службы и высокими диэлектрическими свойствами, и т. д.).

Информационная система SMART GRID строится на оперативно-информационных комплексах (ОИК), включающих: устройства телеизмерения параметров режима электрической системы, сбора и агрегирования информации, каналы связи, базы данных, системы оперативного отображения параметров режима, программного обеспечения, обрабатывающего результаты телеизмерений и формирующего задания для объектов диспетчерского управления, электронные журналы – средства регистрации событий и диспетчерских команд.

Для того чтобы электрическая сеть превратилась в SMART GRID, недостаточно внедрения на ее объектах отдельных «умных» элементов. Требуется также адекватное информационное обеспечение, т. е. создание единого информационно-технологического пространства.

Известно [7], что в правовом поле SMART GRID опирается на пять семейств международных стандартов, два из которых посвящены общей информационной модели (СІМ), необходимой для оперативного сбора и обмена данными между аппаратурой и сетями. Для этой цели целесообразно иметь современные базы данных городских электрических сетей и телемеханические средства сбора и передачи информации. В информационном поле важнейшим элементом SMART GRID в сетях любого уровня является цифровая подстанция.

Информация с цифровых подстанций SMART GRID концентрируется и передается на следующий уровень управления – в SMART-диспетчерские, потому что цифровые подстанции в присутствии постоянного обслуживающего персонала не нуждаются. Сопоставление традиционных и интеллектуальных электрических сетей показано в табл. 2, а краткая характеристика городских SMART GRID в Республике Беларусь проанализирована ниже.

Таблица 2

Сопоставление традиционной электрической сети и SMART GRID
Comparison of a traditional electric grid and the SMART GRID

Показатель сравнения	Традиционная сеть	SMART GRID
Сети потребителей		
Автоматизированная система управления энергопотреблением, в том числе с привлечением потребителей-регуляторов к участию в режимном управлении	Нет	Есть
Автоматизированная система учета электропотребления	Частично	Повсеместно
Система регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности	Частично	В необходимом объеме
Местные (резервные) источники генерации	Практически отсутствуют	Широкое применение малой генерации и накопителей электроэнергии
Наличие интерфейса связи с единым центром управления	Нет	Есть
Интеллектуальные энергосберегающие технологии в системах электроснабжения, в том числе такие, как «умный дом», «умный город»	Практически отсутствуют	Повсеместно
Распределительные сети общего назначения		
Системы автоматического контроля поузлового баланса активной и реактивной мощностей	Незначительно	Повсеместно
Системы контроля качества электроэнергии в узлах сети	Незначительно	Повсеместно
Системы централизованного автоматического управления нагрузкой потребителей	Нет	Есть
Наличие управляемых сетевых элементов, изменяющих параметры сети	Незначительно	Много
Наличие систем управления для поддержания баланса при выделении узлов сети на изолированную работу	Нет	Есть
Системы контроля и управления надежностью электроснабжения	Нет	Есть
Системообразующие сети объединенных энергосистем		
Системы автоматического контроля поузлового баланса активной и реактивной мощностей, потерь электроэнергии	Нет	Есть
Системы контроля напряжения в контрольных точках сети	Не развиты	Повсеместно
Система оперативной оценки текущего состояния (режимов) сети	Пассивная	Активная
Наличие сетевых элементов, изменяющих топологию сети по управляющим воздействиям	Нет	Есть

Окончание табл. 2

Показатель сравнения	Традиционная сеть	SMART GRID
Система автоматического контроля загрузки критических сечений и выдачи управляющих воздействий для их разгрузки	Есть	Дополнительно – автоматическое управление параметрами и конфигурацией сети
Система регулирования частоты и активной мощности в отделившихся энергорайонах при аварийных ситуациях	Не развита	Автоматическая
Система автоматизированной реконфигурации электрических сетей	Локальная	Есть
Система оперативного мониторинга переходных процессов и асинхронных режимов на базе синхронизированных векторных измерений	Локальная	Есть
Межсистемные сети		
Система оперативной оценки текущего состояния (режимов) сети	Пассивная	Активная
Система автоматического контроля загрузки электропередачи и выдачи управляющих воздействий для ее разгрузки (при перегрузках)	Есть	Дополнительно – автоматическое управление параметрами и конфигурацией сети

