

Высоковольтные провода протянулись с опоры ЛЭП (вид снизу)



ЭНЕРГЕТИКА

СОЗДАНИЕ «УМНЫХ» СЕТЕЙ ЭЛЕКТРО ПЕРЕДАЧИ

Возобновляемые источники энергии станут эффективными, если в конструкции новых электросетей будут заложены метеоданные

Питер Фэйрли

ОБ АВТОРЕ

Питер Фэйрли (Peter Fairley) — писатель из Виктории, провинция Британская Колумбия (Канада), интересуется вопросами энергетики и окружающей среды.



Р

ост популярности ветряных электростанций в ущелье реки Колумбия, что течет в северо-западной тихоокеанской части США, свидетельствует об успехе возобновляемых источников энергии и в то же время служит поучительной историей. Электротехники заполнили каньон тысячами ветряных турбин, которые обслуживают от 2 до 3 млн домов. Однако надо сказать, что безуглеродная энергетика стала причиной головной боли отвечающих за районные электросети операторов Бонневиллского управления энергетики, расположенного в Портленде, штат Орегон. Изменения ветрового режима в широком диапазоне размещения турбин вызывают большие скачки мощности. Стратовулкан Худ, возвышаясь над ущельем и разделяя господствующие ветры, подобно огромному валуну в ручье, усиливает беспорядок. Разрыв воздушных потоков отражается на работе ветроэлектростанций, приводя к резким скачкам производимой мощности. В Бонневилле электропитание раскачивается вверх и вниз, как на большой атомной станции.

Управление электросетями связано с рисками, особенно весной, когда импульсы перенапряжения исходят от мощных северо-западных гидроэлектростанций. Плотины вынуждены работать на полной скорости, когда водохранилища над ними переполнены до краев талой водой. Джастин Шарп (Justin Sharp), консультант по энергетике из Портленда, объясняет, что перелив воды поверх плотины без выработки электроэнергии не только становится энергетической потерей, но и вносит избыток воздуха и убивает находящегося в опасности лосося, нерестящегося здесь в боковых ручьях.

В результате в Бонневилле иногда закрываются ветровые электростанции и таким образом разбазаривается чистая энергия.

Шарпу хорошо известна эта ситуация, поскольку он сам участвовал в ее создании. После получения докторской степени по метеорологии за исследования местных сильных ветров он семь лет проработал в проектной энергетической компании *Iberdrola Renewables* (сейчас *Avangrid Renewables*), подводя этот природный ресурс к турбинам, которые сегодня обеспечивают электричеством сети Бонневилла. По словам Шарпа,

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Ветер и солнце не станут главными источниками энергии, пока не будет сконструирована национальная магистральная электросеть на основе местных ежедневных данных о погоде.
- Модели, в которых используются подробные метеоданные, могут помочь оптимизировать размещение возобновляемых источников энергии и ЛЭП постоянного тока, их объединяющих.
- На одной из моделей снабжение электроэнергией страны от возобновляемых источников достигает 67%. Но сопротивление, оказываемое властями штатов и энергетическими компаниями прокладке длинных линий постоянного тока, подавляет строительство адаптивных сетей на базе метеоданных.

