

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ДИЁРОВ РУСТАМ ХАКИМАЛИЕВИЧ

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ГИДРОАГРЕГАТА МИНИ-ГЭС НА ОСНОВЕ
МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
к.т.н., доцент М.В. Глазырин

Новосибирск – 2014

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АГ – асинхронный генератор

ГА – гидроагрегат

ГК – генераторный комплекс

ГЭС – гидроэлектростанция

КПД – коэффициент полезного действия

КРМ – контур регулирования мощности

КРС – контур регулирования скорости

МДП – машина двойного питания

НА – направляющий аппарат

ОДУ – объединённое диспетчерское управление

ПЧ – преобразователь частоты

РО – радиально-осевая

САР – система автоматического регулирования

САУ – система автоматического управления

СВУ – система векторного управления

СГ – синхронный генератор

СХ – статическая характеристика

ТК – тиристорный короткозамыкатель

ЭЭС – электроэнергетическая система

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА.....	16
1.1 Роль мини-ГЭС в энергосистеме	16
1.2 Способы управления активной мощностью гидроагрегата мини-ГЭС.....	18
1.3 Математическое описание системы векторного управления МДП.....	27
1.4 Обзор и выбор типа гидротурбины	32
1.5 Статические характеристики радиально-осевой гидротурбины.....	44
1.6 Выводы.....	54
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОТУРБИНЫ С НАПОРНЫМ ВОДОВОДОМ	55
2.1 Динамические характеристики радиально-осевой гидротурбины с напорным водоводом	55
2.2 Математическое описание гидротурбины в абсолютных величинах.....	63
2.3 Математическое описание радиально-осевой гидротурбины в относительных величинах	67
2.4 Выводы.....	75
ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ.....	76
3.1 Вывод передаточных функции гидроагрегата, управляемого по частоте вращения вала	76
3.2 Анализ динамических свойств объекта управления	83
3.3 Выводы.....	87
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДИКИ СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРОВ ГИДРОАГРЕГАТА МИНИ-ГЭС НА ОСНОВЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ.....	88
4.1 Разработка структуры системы управления гидроагрегата мини-ГЭС.....	89

4.2 Методика синтеза контура регулирования скорости гидроагрегата на основе МДП	92
4.4 Методика синтеза контура регулирования активной мощности гидроагрегата на основе МДП	97
4.5 Моделирование динамических режимов работы двухконтурной САР активной мощности гидроагрегата на основе МДП.....	102
4.6 Выводы.....	121
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОАГРЕГАТА С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА	122
5.1 Описание экспериментальной установки.....	123
5.2 Статические характеристики экспериментального гидроагрегата.....	126
5.3 Результаты экспериментального исследования динамических характеристик двухконтурной САР активной мощности.....	128
5.4 Выводы.....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
Список литературы	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ В	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	153

ВВЕДЕНИЕ

Современная электроэнергетика столкнулась с проблемой истощения традиционных энергоресурсов при одновременном росте потребления электроэнергии. В результате, в зимнее время Республика Таджикистан испытывает недостаток электроэнергии. Поэтому назрела необходимость в интенсивном освоении возобновляемых источников энергии. Основным таким источником в Республике Таджикистан являются малые реки, имеющие расход порядка $1 \text{ м}^3/\text{с}$. Горный рельеф местности позволяет создавать гидросооружения ГЭС с перепадом высот от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Предварительные исследования Таджикско-Норвежского Центра по развитию малой энергетики показывают, что в горных районах Таджикистана технически возможно и экономически целесообразно строительство более 900 мини-ГЭС с мощностями гидроагрегатов от 100 до 3000 кВт [1].

Современная ситуация в республике требует экономической эксплуатации мини-ГЭС. Это наиболее актуально в зимнее время года, которое характеризуется меньшим расходом воды по руслам реки по сравнению с летним периодом. В то же время, в зимний период потребление электроэнергии возрастает по сравнению с летним. Выходом из данной ситуации является создание или модернизация мини-ГЭС с возможностью изменения выработки электроэнергии в соответствии с суточным графиком электрической нагрузки. Такая мини-ГЭС должна иметь бассейн суточного регулирования для запасания воды ночью. В течение суток мини-ГЭС должны автоматически оперативно изменять выработку электроэнергии, чтобы поддерживать баланс между потребляемой и генерируемой активной мощностью.

Крупные ГЭС, имеющие квалифицированный дежурный персонал, осуществляют автоматическое регулирование генерируемой активной мощности (P_3) путём изменения открытия направляющего аппарата (НА) гидротурбин. В основном режиме работы гидроагрегата его угловая скорость определяется

частотой сети, к которой подключен статор синхронного генератора, а требуемое значение P_{Ω} обеспечивается установкой соответствующего угла открытия НА.

Существенной особенностью такого регулирования P_{Ω} является длительный характер переходных процессов. Время их затухания составляет десятки секунд [2,3,4,5], что обусловлено невозможностью быстрого изменения скорости движения воды в водоводе. Уменьшение P_{Ω} производят путём закрытия НА, что вызывает уменьшение кинетической энергии воды в водоводе. Основная часть энергии торможения воды преобразуется турбиной в механическую работу. В результате, закрытие НА сначала (в течение нескольких секунд) приводит к увеличению P_{Ω} , и только потом начинается желаемое снижение величины P_{Ω} . Аналогичное изменение регулируемой величины, P_{Ω} , на начальном участке переходного процесса в сторону, противоположную управляющему воздействию, наблюдается и при переходе в режим увеличения P_{Ω} .

Поэтому, эксплуатируемые в настоящее время ГЭС неспособны компенсировать быстрые нарушения баланса между потребляемой и генерируемой активными мощностями в энергосистеме.

При более интенсивном использовании гидроэнергоресурсов (отсутствие холостых водосбросов, использование аккумулирующей способности водохранилища) воздействие на направляющие аппараты гидротурбин осуществляется автоматически системой регулирования P_{Ω} посредством гидроприводов и гидромеханических блокировок, для работы которых необходима маслonaпорная установка. Перечисленное оборудование требует квалифицированного обслуживания.

Наиболее подробно было рассмотрено регулирование вырабатываемой мощности гидроагрегата (ГА) и поддержание частоты вращения гидротурбин, в работах авторов Ю.Е. Гаркави, М.И. Смирнов, Л.Я. Бронштейн, А.Н. Герман, Г.С. Киселев, Г.И. Кривченко, В.Б. Андреев и др. Их теория в основном,

рассматривает крупные ГЭС. Приведенные способы регулирования активной мощности предназначены для крупных ГЭС [2,3,6,7,8].

В состав стандартных ГА, рассмотренных авторами [9,10,11,12,13,14,15,16,17,18], входит: радиально осевая (РО) гидротурбина, генератор, затвор, байпас, система подводящих и отводящих водоводов и сервомоторов направляющего аппарата.

В рассматриваемых работах не предусмотрено регулирование вырабатываемой электроэнергии изменением частоты вращения гидротурбины. Рассмотренные методы регулирования ГА нецелесообразно применять в мини-ГЭС, т.к. ГА мини-ГЭС должны работать в автоматическом режиме, не имея дежурного персонала.

Регулирование активной мощности путем изменения угловой скорости вала турбины возможно при использовании асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором (АГ) [19,20,21,22], асинхронных генераторов с фазным ротором (АГФР) [23,20,24,25,26] и синхронных генераторов (СГ) [27,28,29,30]. Требования к стабилизации параметров вырабатываемой электроэнергии при переменной угловой скорости вала гидротурбины приводят к двум вариантам построения генераторного комплекса (ГК) [31]: с механическими (дифференциальные редукторы, гидромеханические и пневмомеханические устройства) и электрическими (статические преобразователи частоты (ПЧ)) регуляторами. Оба варианта обеспечивают требуемую стабилизацию параметров вырабатываемой электроэнергии, однако второй, отличающийся простотой механической части ГК, более приемлем. В этом случае ГК может быть построен как на базе АГФР с ПЧ в цепи ротора (машина двойного питания (МДП)), так и по схеме АГ с ПЧ в цепи статора, либо СГ с ПЧ в цепи статора. Мощность ПЧ в цепи ротора АГФР для ГК по схеме МДП прямо пропорциональна частоте скольжения. Мощность ПЧ в цепи статора АГ (СГ) рассчитана на передачу всей активной мощности генератора, что увеличивает капитальные затраты и потери в ПЧ

[32,33,31,34]. В связи со сказанным, целесообразно использовать в качестве генератора машину двойного питания с ПЧ в цепи ротора.

Известные из литературы [35,36,37,38] ГК на основе МДП и системы управления ими ориентированы на их применение в ветроэнергетических установках. Применение в качестве первичного двигателя гидротурбины потребует учета её статических и динамических характеристик при синтезе регуляторов системы управления МДП-генератором гидроагрегата.

Повышение качества электроснабжения потребителей требует повышения манёвренности генерирующих мощностей электроэнергетической системы [39]. Для оперативного изменения выработки активной мощности в аварийных режимах работы электроэнергетической системы необходимо обеспечить высокое быстродействие САР активной мощности гидроагрегата по отработке внепланового задания генерируемой активной мощности мини-ГЭС. Это позволит быстрее восстанавливать внезапные нарушения баланса между потребляемой и генерируемой активными мощностями в электроэнергетической системе.

Целью диссертационной работы является повышение быстродействия системы автоматического регулирования активной мощности гидроагрегата за счёт применения генератора с переменной частотой вращения вала путём формирования требуемого значения электромагнитного момента генератора.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие **задачи:**

1. На основании сравнительного анализа рабочих характеристик гидротурбин обосновать тип гидротурбин, наиболее пригодный для регулирования активной мощности путём изменения числа оборотов.

2. Получить математическую модель радиально-осевой гидротурбины с напорным водоводом для построения систем управления генерируемой активной мощностью гидроагрегата с переменной частотой вращения вала.

3. Обосновать математическую модель управляемой по ротору МДП, адекватную задаче построения систем регулирования скорости и генерируемой активной мощности гидроагрегата.

4. Разработать методику расчета суммарного момента инерции на валу гидроагрегата и постоянной времени напорного водовода для обеспечения работоспособности гидроагрегата в режиме ограничения электромагнитного момента.

5. Разработать методику синтеза регулятора скорости, позволяющую обеспечить приемлемое по быстродействию и колебательности качество гидромеханических переходных процессов.

6. Разработать методику синтеза регулятора генерируемой активной мощности гидроагрегата.

7. Произвести экспериментальную проверку эффективности предложенных методик синтеза регуляторов.

Научная новизна работы.

1. Обоснован выбор радиально-осевой гидротурбины с низким коэффициентом быстроходности для регулирования генерируемой активной мощности путём изменения числа оборотов.

2. На основании общепринятой модели радиально-осевой гидротурбины с напорным водоводом получена модель, предназначенная для моделирования режимов работы с переменной частотой вращения вала, адекватная задаче построения системы регулирования скорости гидроагрегата.

3. Получены расчётные соотношения для выбора постоянной времени напорного водовода и момента инерции гидроагрегата из условий устойчивости и апериодического характера переходных процессов в режиме ограничения электромагнитного момента генератора.

4. На основании метода последовательной коррекции разработана методика синтеза регуляторов скорости и генерируемой активной мощности гидроагрегата.

Практическая ценность работы.

1. Разработанная методика синтеза регуляторов скорости и генерируемой активной мощности гидроагрегата может быть применена при создании гидроагрегатов мини-ГЭС на основе МДП, подключенной по цепи статора к электроэнергетической системе.

2. Разработана и предложена структура САР активной мощности гидроагрегата мини-ГЭС на основе МДП, работающей в составе электроэнергетической системы. Предложенная САР позволит снизить объём холостых водосбросов за счёт использования аккумулирующей способности водохранилища.

3. Результаты исследования динамических характеристик гидроагрегата в режиме ограничения электромагнитного момента МДП-генератора позволяют выработать рекомендации по выбору сечения напорного водовода и расчёту момента инерции маховика, устанавливаемого на валу гидроагрегата.

Методы исследований. Диссертационная работа выполнена с применением теории автоматического управления, теории электропривода, теории гидроэнергетики. Проверка работоспособности разработанной САР произведена методом цифрового моделирования в пакете программ Matlab/Simulink и путём натурального эксперимента.

На защиту выносятся следующие основные положения.

1. Методика синтеза регуляторов скорости и генерируемой активной мощности гидроагрегата, учитывающая статические и динамические свойства радиально-осевой гидротурбины и инерционность масс воды в напорном водоводе.

2. Методика расчета значений суммарного момента инерции на валу гидроагрегата и постоянной времени напорного водовода, необходимых для сохранения работоспособности гидроагрегата в режиме ограничения электромагнитного момента генератора.

3. Структура САР активной мощности гидроагрегата мини-ГЭС на основе машины двойного питания, работающей на сеть бесконечной мощности.

Личный вклад автора в научные работы, опубликованные в соавторстве с научным руководителем, заключается в постановке частных задач исследования, в разработке САР активной мощности ГА мини-ГЭС, в получении расчётных соотношения для выбора постоянной времени напорного водовода и момента инерции гидроагрегата, в разработке методики синтеза регуляторов скорости и генерируемой активной мощности гидроагрегата на основании метода последовательной коррекции, в исследовании синтезированной САР и анализе полученных результатов. В остальных работах, опубликованных в соавторстве, автором осуществлены постановка задач исследования, выбор методов их решения и анализ результатов.

Реализация результатов работы. Научные результаты, связанные с разработкой ресурсо- и энергосберегающих технологий для гидроагрегатов мини-ГЭС с возможностью изменения частоты вращения вала, работающих на электроэнергетическую систему, легли в основу создания методики проектирования и реконструкции действующих мини-ГЭС. Данная методика рассматривается для дальнейшего применения в Республике Таджикистан.

Результаты, полученные в диссертационной работе, используются в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ):

1. При чтении лекций по курсам: «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов», «Моделирование электромеханических систем» для студентов 3, 4 и 5 курсов;

2. В научно-исследовательских работах студентов, при выполнении курсовых и дипломных работ.

Материалы данной работы используются аспирантами кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» при подготовке научно-исследовательских работ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях: XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии», Томск 2012 г.; Восьмой Международной теплофизической школы «Теплофизические исследования и измерения в энерго- и ресурсосбережении, при контроле и управлении качеством процессов, продукции и услуг» Душанбе – Тамбов 2012 г.; на Днях Науки Новосибирского государственного технического университета (НГТУ) в 2013 г., 2014 г. Отдельные результаты исследования докладывались и обсуждались на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 6 печатных работ, 4 из которых – в центральных журналах, рекомендованных списком ВАК, 2 – материалы научных конференций.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и четырёх приложений; содержит 143 стр. основного текста, включая 90 рисунков, 2 таблицы, и библиографический список использованной литературы из 85 наименований.

В первой главе диссертационной работы произведен обзор силовых схем генераторных комплексов переменного тока, предназначенных для работы при переменной частоте вращения вала на сеть бесконечной мощности. По результатам обзора предложена силовая схема на основе МДП. Данная силовая схема широко применяется в ветроэнергетических установках, работающих на сеть бесконечной мощности.

Современные системы управления электромагнитным моментом и активной мощностью МДП строятся как системы векторного управления (СВУ) с ориентированием результирующего вектора токов ротора по вектору потокосцепления статора асинхронной машины. СВУ позволяет регулировать

активную мощность МДП со стороны генератора путём изменения его электромагнитного момента независимо от частоты вращения вала.

