

Основы создания имитационной модели нормализатора напряжения для анализа нормальных режимов электроэнергетических систем

Г.Л. Русин^a, А.Г. Русина^b, П.В. Чурилов^c, И.Л. Клавсуц^d

Новосибирский государственный технический университет, пр. Карла Маркса 20, Новосибирск, Россия

^agelerusin@gmail.com, ^brusina@corp.nstu.ru, ^cpasha-churilv@inbox.ru, ^dira.klavsuts@gmail.com

Статья поступила 12.01.2017, принята 18.02.2017

Электроэнергия — это продукт, который должен быть качественным. Существуют определенные параметры качества, и должны существовать механизмы по их поддержанию и выбору предпочтительных режимов потребления электроэнергии. Рыночные отношения, в которых действует энергетика, выдвигают новые требования к изучению и оценке режима потребителей. Формирование данных о потребителях требует большой регулярной работы по сбору статистической информации о нагрузках и электропотреблении, а также разработки моделей их прогнозирования, методов планирования и управления режимами. В статье рассматриваются принципы построения математической модели инновационного нормализатора в электроэнергетической системе (ЭЭС) с технологией Smart Grid. В настоящее время нормализаторы установлены на нескольких тысячах объектов, что позволяет проводить сбор и обработку статистической информации для построения модели влияния различных факторов на изменение напряжения у потребителей, а следовательно, получить «умный объект» в системе Smart Grid. Нормализатор позволяет осуществлять обратную связь, регулировать и управлять параметрами режима. С точки зрения потребления электроэнергии, при управлении «умным объектом» представляет особый интерес случайная составляющая. Изучение вероятностных и неопределенных факторов обеспечивает возможность более полного исследования процесса электропотребления, что необходимо при разработке имитационных моделей анализа электропотребления предприятия для обоснования установки устройства. Предлагаемая модель позволяет уточнить расчет срока окупаемости, а также является дополнением к созданной авторами имитационной модели нормализатора. Показано, что внедрение нормализатора упрощает идентификацию виртуальной схемы ЭЭС при управлении и анализе ее режимов.

Ключевые слова: нормализатор; Smart Grid; моделирование; интерактивный режим; инновационные технологии; энергетическая эффективность; виртуальная сеть; регулирование напряжения.

Basics of creating a mathematical model of voltage normalizer for analysis of normal modes in power supply systems

G.L. Rusin^a, A.G. Rusina^b, P.V. Churilov^c, I.L. Klavsuts^d

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marks Ave., Novosibirsk, Russia

^agelerusin@gmail.com, ^brusina@corp.nstu.ru, ^cpasha-churilv@inbox.ru, ^dira.klavsuts@gmail.com

Received 12.01.2017, accepted 18.02.2017

Being one of qualitative products, electricity has to meet some certain requirements. Thus, there are mechanisms which make it possible to fulfill these requirements and select preferable modes of energy consumption. Market relations in the energy sector put forward new requirements for the study and assessment of consumption mode. The consumption data generation requires an extensive and regular work on the collection of statistical information on load and power consumption, as well as the development of forecasting models, planning techniques and power management. This article discusses the principles of construction of mathematical model of an innovative normalizer in the electrical power system (EPS) with Smart Grid technology. At present the normalizers are used at several thousands of plants. It allows to collect and process statistical information and build a contagion model of various factors having an influence on voltage changing, and, therefore, to get a "smart object" in the Smart Grid system. The normalizer enables to carry out feedback control mode and adjust parameters. From the point of view of energy consumption, a random component is of special interest in the management of the "smart object". The study of uncertain and probability factors provides more complete examination of power consumption process. Also, this study is essential in the development of simulation models for the analysis of enterprise energy consumption to justify device installation. Being a complement to the normalizer simulation model, the proposed model makes the calculation of payback period more exact. It is shown that the introduction of the normalizer simplifies the identification of virtual circuit of the EPS in the management and analysis of its modes.

Keywords: normalizer; Smart Grid; modeling; interactive mode; innovative technologies; energy efficiency; virtual circuit; voltage regulation.

Введение

Сегодня изменение технологического базиса энергетики, связанное с формированием интеллектуальных энергетических систем Smart Grid, приводит к переоценке системы взглядов на роль и место электроэнергетики в будущем обществе, меняет подходы к достижению целей ее развития. Инновационные компоненты интеллектуальных сетей Smart Grid превращают электрическую сеть из пассивного устройства транспорта и распределения электроэнергии в активный элемент системы, изменяют функции и роль потребителей, их переход к активному участию в управлении энергосистемой, что повышает ее эффективность [1].

В настоящее время развитие энергосистемы во многом определяется тенденцией к децентрализации производства электроэнергии и широким распространением распределенной генерации. Распределенная генерация в России — это, как правило, когенерация (синхронная генерация) на различных видах топлива, малые ГЭС, подключаемые к электрическим сетям 110/35–10/6 кВ, мощностью до 25 МВт, а также изолированно работающие энергосистемы (ИРЭС) с распределенной генерацией.

Электрические сети с распределенной генерацией и ИРЭС недостаточно автоматизированы, поэтому целесообразно использовать технологии планирования и управления режимами электрических сетей, применяемые в централизованных энергосистемах, так как они базируются на подробной цифровой модели электроэнергетических систем (ЭЭС), отражающей топологию сети, параметры всех элементов, что ведет к росту размерности решаемых задач и усложнению системы управления.

Таким образом, возникает необходимость разработки и внедрения целого комплекса новых технологий, обеспечивающих благоприятные условия для интеграции распределенной генерации в существующие электроэнергетические системы или создания изолированных работающих распределенных энергосистем.

Наличие распределенной генерации существенно изменяет схемно-режимные свойства ЭЭС, и прежде всего — ранее пассивных распределительных электрических сетей. При этом решение одних задач по обеспечению допустимых параметров режимов упрощается, других — усложняется.

Прежде всего, наличие распределенной генерации изменяет потокораспределение в прилегающей распределительной сети. Ожидаемым положительным эффектом в этом случае являются снижение потерь, разгрузка передающей сети и увеличение тем самым ее пропускной способности, а также повышение уровня напряжения. Тем не менее, неверно определенные точки подключения распределенной генерации к сети и организация управления ими могут привести к ухудшению параметров режима.

Распределенная генерация существенно усложняет задачу управления режимами централизованной энергосистемы в связи с неопределенностью режима рабо-

ты, чувствительностью генерирующих установок к внешним воздействиям и, как следствие, частыми отключениями.

Кроме того, распределительная сеть с появлением в ней генерации приобретает свойства основной сети, становясь энергосистемой, для которой необходимо решение всех тех же задач, что и для большой энергосистемы, по обеспечению надежного и безопасного функционирования, а значит, контроля устойчивости режима сети.