Анализ городских SMART GRID в Беларуси

Разработанные в республике методические рекомендации предусматривают несколько этапов внедрения технологии SMART GRID в распределительных электрических сетях ОЭС Беларуси:

- автоматизацию передачи и распределения энергии;
- установку «умных счетчиков» и обеспечение связи с ними;
- управление энергоснабжением жилых домов и коммерческих предприятий;
- формирование мощных центров обработки информации, поступающей от датчиков SMART GRID.

С учетом изложенного в стандарте предусматриваются практические меры для реализации первых шагов перехода распределительных сетей к SMART GRID.

Городские распределительные электрические сети ОЭС Беларуси характеризуются значительной долей кабельных линий (более 90 %). В традиционном исполнении эти сети обладают острой проблемой информационной наблюдаемости. Среди доступной режимной информации имеются только показания индукционных счетчиков активной и реактивной электроэнергии на головных участках распределительных линий за месяц, а также месячные данные цифровых приборов учета электроэнергии, установленных на вводах 6–10 кВ трансформаторов (35–110)/(6–10) кВ питающих подстанций (ПС) 35 кВ и выше, включая получасовые графики изменения электроэнергии. Данные об электропотреблении в трансформаторных подстанциях (6–10)/0,4 кВ, как и в других точках сети между

головным участком распределительной линии и ТП, практически отсутствуют. Причина – повсеместное использование индукционных счетчиков на нижнем уровне электрических сетей с отсутствием систем автоматического сбора и передачи данных. В электрических сетях 0,38 кВ единственной доступной информацией о нагрузках являются данные об электропотреблении абонентов из базы энергосбыта, которые зашумлены сезонной составляющей и другими (намеренными и ненамеренными) искажениями. Кроме того, схемы городских распределительных сетей состоят из пассивных элементов, не зависящих от режима сети и не изменяющихся от внешних управляющих воздействий. Понятно, что в условиях информационного голода, пассивности элементов, разомкнутости топологии и скромных возможностей регулирования основным направлением развития методов расчета городских распределительных сетей были восстановление, очистка и моделирование недостающей режимной информации, после чего решение большинства задач управления режимами становилось тривиальным, так как имелась возможность использовать примитивные математические модели. Отсутствие необходимой режимной информации в городских сетях традиционного исполнения подталкивает разработчиков к объединению математических моделей сетей 6–10 и 0,38 кВ для их совместного расчета с целью повышения эффективности использования доступной режимной информации. Как показала практика, совместные математические модели сетей 0,38–10 кВ развернуть в оперативной памяти обычной ПЭВМ достаточно проблематично. Выходом является построение расчетов на методах декомпозиции, используя разомкнутую топологию городских электрических сетей 0,38–10 кВ.

В последние годы городские распределительные электрические сети ОЭС Беларуси активно насыщаются распределенными потребительскими генерирующими источниками, в том числе работающими на альтернативных источниках энергии [9]. Источники распределенной генерации подключаются к шинам ТП, в том числе на стороне нагрузки, и оснащаются автоматикой для обеспечения синхронной работы с энергосистемой, отключения от энергосистемы и поддержания автономной работы. Поэтому учет распределенной малой генерации в задачах управления режимами городских электрических сетей становится необходимым.

Большинство же задач управления режимами, характерных для традиционных городских распределительных сетей, в условиях SMART GRID теряют свою актуальность. Это обусловлено тем, что в отличие от городских распределительных сетей традиционного исполнения SMART GRID обладает исключительной наблюдаемостью. С другой стороны, математическая модель SMART GRID становится более сложной благодаря насыщению активно-адаптивными элементами и средствами регулирования.

Создание инфраструктуры технологического управления режимами и эксплуатацией оборудования SMART GRID должно предусматривать разработку интегрированной информационно-управляющей системы нового поколения, работающей в рамках единой информационной модели на

основе стандартизованных протоколов и интерфейсов взаимодействия и осуществляющей глобальный мониторинг и контроль функционирования всех секторов электроэнергетической системы, обеспечивая требуемое качество и надежность на всех уровнях.

