

Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра Электроснабжения и возобновляемых источников энергии  
Специальность 6М071800 - Электроэнергетика

Допущен к защите  
Зав. кафедрой  
к.т.н., доцент Ефимова О.Н.  
\_\_\_\_\_ «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**пояснительная записка**

Тема Анализ совместной работы шинковой микроГЭС  
с генератором на постоянных магнитах

Магистрант  Нурдаулеткызы А.  
подпись (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации  
 к.т.н., доцент Умбетов Е.С.  
подпись (Ф.И.О.)

Рецензент к.т.н., доцент Джаманбаев М.А.  
подпись (Ф.И.О.)

Алматы, 2017 г.

**Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Факультет Электроэнергетический

Специальность 6М071800 - Электроэнергетика

Кафедра Электроснабжения и возобновляемых источников энергии

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Нурдаулеткызы А.  
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации Анализ совместной работы шнековой микроГЭС с генератором на постоянных магнитах

утверждена Ученым советом университета №148 от «24» октября 2016 г.

Срок сдачи законченной диссертации « 10 » июня 2017 г.

Цель исследования повышение эффективности совместной работы шнековой микроГЭС с генератором на постоянных магнитах

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1. Актуальность и востребованность данной работы
2. Режимы работы электрического генератора
3. Моделирование модели шнековой микроГЭС в программе COMSOL
4. Моделирование модели вентильного генератора на постоянных магнитах в программе COMSOL

Рекомендуемая основная литература

Филиппова Т.А., Мисриханов М.Ш., Сидоркин Ю.М., Русина А.Г. Гидроэнергетика: учеб. пособие. – 3-е изд., перераб. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 620 с.

Дукенбаев К. Возобновляемая энергия. Основы, Потенциал, Технология, Использование. – Алматы: Signet Print, 2014.

Джумамухамбетов Н.Г., Ирышков И.А., Жаналиева М.А. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Учебное пособие. Алматы: Эверо, 2010. <https://expo2017astana.com/>

Горякин Д.В. Вентильный генератор на базе асинхронной машины с управляемым самовозбуждением, 2012.

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1 Актуальность и востребованность данной работы	30.10.2015 г.	выполнено
1.1 ЕХРО - 2017	27.11.2015 г.	выполнено
1.2 Оценка малой гидроэнергетики Казахстана	24.12.2015 г.	выполнено
1.3 Гидрологические особенности и характеристики стока воды	25.01.2016 г.	выполнено
1.4 Преимущества шнековой микроГЭС	22.02.2016 г.	выполнено
1.5 Гидро -динамические и конструктивные параметры шнековых турбин	18.03.2016 г.	выполнено
1.6 Типы генераторов, используемых на микроГЭС	15.05.2016 г.	выполнено
1.7 Преимущества генераторов на постоянных магнитах	12.09.2016 г.	выполнено
2 Режимы работы электрического генератора	17.10.2016 г.	выполнено
2.1 Режим работы генератора на постоянных магнитах	28.11.2016 г.	выполнено
2.2 Вентильный генератор	20.01.2017 г.	выполнено
2.3 Режим работы вентильного генератора	27.02.2017 г.	выполнено
3 Моделирование модели шнековой турбины микроГЭС в программе COMSOL	24.04.2017 г.	выполнено
4 Моделирование модели вентильного генератора на постоянных магнитах в программе COMSOL	29.05.2017 г.	выполнено
Оформление магистерской диссертации	10.06.2017 г.	выполнено

Дата выдачи задания 1 ноября 2015 года

Заведующий кафедрой  (Ефимова О.Н.)  
(подпись) (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации  (Умбетов Е.С.)  
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант  (Нурдаулеткызы А.)  
(подпись) (Ф.И.О.)

## **Андатпа**

Диссертациялық жұмыста тұрақты магниттегі генераторы бар иірімді микроГЭС-тің бірлескен жұмысын талданды. Тұрақты магниттегі генераторлар жұмысының әртүрлі режимдері қарастырылды. Тұрақты магниттегі генераторлар орамдарын ауыстыру жүйесін қалыптастыру өз алдында электр энергиясын өндіруді жоғарлатады және пайдалы әсер коэффициентінің жақсартуымен генератор жұмысының диапазонын кеңейтуге мүмкіндік туғызады.

## **Аннотация**

В данной диссертационной работе была проанализирована совместная работа шнековой микроГЭС с генератором на постоянных магнитах. Были рассмотрены различные режимы работы генераторов на постоянных магнитах. Формирование системы переключения обмоток генератора на постоянных магнитах позволит расширить диапазон работы генератора с улучшенным коэффициентом полезного действия, что в свою очередь увеличит выработку энергии.

## **Annotation**

In this thesis, the joint work of a screw micro HPP with a generator on permanent magnets was analyzed. Different modes of operation of generators on permanent magnets were considered. The formation of a system for switching the generator windings to permanent magnets will expand the range of operation of the generator with an improved coefficient of efficiency, which in turn will increase the generation of energy.

## Содержание

Введение.....	6
1 Актуальность и востребованность данной работы.....	8
1.1 ЕХРО - 2017 .....	8
1.2 Оценка малой гидроэнергетики Казахстана.....	11
1.3 Гидрологические особенности и характеристики стока воды .....	20
1.4 Преимущества шнековой микроГЭС .....	25
1.5 Гидро -динамические и конструктивные параметры шнековых турбин	28
1.6 Типы генераторов, используемых на микроГЭС .....	38
1.7 Преимущества генераторов на постоянных магнитах .....	44
2 Режимы работы электрического генератора .....	46
2.1 Режим работы генератора на постоянных магнитах .....	46
2.2 Вентильный генератор.....	53
2.3 Режим работы вентильного генератора на постоянных магнитах.....	57
3 Моделирование модели шнековой микроГЭС в программе COMSOL.....	62
3.1 Создание методики моделирования .....	62
3.2 Описание средства моделирования COMSOL .....	63
3.3 Проведение исследований .....	65
3.4 Результаты модельного исследования характеристик микроГЭС .....	68
4 Моделирование модели вентильного генератора на постоянных магнитах в программе COMSOL.....	74
4.1 Описание средства моделирования COMSOL .....	74
4.2 Проведение исследований .....	75
Заключение .....	83
Перечень сокращений и обозначений.....	85
Список литературы .....	86

## Введение

На сегодняшний день уровень жизни человечества напрямую зависит от энергии, точнее от услуг, получаемых при ее выработке. Добыча, доставка, переработка, преобразование энергии негативно сказываются на окружающей среде, поэтому одной из самых актуальных проблем человечества является «энергетическая проблема», в сочетании с «экологической».

В ближайшем будущем данная позиция не изменится. Весь мир обсуждает вопрос о непосредственных угрозах антропогенного парникового эффекта и это лишь один из немногих примеров. Вследствие того, что степень осознанности человечества растет, признаются и проблемы, относящиеся к использованию энергии в самом широком смысле этого слова. Это все ведет к повышению интереса к тематике возобновляемые источники энергии.

На данный момент мировое сообщество уделяет особое внимание альтернативным и возобновляемым источникам энергии.

Вследствие развития и актуальности возобновляемых источников энергии тематика международной выставки EXPO-2017, которая будет проходить в Казахстане под названием «Энергия будущего», осветит одну из самых важных тем, которая волнует все мировое сообщество – альтернативные источники энергии.

При организации выставки EXPO-2017 стоял вопрос о том, чтобы предусмотреть электроснабжение объектов выставки энергией за счет альтернативных источников энергии. В связи с проведением выставки EXPO-2017 в Казахстане, наша страна имеет исключительный шанс поддержать такую необходимость вследствие своего уникального географического местоположения, благодаря своему значительному энергетическому потенциалу, имея значительные возможности применения возобновляемых источников энергии.

Энергоснабжение отдаленных потребителей является актуальной проблемой, касающейся всех регионов нашей страны. Огромная территория нашего государства и невысокая плотность населения в сельских районах имеют потребность в сельских линиях электропередач, около 360 тысяч км. Энергоснабжение отдаленных потребителей нерентабельно, так как строительство и эксплуатация ЛЭП большой протяженности, как и огромные потери при передаче электрической энергии в значительной степени увеличивают стоимость электроэнергии. Для решения данной проблемы экономически и экологически более выгодным является использование неисчерпаемой энергии.

В данной магистерской диссертации рассматривается вопрос о повышении эффективности совместной работы шнековой микроГЭС с генератором на постоянных магнитах.

Для достижения указанных целей были поставлены следующие задачи: разработка и моделирование эффективного режима работы генератора на постоянных магнитах.

Объектом исследования данной работы является шнековая микроГЭС и вентильный генератор на постоянных магнитах.

Метод исследования – моделирование генератора в программе COMSOL.

В работе будут рассмотрены вопросы об актуальности нынешней разработке на территории нашего государства, будет дана оценка малой гидроэнергетики Казахстана, будут рассмотрены преимущества шнековой микроГЭС, а также гидро-динамические и конструктивные параметры шнековых турбин. В следующей во второй главе будут проанализированы режимы работы электрического генератора с постоянными магнитами. В третьей главе будут смоделированы четыре типа профиля шнекообразной гидротурбины и будет осуществлен выбор наиболее эффективного профиля. В четвертой главе будет смоделирован вентильного генератора на постоянных магнитах в программе COMSOL. Будут проанализированы четыре его четыре режима работы.

Также необходимо отметить значимость данной диссертационной работы. В настоящее время, с ростом осознанности человечества альтернативные источники все более набирают популярность, но на данный момент не настолько для того, чтобы составить реальную конкуренцию традиционным энергоносителям. Вдобавок ко всему, оказывает влияние дефицит информации и очевидная неготовность общества думать об экологически безмятежном будущем грядущих поколений. Поэтому работы такого рода являются импульсом для развития возобновляемых источников энергии в нашей стране.

## **1 Актуальность и востребованность данной работы**

### **1.1 EXPO - 2017**

Нынешнее состояние окружающей среды и ее охрана привлекают пристальное внимание Президента и Правительства РК. Поэтому экология и недропользование, в частности состояние водных объектов, регулирование процесса выброса и поглощения парниковых газов, находятся под их постоянным контролем. 25 апреля 2016 года Президент страны Н.А.Назарбаев подписал Закон Республики Казахстан, № 505-V, «О внесении изменений и дополнений в некоторые законодательные акты Республики Казахстан по вопросам экологии и недропользования».

Указом Президента РК от 30 мая 2013 года, №577, была утверждена Концепция по переходу страны к «зеленой» экономике, состоящая из трех этапов.

Первый этап. 2013-2020 гг. Оптимизация использования ресурсов и повышение природоохранной деятельности, а также создание «зеленой» инфраструктуры.

Второй этап 2020-2030 гг. Преобразование национальной экономики, ориентированной на широкое внедрение технологий возобновляемой энергетики, на базе сформированной «зеленой» инфраструктуры.

Третий этап 2030-2050 гг. Переход национальной экономики на принципы так называемой «третьей промышленной революции», требующей использования природных ресурсов при условии их возобновляемости и устойчивости.

Возобновляемые источники энергии вместе с такими традиционными источниками энергии, как нефть и газ, превращаются в главнейшие источники электрической энергии. Особенно привлекает внимание использование электрической энергии на отдаленных потребителях, получаемой путем преобразования энергии воды. По причине того, что добыча и транспортировка газа и нефти являются дорогостоящими и финансово затратными [14].

Одним из событий глобального масштаба является выставка «EXPO-2017».

Выставка «EXPO-2017» по своей туристической привлекательности сравнима со спортивными играми мирового масштаба, а по значимости - с крупнейшими экономическими форумами. Предполагается, что она поспособствует привлечению в Казахстан крупных инвестиций, а также наша страна получит новшества в области технологии и инновации, что напрямую окажет влияние на развитие «зеленой экономики».

Выставка «EXPO-2017» — дополнительный стимул для инфраструктурного и экономического развития страны. «Это самое большое достижение Казахстана в международном плане за годы независимости. Это станет поворотным пунктом для нашей страны. В нашей столице будут



представлены лучшие мировые достижения науки и техники. Многие казахстанцы своими глазами смогут увидеть «экономику будущего», к которой мы стремимся» (Н. А. Назарбаев, Президент Республики Казахстан).

Выставки Ехро, проводимые с 1851 года под руководством Международного Бюро Выставок представляют собой ведущий смотр всемирных научно-технических достижений. Государствам, проводящим выставки, при хорошей организации они всегда обеспечивали толчок к развитию, а также раскручивали национальные бренды и проекты, продвигали отечественные достижения и давали приток туристов.

Для Казахстана выставка «ЕХРО-2017» является самым крупным международным мероприятием с наибольшим количеством туристов, иностранных гостей и официальных делегаций из более 100 стран мира.

Во-первых, выбор в пользу нашего государства показывает высокую оценку успехов Казахстана и выделяет перспективы его развития. Во-вторых, это говорит о признании нашей столицы Астаны как центра, достойного провести событие всемирного масштаба. В-третьих, повысится положительный имидж и узнаваемость государства, его научно-технических достижений и инициатив.

На сегодняшний день площадки ЕХРО продолжают представлять и консолидировать яркие разработки в области науки, служат стимулом для развития городов и государств, в которых они проходят, и являются мощным толчком для экономического развития стран.

Выставка «ЕХРО-2017» в Астане, в соответствии с Конвенцией о международных выставках будет проходить в период с 10 июня по 10 сентября 2017 года, в общей сложности продлится 3 месяца. Предполагается, что в выставке примут участие более 100 стран мира, не менее 10 международных авторитетных организаций, около 10 компаний – инновационных лидеров.

Выставка «Энергия будущего» будет демонстрировать инновационные достижения технологических возможностей человечества. «Важно превратить «ЕХРО-2017» в центр перехода к третьей индустриальной революции, которая включает в себя альтернативную экономику, создание соответствующих высокотехнологических материалов, источников возобновляемой энергии, подготовку кадров и другие вопросы» (Н.А.Назарбаев, Президент Республики Казахстан).

Выставки, осуществляемые под руководством Международного Бюро Выставок, являются новым, демократическим, глобальным институтом консолидации усилий всего мирового сообщества по выявлению, объединению и распространению передовых достижений человечества, институтом «демократизации» инноваций.

И нашей стране выпал шанс внести открытие в развитии человечества – новейшую экономику, которая основана на доступной безопасной энергии и «зелёных» технологиях.

Естественно, Казахстан справедливо заслужил такой шанс, ведь на нашей земле впервые открылась дорога всему человечеству в необъятную вселенную, зародились идеи ядерного разоружения, институты евразийской интеграции, Астанинского Экономического Форума, всемирного съезда мировых религий.

Конкретными целями выставки «EXPO-2017» является исследование политики, программы и технологии, которые направлены на усовершенствование устойчивых источников энергии, увеличение надежности и эффективности энергоснабжения, поощрения использования возобновляемых источников энергии, а также продемонстрировать жителям планеты потребность в активной инициации и участии в процессе энергосбережения и сохранении экологии Земли.

Для решения таких проблем как уменьшение выбросов в атмосферу, увеличения энергоэффективности и самое главное обеспечение доступа к электроэнергии для всех предполагается, что на выставке «EXPO-2017» будут демонстрироваться инновационные методики, решения и решительные идеи.

За всю историю EXPO самой «экологичной» выставкой является «EXPO-2017».

«Выставка будет способствовать привлечению в нашу страну крупных инвестиций. Также через «ЭКСПО» Казахстан получит новые технологии и инновации, что непосредственно повлияет на развитие «зеленой экономики» (Н. А. Назарбаев, Президент Республики Казахстан).

В крайние десятилетия можно проследить в тематике проведения всемирных выставок ЭКСПО такую закономерность, как переход с технологических вопросов на проблемы и решения задач в экологии и во взаимодействии человека с природой: Лиссабон Экспо-1998» – рассматриваемая тема « «Океаны — наследство будущего», Ганновер «Экспо-2000» - "Человек природа и техника создают новый мир Нагоя «Экспо-2005» - «Мудрость природы», Сарагоса Экспо-2008» — «Вода и сбалансированное развитие», Шанхай «Экспо-2010» - «Лучший город — лучшая жизнь».

Тематика «Энергия будущего» включает в себе огромный потенциал для новых технологий. Данная выставка осветит всей планете беспрецедентное количество научных экологических разработок, изобретений в области энергетики, а также различные так называемые «зеленые» товары.

Такое понятие как «зеленый» товар сложилось до возникновения в 2008 году термина «зелёная» экономика». Эти «зеленые» товары и услуги способствуют улучшению окружающей среды, улучшению здоровья человечества и работоспособности, а также энергоэффективности и ресурсосбережению.

Предполагается, что выставка «EXPO-2017» выявит преимущества «зелёной» энергетики и тем самым откроет новую страницу в развитии человечества, которая будет основана на принципе доступной энергии, «зелёных» технологиях и открытых инновациях [11].

## 1.2 Оценка малой гидроэнергетики Казахстана

Реки являются частью водного бассейна Земли. Запас воды в реках определен природой и постоянно меняется. Он непредсказуем, множество случайных и неопределенных факторов влияют на речные процессы, величина водных ресурсов постоянно меняется. Водные запасы – возобновляемые.

Энергетический ресурс рек обладает свойством возобновляемости. Органическое топливо (уголь, нефть, газ) – это «кладовая», в которой через 100...200 лет большая часть запасов будет израсходована. Энергия рек будет всегда, пока не изменятся глобальные космические процессы.

Гидроэнергия является возобновляемым источником энергии, в котором энергию получают из энергии воды, перемещающейся с более высокого на более низкий уровень. Это хорошо зарекомендовавшая себя, совершенная предсказуемая и конкурентно способная с точки зрения затрат технология. Механическая энергия падающей воды является старинным инструментом, используемым для различных услуг со времен древних греков более чем 2000 лет тому назад. Первая гидроэлектростанция мощностью 12,5 кВт была построена 30 сентября 1882 года на реке Фокс, штат Висконсин, США, в Казахстане в 1894 году на реке Тургусын (4х50кВт).

Годовой глобальный технический потенциал производства электроэнергии, составляет 14 576 ТВтч (52, 47 ЭДж) при соответствующем оценочном общем потенциале мощности в 3 721 ГВт, то есть в четыре раза больше существующей в настоящее время установленной глобальной мощности гидроэлектростанций. Общий средний коэффициент мощности гидроэлектростанции равен 44 %. Этот коэффициент говорит о том, каким образом гидроэлектроэнергия используется в энергетическом балансе (например, пиковая генерация по сравнению с базовой генерирующей мощностью), или о наличии водных ресурсов, а также может свидетельствовать о возможности увеличения генерации электричества посредством модернизации оборудования и оптимизации эксплуатации.

Ресурсный потенциал для генерации гидроэлектроэнергии может меняться из-за изменения климата. Мощность ежегодного производства электроэнергии до 2050 года может увеличиться на 2,7 ТВтч (9,72 ПДж) в Азии и уменьшится на 0,8 ТВтч (2,88 ПДж) в Европе.

Относительно 80-х годов глобальное потребление электроэнергии возросло на 70 % и продолжает увеличиваться, со средним мировым темпом роста приблизительно 2% в год. Значимая доля электроэнергии в мировом производстве приходится на возобновляемые источники энергии и составляет 18 %. Из них наиболее совершенной в области технологии является гидроэнергетика, она составляет 87 % мировой производимой электроэнергии из возобновляемых источников энергии.

Период крупных проектов в области гидроэнергетики относится к первым десятилетиям XX века. Создание крупных гидроэлектростанций изначально получило наибольшее развитие в Северной Америке, затем широкое распространение получило в других регионах мира: Китае, Канаде, бывшем СССР, Турции, Африке, Индии, Латинской Америке, Иране и Ираке. Такие страны как Северная Америка, Латинская Америка, и Европа обладают значительным гидроэнергетическим потенциалом, большая доля которого уже использована. К регионам, где гидроэнергетика еще развита недостаточно хорошо относятся Южная и Восточная Азия, и еще Африка.

Китай занимает первое место в мире по установленной мощности гидроагрегатов и выработке электроэнергии, далее в пятерку лидеров входит Канада, Бразилии, США и Россия. Лидерами по выработке гидроэнергии на душу населения являются Норвегия, Исландия и Канада. Например, в такой стране как Норвегия на долю гидростанций приходится 98–99% всей вырабатываемой электрической энергии. А Парагвай не только целиком покрывает собственные потребности в электроэнергии благодаря ГЭС, но и экспортирует 90% произведенной энергии в Аргентину и Бразилию.

Таблица 1.1 – Страны, занимающие наибольшую долю в выработке гидроэнергии

	Выработка электроэнергии в 2008 году (млрд кВт.ч)	Выработка электроэнергии в 2009 году (млрд кВт.ч)	Установленная мощность (ГВт)	Доля гидроэнергии в общей выработке электроэнергии в стране (%)
Китай	522,4	548,9	196,8	22
Канада	369,5	363	88,9	61
Бразилия	365,8	387	69	85
США	254,8	272,1	78,1	6
Россия	167,5	176	47,4	21
Норвегия	138,1	124,9	27,5	98
Индия	113,1	104,4	33,6	16
Венесуэла	86,7	85,8	14,6	69
Япония	75,4	75,1	27,2	7
Швеция	68,3	64,4	16,2	44

Более чем 50 % от всеобщего объема потребляемой электроэнергии обеспечивают гидроэлектростанции, в более чем 60 странах мира. Они также осуществляют другие, не менее значимые услуги – борьбу с наводнениями и потребности орошения. Показатели на 2006 год в мире по установленным мощностям крупных ГЭС достигли 770 ГВт, в то время как, производство электроэнергии на них – 2725 ТВт.ч.

По классификации ГЭС различают по мощности и напору. Необходимо отметить, что в каждом государстве используется собственная классификация и параметры, которые рассматриваются ниже приводятся приблизительно.

ГЭС по максимально используемому напору подразделяются на: высоконапорные (более 60 м); средненапорные (от 25 до 60 м); низконапорные (от 3 до 25 м). По установленной мощности (МВт) различаются ГЭС: крупные (250 и выше); средние (от 10-50 до 250); малые (до 1–10, в некоторых случаях до 50).

Рассмотрим вопрос о развитии малой гидроэнергетики в странах СНГ. Превалирующая часть стран мира имеют программы нацеленные на развитие малой гидроэнергетики, как одного из видов возобновляемых источников энергии.

Вследствие последующего усовершенствования технологий по использованию гидроэнергетического потенциала малых рек и соответствующего уменьшения стоимости вырабатываемого ими электроэнергии, а также государственной поддержки данного сектора энергетики, в большинстве развитых и во многих развивающихся странах мира ее доля неуклонно возрастает. Потребность адаптации к глобальному изменению климата, уменьшение расхода и экономия органических ресурсов все это способствует росту использования возобновляемых источников энергии.

Программы по поддержанию малой гидроэнергетики разрабатываются также в странах Содружества Независимых Государств (СНГ). Также на сегодняшний день растет число восстановленных ранее списанных из эксплуатации малые ГЭС

Следует обратить внимание на увеличение числа возобновленных прежде выведенных из эксплуатации МГЭС, применение функционирующих ирригационных гидросооружений для сооружения в их составе малые ГЭС. Также можно отметить, что предмет исследования в составе малые ГЭС – сфера, вызывающая интерес частного капитала. Период окупаемости постройки небольших гидросооружений – 4-5 лет, а с увеличением цены на электроэнергию, покупаемой на розничных и оптовых рынках, этот период снижается через сравнительно недолгий промежуток года в 1,5 раза, что имеет особую привлекательность для среднего и малого бизнеса.

Также есть необходимость обозначить общие и специальные препятствия стран СНГ, которые тормозят последующие усовершенствования данной отрасли. Одной из главных проблем является недостаток долговременного финансирования для строительства малых ГЭС.

В основном заказчиками строительства являются средний бизнес, а также муниципальные и региональные органы исполнительной власти. Обеспечения финансирования подобного рода возведения из бюджета государства обычно не предусматривается.

Банки и кредитные компании не участвуют в возведении малых ГЭС из-за продолжительного (по условиям финансирования банками) периода окупаемости, малых объемов капитальных вложений. Также продолжительными и сложными являются мероприятия по отводу земель под возведения малых гидроэлектростанций и согласование по проектам станций.

В отдельных государствах СНГ сетевые компании преувеличивают запросы по технологическому присоединению к сетям малых ГЭС. По названным причинам наблюдаются разнообразные подходы к осуществлению политики по расширению данной отрасли.

Согласно стратегии развития энергетики России до 2020 года, планируется в ближайшие 10 лет увеличить долю ВИЭ до 4%, что приблизительно в пять раз меньше, чем потенциал возобновляемой энергетики, который возможно осуществить на уровне нынешнего экономического развития.

В нашей стране ситуация подобная. Здесь был принят закон о поддержке возобновляемой энергетики, но он имеет скорее характер рамочного типа и не включает в себя определенных механизмов по осуществлению стимулирования развития данной отрасли энергетики.

Предполагается, что доля возобновляемой энергии до 2020 года должен составить около 2,5 %, это в свою очередь, говорит о слабом темпе роста возобновляемой энергетики, в том числе малой.

Определенные специалисты считают, что несильная заинтересованность может определяться старомодным стереотипом мышления нашего общества о довольно высоком запасе органического топлива, вследствие этого определяется не особый интерес к малой гидроэнергетике.

В других странах СНГ также ожидается небольшой рост применения возобновляемой энергетики, в том числе малой. В связи с этим целесообразно организовать межгосударственный орган в рамках имеющихся интеграционных структур СНГ по развитию возобновляемой энергетики, оказывающий научно-техническую помощь разработкам в данной области.

На сегодняшний день наша страна Казахстан имеет внушительный гидроэнергетический потенциал – 170 млрд кВт.ч, из них 30 млрд подлежат целесообразному использованию со стороны экономики.

Распределение ресурсов в области гидроэнергетики по территории нашей страны неоднородно, они сконцентрированы в основном в юго-восточном и восточном регионах. Центральный и Северный регионы содержат всего 1,7% возможных гидроэнергетических ресурсов страны. На рисунке 1.1 представлены водохозяйственные бассейны Республики Казахстан

Мощность имеющихся ГЭС Республики Казахстан – 2068 МВт с годовой выработкой электроэнергии 8,32 млрд кВт.ч (12% в структуре генерирующих мощностей и выработке электрической энергии).