Широко обсуждаются такие вопросы, как влияние распределенной генерации на устойчивость параллельной работы энергосистем и способы организации диспетчерского управления, отмечается необходимость создания адаптивных и гибких моделей управления режимом работы района распределительных сетей [2].

В рамках концепции Smart Grid один из способов повышения энергоэффективности электроэнергетических систем посредством регулирования напряжения потребителей является запатентованный инновационный нормализатор напряжения торговой марки NORMEL™.

Имитационное моделирование инновационного устройства — нормализатора. В рамках концепции Smart Grid одним из способов повышения энергоэффективности электроэнергетических систем является использование нормализаторов напряжения.

Рассматриваемое запатентованное инновационное устройство позволяет повысить энергоэффективность электроэнергетических систем в рамках концепции Smart Grid [3; 4]. Как показано в работах [5; 8; 13; 14 и др.], нормализатор торговой марки NORMEL™, регулируя напряжение потребителей, улучшает такие показатели качества, как отклонения и колебания напряжения, несимметрия напряжений (за счет возможности независимого пофазного регулирования напряжения) в соответствии с требованиями международного стандарта EN 50160: 2010. Как показывает практика, применение нормализатора позволяет экономить от 5 до 25 % потребляемой электроэнергии в зависимости от характера электрической нагрузки.

Изобретение запатентовано в РФ, США, СНГ, ЕС, Украине, странах АСЕАН. Проявленный в мире интерес свидетельствует о необходимости и актуальности использования и появлении принципиально новых инновационных методов и устройств, позволяющих повысить энергоэффективность электроэнергетических систем в разных странах. Для широкого внедрения метода и устройства организовано научно-производственное предприятие NORMEL™ (www.normel.ru), которое в настоящее время ведет работу по производству и совершенствованию запатентованного устройства на основе НИР и НИОКР.

Суть инновационного устройства состоит в применении вольтодобавочного трансформатора. Исследования показали, что применение запатентованного устройства обеспечивает не только нормальную работу

оборудования потребителя, но и приводит к уменьшению потребляемой мощности и потерь в сети, т. е. эффект от применения метода и устройства проявляется на сторонах низкого и высокого напряжения, включая источники генерации. При внедрении запатентованного инновационного устройства наибольший эффект в виде повышения энергоэффективности энергетической системы может быть достигнут, если электроэнергия будет передаваться потребителю энергоснабжающей организацией при максимальном значении напряжения, допустимым стандартом, а использоваться потребителем — при минимальном допустимом значении. Подобное регулирование позволяет обеспечить нормальное функционирование потребителей и снижение их потребляемой мощности, при этом потери на передачу мощности не будут увеличиваться. Этот подход может быть использован в большинстве стран [6].

Создание математических и физических имитационных моделей позволяет организовать виртуальную электрическую сеть с визуализацией устройства, что делает возможным теоретическое обоснование применения инновационного устройства на базе концепции Smart Grid [7]. Результаты расчетов позволят получить новые научные данные о закономерностях процессов, протекающих в сложной энергоинформационной системе, что в перспективе сможет видоизменить технологию проектирования, реконструкции и эксплуатации

электроэнергетических сетей и систем в целом.

В статье рассматриваются принципы построения имитационной модели при применении инновационного устройства в электроэнергетической системе с технологией Smart Grid.

Массовое применение нормализатора напряжения в случае работы последнего в режиме «Вольтоограничение» приводит к следующим результатам:

а) снижается уровень потребления электрической мощности потребителя, оснащенного устройством, за счет снижения напряжения на шинах потребителя;

б) за счет снижения потребляемой мощности снижаются уровни токов питающих линий и нагрузки, и, как следствие, сокращается уровень потерь электрической мощности на всем протяжении от генерирующего источника до конечного потребителя;

в) повышается устойчивость работы генераторов в ЭЭС — за счет снижения потребляемой, а следовательно, и выдаваемой мощности.

Для создания математической модели была выбрана интерактивная система для моделирования нелинейных динамических систем MatLab Simulink (рис. 1).

Поскольку параметры устройства и нагрузки в узлах сети изменяются, моделирование было названо имитационным [8; 9], что позволяет проводить расчеты при варьировании нагрузки, а также учесть различия в параметрах устройства.

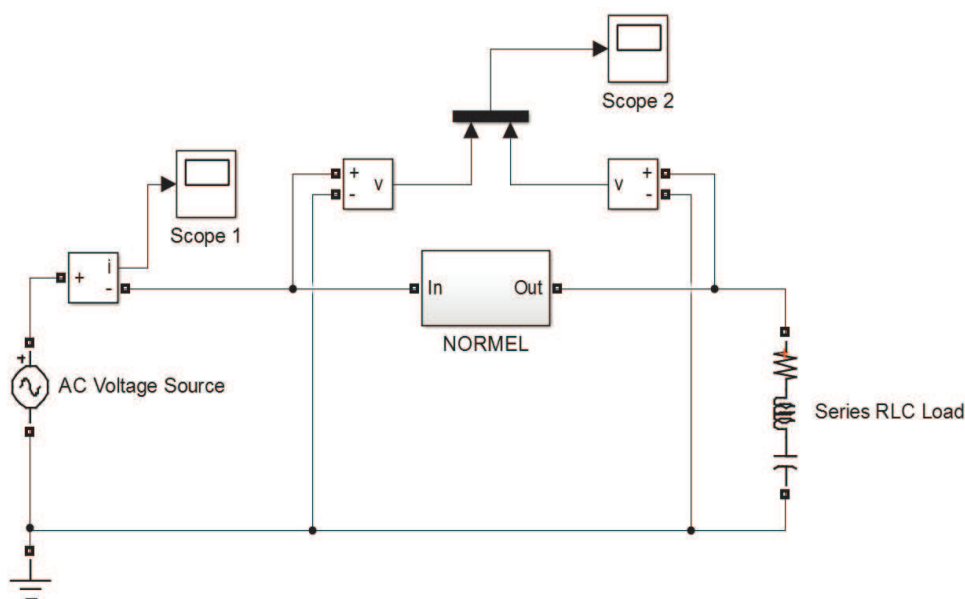


Рис. 1. Графическое представление математической модели нормализатора в Mathlab Simulink: укрупненная схема

Расчет и анализ режимов Smart Grid с использованием нормализатора напряжения. Расчет установленного режима производился на примере локального источника энергоснабжения микрорайона Новосибирской энергосистемы (энергоблок) (рис. 2) в программном комплексе Eurostag в связи с тем, что он позволяет осуществить в дальнейшем внедрение разработанной ранее модели инновационного устройства в MatLab Simulink.