Совместные расчеты городских сетей 6–10 и 0,38 кВ в условиях SMART GRID становятся не актуальными. По каждому ТП 6–10 кВ и каждому потребителю сетей 0,38 кВ в SMART GRID доступны графики изменения действующих значений параметров режима прямой, обратной и нулевой последовательностей на частотах каждой выявленной гармоники, а также графики изменения параметров активно-адаптивных элементов схемы сети.

Традиционно рассчитываемые режимные параметры в SMART GRID являются наблюдаемыми. Основные направления и расширения развития области применения автоматического управления режимами SMART GRID с уменьшением доли человеческого субъективизма и интеллектуализации этого управления достаточно подробно изложены в литературных источниках, например в [6].

При этом к одной из радикально новых концепций SMART GRID относятся микросети, которые в общем виде определяются как сети низкого напряжения с источниками распределенной генерации, накопителями энергии и контролируемой нагрузкой (например, обогревателями и кондиционерами). Важное свойство микросетей – то, что, несмотря на функционирование в рамках распределительной системы, они могут автоматически переводиться в изолированное состояние в случае аварий в сети и восстанавливать синхронизацию с сетью после устранения аварии с поддержанием требуемого качества электрической энергии. В будущем предполагается, что функционирование энергосистемы будет осуществляться путем тесного взаимодействия между централизованными и распределенными децентрализованными генерирующими мощностями [6].

Управление распределенными генераторами может быть собрано в единое целое, образуя микросети (microgrid) или «виртуальные» электростанции, интегрированные как в сеть, так и в рынок электроэнергии и мощности, что будет способствовать повышению роли потребителя в управлении электрическими системами. Микросети могут являться частью национальной энергетической системы: они связаны с региональными сетями и через них – с национальной электрической сетью. Электроэнергия от микросетей будет направляться к потребителям и обратно в региональную сеть в зависимости от условий спроса и предложения. Мониторинг и регулирование в режиме реального времени обеспечат информационный обмен и позволят мгновенно обрабатывать все поставки на национальном уровне. Потребители в этом случае будут иметь возможность корректировки поставок электричества в соответствии со своими потребностями.

Будучи автономными или подключенными к национальной энергетической сети, микросети могут размещаться в непосредственной близости от потребителей (небольших городов, деревень, заводов) и производить

электроэнергию «на месте», существенно снижая потери на передачу электроэнергии и повышая КПД.

Smart-микросети позволяют эффективно покрывать растущий потребительский спрос за счет роста поступлений электроэнергии от возобновляемых источников энергии. В микросети энергетические ресурсы не могут быть полностью «распланированы», интеллектуальные системы сочетаются с коммуникационной инфраструктурой, чтобы обеспечить контроль на стороне спроса, и посредством него – баланс между спросом и предложением.

ВЫВОДЫ

1. SMART GRID представляет собой сверхуправляемую, интеллектуальную, распределенную, самодиагностирующуюся и самовосстанавливающуюся систему, состоящую из информационно-телекоммуникационной и электроэнергетической частей, в которой активно-адаптивными сетями объединены в единое информационно-коммутиционное пространство комплекс электрооборудования и клиенты, которые одновременно могут являться потребителями и производителями электроэнергии.

2. SMART GRID – симбиоз электроэнергетики, электроники, информационных технологий, телекоммуникаций, сенсоров, программного обеспечения и математики.

3. Традиционно рассчитываемые режимные параметры в условиях SMART GRID являются наблюдаемыми, поэтому большинство задач управления режимами, характерных для традиционных городских распределительных сетей, в условиях SMART GRID в будущем теряют свою актуальность.

4. Задачи управления режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID требуют применения более сложных и дорогих многоуровневых математических моделей, учитывающих влияние разнообразных средств регулирования, режимную реакцию активно-адаптивной части сетей и распределенной малой генерации, в том числе использующей нетрадиционные источники энергии.