Освоение гидроресурсов производится различными средними и крупными станциями – Шульбинская, Бухтарминская, и Усть-Каменогорская на Иртыше, Шардаринская на Сырдарье, Капчагайская на реке Или, Мойнакская на реке Чарын. Казахстан обладает также и существенным потенциалом малой гидроэнергетики. Насчитывается 2174 реки длиной более чем 10 км, их всеобщая протяженность превосходит 83,2 тыс. км.

Количество рек протяженностью от 10 до 50 км составляет 1889 (86,9%), от 50 до 100 км – 130 (6%), более 100 км – 155 (7,1%). Следовательно, к категории малых можно отнести почти 90% рек, что определяет их целесообразность применения со стороны экономики для нужд малой гидроэнергетики.



Рисунок 1.1 – Водохозяйственные бассейны Республики Казахстан

Максимальную долю в общем объеме ВИЭ занимают малые гидроэлектростанции. На 2009 год выработка электроэнергии малыми ГЭС 379,6 млн кВт.ч (общая установленная мощность 97,6 МВт). В результате перехода на централизованное энергоснабжение была приостановлена эксплуатация большого количества малых ГЭС, как в Казахстане, так и в других государствах СНГ. В настоящее время функционирующие малые гидроэлектростанции требуют, чтобы их оборудование прошло процесс модернизации и реконструкции.

Так, к примеру, на реке Большая Алматинка находится каскад из 9 деривационных МГЭС, нуждающийся в технической реконструкции и модернизации. Суммарная установленная мощность каскада равна 43,7 МВт, среднемноголетняя выработка – 203,2 млн кВт.ч, самые большие станции каскада – верхние ГЭС-1 и ГЭС-2. С целью покрытия компенсации нехватки электроэнергии в южных регионах РК осуществляются работы по восстановлению и реконструкции прежде функционировавших малых гидросооружений. Такие сооружения были восстановлены в поселке Фабричный Алматинской области, мощность составила 600 кВт, а также идет реконструкция Исыкской ГЭС. На реках Большая и Малая Алматинка, в Алматинской области располагается Алматинский каскад ГЭС. Он включает в

себя 11 малых гидроузлов, общая мощность которых составляет 49,15 МВт, введенных в эксплуатацию в 1944–1954 годах. Владелцем каскада является АО «Алматинские электрические станции». Вероятно развитие каскада за счет возведения двух малых общая мощность которых составит 5 МВт.

На таких реках как Тихая и Громотуха, Восточно-Казахстанской области находится Лениногорский каскад. В свой состав включает две функционирующие ГЭС общей мощностью 11,78 МВт и на данный момент несколько не функционирующих, которые были введены в эксплуатацию в 1928–1949 годах. Владелцем каскада является ТОО «Риддер ГЭС».

На реке Каратал, в Алматинской области находится Каратальский каскад. В свой состав включает четыре функционирующие и несколько проектировочных станций. Предполагается, что в случае полного развития каскад должен состоять из десяти ГЭС. Возведение Каратальской ГЭС началось в 1950 году, станция была запущена в 1953-м году, закончена в 1954 году. Мощность составила 10,08 МВт, среднегодовая выработка – 50 млн. кВт.ч. В здании ГЭС возведены три вертикальных гидроагрегата с радиально-осевыми турбинами, которые работают при расчетном напоре 46,2 метра. Турбины запускают в работу гидрогенераторы мощностью 3,36 МВт. Производит данные гидроагрегаты венгерская компания Ganz. Владелцем Каратальской ГЭС является АО «Казцинк».

Каратальская ГЭС-2. Начало возведения – 31 апреля 2007 года, завершение – 19 сентября 2008 года. Данная станция деривационного типа, размещена ниже Каратальской ГЭС, выполняет водозабор из ее отводящего канала. Мощность составляет 4 МВт, среднегодовая выработка – 19,5 млн кВт.ч. В здании имеются два гидроагрегата, мощность которых 2 МВт, функционирующих на расчетном напоре 19,8 м при общем расходе воды 25 м/с. Оборудование поставляет французская компания SA Mecamidi. Владелец станции – ТОО «Каскад Каратальских ГЭС».

Каратальская ГЭС-3. Начало возведения – февраль 2009 года, завершение – 22 декабря 2009-го. Каратальская ГЭС-3 располагается ниже Каратальской ГЭС-2, а также осуществляет водозабор из отводящего канала. Станция деривационного типа. В состав сооружений входят: водоприемник; деривационный канал длиной 1255 м; напорный бассейн; турбинные водоводы; здание ГЭС; отводящий канал; делитель сбросной и холостой сброс. Мощность составляет 4,4 МВт, три гидроагрегата установлены в здании. Оборудование поставляет китайская компания «Шанли». Владелец станции – ТОО «Каскад Каратальских ГЭС».

Каратальская ГЭС-4 внедрена в строй 28 июня 2010 года, мощность – 3,5 МВт. Владелец станции – ТОО «Каскад Каратальских ГЭС».

В Енбекшиказахском районе Алматинской области на реке Иссык располагается Каскад ГЭС. Состоит из трех станции, дна из которых действует, вторая строится и третья проектируется. Владелцем каскада является ТОО «ЭнергоАлем». Введена в эксплуатацию ГЭС-2, реализовывается строительство ГЭС-1 и проектирование ГЭС-3.



Талгарская ГЭС находится на реке Талгар, мощность составляет 3,2 МВт. Были установлены три гидроагрегата, который в 1959 году изготовил завод «Уралгидромаш». Владелец – АО «Алматинские электрические станции». Предполагается осуществление работ по реконструкции гидроузла с повышением мощности до 6 МВт.

Иссыкская ГЭС-2 введена в строй 3 ноября 2008 года. Располагается на 0,7 км ниже селезащитной плотины Иссыкского озера на территории Иле-Алатауского государственного национального природного парка. Мощность составляет 5,1 МВт, среднегодовая выработка – 25 млн кВт.ч. Стоимость данного проекта оценивается в \$4.3 млн.

Меркенская ГЭС-3 находится на реке Мерке в Меркенском районе Жамбылской области. Мощность составляет 1,5 МВт, среднегодовая выработка – 6, 5 млн кВт.ч, стоимость возведения – 237 млн. тенге. ГЭС введена в строй 28 декабря 2010 года.

Сергеевская ГЭС расположена на реке Ишим, как напорное сооружение используется плотина Сергеевского водохранилища. Мощность составляет 2 МВт, установлены две гидротурбины мощность, каждой составляет 1 МВт.

Иные малые гидросооружения Казахстана: Аксуская ГЭС - 2 МВт, которая введена в строй после восстановления и реконструкции в начале 2008 года; Зайсанская ГЭС - 2 МВт; Успенская ГЭС – 2,5 МВт. Осуществляется эксплуатация Антоновской ГЭС, мощность которой составляет 1,6 МВт, на ней установлены два гидроагрегата, сделанные в 1960 году на заводе «Уралгидромаш»; Георгиевской ГЭС - 1,7 МВт; Урджарской ГЭС 0,175 МВт.

Постановлением правительства Республики Казахстан утверждена программа по развитию электроэнергетики, в которой запланировано развитие малой гидроэнергетики. Прирост генерирующих мощностей предполагается получить за счет строительства новых малых гидроэлектростанций в областях, в которых расположены гидроэнергетическими ресурсами.

В Алматинской области: каскад малые ГЭС на реке Коксу общей мощностью 42 МВт и вводом в строй в 2012 году; МГЭС на реке Баскан мощностью 4,37 МВт и вводом в 2011 году; МГЭС на реке Иссык общей мощностью 5 МВт и вводом в эксплуатацию в 2011–2012 годах; МГЭС на реке Шелек общей мощностью 30 МВт и вводом в 2014–2015 годах; МГЭС на реке Лепсы мощностью 4,8 МВт и вводом в эксплуатацию в 2012 году.

В Южно-Казахстанской области: малые гидроэлектростанции на реке Келес общей мощностью 10 МВт и вводом в эксплуатацию в 2011–2014 годах.

Современные технологии применения энергии малых рек и водотоков разрешают строить малые и мини - гидроэлектростанции при имеющихся гидротехнических сооружениях. Это добавочный резерв в развитии малой гидроэнергетики. В Казахстане существуют каналы с перепадами, вероятными для применения в таких целях. Проектные проработки представляют: строительство малых гидроузлов на перепадах целесообразно реализовывать по типу безнапорной деривационной ГЭС. Наличие большого неосвоенного гидроэнергетического потенциала на крупных ирригационных каналах и

водохранилищах разрешает развивать гидроэнергетику в районах орошаемого земледелия, где отмечается дефицит электроэнергии.

Мировой опыт показывает, что освоение гидропотенциала малых рек находить решение в области энергоснабжения мелких потребителей. В Китае, к примеру, возведено более 90 тысяч малых ГЭС, обеспечивающие 30 процентов энергопотребления в сельских районах. В США разработана государственная программа развития малой гидроэнергетики: до 2020 года предполагается ввести малые ГЭС суммарной мощностью 50 тысяч МВт, что обеспечит производство 200 миллиардов кВт/ч электроэнергии. При этом стоимость 1 кВт/ч электроэнергии, выработанной на малой ГЭС, составляет 1,8-2,4 цента (набольших ГЭС – 3,2-5,5 цента, на АЭС – 2,8-3,9 цента)[3].

В малых, "микро" или "нано" ГЭС совмещаются преимущества большой ГЭС с одной стороны и вероятность децентрализованной подачи энергии с другой стороны. Они не имеют многих изъянов, которые характерны для больших ГЭС, а именно: дорогие трансмиссии, проблемы, связанные с отрицательным влиянием на окружающую среду. Кроме того, использование малой гидроэнергетики приводит к децентрализованному использованию электроэнергии, оказать содействие развитию данного региона, главным образом основанном на самодостаточности и использовании местных ресурсов.

Во всем мире сегодня установлено несколько тысяч малых ГЭС. Современные гидроэнергетические технологии являются очень высокоразвитыми.

За последние 50 лет были значительно усовершенствованы конструкции гидротурбин, в первую очередь с целью достижения более высокого уровня преобразования механической энергии в электрическую.

Малая гидроэнергетика имеет особое значение для стран с развивающейся экономикой, в первую очередь, благодаря обеспечению принципа децентрализации. Выработанная электроэнергия обычно передаётся по низковольтной распределительной сети относительно небольшому количеству потребителей, расположенных поблизости от ГЭС.

Малые ГЭС отличаются друг от друга в зависимости от используемого напора воды. Высоконапорные ГЭС типичны для горных областей; и вследствие того, что для выработки такого же количества электроэнергии им необходим меньший поток, они обычно дешевле других ГЭС. ГЭС малого напора типичны для равнин, им не нужен водопроводящий канал. На размер капитальных затрат, связанных со строительством малых ГЭС, влияет много факторов. Однако одним из наиболее существенных является выбор места и "привязка" к нему ГЭС. Наличие соответствующего напора и скорости потока воды - необходимые условия для производства электроэнергии [4].

Среди экономических, экологических и социальных преимуществ объектов малой гидроэнергетики можно назвать следующие. Их создание повышает энергетическую безопасность региона, обеспечивает независимость

от поставщиков топлива, находящихся в других регионах, экономит дефицитное органическое топливо. Сооружение подобного энергетического объекта не требует крупных капиталовложений, большого количества энергоемких строительных материалов и значительных трудозатрат, относительно быстро окупается.

В процессе выработки электроэнергии МГЭС не производит парниковых газов и не загрязняет окружающую среду продуктами горения и токсичными отходами, что соответствует требованиям Киотского протокола. Подобные объекты не являются причиной наведенной сейсмичности и сравнительно безопасны при естественном возникновении землетрясений. Они не оказывают отрицательного воздействия на образ жизни населения, на животный мир и местные микроклиматические условия.

Строительство МГЭС позволит снабжать горные районы электроэнергией в полном объеме, что приведет к резкому улучшению социальных условий жизни горцев, расширению существующих и созданию новых производств (оросительных систем, цехов по выпуску строительных материалов, систем водоснабжения и водоотведения, агропромышленных комплексов и т.п.) и, соответственно, к созданию дополнительных рабочих мест. В конечном итоге снабжение электроэнергией горных районов на основе использования возобновляемой и экологической чистой гидравлической энергии будет способствовать возрождению и развитию отдаленных горных селений и закреплению на местах коренного населения.

К ускоренному развитию малой гидроэнергетики могут подтолкнуть аварии, участвовавшие в энергосистеме страны, поскольку гидроагрегаты могут быть источниками автономного питания. Другой фактор ускорения – экологические требования к вырабатываемой энергии, что стало еще более актуальным в связи с введением в действие Киотского протокола.

Сегодня малые ГЭС (микро-ГЭС) получили уже распространение во многих странах мира. Они характеризуются большой часовой наработкой, значительными конструктивными запасами и высокой надежностью, не требуют постоянного присутствия обслуживающего персонала.

Экологические последствия от строительства и эксплуатации МГЭС минимальны. Малая гидроэнергетика практически не зависит от погодных условий и способна обеспечить устойчивую подачу электроэнергии потребителю.

МГЭС вырабатывают дешевую электроэнергию, и срок окупаемости не превышает 3-5 лет.

Большинство стран мира имеют программы развития малой гидроэнергетики как одного из видов возобновляемых источников. В результате дальнейшего совершенствования технологий использования гидроэнергетического потенциала малых рек и соответствующего снижения стоимости производимой ими электроэнергии, а также государственной поддержки этого сектора энергетики, в большинстве развитых и во многих развивающихся странах мира ее доля неуклонно возрастает. Этому в немалой

степени способствует рост использования возобновляемых источников энергии, вызванный необходимостью адаптации к глобальному изменению климата, снижения расходования и экономии органических ресурсов [6].

Гидропотенциал Казахстана оценивается примерно в 170 ТВт (млн. мВт) в год, на сегодня из них вырабатываются лишь 7-8 ТВт в год, т.е. менее 5%. Это связано со строительством крупных ГЭС на р. Иртыш и р. Или и отсутствием технических возможностей подключения малых и мини-ГЭС в общую сеть. В настоящее время разрабатываются программы по строительству малых ГЭС каскадного типа. В этом случае большое значение имеют малые гидроэлектростанции, мощность которых составляет менее 10 МВт.

Рост экономики Казахстана предполагает возрастание электропотребления. Для стимулирования строительства возобновляемых источников энергии в 2009 году принят закон «О поддержке использования возобновляемых источников энергии».

Если наладить производство энергии на основе возобновляемых источников, Казахстан сэкономит десятки сотен тонн условного топлива, которые можно экспортировать, и при этом радикально сократить выбросы углекислого газа в атмосферу.

Широкомасштабное строительство малых и мини-ГЭС позволит снизить себестоимость электроэнергии за счет производства собственных гидротурбин и электрооборудования с максимальным казахстанским содержанием [10].

### **1.3 Гидрологические особенности и характеристики стока воды**

Закономерности и характеристики стока рек изучаются в гидрологии. Гидроэнергетика связана с речным стоком и зависит от него. В течение времени происходят колебания стока, так как во времени меняются осадки, таяние снега, испарение, грунтовое питание и другое. Сезонные и многолетние колебания стока рек неблагоприятны для ГЭС и для многих других отраслей народного хозяйства, поэтому сток рек регулируется водохранилищами. Размер водохранилища прямо влияет на степень регулирования стока. Регулирование осуществляется в соответствии с требованиями энергетики и отраслей водохозяйственного комплекса.

Эффективность регулирования стока зависит от знания его особенностей и характеристик, поэтому гидрология является в определенном смысле частью гидроэнергетики. Гидрология помогает правильно определять характеристики стока и, следовательно, выработку электроэнергии и мощность станции.

Осадки – главный стокообразующий фактор большинства рек. Сток воды в определенном створе реки зависит от осадков с площади водосборного бассейна. Часть осадков, выпавших на сушу, испаряется, в остальная часть

стекает в реку. Осадки формируют сток. Сток – объем воды, протекающий через данное поперечное сечение реки за определенный промежуток времени (сутки, неделя, месяц, сезон, год). Площадь, с которой осуществляется сток в данную реку, называется водосборным бассейном этой реки. Линия, отделяющая бассейн одной реки от бассейна другой, называется водоразделом. Для многолетнего периода можно пренебречь грунтовым стоком, тогда уравнение водного баланса по стоку реки бассейна  $W_{реки}$  будет иметь вид

$$W_{реки} = W_{ос} - W_{исп}. \quad (1.1)$$

Сток, осадки и испарения могут быть выражены в объемных мерах – кубических метрах и кубических километрах, но принято выражать их в миллиметрах или сантиметрах слоя воды, как бы равномерно покрывающего площадь водородного бассейна.

Мощность ГЭС зависит от напора, расхода и КПД преобразования гидравлической энергии в электрическую. Эти параметры получают на различных этапах технологического процесса ГЭС. Всего имеется пять этапов:

- получение энергоносителя;
- регулирование гидроэнергии ;
- создание напора;
- преобразование гидравлической энергии в электрическую;
- передача электрической энергии к месту потребления.

Этап 1. Получение энергоносителя. Расход воды, притекающий к энергоузлу, характеризуется гидрографом – календарным графиком средних расходов. Усреднение расхода может производиться за час, сутки, месяц и другие интервалы. На рисунке 1.2 показан гидрограф годовой приточности с усреднением расходов на интервалах 1, 2...∞.

Сток формируется под воздействием многочисленных, разнообразных и часто взаимосвязанных факторов. В их числе главными являются климатические факторы, которые имеют случайный характер. Отсюда и случайный характер стока.

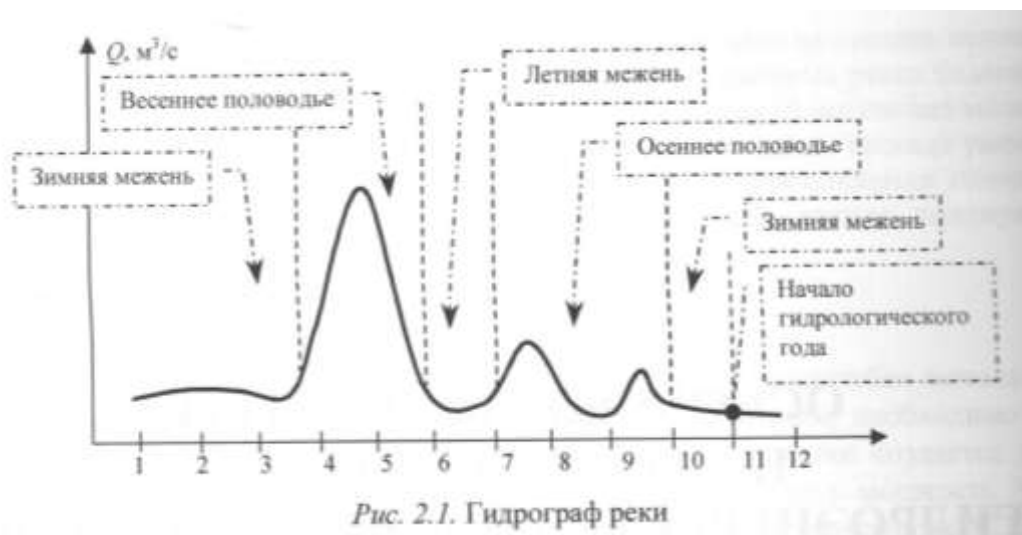


Рисунок 1.2 – Гидрограф реки

Особенностью стока является изменчивость, неповторимость и невозможность точного его прогнозирования на длительные периоды. Эти свойства стока учитываются при проектировании и эксплуатации ГЭС. При проектировании ГЭС рассчитывается на использование только экономически целесообразной части стока. При эксплуатации намечаются различные мероприятия, правила, которые позволяют эффективно использовать сток.

Этап 2. Регулирование гидравлической энергии. Регулирование гидроэнергии осуществляется в соответствии с требованиями потребителей электрической энергии. Потребление имеет неравномерный и случайный характер. Обычно режим потребления энергии представляется в графической форме. На рисунке 1.3 показан график суточного потребления, а на рисунке 1.4 – годового.

Неравномерность объясняется изменением осветительной, отопительной, промышленной, тяговой и других видов нагрузки потребителей электроэнергии. Например, ночью не работают предприятия с двух- и односменными производствами, уменьшается осветительная нагрузка. Летом отопительная нагрузка меньше, чем зимой, и так далее.

Для обеспечения нормальных условий работы потребителей электрической энергии необходимо регулировать энергию реки и согласовывать режим регулирования с потреблением электроэнергии.

Рассмотрим пример регулирования ресурсов внутри года. Максимальные нагрузки потребителей  $P_{\max}$  имеют место зимой в первом и двенадцатом месяцах, а наибольшее количество гидроэнергии – весной. Необходимо перераспределить гидроэнергию с весеннего периода на зимний. Эту роль выполняют водохранилища ГЭС.

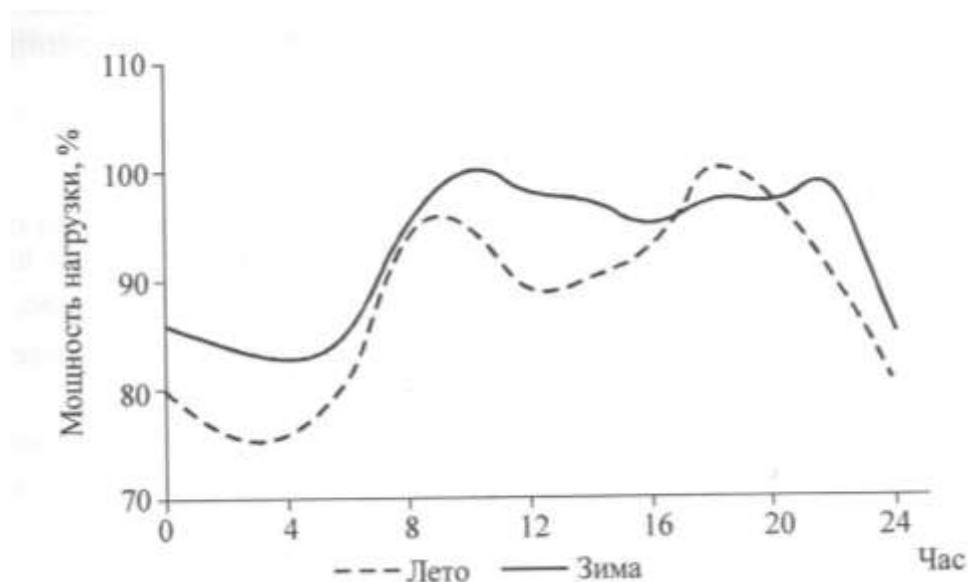


Рисунок 1.3 – Суточные нагрузки системы для зимнего и летнего дня

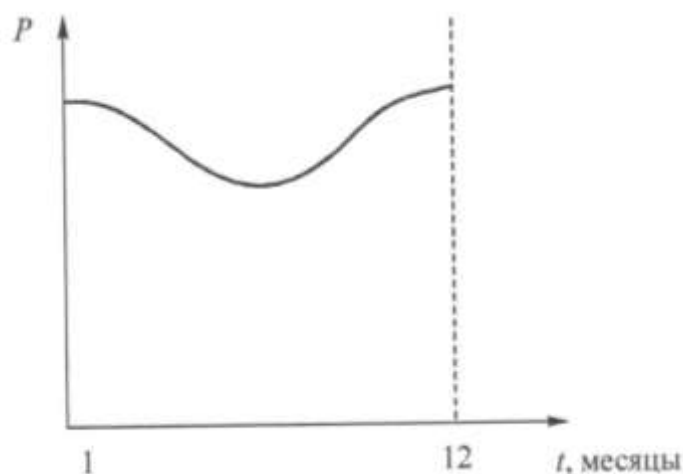


Рисунок 1.4 – Годовой график нагрузки системы

В водохранилище в период весеннего половодья накапливается вода, а затем она используется зимой. Степень перераспределения ресурсов определяется объемом водохранилища. Из экономических соображений не всегда удастся создавать водохранилища, обеспечивающие полное перераспределение стока.

Этап 3. Создание напора. Осуществляется с помощью гидротехнических сооружений. Падение реки рассредоточено по ее длине. Для использования напора необходимо сосредоточить его в одном месте. Напор ГЭС зависит от схемы концентрации напора и естественного падения уровня воды.

Этап 4. Преобразование гидравлической энергии в электрическую. Гидроэнергия подводится к водопроводящим сооружениям, и в них часть

напора  $\Delta H_{BC}$  теряется (рисунок 1.5). Потери напора вызываются трением, ударными потерями, вихреобразованием и другое. Процесс транспортировки характеризует КПД водопроводящих сооружений:

$$КПД_{BC} = \frac{9,81Q(H - \Delta H_{BC})}{9,81QH}. \quad (1.2)$$



Рисунок 1.5 – Схема преобразования энергии и мощности на ГЭС:

$$КПД_T = \frac{9,81(Q - \Delta Q_T)(H - \Delta H_{BC} - \Delta H_T)}{9,81QH}. \quad (1.3)$$

Механическая энергия частично теряется на трение, и оставшиеся ее часть преобразуется в гидрогенераторе в электрическую энергию. При преобразовании частично теряется энергия, подведенная к генератору. Общие потери мощности обозначим величиной  $\Delta N$ , тогда КПД генератора будет:

$$КПД_Г = \frac{9,81(Q - \Delta Q_T)(H - \Delta H_{BC} - \Delta H_T) - \Delta N_Г}{9,81(Q - \Delta Q_T)(H - \Delta H_{BC} - \Delta H_T)}. \quad (1.4)$$

Легко показать, что КПД :

$$КПД_Г = \frac{N_Г}{N_T}, \quad (1.5)$$

где  $N_Г$  – мощность генератора;

$N_T$  – потенциальная мощность (средняя), подведенная к ГЭС.

Средние показатели по этапам:

$$КПД_{BC} = 0,8...0,96 \cdot КПД_T = 0,9...0,96 \cdot КПД_Г = 0,96...0,98.$$



Этап 5. Передача электроэнергии по линиям электропередачи (ЛЭП) к месту потребления. Гидростанции располагаются в удобных створах на реках и очень часто оказываются удаленными на большие расстояния от центров электрической нагрузки. Например, сибирские ГЭС передают электроэнергию даже в центр России на расстояние до 3000 км, Волжский каскад ГЭС передает электроэнергию на расстояние до 1500 км. Поэтому для многих ГЭС существует проблема передачи их энергии к месту потребления. Потери мощности в ЛЭП составляет от 2...10 % в зависимости от параметров [1].

