



Школа молодых ученых – 2025
«Системные исследования
энергетических технологий»

**Координирующая система автоматического
управления разнородными электростанциями
на основе ВИЭ в территориальной
энергосистеме**

Илюшин Павел Владимирович
д.т.н., главный научный сотрудник, руководитель Центра интеллектуальных
электроэнергетических систем и распределенной энергетики ИНЭИ РАН

г. Москва, 25-26 ноября 2025 г.

Существующее положение и перспективные планы по строительству объектов ВИЭ в мире

2

Суммарная мощность объектов ВИЭ в 2024 г. достигла **4 448 ГВт (46,4%** от суммарной установленной мощности мировой электроэнергетики)

По данным МЭА отмечается, что суммарная мощность объектов ВИЭ к **2030 г.** должна составить **11 000 ГВт**, а к 2050 – **31 000 ГВт**

В 2024 г. введено **117 ГВт** на ВЭС (**80 ГВт** – Китай), при этом суммарная установленная мощность ВЭС в мире составила **1 136 ГВт**, а в перспективе к 2050 г. суммарная мощность ВЭС достигнет **8 000 ГВт**

В 2024 г. введено **597 ГВт** на СЭС (**277 ГВт** – Китай), при этом суммарная установленная мощность СЭС в мире составила **1 824 ГВт**, а в перспективе к 2050 г. суммарная мощность СЭС достигнет **23 000 ГВт**

Около **3000 ГВт** мощностей полностью построенных объектов ВИЭ в мире ожидают подключения к электрическим сетям, из которых в Европе почти **1000 ГВт на СЭС** и **500 ГВт на ВЭС**

По данным МЭА при отсутствии решений по новому строительству и реконструкции электросетевой инфраструктуры к 2030 г. в мире не будет работать до **15% ВЭС и СЭС** из **11 000 ГВт** установленной мощности

При массовом вводе объектов ВИЭ возникают проблемы с перегрузками электросетевой инфраструктуры, надежностью электроснабжения потребителей, нарушениями статической и динамической устойчивости, что приводит к **отказам в подключении новых объектов ВИЭ** электросетевыми компаниями (операторами сети)

Существующее положение и перспективные планы по строительству объектов ВИЭ в России

3

- По состоянию на 01 марта 2025 г. в России суммарная установленная мощность объектов ВИЭ составила **6,59 ГВт** или около **2,5%** от суммарной установленной мощности электростанций в ЕЭС России
- В структуре генерирующих мощностей суммарная мощность ветровых электростанций составляет **2,57 ГВт**, солнечных электростанций **2,082 ГВт** и малых гидроэлектростанций (мощность до 50 МВт) – **1,3 ГВт**
- К энергосистемам с относительно высокой долей объектов ВИЭ относятся **ОЭС Юга**, ОЭС Северо-Запада, ОЭС Урала, ОЭС Сибири
- По данным Ассоциации развития возобновляемой энергетики в 2025 г. планируется ввод **2,17 ГВт** мощностей на объектах ВИЭ: **1,4 ГВт** на ВЭС, **645 МВт** на СЭС, **128 МВт** на малых ГЭС (сдвиг вправо)
- В июне 2025 г. опубликованы результаты конкурсного отбора инвестиционных проектов объектов ВИЭ на 2026-2031 гг. (ДПМ ВИЭ): **ВЭС – 249,8 МВт; СЭС – 64,4 МВт; малых ГЭС – 5,05 МВт**
- В августе 2025 г. для энергосистем Дальнего Востока дополнительно отобрано проектов по программе ДПМ ВИЭ на **1,56 ГВт**, из которых на **ВЭС – 520 МВт** и на **СЭС – 1044 МВт**
- Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики до 2042 г. предусмотрен ввод **17,2 ГВт** новых мощностей на ВЭС и СЭС (их доля в ЕЭС России возрастет до **5,8%** в **2036 г.** и до **7,3%** в **2042 г.**)

Основные особенности объектов ВИЭ

4

1

Стохастический характер и непостоянство выдачи мощности в зависимости от поступления первичных энергоресурсов (инсоляция, ветровой поток), зависящих от географических, климатических, метеорологических условий и времени суток

2

Малая удельная плотность поступающих первичных энергоресурсов, требующая для получения требуемых величин мощности больших территорий под строительство объектов ВИЭ

3

Низкий КПД преобразования возобновляемых энергоресурсов в электрическую и тепловую энергию (КПД ВЭУ составляет не более 40-45%, КПД ФЭМ – не более 14-25%, ТЭС на биомассе – 30-40%)

4

Высокие коэффициенты готовности при малом среднем времени между вынужденными отключениями по любой внутренней (отказ, вывод во внеплановый ремонт, отключение технологическими защитами и др.) или внешней (КЗ в прилегающей сети) причине

5

Высокие удельные капитальные затраты для обеспечения гарантированной мощности (система прогнозирования выдачи мощности, СНЭЭ), относительно большой срок окупаемости и затраты на утилизацию отдельных элементов

Стохастический характер и непостоянство выдачи мощности ВЭС и СЭС

5

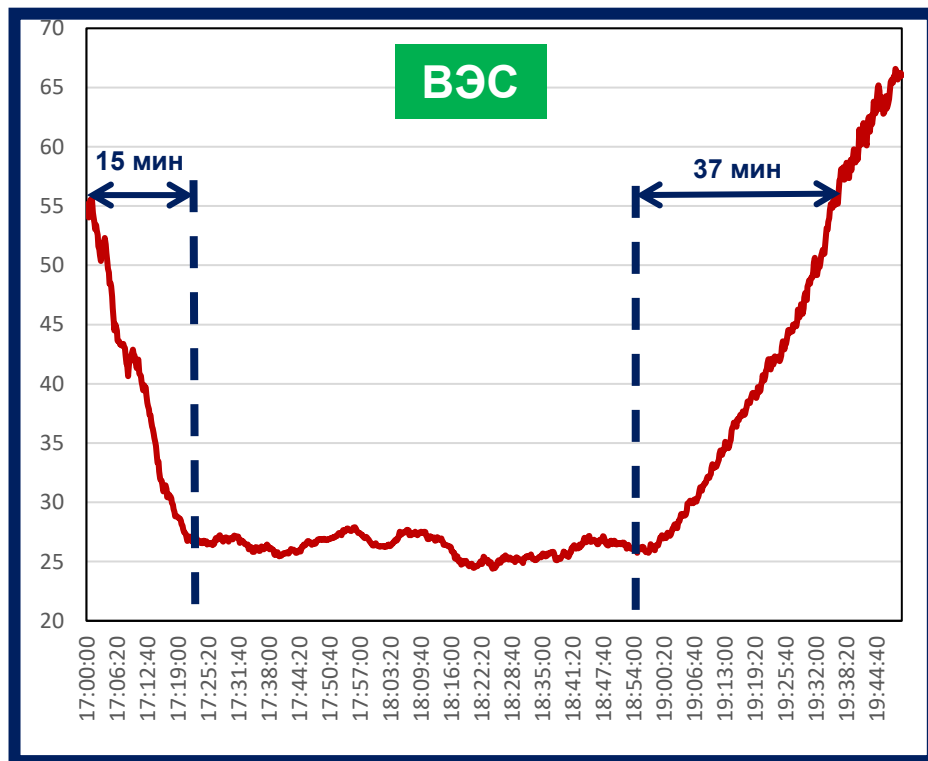


Рис. 1. Изменение выдаваемой мощности ВЭС может составлять до 50% за 15 мин.

