УДК 621.311:621.316.1 DOI: 10.37279/2413-1873-2021-20-69-77

# ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Муровский С.П.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Российская Федерация, murovski@inbox.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрены пути повышения эффективности комбинированных систем электроснабжения удаленных объектов на базе возобновляемых источников энергии. Разработанное схемное решение комбинированного электроснабжения удаленных объектов на базе мини-ГЭС, ГТ и термоэлектрических генераторов, установленных на газоотводной трубе котла, позволит перераспределять энергию между потребителями внутри объекта или накапливать ее в системе электрохимического аккумулирования в период минимального потребления.

**Ключевые слова:** электроснабжение, мини-ГЭС, термоэлектрический генератор, комбинированные системы электроснабжения, ресурсосбережение, Крым

## ВВЕДЕНИЕ

Территория Республики Крым имеет достаточно разнообразный рельеф местности. Большое количество площади полуострова занимают возвышенности и горные массивы. Следовательно, поставлять бесперебойно электроэнергию удаленным потребителям не всегда является возможным или влечет за собой большое количество затрат. Выход из данной ситуации очевиден: децентрализованное генерирование электричества непосредственно на объектах при помощи использования установок на базе возобновляемой энергетики (ВИЭ). Учитывая сложившуюся ситуацию в энергопроизводстве и состояние электросетей, можно прийти к выводу о необходимости развития в Крыму собственных производственных мощностей и разработки инновационных решений на базе ВИЭ, которые бы повысили уровень надежности электроснабжения потребителей. Одним из направлений развития собственной генерации является установка мини-ГЭС в комплексе с другим источником электрогенерации вблизи удаленных объектов [1].

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Одним из факторов, от которого зависит энергосистема Крыма, является изношенное состояние линий электропередач (ЛЭП) и оборудования, установленное на электроэнергетических объектах. Большая часть электрических сетей на полуострове были проложены в 30-х – 40-х годах прошлого века. По проекту ЛЭП проектируются с учетом перспективного развития на ближайшие 10 лет. В случае современного развития труднодоступного объекта, запланированной добавочной мощности может не хватить. Так же следует принять во внимание то, что в среднем срок службы ЛЭП составляет около 50 лет и вскоре это оборудование потребует капитального ремонта. Следовательно, потери в таких сетях довольно высоки за счет токов утечки и повышенной короны, что делает передачу электроэнергии по ним экономически не целесообразной. На данный момент Крым является развивающимся регионом с большим количеством новых объектов, требующих больших энергозатрат, следовательно, дефицит собственных мощностей неизбежен, а низкая эффективность передачи энергии лишь ухудшает ситуацию [2].

Согласно закону Республики Крым [3] необходимо повышать энергосбережение и энергетическую эффективность региона. Полная реконструкция устаревших сетей является слишком дорогим и трудоёмким мероприятием в случае труднодоступности объекта. Для временных объектов, таких как стройка, нет смысла тянуть отдельную линию электропередач, так как вполне вероятно, что проект энергопотребления изменится и в уже протянутую линию придется вносить дорогостоящие изменения. Для долгосрочных объектов, таких как удалённый жилой объект или небольшое поселение, не всегда экономически выгодно строить новую ЛЭП. Объект может находиться в географически трудном месте (горный ландшафт), обладать агрессивными факторами окружающей среды (соленый воздух побережья), неблагоприятным климатом, что сильно повышают удельную стоимость ЛЭП.

Одним из направлений развития собственной генерации является установка мини – ГЭС на реках вблизи жилых домов или поселений. На рис. 1. приведена принципиальная схема мини – ГЭС [4]. Малая гидроэнергетика является, несомненно, одной из наиболее развитых областей энергетики на возобновляемых ресурсах. Вырабатываемую гидростанциями энергию очень легко регулировать, что очень важно при их использовании в энерго-системах с большими колебаниями нагрузки. Гидроэлектростанции и их оборудование имеет свойство высокой надежности и работоспособности. Оно заключаются в том, что составляющие их элементы используются очень долго, турбины, как правило, имеют срок эксплуатации более 50 лет.