#### **1.4 Преимущества шнековой микроГЭС**

МикроГЭС в соответствии с рисунком 1.6 представляет сложную гидроэнергетическую систему, состоящую из совокупности водных потоков и систем преобразования энергии воды в электрическую энергию и находится под воздействием внешней среды. Гидроэнергетическая система преобразования энергии воды в электрическую энергию включает в себя ряд подсистем различного назначения:

- гидросооружение, как подсистему для создания необходимого напора;
- гидротурбину для создания крутящего момента;
- подсистему передачи крутящего момента на генератор;
- подсистемы стабилизации параметров качества электрической энергии;
- подсистемы передачи электрической энергии к потребителю;
- подсистемы замещения электрической энергии из сети или других автономных источников энергии.

В соответствии с принципом целостности, границы исследуемого объекта определены, как одну из подсистем системы микроГЭС, которая сама может рассматриваться, как некоторая самостоятельная система "система электрогенерирования и снабжения", а другие – как внешняя среда или метасистема.

В зависимости от назначения гидротехнических систем они могут отличаться по назначению, например для аккумуляирования воды, для орошения сельскохозяйственных угодий, для подъема воды на некоторую высоту.

Эти особенности предполагают научно–обоснованный подход к выбору и построению оптимальной системы генерирования электрической энергии и определению оптимального состава генерирующего оборудования.

Как известно потребителей можно разделить по нагрузкам 10,25,50, 100 кВт и выше, которые можно обеспечить за счет микроГЭС, а также с возможностью замещения из других источников.

Как показывает анализ, электрическая энергия расходуется на освещение, на бытовые приборы, на горячее водоснабжение, на отопление, кондиционирование и технологические процессы различного назначения.

Поэтому выше названных потребителей можно отнести к объектам с высоким концентрацией энергопотребляющих процессов.

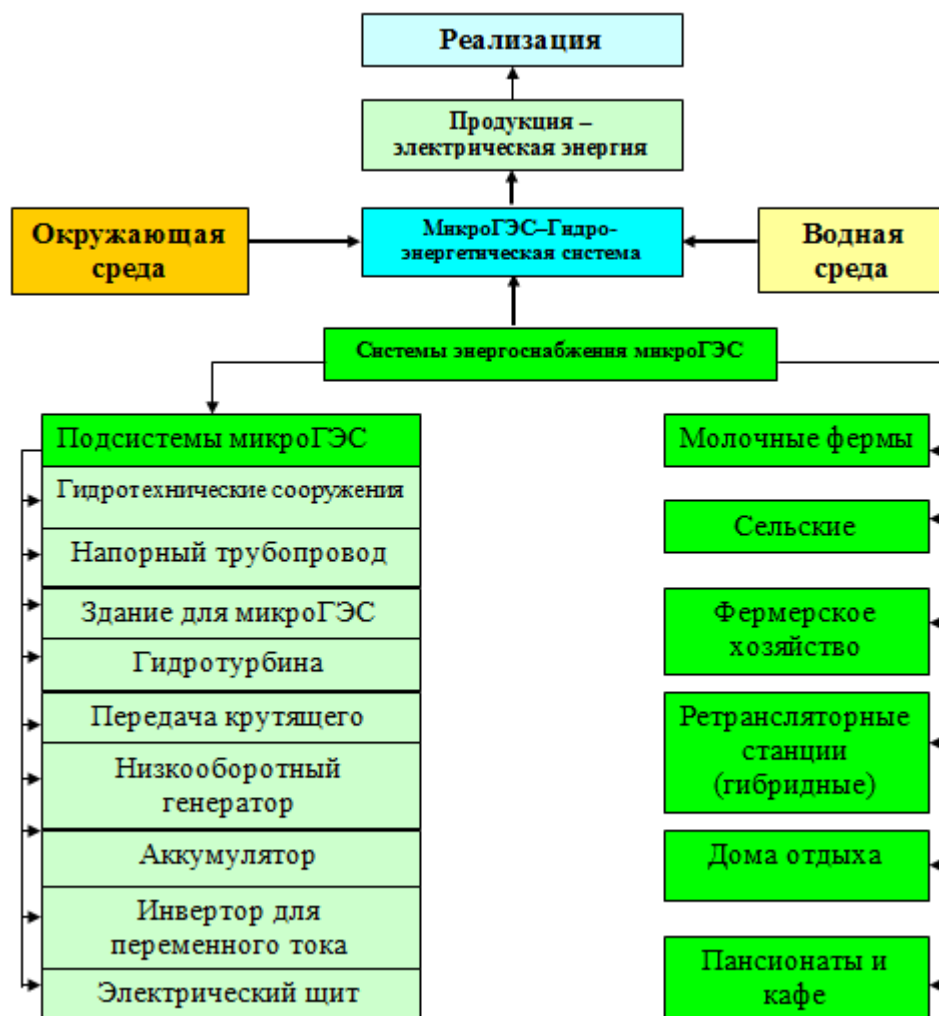


Рисунок 1.6 – Структура гидроэнергетической системы и системы энергоснабжения микроГЭС

Нами рассматривается следующий концептуальный подход к построению системы электрогенерирования (СЭГ) на основе микроГЭС:

– СЭГ должна быть построена на базе многофункционального электрогенерирующего оборудования, снабженный генератором, в которых мощность зависит от расхода воды, а расход воды регулируется за счет дополнительного всасывания воздуха, что позволяет получить двухфазную систему. Данный микроГЭС отличает низкие эксплуатационные затраты, простота конструкции и надежность составляющих и регулирующих элементов, но с другой стороны пренебрегаем явлением кавитацией гидротурбин, что допустимо для низкооборотных микроГЭС.

В базовом варианте для генерирования электрической энергии предусматривается использование различных устройств для выполнения

определенных технологических процессов, в частности поворотно–лопастных гидротурбин в зависимости от расхода и напора воды.

Так для регулирования расхода воды используют поворотно–лопастные гидротурбины или регулируемые решетки, а для передачи механической энергии использует усиленный вал для больших турбин, а для микроГЭС зубчатые или ременные передачи, а также редукторы для повышения оборотов.

Для генерирования электрической энергии классические низкооборотные генераторы, а также имеется щит управления с пускозащитной аппаратурой и системой выпрямления тока.

Коэффициент загрузки и коэффициент использования каждаы из этих узлов очень низкий, что снижает общий КПД установки.

С другой стороны в состав базового варианта входят подсистема передачи механической энергии, и генератор работающий при строгих гостированных оборотах, а также щит для выпрямления номинального напряжения.

В свою очередь, классические высокооборотные генераторы обуславливают высокие затраты на преобразование энергии, и следствием является низкая рентабельность.

Поэтому многие хозяйствующие субъекты не имеют микроГЭС, хотя расположены возле рек.

В новом варианте системы генерирования электрической энергии (СГЭЭ), мы исходим из необходимости учета факторов, определяющих электрические нагрузки, условия и режима эксплуатации микро ГЭС:

- сравнительно высокая степень концентраций различных технологических процессов в одном блоке небольшой площадью (до 500 м<sup>2</sup> ), что обуславливает возможность и целесообразность использования СГЭЭ на базе одного Микро ГЭС.

- наличие определенной временной последовательности технологических процессов в течение суток, что создает условия для перераспределения электрической мощности генератора.

- крайне низкий уровень сервисного обслуживания электрического оборудования в объектах и низкая платежеспособность сельскохозяйственных товаропроизводителей и хозяйствующих субъектов, которые обуславливают необходимость разработки надежных в работе и простых в эксплуатации микроГЭС;

- наличие благоприятных климатических условий для полноводного потока воды.

На основании выше изложенного сформулированы следующие границы построения и требования к конструктивному исполнению микроГЭС:

- СГЭЭ должна быть настроена на низких напорах воды;
- СГЭЭ может быть построена на базе одного МикроГЭС, а так же по возрастающей мощности.;

– для электроснабжения сельскохозяйственных и промышленных объектов целесообразно применять принцип централизации выработки электрической энергии или каскадности на одном речном потоке при достаточном напоре воды.

Основной генератор электрической энергии МикроГЭС-а конструктивно должна представлять собой Микро ГЭС шнекового типа, так как он:

- во первых , позволяет регулировать поток воды;
- во вторых, в гидротурбине не требуется узел регулирования лопасти;
- в третьих, в случае генератора с барабанной лопастью, отсутствует система передачи механической энергии и оно упрощается конструктивно;
- в четвертых система регулирования мощности генераторы, менее сложна, так как она регулируется путем изменения расхода вод, в гидротурбине, чем больше оборотов , тем больше вырабатывает электрическая энергия;
- в пятых, по сравнению с осевыми микроГЭС шнековый микроГЭС применим в широком диапазоне расходы воды;

В зависимости от сезонного колебания потока воды микроГЭС может работать в одном из трех режимов, минимальной-при малых оборотах, номинальной - средних оборотах, максимальной - при больших оборотах.

Минимальный режим - характеризуется тем, что сток воды в летнее время уменьшается, ввиду орошения сельскохозяйственных угодий.

При номинальном режиме сток воды наиболее устойчив, можно дополнительно включить нагрузку нагрева воды и т.д.

При максимальном режиме особенно в зимний период дополнительно включается отопление объектов, что требует надежности всех агрегатов СГЭЭ.

Комплексный анализ СГЭЭ и исследование ее структуры проводится путем представления их в виде моделей: структурной, функциональной и функционально-структурной [6].

## **1.5 Гидро -динамических и конструктивных параметров шнековых турбин**

В гидравлической турбине поток поступает в машину через сечение е-е выходит через сечение а-а (рисунок 1.7). Энергия единицы веса жидкости (.Е) в сечениях:

$$E_{e-e} = Z_e + \frac{P_e}{\gamma} + \frac{\alpha_e V_e^2}{2g}. \quad (1.6)$$

$$E_{a-a} = Z_a + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{\alpha_a V_a^2}{2g}, \quad (1.7)$$

где  $Z$  – высота над плоскостью сравнения;  
 $P$  – давление;  
 $V$  – скорость потока жидкости;  
 $\gamma$  – объемный вес жидкости;  
 $\alpha$  – коэффициент Кариолиса (неравномерности скоростей по сечению потока).

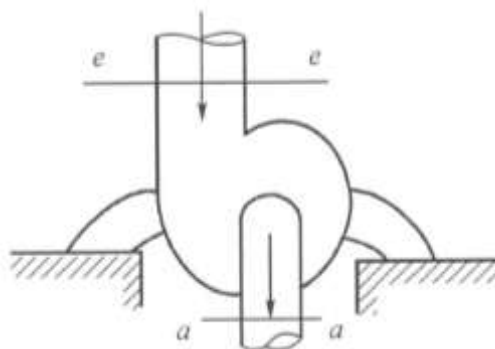


Рисунок 1.7 – Схема гидравлической машины

Если  $E_{e-e} > E_{a-a}$ , то такая гидравлическая машина называется турбиной и является двигателем, т. е. часть гидравлической энергии преобразуется в механическую. Если  $E_{e-e} < E_{a-a}$ , то это насос. Поток при этом получает дополнительную гидравлическую энергию за счет преобразования механической энергии. Наконец, если  $E_{e-e} = E_{a-a}$ , то это гидротрансформатор.

#### *Классификация турбин.*

Наиболее широкое распространение нашли реактивные и активные турбины. Они определяются тем видом энергии, который используется в турбине. По уравнению Бернулли разность энергий в сечениях на входе и выходе турбины:

$$E = E_{e-e} - E_{a-a} = \left[ (Z_e - Z_a) + \frac{P_e - P_a}{\gamma} \right] + \frac{\alpha_e V_e^2 - \alpha_a V_a^2}{2g}. \quad (1.8)$$

Реактивные турбины используют потенциальную энергию:

$$E_{\Pi} = \left[ (Z_e - Z_a) + \frac{P_e - P_a}{\gamma} \right]. \quad (1.9)$$

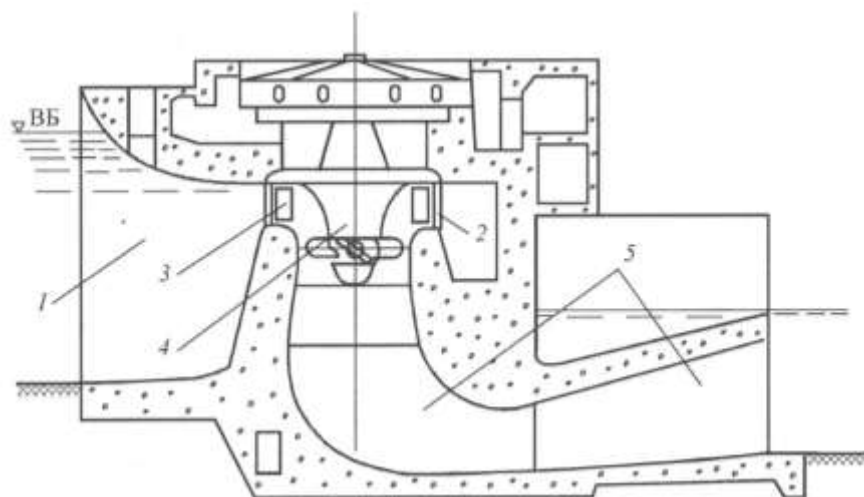
и кинетическую:

$$E_{кин} = \frac{\alpha_e V_e^2 - \alpha_a V_a^2}{2g}. \quad (1.10)$$

а активные только кинетическую:

$$E_{кин} = \frac{\alpha_e V_e^2 - \alpha_a V_a^2}{2g}. \quad (1.11)$$

Конструкция гидротурбинной установки показана на рисунке 1.8а и 1.8б. Она в значительной степени зависит от типа рабочего колеса 4, а тип колеса определяется напором и расходом.



1 — подводные устройства, через которые вода подводится к рабочим органам турбины; 2 — статор турбины, который служит для передачи веса гидроагрегата на фундамент здания ГЭС; 3 — направляющий аппарат (НА), который обеспечивает регулирование расхода воды, поступающего в турбину; 4 — рабочее колесо турбины — это рабочее тело, которое, взаимодействуя с потоком, преобразует гидравлическую энергию воды в механическую. Основным органом турбины является рабочее колесо (РК);

5 — отводящие устройства (отсасывающих труб — ОТ).

Рисунок 1.8 а – Схема гидротурбинной установки

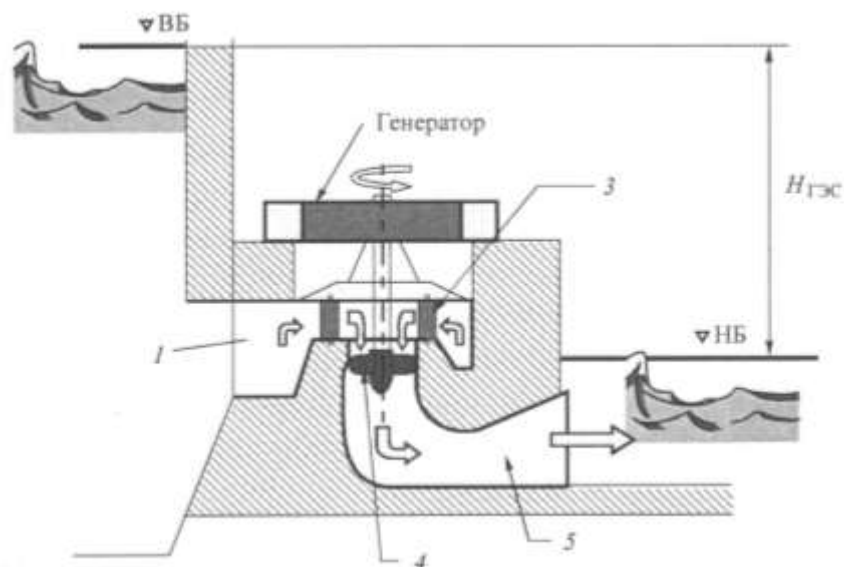


Рисунок 1.8 б – Движение потока воды

#### *Основное уравнение гидромашин.*

Рассмотрим плоскую гидродинамическую решетку (рисунок 1.9). На входе в решетку поток имеет скорость  $V_1$  и давление  $P_1$ , на выходе –  $V_2$ ,  $P_2$ . Решетка движется со скоростью  $U$  ( $U_1=U_2$ ).

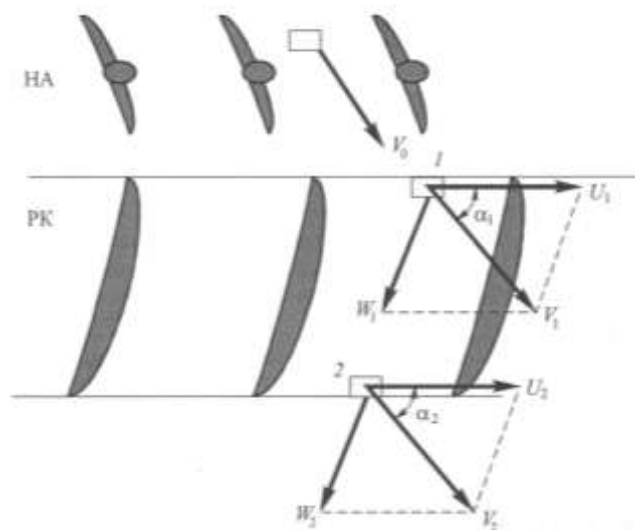


Рисунок 1.9 – Схема плоской гидродинамической решетки

Введем кинематические понятия:  $V$  — абсолютная скорость частиц жидкости;  $W$  — относительная скорость жидкости внутри каналов решетки;  $U$  — переносная скорость (для круглой решетки - окружная); 1 - место входа потока в решетку; 2 - место выхода потока из решетки.

Абсолютная скорость  $V$  получается при сложении векторов скоростей  $\vec{U}$  и  $\vec{W}$ . Векторы  $\vec{U}$ ,  $\vec{W}$  образуют параллелограмм скоростей с диагональю  $\vec{V}$  и

соответственно треугольник скоростей. Углы между скоростями  $\alpha$  и  $\beta$  на входе 1 и на выходе 2 показаны на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Треугольники скоростей на входе и выходе гидродинамической решетки

Для круглой решетки соответствующие треугольники показаны на рисунке 1.11. При выводе основного уравнения гидромашин используются плоские и круглые решетки.

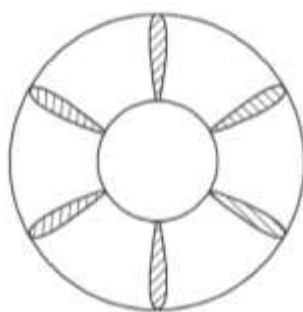


Рисунок 1.11 – Круглая гидродинамическая решетка

Принимаются следующие допущения:

- предполагается, что решетка имеет бесконечное число бесконечно тонких лопастей. Это означает, что будет иметь место полная равномерность потока, действующего на решетку;
- рассматривается установившееся движение потока;
- предполагается безударный вход потока в решетку. Безударным называется такой вход, при котором векторы относительных скоростей параллельны стенкам канала и касательны к лопастям на входе и выходе. На рисунке 1.12 показан безударный вход, а на рисунке 1.13, а, б - ударный и траектории относительного движения частиц жидкости.



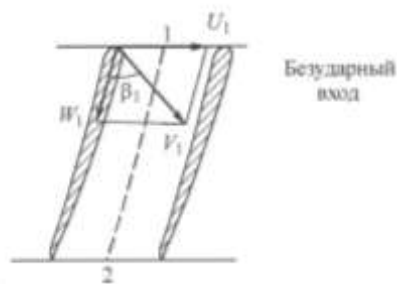


Рисунок 1.12 – Плоская гидродинамическая решетка

*Уравнение Эйлера.*

Уравнение Эйлера дает связь между моментом сил, действующих со стороны потока на лопасти рабочего колеса турбины, и скоростью потока.

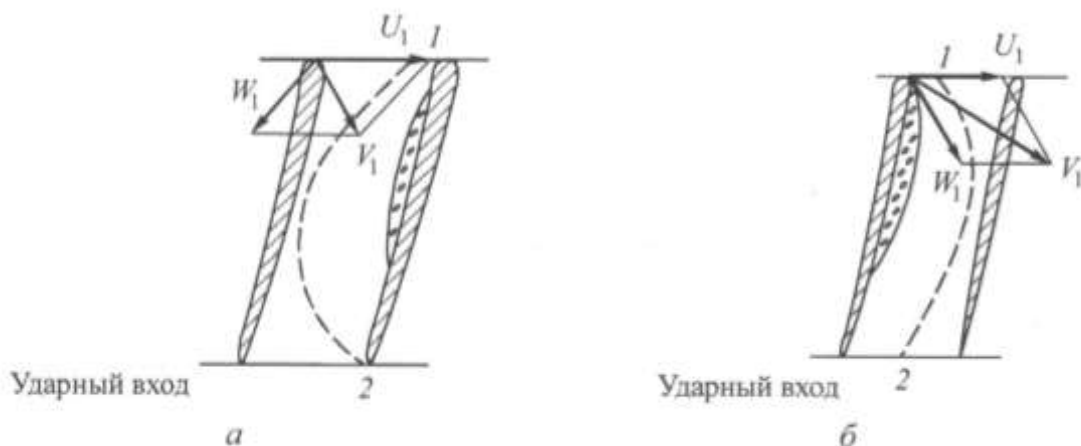


Рисунок 1.13 – Ударный вход потока в решетку

При движении жидкости по каналам решетки скорости частиц жидкости меняют свое направление и величину, а следовательно, на частицы жидкости со стороны лопаток действуют силы. По третьему закону Ньютона частицы жидкости будут действовать на лопатки с такой же силой в обратном направлении. Для того чтобы найти момент этих сил и затем мощность, используют теорему об изменении количества движения. По этой теореме изменение количества движения равно импульсу внешних сил, действующих на тело, то есть:

$$F\Delta t = m(V_1 - V_2), \quad (1.12)$$

где  $F$  - внешние силы;

$m$  - масса тела;

$\Delta t$  - время действия;

$V_1, V_2$  - скорости потока на входе в лопатки решетки и выходе с них.

Произведем небольшие преобразования. Примем  $\Delta t = 1$  с и используем формулу  $m = \rho \cdot q$ , где  $q$  - расход элементарного объема потока жидкости за 1 с,  $\rho$  - плотность. Тогда для элементарного объема, выделенного из потока:

$$F = \rho q(V_1 - V_2) = \rho q V_1 - \rho q V_2. \quad (1.13)$$

Обозначим  $R_1 = \rho q V_1$ ,  $R_2 = \rho q V_2$ , тогда:

$$F = R_1 - R_2, \quad (1.14)$$

где  $R_1$  - сила, действующая в направлении вектора скорости  $V_1$ , которая называется активной силой, а  $R_2$  - сила, действующая в направлении, обратном скорости  $V_2$ , — реактивная сила.

Силы  $R_1$  и  $R_2$  создают вращающий момент турбины относительно оси гидромашины (рисунок 1.13):

$$M = R_1 l_1 - R_2 l_2, \quad (1.15)$$

где  $l_1, l_2$  - плечи сил  $R_1, R_2$ . Причем  $OB = l_1$ ,  $OB' = l_2$ ,  $\angle AOB = \alpha_1$ ,  $\angle A'O'B' = \alpha_2$

$l_1 = r_1 \cos \alpha_1$ ,  $l_2 = r_2 \cos \alpha_2$ ,  $r$  - радиус.

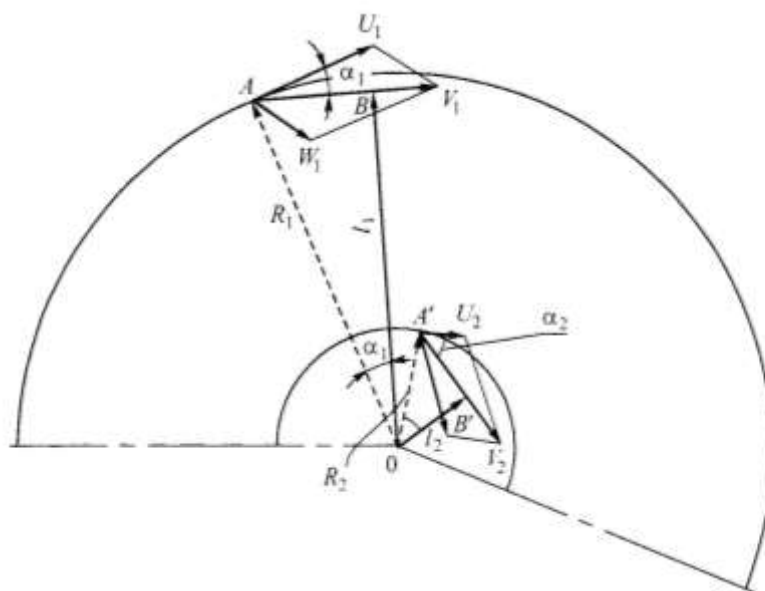


Рисунок 1.14 – Схема векторов сил, дающих вращающий момент турбины

Произведя подстановку этих формул в (1.15), получим выражение для момента на валу турбины для элементарного объема жидкости:

$$M = \rho q (V_1 r_1 \cos \alpha_1 - V_2 r_2 \cos \alpha_2). \quad (1.16)$$

Соответственно мощность на валу турбины в зависимости от воздействия элементарной частицы жидкости:

$$N_{\text{э}} = M \bar{\omega}, \quad (1.17)$$

где  $\bar{\omega}$  — ускорение Или.

$$N_{\text{э}} = \rho q (V_1 r_1 \bar{\omega} \cos \alpha_1 - V_2 r_2 \bar{\omega} \cos \alpha_2); \quad (1.18)$$

$$r \bar{\omega} = U. \quad (1.19)$$

и соответственно:

$$N_{\text{э}} = \rho q (V_1 U_1 \cos \alpha_1 - V_2 U_2 \cos \alpha_2). \quad (1.20)$$

Для всего потока жидкости мощность равна сумме мощностей ее элементарных объемов:

$$N = \sum N_{\text{э}} = \rho Q (V_1 U_1 \cos \alpha_1 - V_2 U_2 \cos \alpha_2), \quad (1.21)$$

где  $Q$  - расход жидкости через рабочее колесо.