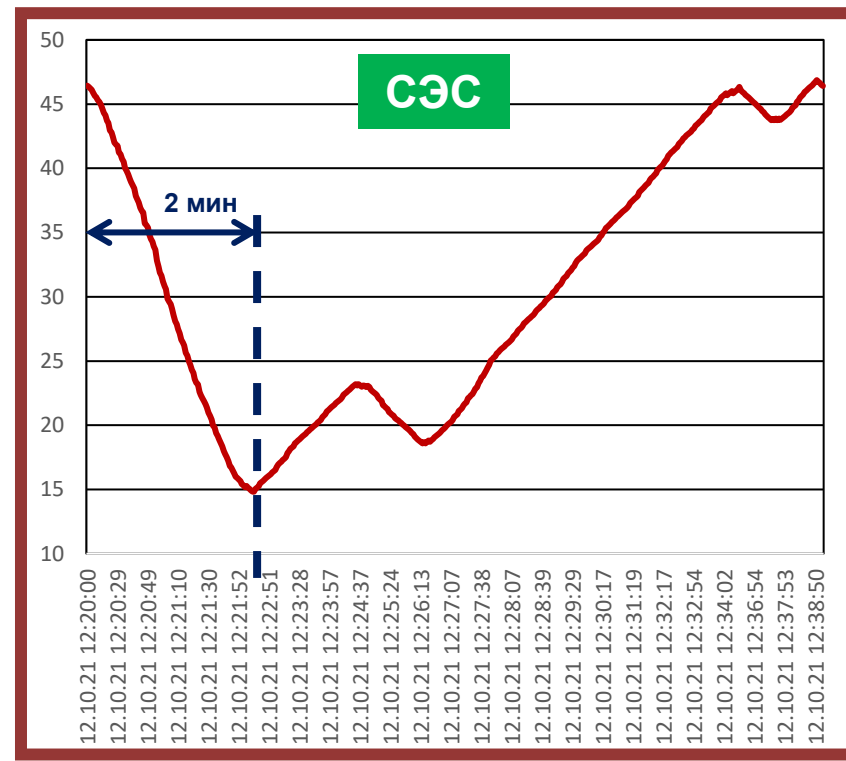


Рис. 2. Изменение выдаваемой мощности СЭС может составлять до 90% за 2 мин.

! Нагрузка по сглаживанию неравномерности величины выдаваемой мощности объектами ВИЭ на коротких временных интервалах полностью ложится на традиционные электростанции (ГЭС, ГАЭС, ТЭЦ) при отсутствии достаточной мощности СНЭЭ в энергосистемах

Технические мероприятия в территориальных энергосистемах при внедрении объектов ВИЭ

6

1

Ввод нового генерирующего оборудования (пиковые газотурбинные установки) или модернизация существующего на традиционных электростанциях для резервирования мощности объектов ВИЭ и обеспечения гибкости энергосистем

2

Проведение реконструкции электросетевых объектов (линий электропередачи, подстанций) с целью увеличения пропускной способности, а также установки СНЭЭ

3

Проведение реконструкции устройств релейной защиты электросетевых объектов (линий электропередачи, подстанций) для обеспечения селективности и повышения быстродействия

4

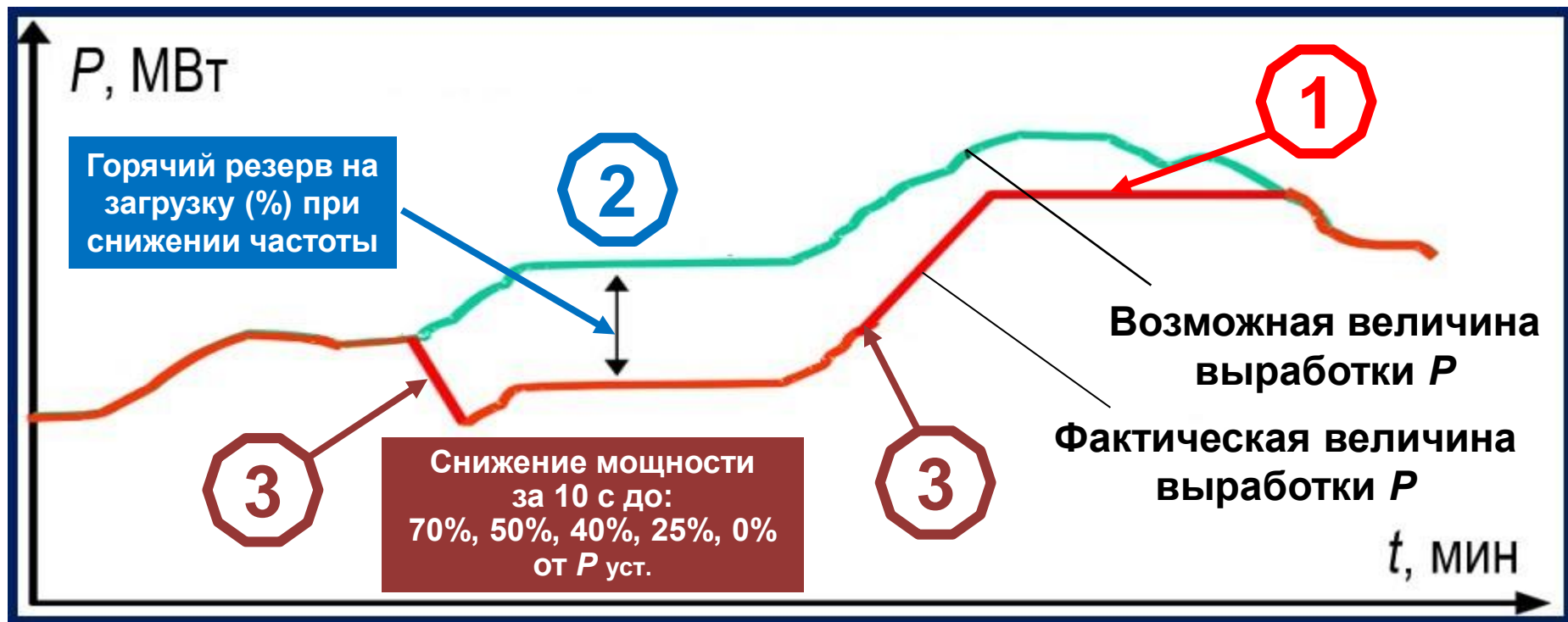
Реализация индивидуальных и групповых технических решений на ВЭС и СЭС для предотвращения их излишних отключений при нормативных возмущениях в прилегающей сети (корректировка характеристики LVRT)

5

Установка дополнительных фильтро-компенсирующих устройств на ВЭС и СЭС для предотвращения возможности возникновения резонанса напряжений на высших гармонических составляющих с повреждением электротехнического оборудования

Международный опыт создания резервов мощности на ВЭС (СЭС) и минимизации требований к маневренности резервирующих мощностей

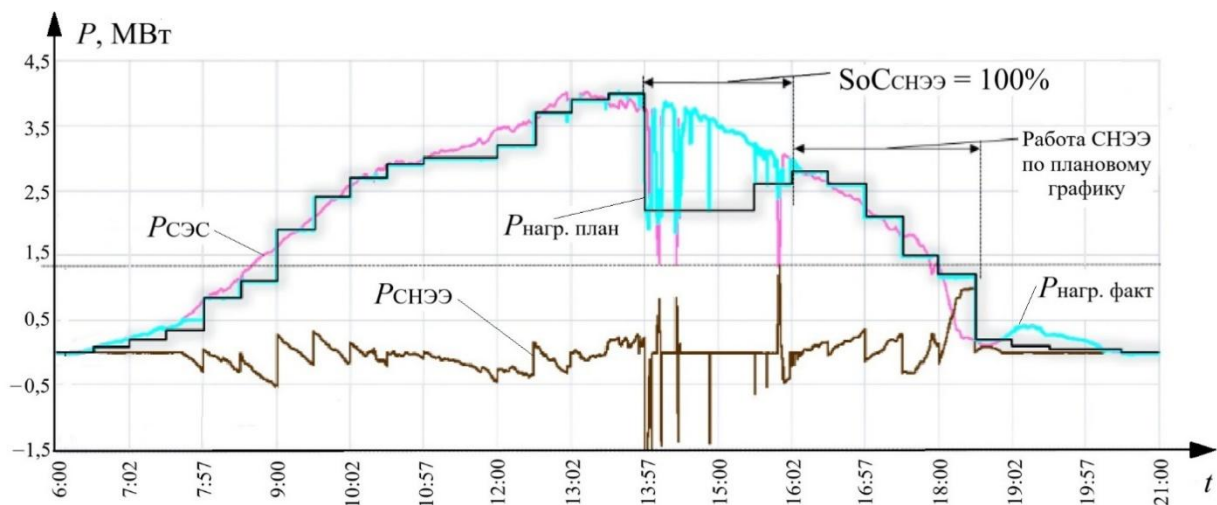
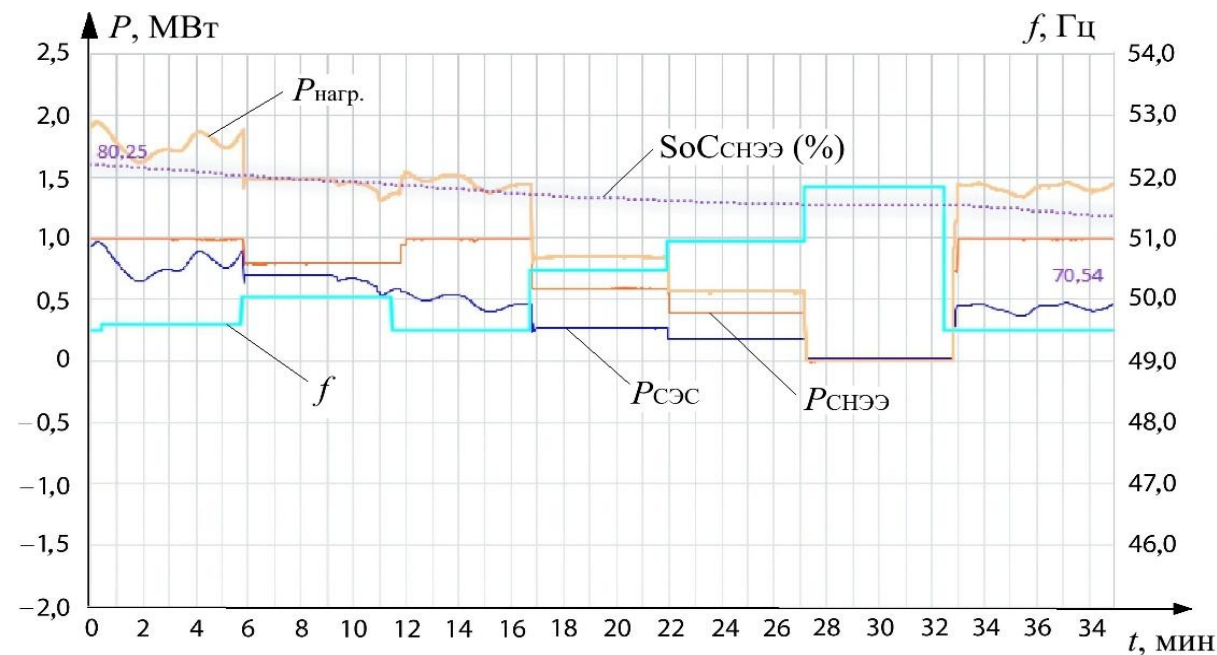
7



