

Украинская энергетическая система:

генерация и балансировка



Показаны возможности балансировки энергосистемы Украины на примерах реальной статистики выработки электроэнергии при различных сценариях роста генерации ВИЭ.

Функционирование энергетической системы страны предполагает непрерывный процесс поддержки ее в состоянии равновесия. Это значит, что должен соблюдаться баланс количества генерируемой и потребляемой энергии во времени. Этот процесс именуют балансировкой энергосистемы.

На первый взгляд может показаться весьма странным утверждение о необходимости соблюдения такого равенства. Ведь на всех диаграммах, иллюстрирующих работу энергосистемы, мы можем видеть единые показатели по генерации и потреблению — сколько энергии в системе было выработано, столько же ее и было использовано.

Иное противоречит законам физики. Что же тогда является критерием, по которому можно оценить состояние энергосистемы? Общепринятым инструментарием контроля является частота генерации, которая не должна

выходить за нормативные пределы $50 \pm 0,2$ Гц. При росте нагрузки она снижается (турбинам тяжелее вращаться), при уменьшении потребления частота растет. И то и другое служит сигналом для сброса или наращивания генерируемой мощности.

Поскольку потреблением в оперативном режиме можно реально управлять лишь отключая избыточную нагрузку, то задача решается на стороне генерации за счет включения или отключения различных энергоблоков по мере необходимости. Эти функции в нашей стране выполняют диспетчерские подразделения НЭК «Укрэнерго», которые управляют маневренными станциями, прежде всего ГЭС, ГАЭС и ТЭС, корректируя уровень вырабатываемой электроэнергии и ее частоту.

Обычно для запуска маневренных источников требуется некоторое время, поэтому существует определенный график приведения турбин в рабочее

состояние, который составляется наперед с определенным лагом. Прежде всего, это необходимо для тепловых станций, подготовка которых требует от 2 до 4 часов и выше при запуске из холодного состояния и 1–2 часа — из горячего.

Стабильность и управляемость сети зависит, прежде всего, от соотношений между различными типами генерации и возможностей компенсировать как рост потребления, так и его снижение. Однако в связи с появлением в 2019 году большого числа новых СЭС и ВЭС доля производства возобновляемой электроэнергии в 2020-м и 2021 годах ощутимо выросла. И хотя темпы введения в эксплуатацию новых возобновляемых мощностей в 2020 году значительно снизились (см. статью **«Підсумки року галузі ВДЕ за 2020 рік»**, Сиб, №1, 2021 г.), но в ближайшем будущем мы столкнемся с дальнейшим ростом ВИЭ-генерации. Эксперты высказывают

опасение, что такая тенденция может негативно сказаться на возможностях балансировки энергосети и необходимости строительства дополнительных маневренных станций.

Подводные части айсберга энергосистемы

Министерство энергетики Украины регулярно публикует данные по структуре генерации и потребления электроэнергии в Украине, из которых следует, что в 2020 году наиболее активными потребителями выступили промышленность (41,8%), население (31,0%) и коммунально-бытовые службы (12,0%). А вот основная генерация осуществляется с помощью АЭС (51,2%), ТЭС и ТЭЦ (35,2%), ГЭС и ГАЭС обеспечивают выработку 5,1%, ВИЭ (СЭС, ВЭС, биогаз, малые ГЭС и др.) — 7,3%.

За один час в Украине в 2020 году в среднем потреблялось 16,72 млн кВт·ч. Это же значение (16,72 ГВт), но выраженное в Гигаваттах, по сути является показателем средней мощности электростанций по стране

Следует также учесть, что часть энергии (как правило, в ночное время) используется для питания турбин ГАЭС, которые работают в режиме насосов и закачивают воду в верхние водохранилища системы, выступая в качестве потребителей. Эти показатели следует вычитать из выработки, ведь в данном случае энергия не поступает в сеть, а наоборот — изымается из нее. Кроме того, в балансе учитываются также трансграничные перетоки, которые с января 2021 года значительно выросли по направлению к Украине.

За 2020 год энергосистема нашей страны (по данным Министерства энергетики) выработала 148 854 млн кВт·ч электроэнергии (брутто), что на 5113,1 млн кВт·ч (3,3%) меньше, чем годом ранее. А вот потребление (нетто) при этом несколько ниже генерации — 146 438,9 млн кВт·ч. Отличие этих показателей (2415,1 млн кВт·ч) связывают с технологическими потерями в транспортной сети. Среднесуточное

потребление по стране составляет 401,2 млн кВт·ч; в течение одного часа средний показатель равен 16,72 млн кВт·ч. А поскольку мощность — это количество энергии в единицу времени, то это означает, что усредненная за год мощность всех электростанций страны составляет 16,72 ГВт. В данном случае это генерируемая мощность; не путать с установленной. Все эти показатели нам понадобятся, чтобы далее было легче ориентироваться в статистике и порядке цифр.

Среднесуточное потребление электроэнергии по стране в 2020 году составляет 401,2 млн кВт·ч

Гидробаланс и перетоки

Для энергосистемы страны большое значение имеют гидроаккумулирующие станции (ГАЭС), которые работают как в режиме генерации электроэнергии, так и ее потребления. В ночной период (примерно с 0:00 до 8:00) избыток расходуется на закачивание воды в водохранилища верхнего уровня, а в часы наибольшей нагрузки (ЧНН) или в моменты нехватки электроэнергии в сети турбины ГАЭС включаются на выработку в режиме генерации. Это традиционный алгоритм работы таких станций до 2019 года. Однако следует отметить, что в 2020 году ГАЭС стали активно закачивать воду в хранилища также и в периоды максимальной активности ВИЭ (с 8:00 до 15:00), чего ранее практически не наблюдалось. Более детально мы расскажем об этом при рассмотрении конкретных примеров суточной генерации в разделах «Летние проблемы энергосети» и «Как может выглядеть «настоящий кризис» в энергосети».