Так как мощность  $N = \gamma Q H$ , то:

$$N = \gamma Q H = \rho Q (V_1 U_1 \cos \alpha_1 - V_2 U_2 \cos \alpha_2); \quad (1.22)$$

и напор:

$$H = \frac{1}{g} (V_1 U_1 \cos \alpha_1 - V_2 U_2 \cos \alpha_2). \quad (1.23)$$

Уравнение (1.23) - это уравнение Эйлера, основное уравнение гидромашин. Оно дает величину напора турбины, имеющей бесконечное число лопастей. В действительности напор будет меньше:

$$H_T = \eta_T H = \frac{1}{g} (V_1 U_1 \cos \alpha_1 - V_2 U_2 \cos \alpha_2). \quad (1.24)$$

Здесь  $\eta_T$  - гидравлический КПД турбины, то есть КПД использования подведенного к турбине напора:

$$\eta = \frac{H_{\text{подв}} - \Delta H}{H_{\text{подв}}}, \quad (1.25)$$

где  $H_{\text{подв}}$  - напор подведенного к турбине потока;  $\Delta H$  - потери напора в процессе преобразования энергии на рабочем колесе.

Из (1.24) видно, что за счет величины  $V_2 U_2 \cos \alpha_2$  напор турбины уменьшается. Если конструктивно турбину выполнить таким образом, чтобы  $\alpha_2 = 90^\circ$ , то получим напор:

$$H_T = \eta_T H = \frac{1}{g} V_1 U_1 \cos \alpha_1. \quad (1.26)$$

Такая турбина называется турбиной с нормальным выходом. Как будет показано дальше, КПД турбины повышается, если поток при выходе имеет закрутку, поэтому чаще всего угол выхода  $\alpha_2 < 90^\circ$ .

Для исследования уравнений (1.23), (1.24) можно воспользоваться треугольниками скоростей (рис. 1.14, 4.15). Проекции скоростей  $V$  на направление переносной скорости будут равны:

$$V_{U_1} = V_1 \cos \alpha_1, \quad (1.27)$$

$$V_{U_2} = V_2 \cos \alpha_2, \quad (1.28)$$

Эти величины называются тангенциальными скоростями абсолютной скорости.

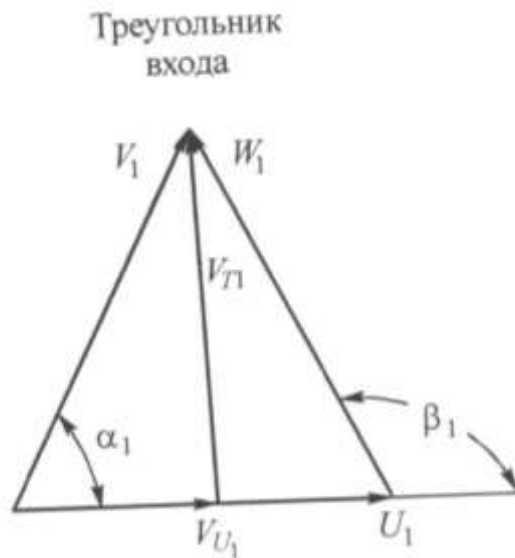


Рисунок 1.15 – Треугольники скоростей на входе в турбину



Рисунок 1.16 – Треугольники скоростей на выходе в турбину

Проекции абсолютных скоростей  $V$  на направление относительной скорости  $W$  будут равны:

$$V_{T1} = V_1 \sin \alpha_1; \quad (1.29)$$

$$V_{T2} = V_2 \sin \alpha_2. \quad (1.30)$$

и они называются меридиональными составляющими абсолютной скорости.

Приняв эти обозначения, уравнения (1.23), (1.24) можно записать следующим образом:

$$H_T = \eta_T H = \frac{1}{g}(V_{U1}U_1 - V_{U2}U_2); \quad (1.31)$$

$$H_T = \eta_T H = \frac{1}{g}V_{U1}U_1. \quad (1.32)$$

Для реальной турбины, работающей с определенным синхронным числом оборотов, переносные скорости  $U_1$  и  $U_2$  - постоянны, следовательно, напор турбины определяется тангенциальной составляющей абсолютной скорости. В процессе проектирования может изменяться число оборотов турбины, тогда меняется и напор турбины.

Меридиональная составляющая абсолютной скорости определяет расход, проходящий через турбину. Действительно, расход зависит от скоростей, перпендикулярных живому сечению. К живому сечению турбины, имеющему радиус  $r_1$  нормальная скорость  $V_{T1}$ , а к живому сечению на выходе из турбины, имеющему радиус  $r_2$ , перпендикулярна скорость  $V_{T2}$  (рисунок 4.9, 4.10). Тогда расход турбины на входе будет:

$$Q = V_{T1} \left( 2\pi r_1 B_1 - \sum_i \delta_{i1} B_1 \right), \quad (1.33)$$

где  $B$  - высота входного сечения;

$\delta_{i1}$  - толщина  $i$ -й лопасти турбины на входе.

Величина  $K_1 = (2\pi r_1 B_1 - \sum_i \delta_{i1} B_1)$  определяется конструкцией турбины и для реальной установки неизменна. Отсюда:

$$Q = V_{T1} K_1. \quad (1.34)$$

Из (1.34) видно, что расход турбины увеличивается с ростом меридиональной составляющей скорости [1].

## 1.6 Типы генераторов, используемых на микроГЭС

В малой гидро и ветроэнергетике применяются генераторы переменного тока, всех современных типов. Основное распространение получили синхронные генераторы. Преимущество синхронных генераторов: возможность выработки реактивной мощности, лёгкость регулирования напряжения при работе на автономную нагрузку, жёсткая связь частоты генератора со скоростью вращения, высокий КПД.

Синхронные генераторы применяются от максимальных мощностей, характерных для малой энергетики, до минимальных. На рынке представлены, преимущественно, зарубежные генераторы для МГЭС мощностью от 50 до 5000 кВт с вертикальным или горизонтальным валом и скоростью вращения от 75 до 750 об/мин.

Недостаток синхронных генераторов - сложность конструкции по сравнению с генераторами других типов, в основном из-за наличия обмотки возбуждения на роторе и необходимости применения щёток и контактных колец для подачи напряжения на обмотку возбуждения ротора. В результате, синхронные генераторы имеют большие габариты, массу и стоимость, чем другие типы генераторов. В последнее время практически для всего диапазона мощностей малой энергетики начинают находить применение синхронные генераторы с безщёточным возбуждением. Однако, безщёточное возбуждение не полностью устраняет конструктивную сложность синхронного генератора.

В диапазоне мощностей от 1 МВт и выше преимущественно используются синхронные генераторы с постоянными магнитами. Так концерн Русэлпром предлагает синхронные генераторы СГ, СГС и ВГС мощностью от 500 МВт и более (таблица 1.2) [5].

При мощности агрегата МГЭС менее 300-500 МВт промышленность не предлагает многополюсных тихоходных генераторов, поэтому в маломощных МГЭС используются общепромышленные синхронные генераторы со скоростью вращения 500 об/мин. и выше. Для согласования скоростей вращения генератора и турбины используются мультипликаторы. В ветроэнергетике практически во всём диапазоне мощностей (от 20 кВт и выше) используются мультипликаторы и высокооборотные генераторы. В таблице 1.2 представлены безщёточные генераторы общепромышленного применения, пригодные для использования в гидро и ветроагрегатах малой энергетики.

Таблица 1.2 – Мощные синхронные генераторы

Модель	Мощность (кВт)	Напряжение (кВ)	Частота вращения (об/мин)	КПД	Масса (кг)
ВГС-450-40-0,4 УХЛ4	450	0,4	150	93,2	13000
СМ-500-6,3-300УХЛ4	500	6,3	300	92	9100
СГВ-500-10,5-300УХЛ4	500	10,5	300	92,2	12300
СГС-500-20-6,3 УХЛ4	500	6,3	300	93,6	6900
СГ-630-12В2 УХЛ3	630	6,3	500	95	5900
СГ-800-16В2 УХЛ3	800	6,3	375	96	6300
СМ-4000-18УХЛ4	4000	6,3	333,3	94,8	57600

Асинхронные генераторы, также могут использоваться почти во всём диапазоне мощностей малой энергетики. Только генераторы относительно большой мощности (более 1 МВт) выполняются преимущественно синхронными, ввиду лучших энергетических показателей. Преимущество

асинхронных генераторов - более низкие стоимость, масса и габариты чем у синхронного генератора той же мощности. Их следует использовать для снижения капитальных затрат на строительство МГЭС или ветроустановки, если требования к эксплуатационным затратам невысоки.

Дополнительные преимущества асинхронного генератора – малая чувствительность к короткому замыканию и высокая степень защиты от внешних воздействий. Малая чувствительность к коротким замыканиям обусловлена развозбуждением асинхронного генератора при коротком замыкании. Высокая степень защиты легко обеспечивается, благодаря простоте конструкции.

Недостаток асинхронного генератора – потребление реактивной мощности. При работе генератора параллельно с мощной сетью, он потребляет реактивную мощность из сети.

Для работы асинхронного генератора на маломощную сеть или на автономную нагрузку используется батарея конденсаторов для генерации реактивной мощности. Последнее ухудшает массогабаритные и стоимостные показатели асинхронного генератора, поэтому его применение оправдано либо для работы параллельно с мощной сетью, либо для работы на активную автономную нагрузку. Активная нагрузка требует применения батареи конденсаторов относительно небольшой мощности. При индуктивной нагрузке батарея конденсаторов должна обеспечивать реактивной мощностью и генератор и нагрузку, что требует батареи большого объема [9].

Таблица 1.3 – Генераторы общепромышленного применения

Страна	Модель	P (кВт)	n (об/мин)	U (кВ)
Чехия	GSH 400 S14	104	500	0,42
Чехия	GSH 400 L12	200	500	0,42
Чехия	GSH 400 S14	104	500	0,42
Чехия	GSH 400 L12	200	500	0,42
Россия	SGA 450-315/8	315	750	0,4
Чехия	GSH 500 M12	352	500	0,42
Чехия	GSH 63 Ma 14	416	428	0,42
Чехия	СГС 900F-12Н1 с УВГС-СГ-500-0,4 и УКН-500 или ШГВ	500	500	0,4
Чехия	GSH 710 M16	600	375	0,42
Чехия	GSH 450 L8	736	750	0,42
Чехия	GSH 840 L16	800	375	0,42
Чехия	GSH 710 L12 S14	1008	500	0,42

Другими недостатками асинхронного генератора являются сложность регулирования напряжения при работе на автономную нагрузку или маломощную сеть, так как регулировать напряжение можно только на выводах генератора, и не жёсткая связь частоты генератора со скоростью вращения ротора, из-за скольжения, что осложняет регулирование частоты. Последний недостаток не имеет значения при работе генератора на



выпрямитель или промежуточное звено постоянного тока [10, 11]. В таблице 1.4 представлены асинхронные генераторы мощностью от 100 до 1000 кВт и скоростью вращения от 125 до 500 об/мин., предназначенные для применения в гидро и ветроэнергетике [12].

Таблица 1.4 – Асинхронные генераторы

Страна	Модель	Р (кВт)	n (об/мин)	U (кВ)
Россия	АСВО-90-32-64	90	187,5	0,38
Россия	АОК2-560МК-10	200	600	0,4
Россия	АК4-450Ч-12УЗ	250	500	0,4
Россия	А4-450Ч	250	500	6
Россия	ДВАН143-500-6-16УЗ	500	375	6
Чехия	GAK560 S12	600	500	0,4

Так же как и синхронные генераторы, многополюсные асинхронные генераторы мощностью менее 300-500 МВт мало представлены на рынке. Поэтому, в маломощных гидро и ветроагрегатах используются общепромышленные асинхронные генераторы и двигатели со скоростью вращения 300-500 об/мин. Для согласования скоростей вращения генератора с низкооборотной турбиной используются мультипликаторы. В таблице 1.5 представлен ряд асинхронных машин пригодных для использования в гидро и ветроагрегатах небольшой мощности.

Синхронные генераторы с постоянными магнитами отличаются от обычных синхронных генераторов более простой конструкцией, но отсутствие на роторе обмотки возбуждения приводит к сложностям регулирования напряжения. Более простая конструкция упрощает обслуживание машины, повышает ее надежность. Однако генераторы с постоянными магнитами практически не обеспечивают регулирование и стабилизацию напряжения на выходе.

Таблица 1.5 – Асинхронные генераторы небольшой мощности

Страна	Модель	Р (кВт)	n (об/мин)	U (кВ)
Китай	Y280M-8	45	740	0,4
Китай	Y315M-8	75	740	0,4
Чехия	GAK280L10	100	600	0,4
Чехия	GAK355S12	155	500	0,4
Чехия	GAK355L12	200	500	0,4
Россия	ДАН-355М-8УЗ	200	750	0,4
Россия	А-450Х-12УЗ	250	500	0,4
Россия	АК4-450У-12УЗ	315	500	0,4
Россия	АГГ-400-0,4-10УЗ	400	600	0,4
Чехия	GAK500M12	510	500	0,4

Недостатком генератора с возбуждением от постоянных магнитов является также высокая стоимость постоянных магнитов и сложность конструкции ротора, из-за необходимости крепления на нём магнитов [13]. Кроме того, дополнительным недостатком генераторов с постоянными магнитами является сложность утилизации постоянных магнитов. Область применения генераторов с постоянными магнитами – гидро и ветроагрегаты с нестабильной частотой вращения турбины, работающие на преобразователь частоты. Промышленность предлагает генераторы с постоянными магнитами мощностью до нескольких десятков киловатт, реже до нескольких сотен, со скоростью вращения от 200-300 об/мин. и выше. Из-за ухудшения стоимостных и массогабаритных показателей, низкооборотный генератор с постоянными магнитами небольшой мощности изготовить также трудно, как генераторы других типов [18].

Таблица 16 – Синхронные генераторы с постоянными магнитами

Страна	Модель	P (кВт)	n (об/мин)	U (кВ)	КПД (%)	Масса (кг)
Китай	YGDL-100	100	125	0,4	93,7	2800
Китай	YGDL-200	200	250	0,4	94	2800
Китай	YGDL-320	320	500	0,4	94,6	1680
Китай	YGDL-400	400	500	0,4	94,5	2800
Китай	YGDL-600	600	500	0,38	94,6	3900
Китай	YGDL-560	700	250	0,4	93,8	6930

В последнее время в гидроэнергетике начинают находить применение индукторные генераторы. Индукторный генератор является разновидностью синхронного генератора и обладает всеми его преимуществами: жёсткая связь частоты генератора со скоростью вращения, возможность генерации реактивной мощности при работе параллельно с сетью, возможность регулирования активной мощности изменением тока обмотки возбуждения при работе на автономную нагрузку или на маломощную сеть.

Конструктивные отличия индукторного генератора от традиционного синхронного – безобмоточный ротор и расположение обмотки возбуждения на статоре. Поэтому, одно из основных преимуществ индукторного генератора простота и надёжность конструкции. Безобмоточный зубчатый ротор индукторного генератора конструктивно проще даже ротора асинхронного генератора. Обмотка возбуждения располагается на статоре, в тех же пазах (часть пазов для этого увеличивают) что и 3-фазная обмотка статора, что незначительно усложняет конструкцию статора. Кроме того, отпадает необходимость в контактных кольцах и щётках для питания обмотки возбуждения.

Главным преимуществом индукторного генератора является магнитная редукция скорости вращения, которая позволяет согласовывать скорость

вращения генератора со скоростью вращения турбины без использования повышающей механической передачи – мультипликатора. В таблице 1.7 приведены параметры индукторных генераторов, выпускаемых Тираспольским заводом «Электромаш» [4].

Таблица 1.7 – Индукторные генераторы

Типоразмер	Мощность (кВт)	Напряжение (В)	Частота вращения (об/мин)	Масса (кг)
СГИ 75-22УЗс ЩУИ 75 УЗ	75	400	273	4300
СГИ 110-22УЗс ЩУИ 110 УЗ	110	400	273	5400
СГИ 100-14УЗс ЩУИ 100 УЗ	100	400	428	4300
СГИ 150-14УЗс ЩУИ 150 УЗ	150	400	428	5400
СГИ2-100-14 УЗс ЩУИ 100 УЗ	100	400	428	5000
СГИ37-22УЗ БК	37	400	273	1500
СГИ75-22УЗ БК	75	400	273	2400
СГИ100-14УЗ БК	100	400	428	2400
СГИ150-14УЗ БК	150	400	428	3200
СВИГ-250-0,4	250	400	600	2500

Номенклатура генераторов охватывает диапазон мощности от 75 до 250 кВт, со скоростью вращения от 273 до 600 об/мин. На рисунке 1.17 представлены индукторные генераторы завода «Электромаш». В данном диапазоне скоростей и мощности, могут применяться генераторы других типов. Но даже в этом случае, индукторные генераторы имеют преимущество в стоимости, благодаря простоте конструкции. На представленном рисунке показана малая гидроэлектростанция «Немново», подземного заложения с индукторным гидрогенератором мощностью 100 кВт на Августовском канале в Беларуси.



Рисунок 1.17 – Малая гидроэлектростанция «Немново» подземного заложения с индукторным гидрогенератором мощностью 100 кВт

## 1.7 Преимущества генераторов на постоянных магнитах

Малая энергетика имеет большой потенциал развития. Но большинство энергоресурсов сосредоточены в области низкоэнергетических водных и воздушных потоков, освоение которых сдерживается отсутствием эффективного оборудования. Оборудование для выработки электроэнергии с помощью низкоэнергетических потоков должно быть высокорентабельным, для окупаемости капиталовложений при относительно небольшой энергоотдаче. Поэтому, главное требование к такому оборудованию – простота конструкции, минимальное использование дорогих материалов, минимум строительных конструкций для размещения оборудования.

В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют генераторы на постоянных магнитах. В малой гидроэнергетике эти генераторы наиболее целесообразно применять в прямоточных гидроагрегатах, требующих наиболее простых гидросооружений. Возможность работы генератора на постоянных магнитах при низкой частоте вращения позволяет сопрягать вал генератора непосредственно с валом низкооборотной турбины, без применения механического мультипликатора. Простота конструкции генератора и безобмоточный ротор обеспечивают высокие стоимостные показатели гидроагрегата и высокую надёжность.

Целью работы является анализ работы новой типовой конструкции генератора на постоянных магнитах для шнековой микро ГЭС.

*Выводы по первой главе.*

Гидропотенциал Казахстана оценивается примерно в 170 ТВт (млн. мВт) в год, на сегодня из них вырабатываются лишь 7-8 ТВт в год, т.е. менее 5%. Это связано со строительством крупных ГЭС на р. Иртыш и р. Или и отсутствием технических возможностей подключения малых и мини-ГЭС в общую сеть. В настоящее время разрабатываются программы по строительству малых ГЭС каскадного типа. В этом случае большое значение имеют малые гидроэлектростанции, мощность которых составляет менее 10 МВт.

Рост экономики Казахстана предполагает возрастание электропотребления. Для стимулирования строительства возобновляемых источников энергии в 2009 году принят закон «О поддержке использования возобновляемых источников энергии».

Если наладить производство энергии на основе возобновляемых источников, Казахстан сэкономит десятки сотен тонн условного топлива, которые можно экспортировать, и при этом радикально сократить выбросы углекислого газа в атмосферу.

Широкомасштабное строительство малых и мини-ГЭС позволит использовать энергию малых горных рек Казахстана.

Наиболее перспективной является использование шнековой микроГЭС, так как она обладает рядом преимуществ.

Использование генераторов с постоянными магнитами дает наилучшую энергетическую эффективность работы генератора с микроГЭС, но в узком диапазоне, а так как в течении сезонов и суток режим работы микроГЭС меняется, то генератор будет отклоняться от своих оптимальных режимов, необходимо использование управление генераторов для обеспечения максимальной эффективности работы, при изменении режимов микроГЭС.

## 2 Режимы работы электрического генератора

### 2.1 Режим работы генератора на постоянных магнитах

Особенности рабочего процесса синхронных генераторов с постоянными магнитами обуславливаются наличием постоянного магнита магнитных цепях этих машин. Магнит выполняет две функции: 1) источника н.с., заменяющего обмотку возбуждения обычной машины с электромагнитным возбуждением, и 2) участка магнитопровода, обладающего определенным магнитным сопротивлением.

Как источник н. с. постоянный магнит имеет ту особенность, что величина отдаваемого им магнитного потока и развиваемая н.с. во внешнем пространстве не остаются постоянными, а изменяются с изменением проводимости внешней магнитной цепи и магнитного поля реакции якоря. При этом с изменением этих параметров изменяются соотношение между потоком рассеяния и полезным потоком и величины наводимой в обмотке якоря ЭДС и напряжения.

Внешней магнитной характеристикой постоянного магнита является прямая возврата с углом наклона  $\beta$ , определяющимся величиной коэффициента возврата  $\rho$ . Ввиду относительно малого значения  $\rho$  внутреннее сопротивление магнита велико:

$$R_m = \frac{I_m}{\rho \cdot S_m}. \quad (2.1)$$

Имеется большое внутреннее падение магнитного напряжения в магните.

Как участок магнитопровода постоянный магнит представляет большое магнитное сопротивление для потоков реакции якоря. Потоки реакции якоря поэтому вынуждены замыкаться по путям потоков рассеяния. Расчетные формулы реактивных сопротивлений  $X_{aq}$  и  $X_{ad}$  здесь приобретают другой вид.

В электрической машине с постоянными магнитами в отличие от машин с электромагнитным возбуждением не имеется прямого способа регулирования величины полезного потока, отдаваемого магнитом. Регулирование возможно только косвенным образом путем изменения магнитной проводимости внешней цепи или за счет воздействия со стороны цепи якоря.

Такие факторы, как отсутствие обмотки возбуждения, большое внутреннее магнитное сопротивление магнита, отсутствие ощутимых контуров вихревых токов внутри материала магнита, оказывают существенное влияние на величины ударного и установившегося токов короткого замыкания.

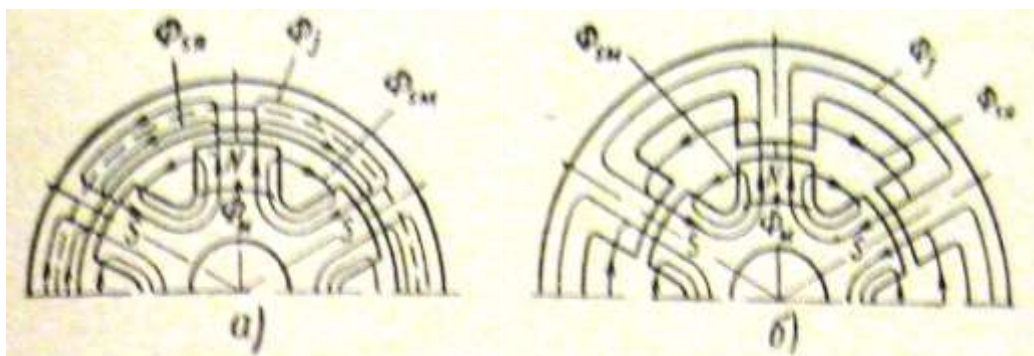
В электрических машинах с постоянными магнитами на рабочий процесс оказывают значительное влияние проводимости рассеяния магнитной цепи, определяющие использование магнитной энергии магнита, внешние характеристики генератора и развиваемую им мощность, величины ударного и установившегося токов короткого замыкания.

Рабочий процесс в генераторах с постоянными магнитами должен рассматриваться в тесной связи со схемами замещения магнитных проводимостей внешней магнитной цепи и магнитным состоянием постоянного магнита.

В режиме холостого хода электрическая цепь якоря разомкнута и н.с. реакции якоря равна нулю. Вследствие вращения ротора в обмотке якоря наводится ЭДС холостого хода  $E_0$ .

Величина полезного потока  $\Phi_0$ , а следовательно, и величина ЭДС  $E_0$  могут быть определены с помощью схемы замещения магнитных проводимостей и рабочей диаграммы магнита.

Схема замещения магнитных проводимостей определяется типом магнитной цепи генератора и магнитным модом машины. Наиболее простые схемы замещения магнитных проводимостей (рисунок 2.2, а и б) соответствуют магнитным цепям генераторов со звездообразным ротором без полюсных башмаков (рисунок 2.1, а и б).



а — статор без выступающих полюсов; б — статор с выступающими полюсами

Рисунок 2.1 – Магнитные цепи генератором со звездообразным ротором без полюсных башмаков

Для режима холостого хода  $F_{ad} = 0$ , то есть со стороны  $F_{ad} = 0$  схема замещения замкнута накоротко. Тогда, пользуясь схемами замещения, можем подсчитать результирующие значения проводимости холостого хода  $G_{0_{рез}}$ , коэффициента рассеяния потока  $\delta_0$ , полезной проводимости  $G_{\Pi}$  и результирующей проводимости рассеяния  $G_{\Sigma}$ . Согласно схеме замещения на рисунке 2.2, а имеем:

$$G_{0pez} = G_{SM} + \frac{1}{\frac{1}{G_1} + \frac{2}{G_2} + \frac{2}{G_3}}. \quad (2.2)$$

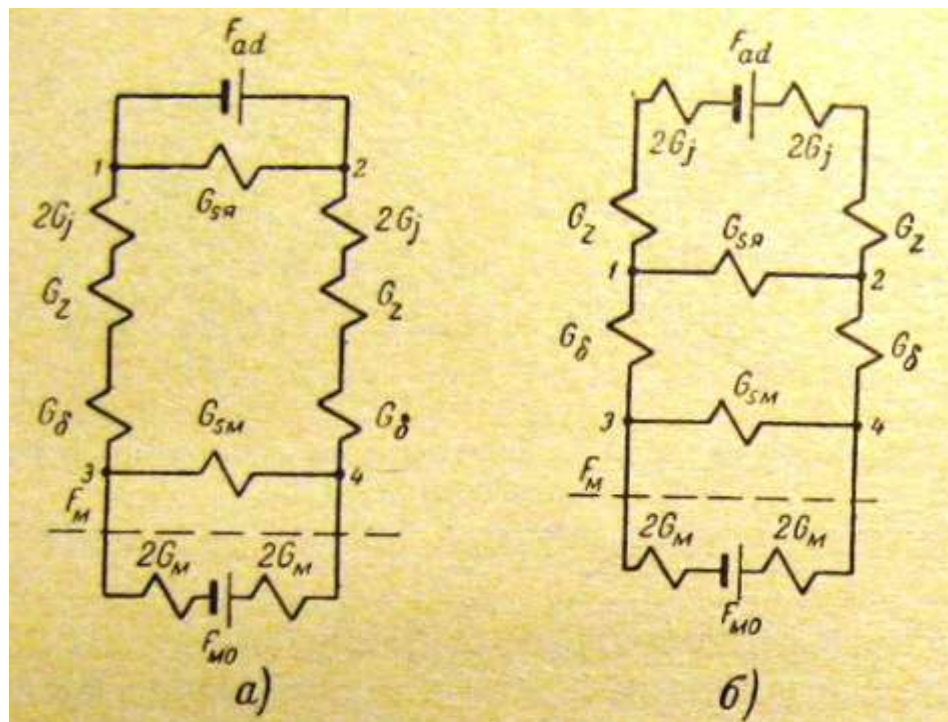
$$\delta_0 = \frac{\Phi_M}{\Phi_E} = 1 + \frac{G_{SM}}{G_0 - G_{SM}}. \quad (2.3)$$

$$G_{II} = \frac{G_0}{\delta_0}. \quad (2.4)$$

$$G_s = G_0 - G_{II} = G_{II}(\delta_0 - 1). \quad (2.5)$$

Полезный поток  $\Phi_0$  равняется потоку в воздушном зазоре  $\Phi_\delta$ .

