

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 41-01-2003 «ОТОПЛЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ».

2. РД 34.21.122-87 ИНСТРУКЦИЯ ПО УСТРОЙСТВУ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.

3. Компьютерные измерительные средства (КИС). Курс лекций: учебное пособие для студентов и магистров по направлению «Приборостроение» /Сост. В. В. Ширяев – Томск, Изд. ТПУ, 2008. -190 с.

**УДК 621.311**

**Голованов Игорь Григорьевич,**  
к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: golovanov\_ig@mail.ru

**Леб Максим Сергеевич,**  
обучающийся группы ЭЭ-20-1,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: lebmaksim2@gmail.com

**Самчук Роман Максимович,**  
обучающийся группы ЭЭ-19-1,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: rark\_rrrrr@mail.ru

**Хазиев Алексей Нурисламович,**  
обучающийся группы ЭЭ-19-1,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: ixaziewaaa@gmail.ru

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ  
БОДАЙБИНСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОЛЬЦА ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ**

*Golovanov I.G., Loeb M.S., Samchuk R.M., Khaziev A.N.*

**IMPROVING THE RELIABILITY OF POWER SUPPLY TO CONSUMERS  
OF THE BODAYBA ENERGY RING OF THE IRKUTSK REGION**

**Аннотация.** Рассмотрены основные направления развития строительства и модернизации линий электропередачи для Бодайбинского энергетического кольца с целью повышения надёжности и качества передаваемой электрической энергии потребителям.

**Ключевые слова:** надёжность, качество электроэнергии, система электроснабжения, воздушные линии электропередачи, снижение затрат при строительстве.

**Abstract.** The main directions of the development of the construction and modernization of power transmission lines for the Bodaibo energy ring in order to increase the reliability and quality of the transmitted electric power to consumers.

**Keywords:** reliability, quality of electricity, power supply system, overhead power lines, reduction of construction costs.

Начало развития будущих мировых энергосистем можно отнести ко второй половине XIX века. В это время были основаны такие компании, как General Electric, Westinghouse, Siemens, явившиеся впоследствии локомотивами мировой энергетики. Интенсивно растущий спрос на рынке электроэнергетики, государственное регулирование при растущих частных инвестициях способствовали возникновению в отрасли круп-

ных компаний, многие из которых превратились в межотраслевые концерны.

Что касается России, то начало становления российской энергетики тесно связано с именем Вернера фон Сименса – основателя немецкого концерна Siemens. После ознакомительного визита Сименса в Россию в 1852 г. в России было учреждено дочернее предприятие компании «Siemens & Halske», которое возглавил брат Вернера – Карл Фридрих фон Сименс. Дальнейшая деятельность Кар-

ла Сименса привела к возникновению в России по указу Александра III «Общества электрического освещения» – прародителя ОАО «Мосэнерго» и ОАО «Ленэнерго». Отсюда и берёт своё начало одна из крупнейших в настоящее время мировых энергосистем – российская [1].

Накануне Первой мировой войны энергетика России серьёзно отставала от зарубежных: энергопотребление на душу населения было в 10 раз меньше, чем в Германии и в 60 раз меньше, чем в США. Россия размещалась на восьмом месте в мире по выработке электроэнергии, что, учитывая степень электрификации мирового сообщества, являлось весьма низким показателем. Ещё больше усугубили ситуацию Первая мировая война и революция. В 1917 г. компания Сименса была национализирована, но спустя три года возобновила работу, выполняя контракты в рамках реализации плана электрификации страны – ГОЭРЛО [2].

При выполнении плана ГОЭРЛО Россия, за десять лет совершила настоящее экономическое чудо. В 1917 году в стране работало 74 электростанции – в 1930 их было уже 860, увеличив количество вырабатываемого электричества с 2,2 млрд. кВт·ч в год до 18,5 млрд. кВт·ч. В конце тридцатых годов план ГОЭРЛО был перевыполнен в три раза. В свое время знаменитый германский политик Отто фон Бисмарк отмечал, что лучше всего русским удаются предприятия невыполнимые [2].

Иркутская область обладает развитой системой электроэнергетики. На сегодняшний день энергосистема Иркутской области является избыточной по мощности и электроэнергии. Потенциал энергосистемы по выработке электроэнергии при среднемноголетней обеспеченности гидроресурсами на современном этапе составляет от 67 до 69 млрд. кВт·ч [3].