Количество электроэнергии, затрачиваемой на накачку воды в хранилища и вырабатываемой ГАЭС в генераторном режиме, отличается на величину результирующего КПД таких систем. Например, за январь 2021 года украинские ГАЭС произвели 119,916 млн кВт·ч, а израсходовали на 30% больше — 155,951 млн кВт·ч. Если проанализировать данные по 12 месяцам 2020 года, то итоговая выработка ГАЭС составила 1674,689 млн кВт·ч, а потребление — 2101,034 млн кВт·ч, что

соответствует к.п.д. 79,7%. В любом случае посуточная генерация и потребление ГАЭС в статистике «Укрэнерго» учитывается отдельными пунктами.

Следует также учитывать, что из энергосистемы Украины через специальные трансграничные линии возможны перетоки в энергосети РФ, Беларуси, Молдовы и страны Евросоюза, а также поступление в нашу страну из указанных сетей. Эти перетоки в статистике «Укрэнерго» учитываются тремя отдельными графами: «Украина – Беларусь, РФ», «Украина – Молдова», «Украина – ЕС».

Таким образом, величина генерируемой электроэнергии в отечественной энергосистеме является результатом суммирования выработки по всем типам станций и трансграничных перетоков (с учетом знака) за вычетом потребления ГАЭС в режиме закачки воды в накопительные хранилища.

Важно отметить, что до 2021 года электростанции нашей страны производили избыточную электроэнергию, что позволяло ее даже экспортировать. Баланс перетоков был отрицательным (другими словами, «трансграничные» страны являлись потребителями). Но уже в нынешнем январе по линии из РФ и Беларуси украинские потребители получили на 144 млн кВт·ч электроэнергии больше, чем туда отправили (произошло доминирование импорта над экспортом). По линии Евросоюза за этот период активное сальдо (превышение поступлений перед расходами) составило 37,906 млн кВт·ч, а по молдавскому направлению — 4,119 млн кВт·ч (цифры указывают величину превышения импорта над экспортом).

Это означает, что в 2021 году электроэнергии в нашей стране стало вырабатываться недостаточное количество.

Итоговое значение перетоков в январе 2021 года по всем трем направлениям составило 186,025 млн кВт·ч (переток в Украину). Для сравнения, за это же время общее потребление электроэнергии по стране составило 14 114,64 млн кВт·ч. Следовательно, общая величина перетоков в Украину за указанный период составляет 1,32%. За февраль

импорт ощутимо вырос и активное сальдо по перетокам достигло величины 471,927 млн кВт·ч (3,5% в энергобалансе страны за этот месяц, который составил 13 419,482 млн кВт·ч).

Годовая динамика

Уровень производства электроэнергии и ее потребление зависят от температуры и длительности светового дня. Для примера рассмотрим годовую диаграмму выработки в 2020 году в срезе работы различных систем генерации (рис. 1).

Как видно из диаграммы, выработка электроэнергии в месяцы с достаточно длинным световым днем (с апреля по сентябрь) ощутимо снижается (до месячного уровня в районе 10 300–10 700 млн кВт·ч) по сравнению с зимними интервалами, где потребление в 1,4 раза выше — 13 000–14 000 млн кВт·ч. Соответственно, месячная динамика генерации АЭС и ТЭС, как наиболее производительных источников энергии, также имеет сезонный характер.

На рис. 2 показано дополнение к рис. 1, где представлена выработка по сегментам, которые не имеют столь весомых долей, а именно — ВИЭ, ГЭС и ГАЭС за 2020 год, а также (для сравнения) совокупные показатели ВИЭ за 2019-й.

Выработка ВИЭ в 2020 году имеет два выраженных пика генерации: в марте–апреле и июле–августе. Кривая генерации ГЭС по 2020 году демонстрирует всплески в июне и ноябре, а ГАЭС имеют максимальную продуктивность в апреле и августе–октябре.

Динамика выработки ВИЭ за 2020 год сильно отличается от предыдущего года (на рис. 2 это голубой график). Ведь именно в 2019-м отмечено массовое появление новых СЭС и ВЭС, которые уже в 2020-м передавали энергию в единую энергосистему страны. При этом выработка ВИЭ выросла практически вдвое по сравнению с 2019-м.

Таким образом, возобновляемую энергетику не случайно относят к одной из проблемных нерегулируемых сфер генерации, которая в будущем может существенно затруднить балансировку

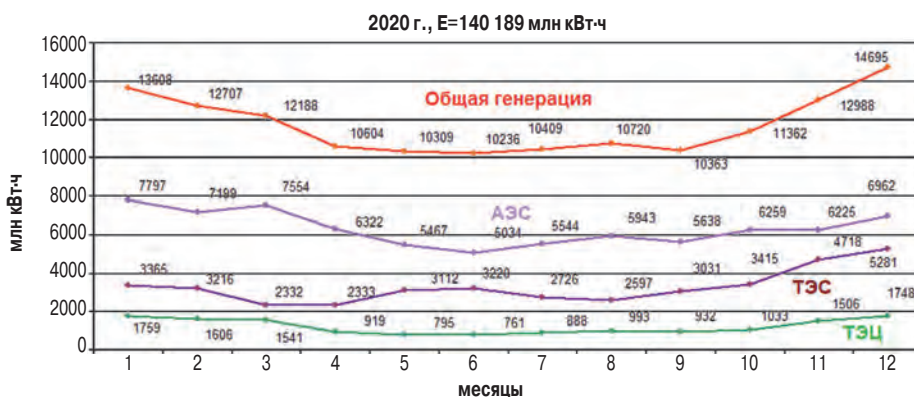


Рис. 1. Помесячная генерация электроэнергии по Украине в 2020 году различными типами станций — АЭС, ТЭС и ТЭЦ

