



**Школа молодых ученых – 2023
«Технологическое развитие отраслей
ТЭК для достижения углеродной
нейтральности экономики России»**

Потенциал развития малой гидроэнергетики и гибридных энергетических комплексов на ее основе в России

Илюшин Павел Владимирович

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

г. Москва, 17-18 октября 2023 г.

Существующее положение

2

- В мире около 1,4 млрд человек не имеет доступа к электроэнергии и 1 млрд не обеспечены в достаточном объеме
- Суммарная установленная мощность МГЭС в мире составляет более 50 ГВт (на территории стран Евросоюза около 17 тыс. МГЭС с суммарной установленной мощностью около 20 ГВт)
- В Швеции действует 1350 МГЭС которые вырабатывают 10% электроэнергии, а в Китае эксплуатируется около 83 тыс. МГЭС
- В России действует более 130 МГЭС (мощностью до 50 МВт) суммарной мощностью около 1200 МВт (32 МГЭС принадлежит ПАО «Русгидро» с суммарной мощностью около 400 МВт)
- Технический потенциал малой гидроэнергетики России очень высок и составляет около 360 млрд кВт·ч/год, что позволяет выработать около 30% потребляемой в России электроэнергии
- В России большое количество изолированных энергорайонов, не имеющих связи с централизованной системой электроснабжения и вырабатывающих электроэнергию на ДГУ

Малая гидроэнергетика способна решать актуальные задачи обеспечения доступности, надежности и эффективности электроснабжения в условиях трансформации энергосистем

Мощности МГЭС в разных странах мира

3

Россия

- ГЭС на равнинных реках с валовым потенциалом до 2 МВт
- ГЭС на горных реках – до 1,7 МВт
- ГЭС на реках с валовым потенциалом 100 – 2000 кВт
- ГЭС мощностью до 30 МВт с единичной мощностью гидроагрегата до 5(10) МВт

Китай

- ГЭС мощностью до 50 МВт

Франция

- ГЭС мощностью до 12 МВт

Германия, Австрия, Испания

- ГЭС мощностью до 5 МВт

Люксембург

- ГЭС мощностью до 3 МВт

Общепринятого для всех стран понятия МГЭС нет, в качестве основной характеристики принята установленная мощность МГЭС

Пико ГЭС – до 10 кВт
Микро ГЭС – до 100 кВт
Мини ГЭС – до 1000 кВт

Средняя расчетная себестоимость производства электроэнергии (LCOE) на протяжении всего жизненного цикла (включая все инвестиции, затраты и доходы) для СЭС составляют 7,8 руб/ кВт·ч, ВЭС – 13 руб/ кВт·ч, а для МГЭС – 1,5 руб/ кВт·ч

История развития малой гидроэнергетики в России

4

В России для производства электроэнергии малые реки активно использовали со второй половины XIX века

Сначала гидравлическую энергию преобразовывали в механическую с помощью водяных колес, а с появлением водяных турбин водяные мельницы были заменены на ГЭС

Первой локальной была Зырянская ГЭС мощностью 150 кВт на речке Берёзовке Алтайского края, построенная в 1892 г. под руководством инженера Николая Кокшарова для электроснабжения шахтного водоотлива Зырянского рудника

Первой сетевой была ГЭС «Белый уголь» мощностью около 740 кВт на реке Подкумок, построенная в 1903 г. управлением Владикавказской железной дороги для энергоснабжения курортов Кавказских Минеральных Вод под руководством Генриха Осиповича Графтио и Михаила Андреевича Шателена

К 1917 г. мощность 78 ГЭС России составляла около 16 МВт (две имели мощность более 1 МВт – Алавердинская и Гиндукушская)

В 1917 г. было около 2 тыс. мелких гидроагрегатов суммарной мощностью около 90 МВт, работавших на механические приводы, и около 40 тыс. мельниц с водяными колесами

Взлет и закат малой гидроэнергетики в XX веке

5

За 1945 г. была построена 641 МГЭС общей мощностью 18 МВт

К 1950 г. на селе действовало около 6 тыс. МГЭС суммарной мощностью 243 МВт (средняя мощность 40 кВт), а в 1952 г. их количество составило 6614 ед. мощностью 322 МВт, что позволяло удовлетворять потребности в электроэнергии

Удельный вес ГЭС, обеспечивающих электроснабжение сельского хозяйства, составлял в 1950 г. 78%, в том числе МГЭС – 39%

