

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Макаров Вячеслав Олегович

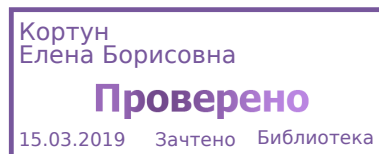
**Разработка мобильной микроГЭС  
для автономного электроснабжения**

Направление подготовки

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2019



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет»

Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент  
Кузьмин Роман Вячеславович

Рецензент: Кандидат технических наук  
Киница Олег Игоревич,  
директор учебно-производственного центра  
КГАПОУ «Губернаторский авиастроитель-  
ный колледж г. Комсомольска-на-Амуре  
(Межрегиональный центр компетенций)»

Защита состоится «15» марта 2019 года в 09 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 203/3.

Автореферат разослан 7 марта 2019 г.

Секретарь ГЭК

Н.Н. Мельникова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

На сегодняшний день сохраняется проблема обеспечения электроэнергией потребителей, отдалённых от централизованной системы энергоснабжения, обусловленная значительной удалённостью, труднодоступностью и изолированностью данных потребителей. При этом в энергетическом обеспечении отдалённых и труднодоступных регионов России большая роль принадлежит малой энергетике, которая обеспечивает электрической и тепловой энергией 70 % территории страны. Из года в год наблюдается всё бóльшая тенденция роста стоимости добычи ископаемых природных ресурсов и производства электрической энергии, а значит использовать альтернативные – возобновляемые источники электроэнергии (ВИЭ) более целесообразно.

ВИЭ сегодня – это наиболее успешно развивающееся направление в электро- и теплоэнергетике. Возобновляемые ресурсы имеют большое значение в децентрализованных системах электроснабжения, характерных для значительных территорий России и других стран.

Современное развитие электроэнергетики в России характеризуется ежегодным ростом стоимости производства энергии. Наибольшее повышение цен на электроэнергию наблюдается в Сибири, на Дальнем Востоке, Камчатке, Курильских островах, где в основном используются децентрализованные системы электроснабжения на базе дизельных электростанций, работающих на привозном топливе.

Себестоимость производства электроэнергии на Дальнем Востоке – одна из самых высоких в стране: 1 кВт/ч обходится от 20 до 100 р. (в удалённых районах). Но конечные потребители этого не замечают: самый большой тариф на электричество для населения (на Чукотском полуострове) составляет 9 рублей за кВт/ч – разницу доплачивают из местных бюджетов. Причин этому несколько. Одна из них – изолированность системы Дальнего Востока от единой энергосистемы страны. Вторая причина – топливо, которое используется для производства тепла и электричества.

Многие страны и регионы во всём мире решают проблемы обеспечения потребителей электроэнергией на основе развития возобновляемой энергетики, и эти решения, во многих случаях, успешны. Целесообразность и масштаб использования ВИЭ определяется в первую очередь их экономической эффективностью и конкурентоспособностью с традиционными энергетическими технологиями. Развитие технической и законодательной базы и устойчивые тенденции роста стоимости за топливно-энергетические ресурсы уже сегодня определяют технико-экономические преимущества электростанций, использующих ВИЭ.

Из вышесказанного очевидно, что в будущем эти преимущества будут возрастать, тем самым расширяя области применения ВИЭ и увеличивая её вклад в мировой энергетический баланс.

**Целью работы** является разработка и исследование мобильной микроГЭС, для автономного электроснабжения удаленных потребителей.

**Основные задачи, решаемые в работе.** Для достижения цели работы поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ типов гидроэлектростанций по способу выработки электроэнергии и выбор наиболее подходящей по критерию мобильности.
2. Исследование существующих технических решений; проведение патентного поиска и анализ его результатов.
3. Расчёт параметров и характеристик системы микроГЭС.
4. Разработка и исследование математической модели микроГЭС.
5. Создание физической модели мобильной микроГЭС.
6. Проведение экономического расчёта разработанной гидроустановки.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования в работе являются гидроэлектростанции малой мощности (до 100 кВт). Предмет исследований – мобильная микроГЭС для автономного электроснабжения, построенная на базе генератора переменного тока.

**Основные методы исследований.** Для решения поставленных задач применялись аналитические и численные методы решения алгебраических

уравнений, методы теоретической электротехники, методы исследования и проектирования электрических машин при помощи имитационного компьютерного моделирования. При выполнении работы использовалась графическая среда имитационного моделирования Simulink, интегрированная в программную среду MATLAB. Также для создания действующего образца мобильной микроГЭС, использовалось физическое моделирование с применением современной элементно-аппаратной базы (синхронный генератор Siemens 1FT6034, оптический датчик скорости вращения и многофункциональный мультиметр ASD DT-831).

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке математической модели системы децентрализованного электроснабжения на основе асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением, и в исследовании электромеханических процессов в системе, а также в физическом моделировании установки мобильной микроГЭС, созданной на основе синхронного генератора.

**Достоверность и обоснованность результатов** обеспечивается корректным использованием математического аппарата, качественным соответствием аналитических рассуждений и результатов, полученных путём моделирования, применением апробированного программного обеспечения MATLAB R2014a. Работоспособность мобильной микроГЭС подтверждена созданием действующего образца и проведением натурного физического эксперимента.

**Практическую значимость** представляют следующие основные результаты работы:

1. Рекомендации к выполнению расчётов системы микроГЭС.
2. Математическая модель, позволяющая проводить численные эксперименты и получать результаты, прогнозирующие работу и эффективность предложенной системы.
3. Созданная физическая модель мобильной микроГЭС.

**Личный вклад автора.** Диссертация является результатом самостоятельных исследований автора, которые проводились с непосредственным его

участием. Все научные положения и результаты, определяющие научную новизну и практическую значимость исследования, получены лично автором. Личное участие автора подтверждено публикациями и выступлениями на научно-практических конференциях. Описываемая в работе физическая модель микроГЭС также создана и исследована лично автором.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты проведенного анализа существующих технических решений малых и микроГЭС, а также результаты проведенного патентного поиска.
2. Разработка математической модели микроГЭС и результаты математического моделирования.
3. Создание экспериментального образца мобильной микроГЭС и проведение физического эксперимента.
4. Результаты экономического обоснования применения микроГЭС.

**Апробация результатов исследований.** Основные научные положения и результаты докладывались и обсуждались на II Всероссийской научно-практической конференции, Электропривод на транспорте и в промышленности (Хабаровск, 2018 г.).

