Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. Минеев, Ветру и солнцу навстречу, *Квант*, 2019, номер 9, 2–9

DOI: <https://doi.org/10.4213/kvant20190901>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.224.135.184

26 апреля 2023 г., 16:27:50

Ветру и солнцу навстречу

А.МИНЕЕВ

*А путь и далек, и долог,
И нельзя повернуть назад.
Держись, геолог, крепись, геолог,
Ты **ветра и солнца** брат.*

Гимн геологов XX века

В ГИМНЕ ГЕОЛОГОВ XX ВЕКА РЕЧЬ ШЛА об открытии геологами месторождений, главным образом, руд, металлов и *невозобновляемых* источников энергии – нефти, газа и каменного угля, урана и тория и т.д. А ветер и солнце – «братья геолога» – в этой песне шли фоном, на котором разворачивались открытия полезных ископаемых.

В XXI веке другие вызовы. Тут уже ветер и солнце рвутся в лидеры мировой *возобновляемой* энергетики. Рвутся с такой силой и скоростью, что грозят потеснить и даже вытеснить со временем уголь, нефть, газ и атом с пространства энергетики. Пройдемся с ручкой и блокнотом по этому новому «возобновляемому полю» и присмотримся к цифрам и некоторым проблемам.

Сколько нужно энергии?

В настоящее время в мире проживает около 7,7 млрд человек (май 2019 г.) и на каждого в среднем тратится мощность 2,3 кВт. Общее потребление энергии приблизилось к величине $0,6 \cdot 10^{21}$ джоулей в год, или $0,6 \text{ Q/год}$ ($1 \text{ Q} = 10^{21} \text{ Дж}$), или около 20 ТВт мощности ($2 \cdot 10^{13} \text{ Вт}$).

Много это или мало? Приведенная удельная мощность средних потребностей людей на Земле (2,3 кВт/чел) складывается из бытовых энергозатрат (холодильник – 150 Вт, компьютер – 300 Вт...), затрат на транспорт, промышленность и т.д. Перепроверим еще раз указанные цифры, воспользовавшись следующей информа-

цией: в 2017 году мир в целом потребил 13,5 миллиардов тонн нефтяного эквивалента (ТНЭ). Одна ТНЭ по энергии равна $4,2 \cdot 10^{10} \text{ Дж}$, а 13,5 млрд ТНЭ составит $0,57 \text{ Q/год}$, или действительно около 2,3 кВт на человека.

В будущем (к 2050 г.) ожидаются увеличение населения до 10 млрд человек, некоторый рост удельной мощности потребления энергии и в результате человечеству нужно будет добывать около 1 Q/год , или непрерывно потреблять 30 ТВт мощности.

Структура производства энергии из невозобновляемых и возобновляемых источников

Сложившаяся к настоящему времени структура производства энергии и динамика ее изменения в течение последних 10 лет приведены в таблице 1. Что следует из этой таблицы?

1) Невозобновляемые ресурсы обеспечивают основную выработку энергии. Их доля сейчас более 80%.

2) Доля атомной энергетики остается примерно постоянной на уровне 5%.

3) Что касается возобновляемых источников энергии – ВИЭ, – то:

- больше всего энергии дает пока сжигание древесины и биомассы, но доля этого ресурса постепенно падает и сейчас составляет около 10%;

- на втором месте – гидроэнергетика; этот ресурс по величине абсолютной мощности генерации практически вышел на стационар, так как районы, в которых целесообразно строить ГЭС, в основном уже освоены; сейчас она составляет 2,5%, но по мере роста суммарного потребления энергии в мире доля гидроэнергии будет постепенно падать;

- доля ветра и солнца быстро растет, хотя пока в *мировом* производстве энергии она невелика;

Таблица 1

Вид энергоресурса	2008 г.	2018 г.	
Нефть + газ + уголь, %	78	81	Невозобновляемые
Атомная энергия, %	5	5	
Древесина и биомасса, %	13,5	10	Возобновляемые
Гидро, %	3	2,5	
Ветер+солнце, %	0,5	1,5	
Сумма по всем ресурсам, %	100	100	
Возобновляемые (древесина + био + гидро + ветер + солнце)	17	14	

• суммарная доля возобновляемых ресурсов (несмотря на рост доли ветра и солнца) пока снижается, главным образом из-за снижения выработки энергии из древесины и биомассы.

На этом фоне планы *отдельных* стран по развитию возобновляемой энергетики, приведенные в таблице 2, выглядят очень

в 2020 году намечено достичь уровня генерации энергии от ВИЭ в 27%, к 2030 году также можно ожидать 35–40%. И даже Франция, где ядерная энергетика всегда была национальным приоритетом и ее доля в выработке энергии в недавнем прошлом достигала 75–78%, в последнее время намечает рост доли ВИЭ до 40% (к 2035 г.)