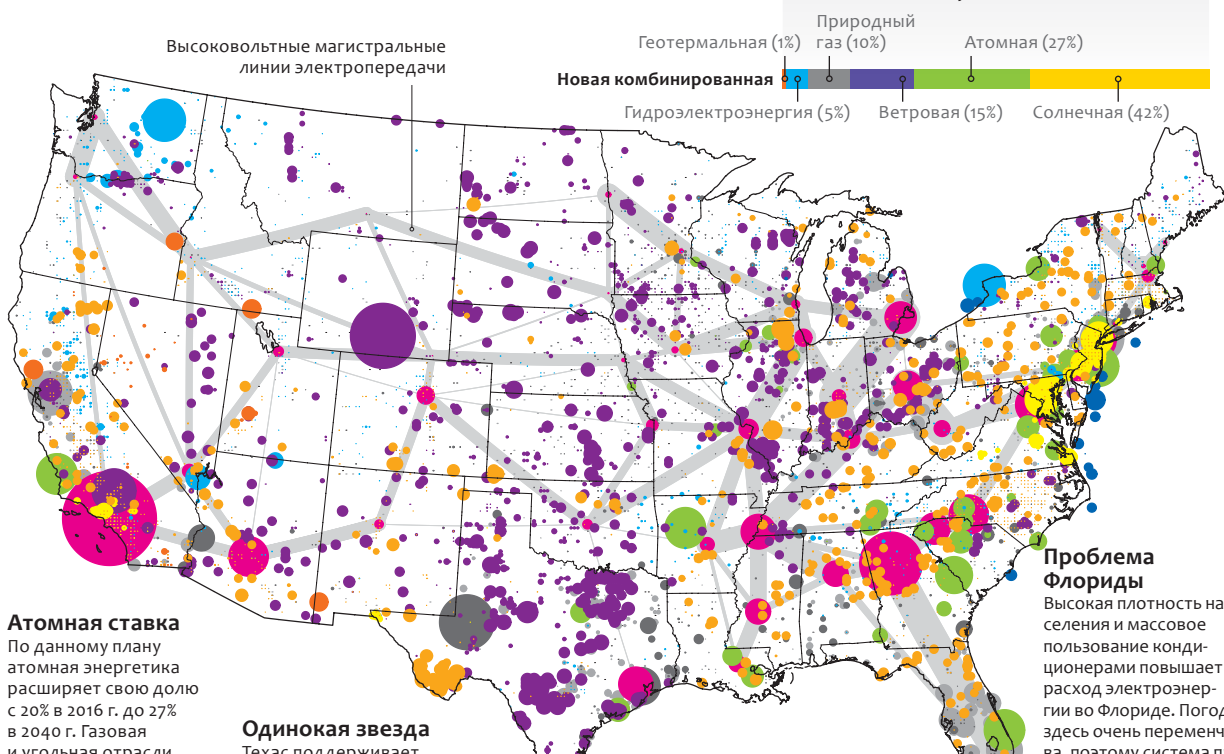
Реконструкция энергетики

Коренная перестройка энергосистемы США позволит увеличить снабжение возобновляемыми источниками энергии до 67% и выше к 2040 г., а также исключить угольные электростанции. В результате выбросы парниковых газов сократятся на 89% по сравнению с эмиссией системы 2016 г., а счета за электричество уменьшатся на 10%. В основе преобразования лежат подробные данные об изменении погоды на территории всей страны, разбитой сетью квадратов со стороной 3 км, передаваемые каждые 5 мин круглый год, по ним определяют, какие возводить электростанции и где (точки), как наиболее эффективно соединить регионы с помощью магистральных ЛЭП постоянного тока (серые). На этом плане *Vibrant Clean Energy* электростанции пространственно рассредоточены более широко, чем сегодня, поэтому они могут под-держивать друг друга во время погодных перемен в любой точке страны.

План развития энергетики на 2040 г.

Каждая точка обозначает один тип местного источника энергии. Каждая точка соответствует 1 тыс. МВт, те, что на карте большего размера, пропорционально мощнее, а меньшего — слабее.

- Накопление энергии
- Сложный цикл с сжиганием газа
- Газогенератор на газе
- Солнечная батарея на крыше
- Атомная энергия
- Гидроэлектростанция
- Береговой ветер
- Геотермальная энергия
- Морской ветер
- Солнечная энергия для коммунального использования



Атомная ставка
По данному плану атомная энергетика расширяет свою долю с 20% в 2016 г. до 27% в 2040 г. Газовая и угольная отрасли заменяются главным образом возобновляемыми источниками энергии. По расчетам, затраты на ядерную энергию остаются оптимистичными, в случае их роста доля атомных электростанций уменьшится с заменой на природный газ.