В целях реализации Инвестиционной Стратегии перед электроэнергетикой области стоят следующие задачи:

- увеличение мощности электростанций в целях обеспечения реализации приоритетных инвестиционных проектов;
- строительство линий электропередач к производственным и инфраструктурным объектам;
- повышение энергетической эффективности: снижение затрат потребителей при подключении и потреблении электроэнергии,

сокращение сроков подключения к энергетическим мощностям [3].

Электроснабжение потребителей электрической энергии в Бодайбинском, Киренском, Усть-Кутском, Казачинско-Ленском районах Иркутской области, Северо-Байкальском и Муйском районах Республики Бурятия, Ленском районе Республики Саха (Якутия) осуществляется от Бодайбинского энергетического кольца 220 кВ (далее – БЭК), которое образуют узловые подстанции (ПС) 500 кВ Усть-Кут, ПС 220 Пеледуй, ПС 220 кВ Мамакан, ПС 220 кВ Таксимо, связанные следующими воздушными линиями (ВЛ):

- ВЛ 220 кВ Усть-Кут – НПС-6 № 1, 2;
- ВЛ 220 кВ НПС-6 – НПС-7 № 1, 2;
- ВЛ 220 кВ НПС-7 – НПС-9 I, II цепь с отпайкой на ПС НПС-8;
- ВЛ 220 кВ Пеледуй – НПС-9 № 1, 2;
- ВЛ 220 кВ Пеледуй – Сухой Лог № 1 и № 2;
- ВЛ 220 кВ Мамакан – Сухой Лог I, II цепь;
- ВЛ 220 кВ Таксимо – Мамакан I цепь;
- ВЛ 110 кВ Таксимо – Мамакан с отпайками (планируется перевод на напряжение 220 кВ);
- ВЛ 220 кВ на участке Усть-Кут – Киренга – Северобайкальск – Новый Уоян – Таксимо.

Центрами питания для БЭК являются ПС 500 кВ Усть-Кут и Мамаканская гидроэлектростанции (ГЭС). На ПС 500 кВ Усть-Кут установлена одна группа однофазных автотрансформаторов 500/220 кВ номинальной мощностью 501 (3x167) МВА.

Суммарное увеличение максимальной мощности потребителей электрической энергии, питающихся от БЭК, с учетом эффекта совмещения новых нагрузок к 2026 году составит 718 МВт.

В БЭК потребителями электрической энергии в рамках технологического присоединения планируется сооружение электрических станций без выдачи мощности в ЕЭС России [3]:

- ООО «ИНК», сооружение тепловой электростанции (ТЭС) установленной мощностью 144 МВт с присоединением к ПС 220 кВ Рассолы;
- ПАО «Газпром», сооружение ТЭС установленной мощностью 66,5 МВт с присоединением к ПС 220 кВ Ковыкта.

Баланс электрической мощности БЭК складывается с существенным собственным дефицитом активной мощности. При максимуме потребления мощности БЭК в зимний период 2019 года – 414 МВт располагаемая мощность единственной электростанции – Мамаканской ГЭС составляет 10 МВт (при установленной мощности станции - 86 МВт) в связи с малой минимальной приточностью в водохранилище в указанный период, который покрывается за счет перетоков по:

- ВЛ 500 кВ Усть-Илимская ГЭС – Усть-Кут № 1;
- ВЛ 220 кВ Усть-Илимская ГЭС – Усть-Кут № 2 (в габаритах 500 кВ);
- ВЛ 220 кВ Усть-Кут – Коршуниха;
- ВЛ 220 кВ Усть-Кут – Лена.

Техническое развитие существующих золотодобывающих предприятий и освоение новых перспективных месторождений на территории Иркутской области, в том числе крупных месторождений золотосодержащих руд Сухой Лог и Чертово Корыто, существенно увеличат спрос на электрическую энергию в БЭК.

Существенное увеличение потребности в электрической энергии будет связано с реализацией масштабного проекта по реконструкции инфраструктуры и расширению, в том числе на территории Иркутской области, Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, а также со строительством таких крупных заводов как Иркутский завод полимеров и завод неорганической химии (ООО «Иркутская нефтяная компания»), а также освоением Ковыктинского месторождения ПАО «Газпром» [3].

К 2026 году планируется увеличение потребления электрической мощности потребителями БЭК до 1131 МВт. Все крупные потребители в соответствии с действующими техническими условиями на технологическое присоединение планируются к вводу до 2026 года (включительно) [3].