Таблица 2

Страна	Население, млн чел. (2019 г.)	Доля ВИЭ (2014г.)	Цель
Германия	80	28%	80% к 2050 г.
Дания	5,5	49%	100% к 2050 г.
Индия	1400	10%	40% к 2030 г.
Китай	1400	9%	27% к 2020 г.
Франция	65	18%	40% к 2030 г.

амбициозно. Отдельно отметим ситуацию в Германии и Дании. Германия после аварии на АЭС в японской Фукусиме приняла решение полностью закрыть атомную генерацию у себя в стране и форсированно перейти к возобновляемым источникам энергии. В 2014 году суммарная доля ВИЭ в Германии составила уже 28% (ветер – 10%, солнце – 6%, гидро – 3%, био – 9%). В «крошечной» Дании, пионере освоения ветроэнергетики, достигли уровня ветрогенерации в 50% и не собираются на этом останавливаться. Что касается «тяжеловесов» по населению (Индия и Китай), то Индия предполагает выйти на 40% ВИЭ к 2030 году. Судя по тому, что в Китае уже

и постепенное снижение атомной генерации до уровня 50% (к 2035 г.).

С чем связано такое внимание к ВИЭ? Тут несколько составляющих. Во-первых – *экологическая*. При производстве электроэнергии с помощью возобновляемых источников энергии (ветер, солнце, гидро) отсутствуют вредные выбросы и, особенно, образование углекислого газа (CO_2), влияющего на климат и глобальное потепление. Во-вторых – *ресурсная*. Запасы невозобновляемых источников энергии на Земле ограничены. Ресурс же ветра и солнечной энергии весьма велик и поддерживается, пока светит наше небесное светило.

Невозобновляемые источники энергии: ресурсы

На рисунке 1 показаны основные страны-производители и ожидаемые периоды максимума добычи этими странами нефти, газа и каменного угля. Видно, что в XXI

гетике существенно выше. Есть возможность использования как уранового, так и ториевого топлива, а также сжигание топлива в реакторах на быстрых нейтронах, что еще более расширяет ресурсную базу атомной генерации. По степени влияния

Рис. 1. Временное положение пиков добычи

столетии будет пройден пик добычи и должно произойти постепенное истощение запасов этих полезных ископаемых. Отметим, что пик добычи каменного угля в США, ЮАР и Китае уже миновал. Добыча нефти и газа будет снижаться уже в ближайшие десятилетия в большинстве стран, за исключением США и Канады. В сланцах (США) и битумных песках и глинах (Канада) довольно много нефти и газа, однако их извлечение вызывает серьезные экологические проблемы. В этом смысле ресурсы сырья для атомной энер-

на окружающую среду из большой тройки невозобновляемых ресурсов (газ, нефть, уголь) газ является наиболее чистым, каменный уголь – наиболее грязным (выбросы электростанций на газе примерно в 2 раза меньше, чем на угле; при газовой генерации нет золы и сажи и т.д.). Газ чище, чем биотопливо. Наконец, есть еще одно важнейшее достоинство газовой генерации электроэнергии – возможность *быстрой регуляции мощности*, что важно при балансировке генерации энергии с ее потреблением.

Возобновляемые источники энергии, особенности генерации

Мотором, приводящим в движение основные возобновляемые источники энергии, является излучение Солнца. Благодаря этому текут реки, дует ветер и растут растения. Энергию солнечного излучения, движения ветра, течения воды и биомассу естественно использовать для нужд человека (рис.2). Получать энергию можно также, используя тепловые процессы, происходящие в толще земной поверхности и

В раю Архимед, Паскаль и Ньютон играют в прятки. Архимед водит и начинает считать. Паскаль убегает за горизонт, а Ньютон оглядывается, берет палку, рисует вокруг себя квадрат со стороной один метр и становится внутри квадрата. Архимед заканчивает считать, открывает глаза и видит Ньютона. – Я вижу Ньютона! – Э, нет! Ньютон на квадратный метр это Паскаль!

Мы тоже, как и в этой шутильной притче, присмотримся сначала издали и за-

ВЭС (ветровые электростанции на суше и на море)

СЭС

(солнечные электростанции)

ГЭС

(гидроэлектростанции)

Биомасса

Рис. 2. Основные виды возобновляемых источников энергии

океанах. Эти возобновляемые источники энергии на небольшом уровне использовались испокон веков, но сейчас на наших глазах происходит революция в их применении.