Одинокая звезда
Техас поддерживает свою собственную сеть электропередачи и ограничивает обмен с соседними сетями, дабы избежать вмешательства органов регулирования федерального правительства, поэтому на схеме его связи слабы. В моделирование не включены также Канада и Мексика, но эффективная энергосеть, учитывающая метеоданные, которая предельно повышает надежность и снижает затраты, должна пересекать Северную Америку.

Решения по постоянному току
Капитальная перестройка обширной магистральной электросети требует прокладки множества длинных ЛЭП постоянного тока; на сегодня их существует только несколько.

Проблема Флориды
Высокая плотность населения и массовое пользование кондиционерами повышает расход электроэнергии во Флориде. Погода здесь очень переменчива, поэтому система питается как от больших солнечных станций, так и от региональных мощных линий постоянного тока. Недостаточная выработка электроэнергии солнечными и ветровыми генераторами или скачки напряжения сглаживаются резервными батареями.

разработчики проектировали ветровые станции для производства максимальной годовой мощности при минимальной стоимости, а Бонневилл наращивал линии электропередачи для сброса этой продукции на рынок. Но все, как добавляет Шарп, проигнорировали изменчивость погоды и климата. «Оценивали мы это непостоянство, когда рассчитывали строительство всех ветроэлектростанций? Нет. Проводим мы эту оценку сейчас? Нет. Оказывает ли это воздействие на всю

систему и ее способность справиться с многочисленными ветрами? Безусловно. Очень сильно».

Эта картина повторяется везде в США. Другие специалисты, подобно Шарпу, предвидят день расплаты для штатов, городов и предприятий, планирующих переход на электричество, полученное без использования угля и углеводородов. Если строители продолжат игнорировать нестабильность, вызванную погодными условиями, электросети будут становиться все более опасными.

Шарп поясняет: «Мы пытаемся вбить квадратный колышек возобновляемых ресурсов в круглую дырку существующей электросистемы, и я думаю, что мы берем курс на крушение поезда».

Нам необходимо проектировать «умные», адаптивные электросети, управляемые метеоданными и передающие электроэнергию на большие расстояния по линиям, в которых будут устранены погодные несоответствия. Подобная система смогла бы перемещать массу чистой энергии через всю Северную Америку и связать спрос и предложение независимо от погоды, позволяя, например, избытку ветров в каньоне реки Колумбия помочь активной жизни в Миннеаполисе, когда ветры на Среднем Западе теряют скорость, и наоборот. «Мы пока еще этого не сделали», — говорит Чарли Смит (Charlie Smith), исполнительный директор Группы интеграции энергетических систем, промышленной ассоциации, в центре внимания которой находится изменение производства электроэнергии.

Укрощение монстров

Эрон Блум (Aaron Bloom), руководитель группы системного анализа электросетей Национальной лаборатории по изучению возобновляемой энергии (NREL) Министерства энергетики США в Голдене, штат Колорадо, отмечает справедливости ради, что технические параметры электросетей всегда отражают погодные условия, но приблизительно. Резкие подъемы жары и похолодания создают в районных сетях пики перенапряжения. Типовые проекты сводятся к обеспечению безопасности, когда система может сообщать о погодных катаклизмах. Но, как отмечает Блум, быстрое равномерное увеличение ветровых и солнечных станций заставляет конструкторов значительно усиливать искусственный интеллект электросети в отношении погодных изменений.

В отличие от традиционных угольных, газовых и ядерных генераторов ветряные турбины и солнечные батареи четко реагируют на погоду, добавляя большие отклонения, изменяющиеся день ото дня в течение года.

