

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. В. БУШУЕВ, Н. К. КУРИЧЕВ, А. А. ТРОИЦКИЙ

**Р**азвитие электроэнергетических систем тесно связано с развитием технологий генерации. Переход к энергетическим системам нового поколения будет осуществляться по четырём направлениям: 1) создание систем управления энергосистемой (“умная” энергосистема); 2) развитие технологий дальнего транспорта электроэнергии; 3) развитие технологий накопления электроэнергии в энергосистеме; 4) развитие распределённой генерации.

## “Умная” сеть (Smart Grid)

“Умная” энергосистема является обобщением развиваемых в настоящее время технологий “умных” сетей. Они необходимы для развития распределённой генерации, а также массового использования ВИЭ в энергосистеме (для решения проблемы нестабильности выработки).

Главным следствием развития умных сетей для электроэнергетики станет переход от концепции базовой нагрузки к концепции подстраивания нагрузки к потребляемой мощности. Как результат к 2030 г. обострится конфликт между ядерно-угольной генерацией с медленным изменением мощности и генерацией на основе ВИЭ с гибким изменением мощности (в ветровой энергетике). В случае совпадения минимума нагрузки и максимума генерации ВИЭ потребуются отключение от сети либо ВИЭ, либо ядерных или угольных энергоблоков, причём последнее проблематично по техническим причинам. В перспективе будут разработаны регламенты, оптимизирующие работу энергосистем в подобных ситуациях.

По оценкам Федеральной сетевой компании (ФСК), внедрение технологии “интеллектуальных” сетей уменьшит потери в российских электрических сетях всех классов напряжения на 25%, что позволит достигнуть экономии в 34–35 млрд кВт·ч/год. По оценкам, развитие сети на основе новой технологии может сократить потребность в новых мощностях на 22 ГВт. Объём капитальных вложений в развитие распределительных и магистральных сетей в результате увеличения пропускной способности можно будет снизить почти на 35 млрд долл.

Потребуется масштабные исследования устойчивости сетей с учётом последствий кооперативного поведения производителей и потребителей, что будет стимулировать рост IT- и энергосервисных компаний.

“Умные” сети предполагают также управление спросом на энергию. Для этого применяются прежде всего дифференцированные тарифы. В развитых странах уже сейчас действует до 100 различных тарифов для разного времени суток, дней недели, месяцев года, активной и реактивной потребляемой мощности и т.п. В перспективе энергопотребляющее оборудование будет оснащаться электронными системами, позволяющими в режиме реального времени управлять уровнем энергопотребления. Кроме того, для управления спросом могут использоваться социальные нормативы на электроэнергию. В совокупности указанные решения позволят значительно снизить пиковую нагрузку, особенно в крупных городах, за счёт снижения энергопотребления неприоритетных видов оборудования в периоды пиковой нагрузки.

Развитие “умных” энергосистем зависит от сценария развития мировой энергетики. В инерционном сценарии будут реализованы только элементы “умных” сетей, в стагнационном – основные элементы технологии “умных” сетей, а в инновационном будут созданы “умные” энергосистемы, обладающие качественно новыми свойствами в виде резкого повышения надёжности, управляемости и качества энергоснабжения.

Развитие “умных” сетей благоприятно как для возобновляемой энергетики (позволяет подстраивать уровень энергопотребления под динамику генерирования электроэнергии), так и для атомной энергетики (обеспечивает большую равномерность нагрузки). Необходимо отметить, что минимальная нагрузка в энергосистеме достигает 60–80% от пиковой в зависимости от соотношения коммунального и промышленного энергопотребления. К 2030 г. разрыв между максимальным и минимальным уровнем может быть снижен до 10%, что создаст благоприятные условия для развития атомной генерации. Для АЭС изменение нагрузки крайне нежелательно по техническим (снижение мощности ниже определённого уровня приводит к остановке реактора) и экономическим (высокие капитальные вложения при низких операционных издержках) причинам. Развитие умных сетей снизит потребность в манёвренных газовых мощностях и гидроаккумулирующих электростанциях.