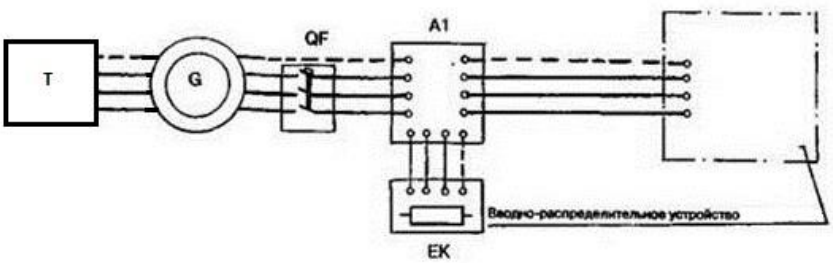


**Рис. 1.** Принципиальная схема мини-ГЭС: Т – гидротурбина; G – генератор; QF – выключатель автоматический; А1 – блок системы регулирования; ЕК – балластная нагрузка
**Fig. 1.** Schematic diagram of mini-hydroelectric power station: T - hydro turbine; G - generator; QF - automatic switch; A1 - control system block; EK - ballast load

Это объясняется условиями их эксплуатации: равномерный режим работы при отсутствии экстремальных температурных и других нагрузок. Вследствие перечисленных факторов стоимость вырабатываемой на гидроэлектростанциях электроэнергии низка и многие из них работают с достаточно высоким экономическим эффектом. КПД гидротурбин варьируется в пределах 85 - 90%. По своему назначению они бывают двух типов: реактивные гидротурбины – рабочее колесо которых полностью погружено в воду и вращается в основном за счет разности давлений до и за колесом; активные гидротурбины – рабочее колесо которых вращается в воздухе натекающим на его лопасти потоком воды, т.е. кинетической энергией этого потока [4].

Гидроэлектростанции малой мощности обладают целым рядом преимуществ, которые делают это оборудование все более популярным. Прежде всего, стоит отметить экологическую безопасность мини-ГЭС – критерий, который становится все более важным в свете проблем защиты окружающей среды. Малые гидроэлектростанции не оказывают вредного влияния ни на свойства, ни на качество проходящей воды. Кроме того, для работы мини-ГЭС нет необходимости в наличии больших водоемов. Они могут работать, используя энергию течения небольших рек и даже ручьев. Дополнительными преимуществами мини-ГЭС являются возможность работы в автоматическом режиме без обслуживающего персонала [1].

В Крыму наиболее перспективными в гидроэнергетическом плане, являются реки: Коккозка, Альма, Кача, Черная и Бельбек. Данные водотоки преимущественно находятся в горной местности, следовательно, в случае отсутствия достаточного напора, есть возможность создания деривационной ГЭС, их особенностью является наличие напорного бассейна, который позволяет подавать на турбину поток воды с постоянным напором и расходом для получения необходимых параметров водотока. Расход данных рек в среднем от 1 до 2 м$^3$/с, что достаточно для создания достаточно мощных деривационных мини-ГЭС [5]. Их особенностью является наличие напорного бассейна, который позволяет подавать на турбину поток воды с постоянным напором и расходом. В случае малых потребляемых мощностей достаточно установить несколько гидротурбин в русле реки на определенном расстоянии друг от друга таким образом, чтобы турбина не занимала все русло реки. Если же требуются достаточно большие мощности, деривационная мини-ГЭС приобретает больший смысл.

Установка мини-ГЭС на реках, которые расположены вблизи жилого объекта позволит использовать избыточную энергию воды путем генерации электроэнергии для собственных нужд и запасании избыточной энергии в аккумуляторе через контролер заряда (рис. 2).

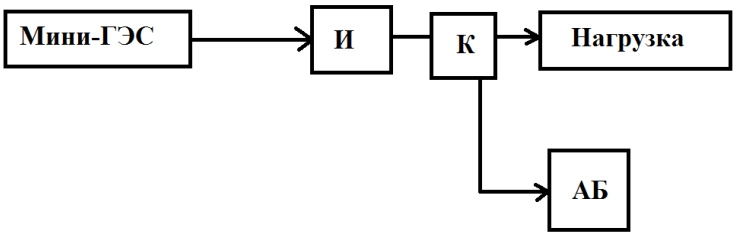


**Рис. 2.** Блок схема электроснабжения жилого дома на базе мини – ГЭС и аккумулирующего устройства
**Fig. 2.** Block diagram of the power supply of a residential building based on a mini-hydroelectric power station and a storage device

Мини – ГЭС будет является основным источником электроэнергии в неотопительный период. На время отопительного сезона рассматривается комбинированная система для генерации электрической энергии, которая включает в себя термоэлектрический генератор (ТЭГ), установленный на газоотводящей трубе действующего котла и гидротурбину,

установленную в контуре циркуляции теплоносителя котла.