**Публикации.**

Кузьмин, Р. В. Анализ и перспективы использования децентрализованных систем энергоснабжения на базе малых и микрогидроэлектростанций / Р. В. Кузьмин, В. О. Макаров, А. С. Толочкин // Электропривод на транспорте и в промышленности: тр. II Всерос. науч.-практ. конф. (Хабаровск, 20–21 сентября 2018 г.) / под ред. С. В. Власьевского. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2018. – С. 290-293.

**Структура и объём магистерской диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения и списка использованных источников из 28 наименований, содержит 86 страниц машинописного текста, 45 рисунков, 12 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи диссертационного исследования, а также методы исследования, благодаря которым решены поставленные задачи, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведена общая характеристика и структура диссертации. а также производится определение объекта и предмета данного исследования.

**В первой главе** дана общая характеристика и классификация возобновляемых источников энергии (ВИЭ), рассмотрены плюсы и минусы «зелёной энергетики». Главными плюсами ВИЭ по сравнению с источниками энергии на органическом топливе являются почти полная неисчерпаемость ресурсов, повсеместное их распространение, отсутствие затрат на топливо и выбросов вредных веществ в окружающую среду, а значит, экологичность. Приведён анализ типов гидроэлектростанций по способу выработки электроэнергии.

Для решения задач диссертационного исследования, по результатам анализа, была выбрана деривационная (напорная) гидроэлектростанция, требующая минимум усилий и капитальных затрат на монтаж и подключение. Деривационные ГЭС используются в случаях, когда имеется большой перепад реки.

Работает деривационная ГЭС следующим образом: часть водного потока реки с помощью водозаборных сооружений 1 отводится в водонапорный трубопровод 2. Напор воды приводит в движение гидротурбину 3 и электрический генератор, вырабатывающий электроэнергию, которая по линиям электропередач передается потребителю (рисунок 1).

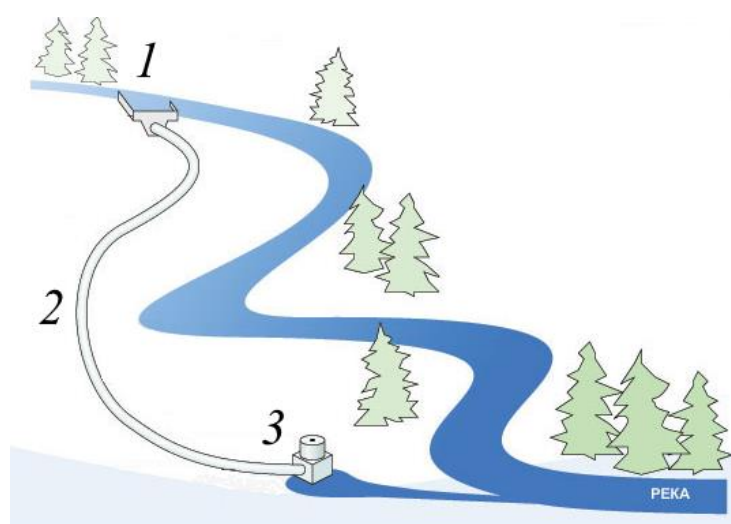
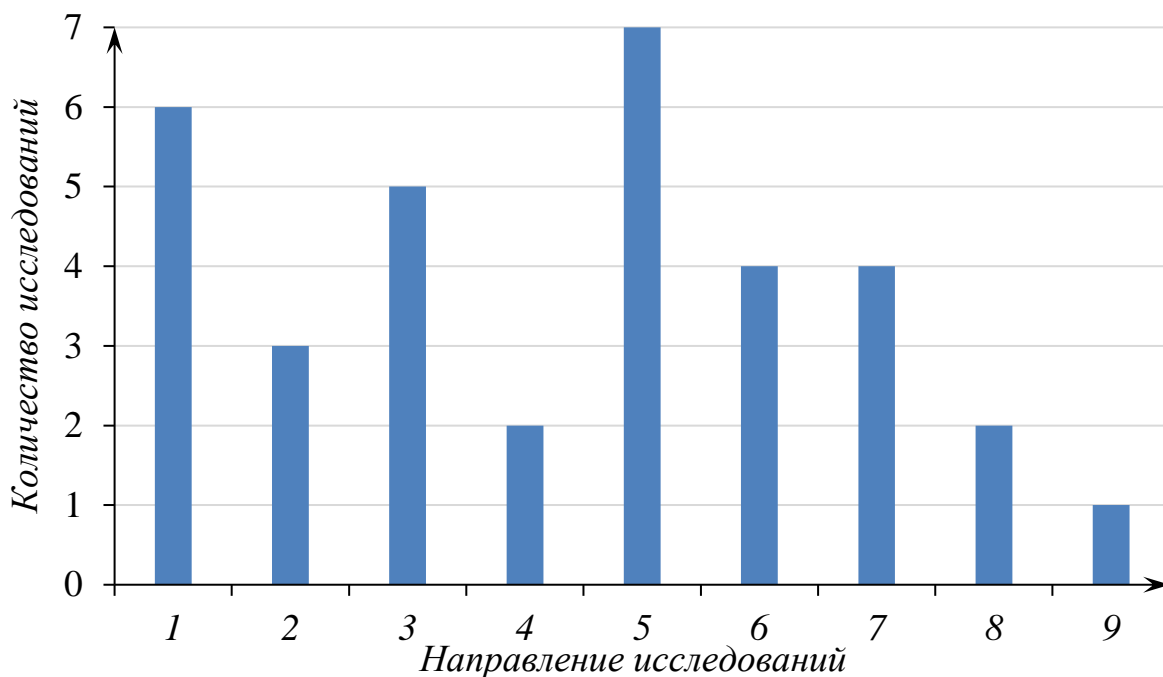


Рисунок 1 – Схема создания напора в деривационной микроГЭС

**Во второй главе** проведены исследования в области истории развития гидроэнергетики, приведены перспективы использования малых- и микроГЭС; рассмотрены некоторые разновидности микроГЭС. Также в главе произведён анализ представлены результаты патентного поиска по отечественным и зарубежным изобретениям в области микрогидроэнергетики (рисунок 2).



1 – упрощение конструкции, компактность; 2 – повышение надежности; 3 – повышение КПД; 4 – универсальность; 5 – технологичность; 6 – снижение стоимости; 7 – обеспечение инвариантности; 8 – мобильность; 9 – снижение воздействия на окружающую среду.

