

СНИЖЕНИЕ ИЗДЕРЖЕК НА ИНТЕГРАЦИЮ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМУ – ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2021 г. С. А. Некрасов*

Центральный экономико-математический институт РАН, Нахимовский просп., д. 47, Москва, 117418 Россия

*e-mail: san693@mail.ru

Поступила в редакцию 07.05.2019 г.

После доработки 30.09.2020 г.

Принята к публикации 21.10.2020 г.

В мире цены на электроэнергию от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) снижаются и в наиболее удачных проектах уже стали меньше 1.5 руб/(кВт · ч). Однако в России этот показатель как в настоящее время, так и в прогнозе на 2035 г. имеет существенно более высокие значения, что обусловлено системным эффектом интеграции ВИЭ в энергосистему. Фактически, на сегодняшний день в России возобновляемая и традиционная энергетика являются антиподами и находятся в противоречиях одна с другой. В статье с позиции всеобщей организационной науки – тектологии – обоснована возможность их гармонизации и приведены примеры технологических решений для ее осуществления: изменение режимов работы электроприемников в составе электротехнических комплексов потребителей; развитие распределенной когенерации в соответствии с графиком электрических, а не тепловых нагрузок в результате разнесения во времени утилизации и потребления тепла на основе накопителей тепловой энергии. По существу, речь идет о повышении структурной устойчивости энергетики на основе альтернативной концепции ее развития и переходе к оптимизации функционирования неразрывной технологической цепочки “производство – потребление топливно-энергетических ресурсов”, включающей в себя и новые возобновляемые источники. Это не только снизит издержки на интеграцию ВИЭ в энергосистему и приведет к сопоставимости цен на электроэнергию от ВИЭ в России и в мире, но и повысит эффективность энергоснабжения вследствие выравнивания графика загрузки ТЭС и АЭС, использования нереализованного потенциала снижения удельного расхода топлива на производство электроэнергии при когенерации, сокращения потерь в распределительных сетях.

Ключевые слова: тектология, структурная устойчивость системы, возобновляемые источники энергии, альтернативная концепция развития энергетики, управление спросом на электроэнергию, распределенная когенерация, удельный расход условного топлива, снижение потерь электроэнергии, компенсация реактивной мощности, электромобили

DOI: 10.1134/S0040363621070031

В июне 1992 г. на конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро была принята декларация, в которой был скорректирован вектор научно-технического и экономического развития мирового сообщества – сокращение негативного воздействия на окружающую среду. Применительно к энергетике задача снижения потребления ископаемых ресурсов и сокращения выбросов парниковых газов определила концентрацию усилий в области возобновляемых источников энергии. В 1990-е годы, как и в последующее десятилетие, стоимость электроэнергии, генерируемой ветровыми и солнечными электростанциями (ВЭС и СЭС), многократно превышала такую от традиционных производителей. Поэтому в некоторых странах был разработан комплекс ме-

роприятий по распределению издержек на развитие ВИЭ на всех потребителей электроэнергии, что обеспечило поддержку темпов прироста возобновляемых источников около 20% в год на протяжении более чем четверти века при неизменном улучшении их экономических показателей.

Так, в 1990 г. стоимость солнечной панели составляла 10 дол. США/Вт, в 2006 г. – уже 4 дол/Вт, в 2012 г. – 1 дол/Вт, а в 2016 г. – 0.36 дол/Вт. В итоге стоимость электроэнергии при реализации наиболее удачных проектов солнечных электростанций, например в США, снизилась до менее чем 2.5 цент/(кВт · ч) [2.175 цент/(кВт · ч) в штате Айдахо, 2.375 цент/(кВт · ч) в штате Невада, 2.490 цент/(кВт · ч) в штатах Аризона и Техас] [1]. В 2017–2025 гг. ожидается дальнейшее снижение

стоимости энергии от СЭС на 57% [2], а к 2040 г. согласно [3] – на 66%.

В отличие от солнечной, в ветровой энергетике на протяжении последних 15 лет наблюдается стабилизация удельных капитальных затрат на уровне 1500–2000 дол. США за 1 кВт установленной мощности, которые в США составили 1590 дол. в 2016 г. и 1610 дол. в 2017 г. [4]. Основной фактор повышения доступности энергии ветра – это рост коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), который, например, в США с 0.25 в 2000-х годах повысился до среднего значения 0.42 к 2016 г. (0.54 для наиболее удачных проектов) вследствие улучшения эксплуатационных характеристик ветровых установок: снижения стартовой скорости ветра, при которой установки способны начать генерировать электроэнергию, увеличения высоты мачты, длины лопастей и т.д. Как результат, стоимость электроэнергии наиболее удачно расположенных ВЭС США не превышает 2 цент/(кВт · ч) [5]. При этом прогнозируется, что в перспективе стоимость электроэнергии от расположенных на суше ВЭС к 2040 г. снизится на 47% [6].

Описанные проекты – это крупные электростанции, которые построены в местах с явно выраженными природными преимуществами. В перспективе будет происходить расширение территорий, где цена электроэнергии от ВИЭ может быть менее 1.5 руб/(кВт · ч). Как было отмечено на Международном экономическом форуме в 2016 г., несубсидируемая электроэнергия от ВИЭ стала дешевле энергии, получаемой на основе ископаемых видов топлива в 30 странах, а к 2025 г. такая ситуация будет характерна для большинства стран мира. К 2021 г. электроэнергия от возобновляемых источников будет стоить меньше, чем электроэнергия от угольных ТЭС в Китае, Индии, Мексике, Великобритании и Бразилии [3]. В 2019 г. стоимость электроэнергии от 74% угольных электростанций в США оказалась выше, чем от ВИЭ, расположенных в пределах 56-километровой зоны от этих ТЭС. Прогнозируется увеличение этой доли до 86% к 2025 г. [7]. Снижение стоимости технологий позволило несубсидированным СЭС и ВЭС стать самым дешевым источником энергии во всех крупных экономиках, кроме Японии [8].

При столь высоких экономических показателях уже не предполагается получение дотаций на реализацию проектов. Таким образом, концепция устойчивого развития, определив политику поддержки ВИЭ, заложила фундамент для их дальнейшего развития, которое теперь уже во многих странах происходит без дотационной поддержки.

По мере снижения издержек на интеграцию в энергосистему единичных ветровых и солнечных установок происходит сокращение разницы меж-

ду стоимостью генерации крупными ветровыми и солнечными парками. Темпы прироста мощности индивидуальных источников опережают аналогичные показатели крупных проектов. Например, в Австралии годовой прирост мощности СЭС в 2017–2018 гг. для крупных источников составил 45%, а для индивидуальных – более 130% [9]. В итоге солнечная и ветровая энергетика, перестав быть “забавой для богатых”, не только достигает сетевого паритета без дополнительного стимулирования, но и производит электроэнергию по ценам более низким, чем традиционная энергетика.

