

Владимир Сидорович

Июнь 2017

Интеграция ВИЭ в энергосистему: практика, мифы и легенды (Обзор документов Международного энергетического агентства)

Увеличение доли генерации на основе ветра и солнца в структуре электроэнергетики многих стран и регионов ставит определенные вызовы перед управляющими энергетическим хозяйством. Каким образом возрастающая доля нестабильных потоков энергии может быть безопасно интегрирована в сеть с наименьшими потерями электроэнергии и без ущерба надежности системы?

Не сегодняшний день накоплено уже большое количество эмпирических данных, касающихся управления сетевым хозяйством в условиях высокой доли и даже доминирования ВИЭ. Кроме того, нет недостатка в теоретических исследованиях и [моделях систем](#), основанных на возобновляемых источниках энергии.

В то же время, несмотря на обилие данных, **обсуждение вопросов интеграции ВИЭ часто сопровождается «ложными неправильными представлениями, мифами и даже дезинформацией»**, - указывает Международное энергетическое агентство (МЭА) в своем [руководстве](#) «Поймать ветер и солнце в сеть» (Getting Wind and Sun onto the Grid), которое было опубликовано в марте текущего года.

В данном документе описываются решения, позволяющие оптимально интегрировать переменчивую генерацию на основе солнца и ветра в сетевое хозяйство.

Это не первый документ МЭА по данной теме. В 2014 году был опубликован 238-страничный [доклад](#) «Сила трансформации – ветер, солнце и экономика гибких энергетических систем» (The Power of Transformation: Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems), в котором дается ответ на вопросы: может ли энергетическая система оставаться надежной и экономически эффективной, если в ней высокая доля переменчивой генерации на основе ВИЭ? И если да, то как?

В 2016 был представлен [доклад](#) «Следующее поколение ветровой и солнечной электроэнергетики» (Next Generation Wind and Solar Power). Пришедшее «следующее поколение» означает технологически зрелые и коммерчески конкурентоспособные технологии генерации на основе ВИЭ. Их всё более широкое распространение создает вызовы для энергосистем, обусловленные нестабильностью выработки. И в работе рассматриваются ответы на данные вызовы с конкретными примерами ряда стран.

Отмечу, МЭА – это исследовательский центр, занимающийся всеми секторами энергетического рынка, а, отнюдь, не «рупор ВИЭ». Кроме того, указанные доклады были

подготовлены при разных руководителях Агентства («The Power of Transformation» при предыдущем главе МЭА, Maria van der Hoeven, другие два – при нынешнем, Fatih Birol). Поэтому их выводы можно считать объективно-нейтральными по сравнению с работами, которые публикуют «заинтересованные стороны».

The Power of Transformation: Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems

В этом докладе 2014 года обобщаются результаты проекта МЭА «Grid Integration of VRE» (VRE - variable renewable energy), проводившегося в ряде стран.

Посмотрим на его ключевые выводы.

Интеграция малых объемов переменчивых ВИЭ в сеть – не проблема. Под малыми объемами здесь понимается доля в 5-10%.

При этом, надо все-таки соблюдать некоторые правила:

- Не допускать неконтролируемых локальных концентраций ВИЭ («горячих точек»);
- Обеспечить, чтобы ВИЭ электростанции могли «помочь» [стабилизировать сеть](#), когда это необходимо;
- Прогнозировать производство электроэнергии на основе ВИЭ и использовать эти прогнозы для планирования работы других электростанций и потоков электроэнергии в сети.

Исследование в регионах проекта показало, что **нынешний уровень гибкости энергосистем технически позволяет «работать» с годовой долей переменчивой генерации в 25-40%**. В соответствии с тем же анализом, «в очень гибких системах» доля ВИЭ может превысить **50%** уровни, если допускается возможность вынужденных остановок «небольших объемов» генерации на основе возобновляемых источников.

Интеграция больших объемов ВИЭ требует трансформации энергосистемы в целом.

Другими словами, речь не идет о простом добавлении новых объектов генерации к «старой», работающей как обычно, системе, а о полном реформатировании системы.