ТЭГ – устройство, которое позволяет генерировать собственную электрическую энергию, принцип его работы основан на преобразования тепловой энергии в электричество посредством использования в его конструкции термоэлементов (термоэлектрических материалов). Весь функционал данного элемента заключается в эффекте образования электрического тока путем охлаждения и нагревания пластины модуля Пельтье (рис. 3). В наше время этот термоэлектрический эффект нашел широкое применение в различных сферах и отраслях электроники [6].

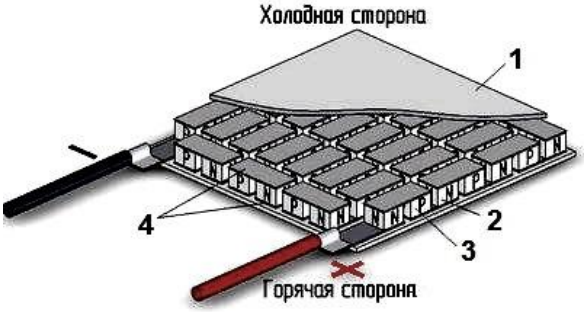


**Рис. 3**. Модуль элемента Пельтье: 1 - изолятор керамический; 2 - проводник «n – типа»; 3 - проводник «p – типа»; 4 - проводник медный

**Fig. 3.** Peltier element module: 1 - ceramic insulator; 2 - "n - type" conductor; 3 - "p - type" conductor; 4 - copper conductor

Необходимым условием подобных энергопроектов является установка запасающих электрическую энергию устройств. В работе проведен расчет и подбор аккумулирующего оборудования. Оно будет установлено с целью запасания электрической энергии, вырабатываемой за счет всех генераторов электричества. С аккумулирующих устройств, после преобразования, электроэнергия будет подаваться для питания потребителей всего объекта. В момент, пиковой нагрузки используется запасенная энергия для электропитания потребителей дома. Таким образом можно избежать дополнительной генерации энергии за счет резервных источников или питающей линии. Однако, на практике нельзя допускать разряда аккумулятора более чем на 80% от запасенной энергии, в противном случае он может выйти из строя [7].

Результатом вышеизложенного стал усовершенствованный проект автономного электроснабжения жилого дома, расположенного вблизи реки, который заключается в установке ТЭГ на дымоходе от котла, гидротурбины (ГТ) в контуре циркуляции теплоносителя котла и установке более мощных гидроагрегатов на русле протекающей речки. Предложенное схемное решение (рис. 4), в ходе его реализации, окажет положительный эффект на экономическую и экологическую сторону данного проекта, позволит приобрести большую независимость и автономию от центральной электрической сети, позволит экономить природные ресурсы, что актуально в плане реализации государственной программы по энергосбережению.