ВИЭ И ТРАНСФОРМАЦИЯ КОНЦЕПЦИИ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Говоря о низких ценах на электроэнергию от ВИЭ, следует сделать следующее существенное уточнение. Речь идет о так называемой недиспетчеризованной электроэнергии, т.е. выдаваемой не по графику спроса, а исходя из возможностей солнечных или ветровых электростанций, которые определяются природными условиями. Проблема диспетчеризации (согласования графика спроса и стохастической генерации ВИЭ) решается путем изменения режима работы энергосистемы – переноса на традиционную энергетику функции покрытия постоянно возникающих дисбалансов. В большинстве энергосистем, особенно в густонаселенных странах, уже многие десятилетия отсутствуют возможности как увеличения мощности существующих, так и строительства новых ГЭС и гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС). Поэтому растет неравномерность работы объектов традиционной энергетики – утяжеляются их режимы, возрастает время вынужденной разгрузки энергоблоков, увеличивается число циклов пуск-останов и т.д. В результате повышается удельный расход условного топлива (УРУТ) на производство электроэнергии, растут эксплуатационные затраты, быстрее снижается ресурс оборудования.

Пока доля возобновляемых источников составляет 5–10%, их появление в энергосистеме в определенной степени эквивалентно росту неравномерности графика электропотребления. При этом увеличивается спрос на наиболее дорогие – пиковые – генераторы и снижается загрузка традиционных электростанций, что выражается в уменьшении их КИУМ. На этом этапе интеграция нерегулируемых источников в энергосистему аналогична присоединению новых традиционных источников. Проблемы возрастают в геометрической прогрессии, если доля ВИЭ превышает 15–20%. А при ее увеличении более 50% требуется трансформация принципов построения энергосистемы [10].

Действительно, разгрузкой оборудования нельзя решить проблему согласования спроса и пред-

ложения в периоды, когда объем генерации ВИЭ превышает потребность в электроэнергии. Такие ситуации возникают, когда доля ВИЭ в среднем годовом производстве становится более 20%. В отдельных странах (Германия, Испания, Дания) этот уровень был достигнут несколько лет назад и стало обычным, что генерация ВИЭ превышает объемы потребления на протяжении десятков, а в последующем и сотен часов. Использование возможностей соседних энергосистем для выравнивания спроса и предложения позволяет решить эту проблему только на начальном этапе. Однако в рамках концепции снижения потребления ископаемых видов топлива расширяется список территорий, где рассматривается возможность полного перехода на ВИЭ. Так, в США принято решение о полном переходе на ВИЭ не позднее 2050 г. в штатах Калифорния, Нью-Мексико, Гавайи. Этот вопрос обсуждается также в Миннесоте, Висконсине, Иллинойсе и Нью-Йорке [11].

Необходимость решения проблемы согласования спроса и графика генерации ВИЭ определила опережающие темпы роста в таких областях, как аккумулирование энергии, электромобили, интеллектуальные сети (smart grid), управление спросом (demand response). На сегодняшний день половина заказов на солнечные панели на крышах в Германии комплектуется системой аккумуляторов. Как ожидалось, емкость хранения энергии должна была вырасти в 2015–2020 гг. в 8 раз [12]. Рынок аккумулирования электроэнергии в США уже в 2018–2019 гг. увеличился более чем в 2 раза, причем прирост аккумулирующих мощностей на 85% был обеспечен литий-ионными батареями. При этом цены на них уменьшились на 85% в 2010–2018 гг. [13], а нормированная стоимость электроэнергии (LCOE – Levelized Cost of Electricity), выдаваемой литий-ионными батареями, только в первой половине 2018 г. снизилась на 35%, т.е. до 18,7 цент/(кВт·ч) [11,8 руб/(кВт·ч)] [14].

Однако, несмотря на снижение стоимости систем аккумулирования и успехи в развитии технологий управления спросом, издержки на диспетчеризацию приводят к удорожанию электроэнергии от ВИЭ на десятки процентов. В работе [15] отмечено наличие системного эффекта в России, который выражается в том, что конкурентные позиции нетрадиционной ВИЭ-генерации ухудшают сопутствующие затраты при ее интеграции в энергосистемы. Даже без учета необходимости строительства дополнительных электрических сетей масштабное развитие ВЭС и СЭС с нерегулярной выработкой ими электроэнергии потребует либо частичного дублирования мощностей, например увеличения мощности газотурбинных установок, либо размещения накопителей, регулирующих режимы выдачи их мощности. Расчеты [15] показывают, что в рамках действующей концепции развития энергетики системный эф-

фект (в частности, необходимость частичного дублирования мощности) увеличивает на 30% стоимость электроэнергии от ВЭС и на 40% от СЭС. Применение накопителей даже при их двукратном удешевлении оказывается еще более затратным решением – стоимость электроэнергии от ВЭС и СЭС в 2035 г. повысится на 60–80%. Поэтому в абсолютных значениях стоимость электроэнергии в России в 2035 г. будет составлять 11,06 руб/(кВт·ч) для СЭС и 8,04 руб/(кВт·ч) для ВЭС [15], что сопоставимо со стоимостью электроэнергии, выдаваемой накопителями по состоянию на 2018 г. согласно данным BloombergNEF (BNEF) [14], а это, в свою очередь, на порядок превышает стоимость электроэнергии от наиболее удачных реализованных проектов ВИЭ. С учетом динамики цен прогнозируемая стоимость электроэнергии от СЭС и ВЭС в России к 2035 г. будет выше среднемировой стоимости электроэнергии от накопителей, не говоря уже о стоимости электроэнергии от ВИЭ.

Рыночные отношения выравнивают стоимость оборудования (ветроустановок, солнечных панелей, инверторов и т.п.), а также затраты на строительные-монтажные и пусконаладочные работы в России и в мире. Потребуется очень высокие ограничительные барьеры, сводящие на нет все утверждения о построении рыночной экономики, чтобы в условиях высокой маржинальности поставок и установки оборудования ограничить проникновение на российский рынок компаний с иностранным участием, в частности на основе ЕРС-контрактов (от англ. engineering, procurement and construction).

Так как согласно [15] до 2035 г. в установленной мощности отечественной энергосистемы доля ВИЭ не будет превышать 5%, они будут реализовываться на территориях с наилучшей обеспеченностью соответствующими природными ресурсами. Поэтому для России, занимающей более 1/9 части суши, утверждения о недостаточной обеспеченности ветром или солнечным излучением не могут быть обоснованием высокой стоимости генерации с помощью ВИЭ. Сопоставимая доступность энергии ветра в Северной Америке и Евразии едва ли может быть подвержена опровержению. А вот в части доступности солнечной энергии можно отметить следующее. По состоянию на май 2019 г. наилучший показатель стоимости энергии от СЭС не только в США, но и в мире [2,175 цент/(кВт·ч), или 1,37 руб/(кВт·ч)] достигнут не в южных штатах и не в таких странах, как Мексика, Чили, Перу, Австралия, Иордания, ОАЭ и т.д., а в границах с Канадой штате Айдахо, где климатические условия по инсоляции в определенной степени аналогичны российским регионам и в европейской, и в азиатской ее части: Кубани, областям Северо-Кавказского федерального округа, Респуб-

лике Крым, Приморью, Амурской области, Еврейской автономной области, Республике Тува и т.д. Крайне сомнителен аргумент о большей востребованности земельных угодий, в том числе в предгорных местностях Дагестана, Ингушетии или Тувы, для сельского хозяйства и, как следствие, о более высокой цене на землю, по сравнению с ценами на нее в Айдахо – штате, в котором помимо пшеницы, кукурузы и других зерновых выращивают картофель и обеспечивают на одну треть потребности США в этом продукте (при том, что численность населения США в 2.27 раза больше, чем России). Поэтому можно сделать вывод, что в основном разницу в стоимости генерации электроэнергии от ВИЭ в России и мире обуславливает уже упомянутый “системный эффект” [15], а не обделенность территории (при, по крайней мере, 5% выработки ВИЭ общего производства электроэнергии) потенциалом для развития ВЭС или СЭС, не более высокая оплата труда в России по сравнению с США или европейскими странами, не бóльшая востребованность земли для сельского хозяйства и т.д.