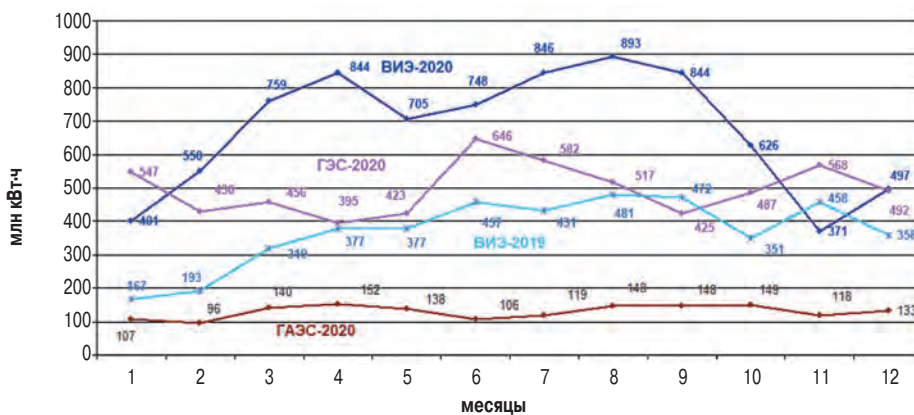


Рис. 2. Помесячная генерация электроэнергии ВИЭ, ГЭС и ГАЭС по Украине в 2020 году, а также ВИЭ за 2019 год

энергосистемы. В 2020 году правительство оказались не готово даже к тому, чтобы вовремя рассчитаться с производителями электроэнергии по «зеленым» тарифам. А ведь построенные ВИЭ никуда не денутся, и в следующем году цифры вырастут еще больше.

Балансировка и моделирование

Напомним, что в практической плоскости балансировка энергосети сводится к поддержке фиксированной частоты генерации электроэнергии путем включения и отключения тех или иных производителей, а также плавным изменением мощности имеющихся маневренных станций.

Понятно, что одними электростанциями можно относительно легко и оперативно управлять (ГЭС, ГАЭС), на другие можно оказывать влияние в инерционном режиме (ТЭС). А вот генерация третьей группы (АЭС, ТЭЦ, ВИЭ) практически не подлежит коррекции; это неманевренные станции.

Поскольку мощностей высокоманевренных ГЭС и ГАЭС для балансировки катастрофически не хватает, к процессу подключаются также «медленные» квазиманевренные мощности ТЭС, запуск которых и вывод на рабочие показатели требует нескольких часов, в зависимости от того, осуществляется ли он в «холодном» режиме или в «горячем». Как правило, работа тепловых станций обеспечивается графиками ввода в действие мощностей, которые строятся с учетом прогнозов потребления электроэнергии, учитывающих такие факторы, как дни недели, температура воздуха, погодные условия, наличие угля и пр.

Особое значение приобретают краткосрочные и среднесрочные прогнозы погоды для местности, на которой размещены СЭС и ВЭС. Ведь генерация электроэнергии сильно зависит от текущего уровня инсоляции и скорости ветра. Управлять выработкой электроэнергии ВИЭ достаточно сложно, да и по правилам, весь «продукт» государство обязано принять и завести в сеть.

Летние проблемы энергосети

При каких же условиях энергосистема нашей страны выдержит пиковую генерацию ВИЭ в самых «экстремальных» случаях?

По результатам исследования, проведенного USAID (US Agency for International Development) с привлечением международных экспертов Tetra TechES и Mercados, которые были представлены в декабре 2018 года, предполагалось, что к концу 2020-го энергосистема Украины сможет принять не более 4750 МВт ВИЭ. Эти данные представлены в интервью Всеволода Ковальчука «Зелено-угольный парадокс украинской энергетики» газете «Зеркало недели» от 25 мая 2019 года.

Чтобы осмыслить этот тезис и разобраться, где находятся те пределы, за которыми сеть станет неуправляемой, воспользуемся реальными статистическими данными «Укрэнерго» по генерации 2020 года.

В качестве примера проанализируем почасовую выработку электроэнергии в течение нескольких дней в различные сезоны. Начнем с диаграммы на самый длинный день года — 21 июня; к тому же это воскресенье со всеми вытекающими особенностями. Для более наглядной иллюстрации здесь и далее графики будем представлять в накопительном виде, отражающем изменение общей суммы по мере добавления каждой кривой генерации (рис. 3).

Для корректности дальнейшего изложения следует отметить, что такие факторы, как потребление ГАЭС в режиме накачки воды в хранилища, а также перетоки по внешним межгосударственным линиям учтены в кривой генерации «АЭС+ТЭЦ+пр.», хотя они в силу их относительной малозаметности не оказывают существенно влияния на конечные результаты.

Приведенный график генерации в день летнего солнцестояния достаточно непривычен — суммарное потребление не имеет характерного пика в районе 18.00 (см. верхнюю кромку рис. 3). Но этот день соответствует воскресенью и включение освещения в домах

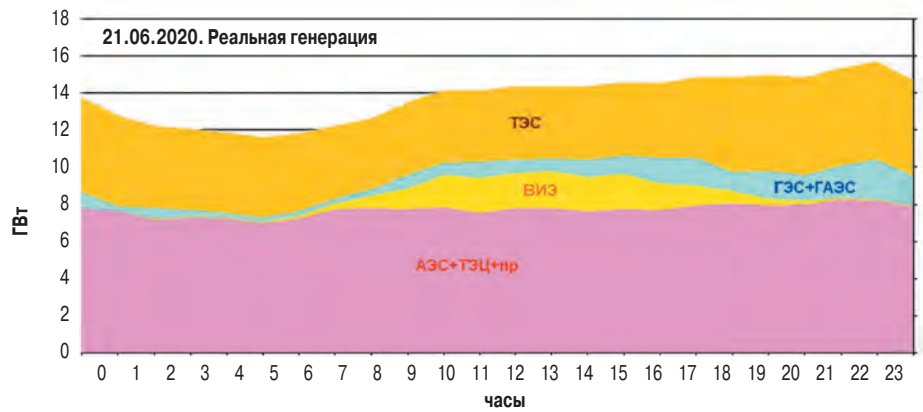


Рис. 3. Диаграмма реальной генерации на 21 июня 2020 года (воскресенье)