Для магнитной системы на рисунке 2.1,б характерным является наличие дополнительного потока рассеяния между полюсами  $\Phi_{sj}$ , слабо выраженного в первой системе. Потоку  $\Phi_{sj}$  соответствует некоторая эквивалентная, приведенная к концам полюсов проводимость  $G_{sj}$ , находящаяся под напряжением, равным падению напряжения в полюсе и ярме статора.



а - со статором без выступающих полюсов; б - со статором с выступающими полюсами;  
 $F_{M0}$  внутренняя (фиктивная) н.с. магнита;  $G_{SM}$  - проводимость рассеяния магнита;  
 $G_\delta, G_z, G_j$  - проводимость воздушного зазора, зубцов и ярма соответственно;  $G_{sj}$  -  
 проводимость рассеяния якоря;  $G_M$  - магнитная проводимость магнита

Рисунок 2.2 – Схемы замещения магнитной цепи генераторов со звездообразными роторами без полюсных башмаков на пару полюсов



Величина потока  $\Phi_{сн}$  в режиме холостого хода обычно незначительна. Согласно схеме замещения (рисунок 2.2,б) имеем:

$$G_{0pez} = G_{3,4} = G_{сн} + \frac{1}{\frac{2}{G_{\delta}} + \frac{1}{G_{сн} + \frac{1}{\frac{1}{G_j} + \frac{2}{G_z}}}}. \quad (2.6)$$

$$\delta_0 = \delta_{1,2} \delta_{3,4} = \left(1 + \frac{G_{сн}}{G_{1,2} - G_{сн}}\right) \cdot \left(1 + \frac{G_{сн}}{G_{3,4} - G_{сн}}\right). \quad (2.7)$$

$$G_{1,2} = G_{сн} + \frac{1}{\frac{1}{G_1} + \frac{2}{G_z}}. \quad (2.8)$$

$$G_{3,4} = G_{сн} + \frac{1}{\frac{1}{G_{1,2}} + \frac{2}{G_{\delta}}}. \quad (2.9)$$

$G_{1,2}$ ,  $G_{3,4}$  - проводимости относительно узловых точек 1 - 2 и 3 - 4 соответственно;  $\delta_{1,2}$ ,  $\delta_{3,4}$  - частичные коэффициенты рассеяния соответственно в точках 1 - 2 и 3 - 4.

Сумма падений магнитных напряжений на отдельных участках магнитной цепи равняется н.с., развиваемой магнитом во внешнем пространстве:

$$F_M = 2F_{\delta} + 2F_z + F_j, \quad (2.10)$$

где  $F_{\delta} = 0,8\delta B_{\delta} \cdot 10^4$  — падение магнитного напряжения в воздушном зазоре, а;

$\delta$  — величина воздушного зазора, см;

$B_{\delta}$  — индукция в воздушном зазоре, Вб/м<sup>2</sup>;

$F_z$  и  $F_j$  — падения магнитного напряжения соответственно в зубцах или полюсе статора и ярме статора.

Величина потока рассеяния  $\Phi_s$  в рассматриваемой магнитной системе определяется в основном проводимостью рассеяния магнита  $G_{сн}$  (поток  $\Phi_{сн}$ ), так как эта проводимость находится под полным напряжением магнита  $F_M$ .

Для магнитной системы со звездообразным ротором без полюсных башмаков характерными являются сравнительно малые рассеяния магнитного потока.

Величина потока рассеяния зависит от величины воздушного зазора  $\delta$ . С увеличением зазора  $\delta$  поток рассеяния возрастает, а полезный поток  $\Phi_0$  и общий поток  $\Phi_M$  уменьшаются.

С точки зрения обеспечения наибольших значений полезного потока  $\Phi_0$  и лучшего использования магнита зазор  $\delta$  должен быть минимально возможным.

При наличии полюсных башмаков на полюсах магнита-звездочки (рисунок 2.3) картина распределения магнитных потоков и схема замещения магнитных проводимостей (рисунок 2.4) усложняются. Помимо потоков рассеяния  $\Phi_{SM}$  и  $\Phi_{SP}$  появляется значительный по величине поток рассеяния полюсных башмаков  $\Phi_{SP\delta}$ . Схема замещения, представленная на рисунке 2.4, отличается от схемы, изображенной на рисунке 2.2, наличием дополнительных проводимостей: а)  $G_{П.\delta}$  - для участка полюсных башмаков; б)  $G_{ст.м}$  - для участка стыка магнита с полюсным башмаком; в)  $G_{SP.\delta}$  - для рассеяния пары полюсных башмаков.

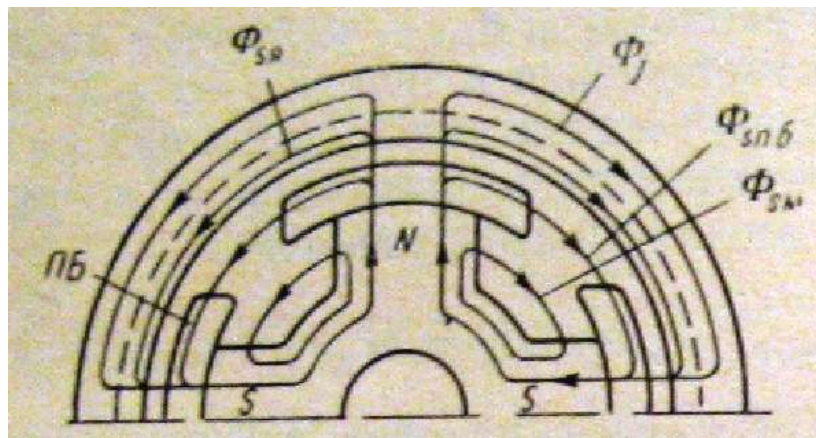


Рисунок 2.3 – Эскиз магнитной цепи генератора с полюсными башмаками

Решение схемы замещения на рисунок 2.4 в принципе ничем не отличается от решения «предыдущей» схемы замещения. Значения результирующей проводимости  $G_{0рез}$  и коэффициента рассеяния  $\delta_0$  определяются так:

$$G_{0рез} = G_{5,6} = G_{SM} + \frac{1}{\frac{2}{G_{ст.м}} + \frac{2}{G_{П.\delta}} + \frac{1}{G_{SP.\delta} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{G_\delta} + \frac{2}{G_z} + \frac{1}{G_j}}}}}; \quad (2.11)$$

$$\delta_0 = \delta_{3,4} \delta_{5,6} = \left[ 1 + \frac{G_{SP.\delta}}{(G_{3,4})_П} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{G_{SM}}{(G_{5,6})_П} \right], \quad (2.12)$$

где

$$(G_{3,4})_{II} = \frac{1}{\frac{1}{G_j} + \frac{2}{G_z} + \frac{2}{G_\delta}}; \quad (2.13)$$

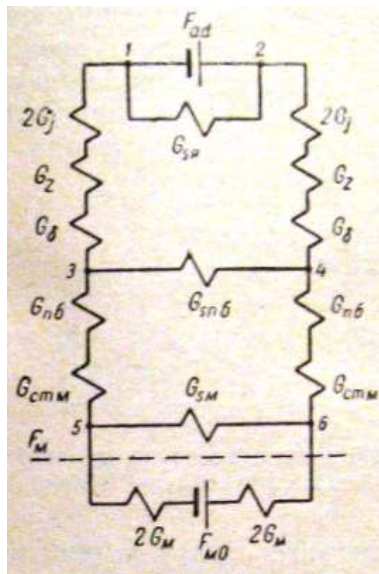
$$(G_{5,6})_{II} = \frac{1}{\frac{1}{G_{3,4}} + \frac{2}{G_{II,\delta}} + \frac{2}{G_{ст.м}}}; \quad (2.14)$$

$$G_{3,4} = (G_{3,4})_{II} + G_{СИ,\delta}. \quad (2.15)$$

Значения полезной проводимости  $G_{II}$  и проводимости рассеяния  $G_s$  определяются выражениями (2.4) и (2.5).

Падение магнитного напряжения во внешней цепи равняется сумме падений напряжения на отдельных участках цепи:

$$F_M = 2F_\delta + 2F_{ст.м} + 2F_{II,\delta} + 2F_z + F_j. \quad (2.16)$$



$G_j, G_z, G_\delta, G_{II,\delta}, G_{ст.м}, G_M$  - магнитные проводимости ярма, зубцов, воздушного зазора, полюсных башмаков, стыка магнита и магнита соответственно;  $G_{сЯ}, G_{СИ,\delta}, G_{SM}$  - проводимости рассеяния якоря, полюсных башмаков, магнита соответственно;  $F_M$  - и.с. постоянного магнита;  $F'_M$  - внутренняя (фиктивная) и.с. постоянного магнита.

Рисунок 2.4 – Схема замещения магнитной цепи генератора с полюсными башмаками (для пары полюсов)

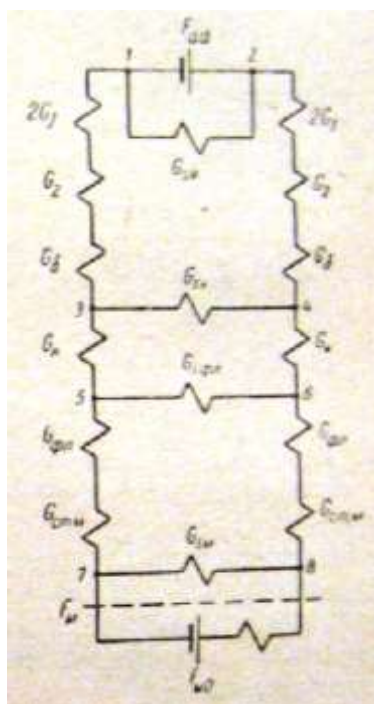


Рисунок 2.5 – Упрощенная схема замещения магнитных проводимостей магнитной цепи генератора с когтеобразным ротором (на пару полюсов)

Для генератора с когтеобразным ротором схема замещения магнитных проводимостей приведена на рисунке 2.5. По сравнению с предыдущей схемой (рисунке 2.4) здесь имеются дополнительные проводимости  $G_{S\_fl}$  и  $G_{fl}$ . Решение этой схемы замещения подобно решению предыдущей схемы.

Приведенные выше схемы замещения магнитных проводимостей для наиболее характерных магнитных систем составлены для пары полюсов. Однако часто пользуются схемами замещения и на один полюс. В этом случае расчет ведется на половинную длину магнита ( $l_m/2$  по средней силовой линии). Расчет проводимостей рассеяния полюса производится относительно эквипотенциальных поверхностей, проходящих между полюсами и по своему магнитному потенциалу соответствующих нейтральному сечению магнита.

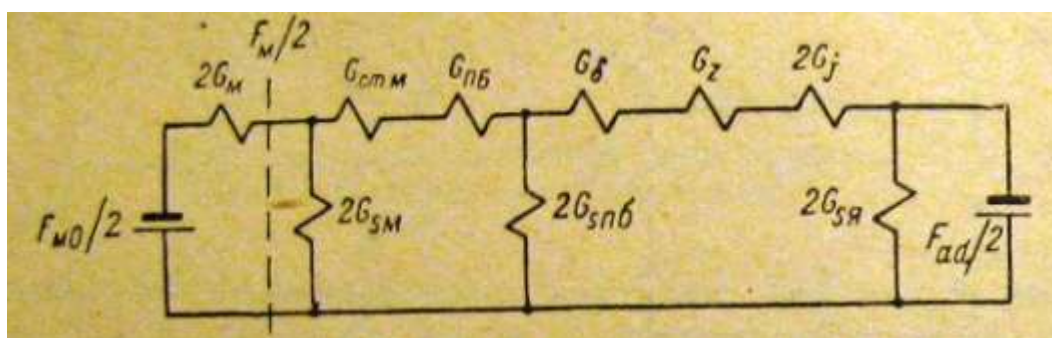


Рисунок 2.6 – Схема замещения магнитной цепи генератора со звездообразным ротором с полюсными башмаками на один полюс

Для перехода от схемы замещения для двух полюсов к схеме замещения для одного полюса в симметричных магнитных системах необходимо от первой схемы оставить одну ветвь последовательно соединенных проводимостей (например, левую в схемах на рисунках 2.2, 2.4 и 2.5), проводимости рассеяния удвоить и второй конец их присоединить к общей линии, имеющей потенциал нейтрального сечения магнита. В качестве и. с. магнита и н.с. реакции якоря берутся их половинные значения. В качестве примера на рисунке 2.6 приведена схема замещения магнитных проводимостей для одного полюса, полученная на основании схемы замещения на рисунке 2.4.

Подсчет величин полезного потока  $\Phi_0$ , потока рассеяния  $\Phi_\delta$ , и общего потока магнита  $\Phi_M$  производится с помощью рабочей диаграммы магнита [19].

## 2.2 Вентильный генератор

Вентильные генераторы переменного тока ВГ-1(12)/450-04 серии «ВИНДЭК».

Вентильные генераторы серии «Виндэк» предназначены для работы в составе ветряных электростанций, работающих через внешний выпрямитель на заряд аккумуляторных батарей. Генераторы выпускаются как обращенной конструкции, так и необращенной. Все генераторы имеют возбуждение от постоянных магнитов на основе сплава неодим – железо – бор. Эти генераторы могут использоваться в микроГЭС.

Генераторы приводятся во вращение непосредственно от вала, конструкция которого определяется разработчиком. Все генераторы серии имеют малый момент страгивания.

Конструкции генераторов ВГ-05(12)-04, ВГ-1(12)/450-04 и ВГ-1(12)/650-04 выполнены таким образом, что на фланцевой щит корпуса, легко может быть установлено через муфту с вал турбины или ветродвигателя (рисунок 2.7) [20].



Рисунок 2.7 – Внешний вид генератора ВГ

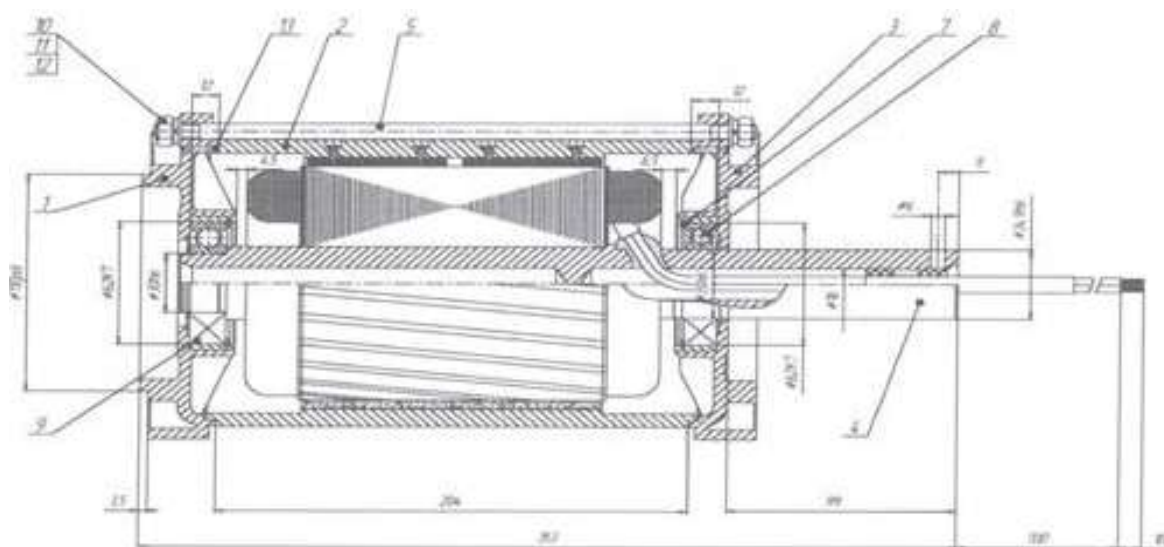


Рисунок 2.8 – Конструкция генератора ВГ-1(12)/450 и ВГ-2(12)/650-01

Этот тип генераторов может работать в низкооборотном диапазоне, что необходимо для Малых микро ГЭС, к которым относится шнековая. Так на рисунке 2.9 показаны внешние характеристики серийного генератора, где генератор может в широком диапазоне нагрузки работать с относительно высоким КПД. Для обеспечения потребителей необходимого качества электроэнергии то работа этого генератора будет осуществляться через выпрямление и инвертирования напряжения.



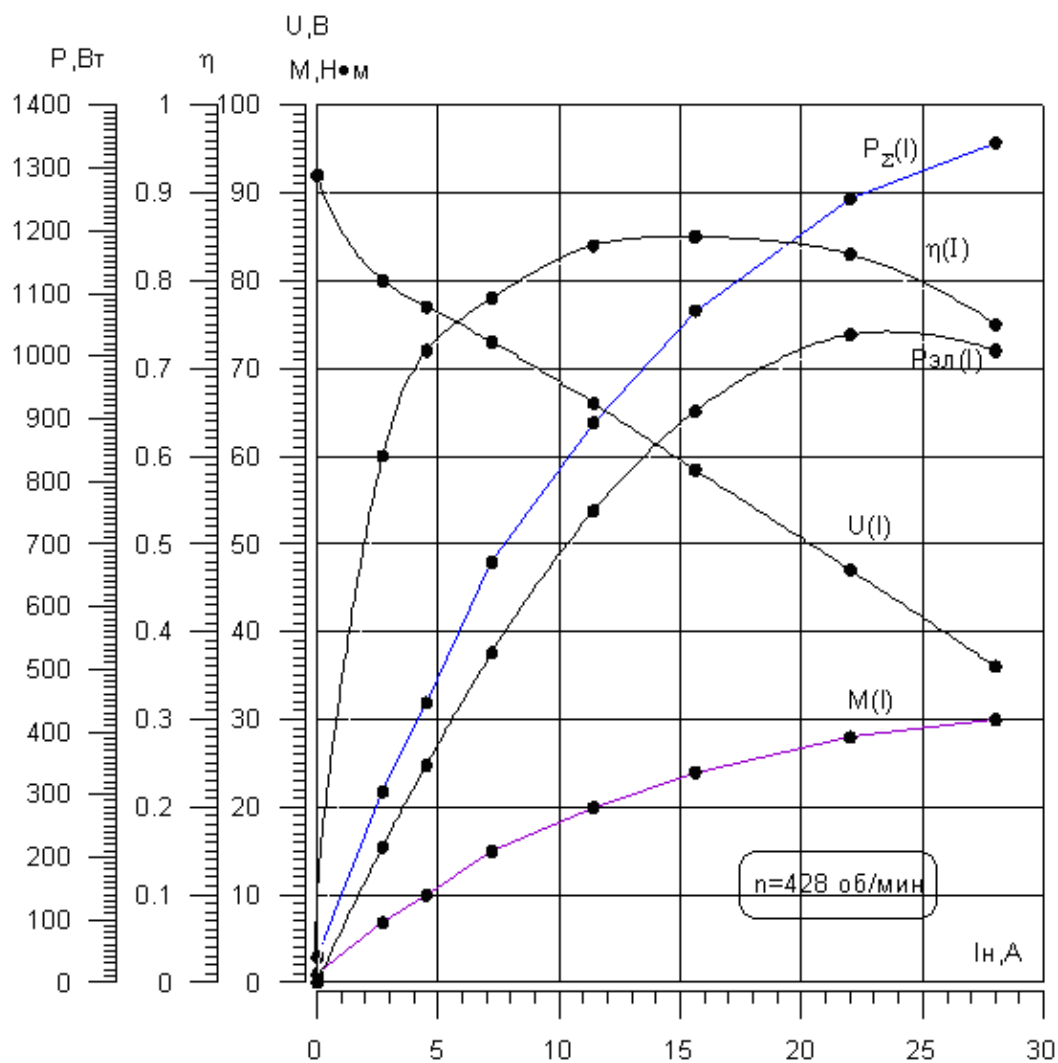


Рисунок 2.9 – Внешние характеристики серийного генератора ВГ-1(12)-01 при  $n = 428$  об/мин

Генераторы необращенной конструкции ВГ – 5(28)/114-300-02В и 02Г

Конструкция. Генераторы ВГ–5(28)/114-300-02В и 02Г представляют собой трехфазные многополюсные генераторы классической конструкции с возбуждением от постоянных магнитов на основе Nd-Fe-B. На цилиндрическом роторе облегченной конструкции наклеены в два ряда сегментные полюса. Генераторы исполнения 02В имеют «уши» для крепления в вертикальном положении, а генераторы 02Г имеют лапы для установки на станину.

Генераторы ВГ – 5(28)/114-300-02В и 02Г предназначены для работы в составе ветроэнергетических установок и МикроГЭС его характеристика приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики генераторов ВГ-5(28)/114-300-02В и 02Г

№	Параметр	ВГ-5(28)/114-300-02В	ВГ-5(28)/114-300-02Г
1	Номинальная мощность, кВт	5,0	5,0
2	Частота вращения, об/мин	300	300
3	Номинальное выходное напряжение выпрямленное, В	114	114
4	Выходной ток, выпрямленный, А	50	50
5	Число фаз, шт.	3	3
6	Частота выходного напряжения, Гц	50	50
7	Диаметр, мм	360	360
8	Момент страгивания, Н·м	5	5
8	КПД	0,85	0,85
9	Масса, кг	95	95

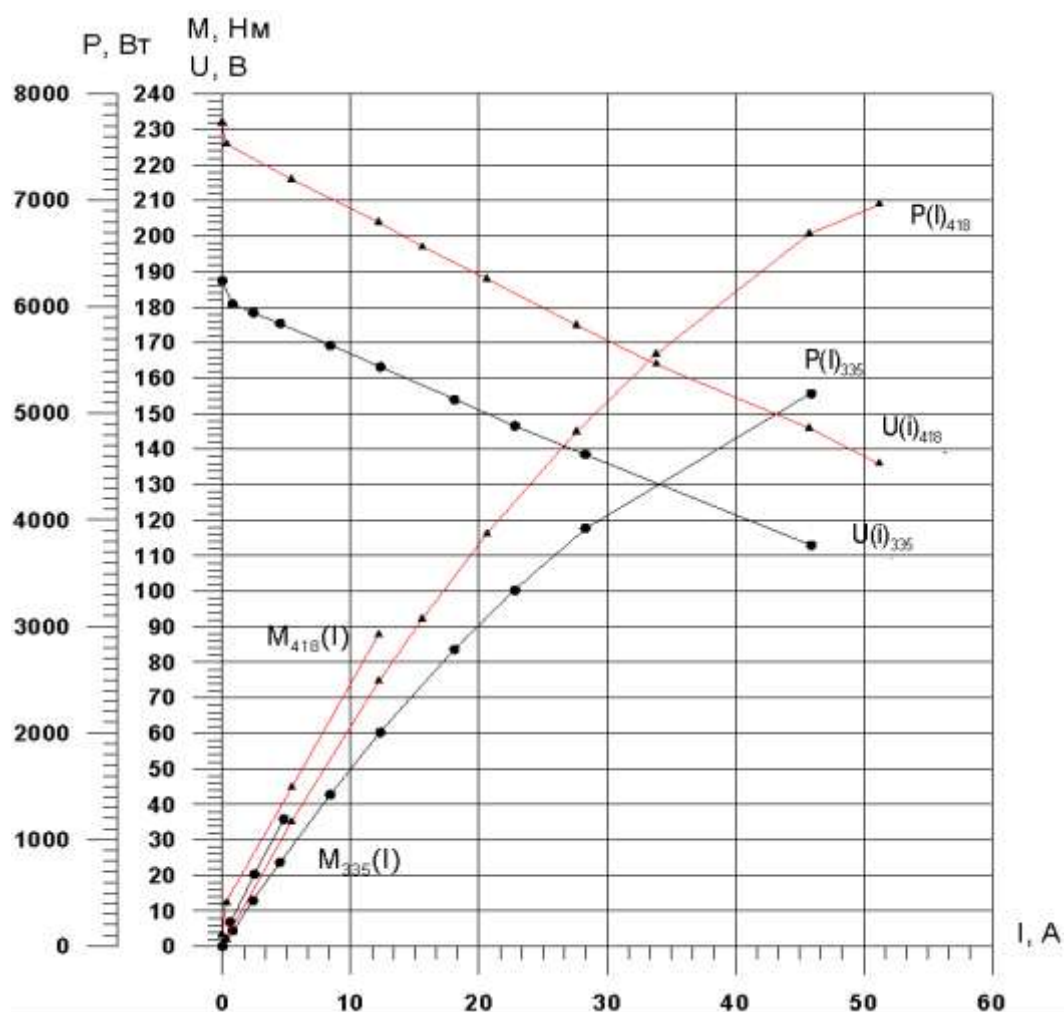


Рисунок 2.10 – Внешняя характеристика генератора ВГ-5 при 300 об/мин



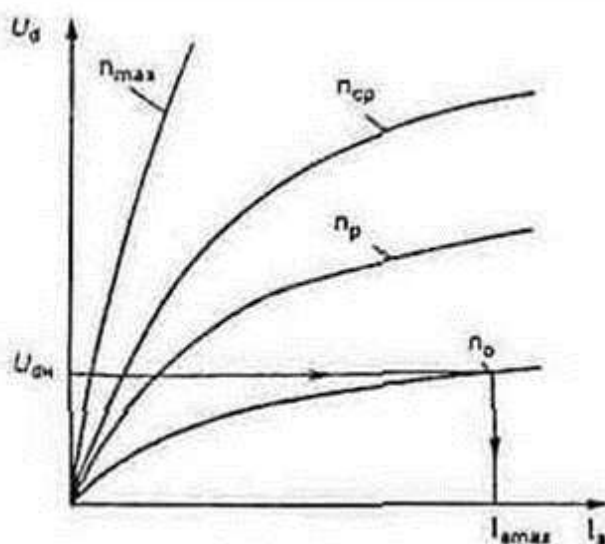
## 2.3 Режим работы вентильного генератора

У генераторов вентильных есть некоторые особенности, которые влияют на их характеристики:

- выпрямленный переменный ток;
- выбор обмотки с данными, обеспечивая номинальное напряжение при минимальной частоте вращения ротора, соответствующей холостого хода двигателя автомобиля;
- удерживающая сила, подаваемая из тока.