В Техасе и Калифорнии эти проблемы ярко выражены. По общей мощности ветровых станций,



Ветровые электростанции в штате Вашингтон могли бы посылать электричество за тысячи километров на восток, если бы энергосеть США была усилена ЛЭП постоянного тока

превышающей 20 ГВт, в стране лидирует Техас. Так как господствующие ветры дуют сильнее всего ночью, сброс излишков энергии в сеть вынуждает коммунальные службы платить крупным клиентам, чтобы они ее забрали. Звучит дико, но это менее затратно, чем отключать ветровые станции и тратить энергию впустую.

В Калифорнии достаточно ветрено, и она опережает другие штаты по количеству солнечных станций и фотоэлектрического кровельного покрытия. Каждое утро, когда встает солнце, гелиоколлекторы выдают электроцунами, иногда превышающие емкость сетей, а ранним вечером, когда потребители требуют больше всего электричества, производительность падает. В Калифорнии мало ресурсов. «Калифорния протянулась с севера на юг, поэтому восход и заход солнца отражаются в каждой солнечной панели приблизительно в одно время», — говорит Марк Ахлстром (Mark Ahlstrom), заместитель президента проектно-конструкторской компании *NextEra Energy Resources*, занимающийся вопросами политики, относящимися к возобновляемым энергоресурсам, на которые и направлена деятельность всей компании. Надо сказать, что три зимы тому назад погодные катаклизмы потрясли систему снабжения ветровой электроэнергией в обоих штатах. Необычно стабильный гребень высокого давления,

установившийся над западным побережьем США, снизил скорость ветров до нижних значений, и это продолжалось несколько месяцев.

Отдельные штаты обычно не получают помощи от остальной части страны, поскольку все электроснабжение США поделено на три больших изолированных региона. Подобная «балканизация» означает, что каждый регион должен справляться со своими непостоянствами погоды самостоятельно. Восточное и Западное энергообъединения, две сети на переменном токе, обслуживающие большую часть США и Канады, а также частично Мексику, практически не имеют между собой связи. И еще менее они обмениваются энергией с Техасом, где есть своя сеть переменного тока.

Потребители далеки от проблем, которые могут вызвать противоречия использования возобновляемых энергоресурсов, поскольку гигантские ветрогенераторы и солнечные батареи дают вместе только 7,6% электроснабжения США. Сетевые операторы до сих пор управляют тысячами традиционных электростанций, то запуская, то приостанавливая их, чтобы сбалансировать питание от всех этих разных источников. Однако доля возобновляемых источников устремляется ввысь. Калифорния официально объявила, что к 2030 г. она составит 50% (и сюда не включены крупные гидроэлектростанции). В штате Гавайи собираются достичь рекордных 100% к 2040 г. Однако всего несколько коммунальных служб и операторов передающей системы пытаются сконструировать сети, приспособленные к переменам погоды, чтобы справляться с грядущими ветровыми и солнечными мощностями. Но также надо отметить, что появляется все больше конструкторских решений, чтобы принять этот вызов.

Большие объемы метеорологических данных

Команда Блума из *NREL* и другие эксперты, такие как Джеймс Макколли (James McCalley) из Университета штата Айова, завершают крупномасштабное исследование по оценке преимуществ расширения совместного использования Восточной и Западной региональных электросетей. В этом исследовании взаимодействия впервые был применен набор новых данных о ветровой и солнечной энергии, имеющих превосходное пространственное и временное разрешение, что поднимает моделирование на новый уровень. Данные, предоставленные группой *NREL*, дают возможность отслеживать мгновенные состояния погоды и потоков энергии по всей стране в интервале 5 мин в течение года, при этом выдаются карты ветров на каждые 2 км² и солнечной радиации на каждые 4 км². Подобная детализация крайне важна для составления схемы переменных силы ветра в такой сложной местности, как каньон реки Колумбия. Проектирование скорости ветра на многочисленных

высотах также дает возможность *NREL* выбрать оптимальное применение турбин в любом месте. В результате всех этих сложных измерений создаются модели, на которых видно, как эффективно и надежно, без лишних затрат увеличить снабжение на континентальной части США (за исключением Техаса), доведя его до величины более 54% к 2040 г., что значительно превышает сегодняшний уровень.