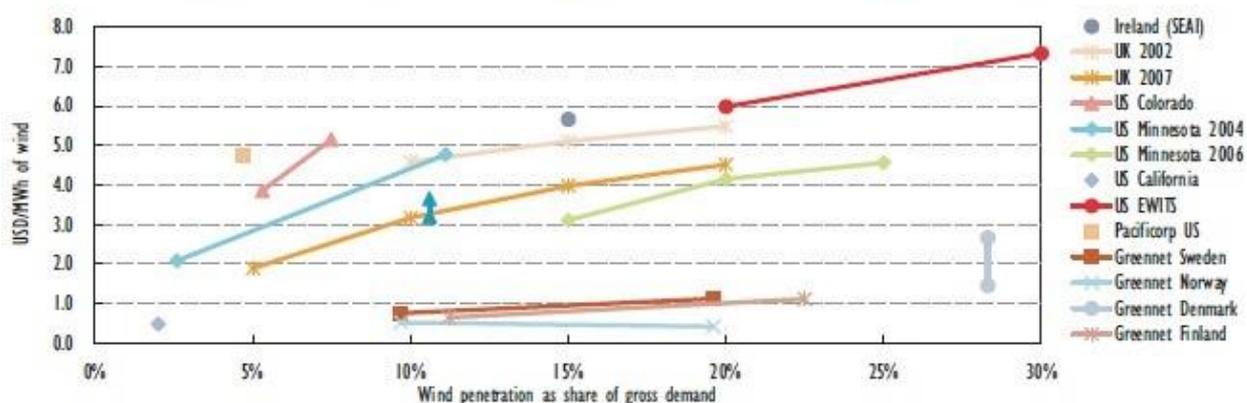
Расходы, связанные с этой трансформацией, зависят от разных обстоятельств. Очевидно, что если высокая доля ВИЭ добавляется единовременно (чего в общем-то не бывает), тогда системные издержки (system cost) возрастают значительно. С другой стороны, при постепенном развитии (с учетом снижения стоимости технологий ВИЭ и, напротив, роста экологических сборов в будущем) возможен *нулевой или даже отрицательный рост системных издержек*.

«Основной вывод этой публикации заключается в том, что крупные доли переменчивой возобновляемой энергии (до 45% годового объема генерации) могут быть интегрированы без существенного увеличения расходов в энергосистеме в долгосрочной перспективе».

В работе еще раз подчеркивается очевидное: интеграционные расходы (integration costs), издержки системы, связанные с добавлением в неё нового источника, не относятся исключительно к переменчивым ВИЭ (дословно: «Integration costs are not specific to wind power or solar PV» – стр. 70). Интегрировать в систему нужно любую электростанцию, а неопределенность в плане выработки присуща для любого объекта генерации (поломки, перебои с поставками топлива и т.д.).

МЭА приводит сводные данные из разных исследований о размере системных расходов, возникающих в связи с переменчивым характером генерации на основе ветра, так называемых расходов на выравнивание (balancing costs) - см. картинку.

Figure 4.2 • Comparison of modelled balancing costs from different integration studies



Notes: SEAI = Sustainable Energy Authority of Ireland. Exchange rate USD/EUR = 1.3476.

Source: Holttinen, H. et al., 2013.

Размер этих затрат варьируется от 1 до 7 долларов США за мегаватт-час.

Кроме того, подход, в рамках которого «просто» осуществляются подсчёты интеграционных расходов, по мнению МЭА, не является грамотным. Правильнее работать с показателем «ценности» (Value of VRE), то есть учитывать более широкий набор эффектов (стр. 81). МЭА прямо советует «избегать методологических недостатков расчета стоимости интеграции и вместо этого оценивать общую эффективность переменчивых ВИЭ на системном уровне» (стр. 189).