1. Абсолютное ограничение мощности – фиксация отпускаемой с шин станции мощности на заданном значении (для СЭС и ВЭС от 1,5 МВт)
2. Относительное ограничение мощности (гарантированный резерв) – ограничение отпускаемой с шин активной мощности, с постоянно заданным значением, относительно максимально возможной (СЭС от 1,5 МВт, ВЭС от 25 МВт)
3. Ограничение скорости изменения активной мощности при изменении инсоляции / ветрового потока (СЭС и ВЭС от 1,5 МВт)

Эффекты от внедрения СНЭЭ на СЭС (ВЭС)

8



Бурзянская СЭС выдает мощность на шины 10 кВ тупиковой ПС Бурзян 110/10 кВ и должна обеспечивать автономное электроснабжение потребителей при отключении питающей ЛЭП 110 кВ до 6 часов

Результаты натурных испытания СЭС с СНЭЭ:

- нивелирование колебаний активной мощности при резких изменениях инсоляции;
- участие в ОПРЧ при снижении частоты в энергосистеме;
- обеспечение надежного электроснабжения потребителей в автономном режиме

Подходы к увеличению доли ВЭС и СЭС в территориальных энергосистемах

9

- В территориальных энергосистемах требуется **определять суммарные предельно допустимые мощности объектов ВИЭ** с учетом ограничений
- Рост доли ВЭС и СЭС возможен за счет повышения маневренности генерирующего оборудования традиционных ТЭС, увеличения пропускной способности межсистемных ЛЭП, внедрения СНЭЭ, а также систем краткосрочного и оперативного прогнозирования на ВЭС и СЭС
- В России выбор площадок для объектов ВИЭ следует производить с учетом **фактических возможностей электрических сетей по их технологическому присоединению** при минимальных объемах реконструкции и нового строительства электросетевых объектов
- Объекты ВИЭ часто рассматриваются в виде однородной группы со стохастическим характером выдачи мощности, однако они **используют различные природные явления и разные технологии для выработки электроэнергии, что влияет на графики выдачи мощности**
- В территориальных энергосистемах имеются возможности для ввода объектов **ВИЭ с гарантированной мощностью**, например, малых ГЭС, биотопливных ТЭС (БиоТЭС) и мусоросжигающих ТЭС

Скоординированное управление суммарной мощностью всех объектов ВИЭ, в том числе имеющих гарантированную мощность, и СНЭЭ за счет внедрения координирующей САУ позволяет получить значимые эффекты

Особенности объектов ВИЭ с гарантированной мощностью

10

Малые ГЭС – сооружаются на небольших реках, озерных водосбросах, ручьях, водосбросах различных предприятий (очистных сооружений и др.) и зависят от постоянного течения воды

Экономический потенциал малых ГЭС в России оценивается $\approx 7-12$ ГВт, однако в настоящее время используется лишь на **2-3%**

БиоТЭС – принцип работы схож с традиционными ТЭС, но в качестве топлива используется растительная биомасса отходов сельского хозяйства и лесной промышленности, торф, а также органические отходы жизнедеятельности животных и людей в виде биогаза

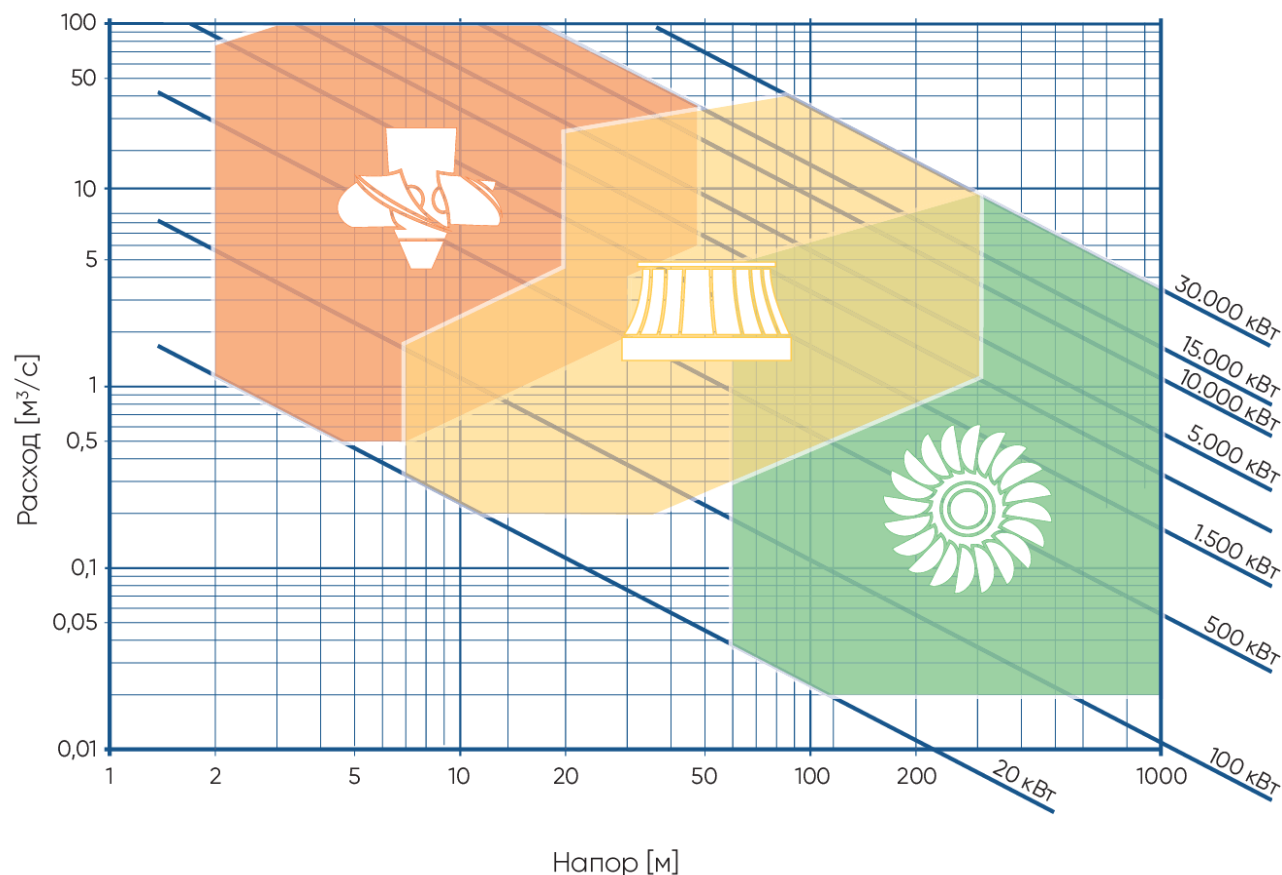
Экономический потенциал БиоТЭС в России оценивается $\approx 13-15$ ГВт, что обусловлено объемом отходов сельского хозяйства и лесной промышленности (ЦФО, ЮФО, ПФО – сельское хозяйство; СЗФО, СФО – лесозаготовительные и деревообрабатывающие предприятия)