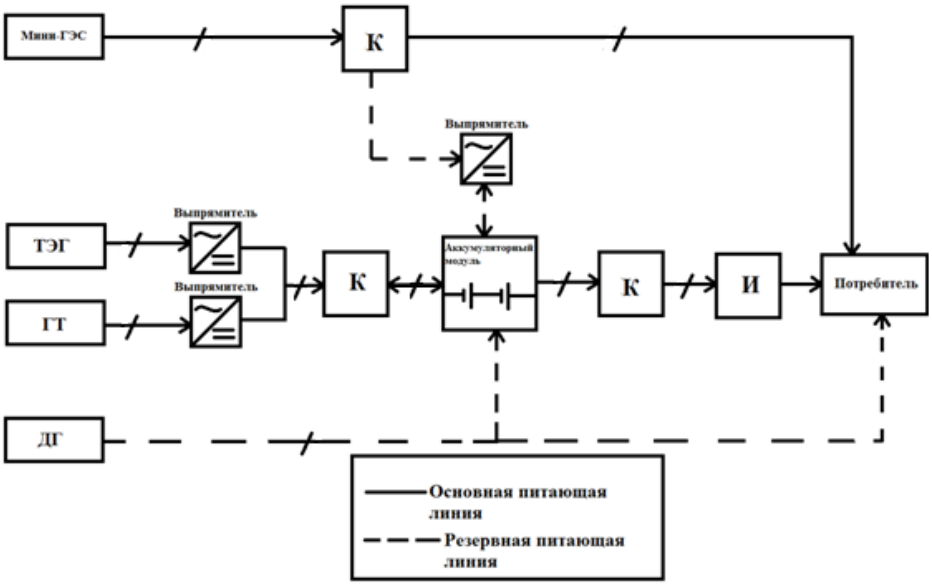


**Рис. 4**. Предлагаемая комбинированная система автономного электроснабжения объекта

**Fig. 4.** The proposed combined system of autonomous power supply of the facility

## ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Целью данной работы является оценка возможности установки комбинированного энергетического комплекса, на базе гидротурбин и термоэлектрогенератора, для обеспечения автономного электроснабжения объекта. Так же возможность и целесообразность установки мини-ГЭС на полноводной реке, расположенной вблизи объекта, обеспечивающих генерацию электроэнергии для собственных нужд за счет избыточной энергии проходящей воды, с учетом климатических и рельефных особенностей, имеющегося специализированного оборудования на энергорынке Крыма и оценке экономического эффекта от внедрения энергосберегающей комбинированной энергосистемы.

Для разработки технических решений по повышению энергоэффективности систем автономного электроснабжения, направленных на внедрение ресурсосберегающих технологий, с целью снижения потребления органических видов топлив, а именно применение мини-ГЭС и ТЭГ, был проведен анализ гидрологических параметров горных рек Крыма по данным многолетних наблюдений; обоснован выбор рациональной конструкции мини-ГЭС и ТЭГ с учетом особенности территории размещения объекта. Учитывая требования государственной программы по энергосбережению традиционных энергоносителей, предлагаемые технические решения являются весьма актуальными для автономного электроснабжения удаленных объектов Крымского региона.

В качестве объекта для разработки технических решений автономного электроснабжения удаленного объекта был выбран двухэтажный частный дом в селе Счастливое, расположенном в верховьях долины р. Бельбек у западного подножья хребта Ай-Петри [8]. Существующая ЛЭП, подходящая к селу, сильно изношена, основная магистраль идет в горной местности с резкими перепадами высот, более 100 м, следовательно, объект является труднодоступным. Местоположение объекта на топографической карте местности показано на рис. 5 [9].

**Рис. 5.** Топографическая карта местности объекта (с. Счастливое)
**Fig. 5.** Topographic map of the site (Schaslyve village)

В работе рассмотрены возможности резервации энергомощностей и внедрения энергосберегающих мероприятий, направленных на экономию потребления традиционных энергоресурсов с учетом перспективного развития энергозатрат объекта.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

-проанализировано состояние энергопотребления объекта и выявлены проблемы состояния инженерных сетей, приводящие к увеличению энергопотребления и проведен расчет электропотребления с учетом перспективного развития энергоснабжения выбранного объекта;

-рассмотрены варианты внедрения современных технологий в автономном производстве электрической энергии, а также применение электрогенерирующих систем на базе ВИЭ с учетом специфики объекта способствующих энергосбережению и уменьшению потребления традиционных энергоносителей;

-на примере автономного электроснабжения объекта разработан проект с применением современных технологий, энергосберегающих мероприятий и использования оборудования на базе ВИЭ, спроектирована функциональная схема комплексного распределения электроэнергии труднодоступного объекта;

-проведен эксперимент и расчет предлагаемой комбинированной системы с целью понимания эффективности и экономической выгодности реализации проекта.

Расчет и подбор оборудования, которое будет установлено на объекте является одним из главных пунктов всего проекта. Именно от выбранного оборудования зависит эффективность работы и его экономическая составляющая. Для проверки работоспособности предлагаемого автономного комплекса был разработан макет гидротурбины, который позволил оценить работу и пропускную способность гидроколеса. В данной установке было использовано в качестве основного механизма ковшовая турбина Пелтона. На данный гидроагрегат подавался напор, пропорциональный реальному напору р. Бельбек. Благодаря раскрутке колеса была снята вольт-амперная характеристика (ВАХ) и проведен расчет вырабатываемой мощности. Расчеты показали, что при таком напоре воды данная турбина работает не эффективно, следовательно, необходима турбина реактивного типа для проектируемого энергокомплекса в качестве основного электрогенерирующего объекта, сравнительная ВАХ гидротурбин представлена на рис. 6 [10].