Отдельная вставка в работе посвящена старому мифу, который называется **«Для ВИЭ нужны резервные мощности»** («Do variable renewables need back-up capacity?» – стр. 74-75). «Термин «резервирование» несколько вводит в заблуждение», - говорится в докладе. **«Нахождение переменчивых ВИЭ в системе не означает, что нужно строить какие-либо дополнительные регулируемые (маневренные) мощности».** Напротив, в той степени, в которой ВИЭ добавляют мощность в систему (capacity credit), снижается потребность в других энергетических мощностях (мощность ВИЭ в системе увеличивается с расширением географии электростанций и диверсификацией источников энергии – см. стр. 8).

«Системе в целом требуется достаточные мощность и энергия. При высоких долях переменной генерации на основе ВИЭ последние вносят сюда асимметричный вклад. В большей степени вклад энергии, чем мощности. Что нужно на уровне системы, так это *не back-up для ВИЭ*, а экономически эффективное решение для удовлетворения спроса на электроэнергию. В результате, при высоких долях ВИЭ, остальная часть электростанций должна в большей степени обеспечивать мощность, чем электроэнергию».

Next Generation Wind and Solar Power. From cost to value (2016)

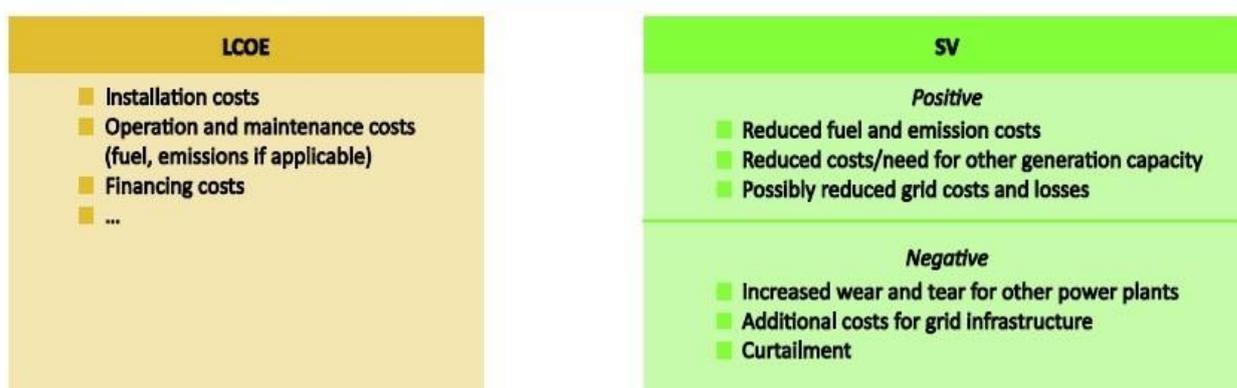
Данный доклад интересен прежде всего большим обзором практики интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистемы разных стран, а также концепцией «системной ценности» разных технологий генерации.

В документе утверждается, что традиционный фокус на стоимости электроэнергии (LCOE) – измерении расходов конкретной технологии генерации на уровне электростанции – сегодня недостаточен.

Подходы «нового поколения» требуют учета «системной ценности» (SV - system value) электроэнергии, производимой на основе ветра и солнца. То есть общей пользы, получаемой при добавлении в энергосистему солнечной или ветряной генерации. Эта «системная ценность» определяется сочетанием положительных и отрицательных факторов, включающих снижение стоимости топлива, сокращение выбросов двуокиси углерода и других загрязняющих веществ, или более высокие затраты на дополнительную сетевую инфраструктуру.

Сравнение LCOE и SV представлено на рисунке:

Figure 5 • Illustration of LCOE and SV



Key point • The LCOE and SV provide complementary information. The LCOE focuses on the level of the individual power plant, whereas SV captures system-level effects.