Рисунок 2 – Направления развития микро ГЭС

Глядя на гистограмму можно сделать вывод о том, что в данном направлении развития, чаще всего целью разработки было повышение технологичности, упрощение конструкции и повышение КПД микроГЭС.

Данные показатели – причина малого использования микроГЭС (из-за низких показателей энергообеспечения и больших массо-габаритных характеристик установок).

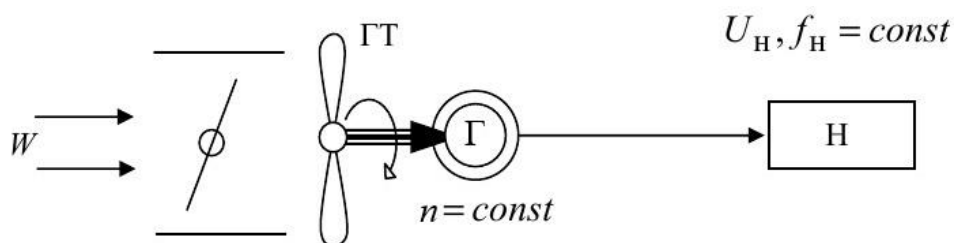
Реже всего в патентах рассматривается уменьшение воздействия на окружающую среду, так как все существующие разработки микроГЭС оказывают минимальное влияние на экологию.



В третьей главе приведен анализ различных типов гидротурбин, выявлены их плюсы и минусы для использования в составе микроГЭС. Рассмотрены методы стабилизации выходных параметров гидроэнергетической системы.

Необходимость наличия в составе микроГЭС стабилизирующей системы обусловлена тем, что соизмеримость мощностей турбины, генератора и нагрузки приводит к значительному изменению выходных электрических параметров микроГЭС при изменении ее режима работы.

Работа *системы с регулированием частоты вращения гидротурбины* (рисунок 3) заключается в изменении угла поворота рабочих лопастей или регулированием расхода воды. При этом происходит выравнивание мощности, развиваемой турбиной, и мощности нагрузки.

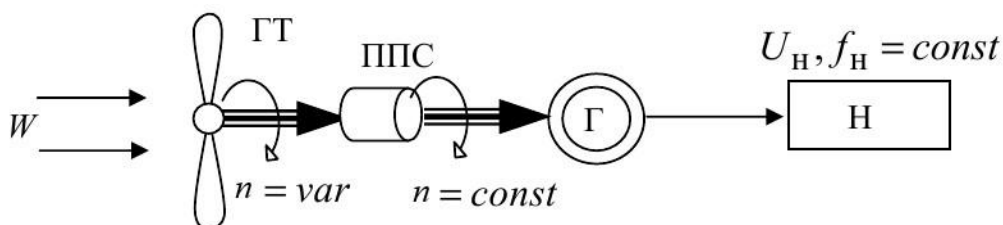


$W$  – энергия потока воды;  $ГТ$  – гидротурбина;  $Г$  – генератор;  $Н$  – нагрузка.

Рисунок 3 – Система с регулированием частоты вращения гидротурбины

Однако, регулируемые турбины имеют сложную конструкцию и большую инерционность регулирования, из-за которой частота вращения в переходных режимах значительно отклоняется от номинальной.

*Системы с приводом постоянной скорости* (рисунок 4) обеспечивают постоянство частоты вращения выходного вала при изменяющейся в определенных пределах частоте вращения приводной турбины.

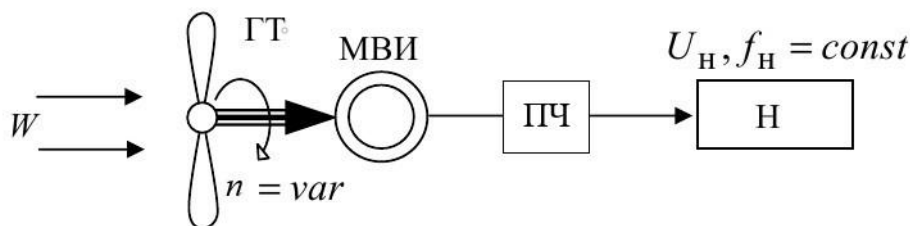


*ППС* – привод постоянной скорости.

Рисунок 4 – Система с приводом постоянной скорости

В электроустановках, использующих ВИЭ, обычно применяют ППС с аккумулярованием механической энергии. В микроГЭС подобные системы могут применяться при малых кинетических энергиях потока из-за низкого КПД.

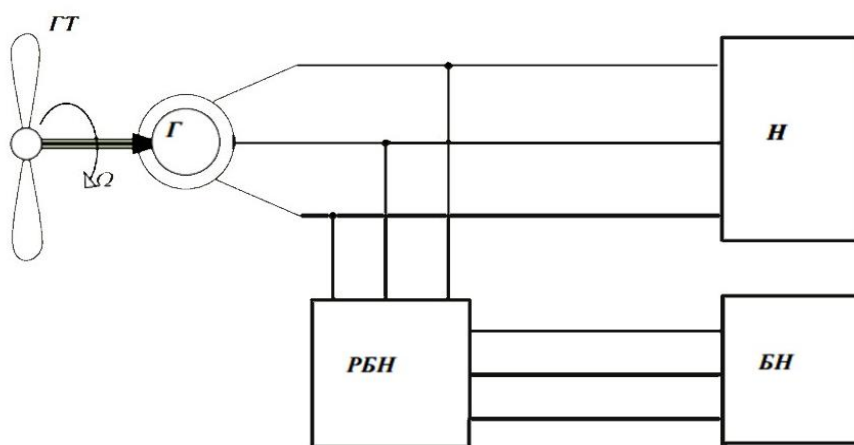
В *системах с преобразователями частоты* машинно-вентильные источники электропитания позволяют стабилизировать частоту генерируемого переменного тока при изменяющейся в широком диапазоне частоте вращения привода системы (рисунок 5).



*МВИ* – машинно-вентильный источник; *ПЧ* – преобразователь частоты.

Рисунок 5 – Система с преобразователем частоты

К достоинствам данной системы относятся высокое качество выходного напряжения и независимость электрических параметров источника от режима работы турбины и параметров нагрузки. Среди недостатков – высокая стоимость преобразовательной части ввиду её большой конструктивной сложности и необходимость наличия специальных генераторов, способных работать в широком диапазоне частот вращения.