Энергоблок включает в себя восемь газопоршневых электрогенерирующих установок (ГПУ) мощностью по 1,98 МВт каждая (одна из установок — в резерве). Для обеспечения надежности электроснабжения потребителей предусмотрен резервный источник энергии, одна дизельная генераторная установка (ДГУ) общей мощностью 2,17 МВт.

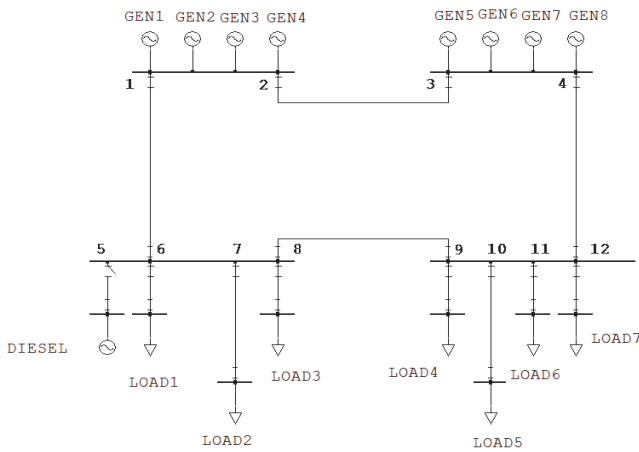


Рис. 2. Расчетная схема Micro Grid

Немаловажным элементом при имитационном моделировании Micro Grid являются нагрузки в узлах. Моделирование нагрузок в узлах осуществлялось в соответствии с их статическими характеристиками. С достаточной для практических расчетов точностью характеристики нагрузки можно записать в виде полиномов второй степени. В программном комплексе Eurostag (который был выбран для моделирования, расчета режима сети Micro Grid) для построения зависимости активной и реактивной мощностей нагрузки от частоты и напряжения применяют выражения (1) и (2):

$$P = P_0 (U / U_0)^a (f / f_0)^g, \tag{1}$$

$$Q = Q_0 (U / U_0)^b (f / f_0)^d. \tag{2}$$

Для упрощения расчетов коэффициенты g и d принимаются равными нулю, а коэффициенты a и b были определены с помощью графиков, изображенных на рис. 3, на примере коммунально-бытовой нагрузки.

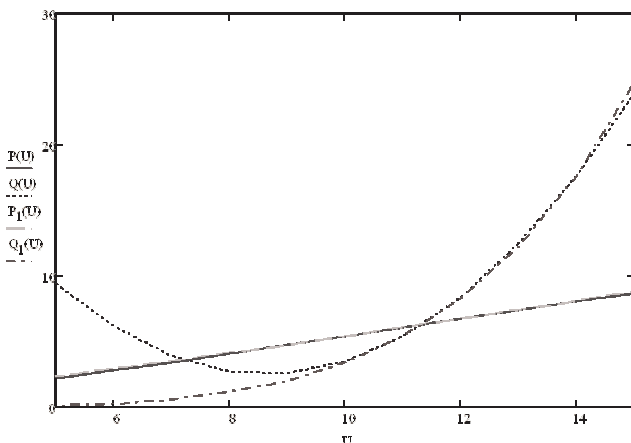


Рис. 3. Статические характеристики коммунально-бытовой нагрузки

На рис. 3 $P(U)$, $Q(U)$ — расчетные характеристики; $P_1(U)$, $Q_1(U)$ — экспериментальные характеристики. Коэффициенты α и β для моделирования в программном комплексе Eurostag были приняты равными 1.2 и 4.9 соответственно.

В результате расчетов авторы столкнулись со следующей проблемой: программы, имеющиеся в распоряжении авторов, не позволяют рассчитать режим сети с классом напряжения 0,4 кВ, а именно на этом напряжении в настоящее время работает рассматриваемое устройство нормализатора.

В этой связи на кафедре автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета (АЭЭС НГТУ) была разработана авторская компьютерная программа расчета нормального режима, названная NET, которая позволяет рассчитывать такую сеть [10]. Тестовая схема для проведения расчетов по модели приведена на рис. 4.

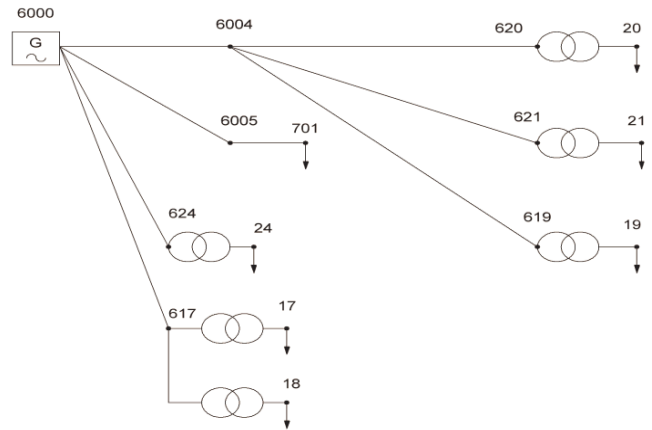


Рис. 4. Тестовая схема сети для расчета нормального режима

В зависимости от параметров напряжения сети глубина регулирования напряжения устройством может варьироваться от 2,5 до 20 %, что решается благодаря применению нормализатора различных модификаций. Соответственно, результаты моделирования находятся в прямой зависимости от выбора регулировочных параметров устройства. Устройство установлено в узлах 17–21 и 24. В программе NET устройство реализовано как двухобмоточный трансформатор (620-20, 621-21, 619-19, 624-24, 617-17, 617-18) с номинальным коэффициентом трансформации, равным 1, и возможностью регулирования напряжения с помощью дополнительных витков с диапазоном регулирования $\pm 5\%$ при изменении напряжения низковольтной обмотки трансформаторов 10/0,4. В таблице приведены данные по регулированию напряжения при работе устройства в режиме вольтоограничения [11].

Результаты расчетов имитационного моделирования в программе NET

№ узла	До регулирования, кВ	После регулирования в узле 18, кВ	После регулирования в узлах 17–21 и 24, кВ
20	0.41	0.41	0.389
21	0.41	0.41	0.389
19	0.41	0.41	0.389
24	0.411	0.411	0.391
17	0.411	0.411	0.39
18	0.412	0.391	0.391

В программе NET регулирование происходит не в автоматизированном режиме. Автоматизация может быть получена с помощью объединения математической модели MatLab Simulink и программного комплекса Eurostag для проведения имитационного моделирования. Поставлена задача построения физической модели Micro Grid на электродинамической модели электроэнергетической системы НГТУ [12].