5. Основное направление развития автоматической системы управления режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID – разработка методов и алгоритмов распределенных расчетов на основе многоуровневых математических моделей с использованием блочно-параллельной обработки данных в условиях распределенных высокопроизводительных вычислительных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов, В. А. Городские распределительные электрические сети / В. А. Козлов. Л.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
2. Фурсанов, М. И. Программно-вычислительный комплекс GORSR для расчета и оптимизации распределительных (городских) электрических сетей 10 (6) кВ / М. И. Фурсанов,

- А. Н. Муха // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2000. № 3. С. 34–39.
3. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
 4. SMART GRID или умные сети электроснабжения [Электронный ресурс] // Энэка. Инженерно-консалтинговая компания. Режим доступа: http://www.eneca.by/ru_smartgrid0/. Дата доступа: 02.03.2016.
 5. Интеллектуальные электрические сети в России – предпосылки [Электронный ресурс] // Умные сети и интеллектуальные энергетические системы. Режим доступа: <http://venture-biz.ru/energetika-energoberezhnie/290-intellektualnye-seti>. Дата доступа: 02.03.2016.
 6. Савина, Н. В. Инновационное развитие электроэнергетики на основе технологий SMART GRID / Н. В. Савина. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. 136 с.
 7. Энергетика, SMART GRID, интеллектуальные транспортные сети. Практические возможности в России / А. В. Конев [и др.] // Rational Enterprise Management = Рациональное Управление Предприятием. 2014. № 1. С. 30–33.
 8. Методические рекомендации по автоматизации распределительных электрических сетей 0,4–10 (6) кВ Белорусской энергосистемы: СТП 09110.47.104–11: стандарт ГПО «Белэнерго». Минск: Белэнерго, 2011. 36 с.
 9. Фурсанов, М. И. Учет потребительских энергоисточников в расчетах распределительных электрических сетей 6–10 кВ / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой, В. В. Макаревич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 4. С. 11–15.
- Поступила 04.05.2017 Подписана в печать 05.07.2017 Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Kozlov V. A. (1982) *City Distribution Electric Networks*. Leningrad, Energoizdat Publ. 224 (in Russian).
2. Fursanov M. I., Mukha A. N. (2000) A Software Package of GORSR for the Calculation and Optimization of the Distribution (Urban) Electrical 10 (6) kV Networks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. (3), 34–39 (in Russian).
3. Kobets B. B., Volkova I. O. (2010) *Innovative Development of Power Industry on the Basis of the SMART GRID Concept*. Moscow, Energiya Publ., 208 (in Russian).
4. SMART GRID or the Smart Grids of Energy Supply. *Eneka. Engineering and Consulting Company*. Available at: http://www.eneca.by/ru_smartgrid0/. (Accessed: 02.03.2016) (in Russian).
5. Smart Grids in Russia: the Prerequisites. *Smart Grids and Intelligent Energy Systems*. (2011, 15.09). Available at: <http://venture-biz.ru/energetika-energoberezhnie/290-intellektualnye-seti>. (Accessed: 02.03.2016) (in Russian).
6. Savina N. V. (2014) *Innovative Development of Power Generation Based on SMART GRID Technologies*. Blagoveshchensk, Amur State Univ. 136 (in Russian).
7. Konev A. V., Kupriyanovskii V. P., Badalov A. Yu., Bogdanov A. G., Volkov S. A., Sinyagov S. A. (2014) Power Engineering, SMART GRID, Intelligent Transport Networks. Practical Possibilities in Russia. *Rational Enterprise Management = Ratsional'noe Upravlenie Predpriyatiem*, (1), 30–33 (in Russian).
8. Enterprise Standard 09110.47.104–11. Guidelines for the Automation of Distribution Electrical Networks of 0.4–10 (6) kV of the Belarusian Energy System. Minsk, Belenergo. 36 (in Russian).
9. Fursanov M. I., Zalatoi A. A., Makarevich V. V. (2011) Account of Consumer Power Sources in Calculations of Distributive Electrical Networks of 6–10 kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 11–15 (in Russian).

Received: 4 May 2017

Accepted: 5 July 2017

Published online: 29 September 2017