

О СИСТЕМНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ И ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С ВИЭ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Авторы: **Андреев Василий Николаевич** - аспирант кафедры ГВИЭ НИУ «МЭИ»;
руководитель проектов, блок стратегии и инвестиций ПАО «Интер РАО», Москва.
Тягунов Михаил Георгиевич - доктор технических наук, профессор НИУ «МЭИ»,
Москва.
Шевердиев Ражидин Пирвеледович – аспирант кафедры ГВИЭ НИУ «МЭИ»,
Москва.
Ахмерова Татьяна Ниязовна – студентка кафедры ГВИЭ НИУ «МЭИ», Москва.

Актуальность

Основными универсальными ориентирами развития человечества на период до 2030 года являются **17 Целей Устойчивого Развития** (ЦУР) ООН.

Одна из ЦУР под номером 7 ставит своей задачей **«Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех»**.



Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 в качестве приоритетов государственной политики также закреплено развитие систем распределенной генерации в **технологически изолированных и труднодоступных территориях** (ТИТТ) и внедрение интеллектуальных систем управления электросетевым хозяйством на базе цифровых технологий.

Особенности и проблемы энергоснабжения ТИТТ России



1. Сложные климатические условия, относительно низкая плотность населения и неравномерное размещение по территории.
2. Недостаточная надежность энергоснабжения потребителей из-за высокого износа генерирующего оборудования.
3. Высокая себестоимость вырабатываемой энергии (**до 150 руб/кВт·ч**), что связано с необходимостью завоза дорогого органического топлива из других районов страны.
4. Значительный ущерб окружающей среде выбросами продуктов сгорания топлива (**40 млн т. CO₂, 80 тыс. т. SO_x, 600 тыс. т. NO_x**) и использованной тарой из-под топлива.

Удельная фактическая стоимость выработки электроэнергии (■) и одноставочный тариф на электроэнергию для населения (■) в 2018 году, руб/кВт·ч *



Разница между себестоимостью производства электроэнергии и установленным для потребителей тарифом – **перекрестное субсидирование**, ценовая нагрузка от которой перераспределена, в том числе на потребителей ценовых зон ОРЭМ

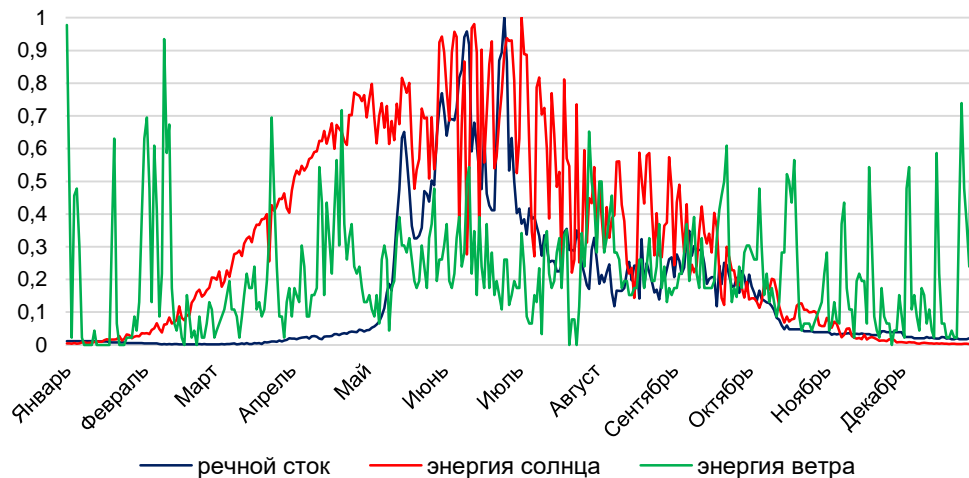
Особенности режимов работы установок ВИЭ в ТИТТ



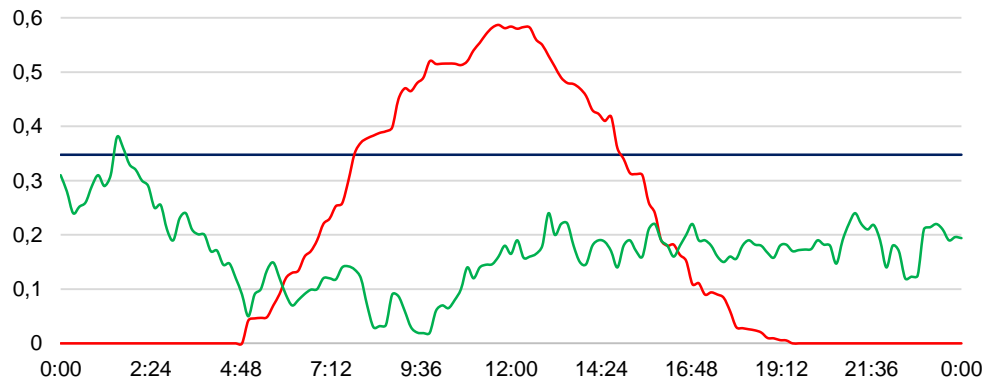
- ❖ На годовом интервале времени все три источника энергии показывают изменчивый характер.
- ❖ На краткосрочном (суточном) интервале времени энергия солнца и энергия ветра изменяются в широком диапазоне, а энергия речного стока имеет постоянный приход.
- ❖ Энергия ветра и энергия солнца могут стохастически изменяться даже на секундных интервалах времени, что связано с их зависимостью от климатических, географических и других природных факторов местности.