Мусоросжигающие ТЭС – располагаются вместе с заводами по переработке ТБО в черте городов или непосредственной близости от них и используют в качестве топлива используются ТБО, дальнейшая переработка и использование которых невозможны

Экономический потенциал мусоросжигающих ТЭС в России оценивается $\approx 2-5$ ГВт, который только начинает использоваться

Оборудование для малых ГЭС (напоры от 3 до 450 м, мощность от 5 кВт до 10 МВт)

11



В России разработаны и изготавливаются пропеллерные гидротурбины (турбины Каплана), радиально-осевые (турбина Френсиса) и ковшовые (турбины Пелтона) широкой номенклатуры

Пример восстановления малой ГЭС (Лыковская ГЭС, Орловская область)

12

Восстановление малых ГЭС, построенных в 1950-1960 гг. позволило бы решить проблему «засорения» малых рек России не использующимися гидросооружениями, которые находятся в удовлетворительном состоянии и не требуют больших затрат на реконструкцию



- Лыковская ГЭС мощностью 760 кВт была построена в 1953 г. в деревне Большое Лыково Мценского района
- В ноябре 2015 г. была завершена реконструкция (объем инвестиций составил 200 млн. руб.) с использованием поворотно-лопастных гидротурбин (напор 6,3 м) для увеличения мощности ГЭС до 1,3 МВт



Примеры строительства мини-ГЭС на водосбросах очистных сооружений

13

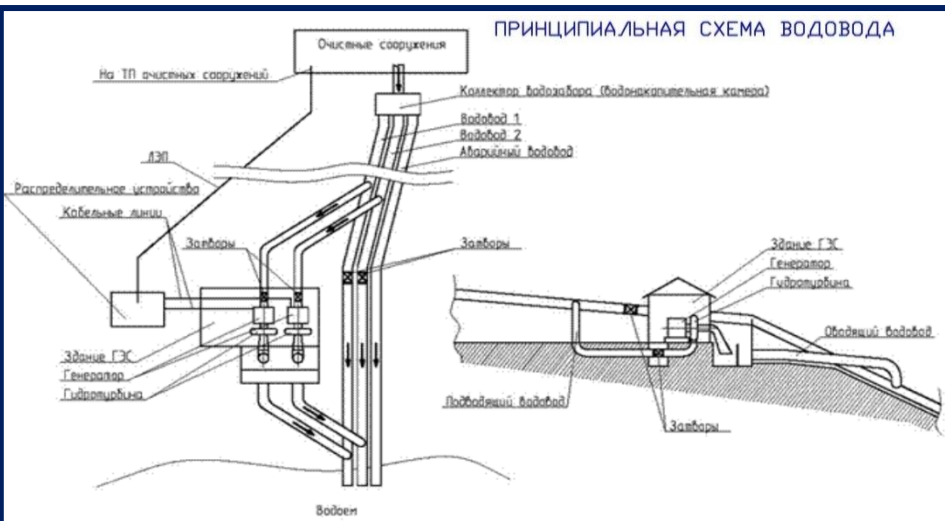
Мини-ГЭС в г. Томск



- объем сброса составляет от 3500 до 11000 м³/час;
- диаметр водовода - 1420 мм;
- расстояние 30 км;
- h - 96 м;
- мощность мини-ГЭС составляет 1000 кВт



Мини-ГЭС в г. Ульяновск



Показатель	Правобережная мини-ГЭС	Левобережная мини-ГЭС
Установленная мощность	1200 кВт (2x600 кВт)	500 кВт (2x250 кВт)
Годовая выработка электроэнергии (зависящая от объема стоков)	более 5,3 млн кВт*ч	Более 2 млн кВт*ч

Преимущества применения вентильных индукторных генераторов

14

Агрегат с переменной частотой вращения

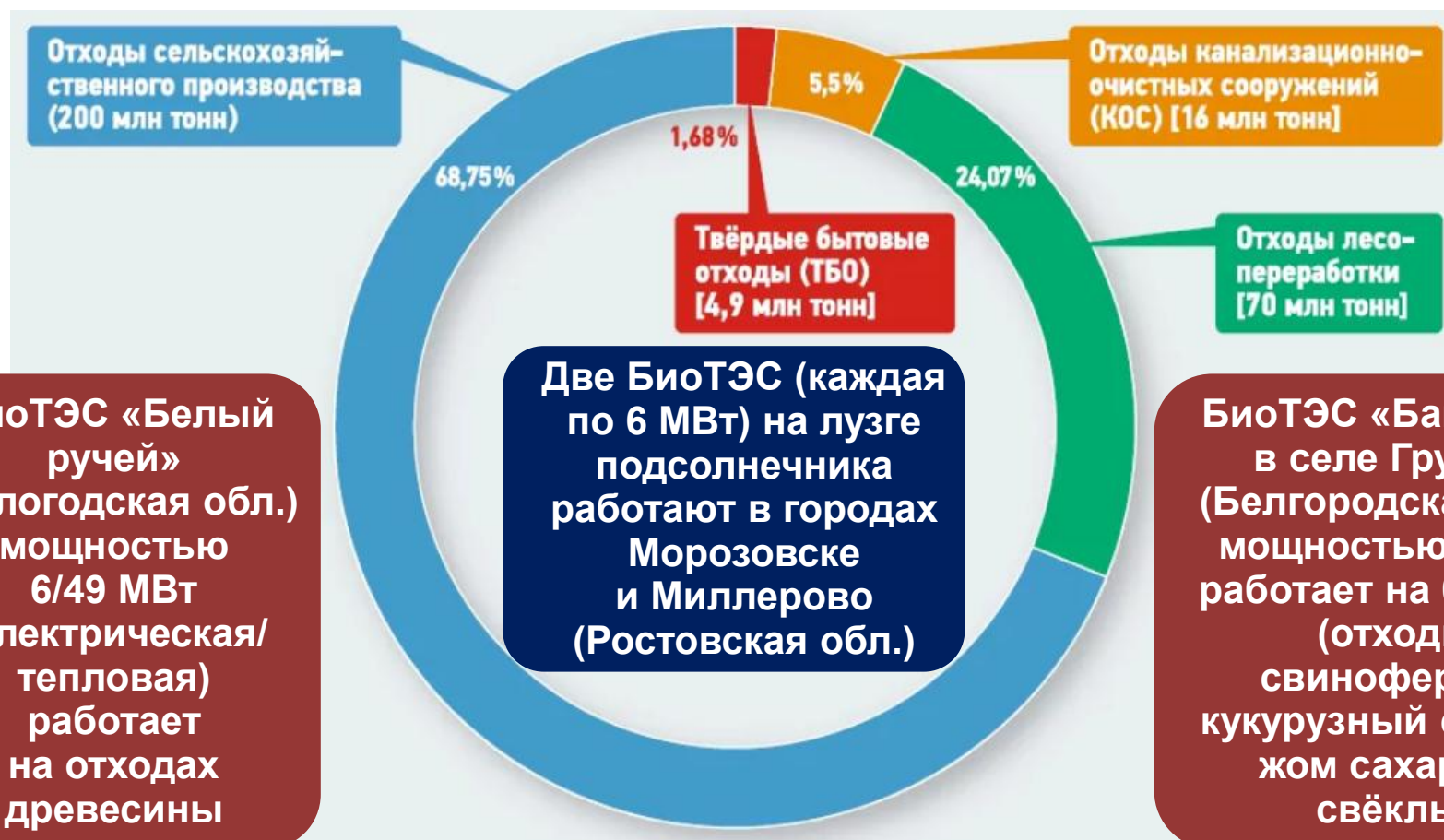


Применение ВИГ позволяет упростить конструкции гидроагрегатов и САУ, интегрировать в шину постоянного тока разнородных ВИЭ, топливных элементов и СНЭЭ, а также повысить эффективность малых ГЭС