Анализ электропотребления Западно-Сибирской железной дороги. Западно-Сибирская железная дорога (ЗСЖД) как потребитель электрической энергии исторически имеет особое стратегическое значение для России. Этот железнодорожный комплекс является связующим звеном единой экономической системы и самым доступным транспортом для миллионов граждан. Без четкой работы железнодорожного транспорта невозможна стабильная деятельность промышленных предприятий, своевременный подвоз жизненно важных грузов в любую часть страны.

ЗСЖД является особым и довольно крупным потребителем электроэнергии. Доля электропотребления электрифицированного железнодорожного транспорта (ЭЖДТ) только в Новосибирской области составляет приблизительно 15 %.

Авторами предложена структура совокупности факторов, формирующих потребление электрической энергии железнодорожным транспортом (рис. 5).

Анализируя диаграмму, можно сделать вывод, что при управлении электрическим режимом такого крупного потребителя, как железная дорога, актуальность рассматриваемой инновационной технологии нормализации напряжения резко возрастает, поскольку с ее помощью электрические параметры режимов энергосистемы могут гибко изменяться. При этом предполагается использование технологии для всех представленных разновидностей потребления ЭЖДТ.

Следующей особенностью ЗСЖД как потребителя электроэнергии является применение самого низкого тарифа, чтобы удержать данного потребителя у себя (поскольку существует возможность того, что железная дорога в скором будущем выйдет на оптовый рынок электроэнергии и мощности).

И, наконец, железнодорожный транспорт имеет старые приборы коммерческого учета электроэнергии, которые дают лишь общую информацию низкого качества, которая используется только для контроля электропотребления и не используется для расчетов.

Проведенный анализ электропотребления ЭЖДТ показал:

1. Процесс электропотребления электрифицированного железнодорожного транспорта имеет большую амплитуду случайных колебаний во времени.

2. В силу огромного количества потребителей железных дорог (электротяга поездов, предприятия самой железной дороги, сторонние предприятия, запитанные от электросетей железных дорог, бытовое потребление электроэнергии от сетей железных дорог) и в связи с

наличием старых приборов коммерческого учета энергии возникают сложности со сбором данных по электропотреблению ЭЖДТ, с их контролированием и обобщением.

3. Поскольку на электропотребление ЭЖДТ влияет большое число факторов, модель становится чрезмерно громоздкой.

Основы создания блока прогнозирования электропотребления, входящего в состав имитационной модели технологии нормализации переменного напряжения. Как уже говорилось, модель прогнозирования электропотребления имеет целевой характер. Основное внимание уделяется модели, используемой в коммерческих отношениях предприятия и энергоснабжающей компании (ЭСК). Она влияет на управление режимами ЭЭС. Планирование, покупка и последующее регулирование электропотребления в крупной территориально распределенной организации с разнородным потреблением и многоуровневой иерархией управления — это сложный многоступенчатый процесс. Он включает в себя формирование прогнозов потребления, их согласование на различных уровнях управления, контроль соответствия фактического электропотребления плановому, анализ причин отклонений, управление потреблением электроэнергии. В настоящее время отношения между ЭСК и потребителями определяются договором на энергоснабжение, нормативным документом взаимных обязательств и ответственности сторон. В нем определяются юридические условия — права и обязанности сторон по договору, порядок согласования договорного объема потребления электрической энергии, порядок компенсации стоимости отклонений фактического объема потребления электрической энергии от договорного, порядок оплаты и срок исполнения покупателем обязательства по оплате. Часть их зависит от прогноза электропотребления предприятия. Каждый потребитель в договоре с энергоснабжающей организацией указывает величину электропотребления на следующий год с помесечной разбивкой — это лимитируемый расход. В течение года абонент имеет право скорректировать лимиты потребления. По окончании расчетного периода ЭСК осуществляет учет и контроль потребленной электрической энергии. При отклонении фактического потребления от лимитируемого расхода фиксируются отклонения и устанавливаются штрафные правила: на величину отклонения вверх — превышение фактического электропотребления над заявленным, на величину отклонения вниз — снижение фактического электропотребления по отношению к заявленному. Это создает довольно жесткие правила для потребителей розничного рынка. Если их заявка неверна, то ЭСК не знает своего дохода. Совершенствование системы прогнозирования — это актуальная проблема как для потребителей, так и для ЭСК. Затраты на оплату электроэнергии постоянно растут и уже составляют на некоторых предприятиях 20 % от совокупных затрат.