ФЭУ, ВЭУ и ГЭУ (без регулирования стока) энергетические установки имеют либо очень незначительную гарантированную мощность – мощность, генерация которой гарантируется в любой момент времени, либо не имеют ее вовсе. В ТИТТ такие установки не могут обеспечить бесперебойное энергоснабжение потребителя

Характер изменения прихода ресурсов ВИЭ в течение года в районе среднего течения реки Колыма (Магаданская область) *



Характер изменения прихода ресурсов ВИЭ в течение суток в районе среднего течения реки Колыма (Магаданская область)



* на основе данных БД НАСА, БД «Расписание погоды», ПАО «РусГидро»

Гибридные энергетические комплексы (ГЭК) бесперебойного энергоснабжения



ГЭК бесперебойного энергоснабжения –

система, состоящая из одной или нескольких установок ВИЭ и других источников мощности (дизель-генераторов, накопителей энергии и т.д.), используемых в качестве гарантирующих источников мощности и обеспечивающих безопасное и бесперебойное энергоснабжение потребителей.

В настоящее время в мире успешно эксплуатируется **свыше 100 ГЭК** с различным составом оборудования для автономного энергоснабжения ТИТТ.

ГЭК бесперебойного энергоснабжения в ТИТТ должны включать следующие элементы:

- Генерирующие установки:** ФЭУ, ВЭУ, ГЭУ, работающие в режиме фактического поступления ресурса ВИЭ, и гарантирующие источники мощности на органическом топливе (например, ДГУ);
- Устройства перераспределения энергии:** разнотипные накопители и преобразователи энергии, балластные нагрузки и т.д.
- Устройства для передачи и преобразования энергии:** контроллеры заряда аккумуляторных батарей, инверторы, блоки автоматики и т.д.
- Потребители электрической и тепловой энергии,** в том числе регулируемые потребители.

Примеры компоновки ГЭК в ТИТТ России и мира

Наименование	Местоположение	Состав оборудования	Объем замещения топлива, %
ГЭК в п. Уэльск	Аляска, США	ДГУ – 411 кВт; ВЭУ – 130 кВт; Никель-кадмиевые НЭ – 31 кВт·ч; Преобразователь напряжения – 156 кВА; Автоматическая система управления	78
ГЭК на о. Рамея	Ньюфаундленд, Канада	ДГУ – 2 775 кВт; ВЭУ – 690 кВт; Водородный НЭ – 250 кВт.	60
ГЭК в с. Менза	Забайкальский край, Россия	ДГУ – 400 кВт; ФЭУ – 120 кВт; Литий-ионные НЭ – 320 кВт·ч; Интеллектуальная система управления.	40
ГЭК в с. Мугур-Аксы	Республика Тыва, Россия	ДГУ – 800 кВт; ФЭУ – 400 кВт; Литий-ионные НЭ – 460 кВт·ч; Интеллектуальная система управления.	40
ГЭК в п. Никольское	Камчатский край, Россия	ДГУ – 292 кВт; ВЭУ – 9550 кВт; электробойлер – 890 кВт; Интеллектуальная система управления.	50

Выбор оптимальной структуры и параметров ГЭК



Факторы, влияющие на состав, параметры и режим работы ГЭК

❖ Выбор **оптимальной структуры и параметров ГЭК** требует учета целого ряда факторов, а их эксплуатация – оптимального и надежного управления для обеспечения стабильного и эффективного энергоснабжения потребителей.

❖ Указанные выше процессы, в том числе исследование эффективности действующих ГЭК, несомненно, быстрее, дешевле и безопаснее выполнять в виртуальном пространстве с использованием специальных инструментов (**3D модели, цифровые модели, цифровые двойники и др.**).

❖ Ключевым компонентом таких инструментов должен быть комплекс **математических, имитационных, нейросетевых моделей**, с высокой точностью описывающих все аспекты поведения ГЭК в течение всего жизненного цикла.