Из возобновляемых источников энергии гидро и биомасса близки к насыщению, в то время как генерация с помощью ветра и солнца быстро растет. На них мы и посмотрим поближе. Навскидку – нет проблем. Известна такая притча:

тем поближе, какая мощность от возобновляемых источников приходится на квадратный метр. В роли Ньютона здесь выступит Джеймс Уатт. Удельная мощность излучения Солнца вблизи орбиты Земли составляет $1,4 \text{ кВт/м}^2$ (солнечная постоянная). Если бы эту мощность можно было без потерь перевести в электроэнергию, то требуемые человечеству 20–30 ТВт заняли бы площадь всего $(1,5 - 2) \cdot 10^{10} \text{ м}^2 = 15000 - 20000 \text{ км}^2$. Не

так много – площадь квадрата со стороной 120–140 км.

Если не вдаваться в детали, то и с ветром похожая благоприятная картина. Действительно, мощность N , развиваемую вращающимися лопастями ветроагрегата, можно оценить в виде произведение силы F на скорость ветра v :

$$N = Fv = \frac{\rho v^2}{2} Sv, \text{ или } \frac{N}{S} = \frac{\rho v^3}{2},$$

где S – эффективная площадь, ρ – плотность воздуха. При $\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$ и скорости ветра $v = 10 \text{ м/с}$ удельная мощность составляет $N/S \sim 650 \text{ Вт/м}^2$ – величину того же порядка, что и солнечная постоянная.

Казалось бы все хорошо. Но если приглядеться...

Солнечная генерация. Величина электроэнергии, снимаемой с единицы площади солнечных панелей в *реальных конструкциях*, оказывается на несколько порядков ниже. Причин несколько. Например:

- излучение Солнца, проходя атмосферу, приходит на поверхность Земли сильно ослабленным;
- в материале солнечной панели излучение поглощается лишь частично;
- КПД преобразования поглощенной энергии в электричество не слишком высок;
- в ночной период и при облачности излучение существенно меньше.

Что получается в итоге для реальных конструкций солнечных панелей? По данным немецких исследователей (не заинтересованных в занижении величин), характерная величина удельного энергосъема с солнечных панелей составляет всего $\sim 1 \text{ Вт/м}^2$ в среднем по солнечным СЭС в мире, $\sim 5 \text{ Вт/м}^2$ на территории Германии и $\sim 20 \text{ Вт/м}^2$ в Сахаре. Это приводит к очень большим площадям и огромному расходу материалов. В результате при удельном энергосъеме в 5 Вт/м^2 для полной замены требуемой человечеству энергии (20–30 ТВт) с помощью СЭС требуется площадь панелей $\sim (4-6) \cdot 10^{12} \text{ м}^2 = (4-6) \cdot 10^6 \text{ км}^2$!

Что касается материалоемкости, то приведем всего пару показательных цифр. Известно, что для обеспечения конструкции солнечных панелей требуется несколько килограммов алюминия на каждый квадратный метр их площади. Если для оценки взять 2 кг/м^2 , то при площади панелей $(4-6) \cdot 10^{12} \text{ м}^2$ потребуется около 10^{10} тонн алюминия (!). При той же потребности в материалах каждому мегаватту электрической мощности, снимаемому с солнечной панели, соответствует 400 тонн металлоконструкций (!).

Ветровая генерация. При использовании ветра снимаемая с ветроагрегата мощность быстро растет при увеличении скорости ($\sim v^3$). Однако, как и в случае солнечной генерации, есть ряд факторов, уменьшающих выход энергии с единицы площади. Так, ветроагрегаты должны располагаться на достаточном удалении друг от друга, иначе будет нарушен характер течения воздуха; площадь лопастей ветроагрегата всегда гораздо меньше заемаемой ими площади; ветроагрегаты плохо работают при очень большой и очень малой скорости воздуха.

Типичное значение удельной мощности на единицу площади земной поверхности, отчуждаемой ветроагрегатом (по данным немецких исследователей), составляет $2-3 \text{ Вт/м}^2$. Тот же порядок, что в случае солнечной генерации. Поэтому для полной замены требуемой человечеству энергии при использовании ветра потребуются тот же огромный уровень необходимых площадей для размещения ветроустановок, порядка $10^{13} \text{ м}^2 = 10^7 \text{ км}^2$, и тот же уровень материалоемкости. В литературе приводится такая цифра для ветряной генерации: 1 МВт соответствует 100 т стальных конструкций ветроагрегата, т.е. для полной замены требуемой энергии ветряной генерацией потребуются порядка $(2-3) \cdot 10^9$ тонн стальных конструкций.