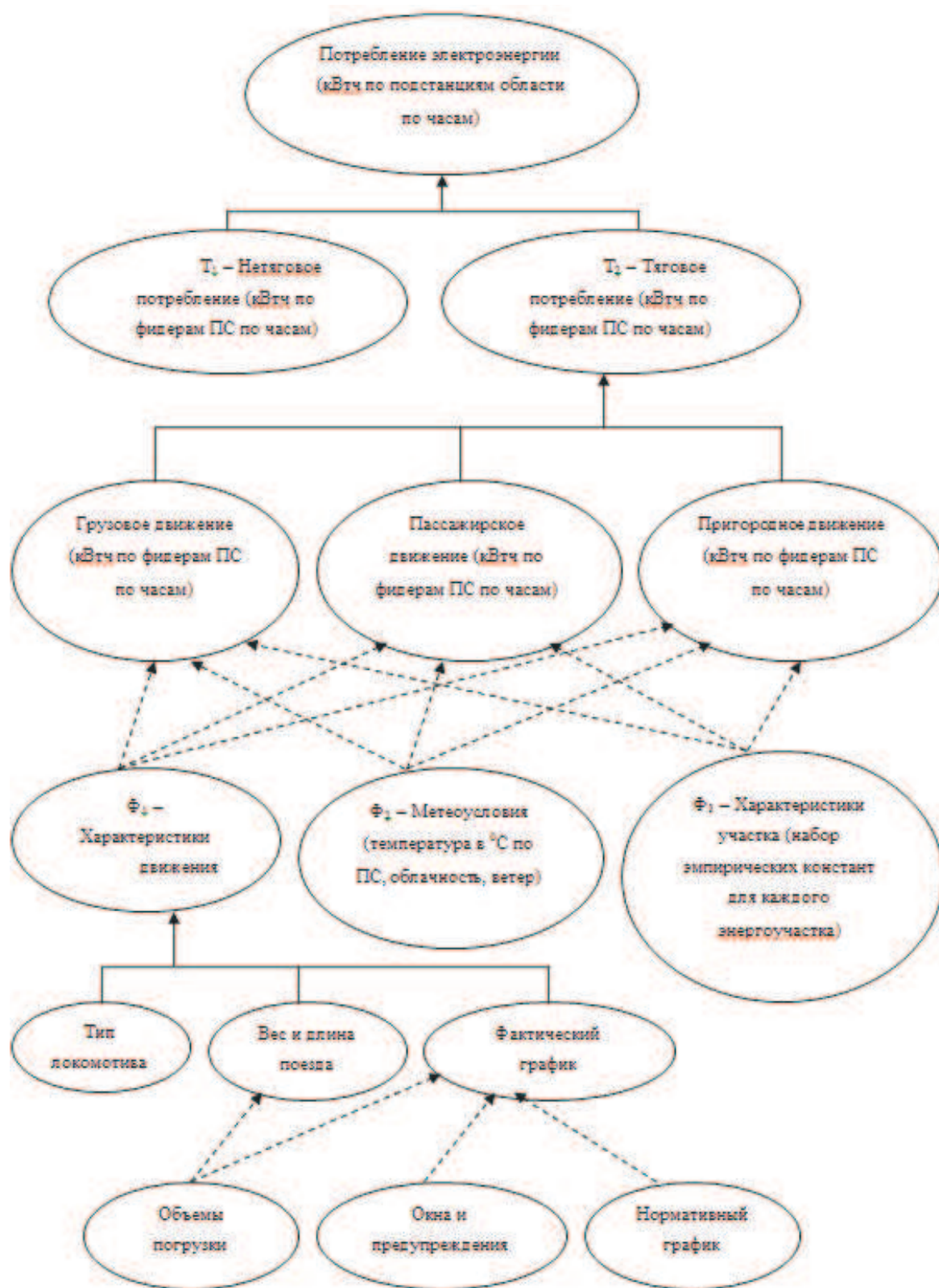


Рис. 5. Диаграмма факторов, формирующих потребление железной дороги

Предприятия решают различные задачи на основе прогнозов электропотребления. Часть задач относится к их внутренней деятельности:

- определяются пути и способы энергосбережения для снижения затрат на электропотребление;
- нормируются величины потребления энергии для выявления эффективности технологического процесса

и его отдельных операций;

- разрабатываются специальные программы взаимоотношений с ЭСК, например программы «Управления спросом»;
- определяется стратегия и тактика конкурентных действий;

- намечается внедрение новых, менее энергоемких, чем существующие, технологий и техники;
- проводится диверсификация продукции, изменяются номенклатура и ассортимент товара и многое другое.

Все эти задачи актуальны и требуют прогнозов, графиков нагрузок и электропотребления по предприятию в целом и по его структурным звеньям.

Вероятностный анализ позволяет оценить влияние неопределенности на электропотребление и нагрузку. Эти оценки можно учитывать при разработке моделей

прогнозирования и использовать при планировании.

Расчеты выборочных характеристик электропотребления железной дороги выполнены в пакетах Excel и Statistica. Суточные графики нагрузки имеют большую неравномерность, размах мощностей — более 50 %. Среднеквадратичные отклонения суточных мощностей также значительны — 17 МВт, т. е. примерно 10 % (рис. 6).

Для других месяцев года получены аналогичные данные. Проявляется также сезонная неравномерность.

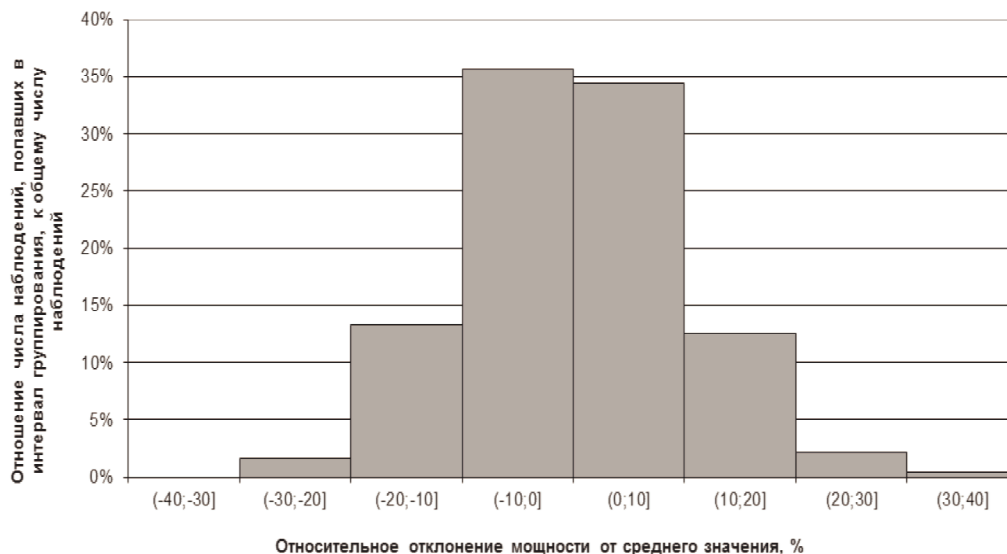


Рис. 6. Гистограмма отклонений нагрузки ЗСЖД от среднего значения за 2015 г.

По вертикальной оси — значения отношений числа наблюдений, попавших в интервал группирования, к общему числу наблюдений; по горизонтальной оси — относительное отклонение мощности от среднего значения, %. Из гистограммы видно, что 36 % отклонений мощности нагрузки от среднего значения принадлежит интервалу $-10...0$ %; 34 % погрешностей — интервалу $0...10$ %, т. е. самым «популярным» является отклонение 10 %. Следовательно, 70 % отклонений находится в интервале $-10...10$ %. Этот интервал может быть взят за порог при разработке модели прогнозирования мощности нагрузки железной дороги, однако видно, что 2-3 % случаев отклонения достигают 30 % [13; 14].

Приведенный анализ электропотребления железной дороги может быть использован для построения адекватной модели крупной нагрузки, рассредоточенной территориально. Данная модель будет использована в комплексной модели электроэнергетической системы с использованием нормализатора переменного напряжения.

Для учета статических характеристик нагрузки была выбрана программа Eurostag, в которой создана ма-

тематическая модель участка сети с установленным устройством (рис. 7).



Рис. 7. Устройство системы с нормализатором в программном комплексе Eurostag

На ст. Рубцовск ЗСЖД (филиал ОАО «РЖД», Новосибирск) установлено и успешно функционирует рассматриваемое устройство. По результатам пассивного эксперимента были получены кривые фазных токов и напряжений (рис. 8).

На основе реальных данных были построены статические характеристики узла нагрузки для ст. Рубцовск. Пример полученной статической характеристики для активной мощности приведен на рис. 9.