Распространение электромобилей приведёт к выравниванию режима нагрузки на электроэнергетическую систему (за счёт роста потребления в ночные часы). По оценкам, в США перевод 50% национального автопарка на потребление электроэнергии может быть осуществлен без строительства новых генерирующих мощностей – исключительно за счёт повышения КИУМ уже существующих мощностей. Дополнительно выравниванию нагрузки будет способствовать переход на круглосуточный режим активности и, соответственно, энергопотребления в крупных городах по мере эволюции образа жизни. Как следствие, характерные суточные профили нагрузки станут существенно более равномерными, что позволит оптимизировать ре-

жим работы энергосистем. Аналогичный тренд будет наблюдаться и в годовом ходе, поскольку по мере прогресса в снижении энергопотребления для производства тепла и распространения систем кондиционирования зимний максимум нагрузки будет сглаживаться. Этот фактор особенно значим для ТЭЦ с комбинированным производством электроэнергии и тепла.

Повышение равномерности нагрузки будет способствовать росту коэффициента использования установленной мощности и позволит снизить потребность во вводе генерирующих мощностей. Особенно значительным выравнивание профиля нагрузки явится в инновационном сценарии.

### Распределённая энергетика

Спрос на устойчивый доступ к энергоинформационным системам, переход к более технологичным видам энергии усилят спрос на развитие распределённой энергетике. Она позволяет повысить надёжность и независимость энергоснабжения, гарантировать управление энергообеспечением для отдельного потребителя. Технологический прогресс даёт возможность экономически оправданного развития распределённой генерации в условиях постиндустриальной фазы развития.

Развитие распределённой генерации предполагает интеграцию энергетики в техносферу, которая может происходить по двум направлениям.

Во-первых, в настоящее время энергия производится преимущественно на крупных специализированных предприятиях (особенно электроэнергия), но уже сформировался тренд увеличения производства энергии как побочного продукта других технологических процессов на неспециализированных предприятиях, что в условиях высоких цен на энергоносители становится рентабельным.

Во-вторых, развитие ВИЭ в рамках технологий “активного дома” и “активного здания” позволяет использовать потенциал производства энергии непосредственно в зданиях за счёт солнечной энергетике, тепловой энергии, отходов и т.п.

Как следствие, в перспективе будет происходить трансформация потребителей энергии (промышленных, сервисных и коммунальных) в производителей, которые частично обеспечивают собственные потребности, а частично поставляют энергию другим потребителям.

В настоящее время этот процесс находится в начальной стадии, но к 2050 г. он будет быстро прогрессировать. При этом в развивающихся странах в некоторых случаях может сразу формироваться децентрализованная энергетика, минуя стадию современной – централизованной.

Развитие распределённой генерации приведёт к формированию “виртуальных электростанций” (Virtual power plant) – групп распределённых генераторов и аккумуляторов электроэнергии, находящихся под единым управлением. Для диспетчера энергосистемы “виртуальная электростанция” выглядит как один объект.

В инерционном сценарии развитие распределённой генерации и производства энергии неспециализированными компаниями (до 5% мощности) не будет иметь системных последствий, которые потребуют адаптации энергосистем к новым условиям работы с их участием.

В стагнационном сценарии рост распределённой генерации до 30%, главным образом за счёт коммунального сектора, приведёт к некоторому снижению потребления от централизованных источников.

В инновационном сценарии к 2050 г. может сложиться “всеобщее производство энергии”, доля распределённых мощностей достигнет 70%. Для этого необходимо решить как технологические проблемы (переход от асимметричных сетей к симметричным, где производитель и потребитель могут меняться местами), так и организационные (порядок оплаты энергии, порядок управления энергосистемами). Такой процесс приведёт к частичной трансформации энергетического рынка из рынка товаров в рынок сначала услуг, а затем и технологий. Энергетические компании будут выступать как поставщики комплексных технических решений для энергоснабжения, в то время как собственно про-

изводство энергии частично перейдет к конечным потребителям.

В стагнационном сценарии существенно возрастёт доля распределённой генерации в рамках концепции энергоэффективного дома и энергоэффективного города, а также вследствие ускоренного перехода от индустриального к постиндустриальному развитию.