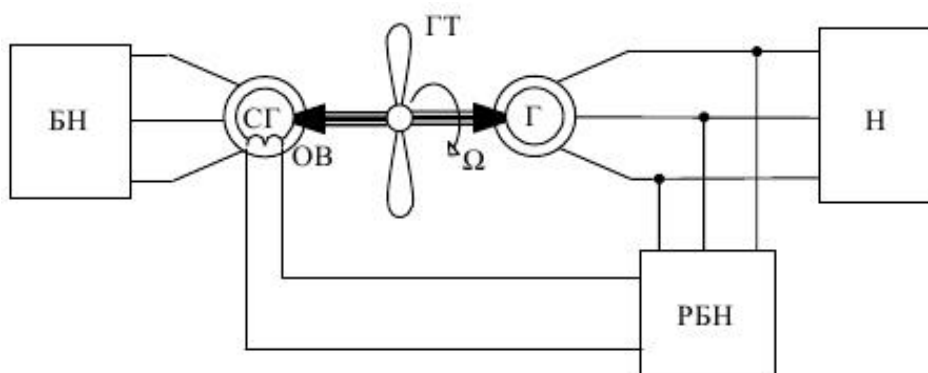
*БН* – балластная нагрузка; *РБН* – регулятор балластной нагрузки.

Рисунок 6 – Система автобалластного регулирования

*Система автобалластного регулирования* выходных параметров микроГЭС (рисунок 6) получила широкое распространение благодаря достаточно

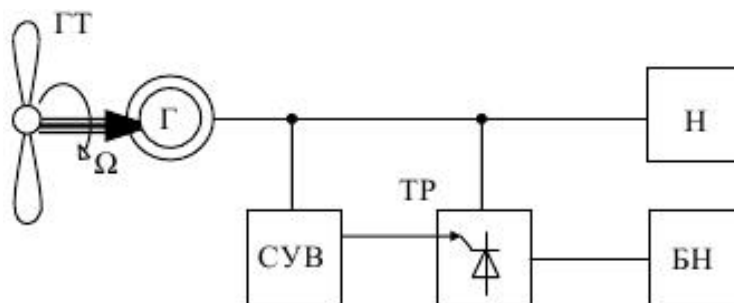
высокому быстродействию, возможности использования как синхронных, так и асинхронных машин, а также использования общепромышленных генераторов без запаса механической прочности.

*Системы со стабилизацией тормозного момента* характеризуются простотой установки, небольшой мощностью цепей управления и высоким быстродействием, но обладают рядом недостатков, среди которых невозможность компенсации возможной несимметрии нагрузки, необходимость использования двух электрических машин соизмеримой мощности и дополнительного регулятора напряжения основного генератора (рисунок 7).



СГ – синхронный генератор; ОВ – обмотка возбуждения  
Рисунок 7 – Система со стабилизацией тормозного момента

*Система стабилизации с фазовым управлением* (рисунок 8) обладает относительно простыми электрическими схемами и плавным регулированием, однако, на выходе появляются нелинейные искажения формы кривых фазных токов и напряжений генератора.



СУВ – система управления вентилями; ТР – тиристорный регулятор  
Рисунок 8 – Структурная схема микроГЭС с фазовым управлением

Также в главе произведён расчёт гидротурбины и асинхронной машины с короткозамкнутым ротором.

**Четвёртая глава** содержит разработку математической модели системы микрогидроэлектростанции с использованием имитационного компьютерного моделирования. Подробно рассмотрены дифференциальные уравнения модели асинхронной машины. Приведены рекомендации к построению математической модели в программной среде MATLAB с помощью стандартных блоков. Созданная модель (рисунок 9) послужила для исследования автономной системы электроснабжения на базе асинхронного генератора путём проведения ряда экспериментов, результаты которых представлены в работе.