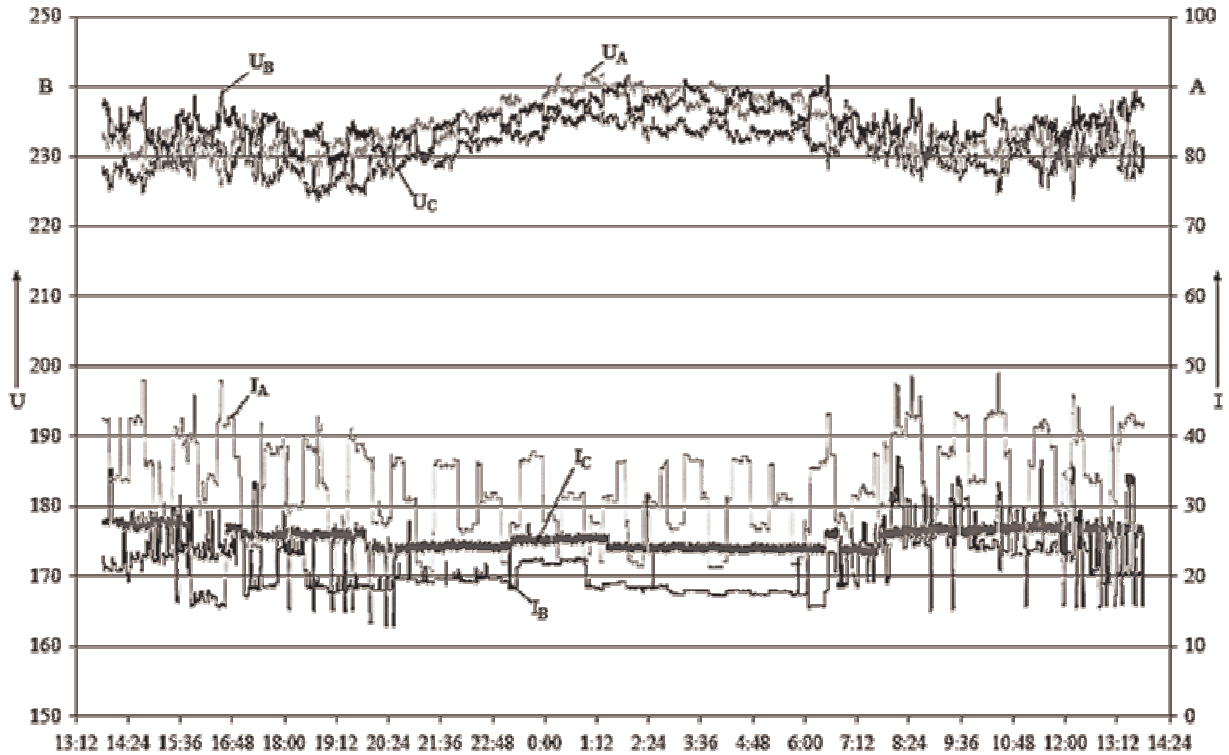


Рис. 8. Кривые фазных токов и напряжений до установки нормализатора напряжения

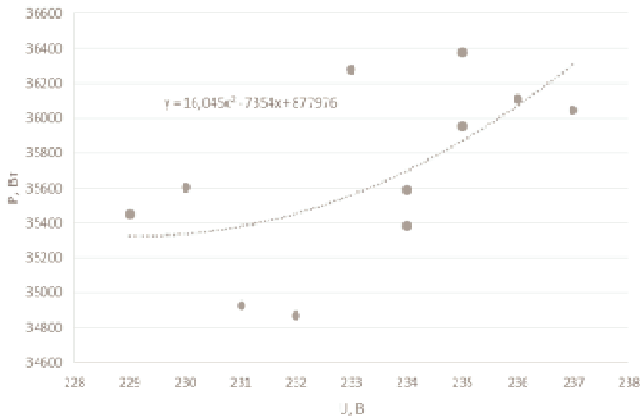


Рис. 9. Статическая характеристика ст. Рубцовск

Статические характеристики реального объекта были использованы для верификации модели узла нагрузки в Eurostag. Согласно формулам (1) и (2) в Mathcad рассчитаны коэффициенты:

$$P = P_0 (U / U_0)^{0.9}, \quad (3)$$

$$Q = Q_0 (U / U_0)^{4.85}. \quad (4)$$

Полученные результаты позволили настроить действие нормализатора в зависимости от уровня входного напряжения и статической характеристики (рис. 10).

На основе проведенного анализа процессов электропотребления крупного потребителя поставлена задача дальнейшего совершенствования и детализации математической модели инновационной технологии нормализации переменного напряжения в Smart Grid System.

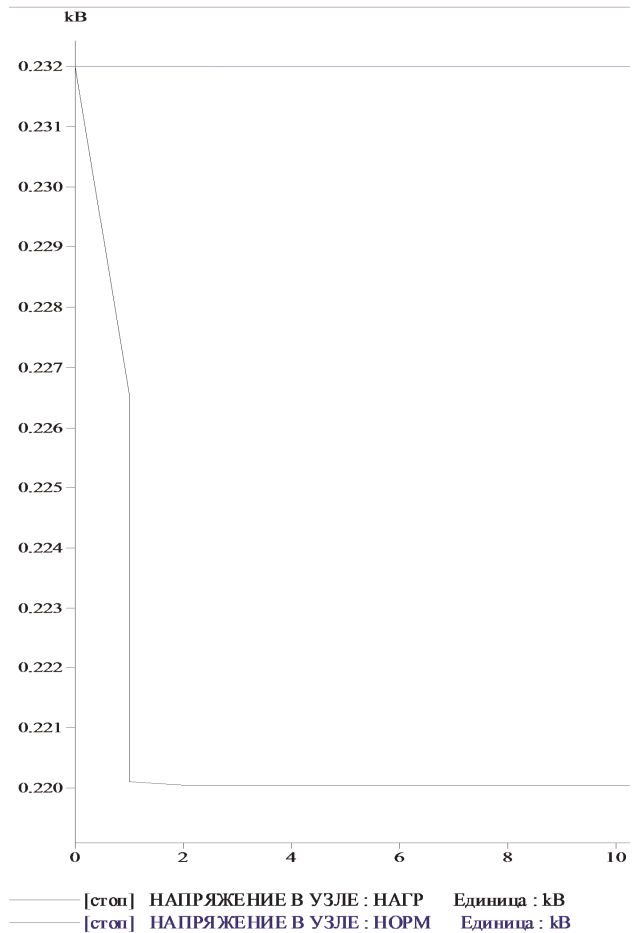


Рис. 10. Регулирование напряжения с помощью нормализатора (ст. Рубцовск)

В качестве ожидаемого результата планируется формирование работоспособной математической модели распределительной сети с участием нормализатора переменного напряжения, позволяющей проводить математические исследования в части отклика нормализатора переменного напряжения на внешние возмущения (существенные изменения нагрузки, а также корректное представление нагрузок их статическими характеристиками).