Источники биотоплива для БиоТЭС в России

15

Ежегодные объемы органических отходов: сельское хозяйство – **200 млн тонн**, в т.ч. растениеводство – **126 млн тонн**, животноводство и птицеводство – **66,5 млн тонн**; лесопереработка – **70 млн тонн**; осадки городских канализационных очистных сооружений – **16 млн тонн**



Технологические особенности БиоТЭС

16

- **Управлять мощностью БиоТЭС в режиме online возможно за счет изменения подачи биотоплива (особое преимущество у биогаза)**
- **Основное отличие БиоТЭС от традиционных ТЭС заключается в характеристиках биотоплива и особенностях его подготовки**
- **Маневренность БиоТЭС существенно зависит от вида используемого топлива и конструкции генерирующего оборудования (требуемые показатели маневренности имеют газовые БиоТЭС на базе ГПУ и ГТУ)**



Утилизация твердых бытовых отходов (ТБО)

17

Группа компаний «РТ-Инвест» (ГК «Ростех»)

Сжигание 1 тонны ТБО замещает ≈ 450 кг ископаемого топлива, что позволяет выработать 1300–1700 кВт·ч тепловой или 300–550 кВт·ч электроэнергии при объеме остаточных продуктов около 10%

Рис. 1. Мусоросжигательная ТЭС в деревне Свистьягино (Московская область), рассчитана на переработку 700 тыс. тонн/год

Слоевое сжигание – отходы располагаются на колосниковой решетке, на которую подаются горячие воздушные потоки (температура $850\text{--}1500^\circ\text{C}$ варьируется в зависимости от химического состава мусора)

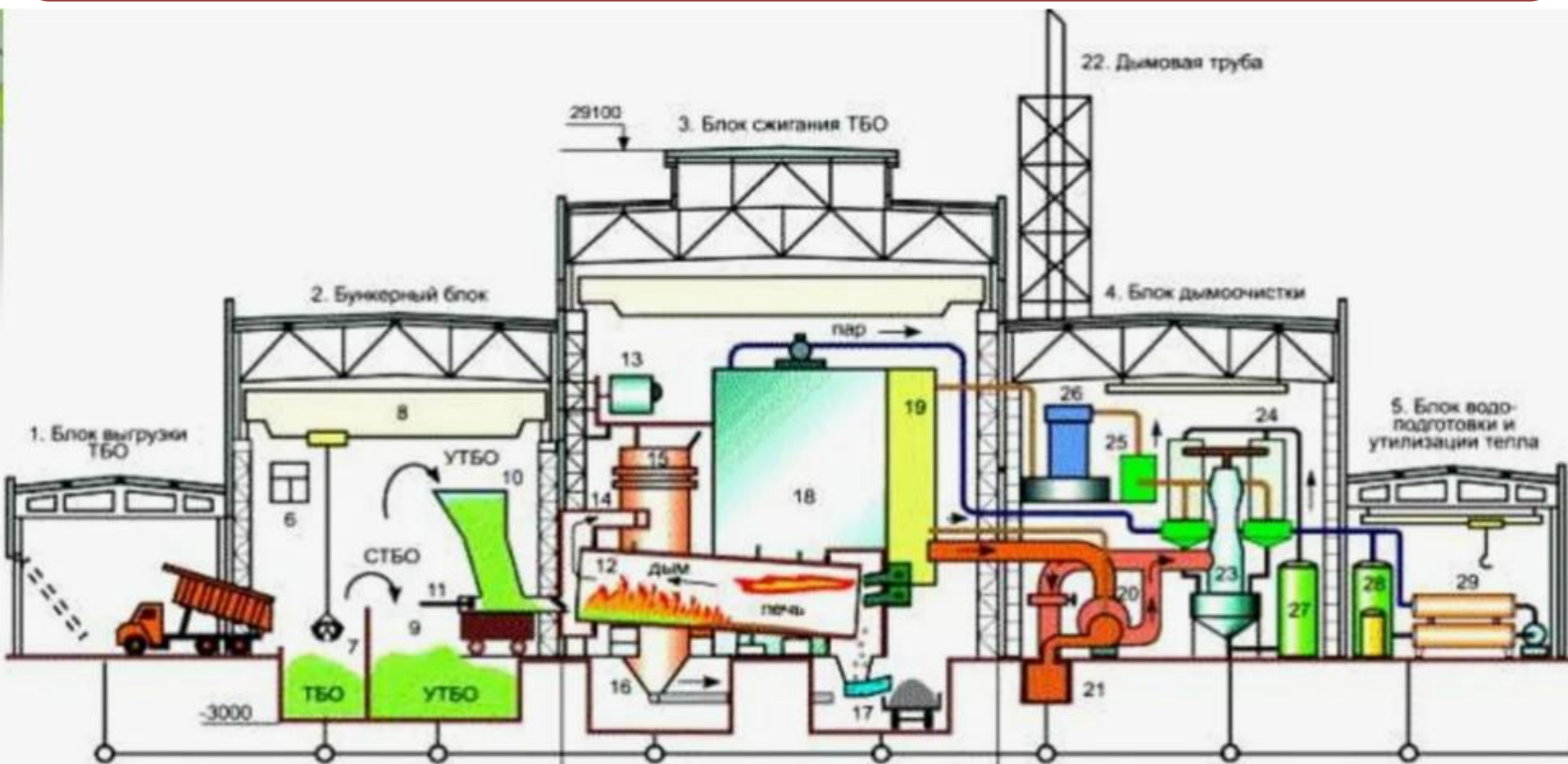
Технология кипящего слоя – отходы предварительно разделяют на гомогенные фракции, а затем сжигают в камерах путем подачи горячего воздуха через предварительно загруженный слой песка, доломитовой крошки или др. абсорбента (сокращение выбросы токсичных веществ)

Пиролиз – отходы разлагаются под давлением в бескислородной среде во вращающейся печи (образующиеся жидкости и газы с высокой удельной теплотой сгорания используются в качестве топлива)

Пример технологического цикла мусоросжигающей ТЭС

18

ТБО сжигают в котлах при температуре свыше 1200°C для нейтрализации токсичные диоксиновые соединений, при этом дымовые газы поступают в энергетические котлы и затем на паровую турбину для производства электроэнергии или водогрейные котлы для выработки тепловой энергии)



Исходные данные для моделирования

19

- Доля **традиционных ТЭС** с паротурбинными установками в территориальной энергосистеме составляет 70% (**700 МВт**)
- Суммарная установленная мощность группы **ВЭС – 200 МВт**, группы **СЭС – 100 МВт**, т.е. 30% (**300 МВт**)
- Территориальная энергосистема имеет связь со смежными энергосистемами через две ЛЭП напряжением 110 кВ с суммарным максимальным допустимым перетоком мощности **165 МВт**
- В большинстве случаев наблюдается разнонаправленность графиков мощности ВЭС и СЭС: периоды выдачи бóльшей мощности СЭС сопровождаются снижением мощности ВЭС и наоборот
- В отдельные интервалы времени возможно синхронное поведение ВЭС и СЭС в виде одновременных максимумов или минимумов мощности (использованы реальные графики выдачи мощности)
- Во всех временных интервалах мощность ВЭС и СЭС принималась максимально возможной, исходя из поступления первичных энергоресурсов, с ее выдачей в сеть без ограничений
- **Малые ГЭС, БиоТЭС и мусоросжигающая ТЭС** в часы минимальных нагрузок выдают мощность на уровне технологических минимумов, а в часы **максимальных нагрузок**, если суммарной мощности традиционных ТЭС, ВЭС и СЭС недостаточно для покрытия графика нагрузки, **бóльшую мощность выдают объекты ВИЭ с гарантированной мощностью**