Произведён анализ рабочих характеристик гидротурбин. Показано, что для эффективной работы ГА мини-ГЭС следует применять гидротурбины радиально-осевого (РО) типа с низким коэффициентом быстроходности. При повышении частоты вращения ГА центробежная сила увеличивает противодействие, препятствующее прохождению воды через направляющий аппарат турбины на рабочее колесо, что позволит наполнять водохранилище ГЭС во время суток, когда потребление электроэнергии минимально.

Вторая глава посвящена математическому описанию гидроагрегата (ГА) мини-ГЭС как объекта управления.

Автором предложен новый взгляд на математическое описание и управление ГА, который позволяет спроектировать САУ с высоким быстродействием по генерируемой активной мощности.

Математическое описание радиально-осевой гидротурбины при переменной частоте вращения ГА получено на основании применяемой проектными организациями модели гидротурбины, работающей на одном валу с синхронным генератором при постоянном значении частоты сети.

Предлагаемая математическая модель составлена при допущениях о неэластичности стенок водовода, несжимаемости воды и о том, что гидротурбина работает на участке характеристики, где её КПД практически не зависит от частоты вращения вала.

В третьей главе произведена линеаризация динамической модели ГА в малой окрестности рабочей точки. Получены передаточные функции ГА, описывающие его динамические свойства:

1. по угловой скорости вала ГА в зависимости от электромагнитного момента МДП-генератора;
2. по генерируемой активной мощности в зависимости от угловой скорости вала ГА.

Разработана методика выбора параметров объекта управления, обеспечивающая устойчивость и аperiodический характер переходных процессов по угловой скорости вала ГА.

Оба эти условия обеспечиваются увеличением суммарного момента инерции ГА и площади поперечного сечения напорного водовода.

Четвертая глава посвящена разработке методики синтеза регуляторов угловой скорости вала и генерируемой активной мощности ГА мини-ГЭС.

Система управления ГА мини-ГЭС построена в виде многоконтурной системы подчиненного регулирования координат. САУ ГА мини-ГЭС содержит внутренний контур регулирования скорости, необходимый для ограничения напряжения на выводах ПЧ со стороны ротора путём ограничения скольжения асинхронной машины, внешний контур регулирования уровня воды в водохранилище и промежуточный контур регулирования активной мощности (P), от которого требуется к высокому быстродействию при отработке внепланового задания в аварийных режимах работы электроэнергетической системы (ЭЭС).

Разработана методика синтеза регулятора скорости, позволяющая обеспечить приемлемое по быстродействию и колебательности качество гидромеханических переходных процессов.

Разработана методика синтеза регулятора генерируемой активной мощности гидроагрегата.

Методом цифрового моделирования произведена проверка работоспособности предлагаемой инженерной методики синтеза регуляторов ГА мини-ГЭС в характерных режимах работы.

Результаты моделирования подтвердили адекватность разработанной инженерной методики синтеза регуляторов САУ активной мощностью ГА.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований САУ активной мощности ГА микро-ГЭС на базе серийной электрической машины постоянного тока.

В приложении к диссертации содержатся технические данные одной из действующих мини-ГЭС Республики Таджикистан, востребованные на этапе цифрового моделирования, а также материалы, подтверждающие внедрение и использование результатов исследований.

ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА

1.1 Роль мини-ГЭС в энергосистеме

В диссертационной работе рассмотрена мини-ГЭС с водохранилищем суточного регулирования, подсоединённая к электрической сети бесконечной мощности. Данный тип гидроэлектростанций является составной частью единой электроэнергетической системы (ЭЭС).

Электрические станции, работающие совместно на общую электрическую сеть, линии передачи, повышающие и понижающие подстанции, составляют ЭЭС. Высоковольтные линии электропередачи, связывая между собой отдельные системы, позволяют создавать объединенные энергосистемы. Для назначения режима и оперативного управления работой ГЭС и сетей организованы Объединенные диспетчерские управления (ОДУ) и диспетчерские управления систем.

Мини-ГЭС могут быть использованы в энергосистеме:

1. для выработки электрической энергии;
2. для покрытия небольших пиков электрической нагрузки ЭЭС.

В данной работе рассматриваются только суточные колебания электрической нагрузки энергосистемы (т.к. водохранилище мини-ГЭС мало), которые определяются неравномерным режимом потребления электрической энергии населением. Данные колебания нагрузки происходят при одновременном росте потребления электрической энергии, происходящем вследствие присоединения новых потребителей.

На рисунке 1.1 показан суточный график электрической коммунально-бытовой нагрузки. Суточный график электрической нагрузки характеризуется изменением нагрузки $P_{\text{наг}}$ в течение суток.

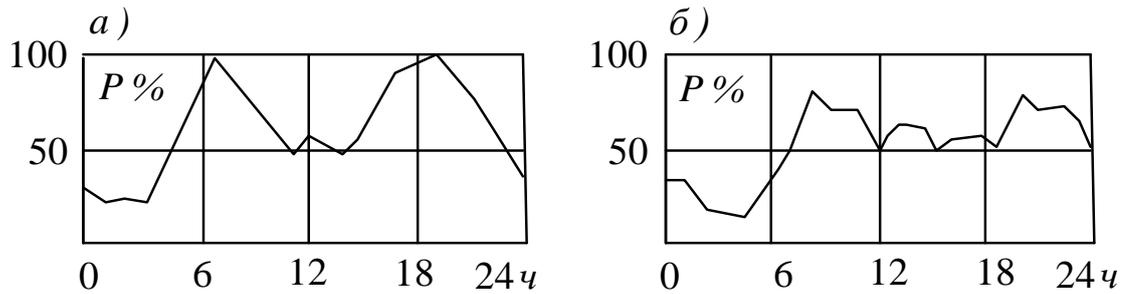


Рисунок 1.1 – График суточной нагрузки энергосистемы.

Коммунально-бытовая нагрузка;

а - зимний день, б - летний день

Данные графики (рисунок 1.1) приведены для зимнего и летнего времени. Из графиков видно, что пик нагрузки приходится на утреннее и вечернее время. В зимнее время расход электроэнергии больше чем в летнее время года. Вместе с тем, зимой водосток в разы меньше чем летом.

Осенний - зимний водосток одной из крупных рек, которая характеризует весь водосток Таджикистана, представлена на рисунке 1.2.

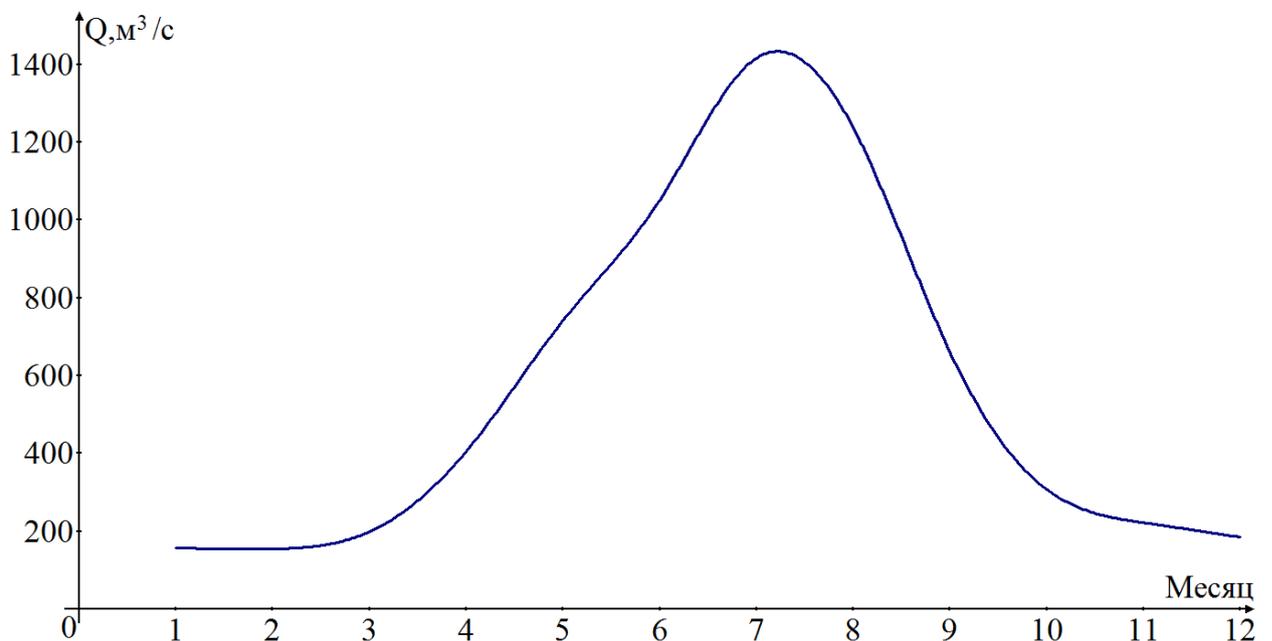


Рисунок 1.2 – Среднегодовой речной сток реки Вахш за 39 лет

Река Вахш одна из крупных рек Таджикистана, на которой сконцентрированы все крупные ГЭС. Река Вахш имеет ледниково-снеговое питание с водосборной площади равной 39 тыс. кв. км, при отметках горизонтов воды в начале 1151 и 316 у устья и длине 355 км. В средних числах октября устанавливается меженное (минимальный водосток) состояние реки с расходами порядка 150-250 м³/сек. Максимальные расходы воды на реке Вахш - могут изменяться от 1780 м³/с (30. 05. 1951г.) до 3780 м³/с. (10. 07. 1953г.). Из рисунка 1.2 видно, что основной сток воды реки Вахш приходит в период с мая по сентябрь и составляет 76,0 % от годового стока [40]. Отсюда следует, что в зимний период водосток рек уменьшается, а потребность электроэнергии увеличивается (рисунок 1.1), а при проектировании мини-ГЭС для расчетов берут зимний сток воды, что занижает установленную мощность мини-ГЭС.

Для того чтобы иметь возможность кратковременно увеличить генерируемую активную мощность и покрывать суточный график электрической нагрузки энергосистемы, необходимо строить мини-ГЭС с водохранилищем суточного регулирования, для покрытия пиков электрической нагрузки энергосистемы.

Суточное регулирование позволяет повысить участие минигидроэлектростанций в покрытии максимума нагрузки системы, снизить потребность в мощности других электростанций и улучшить режим их работы. В меженный период при круглосуточной работе на постоянном приточном расходе гидроэлектростанция может развивать сравнительно небольшую мощность. При работе с суточным регулированием мини-ГЭС с суточным водохранилищем в часы пиковой нагрузки развивает повышенную мощность, а в часы минимальной нагрузки снижает свою мощность и аккумулирует воду в водохранилище.

1.2 Способы управления активной мощностью гидроагрегата мини-ГЭС

Существуют несколько вариантов регулирования активной мощности мини-ГЭС. Рассмотрим поочередно все варианты.

Балластным сопротивлением. На автономных мини-ГЭС устанавливают гидротурбины без маслонапорных установок, направляющий аппарат устанавливают на номинальный режим работы гидротурбины, что не позволяет экономить воду при малом потреблении электроэнергии. В качестве генератора используют машины переменного тока. Автономные мини-ГЭС, как правило, не имеют дежурного персонала. Изменение генерируемой активной мощности (P_g) производится вручную воздействием на направляющие аппараты гидротурбин во время текущего осмотра оборудования мини-ГЭС. Баланс между генерируемой и потребляемой активными мощностями обеспечивается путём «выбрасывания» излишней вырабатываемой электроэнергии на реостаты [41,42,43]. Уровень воды в верхнем бьефе водохранилища ограничивается путём холостого водосброса.

Данный способ регулирования вырабатываемой электроэнергии не энергоэффективен.

Регулирование активной мощности с помощью НА. Рассмотрим мини-ГЭС с одним ГА на основе СГ, подключенного к сети бесконечной мощности. Мощность СГ очень мала по сравнению с сетью бесконечной мощности. Изменение режима работы СГ не может практически повлиять на величину напряжения U_C или частоты f_C электроэнергетической системы. При параллельной работе СГ с сетью бесконечной мощности напряжение U_C и частота f_C на выводах СГ жестко заданы режимом всей сети и не зависят от тока возбуждения, тока нагрузки и мощности самого СГ [44].

Итак, частота вращения СГ определена частотой сети бесконечной мощности, что следует из соотношения

$$\omega = \frac{2\pi f_C}{p_n},$$

где p_n - число пар полюсов СГ.

Мини-ГЭС, как правило, не имеют дежурного персонала. При работе СГ параллельно с сетью бесконечной мощности наиболее часто реализуются два режима:

1. первый режим характеризуется изменением (регулированием) активной мощности генератора при постоянном возбуждении;
2. второй режим характеризуется изменением возбуждения (регулированием реактивной мощности) при постоянстве активной мощности генератора.

При параллельной работе СГ с сетью бесконечной мощности изменение (увеличение / уменьшение) генерируемой активной мощности, вырабатываемой СГ, производится двумя способами:

- 1) вручную воздействием на НА гидротурбин, во время текущего осмотра оборудования мини-ГЭС;
- 2) в автоматическом режиме воздействием на НА с помощью гидроприводов.

Регулирование активной мощности ГА с помощью НА не позволяет получить высокое быстродействие, которое ограничено гидромеханической инерцией системы.

Синхронный генератор с двухзвенным ПЧ. Регулирование активной мощности при переменной частоте вращения вала можно осуществить с помощью СГ с двухзвенным преобразователем частоты (ПЧ) в цепи статора. Данные системы обладают большим быстродействием, но имеют существенный недостаток: мощность ПЧ в статоре СГ рассчитана на передачу всей мощности генератора, что увеличивает капитальные затраты и электрические потери.

Одним из вариантов решения этой проблемы является использование асинхронных генераторов с фазным ротором (АГФР). Требования к стабилизации параметров вырабатываемой электроэнергии при переменной частоте вращения вала ГА приводят к варианту построения ГК с электрическими регуляторами [45]. В нашем случае ГК может быть построен на базе АГ с ПЧ в роторной цепи (машина двойного питания).

Машиной двойного питания. Принципиально новые возможности для быстрого изменения генерируемой активной мощности, P_g , предоставляют генераторные комплексы на основе машины двойного питания.

Использование асинхронной машины в ГА давно интересовало исследователей, работающих в области систем генерирования электроэнергии. Общее признание в этом направлении получили работы А.А. Иванова, Ю.Д. Зубкова, С.К. Бохяна, В.И. Радина, И.Д. Торопцева, М.Л. Костырева, А.В. Новикова и др. [19,25,27,24,46,20,47,23,48,49].

Новый этап в исследовании асинхронных ГК связан с использованием для этой цели МДП. Благодаря широким регулировочным возможностям МДП-генератор занимает равноправное место в ряду альтернативных ГК, а по некоторым показателям имеет существенные преимущества. Глубокие научные и практические исследования в области МДП проведены научным коллективом ВИИИ электроэнергетики под руководством М.М. Ботвинника и Ю.Г. Шакаряна, отражены также в работах Г.Б. Онищенко, В.Г. Титова, А.Е. Загорского и др. ученых [35,50,51,52,53,54,36,55,56]. Новые перспективы применения МДП-генератор получил благодаря последним достижениям в области силовой электроники, созданию современных преобразователей частоты, которые обеспечивают практически синусоидальную форму токов в фазах электрической машины.

Работы по исследованию и внедрению МДП-генератора в ветроэнергетику, судовые валогенераторные установки ведутся и за рубежом. Например, в Японии фирмой Hitachi, в Норвегии - ABB KraftAs и ABB Corporate Research, в Австралии - Rainbow Power Company, в Германии - AKW, Siemens [57,31]. Накоплен значительный мировой опыт в разработке и исследовании МДП-генераторов.