Данная статья написана с целью разработать пути снижения влияния “системного эффекта” на интеграцию ВИЭ в энергосистему в современных условиях России (до достижения доли ветровых и солнечных электростанций в производстве электроэнергии 15%, т.е. не менее чем на ближайшие 20–30 лет).

Поскольку возможность и вероятность решения задач возрастает при их постановке в обобщенной форме [16, т. 1, с. 46], а всякая человеческая деятельность может быть представлена как некоторый материал организационного опыта и исследована с организационной точки зрения [16, т. 1, с. 69], следует рассмотреть задачу снижения издержек на интеграцию ВИЭ в энергосистему на основе методологии всеобщей организационной науки – тектологии (в переводе с греческого – учение о строительстве). С этой позиции в определении энергетики, данном Г.М. Кржижановским в 1920-х годах, как системы, включающей и производство, и потребление энергии [17], базовая идея заключается в соединении в новой системе независимо развивавшихся в XIX и в первые десятилетия XX в. областей производства, передачи и потребления электроэнергии.

Автор тектологии А.А. Богданов сформулировал определение ингрессии, которое гласит, что для соединения двух комплексов требуется изменить их так, чтобы в них получились общие элементы, соответствующие задаче, для которой служит данный организационный процесс [16, т. 1, с. 157]. Этот принцип был основополагающим в развитии энергетики в 1920–1990 гг.: и в плане ГОЭЛРО, и на дальнейших этапах становления и развития отечественной энергетической научной

школы определяющим было понимание энергетики как сложной совокупности трансформации видов энергии от получения энергетических ресурсов до приемников энергии.

В мире постоянно происходит борьба организационных форм, победа в которой зависит не от количественных показателей, а от степени пластичности – способности сопротивляться воздействиям внешней среды. И побеждают здесь формы, обладающие более высокой структурной устойчивостью. Поэтому соединение отдельных систем в новую организационную форму без роста структурной устойчивости оказывается нецелесообразным.

Динамика изменения показателей функционирования энергетики России в 1920–1990 гг. указывает на рост как ее количественной, так и структурной устойчивости. Количественные показатели – это объем производства тепловой и электрической энергии, длина линий электропередачи (ЛЭП), установленная трансформаторная мощность и т.д. Показателем структурной устойчивости служит взаимосогласованное развитие производства и потребления энергии [18], которое вело к повышению эффективности капиталовложений, что выражалось в динамике изменения КИУМ энергосистемы. Структурная устойчивость энергетики – это комплексный показатель, который нельзя сводить только к КИУМ. На ее рост указывает и долгосрочная динамика УРУТ на производство электроэнергии, и самообеспеченность системы собственной научно-технической и промышленной базой (это и отечественные научные школы, и отраслевые НИИ, и проектные институты, и энергомашиностроение). Список может быть расширен, но едва ли он станет исчерпывающим. Ключевым фактором является то, что результатом ингрессии, как базовой идеи определения энергетики [17], стало формирование внутриотраслевой среды, сфокусированной на достижении общесистемной эффективности путем развития всех звеньев единого технологического процесса “производство – потребление топливно-энергетических ресурсов”.

С позиции тектологии, а именно изменения структурной устойчивости, из факта отделения от системы ее частей: сетей и диспетчерских услуг – вовсе не следует ее регресс. Но в результате дезингрессии образуются новые границы, и тогда всякий разрыв связи может быть представлен как внедрение в систему элементов среды по линиям уничтоженных сопротивлений [16, т. 1, с. 165]. Поэтому закономерным итогом реформирования электроэнергетики стало создание новых самостоятельно хозяйствующих объектов. И главная черта внешней среды – фрагментарность постпереходной российской экономики, т.е. распад на отдельные слабо связанные фрагменты [19], в

полной мере стала присуща энергетике, которая перестала быть единым народно-хозяйственным комплексом как в управлении, так и в системном функционировании, приобретая явные черты несистемности. Согласно [20], в послереформенный период вводы новых мощностей составили 39784 МВт, в том числе ТЭС – 30632 МВт (или около 1/5 всего парка ТЭС). Доля газотурбинных и парогазовых установок (ПГУ) в новых мощностях ТЭС равна 81%: не менее 15% энергоблоков ТЭС заменены на ПГУ. Логично предположить, что рост топливной эффективности является следствием ввода более эффективного оборудования. Так ли это? В 1992 г. УРУТ на производство электроэнергии составлял 310.5 г у.т/(кВт · ч), а в 2017 г. – 312 г у.т/(кВт · ч), коэффициент использования тепла топлива на ТЭС в 1992 г. равнялся 56.9%, в 2017 г. – 55.4%.

Сопоставление показателей производственной деятельности энергетики как системы показывает, что интегральный вклад в снижение выброса парниковых газов вследствие сокращения потребления топлива (а это и есть цель развития ВИЭ за рубежом) множества реализованных проектов по энергосбережению и внедрения современных, более энергоэффективных технологических решений (в том числе перевода более 15% ТЭС из паросилового цикла в парогазовый) на временном интервале более четверти века оказался с точностью до 0.5% скомпенсирован фрагментарной, несистемной организацией отрасли.

В отличие от УРУТ, динамика изменения КИУМ менее стабильна. В 1980-х годах его значение было более 0.55 (4900 ч/год), а текущее не превышает 0.47 (4100 ч/год). Но в условиях 20%-ного снижения загрузки установленной мощности возникают ситуации, когда предложение не всегда покрывает спрос на конкурентном рынке отбора мощности [21]. Можно и далее приводить иные показатели, но для понимания сути происходящих в последнее время изменений достаточно высказанного в работе [22] мнения о том, что показатели эффективности работы энергетики с 1991 г. заметно ухудшились: относительные технологические потери при передаче электроэнергии в электрических сетях увеличились более чем в 1.5 раза; более чем в 1.5 раза выросла удельная численность персонала в отрасли; более чем в 2.5 раза снизилась эффективность использования капитальных вложений.