Главными параметрами вентильных генераторов - напряжение  $U$ , частота вращения ротора  $n$  и мощность  $P$  (или сила тока, отдаваемого генератором при заданном напряжении).

Зависимость выпрямленного напряжения  $U_d$  возбуждения тока  $I_B$  при отключении нагрузки и постоянной скорости ротора  $n$  называется характеристикой холостого хода (рисунок 2.11) [4]. На холостом ходу, выпрямленное напряжение равно ЭДС  $E_d$ . Характеристики холостого хода вентильных генераторов, подготовленный к независимым возбуждениям.

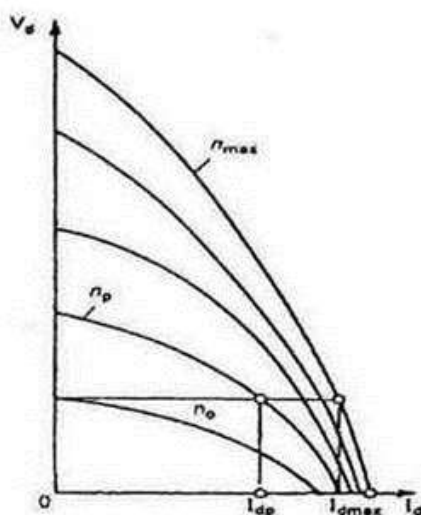


$n_{\max}$ ,  $n_{\text{ср}}$ ,  $n_p$ ,  $n_0$  – частота вращения ротора соответственно максимальная, средняя, расчетная и начала отдачи;  $U_{\text{дн}}$  - выпрямленное номинальное напряжение

Рисунок 2.11 – Характеристики холостого хода вентильного генератора

Внешние характеристики вентильных генераторов зависят от выпрямленного напряжения  $U_d$  (рисунок 2.12) и тока  $I_d$  нагрузки при постоянной скорости вращения ротора, напряжение на выводах катушки возбуждения и его сопротивление. Когда нагрузка возрастает выпрямленное напряжение падает под действием реакции якоря, за счет уменьшения напряжения в цепи статора (якоря) и в выпрямителе, в котором падение напряжения в обмотке статора и в значительной степени зависит от скорости ротора.

Внешние характеристики вентильных генераторов определяются самовозбуждением и независимым возбуждением. Падение напряжения при увеличении нагрузки не только активным, но и индуктивных сопротивлений обмоток статора. В случае самовозбуждения напряжения генератора клапана падает на самого поля обмотки. Размагничивающий эффект реакции якоря магнитного потока уменьшается в рабочего зазора между ротором и статором.

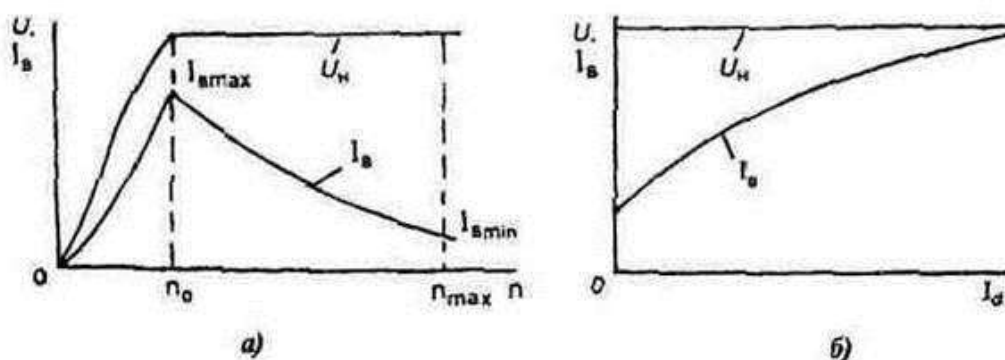


$I_{dp}$ ,  $I_{dmax}$  - соответственно расчетное и максимальное значения силы тока нагрузки

Рисунок 2.12 – Внешние характеристики вентильных генераторов

По внешним признакам определяется максимальным током  $I_{dmax}$ , который создается для заданного значения или регулируемого напряжения.

Поведение регулирования скорости (рисунок 2.13, а) представляет собой закрытый зависимость силы тока возбуждения  $I_c$  от скорости вращения ротора на генератор постоянного напряжения. Как правило, она определяется для нескольких значений тока нагрузки.



а - от частоты вращения ротора; б - от силы тока нагрузки;  $U_n$  - номинальное напряжение  
Рисунок 2.13 –Зависимости напряжения генератора и силы тока возбуждения

Минимальный ток возбуждения мощности определяется силой тока нулевой нагрузки и максимальной скорости вентилятора ротора генератора. Характеристики регулирования скорости можно определить диапазон изменения тока возбуждения к изменению нагрузки при постоянном напряжении.

При увеличении скорости вращения ротора  $n$  закрытого силы тока возбуждения  $I_c$  должна быть уменьшена (рисунок 2.13, а), а при увеличении тока нагрузки - увеличение (рисунок 2.13, б).

Напряжение генератора должно поддерживаться постоянной в диапазоне скоростей ротора от  $n_0$  до  $n_{max}$ , в то время как ток возбуждения будет изменяться от максимального до минимального  $I_{c\text{ макс}}$   $I_{c\text{ мин}}$ .

Из-за непрерывного изменения режима движения и, следовательно, частоты вращения ротора генератора и текущей скорости нагрузки является важной характеристикой – зависимость тока  $I_d$ , который может дать потребителям генератор при заданном напряжении, скорость вращения ротора (рисунок 2.14).

Текущая характерная скорость, удаляются при  $U_d = \text{Const}$  и  $I_c = \text{Const}$ . Элементы управления являются значения начальной частоты генератора  $n_0$  отдачи вычисленной скорости ротора  $n_p$  и соответствующей проектной прочности текущего  $I_{др}$  и максимального тока  $I_{d\text{ макс}}$  на птах. Расчетная скорость ротора и сила тока определяется в точке контакта скорости течения характерной 1 и 2 прямой, проведенной из начала координат. Эта точка соответствует максимальному значению расчетной мощности  $P_{др}$  к расчетной скорости ротора  $n_p$  (режим максимального генераторного нагрева).

Напряжение генератора поддерживает консистенцию в широком диапазоне скоростей (100-500 об / мин), и поддерживает высокий коэффициент полезного действия (КПД) (0.8-0.94) во всем этом диапазоне.

Введение новой конструкции электрической машины требует определенных материальных затрат и времени для технологии производства. Таким образом, идея конструкции генератора клапан был реализован на основе асинхронного двигателя МТ-51-8 с номинальной мощностью 10 кВт (100% МФ) и со скоростью 750 об / мин.

Отличительной особенностью предлагаемого электромеханического преобразователя является исполнение обмотки якоря из нескольких параллельных ветвей, каждая из которых соединена со своим выпрямителем. Число параллельных ветвей зависит от изменения диапазона скорости. В частном случае, необходимого числа параллельных ветвей равна  $a = 6$ .

Индуктор машина имеет четыре пары полюсов  $p = 4$ . Согласно теории электрических машин, с  $2p = 8$ , катушки якоря могут быть выполнены из  $a = 1, 2, 4, 8$  параллельных ветвей. Требуемое количество параллельных ветвей, не включенных в этой серии.

В связи с этим, авторы использовали нетрадиционный метод параллельных ветвей, отделяя зону фазы в трех группах. Для того чтобы уменьшить влияние неравномерного воздушного зазора по электромагнитным

полям, параллельные ветви, каждая из параллельных ветвей катушки распределены равномерно по диаметру статора. Каждая параллельная ветвь соединяется с вашим выпрямителем.

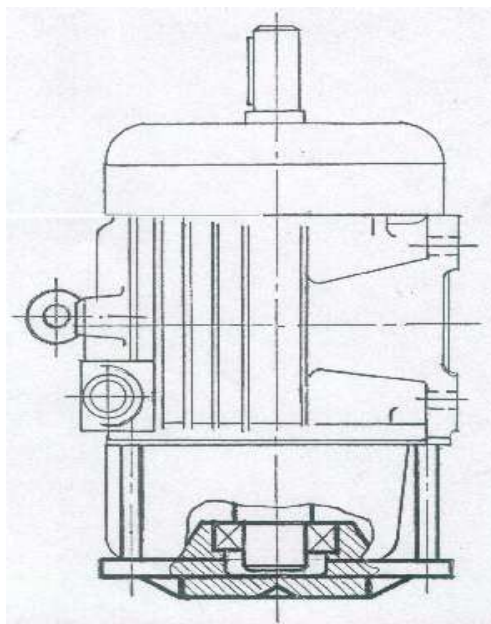


Рисунок 2.14 – Электромеханический преобразователь для ВЭС на базе асинхронного двигателя МТ-51-8

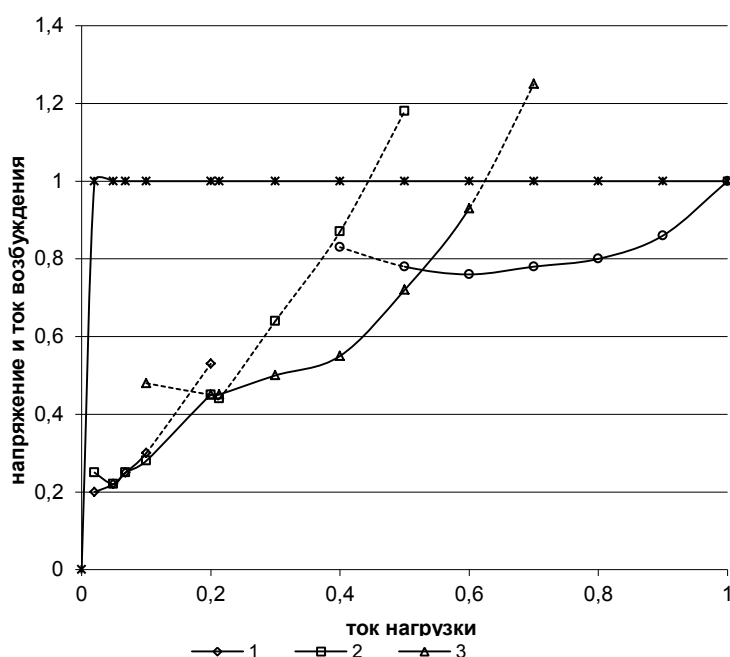
Для проверки эффективности работы выпрямительной схемы циферблате были пересажены на холостом ходу характеристики и внешние характеристики. На рисунке 2.15 приведены кривые возбуждения тока  $I_c$  и напряжения  $U_g$  изменения скорости ЭМП [6].



Рисунок 2.15 – Характеристика холостого хода

Для напряжения генератора ступеней переключит постоянство КВ и одновременное управление током возбуждения. На рисунке показано, что использование КВ поддерживает постоянное напряжение и предел изменения тока возбуждения электромагнитных помех, что позволяет избежать насыщения магнитной цепи.

По результатам испытаний, построенных характеристик управления ЭМП (рисунок 2.15). Кривые 1,2,3,4 являются характеристики тока возбуждения  $I_c$ , каждая из которых показывает изменение в своей работе в рамках одного из ступеней КВ. Линия 11 представляет собой характеристическое напряжение. В ходе испытаний, изменение нагрузки и частоты вращения ЭМП производится в соответствии с экспериментально полученными характеристиками энергии турбин.



Кривые 1,2,3,4-характеристики тока возбуждения на 1,2,3,4 ступенях соответственно, кривая 11- характеристика напряжения

Рисунок 2.16 – Регулировочная характеристика ЭМП

Как видно из рисунка 2.16, шаги регулировки мощности без переключения коммутируемого выпрямителя с широким диапазоном скорости приводит к насыщению магнитной цепи, за счет увеличения тока возбуждения (пунктирная часть характеристик  $I_c$ ). На рисунке показано, как уменьшение мощности и скорости должна уменьшаться в течении привода, что позволяет поддерживать согласованность и сохранить значение напряжения удовлетворительной эффективности (0.7-0.83), во всем рабочем диапазоне скорости [12].

*Выводы по второй главе.*

Использование генераторов на постоянных магнитах при переменном режиме работы микроГЭС не оптимально.

Предлагается использование вентильного генератора на постоянных магнитах.

### 3 Моделирование модели шнековой микроГЭС в программе COMSOL

#### 3.1 Создание методики моделирования

Нами ставится задача разработать имитационную модель рабочего процесса в шнековой турбине микроГЭС, учитывающий варианты решения геометрии в проточной части.

Целью разработки имитационной модели является исследование влияния конструктивных и режимных параметров гидротурбины на ее энергетические характеристики с учетом нормативных документов [40–43].

*Постановка задачи и объект исследования.*

В качестве объекта исследований выбрана проточная часть шнековой гидротурбины, для микроГЭС мощностью до 5 кВт и напоров 10 м и расход воды до 200 л/с. Варианты расчетных схем общего вида проточной части показаны в соответствии с рисунком 3.1.

Гидротурбина состоит из рабочего колеса (р. к.) расположенного в трубе.

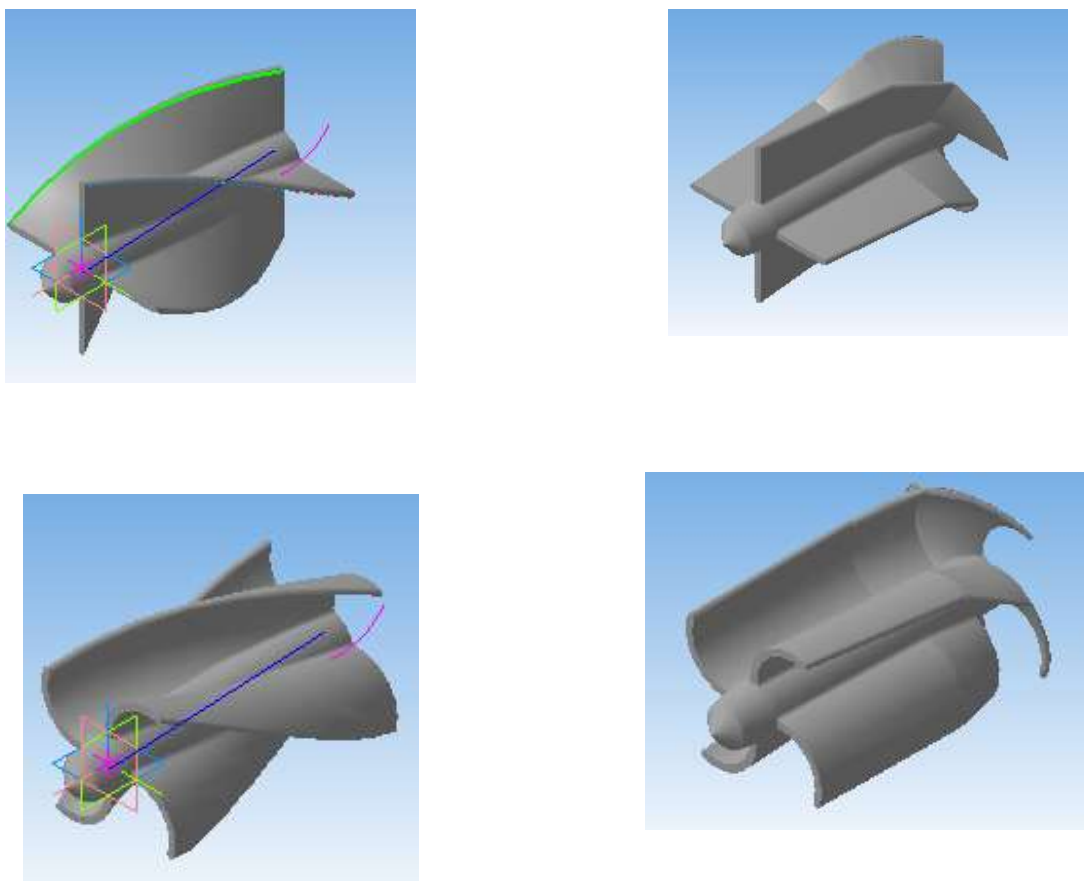


Рисунок 3.1 – Варианты расчетных схем шнековых турбин микроГЭС

Математическое моделирование с помощью компьютера становится все более эффективным инструментом исследователей и инженеров и часто

является одной из основных частей систем автоматизированного проектирования. Оно, позволяет получить общую картину всего течения жидкости в объеме и графически визуализировать поля скоростей, давлений или температур во всей области течения. В то время как при физическом моделировании измерительные датчики располагаются в нескольких точках, где предполагается развитие исследуемых явлений.

Также при математическом моделировании исчезают проблемы, связанные с возмущениями исследуемых процессов устанавливаемыми датчиками, применяемыми в экспериментах, а также отсутствуют технические трудности, вызываемые малыми или большими размерами исследуемых объектов, высокими или низкими температурами, пожароопасными или токсичными веществами. При этом численное решение можно получить для реальных условий исследуемого процесса, что далеко не всегда возможно при экспериментальных исследованиях.

Целью выполненных исследований было разработка надежной и прогнозирующей математической основы для изучения процессов в проточной части турбины. Анализ посвященных изучению гидродинамических явлений, показывает, что математические модели базируются в основном на уравнениях Навье-Стокса, включающих уравнение неразрывности (закон сохранения массы); уравнение импульса (закон сохранения импульса); уравнение энергии (закон сохранения энергии). Эти законы, представленные в виде дифференциальных уравнений в частных производных, решаются методом конечных элементов с применением стандартных пакетов для компьютерного моделирования движения жидкости (Comsol).

### **3.2 Описание средства моделирования COMSOL**

Разработка математической модели выполнена нами с использованием прикладного пакета Comsol, реализующего метод конечных элементов (МКЭ) в рамках модуля Fluid Flow, который отражает CFD (Computerized Fluid Dynamics) технологию моделирования. Модель рассматривалась как нестационарная, турбулентная, с однофазным представлением течение жидкости [13].

Согласно методологии пакета Comsol, разработка математической модели включает следующие этапы :

I. Препроцессорная стадия, включающая операции по созданию геометрической модели рассматриваемой расчетной области; заданию физических свойств среды (материалов) в расчетной области; генерации конечно-элементной модели (дискретизация) рассматриваемой расчетной области, т.е. созданию сетки конечных элементов; приложению к модели граничных условий: внешних воздействий (температур, тепловых потоков, сил и т.д.) и закреплений на границах области.

Дискретизация области включает задание числа, размеров и формы элементов, которые используются для построения конечно-элементной модели. Элементы связаны друг с другом в узловых точках (узлах) и в совокупности аппроксимируют форму расчетной области. Окончательный выбор размеров элементов производится, исходя из физической сущности задачи.

II. Процессорная стадия, заключающаяся в выполнении таких операций: получение на основе функций конечных элементов кусочно-непрерывной функции, определенной на всей расчетной области, и построение глобальной матрицы теплопроводности; составление системы алгебраических уравнений путем минимизации некоторой величины, связанной с физической постановкой задачи, и решение этой системы относительно узловых значений – температуры в задачах теплопроводности, смещений в прочностных задачах и т.п.

III. Постпроцессорная стадия: вывод результатов расчета в графической и текстовой формах (поля скоростей, деформаций и напряжений, потоки тепла, температурные градиенты и др.); анализ полученных результатов.

Таким образом, учитывая особенности компьютерного моделирования в пакете Comsol, была создана математическая модель движение воды за счет давления.

Уравнение неразрывности, соответствующее закону сохранения массы, имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0, \quad (3.1)$$

где  $V_x, V_y, V_z$  – компоненты вектора скорости в направлениях  $x, y$  и  $z$  соответственно;

$\rho$  – плотность;

$x, y, z$  – глобальные декартовы координаты;

$t$  – время.

Закон сохранения импульса, связывающий напряжения и скорость деформации жидкости для трех направлений, можно представить в виде уравнений Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \mu_B \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_B \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_B \frac{\partial V_x}{\partial z} + T_x ; \end{aligned} \quad (3.2)$$



$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \\
& \frac{\partial}{\partial x} \mu_B \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_B \frac{\partial V_y}{\partial y} + T_y \quad ; \\
& \frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_z)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \\
& + \frac{\partial}{\partial x} \mu_B \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_B \frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \mu_B \frac{\partial V_z}{\partial z} + T_z,
\end{aligned} \tag{3.3}$$

где  $g_x, g_y, g_z$  – компоненты вектора ускорения свободного падения в направлениях  $x, y$  и  $z$ , соответственно;

$M_e$  – эффективная вязкость;

$T_x, T_y, T_z$  – компоненты вектора вязких потерь в направлениях  $x, y$  и  $z$ , соответственно:

$$T_x = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_x}{\partial z}. \tag{3.4}$$

$$T_y = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_y}{\partial z}. \tag{3.5}$$

$$T_z = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial V_z}{\partial z}. \tag{3.6}$$

Переходя от записи уравнений в частных производных к матричной форме, формируется система уравнений, решением которых являются значения компонентов вектора скорости, давления в пределах рассматриваемой расчетной области. Этот переход выполняется встроенными алгоритмами пакета Comsol.

С учетом приведенной выше последовательности разработка математической модели работы турбины:

### 3.3 Проведение исследований

*Создание геометрической модели расчетной области.*

Исходной информацией для создания геометрической модели расчетной области выступала шнековая турбина различной проточности приведенной на рисунке 1.1. В качестве расчетной области при создании геометрической модели принято допущение, что внутренний объем турбины является текуче жидкой средой.

*Задание типа конечного элемента.*

В модуле Global Defenition предусмотрено два типа конечных элементов: двумерные 4-х узловые – 2D и трехмерные 8-ми узловые – 3D, применяемые соответственно в двумерной и трехмерной постановках задачи.

#### *Генерация конечно-элементной сетки.*

Для каждой линии, образующей расчетную область, в ручном режиме задавалось количество делений, соответствующих числу элементов. Для создания регулярной сетки стремились, чтобы расчетная область была ограничена 4 линиями (для двумерной задачи) или 6 площадями (для трехмерной задачи). В отдельных случаях использовалось произвольное разбиение на конечные элементы. В результате такого подхода формировалась конечно-элементная модель расчетной области (в соответствии с рисунком 3.2).

#### *Выбор типа решаемой задачи.*

Проведенные исследования выполнялись в постановке нестационарной задачи для несжимаемой жидкости с турбулентным течением. Количество итераций, используемых при решении системы уравнений, принималось равным 15.

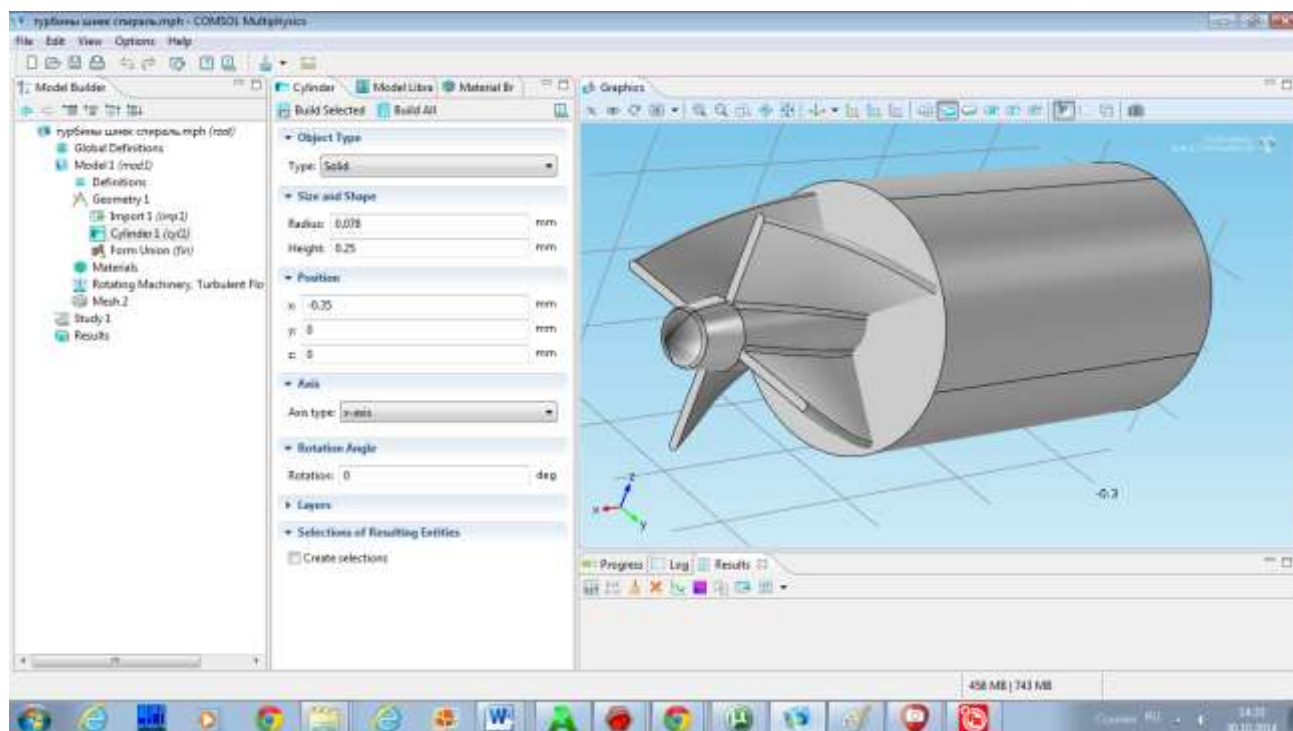


Рисунок 3.2 – Вид конечно-элементной модели расчетной области проточной части со срезанным цилиндром трубы МикроГЭС

#### *Задание свойств потока.*

Математическая модель жидкости задается плотностью, вязкостью. Плотность и вязкость рассматривались зависимыми от температуры. Для выражения этих зависимостей на основании справочных данных были рассчитаны коэффициенты в уравнениях, описывающих рассматриваемые

свойства. В результате в модель были внесены данные и выражения, описывающие: плотность, воды  $\text{кг/м}^3$

*Задание нагрузок и граничных условий.*

В качестве нагрузок и граничных условий для задач гидродинамики могут выступать: скорости ( $\text{м/с}$ ), , источники энергии ( $\text{Вт/м}^3$ ), , давление ( $\text{Па}$ ).