Графики выдачи мощности (нагрузки) в исходном режиме

20

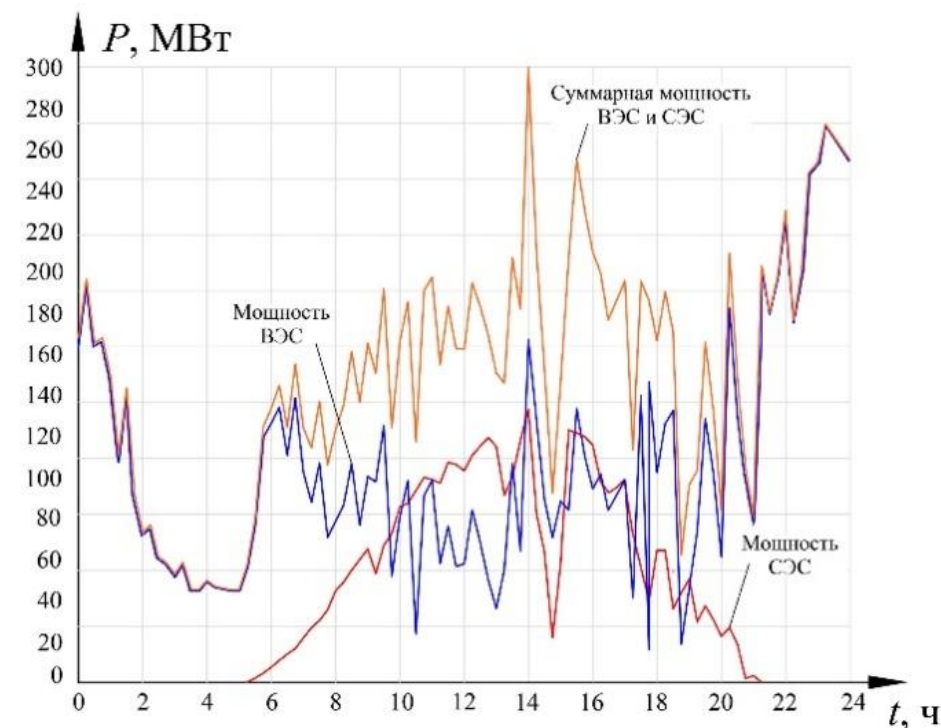


Рис. 1. Суточные графики выдачи мощности ВЭС и СЭС (на 10 мин. временных интервалах)

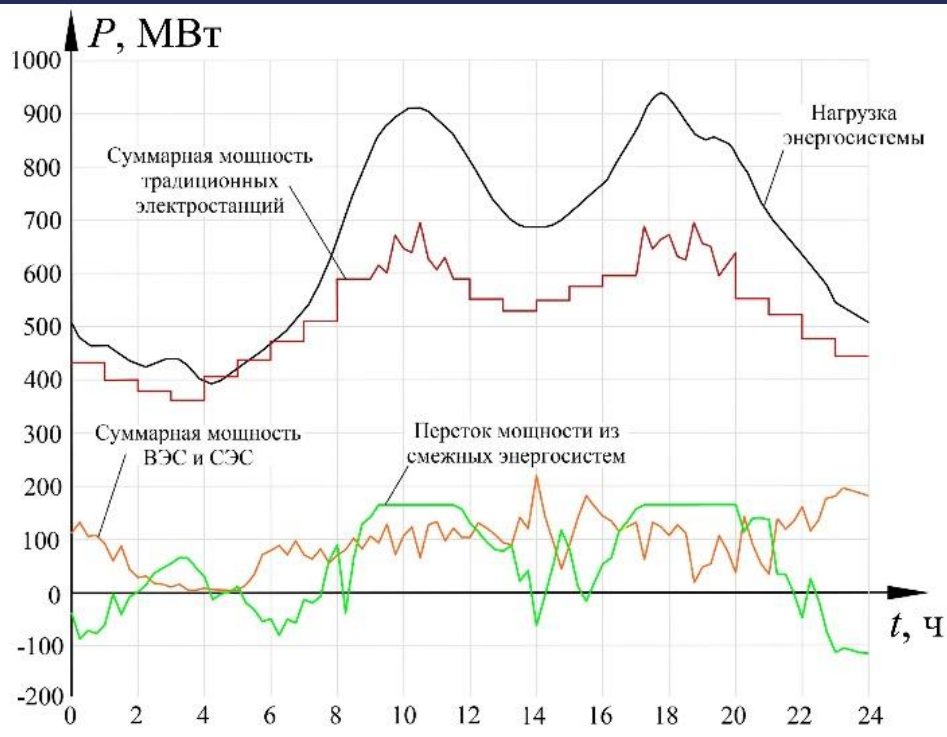


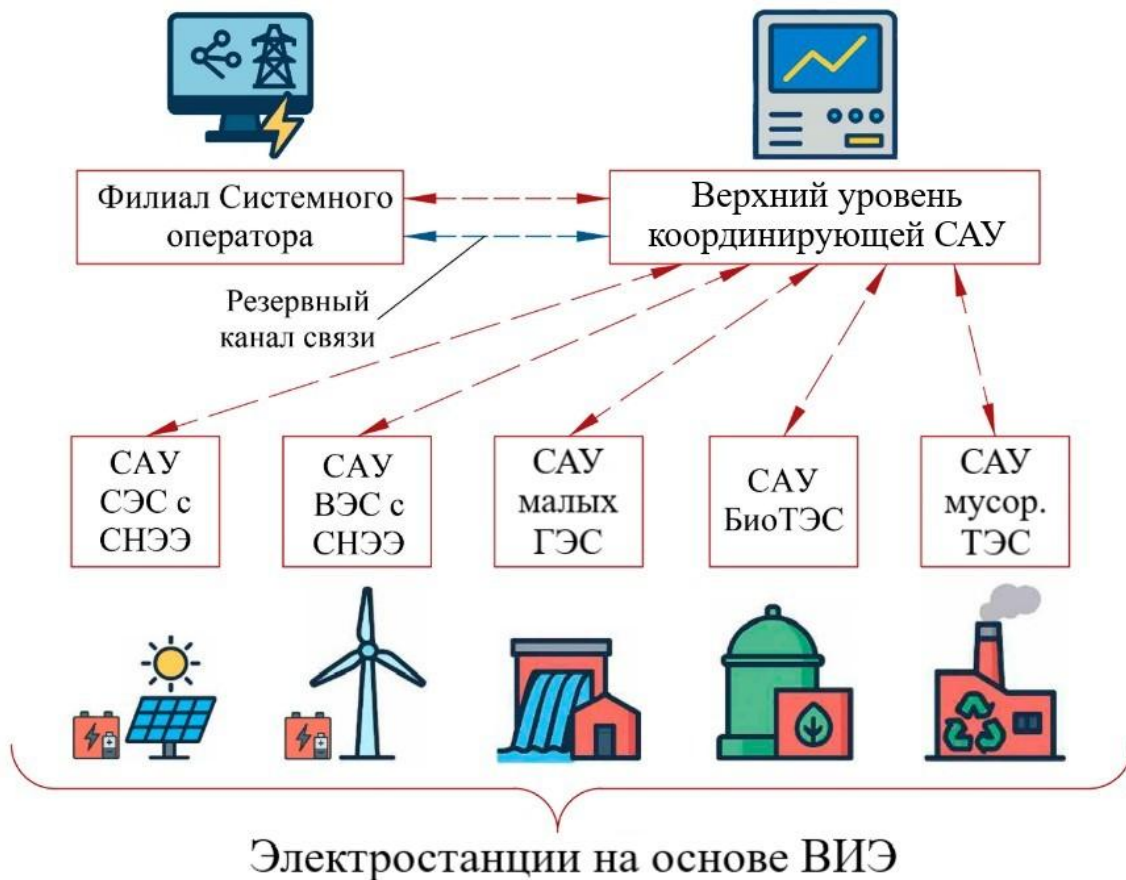
Рис. 2. Суточные графики выдачи мощности традиционных ТЭС, нагрузки и перетока из смежных энергосистем

- Суммарный график мощности ВЭС и СЭС более сглаженный, но содержит **много резких флуктуаций мощности с большой амплитудой**
- В периоды с 09:00 до 11:00 и с 17:00 до 19:30, когда переток мощности из смежных энергосистем максимально допустимый, **традиционные ТЭС вынужденно работают в нестационарных режимах**



Структурная схема координирующей САУ объектов ВИЭ в территориальной энергосистеме

21



Координация обеспечивается за счет взаимодействия АСУТП объектов ВИЭ с верхним уровнем, задающим стратегию управления. Основная цель управления сводится к уменьшению амплитуды колебаний суммарно выдаваемой мощности объектов ВИЭ, а также минимизации отклонений от планового диспетчерского графика на сутки вперед

- Периодичность корректировки заданий по мощности определяется исходя из числа, мощности и технологических особенностей объектов ВИЭ и находится в диапазоне 1-5 минут
- Координирующая САУ в расчетах учитывает внешние сигналы – задания СО ЕЭС, аварийные ситуации, рыночные сигналы и др.