В данной работе задача построения системы автоматического управления активной мощностью МДП-генератора для гидроагрегата мини-ГЭС рассматривается в свете проблемы создания автоматического электропривода, работающего в генераторном режиме, как базового элемента автоматизированной

системы управления [58] технологическим процессом выработки электроэнергии в объединённой электроэнергетической системе Таджикистана.

Упрощенная силовая схема ГК на основе МДП показана на рисунке 1.3. Генератор представляет собой асинхронную машину с фазным ротором (АМ), статор которой подключен к сети, а ротор получает питание от полупроводникового преобразователя частоты (ПЧ) [24,31,59]. Напряжение ПЧ по цепи ротора АМ практически прямо пропорционально частоте скольжения. Изменяя частоту питания ротора, можно регулировать угловую скорость вала генератора при синхронной работе ГК с прилегающей энергосистемой. Это позволяет регулировать мощность P_g , отдаваемую в сеть.

Силовая схема ГК, показанная на рисунке 1.3, применяется в ветроэнергетических установках, имеющих диапазон регулирования ω примерно 1:2. ПЧ строят по силовой схеме, позволяющей передавать активную мощность в обоих направлениях. Установленная мощность ПЧ прямо пропорциональна максимально допустимой частоте скольжения. Данный ГК позволяет в темпе электромагнитных переходных процессов регулировать P_g путём изменения электромагнитного момента (M_g) генератора. Таким образом, появляется возможность в десятки раз уменьшить время переходных процессов $P_g(t)$ по сравнению с эксплуатируемыми в настоящее время ГК на основе синхронных генераторов работающих параллельно с сетью.

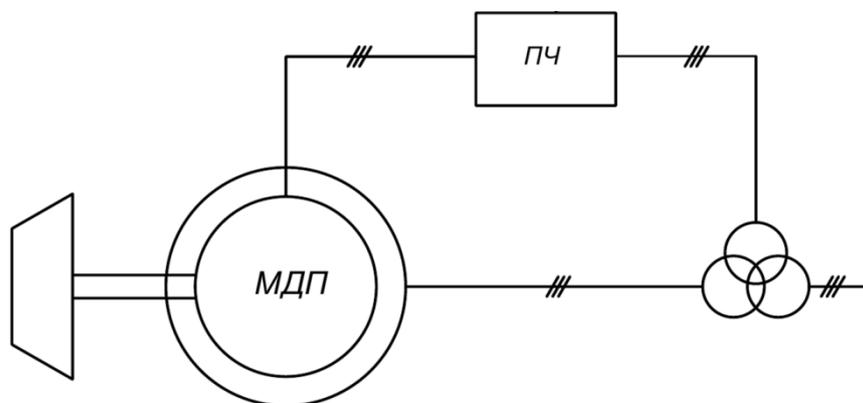


Рисунок 1.3 – Силовая схема ГК на основе МДП

Основное преимущество мини-ГЭС на базе машины двойного питания состоит в том, что управление генератором осуществляется за счёт преобразования не всей, как в СГ с двухзвенным ПЧ, а лишь части электрической энергии, от мощности генератором.

В Российской научно-технической литературе вопросы построения систем управления асинхронной машиной с фазным ротором при помощи ПЧ в цепи ротора рассмотрены в работах научных коллективов под руководством М.М. Ботвинника, Ю.Г. Шакаряна и, в последние два десятилетия, О.С. Хватова. Данная силовая схема широко применяется в ветроэнергетических установках, работающих на сеть бесконечной мощности. Регулирование генерируемой активной мощности P_{Ω} производится изменением частоты вращения ветротурбины.

В своих работах авторы предшествующих работ рассматривали два алгоритма управления: для автономного режима и для работы на энергосистему мощность, которой превышает мощность МДП в 10 раз [31]. Предлагаемые ими алгоритмы больше всего подходят к двигателям внутреннего сгорания, ветроустановкам и к мини-ГЭС с активными гидротурбинами, где изменение M_{Ω} никак не влияет на гидросистему.

Был проведен анализ работ научной группы О.С. Хватова. Были выявлены следующие не решенные вопросы.

В системе управления МДП в качестве ПЧ был выбран двухзвенный АИТ, что является недостатком данной силовой схемы – низкое быстродействие по M_{Ω} вследствие инерционности дросселя (рисунок 1.4).

Авторами предшествующих работ не решены следующие задачи:

- не изучены и не учтены статические характеристики гидротурбины;
- не учтены динамические свойства гидротурбины с водоводом, а именно, не принята во внимание кинетическая энергия воды в водоводе;

- рассмотренная система управления МДП не ограничивает скольжение асинхронной машины в установившихся и динамических режимах;
- не разработана методика синтеза регуляторов скорости и активной мощности.

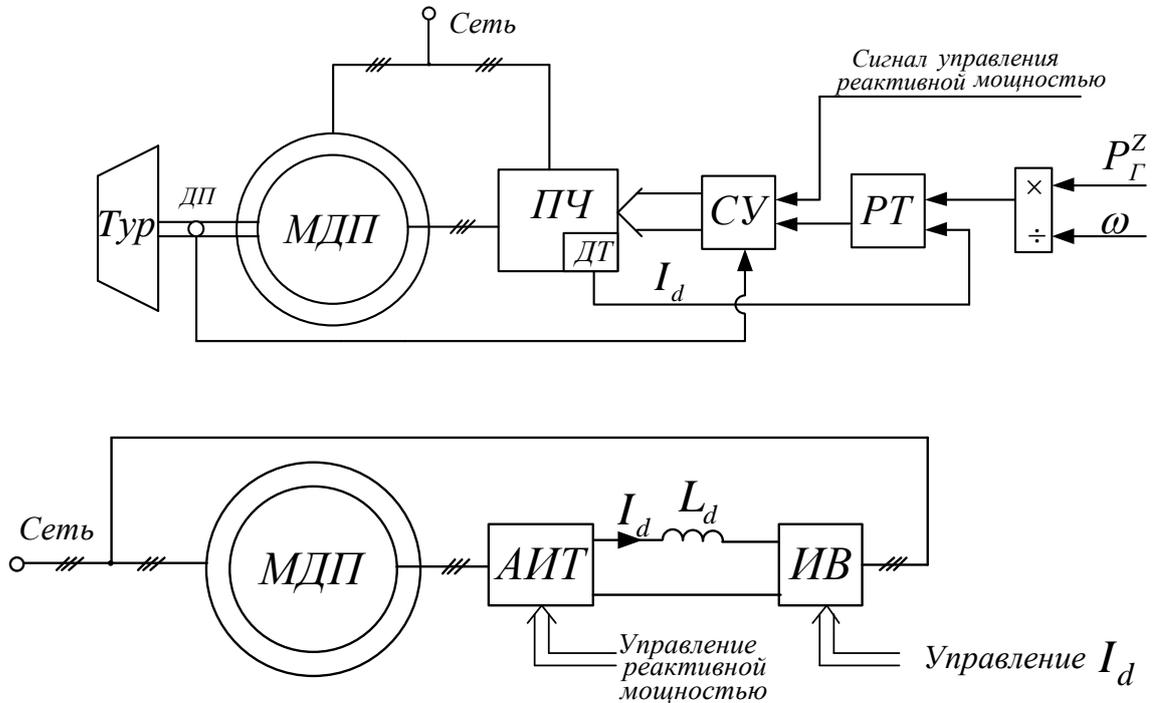


Рисунок 1.4 – Функциональная схема ГА на основе МДП с АИТ

Необходимо продолжение этих работ в направлениях, связанных с анализом электромагнитных и электромеханических процессов, синтезом систем автоматического регулирования МДП-генератора, влиянием на характеристики генератора типа преобразователя частоты и др. Взаимодействие гидротурбины и МДП исследовано недостаточно.

По результатам произведённого обзора в ГА мини-ГЭС предлагается применять систему векторного управления (СВУ) на основе машины двойного питания [37,60]. Современные СВУ электрическими машинами переменного тока, выполненные на основе транзисторных преобразователей частоты, характеризуются высоким быстродействием по электромагнитному моменту. Постоянная времени СВУ МДП по электромагнитному моменту, а соответственно

и по активной мощности, для современных СВУ электрическими машинами переменного тока большой мощности составляет от 0,005 до 0,02 сек.

Противо-ЭДС ротора прямо пропорциональна величине абсолютного скольжения асинхронной машины. Поэтому выходное напряжение, на которое должен быть рассчитан преобразователь частоты, определяется преимущественно величиной максимального скольжения из рабочего диапазона скоростей. Кроме того, за счёт управления током ротора асинхронной машины можно обеспечить минимум суммарных потерь.

Итак, МДП с СВУ характеризуются высокой экономичностью при работе на околосинхронных частотах вращения ротора асинхронной машины. Обычно частота вращения ротора изменяется от -40% до +30% от синхронной скорости. Эти требования определяют диапазон варьирования мощности силового преобразователя - в пределах 30 ÷ 40% от номинального значения мощности МДП-генератора. Применение машины двойного питания особенно эффективно там, где требуется длительная работа на скоростях, превышающих синхронную для генератора, и полной, в частности, номинальной механической нагрузке [31]. В этих режимах МДП генерирует по цепям статора и ротора электрическую энергию. В режимах, где МДП работает ниже синхронной скорости, МДП генерирует по цепи статора электрическую энергию, а по цепи ротора потребляет.

Вследствие ограниченной мощности современных ПЧ, создание ГК на основе МДП перспективно, в первую очередь, для мини-ГЭС.

Автором ставится задача исследовать возможности регулирования основных технологических параметров мини-ГЭС путём изменения частоты вращения гидроагрегата.

Обзор справочной литературы по гидротурбинам [12,13,14] показывает, что для гидротурбин с жёстко закреплёнными лопастями увеличение угловой скорости примерно в два раза по сравнению с номинальной, приводит к снижению мощности, развиваемой гидротурбиной, до нуля (рисунок 1.5) [61].

Цель регулирования частоты вращения ГА в основном режиме - поддержание максимального значения напора мини-ГЭС, но без холостого водосброса.

Управляющее воздействие на ГА в таких мини-ГЭС – электромагнитный момент генератора M_{Σ} .

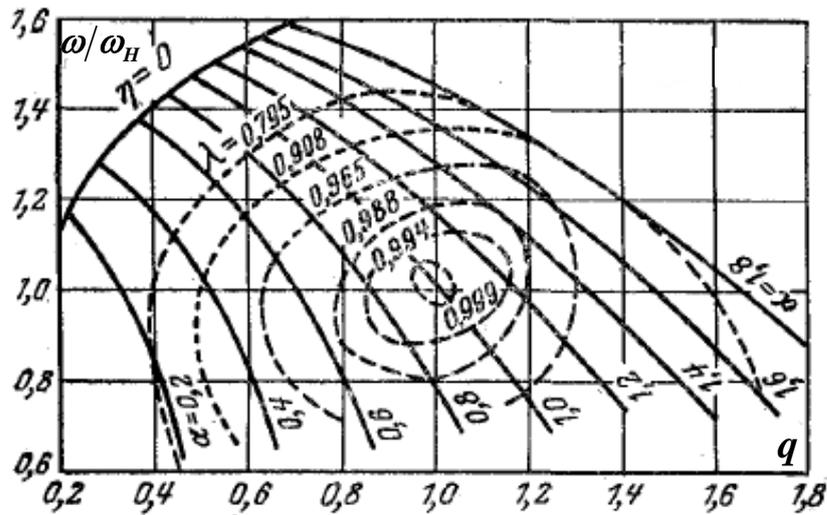


Рисунок 1.5 – Характеристики РО гидротурбины.

α - относительное открытие НА; $\lambda = \eta / \eta_H$ - относительный КПД;

$q = Q / Q_H$ - относительный расход воды

Система автоматического регулирования (САР) угловой скорости ГА ω должна быть внутренним контуром регулирования в САР генерируемой активной мощности P_{Σ} (рисунок 1.6). Быстродействующий внутренний контур – САР ω необходим, прежде всего, для ограничения ω в переходных процессах при внезапных внеплановых заданиях по мощности P_{Σ} . Поскольку напряжение на выводах ПЧ по цепи ротора АМ практически прямо пропорционально частоте скольжения, ограничение минимальной и максимальной величин ω позволит защитить ПЧ от превышения допустимых значений напряжения по цепи ротора.

МДП с СВУ в настоящее время нашли широкое применение в ветроэнергетических установках. МДП с СВУ имеет каналы воздействия для управления передаваемой в сеть активной и реактивной мощностями.

Система векторного управления электропривода на основе машины двойного питания представляет собой двухканальную САУ. Управляющими воздействиями в ней являются компоненты вектора сигналов задания на токи, либо напряжения ротора генератора. При этом одна из компонент вектора используется для регулирования скорости (момента).

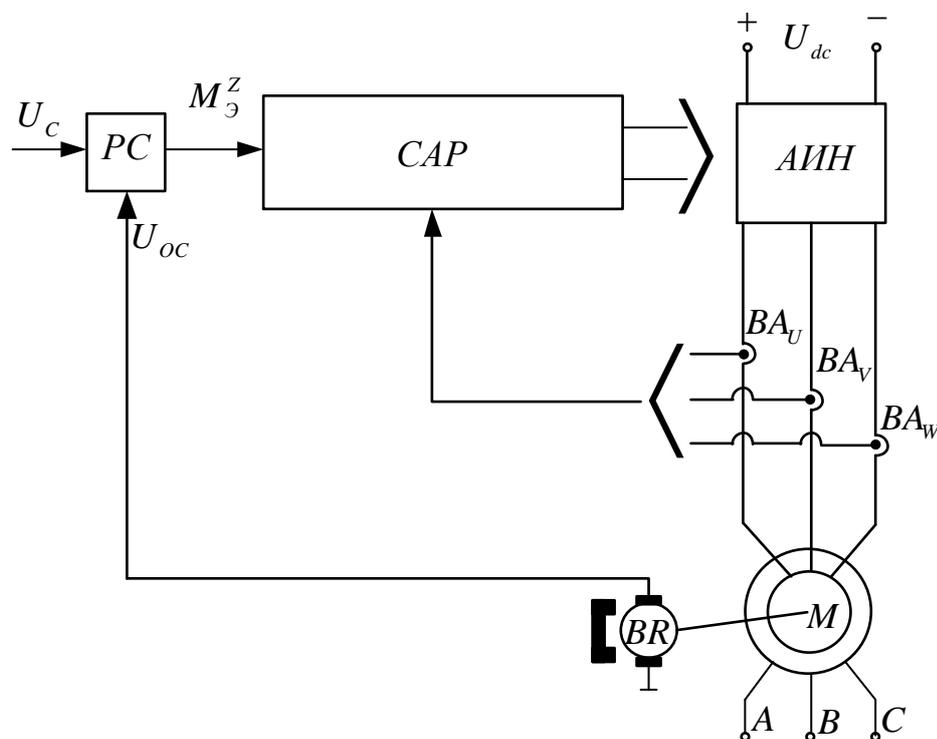


Рисунок 1.6 – Функциональная схема САУ МДП

Задача построения контуров регулирования и синтеза регуляторов системы управления активной мощностью ГА мини-ГЭС на основе МДП требует математического описания процессов в электрической машине и преобразователей электрической энергии уравнениями их двухфазной модели. Переменными данной модели должны являться регулируемые координаты СВУ и проекции вектора управляющих воздействий на оси декартовой системы координат, вращающейся синхронно с полем двигателя.