Для каждого из рассчитываемых параметров (составляющие скорости, давление, температура и др.) задавались методы решения системы уравнений и погрешность для поиска их сходимости. Далее автоматически выполнялось решение систем уравнений для каждого временного шага.

Результатами расчета являлись значения векторов скорости и суммарной скорости, температуры, теплового потока в каждой узловой точке расчетной области для каждого временного шага, которые можно представить в табличной и графической форме (в виде векторных или контурных). В модели также имеется возможность оценивать кинетическую энергию .

В результате выполненного математического моделирования установлено, что гидродинамика меняется в процессе имеет нестабильные периоды [Данные периоды характеризуются неустойчивыми циркуляционными потоками, образованием вихревых зон и зон прямого течения секции, что увеличивает вероятность появления кавитации. Характерные скорости движения потоков, имеющие место в вертикальной плоскости по продольной оси в начале, представлены в соответствии с рисунком 3.3.

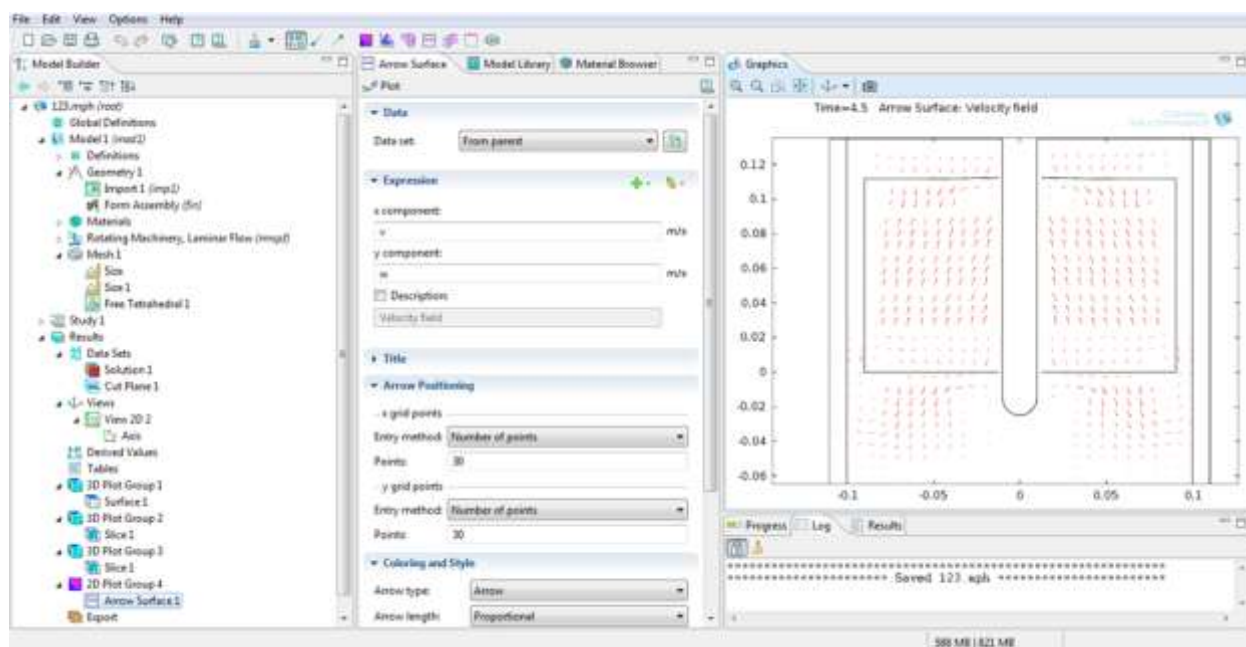


Рисунок 3.3 – Распределение скоростного поля модели расчетной области проточной части МикроГЭС

Представленные закономерности изменения горизонтальной и вертикальной составляющей скорости движения потоков соответствуют центральному сечению вертикальной плоскости.

Выполненный комплекс исследований по оценке эффективности применения сложного профиля проточной части и позволил установить, что существуют широкие возможности по повышению эффективности в случае рациональной организации движения его потоков.. Тестовые исследования гидродинамической картины развития турбулентных потоков в проточной части позволили выделить четыре характерные области:

- область активного воздействия потока,
- участок, локализованный у стенок турбины , отличающийся высокой степенью турбулизации;
- вихревой участок, локализованный над каждой лопастью;
- область горизонтально направленных потоков вдоль лопасти.

### 3.4 Результаты модельного исследования характеристик микроГЭС

Для моделирование были использованы технические данные микроГЭС, которые приведены в соответствии с таблицей 3.1.

Таблица 3.1– Исходные параметры для расчета микроГЭС

Параметр	МикроГЭС
Напор (нетто), м	3,5-7
Расход воды, м <sup>3</sup> /с	0,1-0,25
Вырабатываемая мощность, кВт	до 10
Частота вращения, об/мин	1500
Диаметр рабочего колеса, мм	150
Диаметр подводящего трубопровода, мм	200

Для моделирования использованы четыре типа профиля шнекообразной гидротурбины:

- турбина типа шнек;
- турбина –шнек с изменяющимся шагом;
- турбина –шнек сложным профилем лопасти;
- турбина – шнек с использованием п. 2) и 3).

Моделировалась работа гидротурбин при следующих характеристиках

1) Изменение расхода воды при постоянном напоре и частоте вращения турбин:

2) Изменение напора воды при постоянстве расхода воды и скорости вращения воды.

Моделирование турбулентных эффектов выполнялось с помощью ПО Comsol 4.3.

Для моделирования течения в проточной части агрегата микроГЭС, состоящего из входного цилиндра, использовалась расчетная сетка с суммарным числом ячеек около 800 тыс. Общий вид сетки приведена в соответствии с рисунком 3.4.

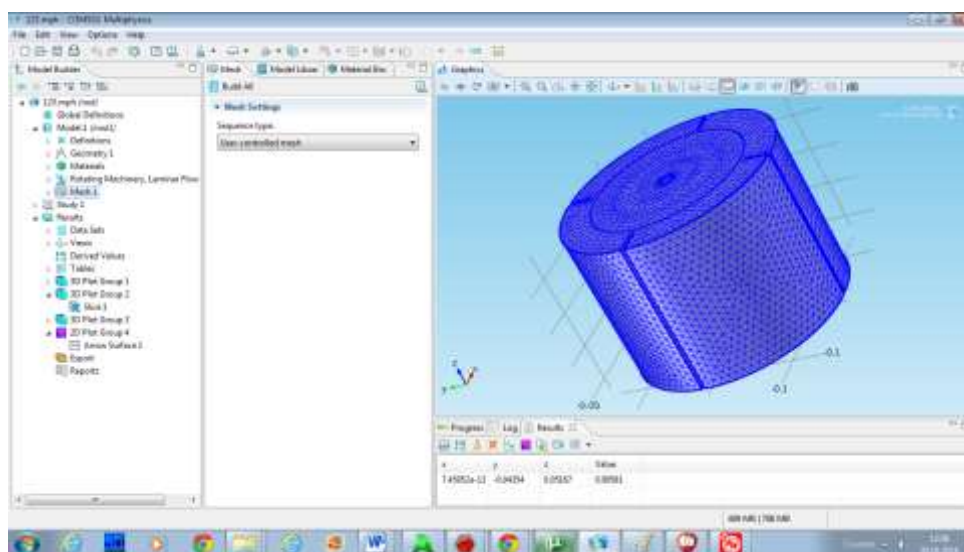


Рисунок 3.4 – Расчетная область гидротурбины микроГЭС с построенной сеткой

Расчеты выполнены для пяти потока воды при постоянной частоте вращения  $p. k. n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ . Результатами расчетов являются кинематические характеристики пространственного потока, значения скоростей и давлений во всей области течения, обработка которых позволяет определить такие величины, как потери энергии в элементах проточной части, КПД, мощность и др.

В соответствии с рисунком 3.5 представлены турбулентный поток на кромках лопастей при значении скорости потока 8,03 м/с.

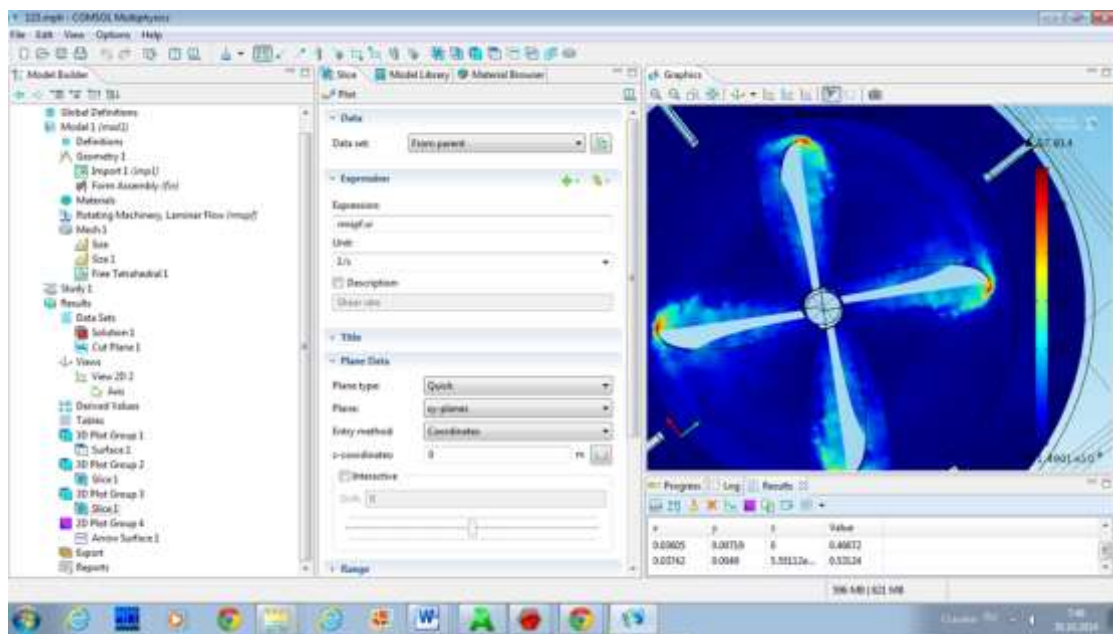


Рисунок 3.5– Турбулентность потока гидротурбины на кромке при входе на рабочую поверхность

В соответствии с рисунком 3.6 приведены эпюры распределения давления  $P$  на лицевой и тыльной сторонах лопасти расположенных вблизи втулочного, среднего и периферийного цилиндрических сечений (соответственно 90, 50 и 10 % размаха лопасти) для режима с  $v = 10,3$  м/с. Характер обтекания лопасти на данном режиме носит безотрывный характер с отсутствием значительных градиентов давления  $P$  по высоте, что обеспечивает отсутствие перетоков по размаху лопасти.

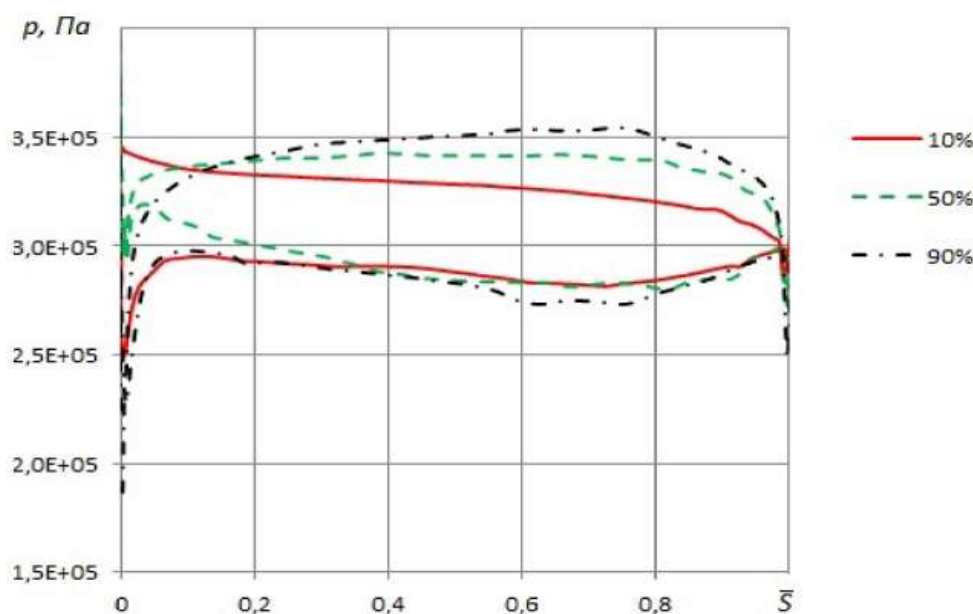


Рисунок 3.6 – Распределение давления по поверхности лопасти



В соответствии с рисунком 3.7 представлена визуализация поле скоростей, полученная для одного из режимов работы режима работы, из которой видно, что течение в проточной части гидротурбины микроГЭС является безотрывным. На данном режиме показано частичное срабатывание циркуляции, что свидетельствует о необходимости доработке профиля для создания близкого к осевому углу выхода потока из лопастной системы.

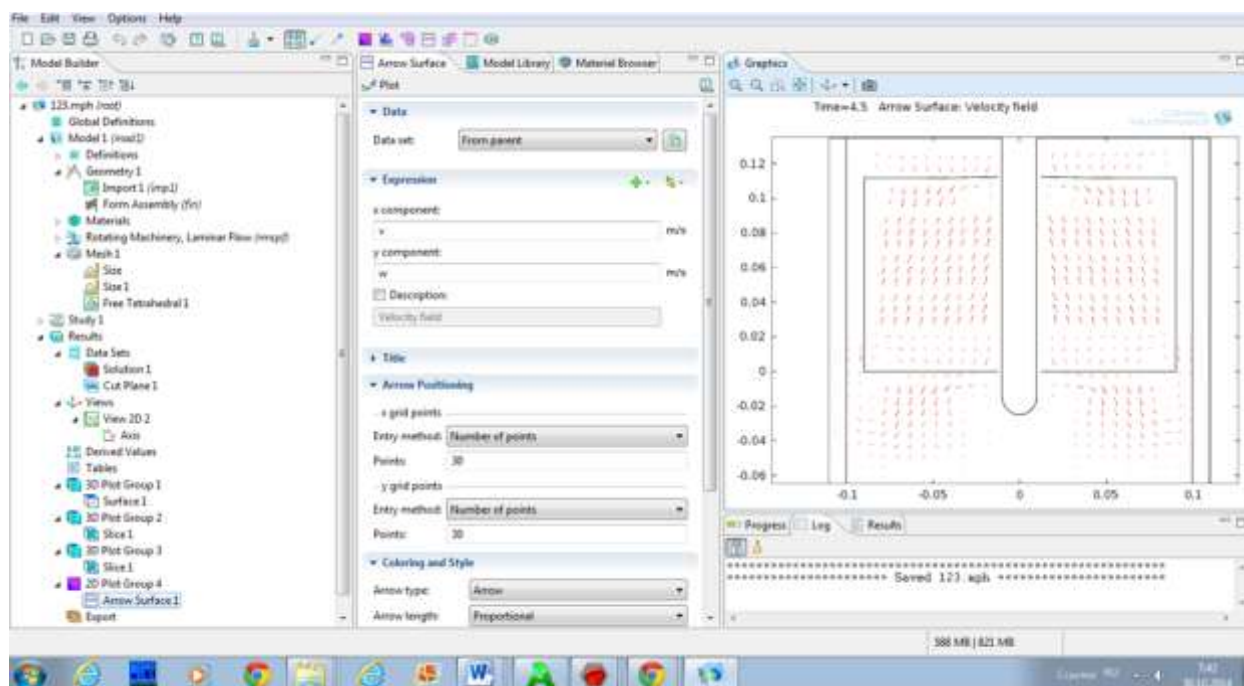


Рисунок 3.7 – Векторное поле скоростей по поверхности лопасти

В соответствии с рисунками 3.8–3.10 приведены зависимости от изменения расхода  $Q$  (или скорости потока), гидравлической мощности, приложенного напора  $H$  и гидравлического КПД проточной части турбины. Из представленных результатов видно, что проточная часть гидротурбины микроГЭС обладает относительно высокими энергетическими показателями во всем рассмотренном диапазоне напоров. На режимах минимальных напоров наблюдается снижение величины КПД на 8-10 %, что приводит к уменьшению генерируемой мощности. Также видно, что при увеличении значений напора с 5 до 7 м и, соответственно, расхода величина генерируемой мощности возрастает с 4,2 до 9,3 кВт, при этом значение гидравлического КПД близко к максимальному (на уровне 92%). Полученные результаты указывают на возможность применения проточной части при больших напорах (при условии использования соответствующих генератора и регулятора частоты). Гидротурбина со сложным профилем шнекообразных лопаток и с изменяющимся шагом имеет наилучшие энергетические характеристики.

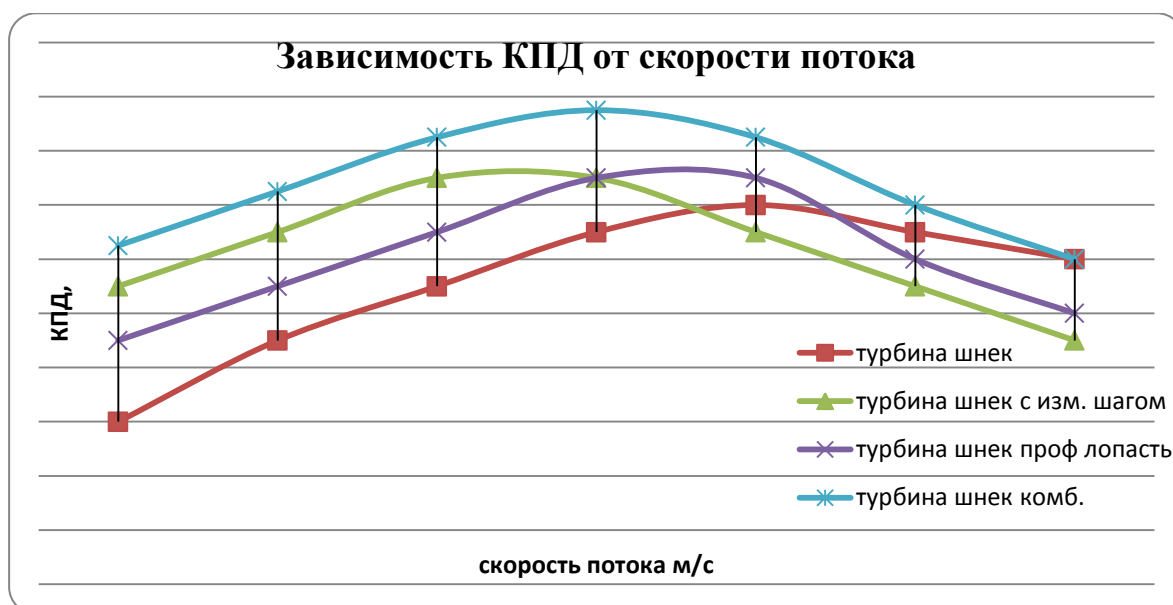


Рисунок 3.8– Зависимости КПД микроГЭС от расхода



Рисунок 3.9– Зависимости мощности микроГЭС от расхода



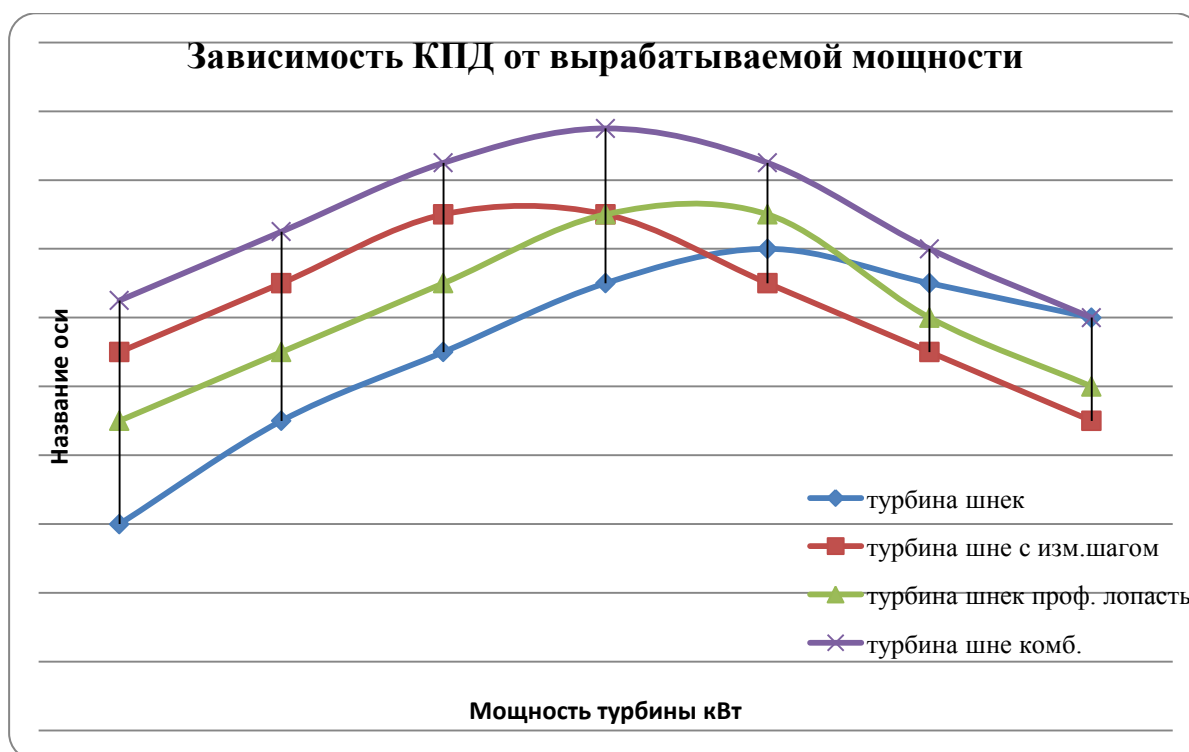


Рисунок 3.10– Зависимости КПД от мощности микроГЭС

*Выводы по проведенным исследованиям.*

В результате моделирования шнековой микроГЭС были рассмотрены четыре типа профиля шнекообразной гидротурбины: турбина типа шнек, турбина –шнек с изменяющимся шагом; турбина –шнек сложным профилем лопасти; турбина – шнек комбинированная с использование шнека с изменяющимся шагом и шнек со сложным профилем лопасти.

Моделирование работы гидротурбины осуществлялась при следующих режимах :

- 1) Режим изменения расхода воды при постоянном напоре и частоте вращения турбин.
- 2) Режим изменение напора воды при постоянстве расхода воды и скорости вращения воды.

В результате полученных данных , можно сделать вывод, что гидротурбина со сложным профилем шнекообразных лопаток и с изменяющимся шагом имеет наилучшие энергетические характеристики.

## **4 Моделирование модели вентильного АДГ-15 генератора на постоянных магнитах в программе COMSOL**

### *Создание методики моделирования.*

Нами ставится задача исследовать вентильный генератор с постоянными магнитами, путем переключения обмоток генератора с последовательного на параллельное включение.

Целью разработки является повышение КПД при режиме работы генератора в более широком диапазоне.

### **4.1 Описание средства моделирования COMSOL**

При помощи программы COMSOL Multiphysics можно осуществлять моделирование практически всех физических процессов, описываемые дифференциальными уравнениями. Затем поставленные задачи находят решение путем конечных элементов (МКЭ). Данная программа также имеет библиотеку УРЧП (Уравнения в частных производных) и разные средства моделирования. К ним относятся: генераторы сетки, средства в области геометрических построений, а также решатели с различными функциями, помогающими с разными сложными задачами нелинейных и линейных задач.

Системный анализ физической модели получается путем описания комбинации разных УРЧП, благодаря решению мультифизических задач в программе COMSOL Multiphysics.

Данная программа имеет четкую структуру приложения, что в свою очередь обеспечивает простое и гибкое использование. COMSOL Multiphysics предназначена для экспериментаторов, разработчиков, и научных сотрудников.

Использование программы в высших учебных заведениях возможно благодаря расширенному диапазону выбора функций отображения результатов и расчетов.

Из нескольких различных частей состоит графическая среда программы.

Model Builder (Построитель моделей) – главная часть среды, в ней изображается структура модели. Интерфейс похож на дерево построения в системах CAD, которые на сегодняшний день представлены на рынке.

При создании модели юзер видит в ходе разработки модели все ее главные части в 4-х основных точках: Geometry - подготовка геометрии, Mesh - генерирование сетки, Study - вариант анализа и Results - обработка результатов расчетов. Различные варианты модели возможно подготовить в одно и тоже время.

Для проведения исследования мы использовали модуль AC/DC. Модуль AC/DC имеет предназначение моделирования задач электромагнитных явлений как переменного, так и постоянного тока. При использовании в

заранее подготовленных приложений можно осуществлять моделирование электромоторов, электромагнитов, трансформаторов напряжения и тока, генераторов, индукторов, конденсаторов, микросенсоры и так далее. Данный модуль AC/DC включает в себя приложения для общего статического и квазистатического электромагнетизма двухмерных (2D) и трехмерных (3D) моделей, имея симметрические геометрии. При осуществлении расчетов моделей возможно реализовать гармонический, статический, и переходный анализ или анализ явлений во времени. Еще можно осуществить расчеты при заданной частоте. А также есть возможность включения в модели, которые анализируются иные физические приложения, например, Джоулева теплота, теплопередача, или индукционный нагрев. Физическое моделирование можно связать с решением электрических цепей заданных в формате SPICE, представляемых как возбуждающий или демпфирующий элемент. В данном модуле AC/DC располагаются также приложения для машин с вращением, которые используют подвижные сетки (метода ALE) в 2D измерении. С целью моделирования неограниченных областей возможно использование бесконечные элементы («Infinite elements»).

## 4.2 Проведение исследований

Объект моделирования – вентильный генератор с постоянными магнитами.