Для обеспечения технологического присоединения указанных потребителей утвержденными техническими условиями на технологическое присоединение энергопринимающих устройств к электрическим сетям определены мероприятия по развитию электрических сетей (далее – «сетевой» сценарий). В том числе предусмотрено:

- перевод на проектное напряжение 500 кВ ВЛ 220 кВ Усть-Илимская ГЭС – Усть-Кут № 2;

- реконструкция ПС 500 кВ Усть-Кут с установкой второго автотрансформатора (АТ) 500/220 кВ и увеличением трансформаторной мощности на 501 МВА (3 x 167 МВА) до 1002 МВА;

- строительство ВЛ 220 кВ Усть-Илимская ГЭС – Усть-Кут № 3 (в габаритах 500 кВ) и других объектов 220 кВ;

- строительство одноцепной ВЛ 500 кВ Нижнеангарская – Усть-Кут с ПС 500 кВ Нижнеангарская трансформаторной мощностью 501 МВА (3 x 167 МВА) заходами ВЛ 220 кВ;

- строительство ВЛ 500 кВ Нижнеангарская - Таксимо с сооружением РУ 500 кВ на ПС 220 кВ Таксимо и установкой АТ 500/220 кВ мощностью 501 МВА.

В целях определения рекомендуемого сценария развития Бодайбинского энергетического кольца выполнены расчеты электроэнергетических режимов и определены значения максимально допустимых перетоков активной мощности во вновь образуемых контролируемых сечениях без учета реализации мероприятий (строительство ВЛ 220 кВ Усть-Илимская ГЭС - Усть-Кут № 3 (в габаритах 500 кВ), ВЛ 500 кВ Нижнеангарская - Таксимо с сооружением РУ 500 кВ на ПС 220 кВ Таксимо), предусмотренных утвержденными техническими условиями (ТУ), в соответствии с требованиями к обеспечению надежности электроэнергетических систем (ЭЭС), надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методических указаний по устойчивости энергосистем», утвержденных Приказом Минэнерго России от 03 августа 2018 года № 630. Таким образом, расчеты выполнялись исходя из реализации следующих мероприятий:

- перевод на напряжение 500 кВ ВЛ 220 кВ Усть-Илимская ГЭС – Усть-Кут № 2;

- реконструкция ПС 500 кВ Усть-Кут с установкой второго АТ 500/220 кВ и увеличением трансформаторной мощности на 501 МВА (3 x 167 МВА) до 1002 МВА;

- строительство одноцепной ВЛ 500 кВ Нижнеангарская – Усть-Кут с ПС 500 кВ Нижнеангарская трансформаторной мощностью 501 МВА (3 x 167 МВА) заходами ВЛ 220 кВ [3].

Согласно «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» в качестве приоритетных направлений научно-технического прогресса в электроэнергетике

выделяются следующие направления развития электроэнергетики РФ [4]:

- создание высоко интегрированных интеллектуальных системообразующих и распределительных электрических сетей нового поколения в Единой энергетической системе России (интеллектуальные сети – Smart Grid);

- использование низкотемпературных сверхпроводниковых индукционных накопителей электрической энергии для электрических сетей и гарантированного электроснабжения ответственных потребителей;

- широкое развитие распределенной генерации;

- развитие силовой электроники и устройств на их основе, прежде всего различного рода сетевых управляемых устройств (гибкие системы передачи переменного тока – Flexible Alternative Current Transmission System (FACTS));

- создание высоко интегрированного информационно-управляющего комплекса оперативно-диспетчерского управления в режиме реального времени с экспертно-расчётными системами принятия решений;

- создание высоконадёжных магистральных каналов связи между различными уровнями диспетчерского управления и дублированных цифровых каналов обмена информацией между объектами и центрами управления;

- создание и широкое внедрение централизованных систем противоаварийного управления, охватывающих все уровни Единой энергетической системы России;

- создание автоматизированных систем управления спросом на электроэнергию;

- создание водородных систем аккумулирования энергии и покрытия неравномерностей графика нагрузки.