В результате получается, что переход на ветер и солнце должен сопровождаться огромными затратами материалов и очень большими площадями для размещения оборудования. Причем производство этих

материалов (не говоря уже о редкоземельных элементах, требующихся для производства солнечных батарей) не является экологичным. Не случайно Германия выводит из страны стальную и алюминиевую отрасли промышленности в страны Юго-Восточной Азии и Восточной Европы, перемещая неэкологичные технологии в другие регионы мира. Но куда в таком случае перемещать, если все страны решат переходить на ветер и солнце?

Временной баланс потребления и генерации. На рисунке 3 приведен характерный вид кривой потребления электроэнергии в течение суток. На нем можно выде-

Рис. 3. Временной характер потребления электроэнергии

лить утренний и вечерний пики потребления (6–9 ч и 18–21 ч соответственно) и некоторый спад в дневное и ночное время. Пик производства электроэнергии при использовании солнечной генерации, при-

Рис. 4. Временной характер солнечной (а) и ветряной (б) генерации

ходящийся на дневное время, приведен на рисунке 4,а. Черная кривая соответствует безоблачному небу, цветные – вариантам облачности. Переменчивый характер вариантов ветряной генерации показан на рисунке 4,б. Сопоставление картин поступления и потребления электроэнергии показывает, что корреляции между ними нет и соблюсти баланс *в каждый момент времени* при прямом использовании только солнечной и ветряной генерации невозможно.

Коэффициент использования мощности возобновляемых и невозобновляемых источников энергии. Переменный и даже непредсказуемый характер генерации энергии ветра и солнца приводит к тому, что соответствующие агрегаты используются неоптимально и коэффициент использования мощности снижается. На атомных электростанциях этот коэффициент достигает 95–98% (в среднем он выше 80%). Для ветроагрегатов он составляет приблизительно 17% в среднем по Европе, 15–20% в Германии, 15% в Китае, 25% в США, где много территорий, на которых постоянно дуют сильные ветры. Для солнечных электростанций коэффициент использования мощности порядка 10% в Германии, 15% во Франции, 15–10% в США. Это означает, что *установленная* мощность генерации ветра и солнца, т.е. та, которую можно было бы получать при оптимальных условиях, существенно превышает мощность, которая фактически вырабатывается.

Что делать?

Вернемся к таблице 2, в которой отражены планы резкого увеличения доли возобновляемых источников энергии, и попробуем нащупать пути выхода из проблем балансировки генерации и потребления электроэнергии при высоком уровне быстро меняющейся во времени доле ветряной и солнечной генерации. Из общих соображений отметим, что необходима своеобразная «основа», или «энергетическая подушка», т.е. «постоянный энергетический фон», на котором будет вырастать «надстройка» в виде перемен-

ной ветряной и солнечной генерации. Затем нужны системы, которые могут быстро менять выдаваемую в электрическую сеть мощность, компенсируя скачки ветряной и солнечной генерации. Наконец, необходимы системы накопления излишков энергии с тем, чтобы в нужное время потратить их.

На роль «постоянного энергетического фона» идеально подходит атомная энергетика. Ее лучшие показатели соответствуют постоянной мощности генерации, поэтому нынешнюю долю (5% в мировой энергетике) желательно не снижать, а наоборот наращивать. Подходят и энергия ГЭС, нынешний уровень которой (3%) также уменьшать нежелательно, и использование биомассы для производства электроэнергии. Таким образом, можно обеспечить «фон» на уровне минимум 20% мирового потребления электроэнергии (лучше – еще больше).

Важной составляющей может стать газовая генерация. Она, с одной стороны, является наиболее чистой из нынешней «большой тройки» (газ, нефть, уголь). С другой стороны – запасы газа достаточно велики (в рамках XXI века). Наконец, газовые электростанции могут увеличивать постоянный «фон» производства электроэнергии и, что очень важно, позволяют легко и быстро менять выдаваемую в сеть мощность.

Варианты на основе гидроаккумулирующих электростанций – ГАЭС – также важны при покрытии пиков и спадов мощности. Согласно принципу действия, ГАЭС закачивает воду в бассейн наверх, когда есть избыток мощности, и сбрасывает воду вниз, вырабатывая электроэнергию, когда мощности не хватает.

Кроме того, использование биомассы для производства энергии тоже нельзя сбрасывать со счета. Ее можно использовать и для поддержания «фона», и для компенсации пиков потребления мощности.