В полном соответствии с положением тектологии о том, что чем значительнее начальное различие комплексов системы, тем быстрее должно идти их дальнейшее расхождение, а следовательно, и развитие противоречий, дезинтеграций между ними, тяготеющее к разрыву их связей [16, т. 2, с. 29], помимо разрыва организационных наметился разрыв технологических связей. Потребители

для снижения издержек устанавливают собственную генерацию и выделяют из состава своих электротехнических комплексов постоянную электрическую нагрузку, переводя ее в автономный режим энергоснабжения от новых мощностей. В результате происходит как снижение потребления из электросети, что для системы передачи электроэнергии влечет рост удельных сетевых потерь, так и уменьшение доли базовой нагрузки, а это – повышение неравномерности графика оставшегося потребления. Получается, что в дополнение к снижению доли потребления промышленности и роста коммунально-бытовой нагрузки в 1990–2020 гг. происходит самоорганизация новой системы, которая приводит к росту неравномерности спроса на электроэнергию.

Таким образом, система находится в “ложном равновесии”, т.е. равновесие непрерывно нарушается в определенную сторону и комплекс находится в процессе преобразования [16, т. 1, с. 253]. Всеобщая организационная наука о перспективах такой системы говорит, что для положительного отбора в природе, т.е. для сохранения или развития данного комплекса в данной среде, требуется, чтобы была благоприятна вся совокупность условий среды. В то же время для отрицательного отбора, т.е. дезорганизации данного комплекса, достаточно одного неблагоприятного условия, непригодности хотя бы в одном отношении к одной части среды. Поэтому для ослабления, а затем и гибели организма нет надобности в нарушении всех или многих условий, достаточно отсутствия одного из них [16, т. 2, с. 166].

Поэтому в рамках действующей концепции развития энергетики задача решается продолжением инвестирования в развитие энергетических мощностей. При низкой структурной устойчивости ответом на воздействие внешней среды в виде роста неравномерности графика спроса вне зависимости от причины, его вызывающей: будь то изменения процесса потребления или появление требующей диспетчеризации стохастической генерации ВИЭ – научно обоснованы и полностью логичны резервирование традиционной энергетики дополнительными мощностями, развитие систем аккумулирования энергии и т.д. А это и есть “системный эффект” [15], в результате которого стоимость энергии от ВИЭ в России не только в настоящее время, но и по меньшей мере в 15-летней перспективе останется в разы выше по сравнению с ее стоимостью в других странах, т.е. наблюдается закономерное следствие снижения структурной устойчивости в результате произошедших тектологических трансформаций энергетики страны.

Далее, после определения сути проблемы рассматриваются возможные пути ее решения с позиции всеобщей организационной науки, соглас-

но которой тектологический прогресс, основанный на пластичности, ведет к усложнению организационных форм, поскольку в них накапливаются приспособления ко все новым и новым изменяющимся условиям [16, т. 2, с. 125], а разделенные части комплекса впоследствии могут быть объединены между собой, но это уже никогда не будет простым воссозданием прежнего комплекса [16, т. 2, с. 11].

ПЕРВООЧЕРЕДНОЕ РАЗВИТИЕ СЕКТОРА ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИЗДЕРЖЕК НА ИНТЕГРАЦИЮ ВИЭ В ЭНЕРГОСИСТЕМУ

Итак, в рамках действующей концепции российской энергетики при анализе развития экономики определяют ее потребности в энергии, а всю совокупность энергоснабжающих предприятий рассматривают как систему. И цель системы энергоснабжения – минимизация издержек на реализацию заданной экономикой производственной программы энергетики [23]. Задача потребителя – это создание фиксированного для каждого момента времени спроса, а система энергоснабжения должна обеспечивать этот спрос при минимальных издержках. В полном соответствии с такой концепцией, генерация ВИЭ рассматривается как добавка, восполняющая потери электроэнергии. А электроэнергию от ВИЭ сетевые организации приобретают для компенсации потерь, т.е. как изменение спроса потребителей на электроэнергию, так и определяемая природными факторами генерация ВИЭ – это в одинаковой степени экзогенные факторы для энергосистемы.

Данная ситуация – это закономерное следствие несистемного подхода, суть которого состоит в том, что проблемы потребления стали “внешними” для энергетики [24]. По мере развития ВИЭ их стохастическая генерация также становится внешним фактором для энергосистемы, а увеличение их доли, как и повышение неравномерности графика спроса, приводит к утяжелению режимов работы традиционной энергетики, в первую очередь ТЭС, и росту спроса на наиболее дорогие – пиковые источники.

Таким образом, фактически складывается противоречие между возобновляемой и традиционной энергетикой, в то время как возможно вполне гармоничное их сочетание. Гармонизация между ними – это задача, которая может и должна быть поставлена и в научном, и в практическом плане. Тогда вместо повышения надежности функционирования системы энергоснабжения путем ввода в действие пиковых электростанций и роста резервирования в энергосистеме возможно использовать незадейство-

ванный потенциал повышения эффективности работы новой системы, включающей в себя производителей, сети и потребителей энергии. Причем в настоящее время эта ингрессия может быть реализована даже не столько на основе новых разработок, которые хоть и будут естественным образом снижать свою стоимость, но на начальном этапе все-таки будут весьма капиталоемкими, сколько путем расширения границы применения хорошо известных и апробированных технологических решений. Это можно проиллюстрировать двумя примерами: управлением спросом потребителя и системным подходом к производству нескольких видов ресурсов (в частности, тепловой и электрической энергии) для оптимизации как единого целого всей технологической цепочки “производство – потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР)”, включающей в себя и новые возобновляемые источники энергии.

Разработка и внедрение процессов управления спросом в промышленных масштабах в отечественной энергетике начались значительно раньше, чем за рубежом. В 1970-х годах в наиболее энергоемкой отрасли экономики – черной металлургии это направление получило развитие благодаря планомерной работе Льва Леонидовича Гейзеля на Западно-Сибирском металлургическом комбинате и Бориса Ивановича Кудрина в Сибирском институте по проектированию металлургических заводов в содружестве с Украинским институтом по проектированию металлургических заводов. При проектировании предприятий черной металлургии предусматривались реализация решений, обеспечивающих разгрузку действующего электроемкого оборудования на 1–2 ч в сутки, и разработка нового оборудования, позволяющего увеличивать период снижения электропотребления без ущерба для основного технологического процесса.

Металлургические предприятия принимали на себя функции активных регуляторов электропотребления и обеспечивали время использования заявленной мощности в период прохождения максимума нагрузки энергосистем иногда даже более 8760 ч в году. Например, на трубном заводе “Лентрубсталь” в 1985 г. при суммарной установленной мощности электропотребляющего оборудования 33 МВт заявленная мощность в период прохождения максимума нагрузок энергосистемы и, соответственно, потребление в эти часы не превышали 3.3 МВт. А в периоды, когда в энергосистеме требовалось уменьшение производства электроэнергии, предприятие увеличивало потребление. В результате переноса времени выполнения энергоемких технологических процессов на периоды минимальных нагрузок предприятие снижало потребность в вынужденной разгрузке энергосистемы, тем самым выполняя функцию регулятора ее работы. А время использования за-

явленной мощности в период прохождения максимума нагрузок достигало 12400 ч/год [25]. Этот опыт доказывает, что возможность решения задачи совершенствования методов и средств планирования и управления производственными процессами потребителя для повышения эффективности функционирования энергосистемы путем снижения электропотребления в период прохождения максимума нагрузки и обеспечения более равномерного режима работы энергоблоков была доказана задолго до развития современных цифровых технологий и замещения ВИЭ традиционной энергетики.