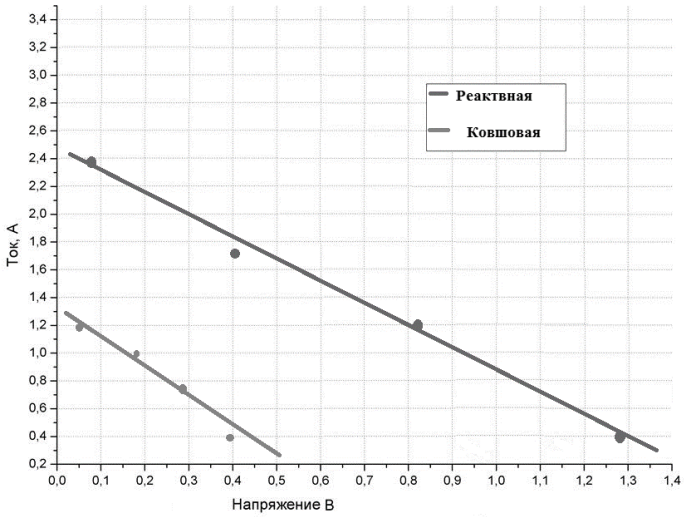


**Рис. 6.** Сравнительная ВАХ гидротурбин различного типа в составе энергокомплекса
**Fig. 6.** Comparative I - V characteristic of hydraulic turbines of various types as part of a power complex

Был проведен эксперимент с элементами Пельтье (рис. 7). На металлическую трубу дымохода были закреплены элементы Пельтье, с целью обеспечения хорошего теплового контакта применялась термопаста.

**Рис. 7.** Внешний вид одного элемента Пельтье
**Fig. 7.** Appearance of one Peltier element

Элементы были соединены последовательно для выработки требуемого напряжения. Внутри металлической трубы находился нагревательный элемент, который имитировал температурный поток газа, отходящего от котла. Для чистоты эксперимента внутри трубы поддерживалась постоянная температура, соответствующая температуре отходящих газов котла, результаты эксперимента представлены на рис. 8. Согласно методике расчета и исходя из размеров дымоходной трубы, было рассчитано, что для данного проекта потребуется 24 одинаковых блоков элементов Пельтье [11], которые будут вырабатывать электроэнергию и подавать её на заряд АБ. Суммарная генерируемая мощность составит 1,4 кВт, что позволит обеспечить до 30% от всей требуемой электроэнергии.

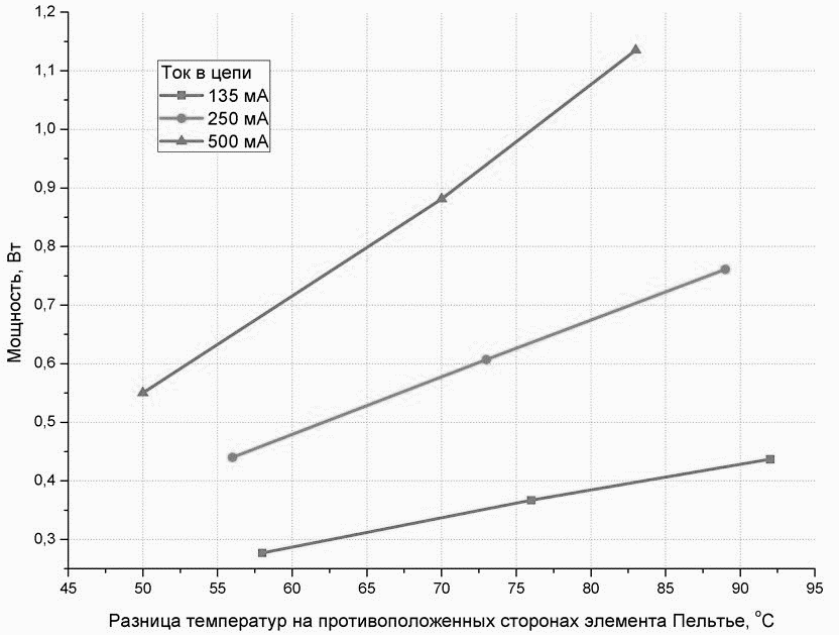


**Рис. 8.** Зависимость вырабатываемой мощности исследуемого элемента Пельтье от разности температур
**Fig. 8.** Dependence of the generated power of the investigated Peltier element on the temperature difference

Для установки в контуре циркуляции теплоносителя котла подходит гидротурбина ГА 2 (рис. 9). Проведенные расчеты по оценке вырабатываемой электрической мощности на рассмотренной ГА 2, показали, что в схему необходимо включить 8 одинаковых агрегата. Расчетный КИУМ показал значение 0,51, что для гидроагрегатов такого типа считается удовлетворительным. Исходя из произведенных расчетов можно сделать вывод, что для данного объекта подобранные турбины являются эффективными.