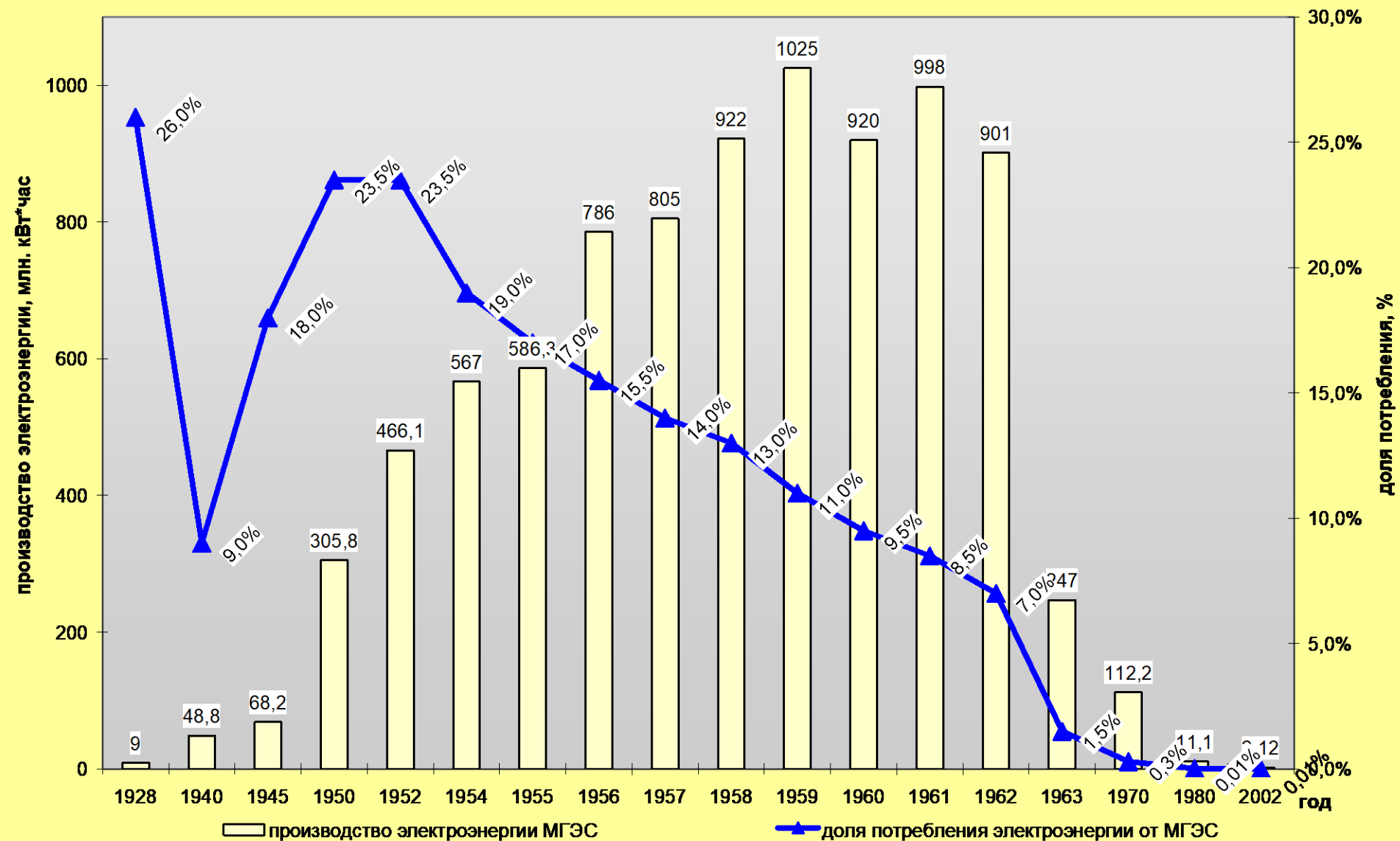
В 1951 – 1953 гг. в стране было построено 111 сельских ГЭС общего пользования средней мощностью 440 кВт и 116 межколхозных ГЭС средней мощностью 300 кВт каждая

В середине 1950-х началось строительство межколхозных ГЭС большей мощности, находящихся в ведении управлений Сельэлектро, позволяющих обеспечить электроэнергией колхозы и совхозы целого района (в Рязанской области была возведена Рассыпухинская ГЭС мощностью 2 МВт, в Узбекской ССР – Кудашская ГЭС мощностью 5 МВт, в Ставропольском крае – Новотроицкая ГЭС мощностью 3,9 МВт и др.)

В 1962 г. число малых ГЭС сократилось до 2665 единиц

Динамика производства электроэнергии на МГЭС в России

6



Положения Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года

7

- В «дорожной карте» НТИ «Энерджинет» приоритетной является разработка новых технических средств для интеллектуальных энергетических систем, в том числе локальных, как в изолированных энергорайонах, так и интегрируемых в ЕЭС России
- Новые технологии распределенного производства электроэнергии, микрогенерации, управляемого потребления, виртуального агрегирования ресурсов создают новые условия для развития конкурентного розничного рынка электроэнергии на базе автоматизированных локальных торговых площадок
- Максимальное экономически эффективное использование местных энергетических ресурсов, ВИЭ и распределенной генерации
- Реализация пространственных приоритетов государственной энергетической политики предполагает повышение устойчивости и надежности энергоснабжения макрорегионов
- Гарантированное обеспечение энергетической безопасности и развитие энергетической инфраструктуры для опережающего социально-экономического развития

Классификация ресурсов для малой гидроэнергетики

8

Источники ресурсов малой гидроэнергетики

Открытые (условно безнапорные)

Закрытые (напорные)

Подземные

Естественные

Искусственные

С природной
водой

С технологическими
жидкостями

Реки

Малые реки

Ручьи

Родники

Каналы
(мелиоративные,
судоходные,
водоснабжения)

Водосбросы
(водохранилищ,
шлюзов,
энергетических
объектов)