На моделях стирается разделение на Восточную и Западную региональные сети путем их связывания воедино вдоль общей границы крупными ЛЭП постоянного тока либо пересечением их сетью более длинных ЛЭП постоянного тока, протянувшихся от побережья Тихого океана до Среднего Запада, и вдобавок магистралью от Луизианы до Флориды. Использование проводов постоянного, а не переменного тока объясняется значительно меньшими потерями энергии при передаче на большие расстояния, что делает отдаленное электроснабжение экономически эффективным. На моделях *NREL* определено, сколько электроэнергии смогли бы передать ЛЭП и где поставить новые генераторы, чтобы воспользоваться преимуществом усиленной системы электропередачи.

На моделях определяются различные возможности оптимизации, связанной с ответом на погодные условия, как, например, в виде установки расширенного ассортимента ветровых и солнечных генераторов с более широким разбросом на местности вместо нагромождения их в нескольких исключительно ветреных или солнечных районах, как их обычно размещают сегодня. По словам Грегга Бринкмана (Greg Brinkman), разработчика энергетической модели, результат, по-видимому, работает на возобновляемую энергию, требующую включения небольших ресурсов традиционных электростанций. Он добавляет: «Таким образом, представлено все природное разнообразие».

В моделях *NREL*, кроме всей их утонченной сложности, прослеживается преодоление трудностей конструкций, отвечающих погодным переменным. Например, Макколли провел несколько упрощений, чтобы облегчить моделирование и сделать расчеты на компьютере в течение шести-семи дней. И при выборе на моделях специальных мест размещения генераторов на возобновляемых ресурсах были использованы упрощенные пространственные и временные схемы, а не точные, исходящие из пятиминутных интервалов и четырехкилометровых площадок.

В лаборатории также предварительно задают первое и последнее значения для линий постоянного тока, чтобы избежать, как говорит Блум, математической неразрешимости вычислений. В результате не всегда происходит одновременная оптимизация как генераторов, так и путей энергопередачи. Тем не менее предварительные

результаты моделирования *NREL* показывают, что провода постоянного тока, уходящие на дальние расстояния, могут дать экономию в \$3,8 млрд в год за счет, например, резкого снижения потребления угля и газа, окупая себя втрое и выше. Но каждый километр передачи постоянного тока может обеспечить еще большую экономию и более серьезное сокращение углеродных выбросов при полной оптимизации всей схемы энергоснабжения.

Недавнее моделирование реконструкции энергосети Европы с полным включением возобновляемых источников энергии, предполагающее введение ее в строй к 2040 г., показало, что в моделях *NREL*, сделанных ускоренным методом, не был учтен потенциал возобновляемой энергетики в полной мере. Европейская сеть системных операторов передачи электроэнергии, ассоциация с представительством в Брюсселе, к модели электросети 2030 г. добавила столько генераторов, работающих на ветровой, солнечной энергии, а также на других видах возобновляемых энергоресурсов, чтобы их доля обеспечения поднялась до 75%. Затем специалисты ассоциации разработали концепцию расширения взаимосвязей стран и усовершенствования сети к 2040 г., чтобы снять узкие места в сезонных энергопотоках. В итоге они перераспределили поступление энергии с тех же самых генераторов и использовали преимущества реконструкции. Данная итеративная разработка оптимизации позволила довести долю возобновляемых источников энергии до 80% и выше в проектах на 2040 г.

К лучшим алгоритмам

Один независимый исследователь заявил, что он может свести все методы моделирования вместе, чтобы выжать еще больше пользы из метеоданных. Кристофер Клак (Christopher Clack), исполнительный директор *Vibrant Clean Energy*, организации, занимающейся моделированием сетей и прогнозированием в области энергетики, которая находится в Боулдере, штат Колорадо, разработал свои передовые алгоритмы построения сетей на метеоданных еще во время четырехлетнего служения в Национальном управлении океанических и атмосферных исследований (*NOAA*). Затем в 2016 г. он запустил свою запатентованную коммерческую программу под названием *WIS:dom*.