В практическом плане в России и за рубежом ведутся активные работы по созданию концепций и апробации технологий интеллектуальных сетей. Перспективы их развития в России можно сформулировать следующим образом [5]:

- запасы нефти и газа не безграничны, и освоение возобновляемых источников энергии с дальнейшим включением их в единую энергетическую систему страны является стратегически важной задачей;

- развитие распределённой энергетики, в том числе когенерации за счёт модернизации существующих котельных, для покрытия

максимумов нагрузок и устранения энергодефицита – весьма важная задача для распределительного электросетевого комплекса;

- обеспечение бесбойной работы системы в условиях роста использования спорадической нагрузки (например, электромобилей, рост использования которых очевиден);

- сокращение потерь электроэнергии за счёт построения систем интеллектуального учёта с возможностью учёта качества электроэнергии и ограничения нагрузки;

- развитие коммуникационной среды, способной надёжно и качественно поддерживать двунаправленный информационный обмен между поставщиками и потребителями энергоресурсов. Одним из способов решения данной задачи является применение беспроводных интеллектуальных коммуникационных устройств (например, российских – СИКОН ТС65 и СИКОН-Колибри);

- повышение качества электроэнергии за счёт применения устройств компенсации реактивной мощности;

- применение интеллектуального оборудования и программных комплексов для управления топологией сети с целью обеспечения надёжности функционирования;

- использование накопителей энергии большой ёмкости для выравнивания графика нагрузки, а также для обеспечения бесперебойной работы особо важных объектов;

- развитие рыночных отношений в энергобизнесе с привлечением потребителей электроэнергии (создание отдельных участков сети – аналог Microgrids) как возможных поставщиков электроэнергии в требуемое время в нужные участки сети;

- разработка и производство отечественными компаниями высокотехнологичной конкурентной продукции для обеспечения функционирования интеллектуальной сети.

Перечисленные аспекты будущей интеллектуальной сети чётко соответствуют модернизационному сценарию развития российской экономики, обозначенному руководством нашей страны. Использование зарубежного опыта (не слепое копирование, а осознанное применение лучших практик в проекции на отечественную действительность) в этом случае не станет нарушением базовых принципов патриотизма, являясь образцом рационального использования мирового опыта.

С точки зрения Министерства энергетики США, интеллектуальным сетям (Smart Grid) присущи следующие возможности [6]:

- способность к самовосстановлению после сбоев в подаче электроэнергии;
- возможность активного участия в работе сети потребителей;
- устойчивость сети к физическому и кибернетическому вмешательству злоумышленников;
- обеспечение требуемого качества передаваемой электроэнергии;
- обеспечение синхронной работы источников генерации и узлов хранения электроэнергии;
- появление новых высокотехнологичных продуктов и рынков;
- повышение эффективности работы энергосистемы в целом.

По мнению Европейской Комиссии, занимающейся вопросами развития технологической платформы в области энергетики, Smart Grid можно описать следующими аспектами функционирования [7]:

- гибкость: сеть должна подстраиваться под нужды потребителей электроэнергии;
- доступность, сеть должна быть доступна 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<sub>2</sub>;
- надёжность: сеть должна гарантировать защищённость и качество поставки электроэнергии в соответствии с требованиями цифрового века;
- экономичность: за счёт организации совместного эффективного управления и регулирования функционированием сетей.

Помимо решения задач снижения нагрузки на окружающую среду, уменьшения энергетического дефицита за счёт использования возобновляемых источников энергии, повышения качества и надёжности работы энергосистемы в концепциях Smart Grid прослеживается ещё один очень важный аспект: Smart Grid является катализатором экономического подъёма. Реализация положений данной концепции будет подразумевать развитие инновационных технологий, расширение масштабов производства высокоинтеллектуальной продукции, более интенсивное применение электрической энергии в транспортной инфраструктуре (использование автомобилей с электродвигателями), развитие

новых рыночных отношений с привлечением в энергетику потребителей в качестве активных игроков рынка (возможность продавать электроэнергию, используя локальные генерирующие источники). Благодаря реализации концепции Smart Grid человечество вступит в новую фазу существования, которая будет характеризоваться гармоничным взаимодействием с окружающей средой, улучшением качества жизни и общим экономическим подъёмом. Выглядит амбициозно, но отнюдь не фантастично. И едва ли это противоречит отечественным взглядам на развитие энергетики и страны в целом.

В России идея Smart Grid в настоящее время выступает в качестве концепции интеллектуальной активно-адаптивной сети, которую можно описать следующими признаками [4]:

- насыщенность сети активными элементами, позволяющими изменять топологические параметры сети;
- большое количество датчиков, измеряющих текущие режимные параметры для оценки состояния сети в различных режимах работы энергосистемы;
- система сбора и обработки данных (программно-аппаратные комплексы), а также средства управления активными элементами сети и электроустановками потребителей;
- наличие необходимых исполнительных органов и механизмов, позволяющих в режиме реального времени изменять топологические параметры сети, а также взаимодействовать со смежными энергетическими объектами;
- средства автоматической оценки текущей ситуации и построения прогнозов работы сети;
- высокое быстродействие управляющей системы и информационного обмена.