Водоводы

Питьевые

Производственные

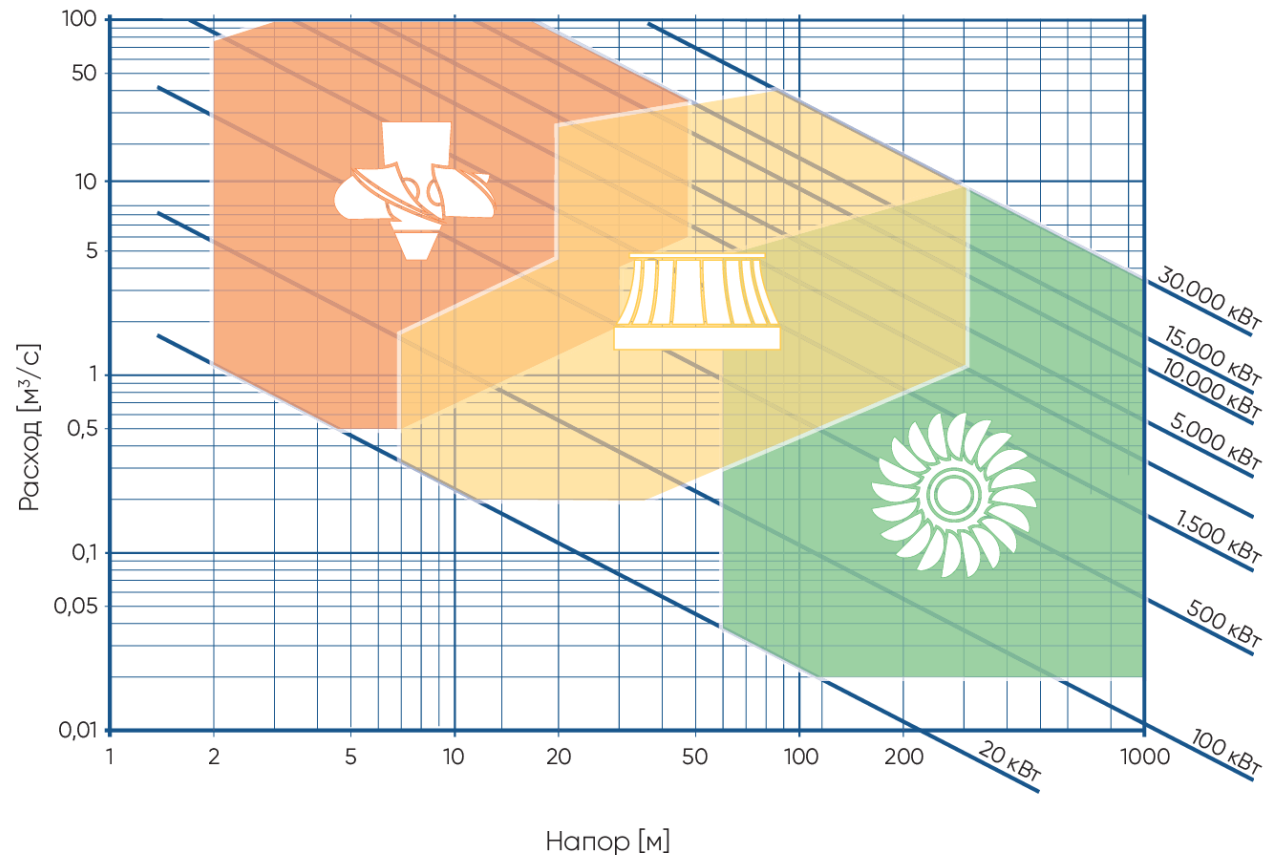
С нормальными
параметрами

С повышенными
параметрами

Оборудование для МГЭС

(напоры от 3 до 450 м, мощность от 5 кВт до 10 МВт)

9



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

Преимущества применения вентильных индукторных генераторов

10

Агрегат с переменной частотой вращения



**Вентильный
индукторный
генератор**

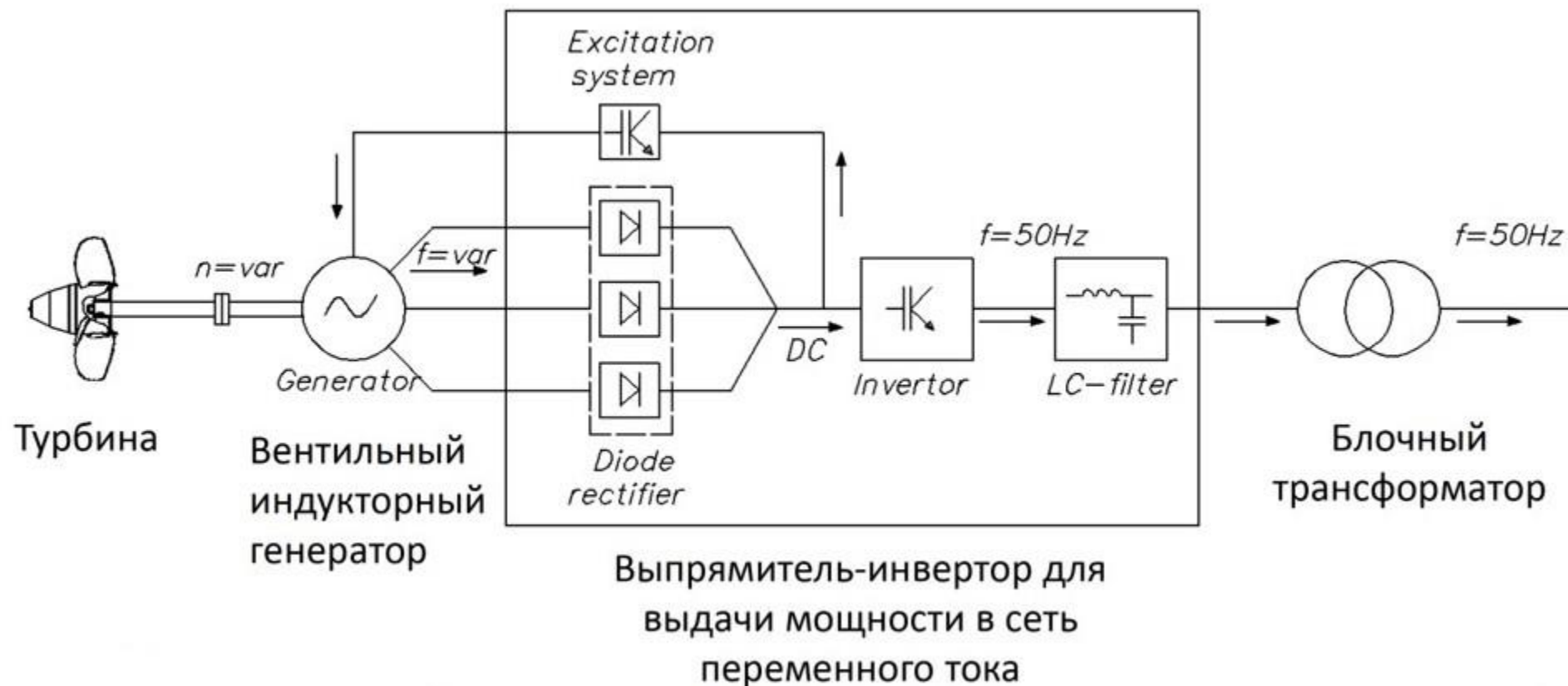
**Силовой
преобразователь**



Возможность интеграции разнотипных ВИЭ, топливных элементов, аккумуляторных батарей с их объединением на шине постоянного тока, что обеспечивает упрощение конструкции агрегатов и системной автоматики

Схема выдачи мощности МГЭС на базе вентильного индукторного генератора с силовым преобразователем

11



- Отсутствие необходимости в координации токов КЗ в сети при вводе новой МГЭС (минимальная подпитка током КЗ)
- Возможность управления балансом мощности и распределения мощности между гидроагрегатами МГЭС по зависимостям от текущих параметров сети (частоты/напряжения)