Как заявляет Клак, в этой программе используются метеоданные высокой степени разрешения, аналогичные тем, что применяют в *NREL*, но, идя другим путем, он создает больше возможностей для возобновляемой энергетики. В результате недавнего анализа объединенной энергосети США он пришел к системе, где возобновляемые источники могли бы дать 62% производства электроэнергии к 2040 г., что на 20% больше, чем в самых последних проектах *NREL*. Электроснабжение, согласно

смоделированной схеме, также выходит на 10% дешевле, чем сегодня. Клак поясняет, что возобновляемые источники могли бы превысить и 67% задолго до 2040 г., если сэкономленные средства возвращались бы в растущие инвестиции в системе магистральных ЛЭП.

Клак утверждает, что его программа *WIS:dom* выжимает больше логических возможностей из метеоданных благодаря одновременной оптимизации электростанций и системы передачи, особенно длинных ЛЭП постоянного тока, а не заблаговременной установке ЛЭП, как это вынуждены делать в *NREL*. Эта модель также отслеживает тенденцию, как изменяется работа возобновляемых источников от одного к другому час за часом, при этом лучше выравнивается энергия ветровых и солнечных станций, расположенных на больших расстояниях друг от друга. Например, эта программа позволяет установить, когда подъем энергии ночных ветров в Техасе может компенсировать отставание, вызванное береговыми ветрами на восточном побережье США, преобладающими в дневное время. «Все самые разные районы могут помогать другим районам в разное время», — поясняет Клак. А Макколли подтверждает, что на модели *NREL* ввиду ее ограничений может быть утрачена часть такой связи, хотя он сомневается, что упрощение может повлечь значительные различия.

Клак говорит, что ему потребуется всего два дня работы на компьютере, чтобы выдать более оптимизированную электросеть. Эксперты утверждают, что его интегральные модели могут стать прорывом в конструкции «умных» сетей на базе метеоданных. Альстром подтверждает, что Клак определенно достиг высшего уровня достоверности.

У программы *WIS:dom*, однако, нет законной силы. Такие эксперты, как Альстром, Блум и другие, хотели бы больше знать о механизме собственных разработок Клака, чтобы подтвердить их надежность. «Крис — умный парень. Он делает большое дело. Но я даже не знаю, что у него на уме», — говорит Блум. Кажется, что он не собирается поделиться своими разработками. Как-никак он продает свою продукцию энергетическим компаниям, в том числе и советы, куда региональным системным операторам и предприимчивым строителям энергосетей следует запланировать вложения в размере миллиардов долларов.

Политические тормоза

Разработчики в области энергетики, такие как Шарп и Смит, стараются привлечь особое внимание сетевых компаний и научных организаций, например Американского метеорологического общества, к планированию, строящемуся на метеоданных. Они также призывают политических

и промышленных руководителей агитировать за ЛЭП постоянного тока, чтобы преодолеть сопротивление их возведению. В государственных документах по возобновляемым ресурсам даны рекомендации сетевым операторам строить линии передачи переменного тока к ветровым и солнечным источникам энергии. Только малая горстка фирм пытается построить длинные ЛЭП постоянного тока для регионального обмена энергией от возобновляемых источников, как поступают в Европе, Китае и других местах на Земле.

Частично создают проблему не вполне обоснованные оппозиционные взгляды на линии электропередачи. Препятствием служит и сдвиг коммунальных инвестиций в беспроводные решения электросетей, как, например, хранение энергии в аккумуляторных батареях. Большие дорогие батареи размещают в местах энергопотребления, они могут принять излишки энергии, например образуемые ночными ветрами в Техасе, и хранить их в течение нескольких безветренных дней. Но батареи не могут служить хорошим подспорьем во время катастрофических событий, подобных засухе на западе США в 2015 г. «Это совсем не похоже на то, что вы сможете забрать всю энергию, собранную вашим солнечным генератором летом, и заложить ее в батарею на зиму», — объясняет Шарп.