А что делать, если уровень ветряной и солнечной генерации станет очень большим? В этом случае понадобятся более радикальные решения. В литературе предложен такой комплекс мер:

- создать *резерв* мощностей *невозобновляемых* источников;
- увеличить установленную мощность возобновляемых источников (*запас по генерации ВИЭ*);
- перекачивать мощность из регионов, где она в избытке, в те регионы, где ее не хватает (*сети* передачи энергии);
- аккумулировать избыточную энергию с целью ее использования во время недостаточной ветро- и солнечной генерации (*накопители*).

Кратко остановимся на этих мерах.

Если энергосистема основана только на ветровой и солнечной генерации, то необходим резерв невозобновляемых источников той же мощности. Фактически это приводит к *дублированию* устройств генерации мощности, причем каждый из элементов используется неоптимально.

Если существенно повысить установленную мощность ветро- и солнечной генерации так, чтобы даже при слабом ветре и слабом освещении энергии было достаточно, то устройств генерации потребуется гораздо больше. Было подсчитано, что при доле ветра и солнца 60% этих устройств нужно вдвое больше, при 80% – в 6 раз больше и при 100% – в 10 раз больше(!). Это огромный расход ресурсов, опять же используемых неэффективно.

Развитие магистральных систем передачи энергии в другие регионы требует радикального обновления сетей и увеличения их пропускной способности в 7 раз при доле ветра и солнца 60% и в 12 раз при 100%. Задача очень амбициозная.

Использование накопителей или аккумуляторов энергии упрощает задачу балансировки производимой и потребляемой мощности и в принципе может позволить полностью обойтись без невозобновляемых источников энергии. Однако хранение избыточной энергии в больших масштабах сталкивается с нерешенными пока проблемами – емкостью накопителей, ресурсом, т.е. количеством циклов заряда-разряда, потерями при зарядке и разрядке. Кроме того, для *изготовления* накопителей нужно затратить довольно большое количество энергии. Так, в

Европе при использовании в качестве накопителей литий-ионных батарей и эффективности цикла заряда/разряда в 85% для производства этих батарей требуется энергия, в 15 раз (!) превышающая нынешнее годовое потребление энергии в Европе.

В последнее время очень широко обсуждается переход к так называемой водородной энергетике. Само название намекает на новый способ *производства* энергии. Но фактически это один из вариантов *накопителя* (аккумулятора) энергии, в котором сначала получают водород из воды, затрачивая энергию, затем хранят ее (в баллонах или топливных ячейках) и, наконец, высвобождают по мере надобности (например, в автомобиле).

Применительно к мировой энергетике с большой долей ветро- и солнечной генерации этот способ оказывается не слишком эффективным. Действительно, КПД получения водорода из воды составляет 65–70%, а КПД получения электричества из водорода ~ 50%. Таким образом, суммарный КПД составляет всего 30–35%,

т.е. большая часть энергии выбрасывается на ветер. В то же время использование водорода как *вида топлива* (в транспорте) в принципе может стать реальной заменой нефти, запасы которой весьма ограничены.

* * *

В итоге развитию возобновляемых источников энергии сейчас придан большой импульс. Уровень затрат на ветро- и солнечную генерацию превысил один триллион долларов (!). По мере роста доли ВИЭ появились проблемы и факторы, сдерживающие ее развитие: дублирование мощностей, управляемость, сети и потери в сетях, ресурс оборудования, медленное развитие накопителей, КПД накопителей, низкий коэффициент использования мощности. Ближайшие 10–20 лет покажут, насколько реальны планы и амбиции, как удастся решить проблемы и каким окажется на деле уровень ВИЭ в мире.

При подготовке статьи использовались данные А.Анпилогова, С.Безгина и Д.Станкевича.

Картография и кривизна

И. ТАЙМАНОВ

ЗАДАЧА О ПОСТРОЕНИИ НАИБОЛЕЕ точной или удобной для использования карты земной поверхности известна с давних времен. Отображение земной поверхности (или части ее) на плоскость называется картографической проекцией (картой) и сопоставляет точке поверхности точку на плоскости.

Понятия долготы и широты ввел в начале II века нашей эры древнегреческий математик и географ Марин Тирский для

того, чтобы построить с их помощью карту, которая сохраняет масштаб длин вдоль экватора и всех меридианов. Эта прямоугольная карта строится очень просто: обозначим через λ долготу, а через φ широту; если точка с координатами (λ_0, φ_0) отображается в точку $(0, 0)$, то точка с координатами (λ, φ) отображается в точку плоскости с координатами $x = \lambda - \lambda_0$, $y = \varphi - \varphi_0$. Такая проекция (рис. 1) называется равнопромежуточной и до сих пор используется, например, в геоинформационных системах. При ней не сохраняются