1.3 Математическое описание системы векторного управления МДП

Машиной двойного питания в данной работе называется асинхронная машина с фазным ротором, управляемая с помощью преобразователя частоты,

причём статор генератора подключен к сети переменного тока, а ротор - к выходам преобразователя. Асинхронная машина может быть как серийной, с трёхфазными обмотками, так и специально спроектированной, в частности, иметь двухфазную обмотку на роторе.

Асинхронный генератор с фазным ротором является неявнополюсной симметричной в магнитном и электрическом отношении машиной. Его математическое описание во вращающейся с произвольной угловой скоростью ω_k декартовой системе координат может быть представлено следующими векторно-матричными уравнениями:

Уравнение равновесия напряжений статорной цепи

$$\frac{d\Psi_s}{dt} = U_s - R_s I_s - \omega_k D\Psi_s. \quad (1.1)$$

Уравнение равновесия напряжений цепи ротора

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = U_r - R_r I_r - \omega_\Delta D\Psi_r. \quad (1.2)$$

Уравнения магнитной цепи

$$\Psi_s = L_s I_s + L_m I_r, \quad (1.3)$$

$$\Psi_r = L_m I_s + L_r I_r, \quad (1.4)$$

$$\Psi_m = L_m (I_s + I_r). \quad (1.5)$$

Выражение для электромагнитного момента двигателя

$$M_\Delta = c L_m I_s^T D I_r, \quad (1.6)$$

Здесь $\Psi_s, \Psi_r, U_s, U_r, I_s, I_r$ - двумерные векторы-столбцы потокосцеплений, напряжений и токов вида $X_i = [x_{i1}, x_{i2}]^T$; x_{i1}, x_{i2} - компоненты вектора X_i , являющиеся его проекциями на соответствующие оси декартовой системы координат 1,2. Индекс i означает, что переменная относится к обмотке статора ($i = s$) или ротора ($i = r$); Т - символ транспонирования вектора-столбца. Ψ_m -

вектор потокосцеплений, характеризующий магнитный поток в воздушном зазоре, $\Psi_m = [\Psi_{m1}, \Psi_{m2}]^T$. D - матрица преобразования вектора-столбца,

$$D = \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix},$$

R_s, R_r - активные сопротивления обмоток статора и ротора, L_m - главная индуктивность двигателя, L_s, L_r - собственные индуктивности обмоток статора и ротора,

$$\begin{aligned} L_s &= L_m + L_{\sigma s}, \\ L_r &= L_m + L_{\sigma r}, \end{aligned}$$

где $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$ - индуктивности рассеяния. ω_Δ - скорость вращения системы координат 1, 2 относительно ротора,

$$\omega_\Delta = \omega_k - p_n \omega. \quad (1.7)$$

При условии, что система координат 1, 2 вращается синхронно с магнитным полем статора, ω_Δ в (1.7) является частотой скольжения. M_Δ - электромагнитный момент, c - конструктивная постоянная генератора. Далее в работе будем полагать, что двухфазная модель асинхронного генератора составлена с использованием инвариантного по мощности преобразования физических переменных [62]. Тогда $c = p_n$.

Уравнение механического движения имеет вид

$$J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_\Delta, \quad (1.8)$$

где M_T - момент гидротурбины, M_Δ - электромагнитный момент МДП-генератора, а J_Σ - суммарный момент инерции ГА, приведённый к валу генератора.

Уравнения (1.1) - (1.6) математического описания асинхронного генератора с фазным ротором составлены в системе общепринятых допущений [24,62]:

1. обмотки статора и ротора электрической машины расположены симметрично относительно оси вращения, а также относительно друг друга при любом угловом положении вала;
2. взаимные индуктивности фаз статора и ротора являются гармоническими функциями углового положения ротора; неравномерность воздушного зазора, обусловленная пазами, не учитывается;
3. характеристика намагничивания является кусочно-линейной;
4. не учитывается эффект вытеснения тока и активное сопротивление цепи намагничивания;
5. нет демпферных контуров на роторе;
6. отсутствуют ёмкости внутри обмоток и между ними, а следовательно, энергия электростатического поля принимается равной нулю.

При построении системы регуляторов электропривода в качестве силовых воздействий на генератор со стороны управляющей части ГА мини-ГЭС будем рассматривать средние за период коммутации силового преобразователя значения токов i_{r1}, i_{r2} , либо напряжений u_{r1}, u_{r2} . Указанные переменные представляют собой проекции обобщённых векторов тока, либо напряжения ротора, соответственно, на оси 1, 2 вращающейся синхронно с полем генератора ортогональной системы координат. Современный уровень развития полупроводниковой и преобразовательной техники позволяет строить системы электроприводов переменного тока, в которых в качестве управляющих воздействий выступает обобщённый вектор тока, либо напряжения на выходе силового преобразователя [63,62,51,56]. Это означает, что быстродействие систем регулирования токов (напряжений) таких ЭП как минимум на порядок выше быстродействия внешних контуров регулирования ГА мини-ГЭС.

Построение систем векторного управления ЭП будем производить, считая преобразователь электрической энергии безынерционным элементом САУ электропривода. Математическое описание системы регулирования токов ротора асинхронного генератора примем в виде

$$I_r = k_{yT} I_r^z, \quad (1.9)$$

где k_{yT} - коэффициент усиления "безынерционного" источника тока;
 $I_r^z = [i_{r1}^z, i_{r2}^z]^T$; i_{r1}^z, i_{r2}^z - сигналы задания токов на выходе внешних регуляторов СВУ.

Аналогичный вид будет иметь и математическая модель системы регулирования напряжений:

$$U_r = k_{yH} U_r^z, \quad (1.10)$$

здесь k_{yH} - коэффициент усиления источника напряжения;

$$U_r^z = \left[u_{r1}^z, u_{r2}^z \right]^T;$$

u_{r1}^z, u_{r2}^z - напряжения на выходе внешних регуляторов системы векторного управления МДП.

Электромагнитный момент $M_{\mathcal{E}}$ генератора определяется произведением величины тока ротора I_r (1.9) и амплитуды потокосцепления статора Ψ_s . Следовательно, в режимах работы ЭП со стабилизацией магнитного состояния ($\Psi_s = const$) мгновенное значение $M_{\mathcal{E}}$ будет прямо пропорционально i_{r2}^z и выражение для $M_{\mathcal{E}}$ будет иметь вид,

$$M_{\mathcal{E}} = -p_n k_s k_{yT} \Psi_s i_{r2}^z, \quad (1.11)$$

где k_s - безмерный коэффициент, $k_s = \frac{L_m}{L_s}$

Математическое описание (1.11) системы регулирования электромагнитного момента асинхронного генератора примем в виде,

$$M_{\mathcal{E}} = \kappa_M^{CBY} M_{\mathcal{E}}^Z. \quad (1.12)$$

где κ_M^{CBY} - коэффициент усиления "безынерционного" источника электромагнитного момента $\kappa_M^{CBY} = -p_n \Psi_s$, $M_{\mathcal{O}}^Z$ - напряжение на выходе внешнего регулятора СВУ.

1.4 Обзор и выбор типа гидротурбины

На рисунке 1.7 представлена мини-ГЭС, которая состоит из водохранилища суточного регулирования, напорного водовода и гидроагрегата. Гидроагрегат состоит из гидравлической турбины и генератора переменного тока.

Гидротурбина – это гидравлический первичный двигатель, предназначенный для преобразования подводимой к нему энергии потока в механическую энергию на его валу. Таким образом, гидравлическая энергия сначала преобразуется в гидротурбине в механическую, а затем при помощи генератора переменного тока - в электрическую энергию [64].

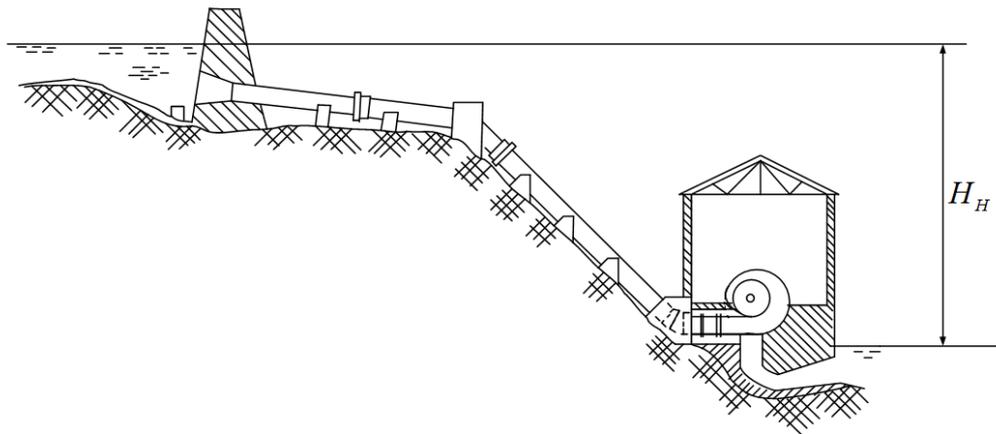


Рисунок 1.7 – Технологическая схема мини - ГЭС

Одной из проблем при проектировании мини-ГЭС является выбор гидротурбины.

Мощность гидротурбины P_T , равна произведению момента гидротурбины M_T на угловую скорость ω ГА

$$P_T = M_T \omega. \quad (1.13).$$

Мощность гидротурбины изменяется при изменении расхода воды Q и напора H . Выражение для расчета мощности гидротурбины имеет вид [64,11,65]

$$P_T = 9,81QH\eta_T, \quad (1.14)$$

где H - напор воды, подведенной к гидротурбине, м; Q - расход воды, m^3 / c ; η_T - коэффициент полезного действия (КПД) гидротурбины.

Величина КПД гидротурбины зависит от ее конструкции и размеров и изменяется при изменении нагрузки гидротурбины. Для малых гидротурбин диаметром примерно 1м наибольшая величина КПД составляет 0,88 – 0,91.

Номинальная мощность P_{TH} определяется при номинальном напоре H_H и номинальной пропускной способности Q_H .

Мощность генератора $P_{\mathcal{E}}$, измеряется на зажимах генератора. В установившихся режимах мощность генератора равна мощности гидротурбины за вычетом потерь в генераторе,

$$P_{\mathcal{E}} = P_T\eta_{ген},$$

где $\eta_{ген}$ - КПД генератора.

При выборе гидротурбин необходимо обратить внимание на то, что гидротурбины делятся на два типа:

- активные гидротурбины, которые используют энергию потока в кинетическом виде (рисунок 1.8. а)
- реактивные гидротурбины (рисунок 1.8. б, в) используют преимущественно потенциальную часть энергии потока.

Активные гидротурбины (рисунок 1.8. а). Конструктивной особенностью турбин этого типа является то, что они работают от свободной струи при нормальном атмосферном давлении. Сопло направляет воду на лопасти рабочего колеса, которые имеют форму ковша, и вся энергия в сопле обращается в кинетическую энергию.

Активные турбины работают, таким образом, за счет кинетической энергии и применяются лишь при больших напорах, от 40 до 800 метров.

Реактивные гидротурбины. Реактивные гидротурбины работают, главным образом, за счет энергии давления.

Реактивные гидротурбины делятся на два типа, осевые гидротурбины и радиально-осевые гидротурбины. Осевые турбины в свою очередь делятся на пропеллерные и поворотнолопастные (рисунок 1.8. б). В осевых турбинах поток в меридиональной плоскости в зоне лопастей рабочего колеса имеет осевое направление, а в радиально-осевых гидротурбинах – радиально-осевое направление [66].

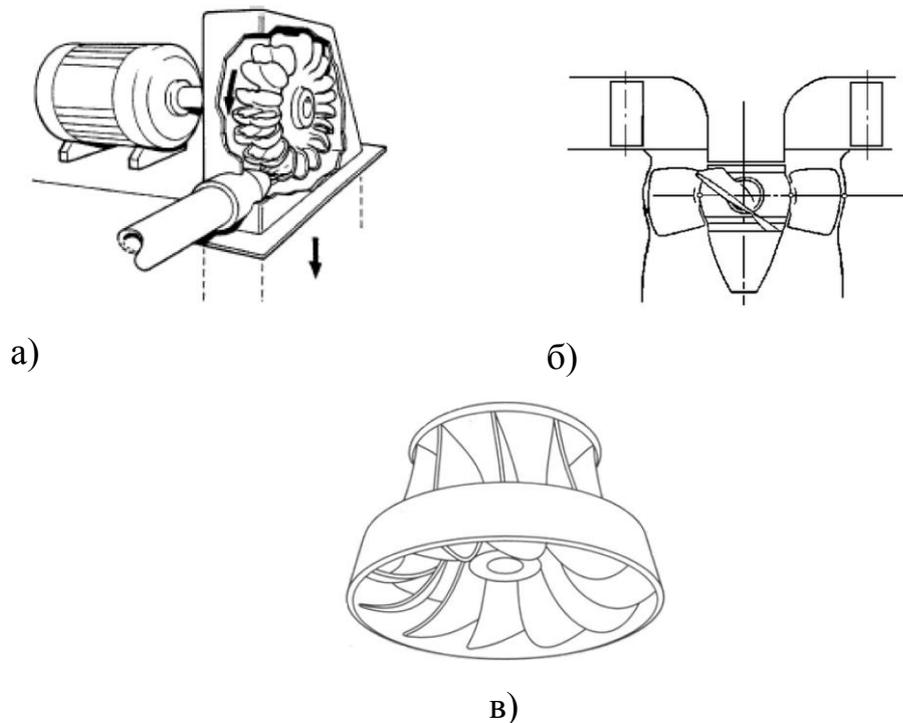


Рисунок 1.8 – Гидротурбины:

а – ковшевая, б – пропеллерная, в – радиально-осевая

Сохраняя энергию по мере возможности в потенциальной форме до самого момента ее преобразования в механическую энергию, турбины этого типа имеют высокую интенсивность использования энергии потока и весьма высокий КПД.

В настоящее время реактивные гидротурбины являются самым распространенным типом турбин, охватывающим область напоров от 1,5-2 до 350 м [11].

Каждый тип гидротурбин соответствует определенному диапазону напора и расхода воды и имеет свою преимущественную область применения.

Путем возведения гидротехнических сооружений возможно создавать самые разнообразные напоры от минимального до максимального значения, которое ограничивает рельеф местности вблизи водотока.

Гидротурбины должны обладать способностью обеспечивать использование сконцентрированной энергии, без каких либо ограничений по напору в указанной области его изменения и с высоким КПД эти требования удовлетворяются следующими системами гидротурбин, характеризуемые в основном конструкцией рабочего колеса:

- пропеллерными и поворотными-лопастными – при напорах от 1,5 до 40 м и выше;
- радиально-осевыми – при напорах от 20 до 350 м;
- ковшевыми – при напорах от 200 до 1500 м и выше.

Данные турбины выполняются как с горизонтальным, так и с вертикальным расположением вала.

Рассмотрим принципиальные формы универсальных характеристик различных систем турбин и типов их рабочих колес.

а. Ковшевые турбины. На рисунке 1.9 изображена универсальная характеристика ковшевой гидротурбины, для которой характерно то, что кривые постоянных КПД имеют форму эллипсов с большой полуосью вдоль оси Q , и с изменением приведенных оборотов n' значения КПД сильно уменьшаются. На рисунке 1.14 показаны основные габариты ковшевой гидротурбины.

Рабочая характеристика ковшевой турбины имеет пологую форму. Кривые постоянных открытий на универсальной характеристике изображаются в виде вертикальных прямых. Объясняется это тем, что расход воды не зависит от

оборотов турбины, а зависит только от открытия сопла и от напора, под которым происходит истечение.