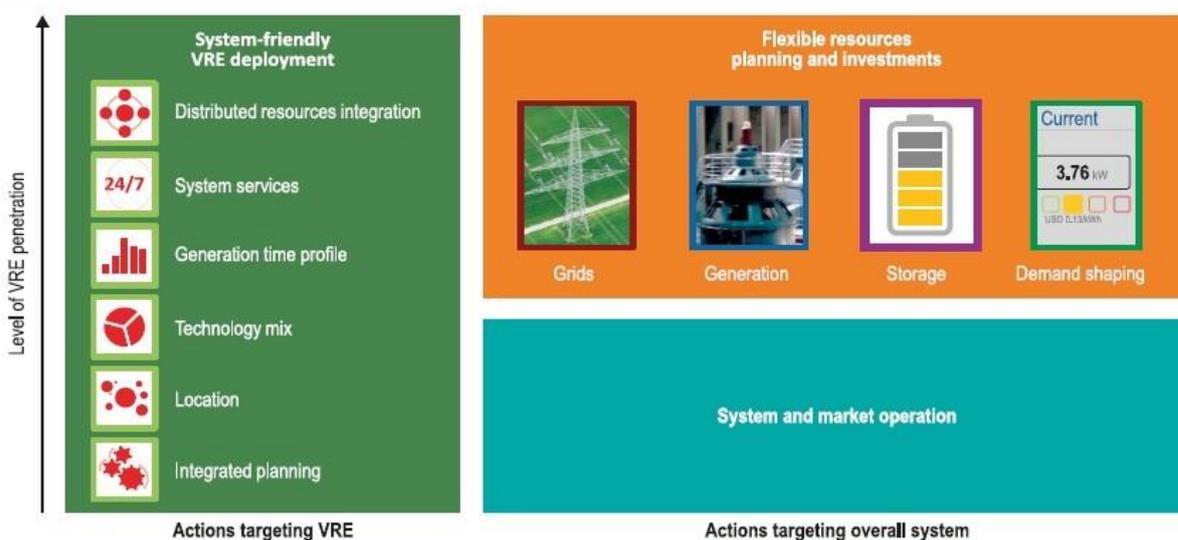
Быстрое распространение солнечной и ветровой энергетики – это факт. Наступает «новое поколение» этих типов генерации – технологически совершенное и экономически эффективное.

С увеличением доли нестабильной генерации на основе солнца и ветра становится необходимым обстоятельный системный подход к трансформации энергетической системы.

Эта трансформация может быть «разбита» на три ключевых элемента:

- 1) «Безболезненная» для системы интеграция переменчивых ВИЭ (см. далее);
- 2) Повышение **гибкости системы** посредством использования соответствующих «гибких технологий» (генерации, хранения энергии, управления спросом);
- 3) Усовершенствование технологий работы системы (например, повышение качества прогнозирования выработки на основе ВИЭ).

Figure ES.2 • Three pillars of system transformation



Key point: VRE can facilitate system integration in combination with improved operations and investment in flexible resources.

Ветряная и солнечная энергетика может «безболезненно» интегрироваться в систему с помощью соответствующих стратегий интеграции.

В частности, выделяются шесть важных направлений/принципов:

- 1) Оказание солнечными и ветровыми электростанциями системных услуг. Для этого необходимы соответствующие изменения в нормативной базе.
- 2) Развёртывание объектов ВИЭ генерации в тех районах, где они могут обеспечивать большую системную ценность (например, ближе к местам наивысшего спроса).
- 3) Диверсификация источников энергии – взаимное дополнение солнечной и ветровой генерации. Параллельное развитие гидроэнергетики (приводится пример Бразилии, которая развивает как ветроэнергетику, так и новые гидроресурсы).
- 4) Локальная интеграция с другими ресурсами. Речь идет о повышении доли собственного (локального) потребления энергии, производимой на месте, благодаря использованию комплекса (пакета) решений. Например, комбинация солнечных электростанций с

накопителями энергии и использование механизмов по управлению спросом. Это снижает потребность в инвестициях в распределительные сети.

5) Оптимизация периода генерации. Конструкция ветровых и солнечных установок может быть оптимизирована для облегчения их интеграции в сеть. Например, использование больших лопастей на ветряной турбине с той же мощностью уменьшает интеграционные вызовы, поскольку они производят электричество с большей стабильностью. Детальное моделирование в рамках проекта МЭА показало, что такая конструкция производит электричество с более высокой ценностью для системы.

6) Комплексное планирование, мониторинг и контроль. Стоимость разных технологий генерации и производимая ими электроэнергия динамично меняются. Следовательно, оптимальная структура генерации также меняется со временем, что требует регулярной корректировки стратегий.