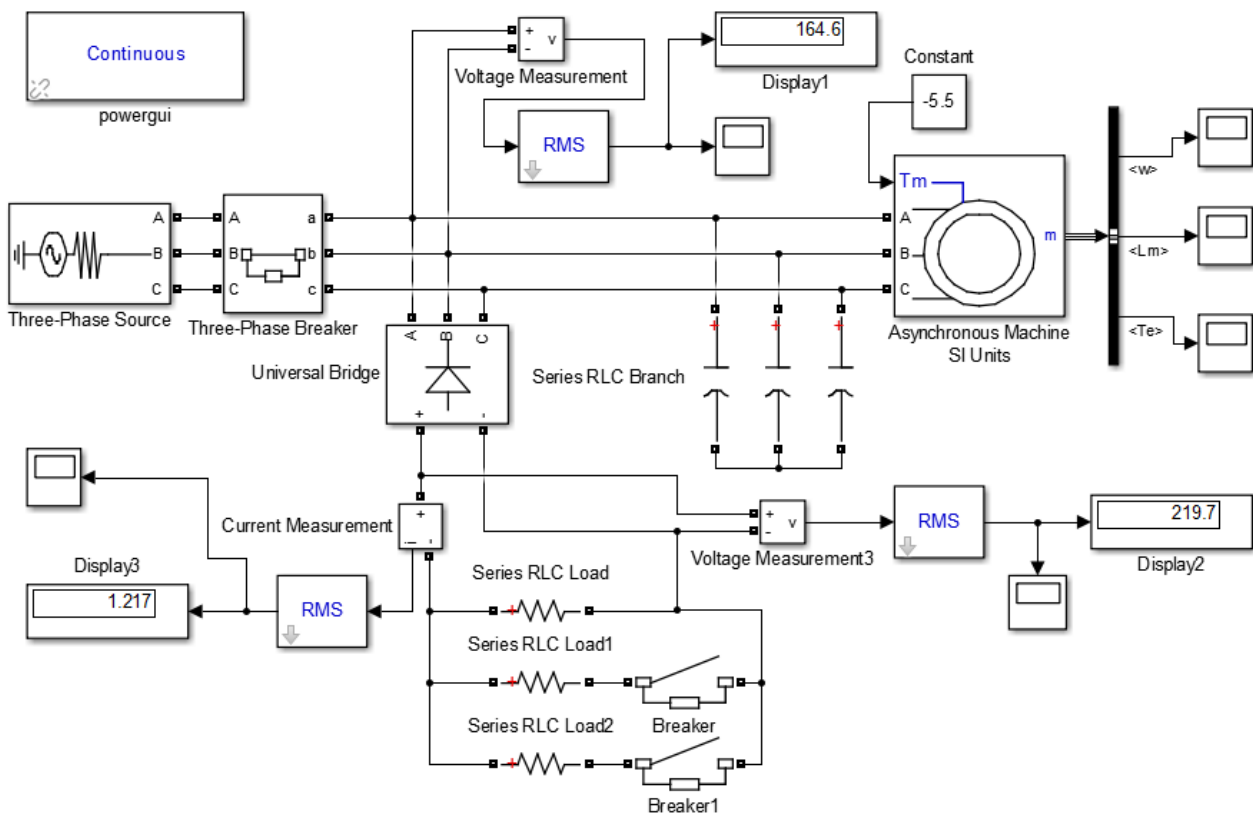


Рисунок 9 – Математическая модель микроГЭС с набросом нагрузки

Эксперимент начинается при включённом в схему трёхфазном источнике напряжения. После окончания первой секунды ( $t \geq 1\text{c}$ ), конденсаторы заряжаются. Выключатель переменного тока размыкает свой контакт, тем самым отключая линию, по которой питалась асинхронная машина от источника напряжения. На вал генератора подается постоянный отрицательный момент, а подключённые в цепь возбуждения заряженные конденсаторы переводят машину в генераторный режим. Осциллограммы переходного процессов напряжения и тока представлены на рисунках 10 и 11.

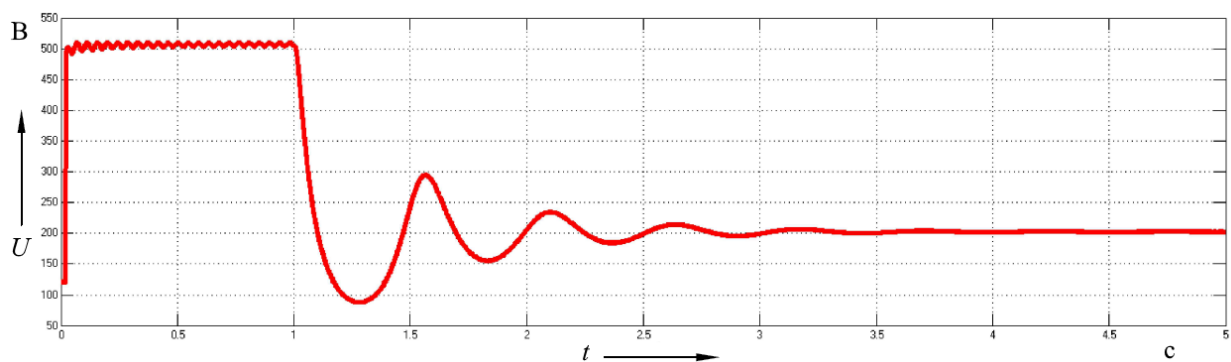


Рисунок 10 – Осциллограмма выпрямленного напряжения на нагрузке

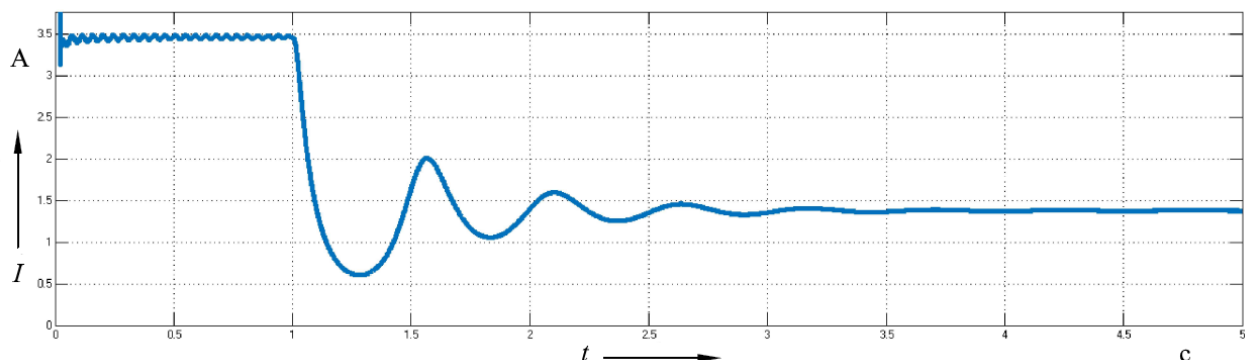


Рисунок 11 – Осциллограмма выпрямленного тока на нагрузке

Проведены исследования математической модели с учётом наброса нагрузки. Нагрузка  $P_1 = 800$  Вт включена в схему изначально. Нагрузки  $P_2$  и  $P_3$ , каждая по 200 Вт добавляются к основной нагрузке на четвёртой и шестой секундах моделирования (результаты на рисунках 11 и 12).