1. **Параметры потребителя:** географические, климатические, технические и ресурсные характеристики конкретного потребителя, характер изменения потребляемой мощности, категория надежности потребителя и т.д.
2. **Метеорологические факторы:** изменение интенсивности солнечной радиации по времени, изменение температуры окружающей среды, уровень и изменчивость ветрового потока, плотность ветрового потока, вертикальный профиль ветра и т.д.
3. **Технические и технологические особенности энергоустановок:** ограничения на предельные величины электрических и тепловых потоков мощности, ограничения по скорости изменения рабочей мощности, динамические характеристики, наличие инерционных элементов и т.д.

Цифровой двойник ГЭК, разработанный на кафедре ГВИЭ, НИУ «МЭИ»



□ ЦД ГЭК – эффективный и универсальный инструмент проектирования, визуализации, мониторинга и управления ГЭК на всех этапах его жизненного цикла в условиях эксплуатации, близких к реальным.

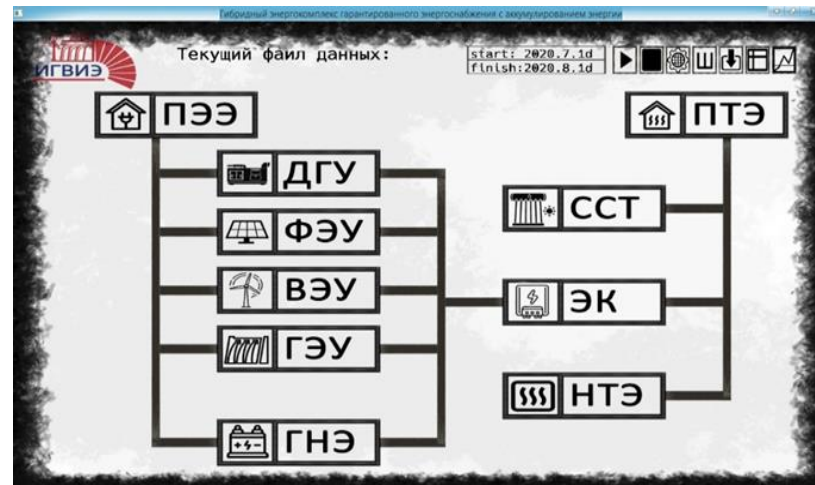
Основные задачи, решаемые с помощью ЦД ГЭК

На уровне проектирования

- Быстрый и надежный выбор оптимальной структуры и параметров ГЭК для любой заданной территории
- Виртуальная апробация и оценка проектных решений
- Изучение и оценка влияния различных факторов на состав, параметры и режимы функционирования ГЭК
- Обучение и виртуальная тренировка персонала ГЭК

На уровне эксплуатации

- Моделирование и исследование режимов работы ГЭК для различных временных интервалов
- Оперативное решение задач по оптимальному управлению режимами работы ГЭК
- Оптимальное управление режимами заряда и разряда НЭ
- Моделирование текущих режимов ГЭК с варьированием состава оборудования



Исследование ГЭК в п. Усть-Камчатск с помощью ЦД



□ **Усть-Камчатск** – поселок и порт в Усть-Камчатском районе Камчатского края (географические координаты 56°14' с. ш. 162°32' в. д.).

Электроснабжение потребителей в поселке обеспечивается за счет ГЭК суммарной установленной мощностью **9 575 кВт**, в состав которого входят одна ВЭУ производства компании «Vergnet» мощностью **275 кВт**, три ВЭУ японской фирмы «KOMAI» мощностью по **300 кВт** каждая и ДГУ мощностью **8 400 кВт**

Основные характеристики изолированного энергоузла п. Усть-Камчатск

Наименование показателя	Значение показателя
Численность населения, чел	4 300
Максимальная мощность потребителей, кВт	4 130
Установленная мощность ГЭК, кВт	9 575
в том числе:	х
установленная мощность ДГУ, кВт	8 400
установленная мощность ВЭУ, кВт	1 175
Потенциал замещения выработки дизельной генерации, %/год	9,6
Фактический объем потребления электрической энергии в 2020 году (с учетом потерь на передачу), МВт·ч	22 199,3

Сравнение фактических и расчетные данные эксплуатации ГЭК в п. Усть-Камчатск в 2020 году

Наименование показателя	Фактическое значение	Расчетное значение	Отклонение (+/-)	
			МВт·ч	%
Объем потребления электрической энергии, МВт·ч	22 199,3	22 102,20	97,1	0,4
Объем выработки ВЭУ, МВт·ч	1 042,3	1 301,6	-259,3	-24,9
Объем выработки ДГУ, МВт·ч	21 157	20 800,6	356,4	1,7
КИУМ ВЭУ, %	10,1	12,6	–	–
КИУМ ДГУ, %	28,7	28,2	–	–
Доля замещения ДГУ, %	4,7	6,4	–	–
Объем экономии дизтоплива, т	255,4	318,9		