Повышение экономической эффективности работы ЭЭС при применении нормализатора. Исследуемое инновационное устройство может быть использовано в качестве системы режимного регулирования спроса со стороны потребителя, что существенно повлияет на динамическое управление электросетями. При массовом внедрении данного устройства упрощается идентификация виртуальной схемы ЭЭС для управления режимами и анализа режимов работы ЭЭС, как нормальных, так и переходных [15].

В дальнейшем предполагается применение разработанной модели для составления методики определения параметров виртуальной схемы нагрузки и оптимизации использования инновационного устройства. Применение методики позволяет уточнить динамику изменения параметров виртуальной схемы нагрузки и тем самым повлиять на расчетный предел по статической и динамической устойчивости генераторов системы, поскольку нормализатор может быть интегрирован в автоматизированную систему управления ЭЭС, так как обладает всеми необходимыми для этого информационными каналами [16].

Проведенные исследования помогут систематизировать эти показатели, провести их статистический анализ и использовать для решения задач корректировки и оптимизации режимов энергетической системы, учитывая тенденции развития электрических сетей и энергетических систем, а также уточнить производственную программу выпуска линеек устройств, оценить эффективность инвестиций в массовое производство устройства [17; 18]. Предложенные модели, по мнению авторов, позволят формализовать и уточнить оценку эффективности внедрения инновационных технологий в электро-энергетические системы в рамках концепции Smart Grid. Теоретические результаты работы могут послужить для формирования основы инновационной энергоинформационной инфраструктуры, которая способна явиться базой для комплексного управления всей энергетической системой на базе концепции Smart Grid. Разработанные программные средства и средства математического моделирования для проведения имитационных расчетов можно рассматривать как инновационную платформу для технологической интеграции электрических и современных информационных сетей [19; 20].

Заключение

На базе электродинамической модели кафедры АЭЭС НГТУ проводятся физические эксперименты, по результатам которых разработана программа верификации цифровой модели нормализатора переменного напряжения с данными, полученным на реальных объектах.

Проведение имитационных расчетов на тестовых схемах и на схемах реальных энергосистем позволяет обосновать массовое внедрение инновационной техно-

логии нормализации переменного напряжения в Smart Grid. Этот этап предполагает подготовку обоснования для массового внедрения инновационного устройства «нормализатор переменного напряжения» в реальную систему электроснабжения с целью обеспечения качества электроснабжения. Прделанная работа позволяет повысить энергоэффективность и улучшить показатели энергосбережения как для отдельного потребителя, так и для энергосистемы в целом.

Разработанные имитационные модели инновационной технологии нормализации напряжения будут использованы в качестве основы программного обеспечения для ее внедрения в Smart Grid [21; 22].

Теоретические результаты работы способствуют формированию основы инновационной энергоинформационной инфраструктуры, которая способна явиться базой для комплексного управления всей энергетической системой на базе концепции Smart Grid. Разработанные программные средства и средства математического моделирования для проведения имитационных расчетов можно рассматривать как инновационную платформу для технологической интеграции электрических и современных информационных сетей.

Литература

1. Скурихина К.А., Арестова А.Ю., Армеев Д.В. Исследование динамических свойств microgrid при параллельной работе с энергосистемой [Электронный ресурс] // Вестн. науки Сибири. 2016. № 1. С. 93. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/1204> (дата обращения: 10.12.16).
2. Feigin L.Z., Levinson S.V., Klavuts D.A. Method and Apparatus for Regulating Voltage: Patent 7 816 894 B2. S.U.; filing date 20.06.07; date of publication: 19. 10.10.
3. Фейгин Л.З., Левинзон С.В., Клавсуц Д.А. Устройство регулирования напряжения электроустановок потребителей: пат. 120499 Рос. Федерация. № 2011138854; заявл.23.09.11.; опубл. 20.09.12.
4. Фейгин Л.З., Левинзон С.В., Косой П.Л., Клавсуц И.Л., Сергина А.А., Фейгин И.Л. Стабилизатор переменного напряжения (варианты): евразийский пат. 018813. № 201001720; заявл. 31.08.09; опубл. 30.10.13. Приоритет изобретения: 16.09.08.
5. Клавсуц И.Л., Клавсуц Д.А., Русина А.Г., Русин Г.Л. Режимы управления Smart Power Grids с использованием инновационного метода и устройства спроса со стороны менеджмента // Материалы 50-й конференции зарубежных электроэнергетических гос. ун-тов. (УПЭК 2015). Стоук-он-Трент, 1-4 сент., 2015 г. IEEE, 2015. ст. 7339779. DOI: 10.1109 / UPEC.2015.7339779. Великобритания.
6. Ackermann T., Andersson G., Sder L. Distributed generation: a definition // Electric Power Systems Research. 2001. Vol. 57. P. 195-204.
7. Беляев Л.С., Лагерева А.В., Посекалин В.В. Энергетика XXI века: условия развития, тех-нологии, прогнозы. Новосибирск: Наука, 2004. 386 с.
8. Чурилов П.В., Мамедалиева Д.С. Разработка математической модели нормализатора напряжения // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. Ч. 4. С. 80-81.
9. Филиппова Т.А., Русина А.Г., Дронова Ю.В. Модели и методы прогнозирования электроэнергии и мощности при управлении режимами электро-энергетических систем: моногр. Новосибирск, 2009. 368 с.
10. Лыкин А.В., Жилина А.Н., [Корнеева Н.В.] Определение потерь электрической энергии на основе расчета энер-

гораспределения в электрических сетях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 2. С. 197-202.

11. EUROSTAG. The reference power system dynamic simulation [Электронный ресурс]. URL. <http://www.eurostag.be/en/products/euro-stag/the-reference-power-system-dynamic-simulation> (дата обращения: 20.10.2016).

12. Аптекарь Д.И., Денисов В.В., Фишов А.Г., Шиллер М.А. Автоматика для электрических сетей с распределенной генерацией // Релейная защита и автоматика энергосистем: сб. докл. 22 междунар. науч.-практической конф., Москва, 27-29 мая 2014 г. М., 2014. С. 264-270.

13. Klavsuts D.A., Klavsuts I.L., Rusin G.L. Aspects Of Evaluating The Efficiency Of Introducing Innovative Method And Technology Demand Side Management In Smart Grid System // 48 th International Universities' Power Engineering Conference – UPEC 2013, hosted by Dublin Institute of Technology, Ireland. Section- Smart Grids. 2th - 5th September 2013.