Задачей современных регуляторов, по мнению МЭА, является создание таких рамочных условий и правил энергетического рынка, которые могли бы учитывать системную ценность проектов и отбирать их с учетом данного критерия. Так, более дорогой (с точки зрения LCOE) проект может быть предпочтительнее, если он обеспечивает высокую ценность для системы.

Getting Wind and Sun onto the Grid

Посмотрим теперь на самую новую, опубликованную в марте 2017 г, работу «Поймать ветер и солнце в сеть» (Getting Wind and Sun onto the Grid). Это руководство (Manual) для сотрудников министерств энергетики и регуляторов энергетических рынков, как отмечает само МЭА.

В этом руководстве основное внимание уделяется задачам и вызовам интеграции ВИЭ. В нем представлены примеры, где и как они встречались и разрешались, и даются ясные рекомендации относительно того, как должны действовать новички в плане развития нестабильной генерации на основе возобновляемых источников.

В документе рассматриваются *четыре стадии* распространения переменчивых ВИЭ, каждая из которых имеет свои специфические характеристики. Для каждой стадии даются соответствующие рекомендации.

1) На первом этапе интеграция переменчивых возобновляемых источников энергии не оказывает заметного влияния на сеть. Нестабильная генерация ветряных и солнечных электростанций «классифицируется» здесь просто как ежедневные и «естественные» изменения спроса на электроэнергию. К странам, которые в настоящее время находятся на этом этапе, относятся Индонезия, Южная Африка, Мексика, где доли солнца и ветра в совокупно не превышают примерно 3% в годовом производстве электроэнергии.

2) На второй стадии ВИЭ уже начинают серьезно влиять на систему, но данное влияние регулируется относительно просто путем усовершенствования некоторых практических методов управления электроэнергетическим/сетевым хозяйством, например, с помощью умного прогнозирования выработки солнечных и ветряных электростанций. На данной

стадии находятся Чили, Китай, Бразилия, Индия, Новая Зеландия, Австралия, Нидерланды, Швеция, Австрия, Бельгию, в которых доля ВИЭ в годовой генерации составляет от 3% до почти 15%.

3) На третьем этапе возникают существенные вызовы для энергосистемы в плане интеграции нестабильных возобновляемых источников энергии. Их влияние ощущается как на уровне системы в целом, так и на практике работы других («традиционных») электростанций. Здесь на первое место выходит **гибкость** энергосистемы – её способность реагировать на неопределенность и изменчивость баланса спроса и предложения. Два главных гибких ресурса этой стадии: управляемые (маневренные) электростанции и сеть, но уже начинает повышаться значение управления спросом (demand response) и новых технологий накопления энергии. На нынешний день на данном этапе находятся Италия, Великобритания, Греция, Испания, Португалия и Германия, где доля «нестабильных» ВИЭ составляет от 15% до 25%.

4) На четвертой стадии находятся Ирландия и Дания с долей переменной ВИЭ генерации в 25%-50% годовой выработки и с её кратковременными повышениями до 100 и более процентов суточного потребления. Здесь вызовы носят, в терминах МЭА, «высокотехнологический» и «менее интуитивный» характер. На четвертой стадии требуется еще большая гибкость системы, её способность к самовосстановлению после резких и объемных колебаний выработки.

Технические требования с указанием соответствующих решений для каждой стадии сведены в следующую таблицу:

Table 3 • Technical requirements for different phases of VRE deployment

	Always	Phase One	Phase Two	Phase Three	Phase Four
Technical requirements	<ul style="list-style-type: none"> - protection systems - power quality - frequency and voltage ranges of operation - visibility and control of large generators - communication systems for larger generators 	<ul style="list-style-type: none"> - output reduction during high frequency events - voltage control - FRT capability for large units 	<ul style="list-style-type: none"> - FRT capability for smaller (distributed) units - communication systems - VRE forecasting tools 	<ul style="list-style-type: none"> - frequency/ active power control - reduced output operation mode for reserve provision 	<ul style="list-style-type: none"> - integration of general frequency and voltage control schemes - synthetic inertia - stand-alone frequency and voltage control

МЭА отмечает, что на четвертой стадии развитие не останавливается. Можно выделить и *пятую и шестую стадии*, которые в работе не рассматриваются, и которым даются только краткие характеристики.