Наибольший потенциал развития распределённой генерации сосредоточен в развитых странах в связи с высоким технологическим уровнем и постиндустриальным типом экономики. В развивающихся странах развитие распределённой генерации до 2030 г. будет сдерживаться стремительной урбанизацией, преимущественно за счёт крупных городов. Но по мере снижения её темпов после 2030 г. такие источники тоже станут быстро распространяться, поскольку в развивающихся странах во многих районах электрификация с опорой на распределённую или внесетевую генерацию эффективнее опоры на централизованные источники энергии. Несмотря на сравнительно небольшой объём потребления энергии распределённых источников, по числу потребителей они займут значимое место.

### **Аккумуляция энергии**

Технологии накопления электроэнергии в энергосистеме необходимы для повышения эффективности использования мощностей и повышения надёжности энергоснабжения. Особенно важны эти технологии для развития возобновляемой электроэнергетики в силу нестабильности выработки на ВИЭ в зависимости от погодных условий.

Технологии в области аккумуляции энергии:

- гидроаккумулялирующие станции (ГАЭС с КПД до 65%);
- аккумуляторы и суперконденсаторы;
- сжатый воздух (КПД до 30–40%);
- супермаховики (КПД может достигать 90% и более);
- сверхпроводящие катушки (КПД к 2050 г. может быть доведен до 99%);
- водородные генераторы (КПД может достичь 50–60% к 2050 г.);

• аккумуляторы тепла с использованием фазовых переходов или энергии химических реакций (КПД до 30%).

Наиболее экономически эффективными накопителями энергии являются ГАЭС и свинцово-кислотные аккумуляторы. В то же время все указанные решения пока отличаются низкой мощностью.

Наряду с накопителями электрической энергии широко применяются и накопители тепловой энергии (как в виде тепла, так и в виде холода). Тепловая энергия аккумулируется нагретой водой, льдом, расплавленными солями. Накопители энергии сейчас находятся среди наиболее быстро развивающихся областей техники. До 2030 г. следует ожидать быстрого прогресса суперконденсаторов, маховиков, сверхпроводниковых накопителей энергии (СПИН).

Технология химического аккумулирования солнечной энергии разработана в Институте катализа им. Г.К. Борескова. За эти работы директор института В.Н. Пармон удостоен Государственной премии 2010 года. Разработанный под его руководством процесс обратимого каталитического преобразования тепловой энергии в химическую и обратно позволяет аккумулировать энергию солнца и использовать высокопотенциальное (600–700 °С) тепло для нагрева пара. Процесс можно также использовать для получения водорода и синтез-газа. Разработаны ещё несколько процессов использования химической энергии.

Водород может быть произведён в ходе различных процессов, связанных с использованием ископаемого топлива, ядерных или возобновляемых источников энергии. К этим процессам относятся электролиз воды, риформинг природного газа, газификация угля и биомассы, расщепление воды при высоких температурах, фотоэлектролиз и различные биологические процессы. В настоящее время проводятся исследования в области получения водорода из воды электролизом, высокотемпературным пиролизом, термokatалитическим разложением. Испытано большое количество катализаторов, однако приемлемое решение до сих пор не найдено. Перспективы водородной энергетики

определяются результатами НИОКР в области катализаторов процесса разложения воды.

На уровне индивидуального потребителя решением могут быть эффективные аккумуляторы большой мощности. Однако создание таких аккумуляторов сталкивается с существенно большими трудностями, чем создание аккумуляторов для электромобилей, поэтому на уровне энергосистемы такие решения до 2030 г. не появятся (в случае технологического прорыва в создании сверхпроводников возможно их появление к 2050 г.). Как следствие, прямое накопление электроэнергии на уровне энергосистемы будет реализовано только в инновационном сценарии и в долгосрочной перспективе.

Косвенные способы накопления электроэнергии на уровне энергосистемы могут быть реализованы путём создания гидроаккумулирующих электростанций. Указанная технология полностью разработана и в перспективе будет быстро распространяться. Особенно эффективной она оказывается в сочетании с использованием ВИЭ, что окупает затраты на создание ГАЭС и потери энергии при многократном преобразовании электроэнергии.