Совместное функционирование объектов ВИЭ в территориальной энергосистеме

22

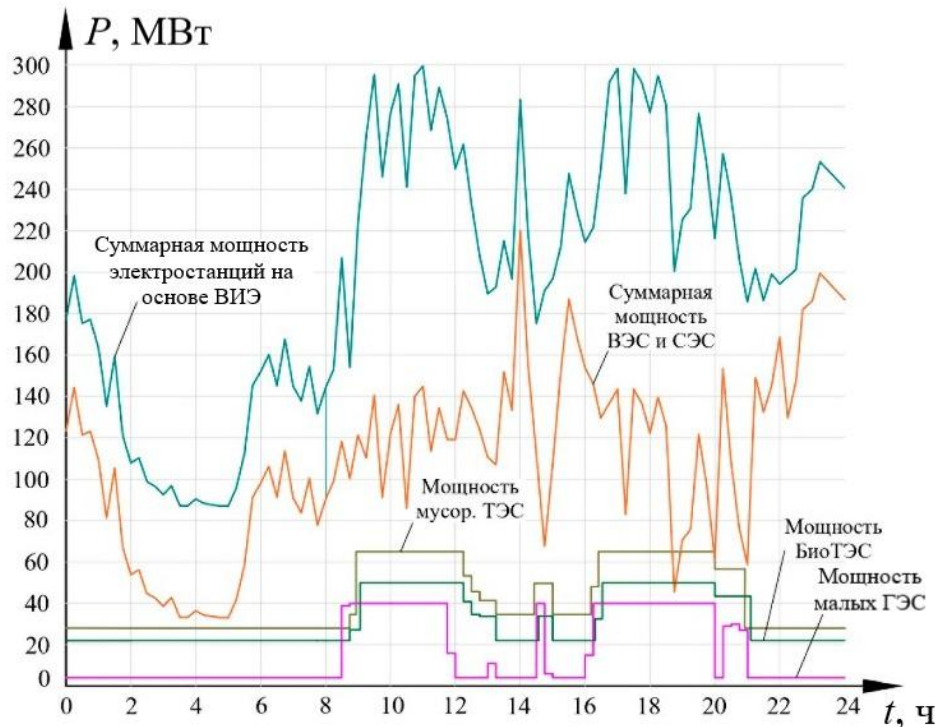


Рис. 1. Графики мощности территориальной энергосистемы для рабочего дня без внедрения координирующей САУ

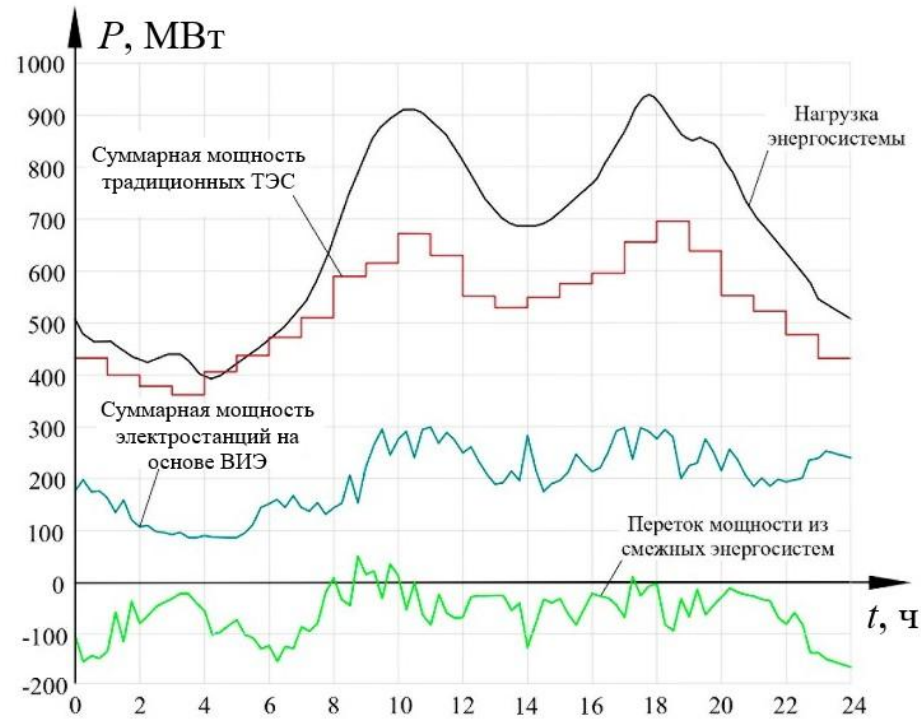


Рис. 2. Графики мощности территориальной энергосистемы при внедрении координирующей САУ

- Первыми в покрытии растущего дефицита мощности участвуют малые ГЭС, имеющие лучшие маневренные характеристики, в это же время осуществляется дозагрузка ГПУ БиоТЭС и ГТУ мусоросжигающей ТЭС, а также подготовительные и пусковые операции на находящихся в резерве агрегатах

Эффекты от внедрения СНЭЭ на ВЭС и СЭС

23

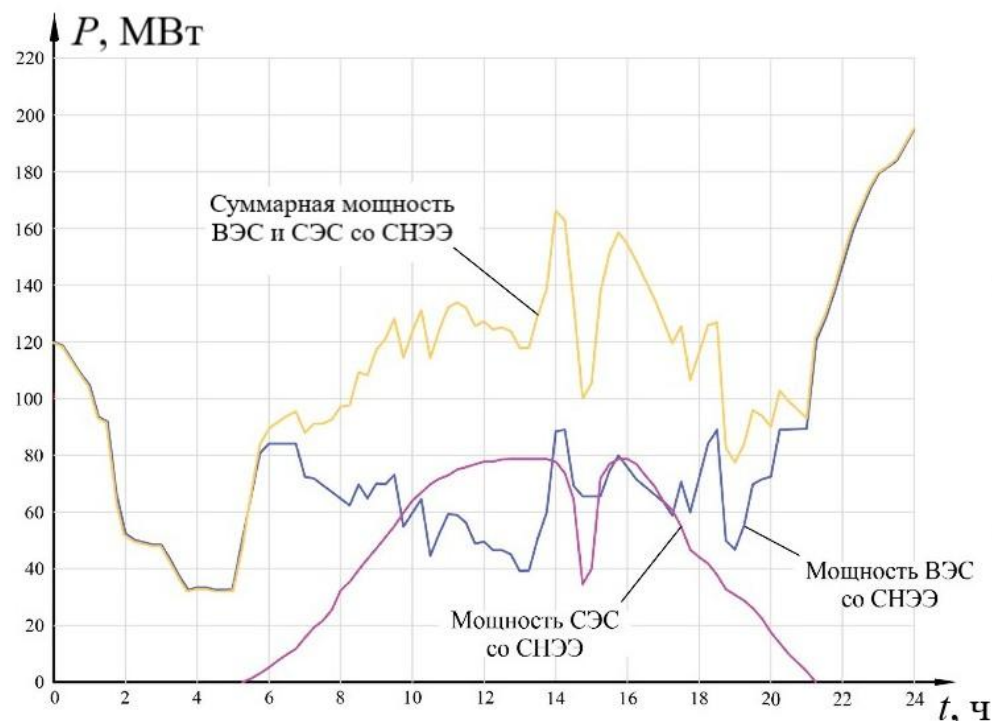


Рис. 1. Суточные графики мощности ВЭС и СЭС со СНЭЭ (сглаживание профилей мощности)

Мощность и энергоемкость СНЭЭ в составе ВЭС и СЭС оптимизирована за счет исключения резервирования всей мощности ВЭС и СЭС