Для рационального распространения ВИЭ (VRE) в среднегодовых объемах, превышающих 50%, для того, чтобы избежать искусственного ограничения выработки (и, соответственно,

ухудшения экономики генерации), требуется электрификация других секторов конечного потребления энергии (теплоснабжение, транспорт).

В условиях тотального доминирования переменчивых ВИЭ (шестая стадия) необходимым становится преобразование электроэнергии в химические вещества (синтетические газы, например, метан и водород).

В работе опять разбираются распространенные **мифы о ВИЭ**, их интеграции в сетевое хозяйство. МЭА делает оговорку, которая, если приложить её к нашим реалиям, выглядит несколько «сатирически». Суть её в том, что новичкам свойственно заблуждаться, поскольку они еще не наработали достаточно опыта, чтобы понять, что заблуждаются.

Всего здесь рассматривается шесть распространенных «претензий» к ВИЭ.

1. Погодой нельзя управлять – выработка солнечных и ветряных электростанций колеблется слишком сильно и непригодна для электроэнергетики.

Это понятные для обывателя соображения, но здесь упускаются два фактора.

Во-первых, спрос на электроэнергию колеблется всегда. Поэтому в энергетических системах уже действуют механизмы, позволяющие справиться с изменчивостью. Когда развитие ветровой и солнечной энергетики только начинается, её колебания «теряются в шуме» колебаний спроса.

Во-вторых, по мере добавления в систему все новых электростанций, работающих на основе ВИЭ, краткосрочные колебания генерации установок, расположенных в разных местах, «компенсируют» друг друга. Это означает, что переменчивость становится менее выражена, и серьезные изменения в выработке, как правило, теперь происходят в масштабах часа, а не секунд.

2. Переменчивость ВИЭ заставляет остальные электростанции пересматривать модели деятельности, что приводит к резкому росту системных расходов.

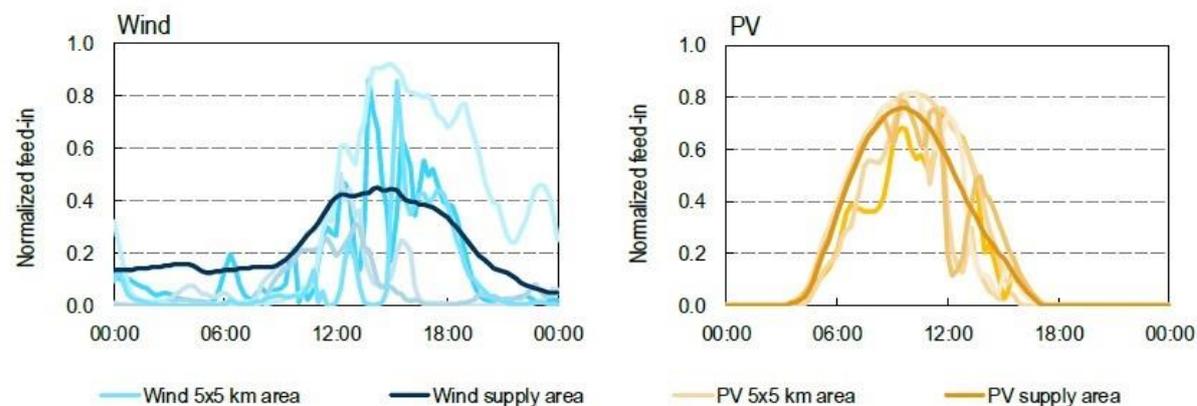
Это обсуждалось ранее. Опыт показывает, что традиционные электростанции технически способны к более «гибкой» работе без существенного увеличения общей стоимости энергосистемы. Использование прогнозов выработки ВИЭ и корректировка графиков выработки в режиме реального времени являются недорогими и эффективными инструментами для смягчения неблагоприятных воздействий. Вопрос – в способности, умении участников энергетического рынка внедрять и применять данные инструменты.