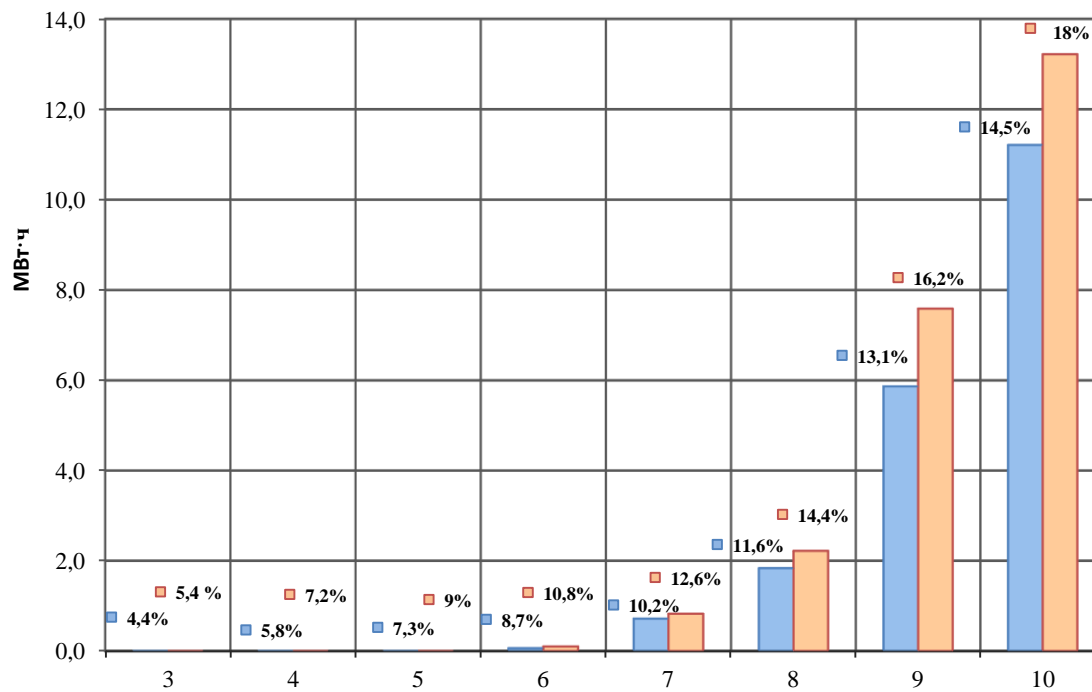
Разница в данных связана с качеством используемых исходных данных и имеющимися принудительными остановками ВЭУ в процессе эксплуатации в периоды ее резкопеременной генерации с целью обеспечения стабильной работы ДГУ

Исследование ГЭК в п. Усть-Камчатск с помощью ЦД




Зависимости требуемой емкости НЭ и доли замещения ДГУ
от количества ВЭУ: ■ – ВЭУ GEV MP R; ■ – ВЭУ KWT 300

Увеличение суммарной установленной мощности ВЭУ в составе ГЭК п. Усть-Камчатск с 1 175 до 1 600 кВт не потребует наличия в его составе НЭ и позволит увеличить долю замещения ДГУ в годовом энергобалансе примерно на 2 %, что эквивалентно примерно 100 т. дизельного топлива



- ❑ **Достижение целей устойчивого развития в энергетике непосредственно связано с развитием бесперебойного энергоснабжения ТИТТ.**
- ❑ **Энергоснабжение ТИТТ требует решения важной социальной, экономической и экологической задачи – снижение себестоимости электроэнергии за счет использования надежных и экологически чистых источников генерации наряду с обеспечением бесперебойного энергоснабжения потребителей.**
- ❑ **Для построения систем бесперебойного энергоснабжения в ТИТТ наиболее целесообразен принцип ГЭК на базе установок ВИЭ, НЭ различного типа, гарантирующих источники энергии и регулируемых потребителей**
- ❑ **Оптимизация режимов работы и исследование эффективности функционирования ГЭК с ВИЭ требует системного подхода и разработки комплексной математической модели, представленной основными уравнениями, учитывающие ресурсные, технические и технологические особенности функционирования разнотипных энергоустановок в ТИТТ.**
- ❑ **Исследование эффективности эксплуатации ГЭК с генерацией на основе ВИЭ, имеющих разнотипный состав генерирующих объектов с огромными массивами данных и высокую зависимость от природных неопределенных факторов значительно облегчаются при использовании специальных верифицированных ЦД**



Андреев Василий Николаевич - аспирант кафедры ГВИЭ НИУ
«МЭИ»; руководитель проектов, блок стратегии и
инвестиций ПАО «Интер РАО»

Почта: vas.andreev@gmail.com

Телефон: +7 (916) 850 40 04