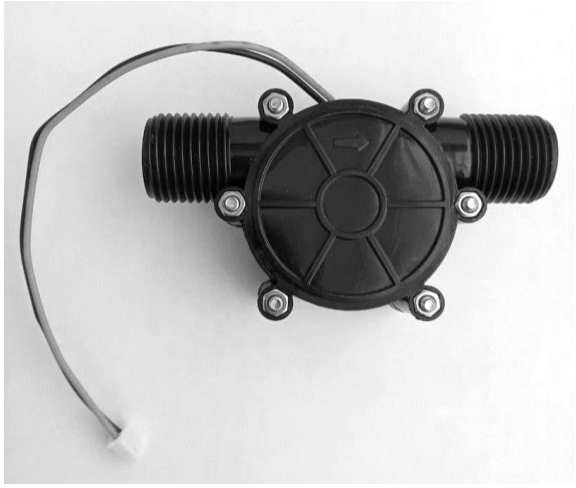

**Рис. 9.** Внешний вид гидротурбины ГА 2
**Fig. 9.** External view of the GA 2 turbine

Последующие расчеты показали, что вырабатываемой мощности элементов Пельтье хватит на 70% заряда АБ, остальные 30% будут добираться за счет работы 8 гидротурбин, установленных в контуре циркуляции теплоносителя. Входе эксперимента было установлено, что данный проект имеет право на существование и может быть применен в практических целях.

Для расчета основной турбины выбрана гидроустановка типа РО15-40. Подобные гидротурбины установлены на мини-ГЭС на о. Парамушир. Данные турбины реактивные с регулируемым поворотным направляющим аппаратом, обеспечивающим устойчивую работу в диапазоне напоров 12-28 метров при колебании расходов от 0,4 до 1,3 м$^3$/с [10]. По результатам расчета была построена графическая зависимость выработки электрической мощности гидротурбины от подаваемых на неё расхода и напора водотока. Полученный график представлен на рис. 10.

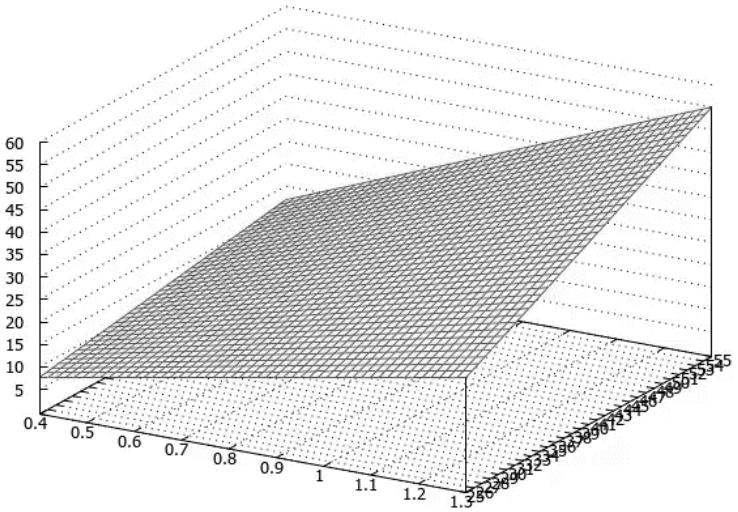


**Рис. 10.** График выработки гидротурбины РО15-40
**Fig. 10.** Schedule of the output of the hydraulic turbine PO15-40

Исходя из построенного графика (рис. 10) определяем генерируемую электрическую мощность турбины $P_{эл}$ с учетом технологических нужд станции и рассчитываем КИУМ. Рассчитанный КИУМ составил 0,58, что приемлемо для турбин такого типа.

В ходе разработки комбинированной энергоустановки, включающей в себя ТЭГ и гидроагрегаты на циркуляции теплоносителя, появилась необходимость автоматического включения и переключения заряда АБ от ТЭГ и ГТ. Был разработан автоматический контроллер, который переключает заряд АБ от ТЭГ и гидроагрегатов. Блок управления (рис. 11) выполнен на базе микроконтроллера и имеет переключатель настройки выходного напряжения в зависимости от поступающего входного, от ТЭГ или ГТ, вывод первого термоэлектрического модуля и вывод последнего термоэлектрического модуля соединены через блок реле с входами силового блока в котором формируется выходное напряжение устройства, аналогично происходит переключение выхода ГТ через блок реле на вход силового блока.

Разработанная комбинированная система автономного электроснабжения (КСАЭС) работает следующим образом. Источники генерации электроэнергии на базе мини-ГЭС с однофазным генератором обеспечивают потребителя электроэнергией с требуемыми параметрами. При выработке мощности на генерирующих станциях больше потребления объектом, избыток электроэнергии идет на заряд АБ, которые разряжаются при недостатке мощности выработки на источниках генерации, компенсирую недостающую мощность потребления объекта.