Преимущества регулирования частоты вращения гидроагрегата независимо от частоты в сети

12

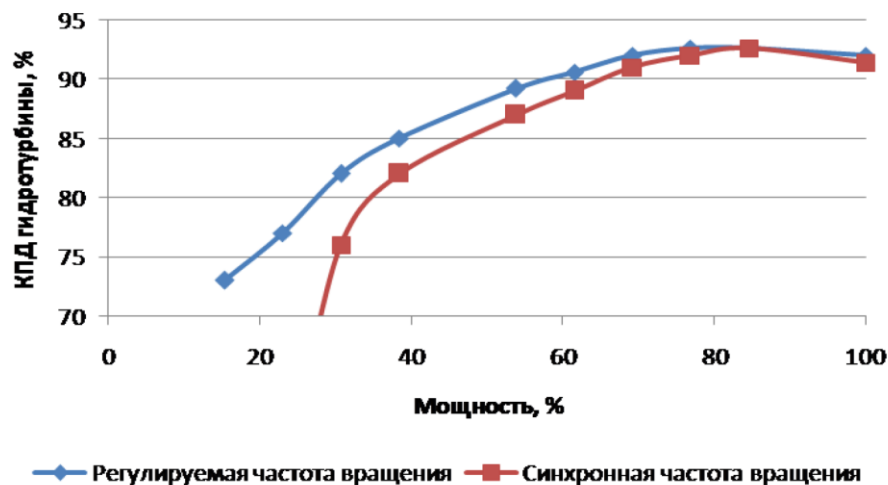


Рис. 1. КПД гидротурбины при синхронной и переменной частоте вращения

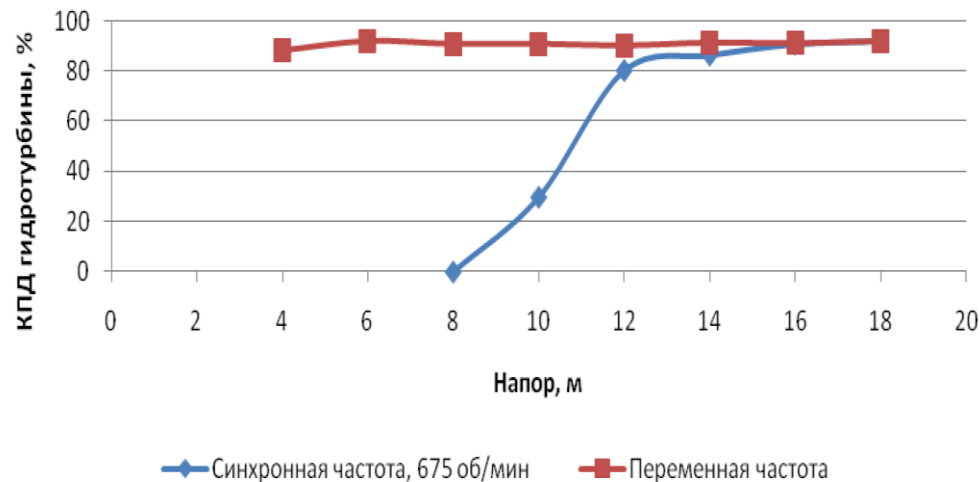
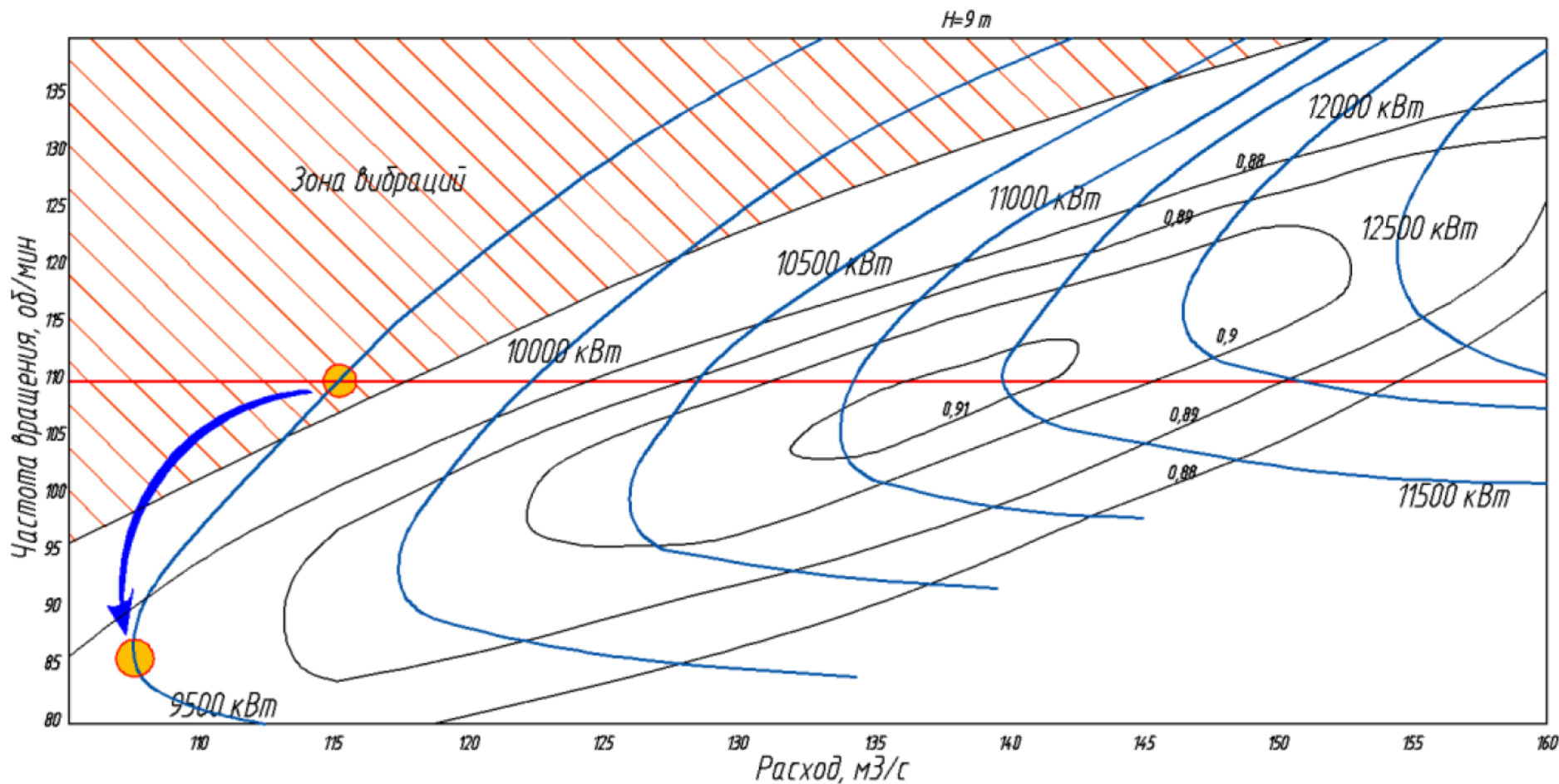