В результате технологического развития граница применимости такого решения сместилась с уровня промышленных гигантов черной металлургии до любого домохозяйства. Далее рассматриваются два подхода к обеспечению необходимого качества энергоснабжения при таких условиях эквивалентных внешних воздействий, как порывистые изменения генерации ветроустановок и эксплуатация электроприемников, работа которых сопровождается резкопеременными толчками нагрузки (вентильные преобразователи, дуговые электропечи, электросварочные аппараты, электровозы).

Первый подход – включение в энергосистему компенсирующих устройств. Для компенсации быстропеременных процессов в наибольшей степени подходят системы аккумулирования, включающие в себя суперконденсаторы. Их применение обеспечивает динамическую устойчивость электрической сети при снижении или набросе нагрузки, регулирование параметров электрической сети (частоты), улучшение параметров напряжения электрической сети (компенсация реактивной составляющей), диспетчеризацию мощности – выравнивание графиков нагрузки в сети (накопление электрической энергии в периоды ее избыточной выработки и выдача в сеть в периоды дефицита), сокращение нерегулярных колебаний в межсистемных линиях электропередачи, повышение вследствие этого пропускной способности ЛЭП [26].

Второй подход – задействование возможностей потребителей электроэнергии для участия в диспетчеризации работы энергосистемы [27]. В рамках действующей концепции энергетики имеется следующее обоснование некорректности данного подхода. Предприятия, выпускающие дорогую продукцию, цена которой существенно превышает стоимость электрической и тепловой энергии, совсем не обязаны решать задачу облегчения режимов электро- и теплогенерации во внешних энергосистемах. Для них в приоритете качество производимой продукции, которое обычно требует стабильной работы технологических установок. Изменение их технологических режимов в угоду энергетике не будет допустимым.

В результате формирования новых связей между энергосистемой и потребителем технологические процессы у последнего могут быть изменены без ущерба для него. Наиболее простое для любого бытового потребителя решение – это использование возможностей инверторных компрессоров бытовых холодильников, которые при частичной нагрузке могут в пределах 100–200 Вт демпфировать провалы или всплески активной мощности в электросети, что при согласованном управлении в рамках микрогрид (от англ. Micro Grids) эквивалентно выполнению перечисленных функций. В настоящее время цена бытового холодильника с инверторным компрессором выше, чем с обычным, почти на 10000 руб. Эта разница складывается из доплаты за иностранный бренд (Samsung, LG, Liebherr, Haier и т.п.), что включает в себя, как правило, более длительное время сохранения холода (от 18 ч), лучший дизайн, продуманность и функциональность внутреннего объема, удобство эксплуатации и т.д. Удельная стоимость функции выравнивания профиля активной мощности на временных интервалах от долей секунды (время реакции инверторного компрессора бытового холодильника) до 18 ч и более составляет примерно 50–100 руб/Вт. Если в качестве нижней оценки количества бытовых холодильников принять значение 50 млн шт., то при единичной мощности компрессора более 200 Вт суммарная мощность такой равномерно распределенной системы регулирования составит не менее 10 ГВт.

Издержки на развитие компенсирующих устройств в составе электротехнических комплексов потребителей и формирование множества микрогрид по их использованию для сглаживания нагрузки в расчете на 1 Вт установленной мощности многократно ниже, например, затрат на установку систем аккумулирования с суперконденсаторами на подстанциях линий электропередачи [26]. Налицо повышение структурной устойчивости технологической цепочки “производство – потребление ТЭР”, для которой вовсе не требуется объединения юридических лиц, изменения прав собственности и т.п. Ингрессия достигается путем формирования новых связей, причем затраты на них значительно ниже, чем на альтернативные решения, а потенциал превышает мощность систем аккумулирования, которая была и будет введена в ближайшие десять лет. Область применения – диспетчеризация точечной неравномерности графика нагрузки.

Как самостоятельное решение изменение режимов работы электроприемников потребителей не может заменить систем аккумулирования [28], задача которых состоит в обеспечении бесперебойного энергоснабжения при авариях в энергосистеме. Но ситуация меняется при системном подходе к использованию возможностей потребителя. Значительно больший потенциал поддержа-

ния бесперебойного энергообеспечения в условиях аварии в энергосистеме по сравнению с системами аккумулирования имеет распределенная энергетика. Она отличается от традиционной “большой” энергетике параллельным с сетью производством электроэнергии для электроснабжения потребителей, расположенных на расстоянии, при котором можно обеспечить ее передачу без трансформации уровня напряжения, тем самым снизив потребление из сети, когда это экономически целесообразно. Распределенная энергетика – это источники электроэнергии, подключенные к шинам распределительной подстанции, в том числе на стороне нагрузки, и оснащенные автоматикой для обеспечения синхронной работы с энергосистемой, а также отключения от нее и поддержания автономной работы источника и выделенной нагрузки [29]. Источники распределенной энергетике могут быть как нерегулируемыми, например на основе солнечной или ветровой энергии, так и регулируемые, среди которых в условиях России наибольший интерес представляют когенерационные установки.

В настоящее время не в полной мере задействован потенциал снижения потребления топлива в результате перехода от раздельной схемы выработки тепла и электроэнергии к комбинированной. Это противоречит мировым тенденциям – снижению единичной мощности когенерационных установок. По состоянию технологического развития в СССР в 1980-х годах была обоснована экономическая целесообразность перехода к комбинированной выработке тепловой и электрической энергии при наличии теплового потребления не менее 460 МВт. Но граница экономической эффективности применения когенерации снизилась. В мире в 2010-х годах наибольшее количество установленных газовых когенераторов имели мощность несколько десятков киловатт. А в ближайшее десятилетие прогнозируется смещение до единиц киловатт границы мощности тепловой нагрузки, при которой когенерация имеет преимущества по сравнению с раздельной выработкой тепла и электроэнергии.

Использование комбинированной схемы для снижения потребления топлива характерно для всех стран, где в силу климатических особенностей целесообразно развитие когенерации. Фактически рост ВИЭ за рубежом стал происходить по мере срабатывания наименее капиталоемкого потенциала сокращения потребления топлива в результате снижения его расхода на выработку электроэнергии вследствие перехода к комбинированной схеме выработки тепла и электроэнергии. Например, в Дании массовое развитие ВИЭ началось после того, как доля теплоэлектростанций (ТЭЦ) в производстве тепла изменилась с 40% в 1980 г. до 60% в 1990 г. (рост в 1,5 раза за 10 лет) и происходило вместе с ее увеличением до 77% к

2009 г. (дополнительный рост в 1,28 раза за 19 лет) [30]. В результате расширения границы применимости когенерации можно использовать сформировавшееся потребление тепла, в частности на горячее водоснабжение (ГВС) даже небольших систем теплоснабжения с тепловой нагрузкой несколько мегаватт, для круглогодичного производства электроэнергии в комбинированном режиме и регулирования сезонной неравномерности графика нагрузки.

Можно показать, что распространение хорошо известного решения – аккумулирования тепловой энергии в баках – накопителей горячей воды [31] для разнесения во времени производства (утилизации) и потребления тепла для ГВС – это путь трансформации когенераторов из ТЭЦ, работающих по тепловому графику, в пиковые источники электроэнергии.