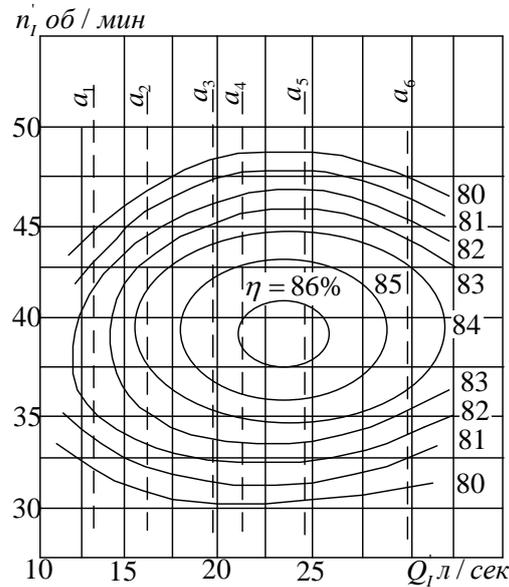


Рисунок 1.9 – Универсальная характеристика ковшевой гидротурбины

б. Радиально-осевые гидротурбины с низким коэффициентом быстроходности
 $n_s = 45 \div 150$. Турбины одной и той же системы имеют разные типы рабочих колес. Каждая система турбин имеет тихоходные, нормальные и быстроходные колеса. На рисунке 1.10, изображена универсальная характеристика радиально-осевой гидротурбины с низким коэффициентом быстроходности, а на рисунке 1.14.б показаны основные габариты. Такие колеса имеют малые отношения b_0/D_1 . Входные кромки лопастей колеса находятся вблизи выходных концов лопаток направляющего аппарата и имеют почти вертикальное расположение, а длина лопастей по линии тока относительно велика. Число лопастей рабочего колеса тоже велико – от 17 до 21. Касательные к кривым постоянных открытий образуют с прямой, параллельной оси Q , тупой угол.

Расход воды зависит, как от частоты вращения гидротурбины, так и от открытия НА.

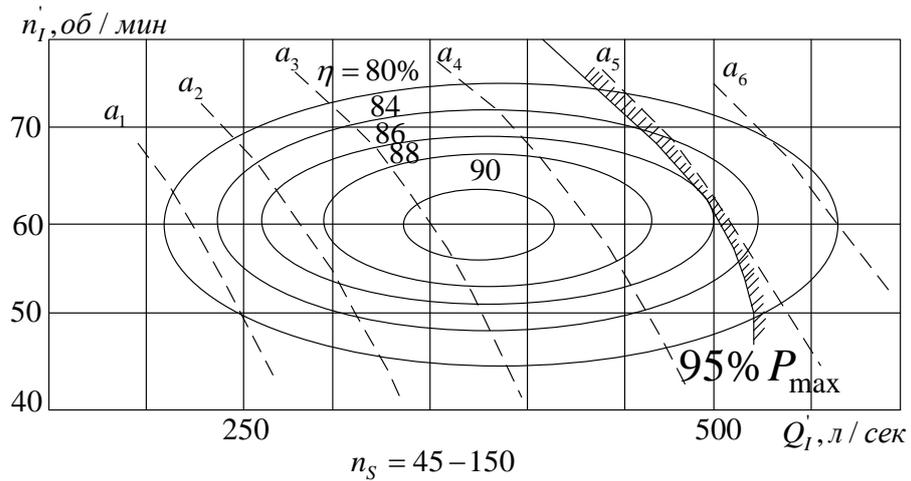


Рисунок 1.10 – Характеристики радиально-осевой гидротурбины с низким коэффициентом быстроходности

в. Радиально-осевая гидротурбина со средним коэффициентом быстроходности
 $n_s = 145 \div 260$. На рисунке 1.11 изображена универсальная характеристика радиально-осевой гидротурбины со средним коэффициентом быстроходности, а на рисунке 1.14.в показаны её основные габариты.

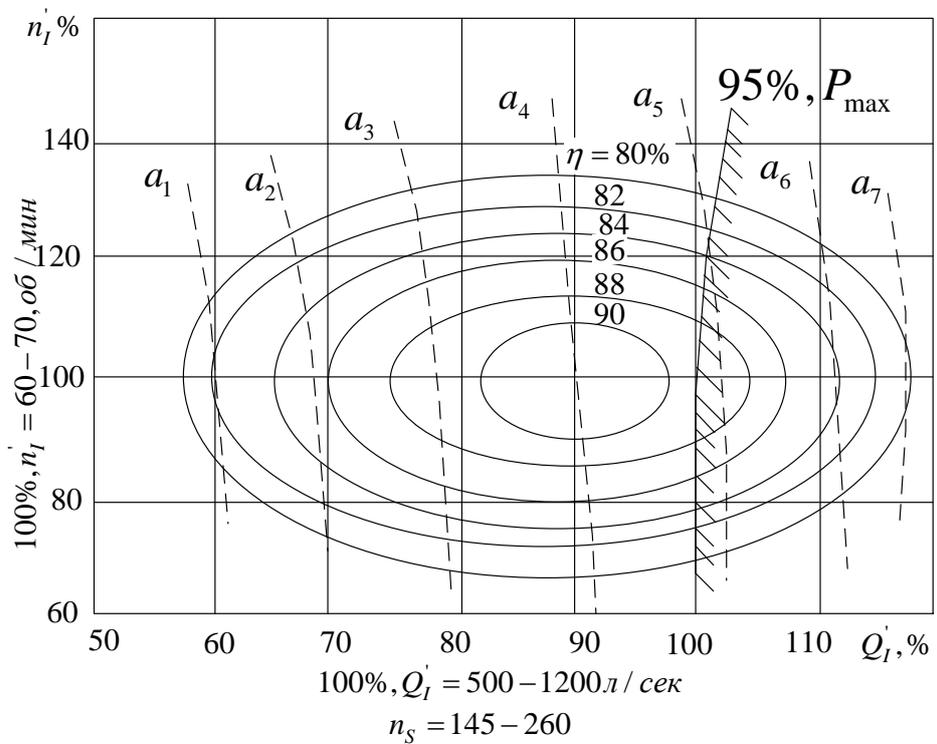


Рисунок 1.11 – Характеристики радиально-осевой гидротурбины со средним коэффициентом быстроходности

Колеса нормальных радиально-осевых турбин имеют более высокое значение b_0/D_1 по сравнению с колесами тихоходных турбин. Входная кромка лопастей рабочего колеса располагается почти вертикально. Кривые постоянных открытий приближаются к вертикальным прямым.

г. Радиально-осевые гидротурбины с высоким коэффициентом быстроходности $n_s = 260 \div 400$. На рисунке 1.12 изображена универсальная характеристика радиально-осевой гидротурбины с высоким коэффициентом быстроходности, а на рисунке 1.14.г показаны её основные габариты.

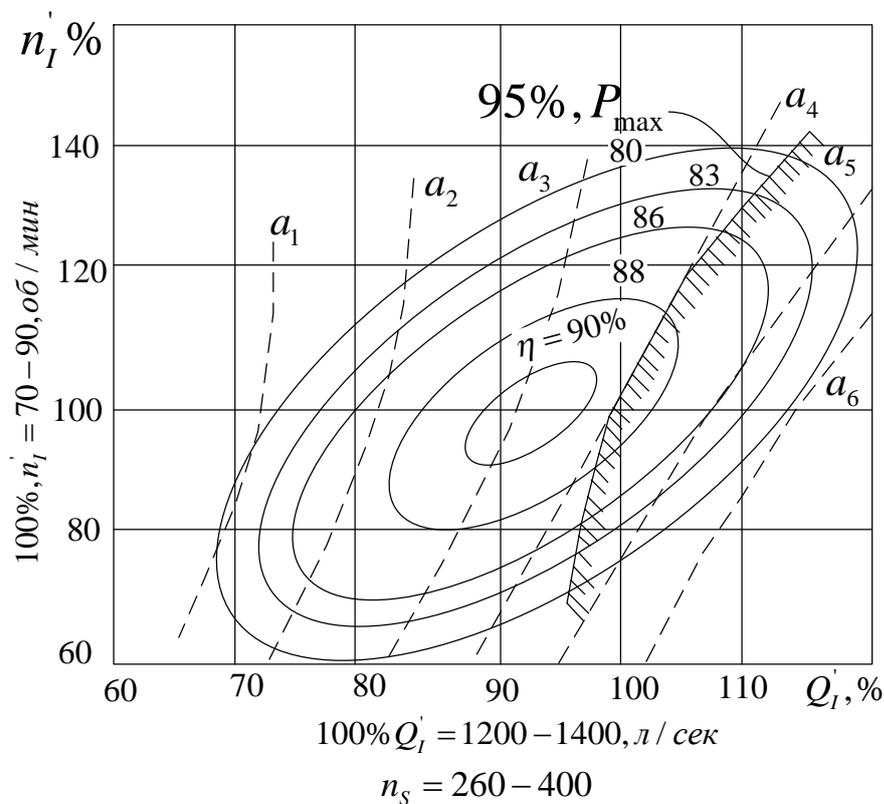


Рисунок 1.12 – Характеристики радиально-осевой гидротурбины с высоким коэффициентом быстроходности

Входная кромка лопастей колеса значительно удалена от выходных концов лопаток направляющего аппарата и резко наклонена к оси вала. Длина лопастей по линии тока относительно невелика, а число лопастей рабочего колеса составляет 8-16 шт.

Универсальные характеристики радиально-осевой гидротурбины с высоким коэффициентом быстроходности сжаты вдоль оси Q , и вытянуты вдоль оси n . Главным недостатком таких характеристик является резкое изменение КПД с изменением мощности турбины, причем кривая пятипроцентного запаса мощности близко подходит к оптимальному значению КПД. Быстроходные радиально-осевые гидротурбины целесообразно устанавливать на тех станциях, для которых по условиям эксплуатации не требуется изменять нагрузки в широком диапазоне. Вытянутость вдоль оси n кривых $\eta = const$ позволяет сохранять высокие значения КПД в большем диапазоне за счет изменения напора.

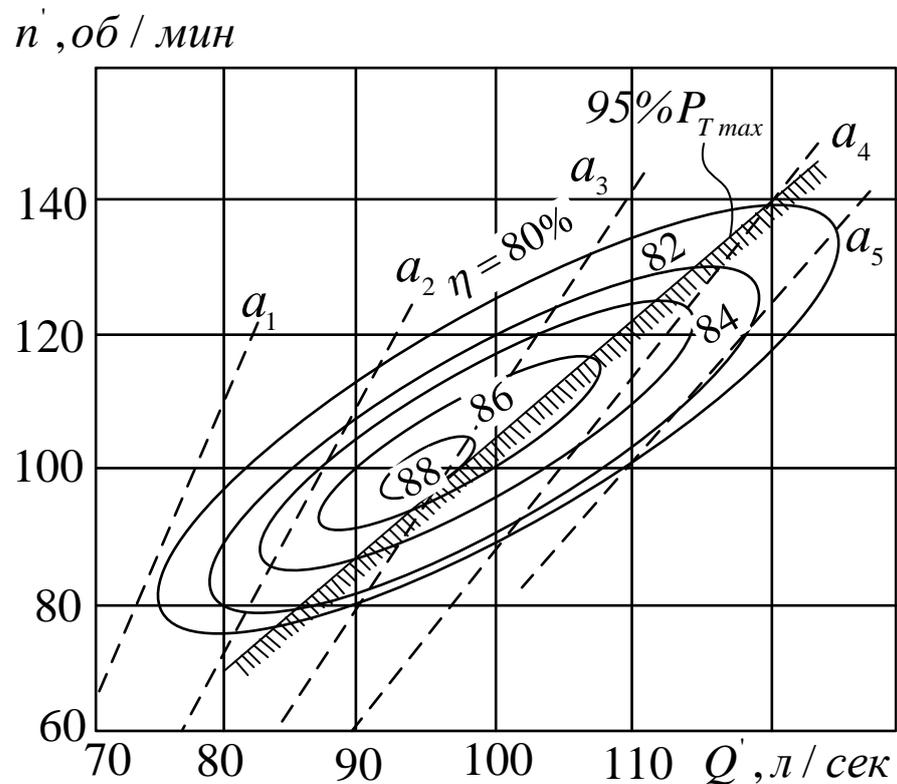


Рисунок 1.13 – Пропеллерная гидротурбина.

д. Пропеллерные гидротурбины. На рисунке 1.13 изображена универсальная характеристика пропеллерной гидротурбины, а на рисунке 1.14.д изображена форма её проточной части. Пропеллерным турбинам присущи все недостатки радиально-осевых гидротурбин с высоким коэффициентом быстроходности, но только в более резкой форме. Значительное изменение КПД получается уже при

малых изменениях мощности, а кривая пятипроцентного запаса мощности проходит вблизи оптимальных значений КПД. Однако положительным эффектом является небольшое изменение КПД в широком диапазоне напоров.

Пропеллерные гидротурбины рационально устанавливать на станциях с большим количеством агрегатов, так как в этих условиях можно будет вести эксплуатацию турбины с малыми изменениями мощности, а значительные изменения мощности всей ГЭС обеспечивать путем включения и выключения одного или нескольких агрегатов.

На рисунке 1.15 изображена группа рабочих характеристик гидротурбин различных типов и быстроходностей. Ковшевые и поворотлопастные гидротурбины имеют наиболее пологую форму характеристики с относительно малым изменением КПД при колебаниях нагрузки в пределах от 25-30 до 10%. Радиально-осевые турбины обнаруживают тем большее падение КПД при частичных нагрузках, чем больше их коэффициент быстроходности

Рабочие характеристики с увеличением коэффициентом быстроходности приближаются к характеристикам пропеллерных гидротурбин. По этой причине работа радиально-осевых с высоким коэффициентом быстроходности и пропеллерных гидротурбин при частичных нагрузках является в большинстве случаев не экономичной.

Изменение расхода при изменении частоты вращения ГА, иными словами, наклон линий равного открытия на расходных характеристиках, у РО гидротурбин зависит от формы проточной части, т.е. от типа колеса. Влияние типа колеса на положение линий равного открытия можно проследить, сопоставляя универсальные характеристики колес различных типов.

Для радиально-осевых гидротурбин с низким и средним коэффициентом быстроходности характерно уменьшение пропускной способности при увеличении частоты вращения. Это объясняется тем, что их рабочие колеса имеют значительные участки лопастей с радиальным направлением межрадиального потока. При повышении частоты вращения, благодаря

центробежному эффекту создается противодействие, препятствующее поступлению воды через направляющий аппарат в рабочее колесо. У низконапорных и некоторых средненапорных РО гидротурбин, напротив, большая часть лопастей работает в режиме с осевым направлением межрадиального потока. Поэтому при повышении частоты вращения за счет увеличения осевых составляющих скоростей у РО гидротурбин намечается тенденция к некоторому росту пропускной способности при неизменном открытии НА.