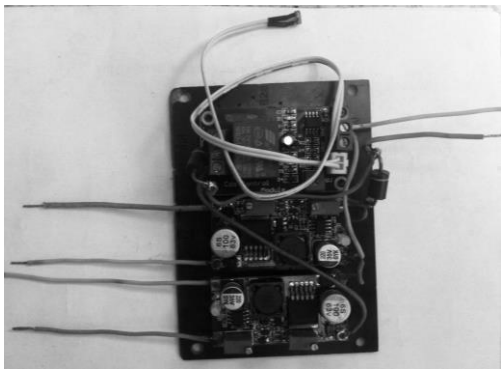

**Рис. 11.** Блок управления комбинированной системы энергоснабжения
**Fig. 11.** Control unit for combined power supply system

Главной чертой данного комплекса является наличие внешнего источника генерации электроэнергии на базе ВИЭ, подключенного к шинам питания потребителя электроэнергии (рис. 12). В проекте предусмотрен объем автоматизации, который обеспечивает оптимальный режим энергоснабжения удаленного объекта, экономию материальных и энергетических ресурсов, обеспечение условий для обслуживания технологического оборудования.

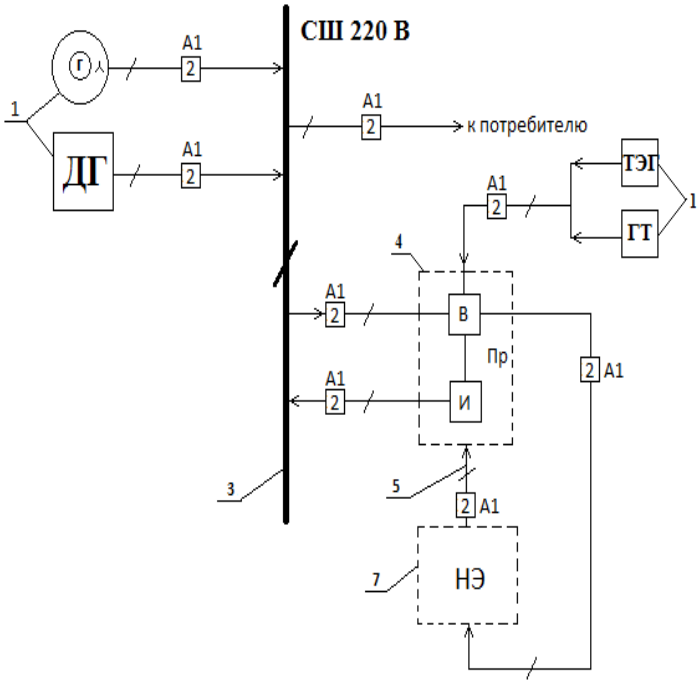


**Рис. 12.** Схемное решение децентрализованного энергоснабжения удаленного объекта в составе мини-ГЭС, ТЭГ и ГТ: 1- электрогенерирующие устройства; 2 - контроллеры; 3 - система шин; 4 - преобразователь; 5 - питающая линия
**Fig. 12.** Schematic solution of decentralized power supply of a remote facility as a part of mini-hydroelectric power plants, TEG and GT: 1- power generating devices; 2 - controllers; 3 - bus system; 4 - converter; 5 - supply line

Техническим результатом является расширение области применения автономной системы электроснабжения, связанной с обеспечением потребителя электроэнергией требуемого параметра, снижение энергозатрат и повышение быстродействия системы на переходных режимах, повышение надежности и эксплуатационных характеристик.

В альтернативной энергетике большинство проектов носят инвестиционный характер. Это означает, что получение прибыли и вложение капитала происходят не одновременно. В случае частных проектов, направленных на автономизацию электроснабжения, цель которых – обеспечить электричеством жилой объект, не прибегая к подключению центральной энергосети, это означает, что окупаемость объекта не является основной задачей данного проекта. Следовательно, в данной разработке будет целесообразно рассчитать примерную экономию от производства собственной электрической энергии. Фактор времени и коэффициент инфляции в данной работе не учитывается. Применена упрощенная смета капитальных затрат на создание автономной энергоустановки, затраты на монтаж приняты равными 15% от стоимости всей установки. Суммарные затраты составили 490762 руб. Для определения экономии за счет генерации собственной электроэнергии достаточно знать потребление объекта и цену на электроэнергию, в расчетный период она составила 4,15 руб./кВт·ч. Следовательно, экономия в год составит, примерно 8000 руб.