Необходимо отметить, что создание “умных” сетей, позволяющих снизить разрыв между минимальной и пиковой нагрузками и обеспечить динамичное управление мощностью, снижает потребность в накоплении энергии. Поэтому технологии накопления энергии, по-видимому, будут служить не для валового накопления энергии, а для стабилизации режима работы энергосистемы. При сравнительно малой абсолютной мощности они станут играть значимую роль в энергосистеме.

## **Системы передачи электроэнергии**

Появление большого количества мелких источников генерации, рост реактивной нагрузки, усложнение топологии сетей, необходимость повышения качества электроэнергии требуют согласования фаз и управления коэффициентом мощности. Эти задачи решаются с помощью технологий FACTS и линий передачи постоянного тока.

**FACTS (Flexible Alternative Current (AC) Transmission Systems) – гибкие системы передачи на переменном токе.** Системы FACTS появились около 1990 г. Предпосылкой их разработки послужил приход на рынок запираемых электронных компонентов высокой мощности – IGBT, GTO, IEGT. Для управления передачей ЛЭП и подстанции оснащаются средствами управления фазой: синхронными компенсаторами, компенсаторами реактивной мощности Static VAr Compensator (SVC), а для управления ещё и напряжением в сети – поперечными компенсаторами STATCOM (Static Synchronous COMpensator – статический синхронный компенсатор) и продольными компенсаторами SSSC (Static Synchronous Series Compensator – статический синхронный продольный компенсатор). В 1998 г. в США создана первая система UPFC (Unified Power Flow Controller – унифицированная система управления энергопотоками), объединяющая возможности STATCOM и SSSC. Она позволяет управлять и активной, и реактивной мощностью. Пока таких систем в мире единицы. Они особенно важны в больших городах со сложной топологией сетей и трудностями прокладки новых ЛЭП.

**Высоковольтные ЛЭП постоянного тока (HVDC).** Мощность, передаваемая по проводам ЛЭП, ограничена нагревом проводов. Постоянный ток позволяет по той же линии передавать вдвое большую мощность, чем переменный. Кроме того, линии постоянного тока дают возможность связывать части сети переменного тока с разной фазой и частотой. Разработки ННИИПТ (Россия) позволяют плавно перераспределять мощность из линии постоянного тока в разные сети переменного тока. Ключевым для распространения ЛЭП постоянного тока стало создание мощных полупроводниковых выпрямителей и инверторов.

**Сверхпроводящее оборудование.** Отсутствие омического сопротивления в сверхпроводниках давно привлекает энергетиков. Однако снижение стоимости сверхпроводникового оборудования отстаёт от прогнозов. Несмотря на открытие в 1986 г. высокотемпературной сверхпроводимости (при температуре жидкого азота), на ВТСП сделаны толь-

ко ограничители тока. Сильноточные металлургические проводники приходится охлаждать жидким гелием. С 2008 г. в Москве на подстанции “Динамо” действует сверхпроводящая вставка постоянного тока. Открытие новых высокотемпературных сверхпроводящих материалов может произойти в любой момент.

**Воздушные ЛЭП.** Для воздушных ЛЭП высокого напряжения созданы высокие (60–80 м) трубчатые опоры, позволяющие не прокладывать опоры в лесах и застраивать землю под ЛЭП в городах. В России создан длинноискровой петлевой разрядник, защищающий ЛЭП и установленное на них оборудование от грозовых перенапряжений и повреждений, а электрические сети – от коротких замыканий. Новый разрядник позволит отказаться от грозозащитного кабеля, повысит надёжность и снизит затраты на эксплуатацию воздушных ЛЭП.

**Кабельные ЛЭП.** Рост стоимости земли, особенно в городах, и экологические проблемы повышают интерес к кабельным ЛЭП. Для кабельных ЛЭП создаются новые изолирующие материалы с малыми потерями. Сверхпроводниковые ЛЭП также будут прокладываться под землей. Следует ожидать роста доли кабельных ЛЭП, перевода к 2050 г. всех городских сетей на кабель.