Рис. 2. КПД гидротурбины при изменении величины проектного напора

- Исключение необходимости быстрого регулирования направляющего аппарата гидротурбины
- Сохранение работоспособности до угонной частоты вращения гидроагрегата (1,45 – 1,7 номинальной частоты вращения)
- Обеспечение стабильной работы в изолированных энергорайонах и в островном режиме
- Снижение вибрационных нагрузок на гидроагрегаты

Снижение вибрационных нагрузок на гидроагрегаты

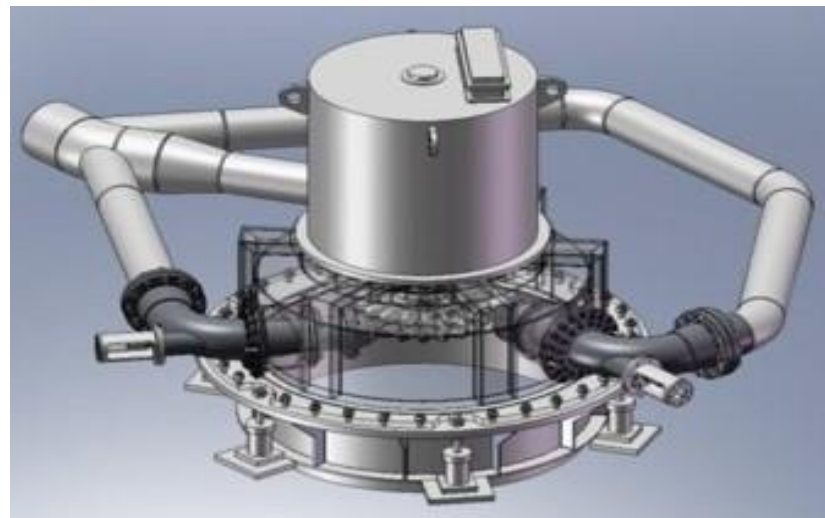
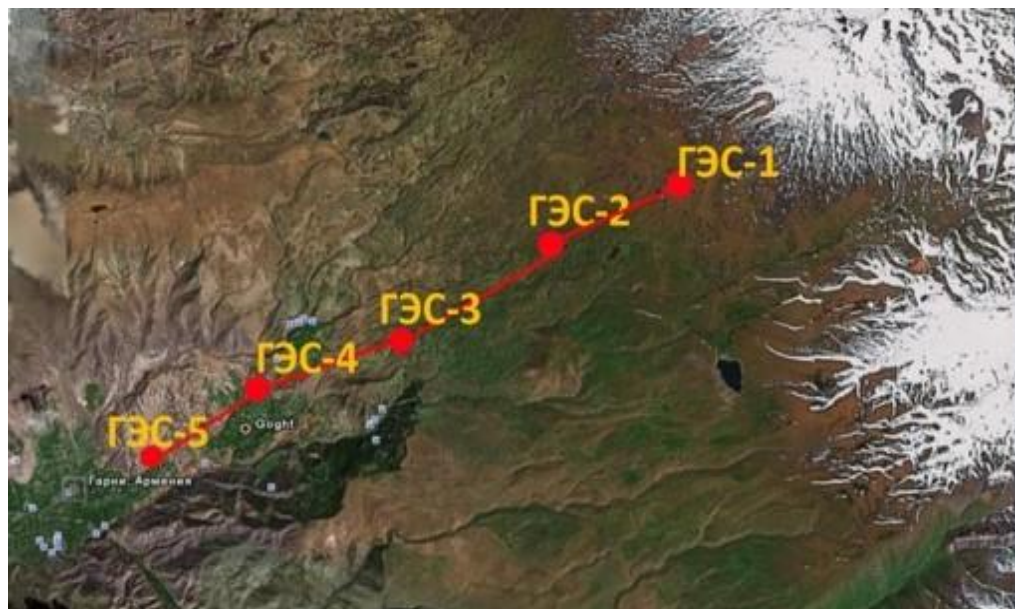
13



При использовании переменной частоты вращения возможно обеспечить работу гидроагрегата в режимах, где пульсации давления и образование вихревых жгутов за рабочим колесом сведены к минимуму

Сужение номенклатуры гидротурбин на каскаде МГЭС при использовании переменной частоты вращения

14



	H, м	D1, м	n, об/мин
МГЭС1	270	0,5	1160-1310
МГЭС2	275	0,5	1260-1325
МГЭС3	290	0,5	1294-1361
МГЭС4	265	0,5	1267-1301
МГЭС5	209	0,5	1137-1156