3. Третьим пунктом опять идет любимое многими «экспертами» резервирование 1:1, о котором также уже говорилось.

«Важно напомнить», - говорится в Исследовании, что «энергосистемы не строятся таким образом, чтобы резервировать какую-то конкретную группу электростанций». Важно, чтобы система в целом обеспечивала соответствие спроса и предложения.

При географическом распространении объектов генерации на основе ВИЭ, то есть, если появляется множество объектов в разных местах, «ценность выдаваемой мощности» ВИЭ (*capacity value*) увеличивается. Это означает, что график выработки становится в значительной степени прогнозируемым, как показано на рисунке из данного доклада.

Figure 10 • VRE output and the benefit of geo-spread



4. Высокая стоимость развития сетевого хозяйства, связанная с тем, что лучшие солнечные и ветровые ресурсы расположены далеко от центров потребления электричества.

Это аргумент из прошлого, и обсуждать его нужно индивидуально, применительно к ситуации каждой энергосистемы и отдельного объекта. Нынешние технологии ВИЭ стремительно дешевеют, поэтому их можно использовать экономически рационально в не самых удачных, в плане солнечных или ветровых ресурсов, местах.

5. Для развития ВИЭ необходимы накопители энергии.

Накопители не нужны на начальных стадиях развития ВИЭ и при разветвленном и эффективно управляемом сетевом хозяйстве. Немецкий опыт показывает, что сети с долей переменчивых ВИЭ в потоках электроэнергии на уровне 50% в год могут нормально функционировать без каких-либо дополнительных накопителей. **Накопители – лишь один из инструментов повышения гибкости энергосистемы.** Говорить именно о том, что в системе **необходимы** накопители для её бесперебойной работы можно лишь применительно к энергосистемам с крайне высокой долей ВИЭ, далеко превышающей 50%.

6. Переменчивые ВИЭ дестабилизируют энергосистему.

Энергетические системы входят в число самых сложных машин, когда-либо созданных человеком. Работа системных операторов в обеспечении устойчивости системы в некотором роде сходна с ездой на велосипеде: нужно непрерывно подруливать, чтобы поддерживать равновесие.

Каждый знает, что труднее сохранять равновесие при медленном движении. Вращение колес на высокой скорости обеспечивает инерцию, стабилизируя велосипед по законам физики. Аналогичный процесс происходит в энергосистемах: работа больших генераторов и турбин на электростанциях обеспечивает инерцию в системе и удерживает её в

равновесии. А вот солнечные и ветряные электростанции работают по-другому, и инерции не обеспечивают. Это является основанием данной шестой претензии.

На начальных стадиях развития ВИЭ эта проблема не возникает. Если же доля традиционных электростанций в системе снижается, снижается также и инерция энергосистемы, поэтому для обеспечения её стабильности требуются дополнительные решения. В условиях высокой доли ВИЭ могут применяться технологически продвинутые решения, направленные на извлечение синтетической инерции ветровых турбин или включающие в себя использование маховиков.

Кроме того, современные солнечные и ветряные электростанции настолько технически совершенны, что способны предоставлять (вспомогательные) [системные услуги для стабилизации сетевого хозяйства](#). В то же время для «шлифовки», а также законодательного принятия этих технологических решений потребуется время.

Заключение

Доля ВИЭ в мировой энергетике растет, и это создает определенные вызовы для управления отраслью, поскольку генерация на основе солнца и ветра имеет «прерывистый» и непредсказуемый характер.

В то же время вопросы интеграции в энергетическую систему нестабильных возобновляемых источников энергии глубоко изучены и основательно проработаны. Накоплен и описан богатый практический опыт использования ВИЭ в разных государствах. Общие принципы обращения с ними составлены и подробно сформулированы.

Поэтому при обсуждении перспектив и вопросов планирования развития энергетики желательно обращаться к этому опыту, который, в том числе, обобщен и в рассмотренных документах Международного энергетического агентства.