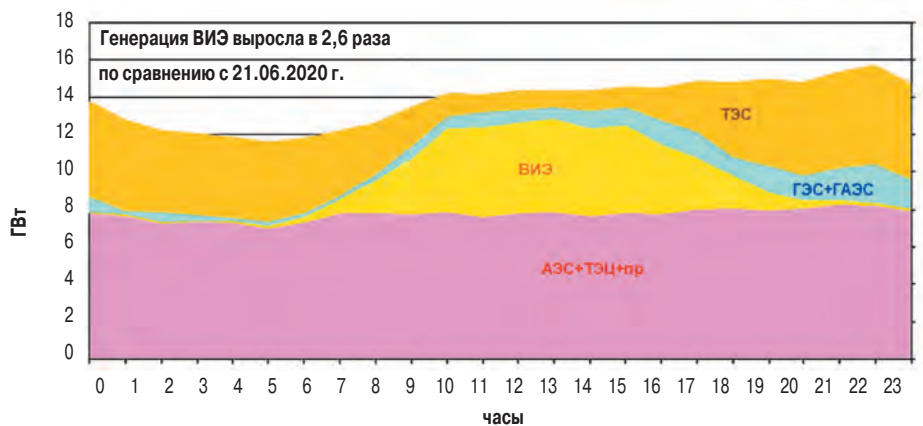


Рис. 4. Гипотетическая диаграмма, на которой выработка ВИЭ выросла в 2,6 раза по сравнению с 21 июня 2020 года

приходится на интервал времени вблизи 22.00. Как видно из диаграммы, ближе к концу дня на повышенный режим генерации были вынуждены перейти ТЭС и гидростанции, поскольку рост потребления достиг пикового значения. При этом уровень генерации ТЭС в течение суток находился в диапазоне от 3914 МВт до 5348 МВт. Атомные станции работали со среднесуточным показателем 6975 МВт.

Критическая точка для нашего анализа пришлась на 13.00. В этот момент балансирующая генерация ТЭС составила 3923 МВт, а ВИЭ вырабатывали максимальное количество электроэнергии — 1926 МВт.

Представим, что светлое будущее, о котором мы мечтаем (или которого опасаемся), уже наступило, и мощность возобновляемых источников выросла в пиковые моменты, например, в $k_1=2,6$ раза (с 1926 МВт до 5007 МВт). Признаемся, что указанный коэффициент k_1 был подобран экспериментальным путем. Что следует предпринять? Ведь потребление

осталось прежним. Как изъять из энергосети излишек выработки?

Для простоты решения задачи условимся, что использовать генерацию ГЭС и ГАЭС для балансировки мы не станем. Хотя максимальная генерируемая мощность ГЭС может достигать уровня 2700–2800 МВт и даже выше, о чем свидетельствует реальная статистика. Например, в 2020 году было зарегистрировано всего 10 случаев превышения этого порога, а рекорд был установлен 06.04 2020 года — 3216 МВт.

И хотя инструмент ГЭС очень эффективен, балансировать энергосистему будем за счет снижения мощности ТЭС, причем синхронно с ростом генерации ВИЭ (рис. 4). Хотя в реальном мире эта синхронность, скорее всего, невозможна без быстрой корректировки мощности с помощью ГЭС и ГАЭС. Но мы ведь проводим мысленный эксперимент. Итак, мощность ТЭС будем снижать по мере роста выработки ВИЭ, характер которой условно примем такой же, как

и 21 июня 2020 года. Очевидно, что общий график, как функция времени, должен остаться прежним, как на исходной диаграмме рис. 3. Кроме того, должно выполняться также условие

$$E_{ТЭС+ВИЭ}(t) = ТЭС_{кор}(t) + ВИЭ_{кор}(t)$$

где $ВИЭ_{кор}(t) = k_1 \cdot ВИЭ(t)$ — возросшая в k_1 раз выработка из возобновляемых источников; $ТЭС_{кор}(t)$ — скорректированный показатель генерации тепловых станций.

Это значит, что суммарный откорректированный график выработки $E_{ТЭС+ВИЭ}(t)$ должен соответствовать исходному. Если сравнить диаграммы рис. 3 и рис. 4, то можно увидеть, что эти условия совпадают. Добиться таких результатов очень просто в связи с тем, что функции выработки по всем типам станций известны и представлены в табличном виде. А искомая функция $ТЭС_{кор}(t)$ находится как разность

$$ТЭС_{кор}(t) = E_{ТЭС+ВИЭ}(t) - k_1 \cdot ВИЭ(t).$$

В результате проведенной коррекции (балансировки) тепловые станции, как видно из рис. 4, продолжают вырабатывать электроэнергию даже в промежутке 11.00–14.00, хотя и на незначительном уровне 0,97–1,4 ГВт.

Если же коэффициент роста выработки ВИЭ в будущем принять на уровне $k_1=3,1$, то теоретически это позволит полностью отключить все тепловые станции, по крайней мере, на интервале 10.00–15.00 и выполнять балансировку только с помощью гидростанций. Однако в силу инерционности ТЭС реализовать это, скорее всего, невозможно.

Но есть еще один способ, и связан он с возможностью отключения одного из реакторов АЭС мощностью 1 ГВт. Хотя, конечно же, такие операции должны выполняться в плановом порядке и на достаточно длительное время. Это позволит увеличить допустимую мощность генерации ВИЭ с 5 ГВт до 6 ГВт, что в 3 раза выше, чем пиковая генерация, продемонстрированная 21 июня 2020 года. Следовательно, генерируемую мощность ВИЭ в будущем можно будет поднять в три раза по сравнению с реально установленной на 21.06.2020, т.е. с $P_{устВИЭ06.20}=7219,6$ МВт до $P_{устВИЭфутур}=21\ 658$ МВт.

Таким образом, возобновляемой энергетике есть еще куда расти, даже в рамках существующих ограниченных возможностей балансирующих мощностей. Однако описанная ситуация — еще не самая сложная на энергосети. День летнего солнцестояния оказался не самым тяжелым для энергосистемы нашей страны. Ниже будет приведен совсем уж «холодящий кровь» сценарий ☹.