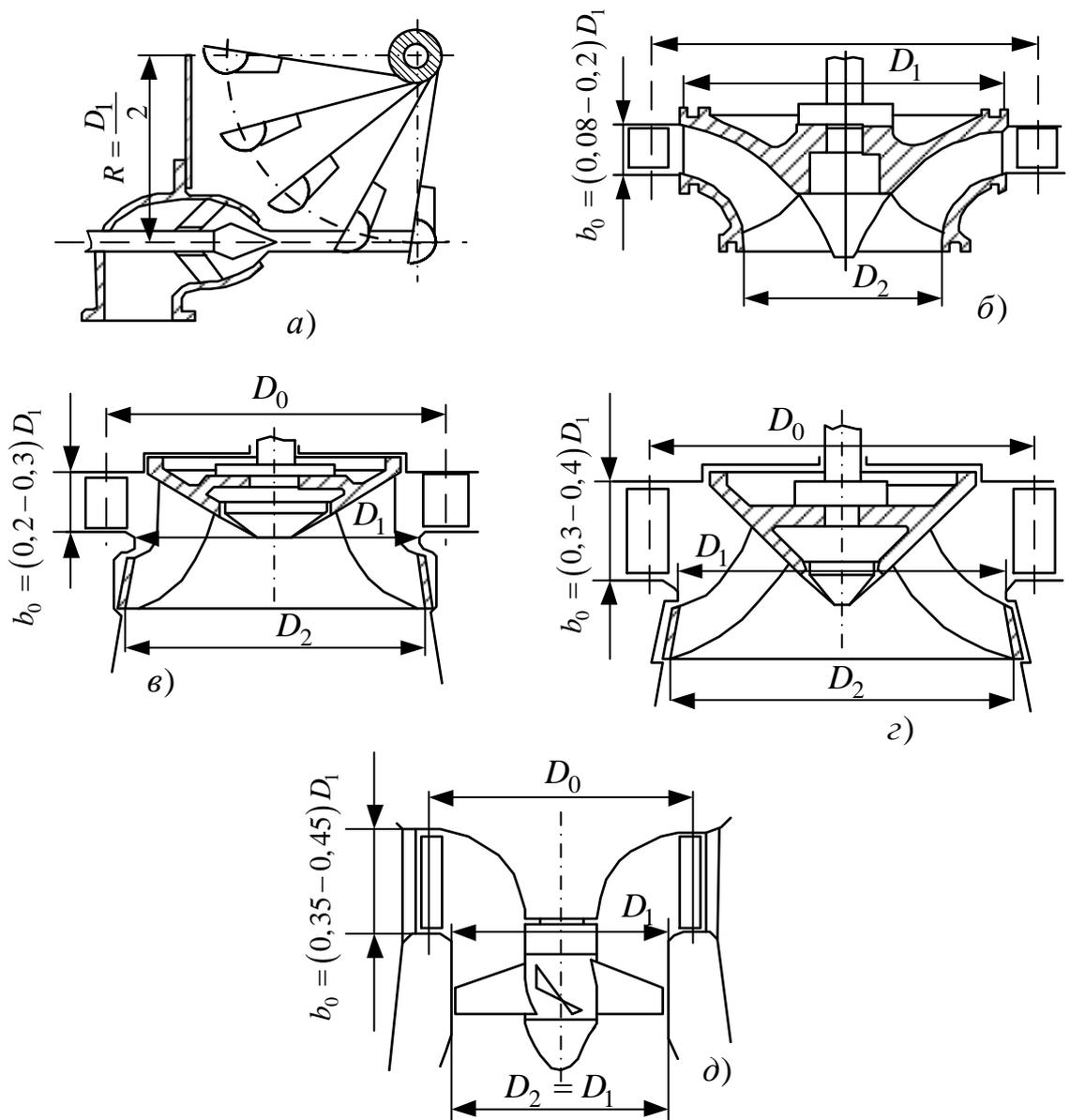


Рисунок 1.14 – Типы гидротурбин

На основании обзора технических свойств гидротурбин и условий их эксплуатации, сделан следующий вывод по выбору типа гидротурбин.

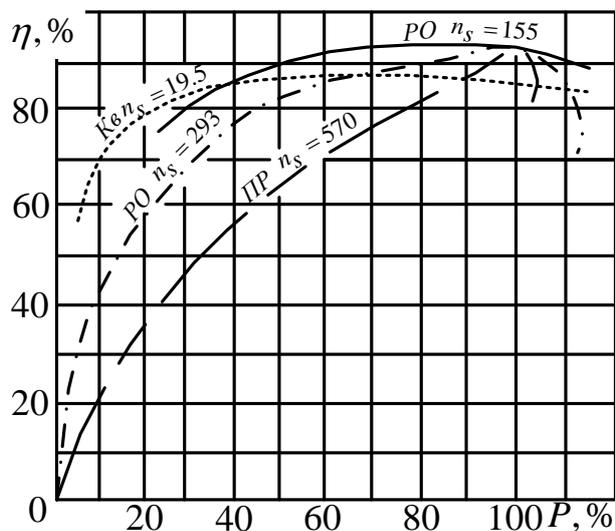


Рисунок 1.15 – Рабочие характеристики гидротурбин различных систем и быстроходностей

В связи с тем, что основной сток воды (рисунок 1.2) в республике приходится на период с мая по сентябрь и составляет 76,0 % от годового стока, а на остальные месяцы приходится минимальный сток при одновременном увеличении потребности в электроэнергии (рисунок 1.1). А при проектировании мини-ГЭС берут зимний сток воды, что существенно занижает установленную мощность мини-ГЭС, и не позволяет ей участвовать в суточном регулировании.

Для кратковременно увеличения выработки активной мощности мини-ГЭС и участия ее в суточном регулировании необходимо:

- строить водохранилища суточного регулирования, что позволит повысить участие мини-ГЭС в покрытии максимума нагрузки энергосистемы, снизить потребность в мощности других электростанций и улучшить режим их работы;

- выбрать из рассмотренных выше гидротурбин радиально-осевую гидротурбину с низким коэффициентом быстроходности, что позволит при снижении величины генерируемой активной мощности $P_{\text{э}}$ уменьшать расход воды путем увеличения частоты вращения ГА.

Из рисунка 1.5 видно, что при использовании гидротурбин с низким коэффициентом быстроходности, гидротурбина имеет наивысший КПД на основной угловой скорости вала ГА, $\bar{\omega} = 1$. Рассмотрим главную универсальную характеристику (рисунок 1.5) по линии $a = 1$ которая соответствует номинальному углу открытия НА ГА. Возрастание угловой скорости вала ГА до $\bar{\omega} = 1,4$ приводит к уменьшению расхода воды через гидротурбину (q) примерно до значения $q = 0,6$ и к уменьшению мощности, развиваемой гидротурбиной (P_T) – в 2,4 раза. При уменьшении угловой скорости вала ГА от номинальной вниз до $\bar{\omega} = 0,7$ расход воды увеличивается до значения $q = 1,25$, а P_T возрастает всего лишь на 16 процентов, вследствие снижения КПД гидротурбины. Дальнейшее уменьшение скорости не имеет смысла, поскольку не приводит к увеличению мощности гидротурбины. При других углах открытия НА ситуация аналогична.

Таким образом, для гидроагрегатов на основе РО гидротурбин с низким коэффициентом быстроходности требуемый диапазон изменения частоты вращения составит примерно 1:2. При таком диапазоне угловых скоростей ГА имеется возможность изменять P_T в диапазоне 1:2,4 без воздействия на НА гидротурбины. При этом имеется возможность в часы минимума электрической нагрузки уменьшать q примерно в 2 раза для запасаания воды в водохранилище.

При неизменном притоке воды в водохранилище бóльшим значениям ω соответствуют меньшее значение мощности P_{Σ} и запасаание воды; меньшим – бóльшее значение P_{Σ} и понижение уровня воды в водохранилище. Такая мини-ГЭС может автоматически оперативно изменять выработку электроэнергии, поддерживая баланс между генерируемой и потребляемой активными мощностями, и использовать аккумулирующую способность водохранилища для покрытия пиков графика электрической нагрузки.

Цель регулирования частоты вращения ГА в основном режиме – поддержание максимального значения напора мини-ГЭС, но без холостого водосброса.

Управляющее воздействие на ГА в таких мини-ГЭС – электромагнитный момент генератора ($M_{\mathcal{E}}$).

1.5 Статические характеристики радиально-осевой гидротурбины

Из теории электропривода известно, что синхронная машина имеет абсолютно жёсткую механическую характеристику. Данная механическая характеристика не позволяет ГА изменять частоту вращения.

При неизменной угловой скорости вала ГА, в любой отрезок времени сохраняется равенство между моментами $M_{\mathcal{E}}$ и M_T . Во время работы гидроагрегата величину M_T можно изменять в широких пределах. Момент гидротурбины изменяется за счет изменения расхода воды на ГА мини-ГЭС.

Момент, развиваемый гидротурбиной, зависит от расхода воды Q , угловой скорости вращения ротора, действующего напора H и определяется по формуле

$$M_T = 9,81 \frac{QH}{\omega} \eta_T. \quad (1.15)$$

Из этого выражения видно, что при $\omega = const$ момент гидротурбины можно изменять путем изменения расхода воды Q или напора H . В реальных условиях практически невозможно автоматически изменить действующий напор, поэтому момент турбины регулируют изменением расхода воды. Расход воды Q является так называемым параметром регулирования, с помощью которого регулируемая величина (генерируемая активная мощность) поддерживается в заданных пределах. Изменение расхода воды осуществляется регулирующими органами, которые соответствуют типу гидротурбины.

Для перестановки регулирующих органов в гидротурбинах применяются исключительно гидравлические сервомоторы, позволяющие создать необходимые усилия.

Поддержание активной мощности гидроагрегата в заданных пределах при различных нагрузках генератора осуществляется автоматическим регулятором скорости, который, изменяя положение направляющего аппарата,

соответствующим образом изменяет расход воды через гидротурбину. Данный способ управления активной мощностью не подходит для мини-ГЭС из-за усложнения механической части гидротурбины и отсутствия дежурного персонала.

Автором предлагается регулировать активную мощность $P_{\mathcal{E}}$ МДП-генератора путем изменения числа оборотов ГА. Напряжение статора МДП и частота f_c электрического тока в цепи статора поддерживается энергосистемой бесконечной мощности.

Путем изменения частоты вращения ГА надо обеспечить регулирование активной мощности $P_{\mathcal{E}}$ МДП в соответствии с заданием из ОДУ. Равенство

между $M_{\mathcal{E}} = M_T$ обеспечивается при $\frac{d\omega}{dt} = 0$. В динамических режимах работы

$\frac{d\omega}{dt} \neq 0$. Момент M_T гидротурбины и электромагнитный момент $M_{\mathcal{E}}$ МДП в

динамических режимах изменяются. Момент $M_{\mathcal{E}}$ изменяется за счет изменения задания управления, а момент M_T гидротурбины изменяется за счет эффекта саморегулирования, при изменении расхода воды.

Задача автоматического управления ГА мини-ГЭС сводится к тому, чтобы при изменениях сигнала управления быстро отработать сигнал задания по активной мощности МДП. При этом угловую скорость ГА предполагается изменять в диапазоне 1:2.

Мощность, развиваемая гидротурбиной при открытии направляющего аппарата (НА) $a = const$, зависит от расхода Q , действующего напора H и электромагнитного момента $M_{\mathcal{E}}$ МДП и определяется формулой (1.14.) и (1.8.).

Если принять, что в установившихся режимах $M_T = M_{\mathcal{E}}$, то формулу (1.15.) можно записать в таком виде

$$\omega = 9,81 \frac{QH}{M_{\mathcal{E}}} \eta_T. \quad (1.16)$$

Из этого выражения видно, что при $a = const$ угловая скорость ω ГА и расход гидротурбины можно изменять путем изменения электромагнитного момента $M_{\text{Э}}$ МДП. С помощью электромагнитного момента $M_{\text{Э}}$ МДП, регулируемая величина (активная мощность $P_{\text{Э}}$ мини-ГЭС) поддерживается в заданных пределах. Как известно из практики, в мини-ГЭС практически не встречаются системы автоматического регулирования активной мощности с помощью регулирования расхода воды при зафиксированном открытии НА $a = a_{\text{ном}}$.

Согласно формуле (1.15), момент гидротурбины является функцией расхода, скорости вращения напора воды и коэффициента полезного действия, т.е. $M_T = f(Q, \omega, H, \eta_T)$, если учесть, что расход через гидротурбину определяется открытием регулирующего органа a , то $M_T = f(a, \omega, H, \eta_T)$. Эта зависимость называется статической характеристикой гидротурбины. Ее часто называют также моментной характеристикой. Однако представить такую зависимость на одном графике не представляется возможным, поэтому обычно ограничиваются функцией вида $M_T = f(a, \omega, \eta_T)$, построенной для определенного напора H_H . Для других значений напора эта зависимость перестраивается с помощью известных формул пересчета.

Статическая характеристика гидротурбины $M_T = f(a, \omega, \eta_T)$ может быть построена по данным универсальной характеристики модели гидротурбины, на которой в координатах n_1' и Q_1' , приведенных к 1 м напора и 1 м диаметра рабочего колеса, построены кривые постоянных открытий регулирующего органа a_M и кривые постоянных значений коэффициента полезного действия η_M модели гидротурбины.

Наиболее широкое применение нашли статические характеристики (СХ), построенные на основе [67]:

- в осях относительных безразмерных параметров: m - момента, $\bar{\omega}$ - частоты вращения, \bar{h} - напора, q - пропускной способности;

- в осях приведённых параметров M'_I, n'_I, Q'_I (рисунок 1.16).

Относительные безразмерные параметры определяются соотношениями

$$m = \frac{M}{M_H}, \quad (1.17a)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_H}, \quad (1.17б)$$

$$\bar{h} = \frac{H}{H_H}, \quad (1.17в)$$

$$q = \frac{Q}{Q_H}, \quad (1.17г)$$

где M, M_H - момент турбины и его номинальное значение, Q, Q_H - расход воды через турбину и его номинальное значение, H, H_H - напор на турбине и его номинальное значение, ω_H - номинальная угловая скорость вращения.

Соотношениями для расчета приведённых параметров,

$$M'_I = \frac{M}{HD_1^3}, \quad (1.18 a)$$

$$n'_I = \frac{nD_1}{\sqrt{H}}, \quad (1.18 б)$$

$$Q'_I = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}}. \quad (1.18 в)$$

Статические характеристики (СХ) являются полными в том смысле, что охватывают все режимы, которые могут иметь место при эксплуатации гидроагрегата. По СХ можно наглядно проследить, а также просчитать (с учетом влияния неустановившегося движения жидкости) изменение приведенного расхода, момента и частоты вращения от момента сброса нагрузки с агрегата до его полной остановки.

Для обычных гидротурбин существует три режима: турбинный, разгонный и режим гидравлического торможения. При построении СХ турбин используется иное правило знаков - за положительные принимаются турбинные параметры: по направлению движения жидкости, по направлению вращения вала и знаку момента.

На форму характеристики большое влияние оказывает тип гидротурбины. На рисунке 1.16, показана СХ радиально-осевой гидротурбины.

Прежде всего, стоит отметить различия в характере линий постоянных открытий НА: у РО гидротурбин с низким коэффициентом быстроходности с повышением частоты вращения расход воды уменьшается, что объясняется эффектом «гидравлического запираия канала», а у осевых турбин, наоборот, повышение частоты вращения сопровождается ростом расхода, обусловленным «насосным эффектом».