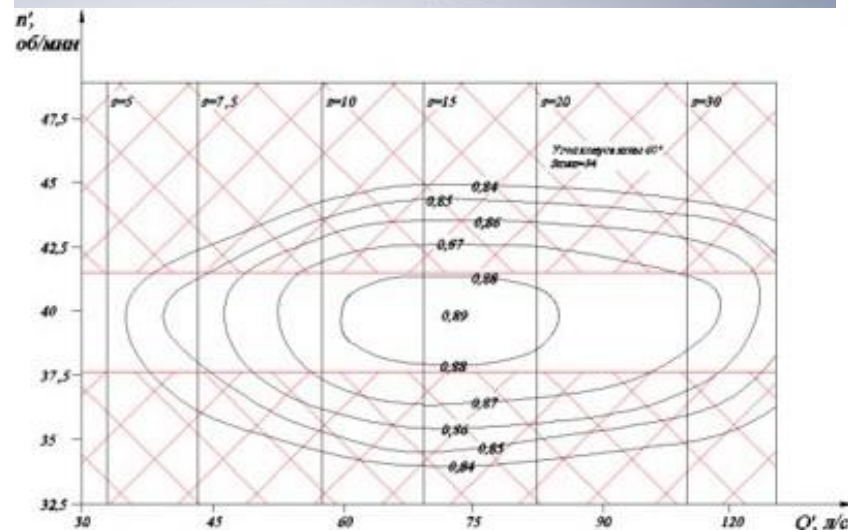


Рис. 1. Универсальная характеристика ковшовой гидротурбины К-200/685-ГЗ-114

Примеры восстановления МГЭС в России (Лыковская ГЭС, Орловская область)

15

Восстановление МГЭС, 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



Основные преимущества малой гидроэнергетики

16

- Обеспечивает энергетическую и информационную безопасность, децентрализацию генерирующих мощностей, содействует энергосбережению и минимизации потерь электроэнергии
- Не требуется подтопление лесов, сельскохозяйственных угодий, сноса и/или переноса населенных пунктов
- МГЭС не производят парниковых газов и оказывают минимальное влияние на окружающую среду (образ жизни населения, поведение животных и микроклиматические условия)
- Максимальная безопасность при природных землетрясениях и не являются причиной наведенной техногенной сейсмичности
- Низкие капитальные и эксплуатационные затраты, трудозатраты и материалоемкость строительства, себестоимость электроэнергии, длительные сроки службы (40–50 лет)
- Малые сроки проектирования, строительства и окупаемости инвестиций, учитывая модульную конструкцию оборудования
- Обеспечивает доступность и надежность электроснабжения для удаленных потребителей в изолированных энергорайонах
- Полный комплекс оборудования отечественной разработки и изготовления, ремонтпригодный на месте его установки

Основные недостатки малой гидроэнергетики

17

- При автономном электроснабжении повреждение оборудования МГЭС будет приводить к нарушению работы потребителей, что требует наличия резервных источников – ДЭС, ВЭС, СЭС и др.

- Возможность разрушения плотины и гидроагрегатов в результате перелива через гребень плотины при неожиданном подъеме уровня воды и несрабатывании запорных устройств

- Содействие в ряде случаев заилению водохранилищ и оказание влияния на руслоформирующие процессы

- Наличие сезонности в выработке электроэнергии (в зимний и летний периоды из-за снижения расхода на водотоке вырабатываемая мощность может значительно уменьшаться), что требует наличия дублирующих мощностей

- Необходимо наличие квалифицированного персонала для организации технического обслуживания оборудования МГЭС

- Требуется полная автоматизация всех процессов на МГЭС для минимизации численности обслуживающего персонала

- Отсутствие у заводов-изготовителей круглосуточных сервисных центров, складов запасных частей для ремонта и договоров на их гарантированную доставку в течение 1-2 дней (недели)

Перечень научно-технических задач в области малой гидроэнергетики

18

Разработка нового современного оборудования

- надежность, простота изготовления и технического обслуживания
- работа в автономном режиме и/или параллельно с энергосистемой
- обеспечение соответствия качества вырабатываемой электроэнергии требованиям ГОСТ 32144-2013
- максимальная автоматизации (переход на обслуживание ЦУГ)
- экологическая безопасность принятых технических решений

Особенности проектирования МГЭС

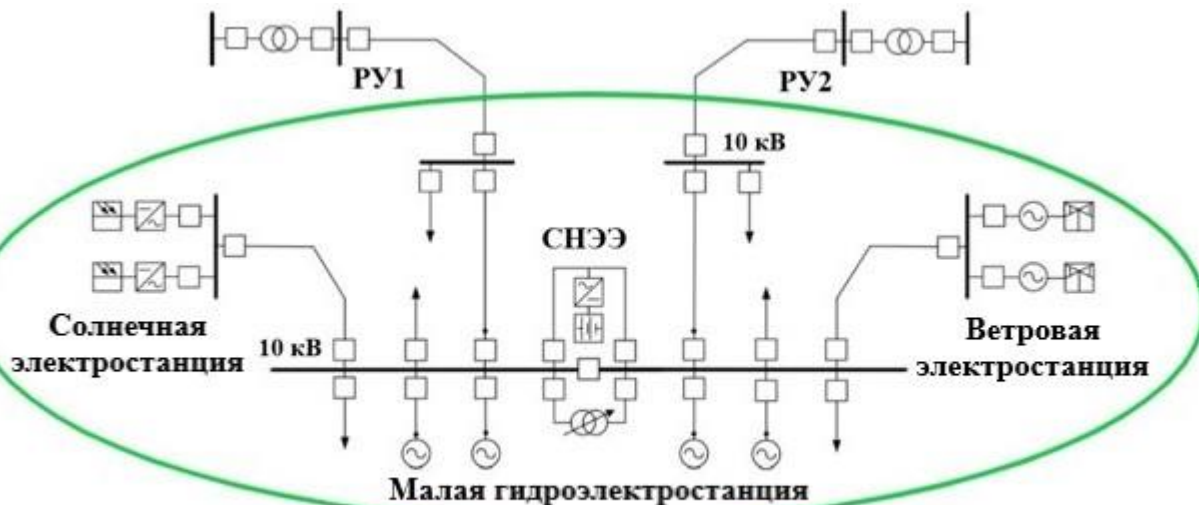
- обеспечение работы «по водотоку»
- использования каскадных схем на притоках
- использование местных строительных материалов
- использование новых технологических схем
- выбор створов с близкими характеристиками
- унификация технических решений

Оценка ресурсов для развития малой гидроэнергетики

- выявление региональных технических ресурсов
- особенности водозенергетических расчетов
- учет боковой проточности