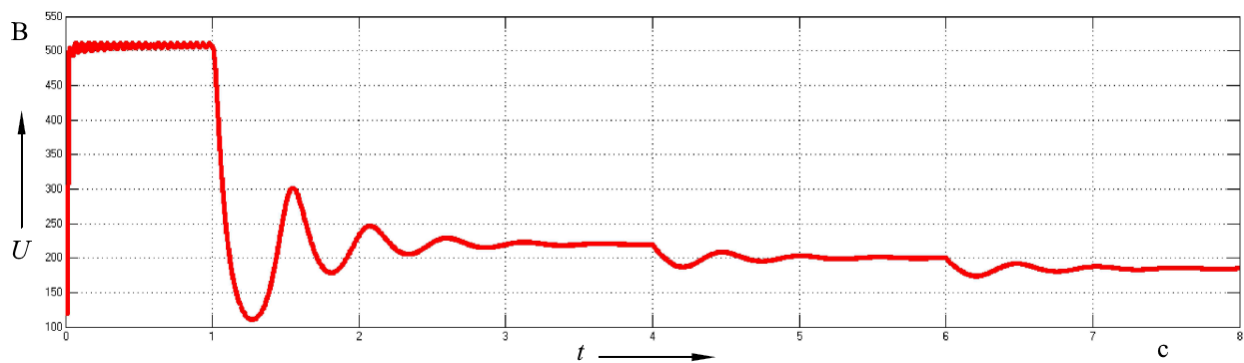


Рисунок 11 – Осциллограмма напряжения при набросе нагрузки

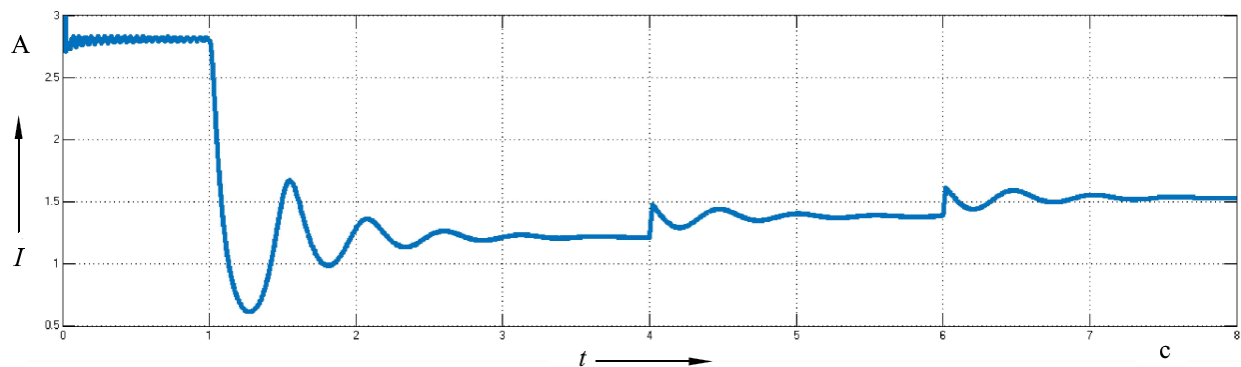


Рисунок 12 – Осциллограмма тока при набросе нагрузки

По осциллограммам, представленным выше, видно, что при увеличении активной нагрузки происходит просадка напряжения и скачок тока, что является нормальным явлением.

Также проведено исследование зависимостей тока и напряжения от нагрузки при изменении величины и характера нагрузки ( $\cos\phi$ ). Для это в математическую модель была добавлена активно-индуктивная нагрузка (рисунок 13), которая в ходе эксперимента изменялась по величине и характеру.

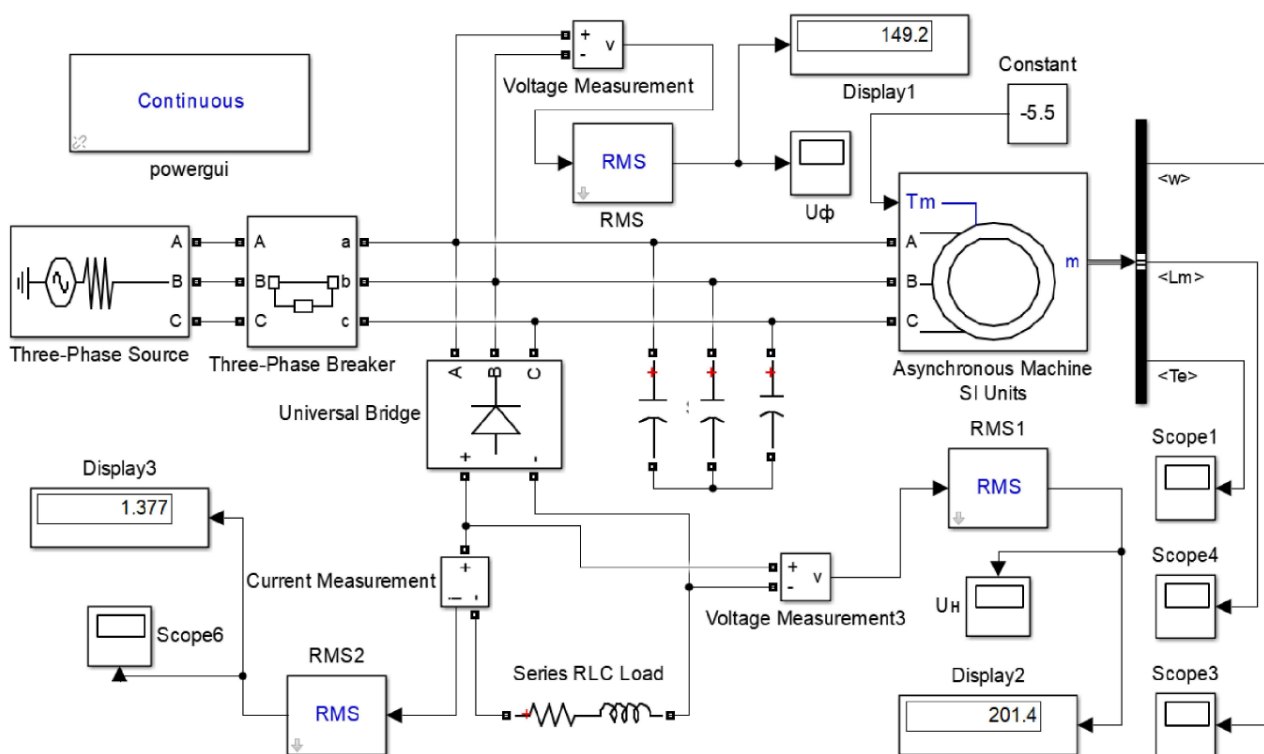


Рисунок 13 – Математическая модель с учётом величины и характера нагрузки

По экспериментальным данным, полученным в ходе эксперимента, построены графики функции напряжения и тока от величины и характера нагрузки, представленные на рисунках 14 и 15.

По результатам проведённых экспериментов следует вывод о том, что данная математическая модель работает адекватно и может служить для исследования автономной системы электроснабжения на базе асинхронного генератора. Математическая модель позволяет исследовать выходные электрические параметры генератора, преобразователя, а также всех переменных входящих в состав модели. Процессы моделирования показали, что выходные параметры напряжения и тока на нагрузке регулируемые.