14. Klavsuts I.L., Klavsuts D.L., Rusin G.L., Mezhev I.S. Perfecting business processes in electricity grids by the use of innovative technology of demand side management in the framework of the general conception of smart grids // 49 International Universities power engineering conference (UPEC), Romania, Cluj-Napoca, 2-5 Sept. 2014. IEEE, 2014. 4 p. (UPEC);

15. Schafer A., Moser A. Dispatch optimization and economic evaluation of distributed generation in a virtual power plant // IEEE Energytech. 2012. P.1-6.

16. Jing-Hui Song, Xue-Rong Jing, Hong-Kai Liao, Hong-Bo Gu, Distributed power generation technology and the effect of it on the accident of large-scale power grids // China International Conference on Electricity Distribution. 2008. P.1-5. China.

17. Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability Anderson, A.A. Fouad A.A. NJ, IEEE Press, USA, 2003. 658 p.

18. Lei X., Povh D., Ruhle O. Industrial approaches for dynamic equivalents of large power systems, in: PES Winter Meeting. New York, 2002. Vol. 2. P. 1036-1042.

19. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.

20. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления М.: Наука, 2006. 333 с.

21. Nouredine H. SmartGrids: Motivation, stakes and perspectives // ELECTRA. October, 2012. P. 4-22.

22. Wang Bo, Lan Ka. Analysis of the Distributed Generation System and the Influence on Power Loss // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Wuhan, 2011. P. 1-4.

References

1. Skurikhina K.A., Arestova A.Yu., Armeev D.V. Study of dynamic properties in microgrid parallel operation with energosystem [Elektronnyi resurs] // Vestn. nauki Sibiri. 2016. № 1. P. 93. URL. <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/1204> (data obrashcheniya: 10.12.16).

2. Feigin L.Z., Levinson S.V., Klavsuts D.A. Method and Apparatus for Regulating Voltage: Patent 7 816 894 B2. S.U.; filing date 20.06.07; date of publication: 19.10.10.

3. Feigin L.Z., Levinson S.V., Klavsuts D.A. Method and Apparatus for Regulating Voltage: pat. 120499 Ros. Federatsiya. № 2011138854; zayavl. 23.09.11.; opubl. 20.09.12.

4. Feigin L.Z., Levinson S.V., Kosoi P.L., Klavsuts I.L., Segregina A.A., Feigin I.L. AC voltage regulator (options): evraziiskii pat. 018813. № 201001720; zayavl. 31.08.09; opubl. 30.10.13. Prioritet izobreteniya: 16.09.08.

5. Klavsuts I.L., Klavsuts D.A., Rusina A.G., Rusin G.L. Modes control of Smart Power Grids based on the usage of the innovative method and device of Demand Side Management //

Materialy 50-i konferentsii zarubezhnykh elektroenergeticheskikh gos. un-tov. (UPEK 2015). Stouk-on-Trent, 1-4 sent., 2015 g. IEEE, 2015. st. 7339779. DOI: 10,1109 / UPEC.2015.7339779. Velikobritaniya.

6. Ackermann T., Andersson G., Sder L. Distributed generation: a definition // Electric Power Systems Research. 2001. Vol. 57. P. 195-204.

7. Belyaev L.S., Lagerev A.V., Posekalin V.V. Energy XXI century: the conditions of development, technology, forecasts. Novosibirsk: Nauka, 2004. 386 p.

8. Churilov P.V., Mamedaliev D.S. Development of a mathematical model of the rate-voltage analyzer // Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sb. nauch. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2015. Ch. 4. P. 80-81.

9. Filippova T.A., Rusina A.G., Dronova Yu.V. Models and methods of forecasting of electricity and capacity in the management of modes of electric power systems: monogr. Novosibirsk, 2009. 368 p.

10. Lykin A.V., Zhilina A.N., [Korneeva N.V.] Energy saving and increase of energy-efficiency-energy in electrical networks // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2015. № 2. P. 197-202.

11. EUROSTAG. The reference power system dynamic simulation [Elektronnyi resurs]. URL. <http://www.eurostag.be/en/products/eurostag/the-reference-power-system-dynamic-simulation> (data obrashcheniya: 20.10.2016).

12. Aptekar' D.I., Denisov V.V., Fishov A.G., Shiller M.A. Automation for electrical networks with distributed generation-term // Releynaya zashchita i avtomatika energosistem: sb. dokl. 22 mezhdunar. nauch.-prakticheskoi konf., Moskva, 27-29 maya 2014 g. M., 2014. P. 264-270.

13. Klavsuts D.A., Klavsuts I.L., Rusin G.L. Aspects Of Evaluating The Efficiency Of Introducing Innovative Method And Technology Demand Side Management In Smart Grid System // 48 th International Universities' Power Engineering Conference - UPEC 2013, hosted by Dublin Institute of Technology, Ireland. Section- Smart Grids. 2th - 5th September 2013.

14. Klavsuts I.L., Klavsuts D.L., Rusin G.L., Mezhev I.S. Perfecting business processes in electricity grids by the use of innovative technology of demand side management in the framework of the general conception of smart grids // 49 International Universities power engineering conference (UPEC), Romania, Cluj-Napoca, 2-5 Sept. 2014. IEEE, 2014. 4 p. (UPEC).

15. Schafer A., Moser A. Dispatch optimization and economic evaluation of distributed generation in a virtual power plant // IEEE Energytech. 2012. P. 1-6.

16. Jing-Hui Song, Xue-Rong Jing, Hong-Kai Liao, Hong-Bo Gu. Distributed power generation technology and the effect of it on the accident of large-scale power grids // China International Conference on Electricity Distribution. 2008. P. 1-5. China.

17. Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability Anderson, A.A. Fouad A.A. NJ, IEEE Press, USA, 2003. 658 p.

18. Lei X., Povh D., Ruhle O. Industrial approaches for dynamic equivalents of large power systems, in: PES Winter Meeting. New York, 2002. Vol. 2. P. 1036-1042.

19. Kobets B.B., Volkova I.O. Innovative development of the electric power on the basis of Smart Grid concept. M.: IATs Energiya, 2010. 208 p.

20. Makarov I.M., Lohkin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P. Artificial intelligence and intelligent control. M.: Nauka, 2006. 333 p.

21. Nouredine H. SmartGrids: Motivation, stakes and perspectives // ELECTRA. October, 2012. P. 4-22.

22. Wang Bo, Lan Ka. Analysis of the Distributed Generation System and the Influence on Power Loss // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Wuhan, 2011. P. 1-4.