**Низковольтные сети.** В связи с широким использованием микрогенерации и аккумулирования энергии низковольтные сети также станут управляемыми. Фотоэлектрические батареи производят энергию постоянного тока. Аккумуляторы, суперконденсаторы и сверхпроводниковые накопители запасают энергию постоянного тока. Светодиоды и электронные приборы потребляют постоянный ток. Поэтому можно ожидать создания двух параллельных сетей у конечного потребителя: низковольтной постоянного тока для питания освещения (светодиодного) и слаботочной электроники и силовой сети переменного тока. Это решение особенно быстро будет распространяться в развивающихся странах, где новые сети могут быть построены практически с нуля.

Развитие технологий дальнего транспорта электроэнергии также позволит снизить потребность в генерирующих мощностях, повысить надёжность энерго-

снабжения и гибко удовлетворять спрос. Современное эффективное расстояние передачи энергии составляет 400–500 км в среднем и до 1000–1500 км в предельном случае при норме потерь при передаче энергии не менее 4% (на больших расстояниях до 10%). В перспективе потери будут постепенно снижаться и в инерционном сценарии к 2030 г. эффективное расстояние передачи электроэнергии возрастет до 1500 км и 2000 км в 2050 г.

В инновационном сценарии эффективное расстояние передачи уже к 2030 г. может достичь (для отдельных ЛЭП) 4000 км при характерной величине 2000 км, а к 2050 г. магистральные ЛЭП, образующие каркас мировых и региональных энергосистем, будут обеспечивать передачу электроэнергии на расстояние до 6000 километров. Такой прирост стимулирует строительство магистральных ЛЭП высокого напряжения и окажет значимое воздействие на строительство и использование генерирующих мощностей.

Расширятся возможности для использования электроэнергии всех видов электростанций, которые по экологическим (АЭС и крупные угольные ТЭС) причинам желательно размещать в малонаселённых районах, либо для использования ресурсов, сосредоточенных в малонаселённых районах (многие ГЭС и угольные ТЭС, часть ВИЭ – ветровые и солнечные электростанции). В ЕС рассматривается проект высоковольтной ЛЭП постоянного тока для системы ветропарков в Северном море общей мощностью 68 ГВт. Стоимость ЛЭП оценивается в 15–20 млрд евро. В случае реализации проекта сеть может поставлять в страны ЕС 247 млрд кВт·ч электроэнергии в год. Развитие высоковольтных ЛЭП постоянного тока в ЕС позволит создать систему потоков электроэнергии, получаемой от крупных ветростанций в Северном море и солнечных станций в Испании и Северной Африке. Развитие сети солнечных термальных электростанций в Северной Африке (проект Desertec) с последующим экспортом электроэнергии в ЕС позволит увеличить энергетическую независимость ЕС и обеспечить 15% электропотребления в Западной Европе.

Это создаст условия для снижения доли угольных ТЭС, а также для замещения атомной генерации. При этом газовые ТЭС потеряют преимущества близости к потребителю (кроме ТЭЦ), но сохранят преимущества дешевизны строительства.

### **Электроэнергетические системы нового поколения**

В совокупности указанные выше тренды сводятся к созданию интеллектуальных Единых энергетических систем нового поколения (ЕЭС 2.0) с возможностями оптимизации нагрузки со стороны конечных потребителей в режиме реального времени.

Возникают интеллектуальные системы управления энергетикой как на уровне энергосистемы, так и на уровне отдельного потребителя. Примерами таких систем уже в настоящее время являются технологии “умных” сетей (Smart Grid) и системы управления энергопотреблением в зданиях и на производственных объектах. В перспективе с 2030 г. из современных разрозненных элементов сложится целостная система интеллектуального управления энергетикой от производства до конечного потребления. В электроэнергетике это потребует создания ЕЭС 2.0. В других отраслях энергетики этот тренд будет выражен слабее (поскольку характерное время доставки энергоносителя потребителю несравнимо выше), но он также приведёт к прогрессу систем диспетчеризации, управления, контроля качества.

В результате взаимодействия интеллектуальных систем управления энергетикой и систем энергетической поддержки информационных систем будут формироваться единые энергоинформационные системы, в которых доступ к информационной сети Интернет и доступ к электроэнергетическим сетям, поддерживающим возможность доступа, будут тесно взаимосвязаны и станут оказывать друг на друга взаимное влияние.

Для России создание электроэнергетической системы нового поколения может стать национальным проектом и средством решения целого комплекса экономических, социальных и энергетических проблем.