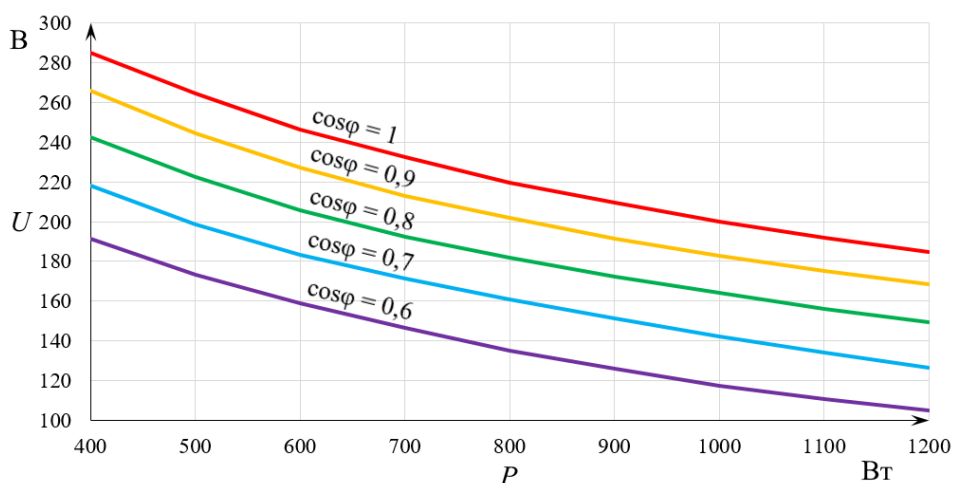


Рисунок 14 – Зависимость напряжения от величины и характера нагрузки

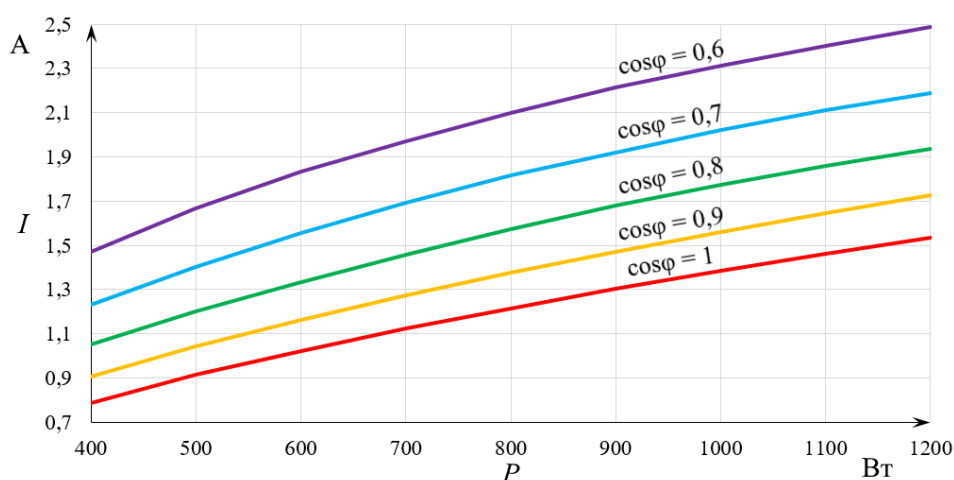


Рисунок 15 – Зависимость тока от величины и характера нагрузки

Изменяя в модели значения активной и реактивной мощности, момента на валу, можно добиться желаемого результата и построить графики зависимости этих величин. При увеличении активной мощности действующее напряжение на нагрузке уменьшается, а ток возрастает. Аналогичная ситуация при добавлении реактивной мощности и уменьшении полного сопротивления цепи. При увеличении отрицательного момента вращения напряжение и ток возрастают.

**В пятой главе** описано создание действующего физического образца мобильной микроГЭС. При создании физического образца, были поставлены следующие требования: минимальные массо-габаритные показатели установки, для обеспечения её мобильности; минимальные финансовые вложения при создании экспериментального образца; доступность элементов конструкции.



Рисунок 16 – Синхронная машина Siemens 1FT6

В ходе поиска основных элементов, входящих в гидроустановку, была выбрана синхронная машина Siemens 1FT6034-1AK71-3AN1 с возбуждением от постоянных магнитов (рисунок 16). Данная электрическая машина подходит

для моделирования из соображений малых массо-габаритных показателей, а также минимальных финансовых вложений, поэтому создание физической модели осуществлялось на базе синхронной машины.

Для обеспечения компактности и мобильности было решено использовать редуктор от дрели (передаточное число 1/10), который был жёстко закреплён на валу синхронного генератора. На другом конце редуктора был оставлен сверлильный патрон для закрепления гидротурбины. Плюсом использования редуктора от дрели вместе со сверлильным патроном является возможность легко и быстро установить и снять гидротурбину, а также в дальнейшем проводить эксперименты с другими видами турбин.

Для дальнейших экспериментов было создано *гидроколесо меньничного тина* (рисунок 17), которое не нужно целиком опускать в воду – необходимо, чтобы в воде находились только лопасти колеса.

За основу данного гидроколеса было взято велосипедное колесо, по всему ободу которого жёстко закреплены 16 алюминиевых лопаток. В ходе последующих опытов, форма лопаток была изменена с плоской на U-образную.

Также было проведено исследование физического объекта, в результате которого получены графики напряжения в зависимости от величины нагрузки при различных скоростях вращения гидроколеса.



Для проведения эксперимента использовался многофункциональный мультиметр ASD DT-831, оптический датчик измерения скорости вращения, дрель (для задания постоянной скорости вращения), а также активная нагрузка – 16 ламп накаливания МН 26-0,12 мощностью 3,12 Вт. В результате получены графики зависимости напряжения от феличины нагрузки при различных скоростях вращения генератора, представленные на рисунке 18.



Рисунок 17 – Физический образец мобильной микроГЭС

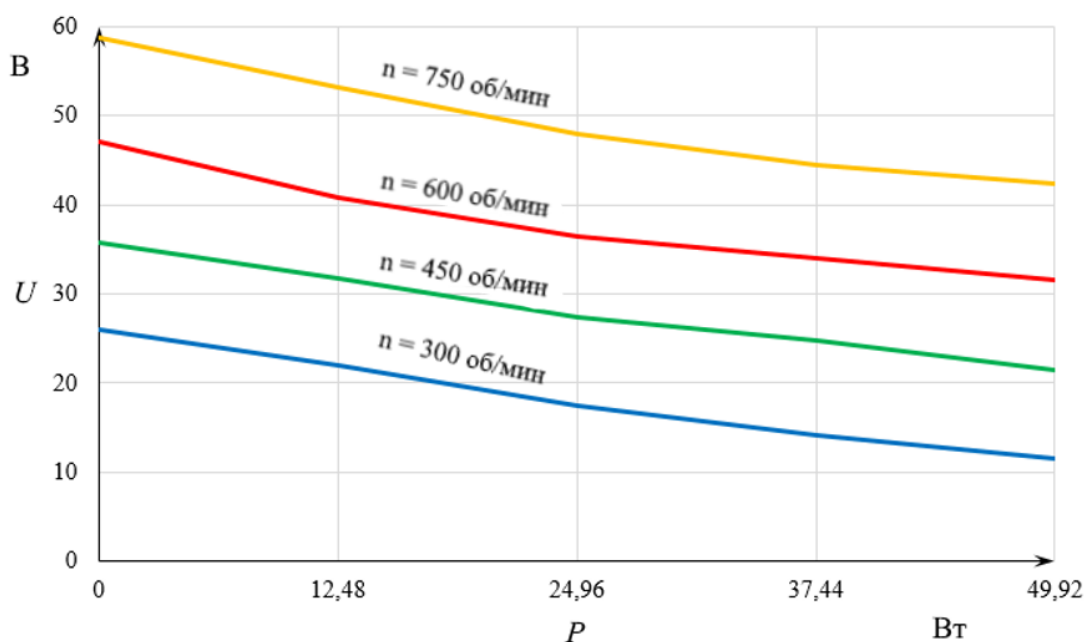


Рисунок 18 – Графики напряжения на нагрузке при различных скоростях вращения синхронного генератора