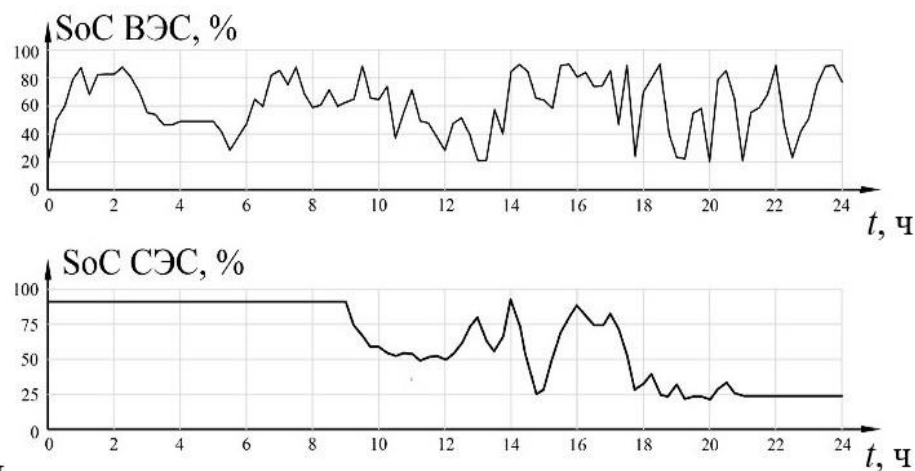


Рис. 2. Суточные графики уровня заряда СНЭЭ на ВЭС и СЭС (на ВЭС 7–8 полных циклов заряда/разряда за сутки)

- Мощность СНЭЭ выбрана из расчета 75% установленной мощности ВЭС и СЭС, т.е. (150 и 75 МВт), а энергоемкость – на 30 минут работы
- СНЭЭ обеспечивает кратковременную компенсацию мощности на этапе **дозагрузки работающего и запуска резервного генерирующего оборудования на объектах ВИЭ с гарантированной мощностью**



Комплексные эффекты для территориальной энергосистемы

24

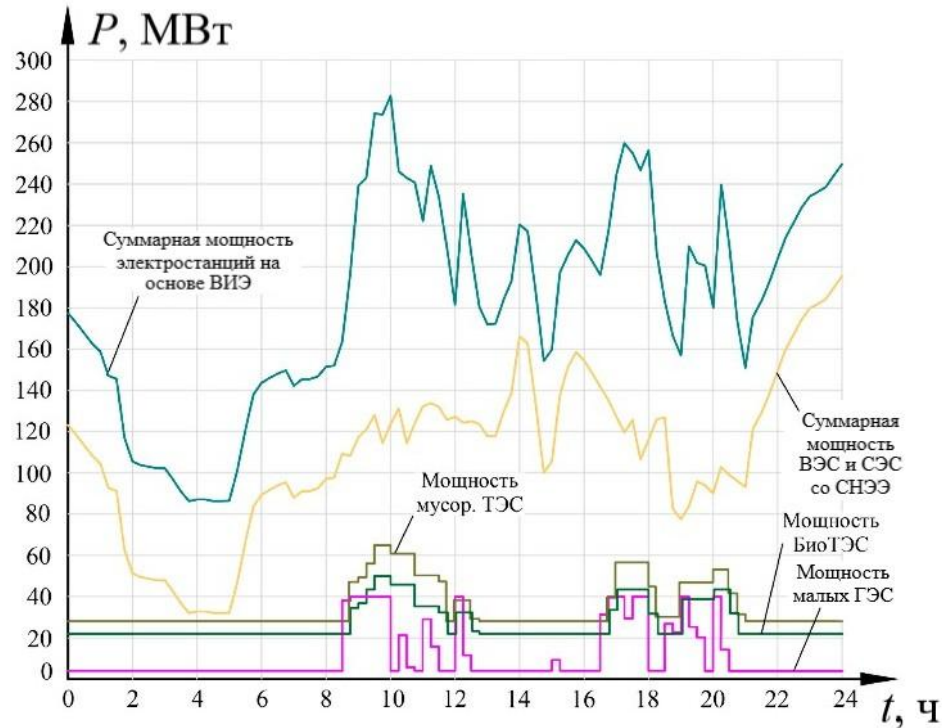


Рис. 1. Суточные графики выдачи мощности объектов ВИЭ при наличии СНЭЭ и координирующей САУ

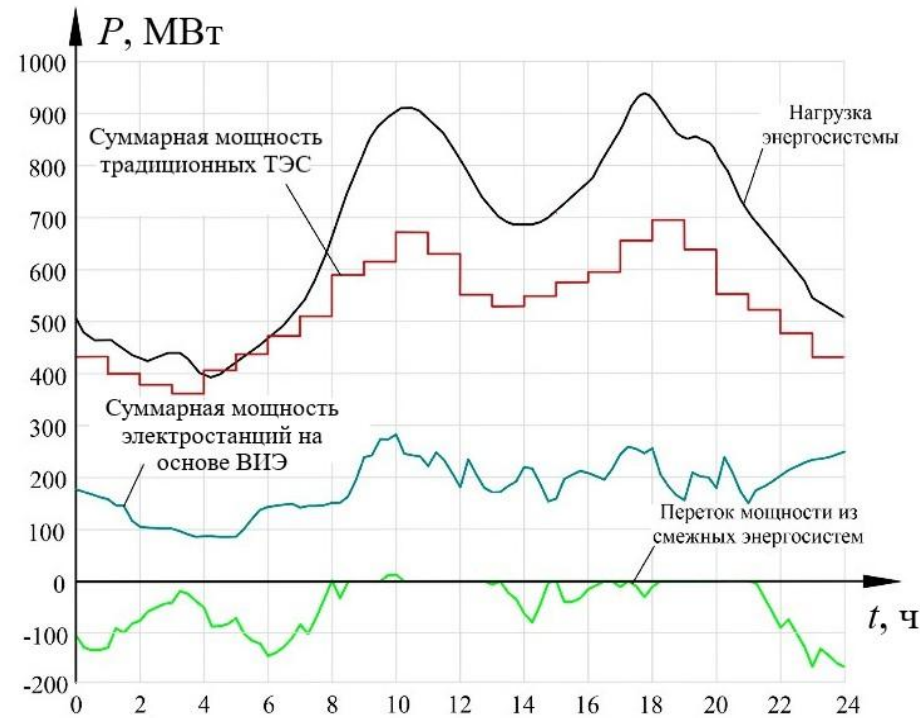


Рис. 2. Суточный график нагрузки, выдачи мощности электростанций и перетока мощности из смежных энергосистем

- Позволило традиционным ТЭС работать без отклонения от планового диспетчерского графика и сократить число часов работы объектов ВИЭ с гарантированной мощностью с полной загрузкой
- Снижение амплитуды колебаний мощности объектов ВИЭ уменьшило величину и смену направлений перетока мощности по сечению

Основные барьеры:

- отсутствие механизмов, позволяющих использовать скоординированное управление электростанциями с различной юридической принадлежностью и правовым статусом
- все ВЭС и СЭС, построенные по программе ДПМ ВИЭ, имеют жесткие условия по выработке электроэнергии и участию в централизованном управлении
- разнородность участников рынка: государственные, частные, муниципальные компании, не имеющие единой модели участия

Требуемые изменения в регуляторных механизмах:

- разработка механизмов коллективной регистрации мощности
- определение правового статуса Агрегатора и оператора координирующей САУ
- внедрение гибких моделей участия Агрегатора в рынках электроэнергии и мощности, а также системных услуг

Комплексный подход к планированию развития объектов ВИЭ в территориальных энергосистемах позволяет получить значимые эффекты в части повышения управляемости их режимами, гибкости и живучести, а также надежности электроснабжения потребителей

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

26

В большинстве территориальных энергосистем возможно строительство электростанции на основе ВИЭ с гарантированной мощностью на базе местных энергоресурсов, которые могут эффективно решать актуальные задачи

Скоординированное управление различными электростанциями на основе ВИЭ, включая ВЭС и СЭС со СНЭЭ, позволяет существенно уменьшить амплитуду колебаний суммарно выдаваемой мощности

Внедрение координирующей САУ позволяет снизить требуемый резерв мощности в территориальной энергосистеме, число неэффективных пусков/остановов и требования к маневренности генерирующего оборудования традиционных ТЭС, требования к пропускной способности межсистемных ЛЭП, мощности и энергоемкости СНЭЭ

Для достижения значимых эффектов мощности электростанций на основе ВИЭ с гарантированной мощностью должны быть коррелированы с суммарной установленной мощностью ВЭС и СЭС, при этом нужно оценивать достаточность запасов энергоресурсов на срок службы электростанций на основе ВИЭ с гарантированной мощностью

Внедрение координирующей САУ позволяет повысить эффективность планирования и управления электрическими режимами территориальных энергосистем, обеспечить их устойчивое функционирование, а также надежное электроснабжение потребителей в различных схемно-режимных ситуациях



БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ !

Илюшин Павел Владимирович
ilyushin.pv@mail.ru