Региональные войны за сферы влияния создают, может быть, даже еще большие препятствия к установлению длинных взаимосвязей на постоянном токе. Представители властей штатов и местные чиновники часто препятствуют сооружению крупных ЛЭП, приносящих дешевую энергию издалека, дабы защитить свои генераторы. Дейл Осборн (Dale Osborn), возглавивший команду, проектировавшую сеть постоянного тока, исследованную NREL, получил горькие уроки сопротивления. Осборн как представитель энергетики страны стоял за укрепление сетей линиями постоянного тока, пока в прошлом году не ушел на пенсию из компании — независимого системного оператора *Midcontinent*, управляющей ЛЭП и оптовым рынком электроэнергии, в котором участвуют 15 штатов США и канадская провинция Манитоба. Анализ NREL показал, что системе, торгующей электроэнергией от штата Вашингтон до Флориды, требуется намного меньше электростанций, разбросанных по всей стране. Хотя при таком подходе снижается общая стоимость, но Осборн посетовал, что есть много своекорыстных людей, которые не хотят низкокзатратного производства: «Они хотят больше получать за выработку своей энергии».

Клак говорит, что передача постоянного тока высокого напряжения (HVDC) в США представляется в перспективе так неясно, что клиенты обычно просят исключить ее из исследований, которые он для них выполняет, поэтому в его программе *WIS:dot* появляется больше коротких ЛЭП

переменного тока. «Длинные высоковольтные линии передачи постоянного тока исключаются, поскольку большинство не верит, что это случится», — поясняет Клак. По крайней мере, не в обозримом будущем. К сожалению, он отмечает, что при исключении линий постоянного тока затраты остаются прежними, а сокращение эмиссии диоксида углерода становится менее результативным приблизительно наполовину в результате того, что исчезает меньшее количество традиционных электростанций.

Федеральное правительство могло бы помочь ослабить блокировку энергосети. Министр энергетики, действовавший при президенте Бараке Обаме, Эрнест Мониз (Ernest Moniz), применял не подтвержденные практикой полномочия по принудительному отчуждению земель со статусом имеющих национальную значимость под ЛЭП постоянного тока. Это мероприятие было направлено на сброс излишков ветровой энергии из Оклахомы на рынок штатов Среднего Юга и Юго-Востока, но недавно было отодвинуто на задний план его поборником — *Clean Line Energy Partners*, пока идет борьба за несколько проектов на Среднем Западе, которые также были приостановлены силами местной и штатской оппозиции.

Подобного рода продвижение энергетики во времена президента Доналда Трампа менее вероятно. Министр энергетики Рик Перри (Rick Perry), защитник электростанций, работающих на угле, утверждает, что расширение использования угольных ресурсов на местах способствует созданию более приспособленной к погодным катаклизмам сети. Однако специалисты подчеркивают, что угольные кучи могут промерзнуть во время внезапных похолоданий и размываться под действием тропических ураганов — и тогда электростанции выходят из строя. Но во время таких погодных условий часто происходит перепад давления, когда раскручиваются ветровые турбины и очищается небо, дающее максимум солнечной радиации. Шарп отмечает: «В стране есть места с весьма ценными возобновляемыми источниками энергии, работающими в период погодных неурядиц».

Но эта энергия будет получена, только если умные сети ее доставят. ■

Перевод: В.И. Сидорова

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Уолд М. Как построить суперсеть // ВМН, № 1, 2011.
- Transmission Upgrades & Expansion: Keys to Meeting Large Customer Demand for Renewable Energy. David Gardiner and Associates. Wind Energy Foundation, January 2018.
- National Renewable Energy Laboratory's Interconnections Seam Study: www.nrel.gov/analysis/seams.html