Как может выглядеть «настоящий кризис» в энергосети

Если изучить статистику «Укрэнерго» по генерации ВИЭ на протяжении всего 2020 года, то из нее можно увидеть, что уровень 3500 МВт почасовой выработки электроэнергии из возобновляемых источников был превышен в течение всего лишь 20 часов, причем это произошло на протяжении 8 дней — в июне (1 день), августе (4 дня) и сентябре (3 дня).

При этом абсолютный пик генерации ВИЭ пришелся на 30 августа 2020 года с показателем 3871 МВт (12.00). А это ощутимо выше, чем использовавшиеся нами данные на 21 июня (1926 МВт). Причина, вероятно, в погодных условиях — на диаграмме рис. 1 август характеризуется повышенной выработкой электроэнергии. Отметим, что по состоянию на 01.09 2020 г. общая установленная мощность ВИЭ по стране составляла $P_{устВИЭ09.20}=7351,846$ МВт.

Рассмотрим детальнее эту «ВИЭ-катастрофу» 2020 года. Итак, 30.08.2020 г. Как и следовало ожидать ☺, это снова воскресенье (рис. 5). В диапазоне 11.00–13.00 ГЭС практически

прекратили выработку электроэнергии. Однако производительность ТЭС все еще остается на уровне 2700–2900 МВт, и это логично, ведь к вечеру генерация ВИЭ начнет снижаться, а общее потребление электроэнергии все еще будет расти и, по прогнозам, спад наступит не ранее 22.00. Поэтому снижать генерацию ТЭС действительно не следует.

Абсолютный пик генерации ВИЭ в 2020 году пришелся на 30 августа 2020 года на 12 часов дня и составил 3871 МВт при общей установленной мощности ВИЭ на тот момент составившей 7351,846 МВт

Более того, в интервале с 9.00 по 16.00 ГАЭС непрерывно потребляли электроэнергию в режиме ее изъятия из сети. Максимальная мощность закачки воды в хранилища с 10.00 до 14.00 составляла 920–930 МВт. Т.е. гидроагрегаты интенсивно трудились в несвойственное для них время, чтобы по максимуму отобрать энергию из сети и наполнить водохранилища. На самом деле на этот момент энергосеть была перегружена. Хотя если бы удалось несколько снизить генерацию ТЭС, то вопрос несвойственного включения агрегатов ГАЭС в дневное время в режиме насосов был бы снят. Но как видно из диаграммы, тепловые станции продолжали свою работу, практически не снижая генерацию (вероятно угля на тот момент было еще достаточно).

Можем ли мы в такой ситуации всерьез говорить о возможности балансировки,

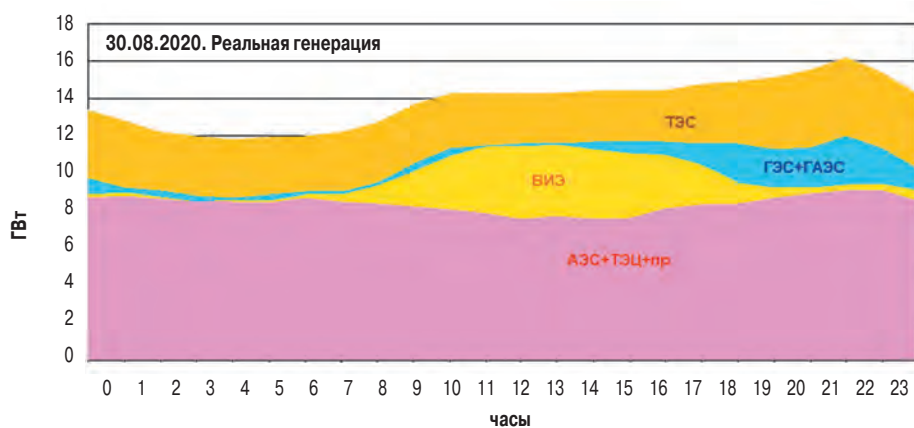


Рис. 5. Диаграмма реальной генерации на 30 августа 2020 года (воскресенье)

когда выработка ВИЭ в скорой перспективе вырастет хотя бы в 1,4 раза? Теоретически это возможно за счет отключения части энергоблоков ТЭС. Как видно из диаграммы (рис. 6), где генерация ВИЭ выросла в 1,4 раза, мощность ТЭС в обеденные часы остается на уровне 1085–1343 МВт (полностью заглушать станции нельзя). При этом возможности ГАЭС по балансировке, как уже говорилось, полностью исчерпаны.

Максимальная мощность ТЭС в течение суток достигает при этом $P_{\text{maxТЭС}}=4057$ МВт, а соответствующий показатель по ВИЭ — $P_{\text{maxВИЭ}}=5347$ МВт.

Добиться еще большей величины допустимого роста генерации ВИЭ можно лишь путем снижения генерации АЭС. Отключение одного энергоблока мощностью 1000 МВт позволит увеличить предельную выработку ВИЭ в 1,7 раза (до величины 6580,7 МВт) по сравнению с зафиксированной на указанную дату (рис. 7).

Но это в свою очередь приведет к увеличению мощности генерации ТЭС с 3700–4000 МВт до 4600–4900 МВт в утренние часы и с 3600–3800 МВт до 4400–4600 МВт — в вечерние. Другими словами, отключение энергоблока АЭС может несколько поднять предел роста выработки ВИЭ, но при этом вырастет генерация ТЭС. Если посчитать суточные показатели, то при росте ВИЭ в 1,4 раза (рис. 6) генерация ТЭС составит 64,895 млн кВт·ч, а АЭС — 183,972 млн кВт·ч. Если рост ВИЭ составит 1,7 раза и будет отключен один энергоблок АЭС мощностью 1000 МВт, то выработка ТЭС за указанные сутки вырастет до 78,959 млн кВт·ч, а производство АЭС снизится до 159,972 млн кВт·ч. Что в этом случае лучше — экономить уран или жечь уголь, мы не беремся сказать. Но то, что это позволит обеспечить рост ВИЭ по стране в 1,7, а не в 1,4 раза — несомненный факт.