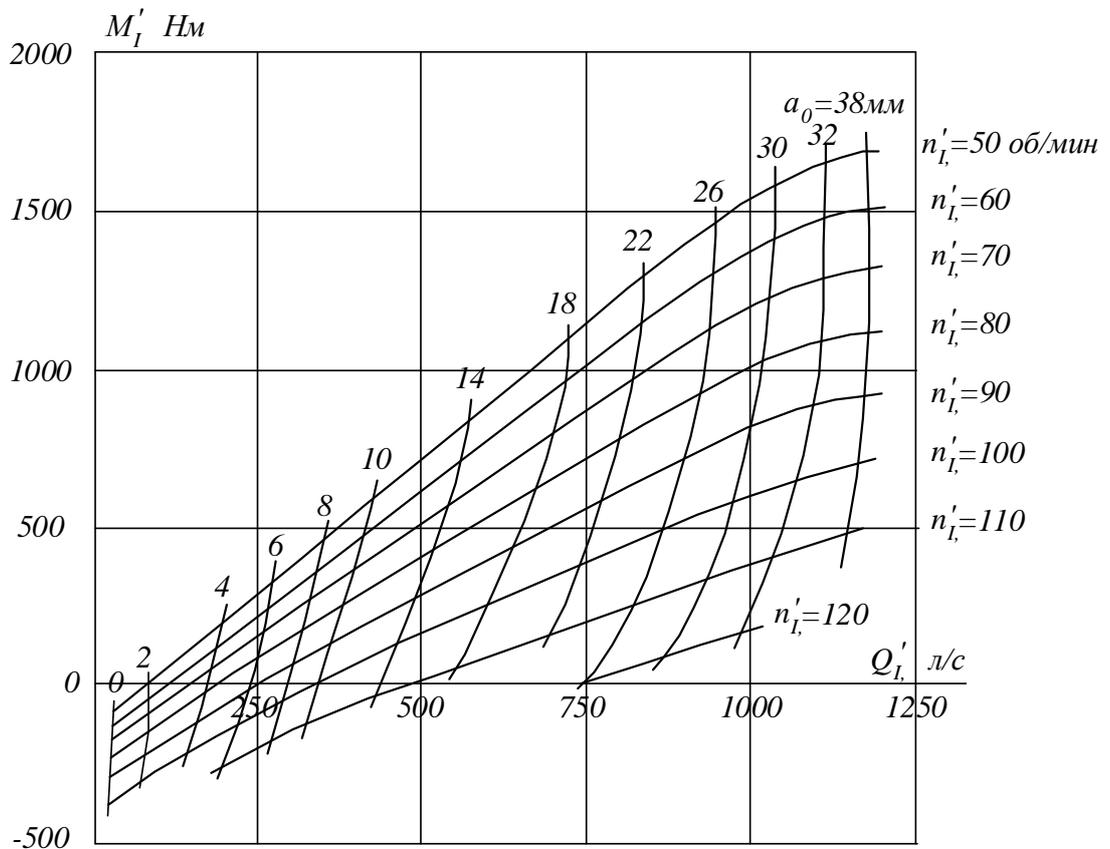


Рисунок 1.16 – Полная статическая моментно-расходная характеристика РО гидротурбины

Построение статических характеристик гидротурбины проектируемого ГА ведется следующим образом. Пусть требуется построить характеристику для величины открытия НА, соответствующего a_M в модели. Вначале необходимо определить открытие a НА проектируемого ГА, которое соответствует открытию a_M (a_M - определяется из универсальной характеристики физической модели гидротурбины), по формуле

$$a = a_M \frac{D z}{D_M z_M}, \quad (1.19)$$

где D_M - диаметр рабочего колеса модели; z и z_M - число лопаток направляющего аппарата соответственно гидротурбины и модели; a_M - открытие НА модели.

Вид универсальной характеристики модели радиально-осевой гидротурбины показан на рисунке 1.17.

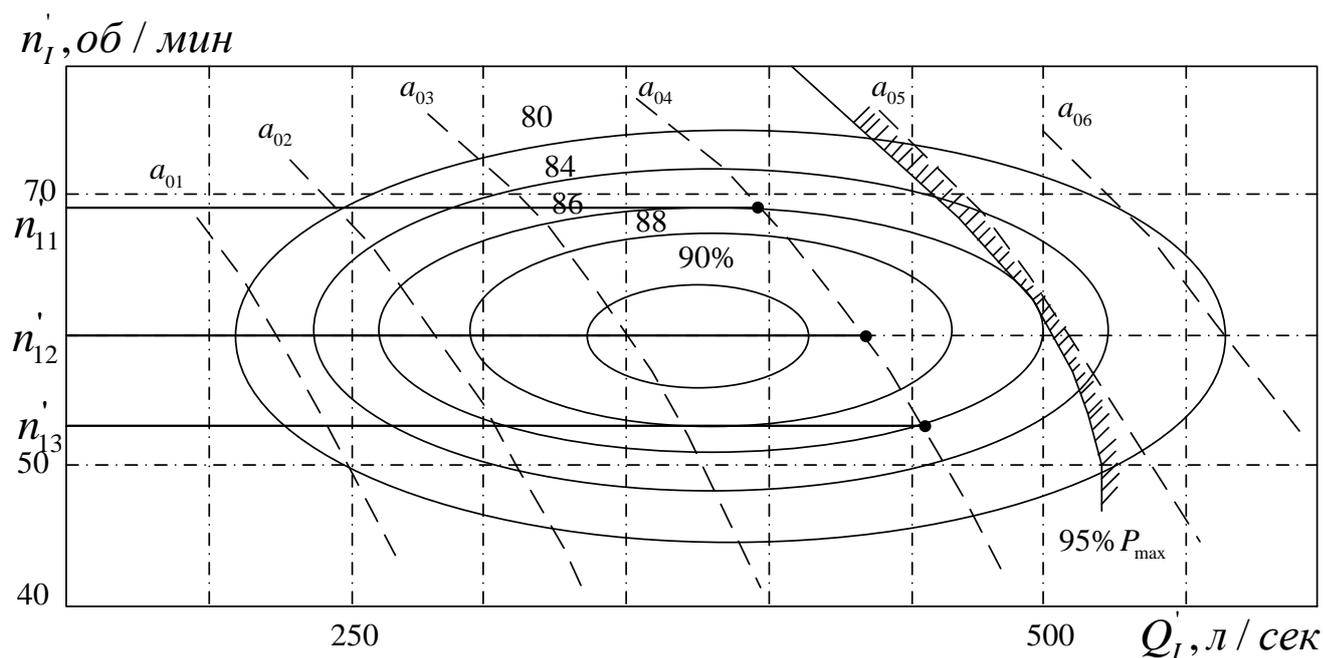


Рисунок 1.17 – Вид универсальной характеристики радиально-осевой гидротурбины

Затем проводится ряд линий постоянных значений приведенной скорости n_{11}, n_{12}, n_{13} и т.д. и по выражению (1.18.б) для каждого значения n_1 определяется

скорость вращения реальной гидротурбины. В точках пересечения этих линий с кривой $a_M = const$ определяются значения приведенного расхода Q_1' и КПД модели η_T . Далее, для каждого из рассматриваемых значений n_1' подсчитывается момент гидротурбины по формуле [16]

$$M_T = \frac{30}{\pi} \gamma D_1^3 H \frac{Q_1'}{n_1'} \eta_T, \quad (1.20)$$

где γ – в $H / м^3$; Q_1' – в $м^{1/2} / с$; n_1' – в $м^{1/2} \cdot об / мин$.

КПД гидротурбины в выражении (1.20) в первом приближении можно принять равным КПД модели η_M . Однако для более точного определения момента гидротурбины целесообразно пользоваться эмпирической зависимостью,

$$\eta_T = 1 - (1 - \eta_M) \sqrt[5]{\frac{D_M}{D_1}}. \quad (1.21)$$

Точно таким же путем строятся статические характеристики и для других открытых регулирующих органов.

Рассмотрим примерный вид статических характеристик радиально-осевой гидротурбины (рисунок 1.18) при различных открытиях направляющего аппарата a_1, a_2, a_3 .

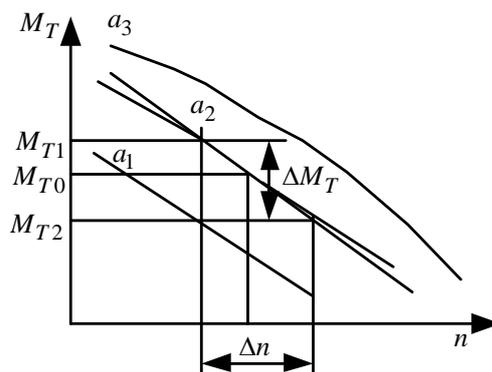


Рисунок 1.18 – Статические характеристики гидротурбины

Из графиков видно, что с увеличением скорости вращения турбины ее момент уменьшается. Этим свойством обладают все без исключения типы

гидротурбин, и оно называется эффектом саморегулирования. Количественно эффект саморегулирования характеризуется коэффициентом саморегулирования турбины e_T , который для заданного режима определяется наклоном касательной, проведенной к кривой постоянного открытия в рассматриваемой точке. Обычно коэффициент e_T выражается через относительные величины и определяется по соотношению

$$e_T = \frac{dM_T}{dn} \frac{n_H}{M_{TH}}, \quad (1.22)$$

где M_{TH} и n_{TH} – номинальные (расчетные) значения соответственно момента и скорости вращения турбины.

Согласно рисунку 1.18, производная dM_T / dn всегда имеет знак минус, т. е. коэффициент саморегулирования является величиной отрицательной. Следует отметить, что обычно в технической литературе по регулированию гидротурбин коэффициентом саморегулирования называют величину (1.22), взятую с обратным знаком. Данное выше определение коэффициента саморегулирования принято в соответствии с Международным кодом по испытаниям систем регулирования гидротурбин [68].

На основании сделанного обзора мирового состояния развития мини-ГЭС автором предлагается функциональная схема управления мини-ГЭС, приведенная на рисунке 1.19.

Данная схема отличается от стандартных схем автоматического регулирования активной мощности ГЭС с одним ГА, тем, что регулирование активной мощности на ГЭС осуществляется за счет изменения частоты вращения ГА. В предлагаемой автором системе регулирования активной мощности, НА гидротурбины не требует наличия маслонапорной установки (МНУ). Регулирование положения НА производится вручную, настраивается на номинальный режим работы, а регулирование вырабатываемой активной мощности осуществляется со стороны генератора за счет изменения

электромагнитного момента M_{Ω} генератора (частоты вращения ГА). Мини-ГЭС на основе МДП работает параллельно ЭЭС. Регулирование в предлагаемой системе осуществляется за счет увеличения или уменьшения электромагнитного момента, что позволяет аккумулировать воду, и позволяет ее использовать в пики нагрузки при наличии водохранилища.

Управление оборудованием гидроагрегата обеспечивает цифровое устройство обработки информации (ЦУОИ) (рисунок 1.19), которое принимает все необходимые сигналы от датчиков, являющихся источниками информации в САУ и по заданному алгоритму осуществляет управление.

Исполнительным устройством, регулирующим выработку электроэнергии в соответствии с заданием мощности, является МДП-генератор. Увеличение электромагнитного момента генератора, приводит к уменьшению частоты вращения гидротурбины, результате чего расход воды увеличивается.

Крутящий момент на валу гидротурбины передается посредством механического соединения на ротор генератора электроэнергии. Это приводит к вращению генератора с определенной частотой и выработке электроэнергии. Полученная электроэнергия поступает в коммутационный шкаф (ШК), выполняющего функцию силового выключателя и передается в ЭЭС.

Предлагаемая гидроэнергетическая установка использует свойство гидротурбины уменьшать расход воды и мощность при увеличении скорости вращения для запасания воды в водохранилище во время снижения потребления электроэнергии потребителями. Запасенная вода используется гидроэнергетической установкой при дефиците мощности в энергосистеме.

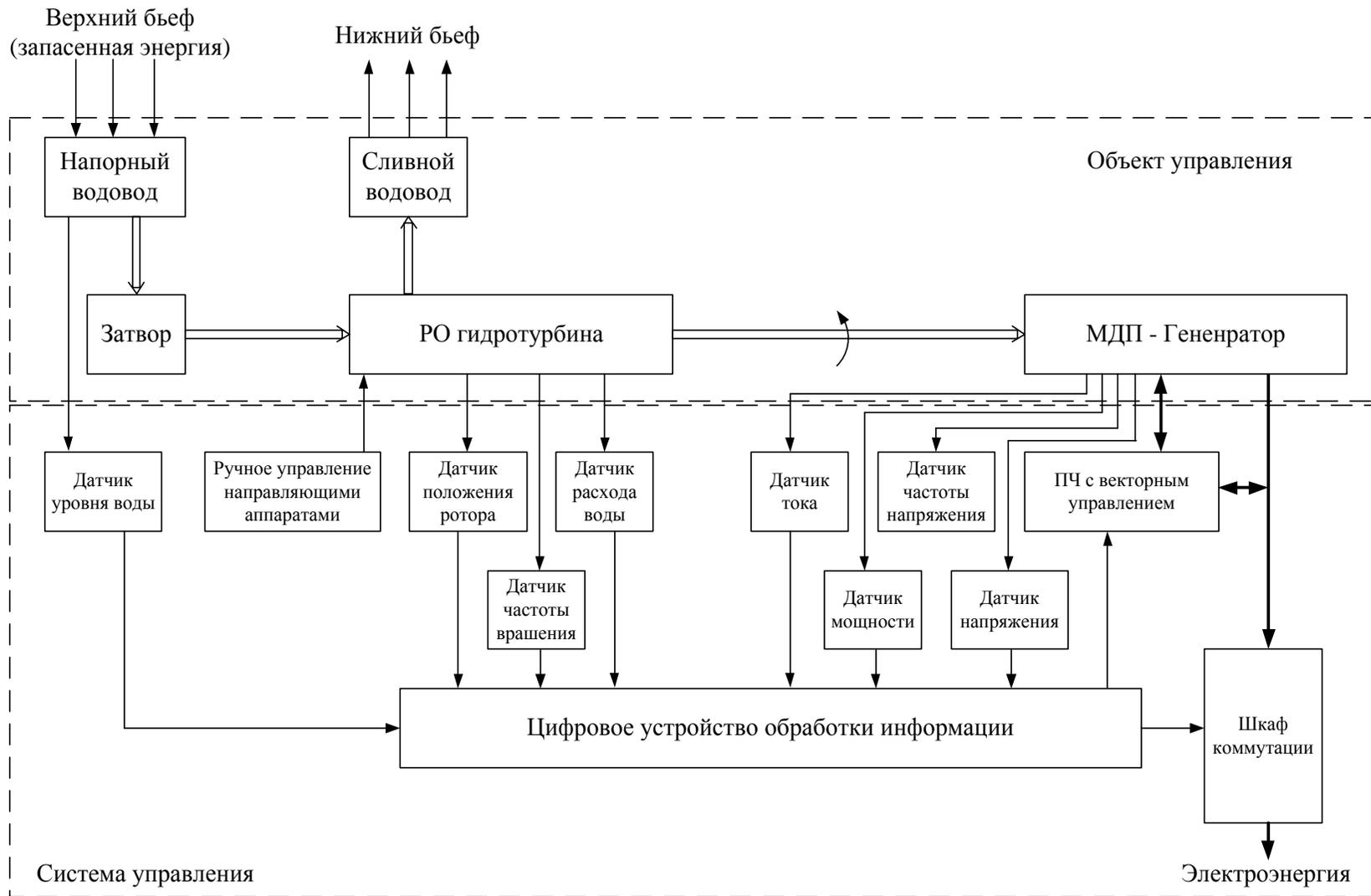


Рисунок 1.19 – Функциональная схема ГА мини-ГЭС

1.6 Выводы

1. Обоснована необходимость суточного регулирования уровня воды в водохранилище мини-ГЭС для покрытия максимума нагрузки электроэнергетической системы. Такое регулирование позволит снизить выработку активной мощности других электростанций в часы максимума электрической нагрузки и улучшить режим их работы.

2. Обоснована целесообразность регулирования активной мощности ГА мини-ГЭС на основе МДП путём изменения частоты вращения вала ГА.