Перспективы создания локальных интеллектуальных энергосистем (ЛИЭС) на базе ГЭК с МГЭС

19



Локальная интеллектуальная энергосистема (ЛИЭС)

В России 2,5 млн малых рек, сток которых около 50% общего стока рек

На территории бассейнов малых рек проживает:

- до 44% городского населения;
- 90% сельского населения

■ **Функционирование в сетях среднего (низкого) напряжения**

■ **Сбалансированность в нормальном режиме по электрической мощности с постоянной работой в режиме избытка и кратковременно (в послеаварийных режимах) дефицита мощности**

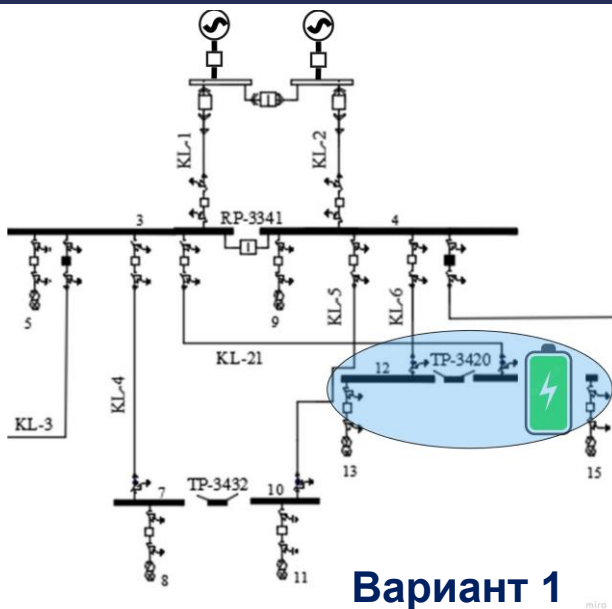
■ **Работа как параллельно с энергосистемой, так и в островном режиме**

■ **Обеспечение заданных уровней балансовой, режимной надежности и бесперебойности электроснабжения нагрузки в островном режиме**

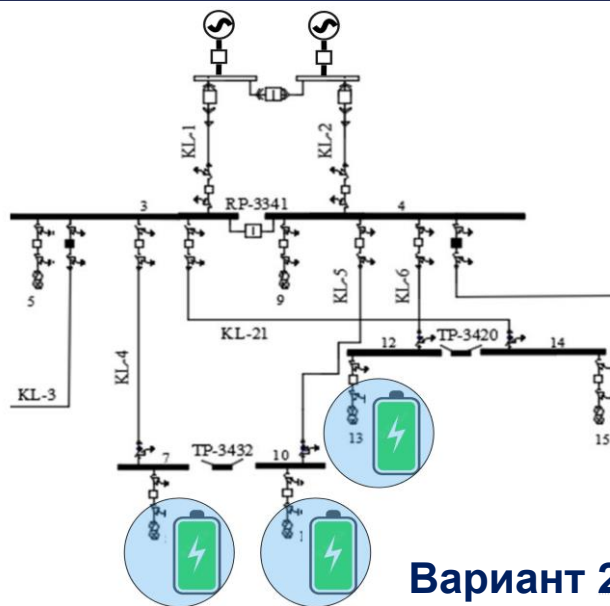
■ **Наличие внутренних электрических сетей до всех потребителей, а также интеллектуальной системы управления ЛИЭС в целом**

Эффекты от создания ГЭК на основе МГЭС

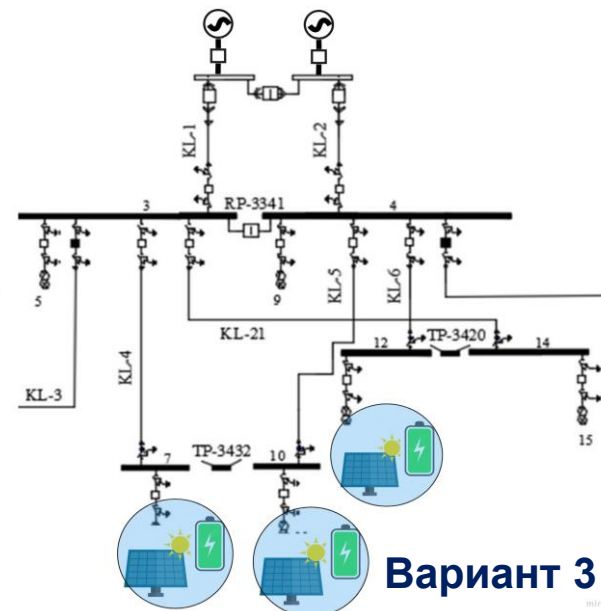
20



Вариант 1

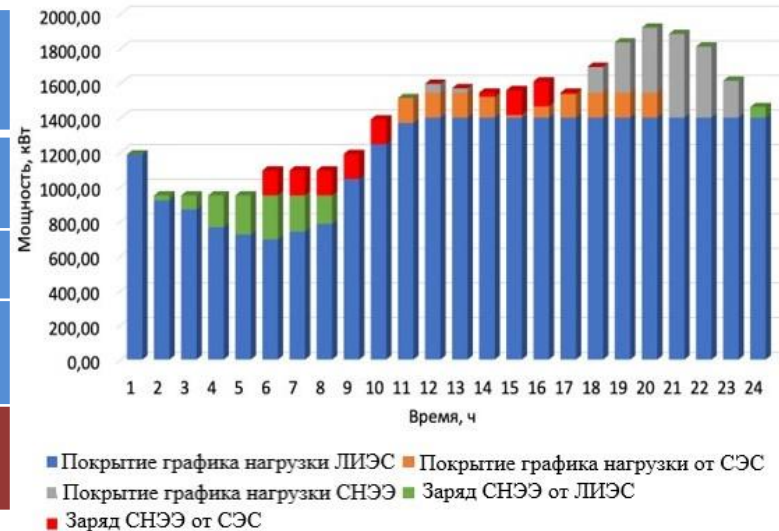


Вариант 2



Вариант 3

	Исходный график нагрузки		Измененный график нагрузки		Изменение коэффициентов	
Изменение	α	β	α	β	α	β
Установка СНЭЭ на ТП	0,36	0,69	0,583	0,815	59,3 %	9,0 %
Установка СНЭЭ в зданиях			0,558	0,824	52,5 %	10,2 %
Создание ГЭК (СЭС и СНЭЭ)			0,65	0,85	80 %	23 %