Таблица 4.1 – Параметры вентильного генератора с постоянными магнитами

Номинальная мощность	5кВт
Номинальное напряжение, $U_d$	150 В
Номинальные частота вращения	60-120 об/с

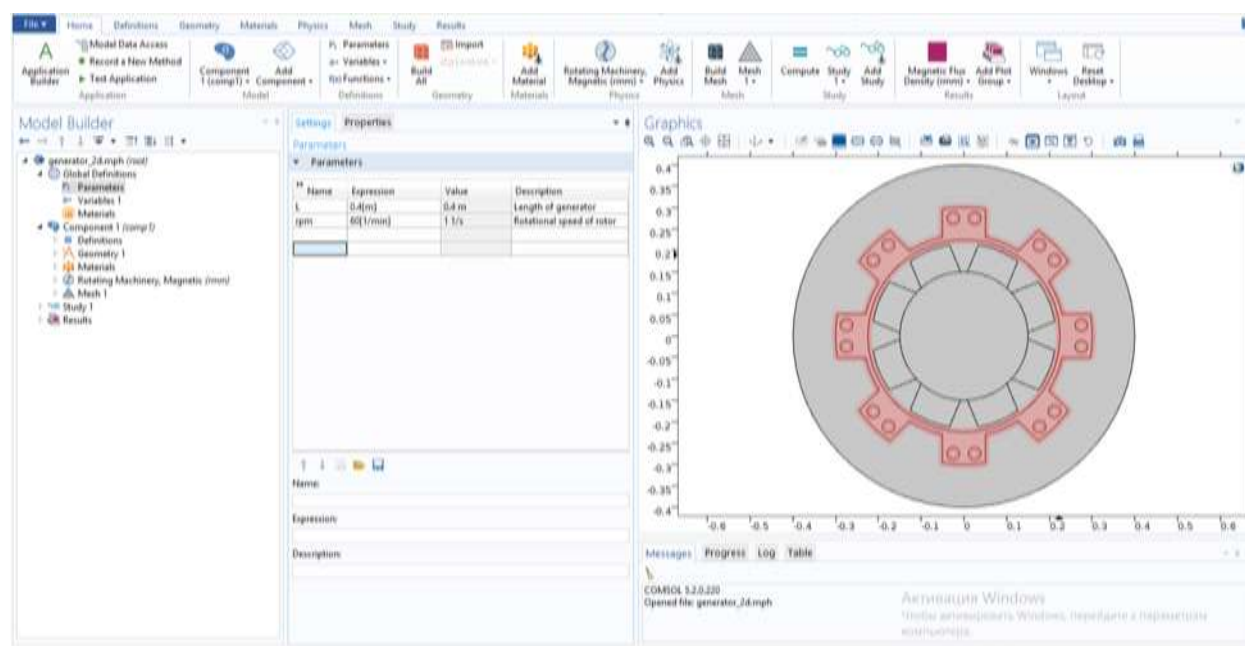


Рисунок 4.1 – Моделирование 2д генератора

Генератор на рисунке 4.1 моделировался на базе стандартной модели, но обмотка якоря выполнена из нескольких параллельных ветвей  $a=2$ . Для уменьшения влияния несимметричного поля и неравномерного воздушного зазора на ЭДС параллельных ветвей, катушки каждой параллельной ветви расположены по диаметру статора. На рисунке 4.2 показана схема получения шести параллельных ветвей для одной фазы.

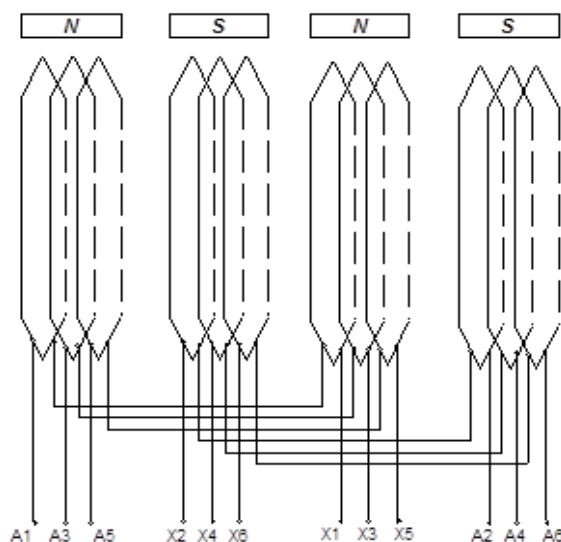


Рисунок 4.2 – Схема укладки обмотки якоря и разделение на параллельные ветви фазы А

В целях проверки правильного исполнения обмотки якоря, а также симметрии параллельных ветвей было проведено предварительное моделирование с замером напряжения на 2 параллельных ветвях на стороне переменного тока. Моделирование проводилось на нескольких скоростях вращения. Общая схема с испытуемым генератором приведена на рисунке 4.3. Данные моделирования приведены в таблице 4.2 согласно данным расчета и испытания рисунке 4.4, результаты испытания на рисунке 4.6.

Таблица 4.2 – Характеристика холостого хода на переменном токе

n об/мин	1 ветвь В			2 ветвь В		
	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{AC}$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{AC}$
127	12	12	12	12	12	12
178	15,2	15,6	15,8	15,8	15,8	15,8
250	22	22	22	22	22	22
500	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2

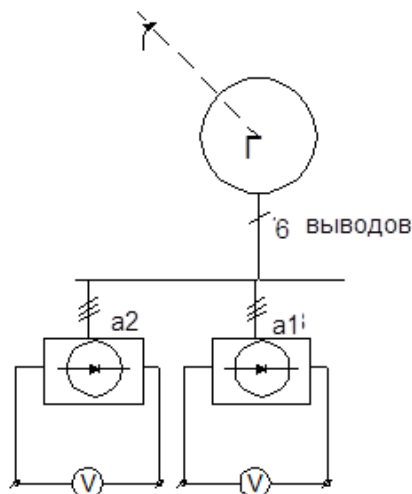


Рисунок 4.3 – Общая схема моделирования генератора, a1-a2 параллельные ветви обмотки якоря

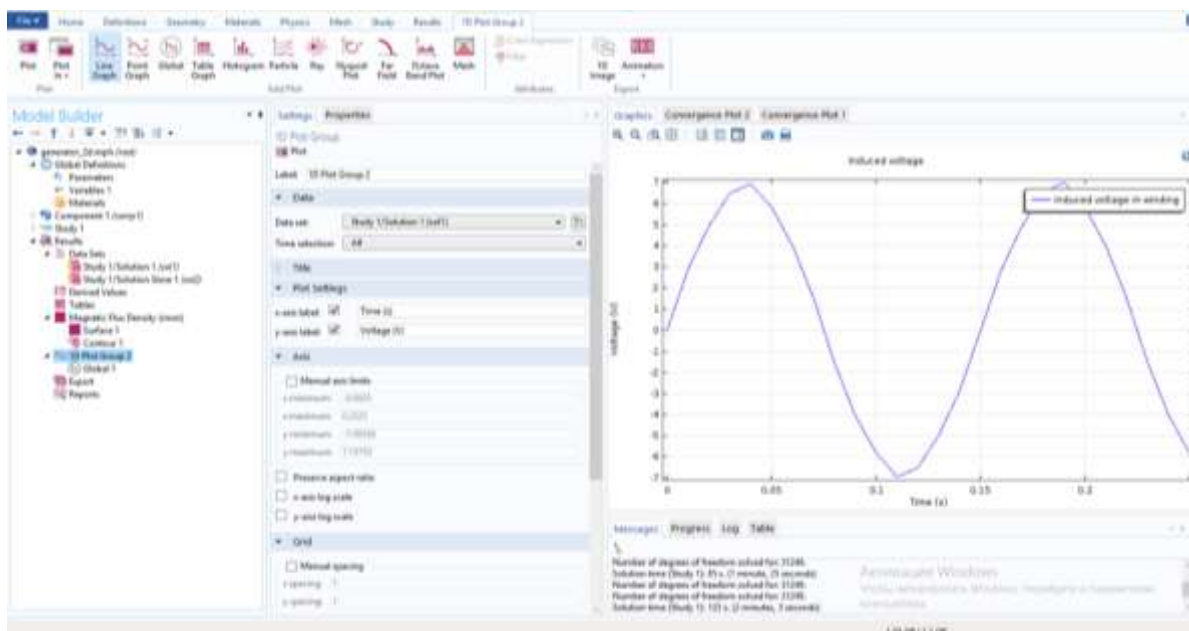


Рисунок 4.4 –Результаты моделирования генератора

Следующий опыт проводился с подключением обмотки якоря к коммутационному выпрямителю (на стороне постоянного тока). Данные опыта приведены в таблице 4.3. В этом опыте замерялось выпрямленное напряжение в каждом блоке. Одним из главных моментов данного ответа является соответствие коэффициентов передачи всех ступеней (коэффициент изменения напряжения генератора  $U_{dr}$ , при переключении ступеней коммутируемого выпрямителя на той же частоте вращения).

Таблица 4.3 – Характеристика холостого хода с коммутируемым выпрямителем

Частота вращения	Напряжение на коммутируемых блоках		Напряжение при последовательном включении	Напряжение при параллельном включении	Примечание
n об/мин	$U_{дбл1}$ В	$U_{дбл2}$ В	$U_{дрп1}$ В	$U_{дрп2}$ В	
127	14,5	14,5			блоки автономны
127	14,5	14,5	29		блоки последовательны
178	20	20	40		блоки последовательны
250	29	29	59	59	блоки последовательны
375	40	40	83	83	блоки последовательны
375	42	42	84		Все блоки параллельно
500	60	60	120		Все блоки параллельно

Переключение производилось на частоте вращения  $n=200$  об/мин. Схема обмотки якоря с подключением к коммутационным выпрямителем приведена на рисунке 4.5. Первое переключение соответствует переключению с первой на вторую ступень выпрямителя.

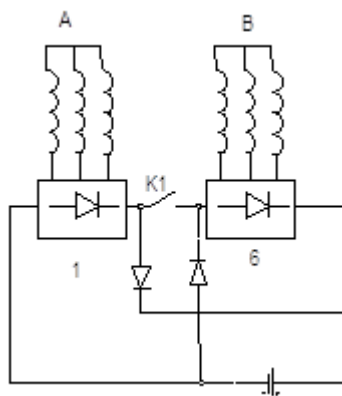


Рисунок 4.5 – Коммутируемый выпрямитель, K1 - коммутирующие ключи

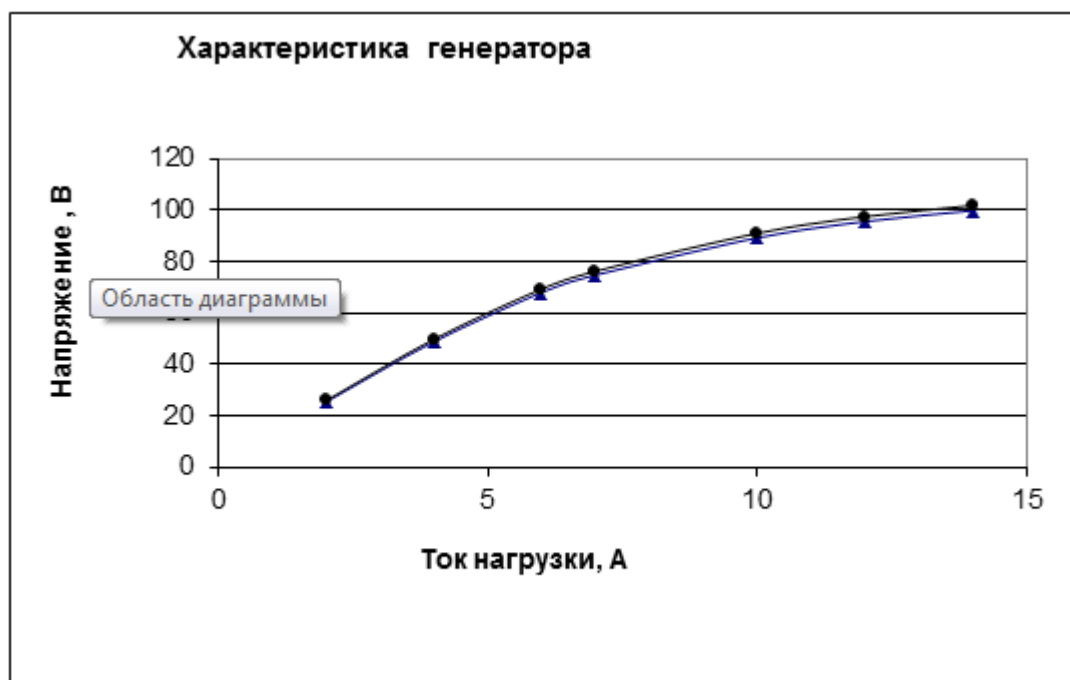


Рисунок 4.6 – Нагрузочная характеристика генератора при работе на аккумулятор

После переключения на вторую ступень (размыкается ключ К3), образуются две группы, по три блока в каждой. Напряжение должно изменится в два раза. Составляем значение:  $U_{e1}=128\text{ В}$  и  $U_{e2}=62\text{ В}$ ,  $n_1=n_2=178\text{ об/мин}$ .

Коэффициент на первой ступени равен:

$$K_{c1} = \frac{U_{e1}}{U_{e2}} = \frac{128}{62} \approx 2,$$

что соответствует ожидаемому.

Это совпадение подтверждает работоспособность и идеологию работы коммутируемого выпрямителя. Также были сняты характеристики короткого замыкания, данные опыта приведены в таблице 4.4. Схема приведена на рисунке 4.7.

Таблица 4.4 – Характеристики короткого замыкания

Частота вращения, n об/мин	Ток короткого замыкания, I <sub>кз</sub> А	Примечания
127	2,5	все последовательно, (рис. 5)
178	5,25	все последовательно, (рис. 5)
178	2,5	ключ К1 разомкнут (рис. 5)
250	6	ключ К1 разомкнут (рис. 5)

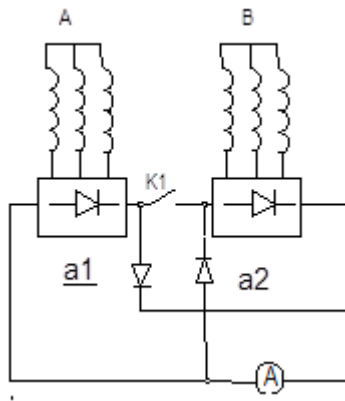


Рисунок 4.7 – Коммутируемый выпрямитель в режиме короткого замыкания

Согласно теории электрических машин, ток короткого замыкания равен:

$$I_{кз} = \frac{E}{X_s}. \quad (4.1)$$

где

$$X_s = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s = 2 \cdot \pi \cdot \frac{p \cdot n}{60} \cdot \frac{\Phi_{оо\omega}}{I_{\phi}}; \quad (4.2)$$

$$E = 4,44 \cdot f \cdot \omega \cdot k_{\omega} \cdot \Phi. \quad (4.3)$$

Значение  $L_s$ ,  $\omega$ ,  $k_{\omega}$ ,  $\Phi$  для определенного тока возбуждения, частоты вращения постоянны. Отсюда следует, что значения индуктивного сопротивления и ЭДС генератора изменяются пропорционально изменению частоты вращения и соответственно и х отношение  $I_{кз}$  остается постоянным. При переключениях ступеней коммутируемого выпрямителя ЭДС генератора изменяется пропорционально коэффициенту передачи ступени  $K_c$ , а индуктивное сопротивление якоря обмотки якоря изменяется в  $K_c^2$ , поэтому ток  $I_{кз}$  изменится в  $K_c$  раз. Это видно по графикам на рисунке 4.9 характеристики короткого замыкания построены по данным моделирований, где наблюдается совпадение характеристик 1, 2 (при скоростях вращения 127 и 178 об/мин на первой ступени) и увеличение тока короткого замыкания в 2 раза после переключения, что соответствует коэффициенту передачи  $K_{c1}$  при переключении с 1 на 2 ступень.



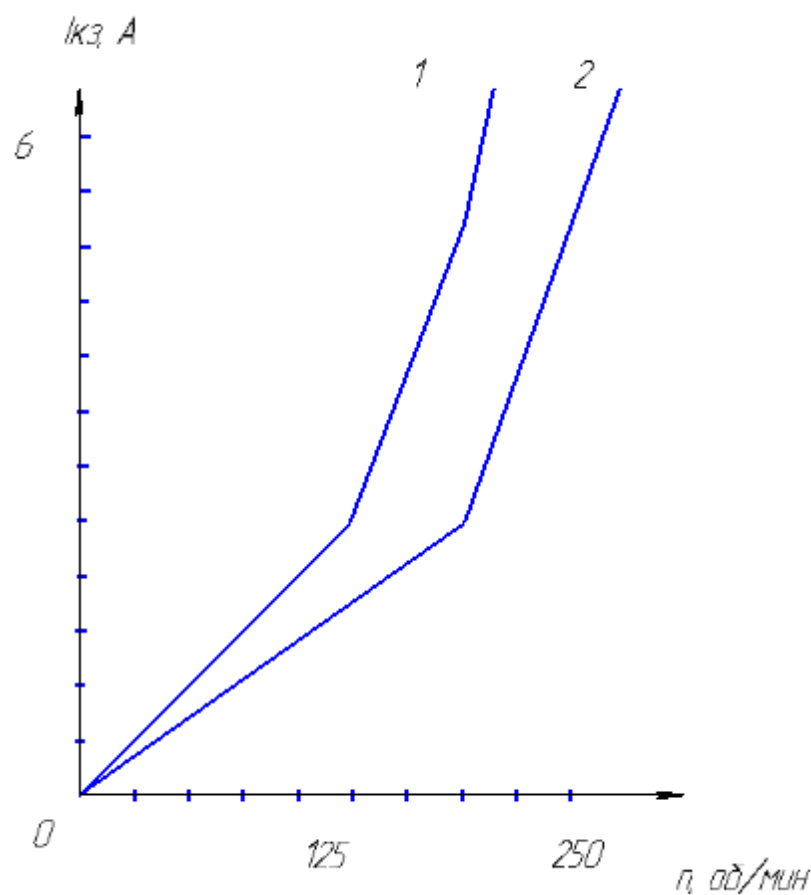


Рисунок 4.8 – Характеристика короткого замыкания

Анализ результатов моделирований позволяет утверждать о работоспособности идеи коммутируемого генератора.

В итоге получены две характеристики КПД для последовательного включения обмоток 1 кривая (рисунок 4.9) и параллельное включение обмоток кривая 2 (рисунок 4.9). Если их совместить используя переключение обмоток то можно добиться режим работы генератор в более широком диапазоне с более высоким КПД, чем без коммутации кривая 3 (рисунок 4.9).

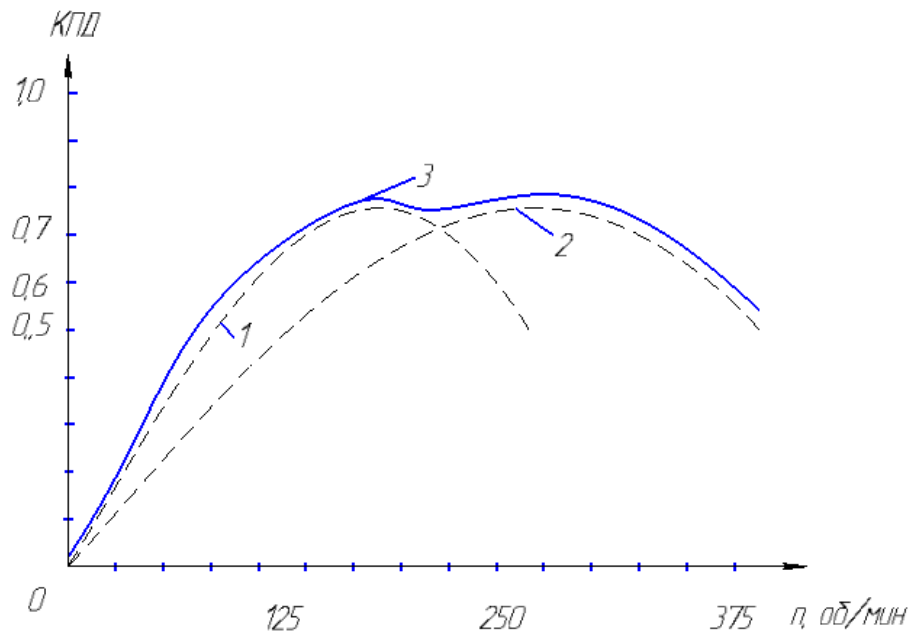


Рисунок 4.9 –График КПД для изменяемых оборотов электрогенератора

*Выводы по проведенным исследованиям.*

Смоделирована работа вентильного генератора, где показана его эффективность в диапазоне работы шнековой микроГЭС. И сделан вывод, что режим переключения обмоток позволяет расширить диапазон работы генератора с улучшенным КПД, чем с КПД без переключения.

## Заключение

Гидропотенциал Казахстана оценивается примерно в 170 ТВт (млн. мВт) в год, на сегодня из них вырабатываются лишь 7-8 ТВт в год, т.е. менее 5%. Это связано со строительством крупных ГЭС на р. Иртыш и р. Или и отсутствием технических возможностей подключения малых и мини-ГЭС в общую сеть. В настоящее время разрабатываются программы по строительству малых ГЭС каскадного типа. В этом случае большое значение имеют малые гидроэлектростанции, мощность которых составляет менее 10 МВт.

Рост экономики Казахстана предполагает возрастание электропотребления. Для стимулирования строительства возобновляемых источников энергии в 2009 году принят закон «О поддержке использования возобновляемых источников энергии», последние изменения и дополнения были внесены 28 декабря 2016 года.

Если наладить производство энергии на основе возобновляемых источников, Казахстан сэкономит десятки сотен тонн условного топлива, которые можно экспортировать, и при этом радикально сократить выбросы углекислого газа в атмосферу.

Широкомасштабное строительство малых и мини-ГЭС позволит использовать энергию малых горных рек Казахстана.

Наиболее перспективной является использование шнековой микроГЭС, так как она обладает рядом преимуществ.

Использование генераторов с постоянными магнитами дает наилучшую энергетическую эффективность работы генератора с микроГЭС, но в узком диапазоне, а так как в течении сезонов и суток режим работы микроГЭС меняется, то генератор будет отклоняться от своих оптимальных режимов, необходимо использование управление генераторов для обеспечения максимальной эффективности работы, при изменении режимов микроГЭС.

Использование генераторов на постоянных магнитах при переменном режиме работы микроГЭС не оптимально.

Предлагается использование вентильного генератора на постоянных магнитах.

В результате исследования были рассмотрены четыре типа профиля шнекообразной гидротурбины: турбина типа шнек, турбина –шнек с изменяющимся шагом; турбина –шнек сложным профилем лопасти; турбина – шнек комбинированная с использованием шнека с изменяющимся шагом и шнек со сложным профилем лопасти.

Исследование работы гидротурбины осуществлялась при следующих режимах

1) Режим изменения расхода воды при постоянном напоре и частоте вращения турбин;

2) Режим изменение напора воды при постоянстве расхода воды и скорости вращения воды.

В результате полученных данных, можно сделать вывод, что гидротурбина со сложным профилем шнекообразных лопаток и с изменяющимся шагом имеет наилучшие энергетические характеристики.

Была исследована работа вентильного генератора, где показана его эффективность в диапазоне работы шнековой микроГЭС. И сделан вывод, что режим переключения обмоток позволяет расширить диапазон работы генератора с улучшенным КПД, чем с КПД без переключения.

## **Перечень сокращений и обозначений**

ВИЭ – возобновляемые источники энергии

КЗ – короткое замыкание

КПД – коэффициент полезного действия

ЭДС – электродвижущая сила

ГЭС – гидроэлектростанция

СНГ – Содружество Независимых Государств

МГЭС – малая гидроэлектростанция

РК – Республика Казахстан

СЭГ - система электрогенерирования

## Список литературы

### *Основная:*

- 1 Филиппова Т.А., Мисриханов М.Ш., Сидоркин Ю.М., Русина А.Г. Гидроэнергетика: учеб.пособие. – 3-е изд., перераб. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 620 с.
- 2 Дукенбаев К. Возобновляемая энергия. Основы, Потенциал, Технология, Использование. – Алматы: Signet Print, 2014.
- 3 Джумамухамбетов Н.Г., Ирышков И.А., Жаналиева М.А. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Учебное пособие. Алматы: Эверо, 2010 .
- 4 Горякин Д.В. Вентильный генератор на базе асинхронной машины с управляемым самовозбуждением, 2012.
- 5 Фолькер Куашинг. Системы возобновляемых источников энергии. Технология-Расчеты-Моделирование. – Астана, 2013. – 429 с.
- 6 Умбетов Е.С., Касимов А.С. Анализ и синтез систем микроГЭС. // Поиск Алматы.– 2013.– №4.–С.94–99.
- 7 А. Алхасов. Возобновляемая энергетика. Москва:2012, -206 с.
- 8 Бакенов К.А. Электромеханический преобразователь с электромагнитным возбуждением. Вестник Павлодарского государственного университета. №3, -2009. С.17-24.
- 9 Положение о нормативных энергетических характеристиках гидроагрегатов и гидроэлектростанций Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан «24» ноября 2010 года №115-П.
- 10 Гидроэнергетика. Гидропотенциал. Гидроэлектростанции. <http://www.ecomuseum.kz/dieret/hydro/hydro.html>
- 11 <https://expo2017astana.com/>
- 12 [www.inset.ru](http://www.inset.ru)
- 13 <https://www.comsol.ru>
- 14 [http://www.energypartner.kz/index.php?option=com\\_content&view=](http://www.energypartner.kz/index.php?option=com_content&view=article&id=25&Itemid=34&lang=ru)  
article& id=25&Itemid=34&lang=ru
- 15 <http://gbpp.org/gidroenergetika>

### *Дополнительная:*

- 16 Лукутин Б.В., Обухов С.Т., Яворский М.И.. Перспективы малой энергетики в Томской области.// Ресурсы регионов России. — 2002. — № 4.- С.25-32.
- 17 Новокшенов В.С., Болотов С.А., Бакенов К.А. Бесконтактные генераторы для ВЭС малой мощности. //Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: труды 5-ой межд. науч.-тех. конф. - Некоммерческое АО Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, - 2006. - С.142-144.
- 18 Ежков А.В. Оборудование микроГЭС. Энергохозяйство за рубежом, - 1982. -№5.

19. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Электрические генераторы с постоянными магнитами. – Издательство: М.: Энергоатомиздат, 1988.

20 Вентильный генератор для автономных систем электроснабжения постоянного тока / Б.А. Алиевский [и др.] // Электричество. - 2003. - № 1. — с.27-34.