Проведенный анализ позволил увидеть, что несмотря на относительно небольшую долю генерации ВИЭ, реальная проблема состоит в пиковой выработке в обеденные часы в летние месяцы. Лето — наиболее опасный сезон для энергосистемы. И возникшая «неожиданно» задача оказалась

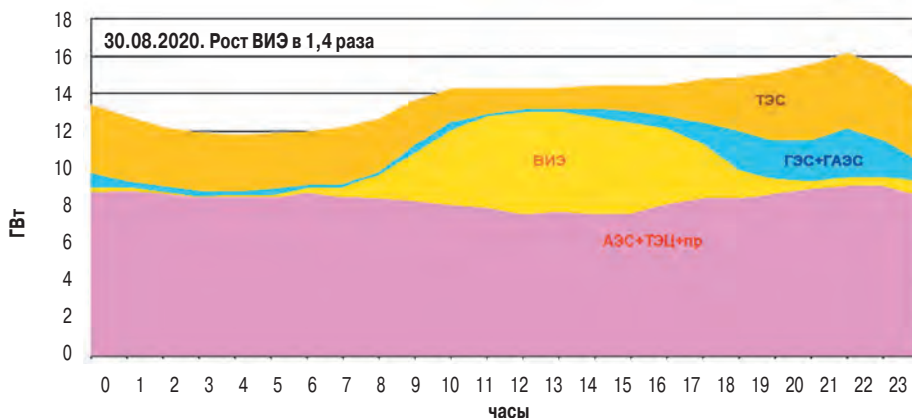


Рис. 6. Гипотетическая диаграмма, на которой выработка ВИЭ выросла в 1,4 раза по сравнению с 30 августа 2020 года

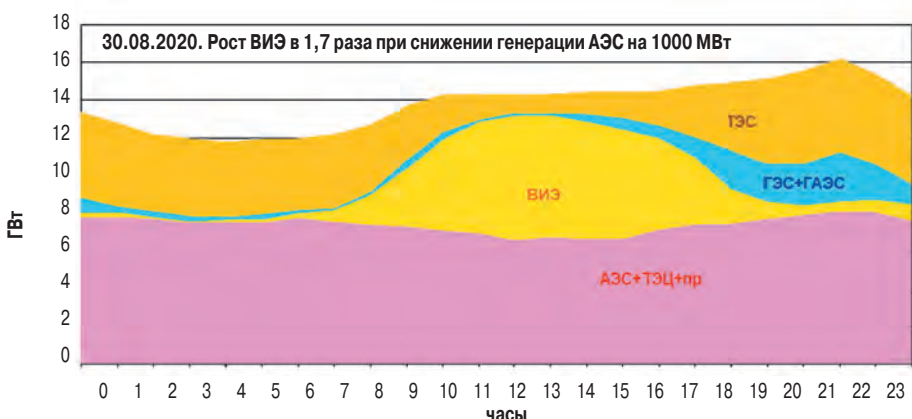


Рис. 7. Гипотетическая диаграмма, на которой выработка ВИЭ выросла в 1,7 раза по сравнению с 30 августа 2020 года, а генерация АЭС снижена на 1000 МВт

связанной не с недостатком генерирующих мощностей, а с избытком вырабатываемой электроэнергии в отдельные пиковые интервалы времени.

Проблема энергосети оказалась связанной не с недостатком генерирующих мощностей, а с избытком вырабатываемой электроэнергии в отдельные пиковые интервалы времени в летние месяцы

Зимняя нагрузка

В зимние месяцы производство и потребление электроэнергии растет. И ее пока что хватает, тем более что год от года потребление снижается. В зимние месяцы отсутствуют также резкие пики выработки ВИЭ, которые являются насущной проблемой летом.

Вот еще один пример, который также базируется на реальной статистике. Он относится к 22 декабря 2020 года

(день зимнего солнцестояния) и приходится на рабочий вторник. Здесь картина потребления электроэнергии выглядит более привычной и содержит два традиционных пика — утренний и вечерний (рис. 8).

На зимней диаграмме стандартный вечерний максимум (18.00) потребовал включения ТЭС на максимальную мощность — $P_{\text{ТЭСmax}}=9312$ МВт, при этом минимальная генерация на протяжении суток составила $P_{\text{ТЭСmin}}=5948$ МВт. АЭС работали в этот день на среднем показателе 9154 МВт.

Имеет ли энергосистема нашей страны возможность балансировки при наращивании в будущем производства ВИЭ в зимний период? Из диаграммы рис. 8 видно, что тепловые станции вырабатывают достаточно много дорогой тепловой электроэнергии. И даже вопрос балансировки энергосети остро здесь не стоит. Ведь только в январе 2021 года, в самый неблагоприятный период для генерации, удалось легко «потушить» два энергоблока АЭС (а это 1,1 ГВт). Этот