Теплоэлектростанции работают по графику тепловых нагрузок. В отсутствие потребления тепла электроэнергия на ТЭЦ производится в конденсационном режиме. Благодаря установке тепловых аккумуляторов и переходу к новому алгоритму управления ими, небольшие маневренные когенераторы получают возможность работать по графику электрических, а не тепловых нагрузок. В результате мини-ТЭЦ приобретают новое функциональное свойство – покрытие пиковых нагрузок и неравномерности генерации ВИЭ, что приводит к выравниванию графика работы крупных электростанций. В итоге КИУМ электростанций традиционной энергетике может быть повышен, что обеспечит их работу в номинальном режиме при наименьших удельных расходах топлива на выработку электроэнергии. Произведенная (утилизированная) и не востребованная в период производства пиковой электроэнергии тепловая энергия будет аккумулироваться в баках-накопителях и расходоваться по графику спроса на тепло, а задача регулирования будет состоять в согласовании суточных объемов производства тепла на мини-ТЭЦ с его потреблением. Такой вариант более целесообразен, чем вариант аккумулирования электроэнергии, ввиду того что малые когенерационные установки имеют высокую маневренность и возможность многократных включений с незначительной потерей ресурса, а тепловые накопители для горячего водоснабжения и в дальнейшем будут существенно дешевле систем аккумулирования электроэнергии.

В настоящее время суммарная емкость систем аккумулирования электроэнергии по самым оптимистичным оценкам способна обеспечить энергообеспечение в полном объеме на временных интервалах, не превышающих десятков секунд. Для масштабного развития этого направления могут быть различные ресурсные ограничения [32]. В то же время отсутствуют какие-либо препятствия для

массового создания баков – аккумуляторов горячей воды как при надстройке котельных когенерационными установками, так и для перевода ТЭЦ в режим работы по графику электрических, а не тепловых нагрузок.

Таким образом, ингрессия систем тепло- и электроснабжения путем надстройки существующих котельных в пределах 12–14% их пиковой тепловой мощности (что соответствует потреблению тепла на ГВС в неотопительный период) когенерационными установками и баками – накопителями горячей воды с последующей работой распределенной когенерации по графику электрических, а не тепловых нагрузок – это малозатратный способ покрытия потребности в системах суточного регулирования дисбаланса спроса и предложения электроэнергии и выравнивания графика работы электростанций традиционной энергетики.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА РАЗВИТИЯ КОГЕНЕРАЦИИ НА СТОРОНЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ

Альтернативой системам аккумулирования энергии при энергоснабжении выделенных электроприемников служит расположенная на стороне нагрузки распределенная энергетика. Она менее капиталоемка, так как удельные расходы на строительство традиционной ТЭС и системы аккумулирования выше по сравнению с затратами на установку маневренных когенераторов в существующих котельных. На ее основе можно добиться большего объема снижения выброса парниковых газов на единицу вложенных средств по сравнению с развитием ВИЭ [23]. Кроме того, она обладает лучшими эксплуатационными характеристиками. Любые системы накопления имеют КПД менее единицы, а наиболее доступные решения на основе ГАЭС – 60% [28]. Таким образом, фактический расход топлива на электроэнергию, прошедшую диспетчеризацию с участием систем аккумулирования, вырастает до 66% по отношению к сегодняшнему среднему удельному расходу топлива в энергосистеме: с 310 до 470 г у.т./кВт·ч и более. В то же время подтвержденный удельный расход топлива на производство электроэнергии при утилизации попутного тепла на когенерационных установках составляет 160 г у.т./кВт·ч [33, 34].

Учет сетевых потерь дополнительно увеличит это различие на 7–8%, так как из-за расположения малых когенераторов вблизи потребителя на стороне нагрузки потребление производимой ими электроэнергии происходит преимущественно в пределах зоны действия понижающей подстанции. В России длины распределительных электрических сетей на напряжении 6–10 кВ могут составлять 70 км и более [35] (описан случай электро-

снабжения по линии 10 кВ на расстояние 160 км), что кратно превышает проектные значения (до 10–12 км). Поэтому распределенная генерация – это путь усиления слабого места (закон наименьших в тектологии), снижения потерь на передачу электроэнергии в результате приближения источника к потребителю и повышения надежности энергоснабжения. Дополнительная возможность распределенной энергетики по снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях – это формирование динамической системы компенсации реактивной мощности. Добиться гибкого обеспечения баланса реактивной мощности в распределительных сетях можно созданием распределенной генерации на основе синхронных генераторов с возможностью управления токами возбуждения. Свойства синхронных машин таковы, что при резком снижении напряжения они увеличивают выдаваемую реактивную мощность, поддерживая режим, в отличие от устанавливаемых в настоящее время конденсаторов, которые ведут себя прямо противоположно – при падении напряжения их мощность уменьшается пропорционально квадрату напряжения в точке их подключения, усугубляя тем самым дефицит реактивной мощности.

В результате когенерация на стороне потребителя получит новые функциональные свойства:

вовлечение неиспользованного потенциала снижения удельного расхода топлива на выработку электроэнергии благодаря совместному производству тепла и электроэнергии. В [36] проведена его оценка – 50 млн т у.т. в год, что соответствует суммарной мощности мини-ТЭЦ около 50 ГВт. При надстройке котельных в объеме ежегодного теплового потребления ГВС можно привести более сдержанные оценки: примерно 20 млн т у.т. в год и 20 ГВт маневренных источников;

регулирование суточного графика работы энергосистемы: как покрытие пиковых нагрузок потребителей, так и выдача электроэнергии в периоды снижения генерации ВИЭ в результате работы по графику электрических, а не тепловых нагрузок;

перевод режимов работы крупных энергоблоков в оптимальные режимы с наименьшими удельными расходами топлива на производство электроэнергии, снижение количества циклов пуск/останов;

компенсация реактивной мощности в распределительных сетях, особенно в наиболее удаленных их точках, где потери электроэнергии имеют максимальное значение;

автономное энергоснабжение части выделенной нагрузки при аварии в энергосистеме;

повышение надежности энергоснабжения в нормальных режимах.

При такой постановке вопроса апробированные решения, такие как регулирование спроса на электроэнергию путем изменения технологиче-

ских процессов у потребителя, а также распределенная когенерация и аккумулярование тепловой энергии будут взаимодополняющими. Их совместное применение — путь, который в перспективе будет сфокусирован на снижении издержек на интеграцию ВИЭ в энергосистему, а в настоящее время — на уменьшении стоимости энергообеспечения из-за перехода к функционированию традиционной энергетики в оптимальных режимах, сокращения спроса на системы аккумулярования и пиковые источники.