На основе указанных признаков можно дать достаточно чёткое определение интеллектуальной сети как совокупности подключённых к генерирующим источникам и электроустановкам потребителей программно-аппаратных средств, а также информационно-аналитических и управляющих систем, обеспечивающих надёжную и качественную передачу электрической энергии от источника к приёмнику в нужное время и в необходимом количестве.

На уровне концептуальных отечественных документов можно определить пред-

посылки к развитию отечественной интеллектуальной энергетики. Задачи, которые стоят перед разработчиками сетевых инфраструктур, определены в плане развития электроэнергетики систем электроснабжения к 2030 году. Одним из направлений этого плана является внедрение силовой электроники для решения задач систем автоматического управления и защиты электрооборудования ЭЭС. Внедрение силовой электроники в ЭЭС повысит качество управления, эффективность систем электроснабжения и позволяет обеспечить надёжность электроснабжения потребителей до 0,9990 – 0,9997 с текущего уровня 0,9960 [8].

Предусмотрено широкое внедрение гибких систем передачи электроэнергии (FACTS) и совершенствование комплексов автоматической аварийной защиты и диспетчерского управления. FACTS – это электропередачи переменного тока, оснащенные устройствами современной силовой электроники. Технической основой (устройствами) FACTS являются:

- статические тиристорные компенсаторы;
- вставки постоянного тока;
- электромеханические преобразователи частоты на базе асинхронизированных синхронных машин;
- управляемые шунтирующие реакторы;
- синхронные компенсаторы;
- накопители энергии.

Для энергосистемы сегодняшнего дня характерно механическое управление. Для реализации технического управления и защиты электрооборудования системы электроснабжения широко используется компьютерные технологии, которые обеспечивают высокую скорость обработки и передачи информации о состоянии объекта, однако управляющие сигналы от системы управления и защиты посылаются на электромеханические коммутационные аппараты, где и реализуется управляющее воздействие. Быстродействие микропроцессоров, которые обеспечивают реализацию алгоритмов управления и защиты электрооборудования системы электроснабжения гораздо выше быстродействия исполнительных электромеханических коммутационных аппаратов. Ресурс электромеханических коммутационных аппаратов, как исполнительного элемента

системы управления и защиты электрооборудования по вопросу износа контактной группы значительно ниже, чем у полупроводниковых элементов силовой электроники.

Внедрении в электрические сети технологии FACTS позволит увеличить пропускную способность ЛЭП, оперативно изменить конфигурацию электрической сети и снизить перегрузку сети, регулируя её оптимальную загрузку. Тем самым повышается эффективность и надёжность передачи электрической энергии в системе электроснабжения и предотвращает развитие возможной аварийной ситуации.

Внедрение технологий FACTS в России было инициировано еще в 2003 г. приказом РАО «ЕЭС России» № 488 [8]. Это было обосновано появлением проблем в системе управления электрическими сетями, снижения пропускной способности ЛЭП, недостаточным числом элементов регулирования напряжения в узлах нагрузки, проблемами регулирования реактивной мощности и неоптимальным распределением потоков мощности в электрической сети.

Примеры применения элементов FACTS в последние годы приведены в [9]:

- СТАТКОМ - статический компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения, 50 Мвар, 11 кВ (ПС «Выборгская», 330/400 кВ);
- асинхронизированный синхронный компенсатор с управляющей обмоткой, 2х100 Мвар, (ПС «Бескудниково», 500 кВ);
- устройство управляемой продольной компенсации ЛЭП 500 кВ (ПС «Саяно-Шушенская» - ПС «Новокузнецкая»);
- Забайкальский преобразовательный комплекс, 200 МВт, 220 кВ (ПС «Могоча», сечение ОЭС Сибири - ОЭС Востока);
- фазоповоротное устройство, сечение ОЭС Сибири - ОЭС Урала, транзит 220 кВ Советско-Сосненская-Володино;
- асинхронизированный турбогенератор с управляющей обмоткой, 320 МВт (Каширская ГРЭС-4 ОАО «ОГК-1», энергоблок № 3). Реализация этих проектов является залогом успешного последующего внедрения аналогичных устройств на других объектах единой энергосистемы России. Тем более что улучшение финансового положения в последние годы создаёт для этого благоприятные условия.