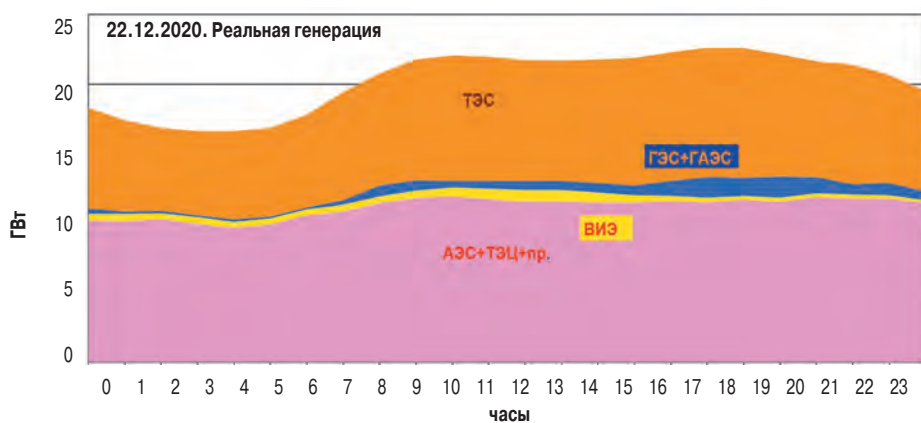


Рис. 8. Диаграмма реальной генерации на 22 декабря 2020 года

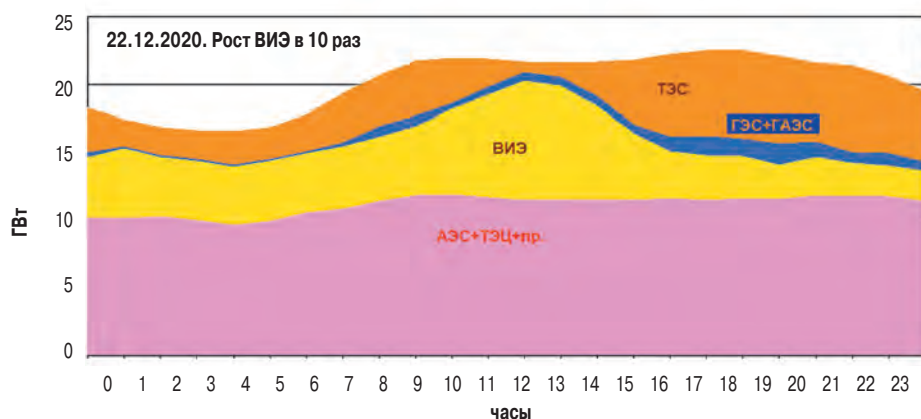


Рис. 9. Гипотетическая диаграмма, на которой выработка ВИЭ выросла в 10 раз по сравнению с 22 декабря 2020 года

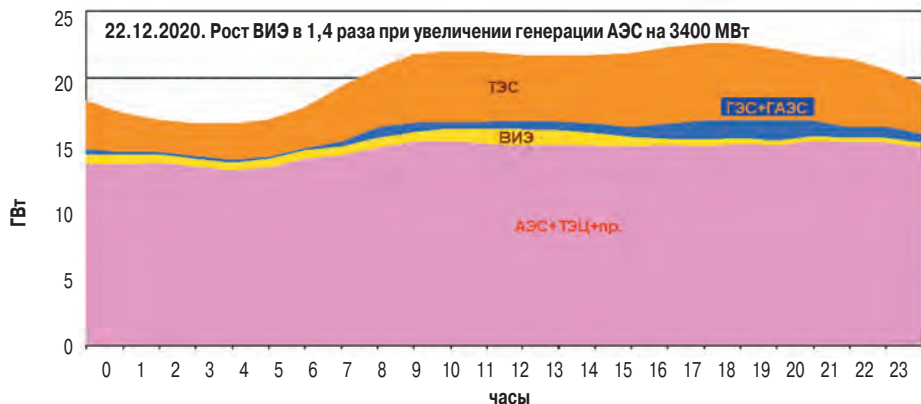


Рис. 10. Гипотетическая диаграмма, на которой выработка ВИЭ выросла в 1,4 раза, а АЭС — на 3,4 ГВт по сравнению с 22 декабря 2020 года

«сброс» компенсировали ТЭС и потоки по межгосударственной линии «Украина – Беларусь, РФ».

Из диаграммы рис. 8 следует, что гипотетически при картине потребления в энергосети на уровне 22 декабря 2020 года мощность ВИЭ в будущем может вырасти в 10 раз (рис. 9).

Но не следует радоваться этой цифре, ведь летом энергосистема сможет пережить рост генерации ВИЭ всего в 1,4 раза. Поэтому целесообразно считать, что максимальная генерация

возобновляемых источников по стране может подняться до уровня $k_1=1,4$ раза (один из наиболее критичных летних показателей).

Было бы также очень неплохо включить на зимний период дополнительные энергоблоки АЭС с выработкой 3,4 ГВт. Эта величина была выбрана исходя из того, что максимальная суммарная генерация всех украинских АЭС, которая была достигнута 18.02.2017 года, составляет $P_{АЭС\max}=12,6$ ГВт. В то же время на 22.12.2020 энергосистема оперировала со среднесуточной

мощностью $P_{АЭС}=9,154$ ГВт. Разность как раз и составляет величину 3,4 ГВт. Имеется ли в настоящее время реальная возможность повышения выработки АЭС до такой мощности, нам неизвестно. Тем не менее в этом случае мы получим диаграмму генерации, представленную на рис. 10.

Из этого графика видно, что при росте выработки ВИЭ в 1,4 раза, мощность АЭС можно увеличить на 3,4 ГВт, т.е. до 12,6 ГВт и выше. При этом запас балансирующей мощности ТЭС в ночные часы составит величину $P_{\min\text{ТЭС}}=1857$ МВт.

ГАЭС не вытянут

Поскольку в летние дни запас по балансировке имеет гораздо меньшую величину, чем в зимние, то и ориентироваться следует именно на них. Понятно, что мощность ВИЭ в энергосистеме не может увеличиваться бесконечно. Предельная величина допустимой генерации ВИЭ составляет $P_{\max\text{ВИЭ}}=5347$ МВт, а при отключении одного энергоблока АЭС может вырасти до 6580,7 МВт. Показатели генерации ВИЭ трудно нарастить без появления новых накопительных мощностей.

Ведь при этом речь идет уже не просто о балансировке, а о переизбытке электроэнергии в сети. Ее банально становится некуда девать, если отсутствует возможность изъятия и накопления. При этом если ГАЭС обычно закачивает воду в водохранилища в ночные часы, поскольку энергию именно в это время девать просто некуда, то в летнее время (в данном случае как в нашем примере 21.06.2020 г.) избыток возник в 14.00, когда ГАЭС перешли в режим потребления электроэнергии. Пусть ненадолго, всего на один час, но это побудило нас изучить это вопрос более тщательно.

Оказалось, что на самом деле таких нетрадиционных включений ГАЭС на закачку воды в середине дня в 2020 году было достаточно много. Так, 22.01.2021 г. было выполнено включение ГАЭС на изъятие электроэнергии в интервале 13.00; потребление составило 451 МВт·ч. До этого, 17 января, ГАЭС были включены днем на целых три часа — с 13.00 по

15.00 для «отвода» 123 МВт·ч. В каждом месяце таких дней можно насчитать около десятка только в холодный период.