Приведенные примеры являются иллюстрациями, но не исчерпывающим описанием, при котором оптимизация энергообеспечения происходит путем установления новых связей при использовании технологических возможностей потребителя, но не в ущерб ему. Список технических решений может и должен быть расширен по мере их выхода на бездотационный режим. В качестве примера можно отметить расширение границы применимости электромобилей. Уже по состоянию на 2015 г., когда литий-ионные накопители были более чем в 3 раза дороже, чем в настоящее время, было обоснованно доказано, что распределенные системы накопления на базе парков электромобилей экономически эффективны при режиме их использования до 1 ч/сут [37]. По мере расширения области экономической эффективности их применения создание инфраструктуры для использования парка электромобилей для покрытия пикового спроса на электроэнергию и регулирования неравномерности генерации ВИЭ должно стать одним из направлений трансформации системы энергообеспечения.

ВЫВОДЫ

1. Изначально поставленная цель прошедших преобразований в отрасли успешно достигнута: появились независимые объекты, каждый из которых наиболее эффективно решает свою задачу в своей области: диспетчерских услуг, передачи, производства, продажи энергии и т.д. В полном соответствии с законом Ле-Шателье любая система реагирует на внешнее вмешательство так, чтобы минимизировать его воздействие: потребители создают собственную генерацию, выделяют из состава своих электротехнических комплексов постоянную нагрузку и обеспечивают ее автономное электроснабжение; энергосистема наращивает пиковые мощности и развивает системы аккумулярования энергии для выполнения заданной для нее извне производственной программы — обеспечения спроса на электроэнергию, который становится все менее равномерным вследствие как изменения характеристик потребления, так и появления стохастической генерации ВИЭ. В итоге инвестиции используются наиболее эффективным образом с точки зрения каж-

дого отдельного хозяйствующего объекта, но не системы в целом; мощность энергосистемы увеличивается, КИУМ снижается, но спрос на пиковые источники и системы аккумулярования энергии возрастает; УРУТ на производство электроэнергии не изменяется на 25-летнем временном интервале несмотря на энергосбережение, внедрение более энергоэффективных технологий, включая ПГУ, что как по отдельности, так и в совокупности приводит к росту издержек энергообеспечения.

2. Согласно тектологии, причины системных противоречий находятся на уровне организации и взаимодействия ныне самостоятельно функционирующих систем. Применение ее методологии позволило на основе ранее известных технологических решений скорректировать концепцию развития энергетики для повышения структурной устойчивости неразрывной технологической цепочки “производство — потребление ТЭР”.

3. Развитие возможностей потребителей в диспетчеризации функционирования энергосистемы, в отличие от наращивания количественных показателей генерирующих компаний, будучи альтернативой действующей концепции развития энергетики, — это в краткосрочной перспективе путь повышения КИУМ традиционной энергетики, а в долгосрочной — снижения издержек на интеграцию в энергосистему ВИЭ с их требующей диспетчеризации энергией, т.е. “системный эффект” в сегодняшнем его понимании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Weaver J.** New record low solar power price? 2.17 cent/kWh in Idaho // PV Magazine. 27.03.2019. <https://pv-magazine-usa.com/2019/03/27/idaho-seeks-record-low-solar-power-price-2-175%C2%A2-kwh/> (Дата обращения 28.04.2019.)
2. **US PV system pricing H2 2016: system pricing, breakdowns and forecasts** // Wood Mackenzie. 28.11.2016. <https://www.greentechmedia.com/research/report/us-solar-pv-system-pricing-h2-2016> (Дата обращения 28.04.2019.)
3. **The power to change: solar and wind cost reduction potential to 2025.** International Renewable Energy Agency (IRENA). June 2016. <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/The-Power-to-Change-Solar-and-Wind-Cost-Reduction-Potential-to-2025>
4. **Chao J.** Report confirms wind technology advancements continue to drive down wind energy prices // News Center. 23.08.2018. <https://newscenter.lbl.gov/2018/08/23/report-confirms-wind-technology-advancements-continue-to-drive-down-wind-energy-prices/> (Дата обращения 28.04.2019.)
5. **Utilities increasingly adding low cost wind power to rate base, leaving inefficient coal plants at risk** // Moody's. 15.03.2017. https://www.moody's.com/research/Moodys-Utilities-increasingly-adding-low-cost-wind-power-to-rate-PR_363547 (Дата обращения 18.10.2018.)

6. **Bloomberg** New Energy Outlook 2017. <https://www.csis.org/events/bloomberg-new-energy-finances-new-energy-outlook-2017> (Дата обращения 28.04.2019.)
7. **The coal cost crossover: economic viability of existing coal compared to new local wind and solar resources** / E. Gimon, M. O'Boyle, C.T.M. Clack, S. Mckee // Energy Innovation. March 2019. https://energyinnovation.org/wp-content/uploads/2019/03/Coal-Cost-Crossover_Energy-Innovation_VCE_FINAL.pdf (Дата обращения 28.04.2019.)
8. **Hill J.S.** Solar and onshore wind now cheapest source of new bulk power. <https://cleantechica.com/2018/11/21/solar-onshore-now-cheapest-source-of-new-bulk-power/> (Дата обращения 28.04.2019.)
9. **ACT** leads the way in rooftop solar uptake, doubling capacity in 2018. www.canberratimes.com.au/national/act/act-leads-the-way-in-rooftop-solar-uptake-doubling-capacity-in-2018-20190112-p50qyc.html (Дата обращения 28.12.2018.)
10. **Getting** wind and sun onto the grid. A manual for policy makers / OECD IEA (International Energy Agency) – автономный международный орган в рамках Организации экономического сотрудничества и развития OECD // IEA. Insights Series. 16.03.2017. https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/Getting_Wind_and_Sun.pdf (Дата обращения 28.04.2019.)
11. **Winston K.** As states push toward 100% clean energy, hurdles loom // Electric Power. 05.04.2019. Washington: S&P Global Platts. <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/040519-as-states-push-toward-100-clean-energy-hurdles-loom> (Дата обращения 28.04.2019.)
12. **Hockenos P.** A solar array on every roof, an (EV) car in every garage, and a battery in every basement // Bulletin of the Atomic Scientists. 29.03.2019. <https://thebulletin.org/2019/03/a-solar-array-on-every-roof-an-ev-car-in-every-garage-and-a-battery-in-every-basement/> (Дата обращения 28.04.2019.)
13. **Eckhouse B., Chediak M.** Explosions threatening lithium-ion's edge in a battery race // Bloomberg. 24.04.2019. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-04-23/explosions-are-threatening-lithium-ion-s-edge-in-a-battery-race> (Дата обращения 28.04.2019.)
14. **Wood E.** How batteries are challenging coal and gas on cost: BNEF // Microgrid Knowledge. 27.03.2019. <https://microgridknowledge.com/lithium-ion-battery-costs-bnef/> (Дата обращения 28.04.2019.)
15. **Стратегические** перспективы электроэнергетики России / А.А. Макаров, Ф.В. Веселова, А.С. Макарова, Т.В. Новикова, Т.Г. Панкрушина // Теплоэнергетика. 2017. № 11. С. 40–52. <https://doi.org/10.1134/S0040363617110066>
16. **Богданов А.А.** Тектология. Всеобщая организационная наука. В 2 кн. / под ред. Л.И. Абалкина. М.: Экономика, 1989.
17. **Кржижановский Г.М.** Сочинения. Т. 1. Электроэнергетика / Энергет. ин-т АН СССР. М.; Л.: Энергоиздат, 1933.
18. **Некрасов С.А., Зейгарник Ю.А., Шевченко И.С.** Гармонизация интересов производителей и потребителей энергии как одно из условий эффективно-го развития энергетики // Энергетика Татарстана. 2012. № 3(27). С. 74–77.
19. **Клейнер Г.Б.** Российская экономика: системный подход // Мезоэкономика развития / под ред. Г.Б. Клейнера. Гл. 1. М.: Наука, 2011.
20. **Кожуховский И.С.** Ключевые результаты реформы электроэнергетики и новые вызовы // Региональная энергетика и энергосбережение. 2018. № 5. 14.06.2018. <https://energy.s-kon.ru/i-s-kojuchovskii-klyuchevie-rezultati-reformi-elektroenergetiki-i-novie-vizovi/> (Дата обращения 29.02.2020.)
21. **Формальный** дефицит на КОМ вернул потребителей к вопросу избытка резервов в Сибири // Энергетика в России и в мире. Переток. ру. 18.02.2020. [Электрон. ресурс.] Режим доступа: <https://peretok.ru/news/strategy/21725/> (Дата обращения 29.02.2020.)
22. **Шейндлин А.Е.** Об отечественной электроэнергетике: вчера, сегодня и возможное завтра. М.: Наука, 2013.
23. **Некрасов С.А., Грачёв И.Д.** Возобновляемая энергетика: перспективы корректировки развития энергоснабжения в России // Проблемы прогнозирования. 2020. № 1 (178). С. 99–109. <https://doi.org/10.1134/S1075700720010104>
24. **Проценко В.П.** Концепция перевода энергетики России на ресурсосберегающий путь развития // Энергосбережение и водоподготовка. 2003. № 1. С. 13–17.
25. **Авдеев В.А., Кудрин Б.И., Якимов А.Е.** Информационный банк “Черметэлектро”. М.: Электрика, 1995. <http://www.kudrinbi.ru/public/10000/index.htm> (Дата обращения 18.10.2018.)
26. **Деньщиков К.К., Жук А.З.** Гибридный накопитель электроэнергии мегаваттного диапазона // Материалы Междунар. конгресса REENCON-XXI “Возобновляемая энергетика – XXI век: энергетическая и экономическая эффективность”. Москва, 13–14 октября 2016 г. / под ред. Д.О. Дуникова, О.С. Попеля. М.: ОИВТ РАН, 2016. С. 129–135. <https://publications.hse.ru/mirror/pubs/share/folder/221cqhgufu/direct/200597934> (Дата обращения 18.10.2018.)
27. **Некрасов С.А., Матюнина Ю.В., Цырук С.А.** Оптимизация электроснабжения с целью выравнивания графика нагрузки и снижения энергозатрат // Промышленная энергетика. 2015. № 5. С. 2–8.
28. **Попель О.С., Тарасенко А.Б.** Сравнительный анализ длительного аккумулирования энергии для источников резервного и аварийного питания, а также энергоустановок на возобновляемых источниках энергии // Теплоэнергетика. 2012. № 11. С. 61–68.
29. **Некрасов С.А.** Концепция формирования энергоснабжения территории Российской Федерации для обеспечения возможности модернизации экономики // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. № 25. С. 20–33. № 26. С. 27–43.