## ВЫВОДЫ

1.Рассмотрена возможность внедрения перспективных технологий на базе ВИЭ для децентрализованного электроснабжения удаленных объектов, которые позволяют существенно снизить потребление традиционных энергоресурсов и экономить денежные средства при оплате услуг за электрическую энергию.

2.Проведен расчет системы энергопотребления объекта, с учетом возможного перспективного развития, выбраны и рассчитаны с применением математического моделирования наиболее эффективные электрогенерирующие агрегаты для данного объекта, разработаны преобразовательные устройства для обеспечения качественной электроэнергией объекта.

3.Проведенные расчеты показали, что разработанная КСАЭС является эффективной, позволит обеспечить электроэнергией дом с пиковой нагрузкой - 3,6 кВт. Генерация электроэнергии от мини – ГЭС составит 3,6 кВт при работе в нормальном режиме, 4,2 кВт в максимальном режиме, а от ТЭГ и ГТ в контуре котла - 1,6 кВт. Экономия электроэнергии от центральных сетей в течении года составит 8000 руб.

4.Проведенные мероприятия по снижению электропотребления жилого дома позволят в полной мере реализовать комплекс мер по повышению энергоэффективности и энергосбережению, что является актуальной задачей для энергодефицитного Крымского полуострова.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Курзо А.Н. Система автономного электроснабжения удаленных потребителей на базе возобновляемых источников энергии / А.Н. Курзо, С.П. Муровский// Сборник статей Международной научно-практической конференции «Успехи современной науки» (Белгород, 25.03.2017 г.). – Белгород: «Эпицентр», 2017. – С. 54-58.
2. Муровская А.С. Внедрение новых схемных решений в систему электроснабжения жилых объектов Крыма/А.С. Муровская //Строительство и техногенная безопасность. - 2018. - № 63.- С.109-117.
3. Закон Республики Крым «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности в Республике Крым» №77 – ЗРК от 28.01.2015 г. / Правительство Республики Крым. – Крым, 2015. – 19 с.
4. Андреев А.Е., Бляшко Я.И., Елистратов В.В., Кубышкин Л.И., Кудряшова И.Г. и др. Гидроэлектростанции малой мощности: Учеб. Пособие / Под. ред. Елистратова В.В. Спб.: Изд-во Политех. ун-та. - 2005. - 432 с.
5. Поверхностные водные объекты Крыма. Справочник. - Симферополь: Рескомводхоз АРК, 2004. – 113 с.
6. Гершберг И.А. Выбор оптимального ТЭМ в зависимости от условий внешнего теплообмена / И.А. Гершберг // Термоэлектрики и их применения. Доклады IX Межгосударственного семинара. – СПб., 2004. – С. 70-47.
7. Асанов М.М. Повышение эффективности и надежности работы возобновляемых источников путем аккумулирования генерируемой ими энергии / М.М. Асанов, Э.А. Бекиров // Строительство и техногенная безопасность. - 2017. - № 60. - С. 75-80.
8. Олиферов А.Н. «Гидроэнергетическая мощность рек Крыма»// Ученые записи Таврического национального университета имени В. И. Вернадского// серия «География» том 26(65).- 2013.- С.243-245.
9. Электронный ресурс: // https://crimeaz.ru/vodoemy-kryma / Счастливенское водохранилище (Крым).
10. Муровский С.П. Внедрение ресурсосберегающих технологий в систему электроснабжения промышленных предприятий/ С.П. Муровский, В.О. Купленый, Б.И. Тараненко // Строительство и техногенная безопасность. - 2017. - № 60. - С. 97-103.
11. Тахистов Ф.Ю. Расчет параметров термоэлектрических модулей с учетом температурных зависимостей термоэлектрических свойств // Термоэлектрики и их применения.- СПб.: ФТИ, 2002.- 175 с.


# WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF POWER SUPPLY TO REMOTE OBJECTS


Murovsky S.P.

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation, murovski@inbox.ru



**Summary:** The paper considers ways to improve the efficiency of combined power supply systems for remote facilities based on renewable energy sources. The developed circuit solution for the combined power supply of remote facilities based on mini-hydroelectric power plants, GT and thermoelectric generators installed on the boiler's gas outlet pipe will allow redistributing energy between consumers inside the facility or storing it in the electrochemical storage system during the period of minimum consumption.



**Key words:** power supply, mini-HPP, thermoelectric generator, combined power supply systems, resource saving, Crimea