Летом же включения ГАЭС на закачку воды в середине дня выполнялись практически непрерывно. Наглядным примером может служить 31 мая 2020 года (воскресенье), когда ГАЭС потребляли энергию без остановки в течение 15 часов (с 02.00 до 17.00), изъяв из энергосистемы 8450 МВт·ч. Кстати, именно в этот день ВИЭ выработали 28 820 МВт·ч. Для этого случая также были произведены расчеты, которые показали, что рост генерации из возобновляемых источников для этого дня может составить 2,4 раза (при минимальном значении производства ТЭС в 1000 МВт), что примерно соответствует картине балансировки на 21 июня 2020 года.

Отметим также, что себестоимость электроэнергии, вырабатываемой ГАЭС, более чем в два раза должна превышать таковую для ГЭС. Связано это с необходимостью заполнения верхних водохранилищ, для чего используется больше электроэнергии, чем будет затем выработано. Тем не менее, если учитывать рыночное ценообразование, которое должно внедриться в нашей стране в данной отрасли, то закачка воды будет выполняться в часы минимальной стоимости электроэнергии, а генерация — в периоды ее максимальной цены. Так что вполне может оказаться, что экономическая сторона технологии работы ГАЭС станет вполне гармонизированной.

В то же время в 2019 году ситуации «внештатного» включения ГАЭС в середине дня носили единичный характер. Так, с марта по июль включительно отмечено всего лишь 7 подобных случаев, из которых самое мощное «нештатное» включение ГАЭС произошло 28 апреля 2019 года (воскресенье) — в течение трех часов (15.00–17.00) был выполнен отбор 804 МВт·ч. А это всего лишь 10% от «рекорда» 31 мая 2020 года.

Таким образом, проведенные оценочные расчеты свидетельствуют об опасности непродуманного наращивания мощности ВИЭ без учета реальных балансирующих возможностей.

Есть ли альтернатива?

Кроме ГАЭС, роль которых в балансировке энергосистемы трудно переоценить, перспективными видятся также аккумуляторные накопители, газогенераторы, а в будущем и виртуальные электростанции, использующие АКБ электромобилей и домашние накопители электроэнергии. Есть определенные перспективы в создании малых атомных реакторов (100–500 МВт) со значительным уровнем маневренности — мощность генерации можно снижать или повышать на 40% в течение часа. Однако такие системы пока еще в стадии испытаний и в промышленную эксплуатацию не введены. О термоядерном синтезе пока не говорим, этой «птичке» до размеров «черного лебедя» следует еще вырасти.

Перспективным направлением видится также использование водорода как энергоносителя для поездов, кораблей, автомобильного транспорта. При этом выработка водорода электролитическим методом потребует электроэнергию, которую можно будет изымать из энергосети в моменты ее переизбытка. Однако эти перспективы растянуты на десятилетия, в то же время проблемы балансировки остро стоят уже сегодня.

Если посмотреть на мощность, отбираемую насосами украинских ГАЭС в пиковых режимах работы, то самый высокий показатель в 2020 году отмечен 30.06.2020 г. — 1178 МВт. При этом гидроагрегаты за сутки могут «изъять» из энергосети в районе 8500 МВт·ч электроэнергии.

А ведь ГАЭС решают именно задачу, которая начала проявляться летом при балансировке энергосети — избыток выработки ВИЭ нужно куда-то девать. Для сравнения, накопитель Tesla в Австралии имеет мощность 150 МВт/193,5 МВт·ч и его емкость в 44 раза ниже возможностей нынешних украинских ГАЭС. А если говорить о числе «циклов заряда/разряда», то отечественные гидросистемы вообще не имеют таких ограничений и могут служить десятки лет, меняя каждый день цикл генерации на режим накопления энергии.

При этом Li-Ion-аккумуляторы, кроме ограниченного количества циклов заряда/

разряда очень требовательны к температуре эксплуатации и имеют ограничения по токам заряда/разряда. Так, емкость обычного АКБ нормируется при условии, что ток разряда (мощность, поступающая в нагрузку) будет составлять около 10% от показателя, который измеряют в А·ч или Вт·ч. Это значит, что для упомянутой системы Tesla (с параметром 193,5 МВт·ч) нормированная мощность разряда составит всего $P_{ном} = 19,5$ МВт. К сожалению, реалии таковы, что для балансировки энергосети на уровне государства Li-Ion-аккумуляторы пока не имеют перспектив.

Так, при стоимости аккумуляторных накопителей на уровне \$300 за 1 кВт·ч, хранилище на 10 ГВт·ч, которое позволит обеспечить выработку $E_{ном} = 1$ ГВт·ч, обойдется в \$3 млрд. Но и такие показатели недостаточны для решения задач балансировки. И мы не говорим даже о проблемах производства необходимого количества АКБ и ограниченном ресурсе использования. В то же время основное преимущество упомянутых систем, в данном случае весьма маломощных, состоит в оперативности внедрения (в случае с австралийским проектом все работы заняли 60 суток).

Поскольку статья предназначена не для энергетиков, а скорее для «айтишников», то вполне может оказаться, что не все вопросы затронуты и освещены с должной степенью корректности. Например, несколько смущает возможность обеспечения значительных перепадов генерируемой мощности ТЭС в течение суток. А ведь именно на этом базируется идея балансировки энергосети в летние месяцы при росте выработки ВИЭ.

Тем не менее очевидно, что грядущие проблемы (хотя практически они уже нынешние) балансировки энергосети страны напрямую связаны с ежегодным ростом генерации солнечной и ветряной электроэнергии. В связи с этим уже сейчас нужно пересмотреть роль тепловых и атомных станций в генерации, а также осмыслить позитивную роль ГАЭС, которые являются непревзойденным инструментом отбора излишков электроэнергии, генерируемых ВИЭ, и выработки ее в энергосеть по мере необходимости.

Владимир СКЛЯР, СиБ