30. **Современное** состояние и перспективы развития теплоснабжения в России / А.С. Некрасов, Ю.В. Синяк, С.А. Воронина, В.В. Семикашев // Открытый семинар ИПП РАН “Экономические проблемы энергетического комплекса”. Москва, 20 декабря 2011 г. М.: ИПП РАН, 2012.
<https://ecfor.ru/wp-content/uploads/seminar/energo/z125.pdf>
31. **Оценка** экономической эффективности использования аккумулирующих систем в электроэнергетике / В.А. Волконский, А.И. Кузовкин, В.М. Чаховский, М.В. Глухова, А.И. Емец // Проблемы прогнозирования. 2010. № 2 (119). С. 33–52.
32. **Нижегородцев Р.М., Ратнер С.В.** Тенденции развития промышленно освоенных технологий возобновляемой энергетики: проблема ресурсных ограничений // Теплоэнергетика. 2016. № 3. С. 43–53.
<https://doi.org/10.1134/S0040363616030085>
33. **Эффективные** технологии производства электрической и тепловой энергии с использованием органического топлива / О.Н. Фаворский, А.И. Леонтьев, В.А. Федоров, О.О. Мильман // Теплоэнергетика. 2003. № 9. С. 19–21.
34. **Салихов А.А.** Пути повышения технико-экономических показателей действующих ТЭС. Минск: Ковчег, 2009.
35. **Мещеряков В.А., Федянин В.Я.** Инновационные технологии обеспечения энергией сельских потребителей, расположенных на юге Западной Сибири // Теплоэнергетика. 2009. № 6. С. 64–68.
36. **Концепция** развития электроэнергетической и теплоснабжающей инфраструктуры в Российской Федерации на основе когенерации и распределенной энергетики // Материалы Круглого стола “Перспективы развития малой распределенной и возобновляемой энергетики Российской Федерации”. Москва, Гос. дума Федерального собрания, 15 ноября 2012 г.
<http://www.myshared.ru/slide/279094/> (Дата обращения 28.04.2019.)
37. **Жук А.З., Бузоверов Е.А., Шейндлин А.Е.** Распределенные системы накопления электроэнергии на основе парков электромобилей // Теплоэнергетика. 2015. № 1. С. 3–8.
<https://doi.org/10.1134/S0040363615010129>

Reducing Costs for Integration of Renewable Energy Sources: A Way to Making Renewable Energy More Accessible

S. A. Nekrasov*

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117418 Russia

**e-mail: san693@mail.ru*

Abstract—The prices for electricity from renewable energy sources (RES) tend to decrease around the world and have already become lower than 1.5 rubles/(kW h) in the most advantageous projects. However, this indicator in Russia has essentially higher values both at present and in the forecast for 2035, which is caused by the system effect of RES integration in the power system. In fact, renewable energy and conventional energy are antipodes in Russia and are in contradiction with respect to each other. The article substantiates the possibility of harmonizing them with each other from the viewpoint of the universal organizational science called tectology and gives examples of technological solutions for implementing this: changing the operation modes of electrical loads in the compositions of consumer electrical systems and development of distributed cogeneration in accordance with the schedule of electrical rather than heat loads as a result of separating the heat-recovery and consumption processes in time by using thermal energy-storage devices. In fact, this refers to achieving better structural stability of the energy sector based on an alternative concept of its development and transition to optimizing the operation of the inseparable process chain “production–consumption of fuel and energy resources,” which also includes new, renewable sources. Apart from decreasing the costs for integrating RES into the power system and making the prices for electricity from RES in Russia commensurable with those around the world, this will also result in a more efficient power supply as a consequence of more uniform loading of thermal and nuclear power plants, the use of the nonutilized potential of decreasing the specific fuel consumption for electricity production in the cogeneration mode, and decreased losses in distribution networks.

Keywords: tectology, structural stability of a system, renewable energy sources, alternative energy sector development concept, electricity demand management, distributed cogeneration, specific reference fuel consumption, reduction of electric energy losses, reactive power compensation, electric vehicles