**Шестая глава** содержит экономическое обоснование целесообразности использования напорной микроГЭС в качестве альтернативного источника электроэнергии относительно дизельной электростанции. Технико-экономические показатели автономных систем электроснабжения приведены в таблице 1. Расчитанные себестоимости систем приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Технико-экономические показатели автономных систем электроснабжения

| <i>МикроГЭС</i>   |                | <i>Дизельный генератор</i>         |              |
|---|----------------|------------------------------------|--------------|
| Элемент установки   | Стоимость, руб | Параметр                           | Значение     |
| Асинхронная машина АИР132S8   | 27972          | Номинальная мощность, Вт           | 4000         |
| Осевая поворотной-лопастная (пропеллерная) гидротурбина с системой трубопровода | 15700          | Номинальное напряжение, В          | 230          |
| Система конденсаторного возбуждения СВВ65 (70 мкФ)                              | 1764           | Частота питающей сети, Гц          | 50           |
| Диодный выпрямитель   | 10524          | Топливо                            | Дизельное    |
| Инвертор  | 78250          | Объем топливного бака, л           | 16           |
| Аккумулятор Delta GX 12-200   | 49651          | Расход топлива, л/час              | 1,1          |
| <b>Стоимость оборудования</b>   | <b>181861</b>  | <b>Стоимость оборудования, руб</b> | <b>66900</b> |

Таблица 2 – Расчет себестоимостей микроГЭС и дизельного генератора

| Тип затрат                               | Стоимость, руб  |                            |
|--|-----------------|----------------------------|
|  | <i>МикроГЭС</i> | <i>Дизельный генератор</i> |
| Суммарные капитальные затраты            | 197650,58       | 66900                      |
| Расходы на обслуживание и ремонт в месяц | 4002,81         | 1115                       |
| Затраты на топливо в месяц               | 0               | 38808                      |

По итогам расчёта себестоимостей автономных систем построен график срока окупаемости микроГЭС, представленный на рисунке 19.

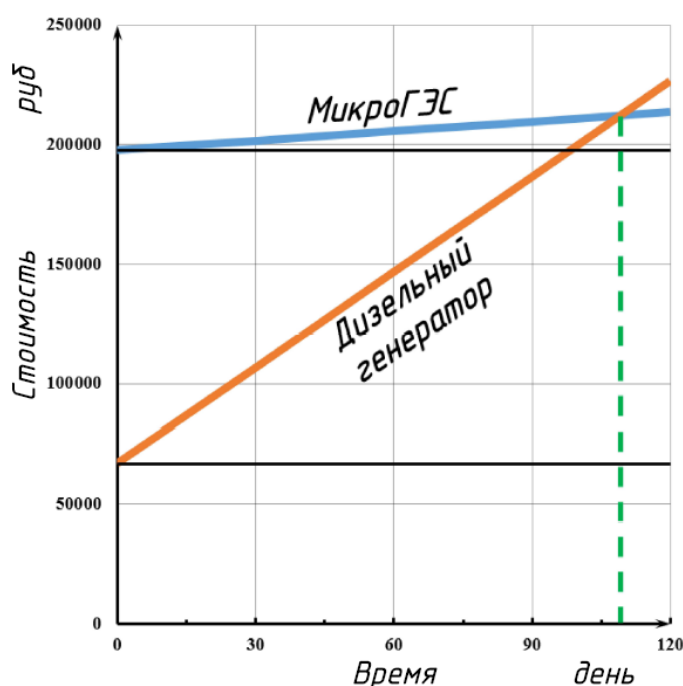


Рисунок 19 – График срока окупаемости микроГЭС

По итогам экономического расчёта, при сравнении разработанной микроГЭС с эквивалентным по мощности дизельным генератором, гидроустановка оказалась более экономичной. Полная себестоимость установки составила 212427,50 рублей, срок окупаемости – 110 дней. По графику срока окупаемости можно сделать вывод о том, что данная гидроэнергетическая установка окупается менее чем за 4 месяца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертационной работе рассмотрен вопрос использования возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ), который является высокоперспективным направлением развития человечества, имеющим массу достоинств. Особенно важно, что использование ВИЭ для получения электроэнергии, является экологичным способом и не расходуют топливные ресурсы планеты, а недостатки, снижающие их использование, с каждым годом уменьшаются, благодаря новым технологиям и инновациям в их производстве.

Целью настоящего исследования являлась разработка и исследование мобильной микроГЭС, способной в автономном режиме обеспечивать потребителя электроэнергией. Для её достижения были решены следующие задачи:

1. Проведены исследования в области истории развития гидроэнергетики, проанализированы типы гидроэлектростанций по способу выработки электроэнергии, приведены перспективы использования малых- и микроГЭС. Произведен анализ и представлены результаты патентного поиска по отечественным и зарубежным изобретениям в области микрогидроэнергетики.

2. Рассмотрены методы стабилизации выходных параметров гидроэнергетической системы. Произведён расчёт гидротурбины, а также асинхронной машины с короткозамкнутым ротором, параметры которой были использованы для создания математической модели микроГЭС. Получены и исследованы зависимости выходных электрических параметров микроГЭС от различных внешних факторов.

3. Создан действующий физический образец мобильной микроГЭС на базе синхронного генератора фирмы Siemens, проведено исследование объекта, в результате которого получены графики напряжения в зависимости от величины нагрузки при различных скоростях вращения гидроколеса.

4. Приведено обоснование экономической целесообразности использования напорной микроГЭС в качестве альтернативного источника электроэнергии относительно дизельной электростанции. На основе расчёта построен график окупаемости предлагаемой микроГЭС.