Обеспечение электроснабжения потребителей 1-ой и 2-ой категорий надежности

21

Независимым считается источник электроснабжения на котором напряжение сохраняется в послеаварийном режиме в допустимых пределах при его исчезновении на другом или других источниках

Виды независимых источников внешнего электроснабжения:

- электросетевые объекты (подстанции различных классов напряжения)
- объекты распределенной генерации (мини-ТЭЦ, МГЭС, резервные источники электроснабжения – ДГУ и др.)
- системы накопления электроэнергии (требуется внесение изменений в действующие нормативно-технические документы)

К числу независимых источников относятся источники с двумя секциями или системами шин одной или двух электростанций или подстанций при одновременном соблюдении следующих двух условий:

1 Каждая из секций или систем шин в свою очередь имеет питание от независимого источника питания (применение подстанционного или линейного автоматического ввода резерва)

2 Секции (системы) шин не связаны между собой или имеют связь, автоматически отключающуюся при нарушении нормальной работы одной из секций (систем) шин

Опыт и планы ПАО «Русгидро» в строительстве и эксплуатации МГЭС

22

Основная часть МГЭС ПАО «РусГидро» находится в СКФО

В 2016 г. введена в эксплуатацию Зарагижская МГЭС (30,6 МВт)

В рамках механизма поддержки ДПМ ВИЭ 1.0 в 2020 г. **завершено строительство, ввод в эксплуатацию, квалификация и аттестация:**

- Верхнебалкарская МГЭС в Кабардино-Балкарской Республике (10 МВт)
- Усть-Джегутинская МГЭС в Карачаево-Черкесской Республике (5,6 МВт)
- Барсучковская МГЭС в Ставропольском крае (5,25 МВт)

В стадии строительства и ввода в эксплуатацию (до 01.12.2024 г.):

- Правокубанская МГЭС, Красногорская МГЭС в Карачаево-Черкесской Республике (по 24,9 МВт каждая)
- МГЭС Башенная в Чеченской Республике (10 МВт)
- МГЭС Псыгансу в Кабардино-Балкарской Республике (19,1 МВт)

В рамках ДПМ ВИЭ 2.0 (до 2035 года) реализуются проекты:

- МГЭС Могохская в Республике Дагестан (49,8 МВт) – 1 декабря 2028 г.
- МГЭС Нихалойская в Чеченской Республике (23 МВт) – 1 декабря 2027 г.
- МГЭС Верхнебаксанская в Кабардино-Балкарской Республике (23,2 МВт) – 1 декабря 2027 г.

По результатам реализации проектов в рамках ДПМ ВИЭ до 2035 г.
будет введено 195,75 МВт мощностей на МГЭС ПАО «Русгидро»

- Круглосуточное дежурство и осуществление оперативным персоналом ЦУГ функций ОТУ и управления водным режимом
- Выполнение функций по контролю безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений каждой МГЭС (каскада малых ГЭС)
- Технологическое оснащение ЦУГ, необходимое для выполнения функций ОТУ и управления водным режимом МГЭС (каскада МГЭС), в том числе наличие и функционирование АСТУ
- Автоматический сбор с каждой МГЭС (каскада МГЭС) телеметрической информации в объеме, необходимом для осуществления функций ОТУ МГЭС и управления водным режимом МГЭС (каскада МГЭС), в том числе параметров контроля безопасной эксплуатации ГТС
- Осуществление функций дистанционного управления технологическим режимом МГЭС и эксплуатационным состоянием генерирующего оборудования, коммутационных аппаратов, разъединителей с заземляющими ножами, и других устройств МГЭС из ЦУГ
- Прибытие оперативного персонала на каждую МГЭС каскада за время, не превышающее 60 мин.

Факторы, сдерживающие развитие малой гидроэнергетики в России

24

- Отсутствие стратегии развития малой гидроэнергетики
- Применение избыточных требований НПА и НТД при проектировании, строительстве и эксплуатации МГЭС (рост стоимости – снижение инвестиционной привлекательности)
- Отсутствие методик оценки и прогнозирования воздействия МГЭС на окружающую среду и хозяйственную деятельность
- Низкая операционная эффективность МГЭС без ДПМ ВИЭ
- Низкий КИУМ МГЭС по сравнению с проектным (заиление, увеличение отбора воды другими водопользователями и др.)
- Технические проблемы (проектные и конструкторские недоработки оборудования и ГТС), повышенный износ оборудования (горные реки)
- Высокие затраты на охрану МГЭС, сопоставимые с затратами на их эксплуатацию
- Слабая изученность гидрологического режима малых водотоков
- Отсутствие серийных производств современного оборудования для массового строительства МГЭС
- Отсутствие актуальных технических требований для разработки и изготовления современного оборудования для МГЭС

ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ

25

- В России технический потенциал малой гидроэнергетики очень высок, однако используется крайне неэффективно
- МГЭС обеспечивают реализацию ФЗ от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...»
- МГЭС обеспечивают энергетическую безопасность, доступность и надежность электроснабжения потребителей в изолированных энергорайонах при минимальном воздействии на окружающую среду
- В малой гидроэнергетике практически полностью решены вопросы технологической независимости (импортозамещения)
- Эффективно создание ГЭК на базе МГЭС для компенсации стохастического характера выработки электроэнергии ВЭС и СЭС
- Требуется разработка проектов МГЭС с максимальным уровнем автоматизации всех технологических процессов
- Необходимо на государственном уровне определить роль, место и способы эффективного применения МГЭС при планировании развития электроэнергетики регионов
- Требуется льготная система налогообложения для производителей и потребителей оборудования МГЭС, а также поддержка проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ
- Включение МГЭС в программу ДПМ ВИЭ и увеличение их установленной мощности до 50 МВт может придать новый импульс их развитию



БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ !

Илюшин Павел Владимирович
ilyushin.pv@mail.ru