3. Обосновано математическое описание асинхронной машины двойного питания с ПЧ в цепи ротора как объекта управления. Для дальнейших исследований принята безынерционная модель системы векторного управления электромагнитным моментом МДП с источником тока в цепи ротора.

4. Для целей регулирования активной мощности изменением числа оборотов наиболее подходит радиально-осевая гидротурбина с низким коэффициентом быстроходности.

5. Регулирование угловой скорости МДП-генератора в составе ГА потребует производить в диапазоне не шире, чем 1:2, вследствие нарастающего снижения КПД гидротурбины при отклонении её частоты вращения от основной.

6. Постоянная времени СВУ МДП по электромагнитному моменту, а соответственно и по активной мощности, для современных СВУ электрическими машинами переменного тока большой мощности составляет от 0,005 до 0,02 сек.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОТУРБИНЫ С НАПОРНЫМ ВОДОВОДОМ

2.1 Динамические характеристики радиально-осевой гидротурбины с напорным водоводом

В процессе работы мини-ГЭС изменение внепланового задания активной мощности сопровождается гидромеханическим переходным процессом, который вызван изменением электромагнитного момента M_{\ominus} МДП и изменением расхода гидротурбины.

Для изначальной оценки гидромеханических переходных процессов, возникающих в нормальных эксплуатационных режимах, необходимо предварительно рассматривать алгебраические и дифференциальные уравнения, которые характеризуют режим работы мини-ГЭС.

Особое внимание необходимо уделять гидромеханическим переходным процессам, так как они определяют повышенные динамические нагрузки, возникающие в водоводах и проточном тракте гидравлических машин, и проявляются в форме гидравлического удара.

При переходных процессах после сброса нагрузки гидротурбина проходит чрезвычайно широкую область режимов. Поэтому для расчетов и прогнозирования этих процессов также необходимы экспериментальные полные статические характеристики турбины, охватывающие все возможные режимы работы.

При проектировании мини-ГЭС расчеты переходных процессов выполняются для улучшения режимов регулирования, например с целью повышения надежности, и определения быстродействия изменения мощности гидроагрегата и выбора наилучших режимов регулирования. Иногда возникает возможность повысить номинальную мощность гидроагрегата.

Мини-ГЭС не только обеспечивают частичное покрытие графика нагрузки энергосистемы, но и выполняют функцию высокоманевренного резерва мощности. В связи с этим важным их эксплуатационным показателем является

быстродействие по изменению активной мощности. Поэтому переходные процессы изменения электромагнитного момента $M_{\mathcal{E}}$ МДП мини-ГЭС рассматриваются при постоянном открытии НА ($a = const$) гидротурбины. Естественно, что в этих условиях появляются наибольшие динамические воздействия, проявляющиеся в форме гидравлического удара.

При изменении активной мощности $P(t)$ изменяется расход воды, что вызывает гидравлический удар $\Delta H(t)$ в напорных водоводах и проточном тракте ГА, который приводит к временному падению напора турбины. Здесь важно отметить, что гидравлический удар всегда действует на мощность в направлении, противоположном воздействию изменения электромагнитного момента $M_{\mathcal{E}}$, что приводит к отставанию изменения мощности, т.е. к снижению быстродействия регулирования [8].

В исследованиях, связанных с малыми колебаниями частоты вращения гидротурбины, изменениями напора обычно пренебрегают, т.е. считают $H = const$. Однако при резких изменениях открытия направляющих аппаратов или изменение частоты вращения ГА, обусловленных, например, действием специальной автоматики, такое допущение является грубым, т.к. оно не учитывает значительного увеличения давления воды перед НА, обусловленного изменением кинетической энергии больших масс содержащихся в трубопроводе (явление, известное под названием гидроудара) [69,70]. Для иллюстрации влияния гидроудара на ход изменения частоты вращения на рисунке 2.1 приведена так называемая динамическая характеристика ГА.

Из этой характеристики видно, что возникновение гидроудара резко меняет не только скорость изменения момента, но и его характер (в начале процесса момент не уменьшается, а увеличивается).

Гидравлический удар (ударное давление) ΔH - представляет собой динамическое повышение или понижение давления, в напорном трубопроводе

вызываемое действием инерционных сил возникающих при неустановившихся режимах, когда $dQ/dt \neq 0$.

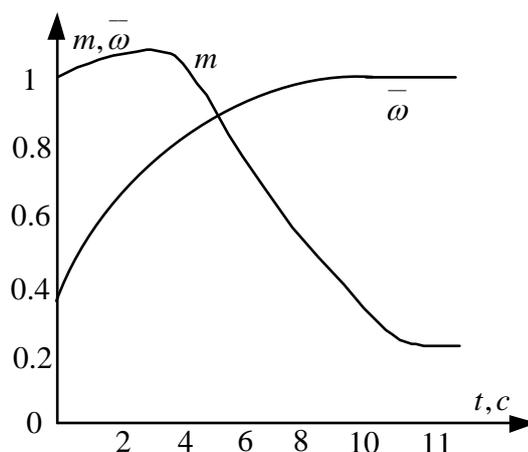


Рисунок 2.1 – Динамические характеристики гидроагрегата

При установившемся режиме давление в любом сечении напорного водовода определяется высотой пьезометрического уровня, в сечении С-С (рисунок 2.2), равна $(p/\rho g)^c$. В динамических режимах добавляется динамическая составляющая - гидравлический удар величиной ΔH^c и высота пьезометрического уровня становится равной $\left(\frac{p}{\rho g}\right)^c + \Delta H^c$.

Определим гидравлический удар, приняв допущения, что плотность жидкости и размер сечения водовода не зависят от давления («жесткие»). Используем теорему количества движения [8]

$$\frac{d(WV)_x}{dt} = \Sigma X, \quad (2.1)$$

где W, V - масса и скорость жидкости в водоводе; ΣX - сумма проекций на ось x внешних сил, действующих на данную массу жидкости в момент времени t . Рассмотрим массу жидкости в водоводе на участке, расположенном между водохранилищем и гидротурбиной (рисунок 2.2)

$$W = \rho SL,$$

где ρ - плотность жидкости, S - площадь сечения водовода, L - длина водовода между сечениями $A-A$ и $B-B$. Ось x совпадает с осью трубопровода и направлена от A к B .

Вместо высоты пьезометрического уровня используем выражение для потенциального напора [71]

$$H = \frac{P}{\rho g} + z, \quad (2.2)$$

которое удобно тем, что напор не зависит от продольного профиля трубопровода. Если не учитывать гидравлические потери. При этом действующее на массу W усилие вдоль оси x будет равно [8,67]

$$\sum X = \rho g S \Delta H, \quad (2.3)$$

где ΔH гидравлический удар, м; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения.

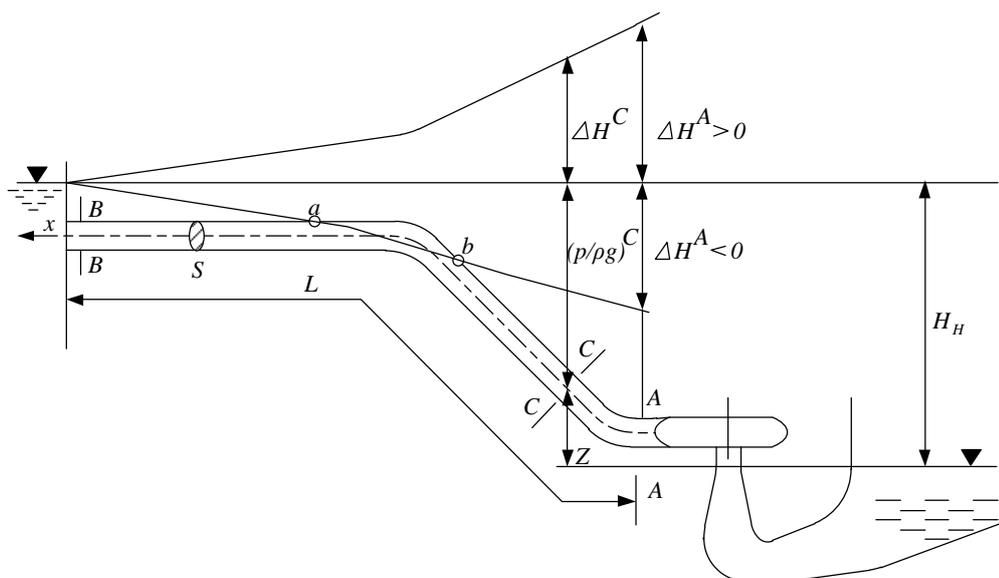


Рисунок 2.2 – Схема гидроудара в напорном трубопроводе

Если не принимать во внимание упругие деформации жидкости и водовода, вызываемые изменением давления, т.е. считать, что плотность жидкости ρ и площадь сечения S не зависят от давления (жидкость и водовод жесткие), то на основании (2.1) и (2.3) получаем

$$-\rho S L \frac{dV}{dt} = S \rho g \Delta H,$$

(знак минус показывает, что повышение ударного давления вызывается уменьшением скорости $dV / dt = 0$). Отсюда

$$\Delta H = -\frac{L}{g} \frac{dV}{dt}. \quad (2.4)$$

при $dV / dt = (dQ / dt) / S$,

$$\Delta H = -\frac{L}{gS} \frac{dQ}{dt}. \quad (2.5)$$

При известном законе изменения расхода воды через гидротурбину, повышение давления может быть найдено путем дифференцирования функции $V_x = V_x(t)$. Однако, сам закон изменения скорости определяется значениями распределенных давлений, приложенных к жидкости.

Для определения функции $V_x = V_x(t)$ [67] используется понятие о равновесных и неравновесных режимах и, соответственно, о статических и динамических параметрах. При постоянном напоре H_H и различных значениях μ - параметра, характеризующего положение (открытие) регулирующего органа или изменение частоты вращения гидроагрегата, обеспечиваются равновесные (установившиеся) режимы, при которых могут определяться экспериментально значения скорости в проточной части. Полученные значения скорости будут являться статическими. Следовательно, экспериментальным путем можно получить зависимость $V_{x_cm} = V_{x_cm}(t)$.

Когда при переходном процессе происходит изменение частоты вращения ГА, значение скорости воды в проточной части не соответствует зависимости, полученной при равновесных режимах. Появившиеся распределенные давления приводят к возникновению дополнительных перепадов давлений на НА, что создает иные условия протекания через регулирующий орган.

Возникает несоответствие между положением μ регулирующего органа, частотой вращения ГА и значением скорости воды в проточной части. Кривая изменения скорости при наличии распределенных давлений не совпадает со

статической характеристикой скорости, что свидетельствует о существовании неравновесных режимов. Новые значения скорости называют динамическими, а изменение скорости будет определять зависимость

$$V_{x_дин} = V_{x_дин}(\mu, \omega, t).$$

В случае увеличения частоты вращения ГА (рисунок 2.2), перед НА возникает дополнительное давление Δp , и истечение жидкости происходит уже не под напором H_H , как это было при соответствующем равновесном режиме, а под напором $H_H + \frac{\Delta p}{\gamma}$. Резкое изменение частоты вращения или резкое изменение открытия НА приводят к динамическим процессам в водоводе, что приводит к появлению гидроудара. В каждый момент времени связь между динамическими и статическими значениями скоростей выражается зависимостью

$$V_{x_дин} = V_{x_ст} \sqrt{\frac{H_H + \frac{\Delta p}{\gamma}}{H_H}} = V_{x_ст} \sqrt{1 + \frac{\Delta p}{\gamma H_H}}. \quad (2.6)$$

При уменьшении частоты вращения ГА истечение жидкости происходит под напором $H_H - \frac{\Delta p}{\gamma}$ и связь между динамическими и статическими значениями скоростей определяется зависимостью

$$V_{x_дин} = V_{x_ст} \sqrt{\frac{H_H - \frac{\Delta p}{\gamma}}{H_H}} = V_{x_ст} \sqrt{1 - \frac{\Delta p}{\gamma H_H}}. \quad (2.7)$$

Из рассмотренных выражений (2.6) и (2.7) видно, что разница в величинах $V_{x_дин}$ и $V_{x_ст}$ возрастает с увеличением интенсивности переходного процесса. При медленных изменениях частоты вращения ГА можно использовать непосредственно статические значения скоростей без каких-либо поправок.

Дополнительный, по сравнению с установившимся режимом, перепад давлений у регулирующего органа уравнивает силы инерции, являясь в то же

время причиной, обуславливающей разность в значениях скоростей при равновесных и неравновесных режимах.

Инерционный напор, в зависимости от значения частоты вращения ΓA , дает в его области эффект изменения действительного напора H_H . В связи с этим отношение инерционного напора к действительному называют относительным изменением напора [67]:

$$h = \frac{H - H_H}{H_H} = \frac{\Delta H}{H_H}, \quad (2.8)$$

$$h = \frac{\Delta H}{H_H} = -\frac{L}{gH_H} \frac{dV_{\text{дин}}}{dt}. \quad (2.9)$$

Используя понятие об инерционном напоре, получим вместо (2.6) и (2.8):

$$V_{\text{дин}} = V_{\text{см}} \sqrt{\frac{H_H + \Delta H}{H_H}} = V_{\text{см}} \sqrt{1 + h}. \quad (2.10)$$

При увеличении частоты вращения ΓA $h > 0$, при уменьшении $h < 0$.

Так как при переходном процессе поле скоростей в проточной части в каждый момент времени совпадает с полем скоростей установившегося режима при предыдущем изменении частоты вращения, можно говорить об эффекте запаздывания в перестроении поля скоростей, связывая запаздывание с инертностью жидкости. Действительно, возникающий эффект запаздывания сильнее проявляется при значительных изменениях кинетической энергии жидкости за малые промежутки времени.

Таким образом, рассмотрение одномерного неустановившегося движения жидкости показывает, что разница в неравновесных и равновесных режимах объясняется инерционностью жидкости. Знание функции относительного изменения напора $h = h(0)$ позволяет определять при расчете переходных процессов влияние инертности жидкости.

Перейдем в формуле (2.9) к безразмерному значению скорости

$$v_{\text{дин}} = \frac{V_{\text{дин}}}{V_H},$$

где V_H - скорость в проточной части гидротурбины при номинальном режиме. Тогда получим

$$h = -\frac{LV_H}{gH_H} \frac{dv_{\text{дин}}}{dt} = -T_W \frac{dv_{\text{дин}}}{dt}. \quad (2.11)$$

Постоянный для данного процесса параметр $T_W = \frac{LV_H}{gH_H}$ называют постоянной инерции или постоянной времени напорного водовода. Он характеризует время разгона масс воды - время, потребное для сообщения жидкости, находящейся в состоянии покоя, скорости V_H под воздействием напора H_H .

Учитывая, что в безразмерной форме для одного и того же режима значения скорости и расхода равны, используя зависимость (2.11), получим

$$v_{\text{дин}} = v_{\text{см}} \sqrt{1+h} = q_{\text{см}} \sqrt{1+h}. \quad (2.12)$$

В большинстве случаев мини-ГЭС имеют цилиндрический напорный водовод (рисунок 2.2) площадью сечения S (диаметр D_{TP}), длиной L , в конце трубопровода расположена турбина с НА, регулирующей расход воды. Положение сечений определяется координатой x , отсчитываемой по оси x , совпадающей с осью водовода в направлении от сечения 1-1. Направления расхода Q и скорости $V = Q/F$ принимаются положительными т.к. вода движется от водохранилища к гидротурбине.

В результате перехода к безразмерным параметрам получим (2.11) в виде

$$h = -T_W \frac{dq}{dt}, \quad (2.13)$$

где

$$T_W = \frac{Q_H}{gH_H} \sum \frac{L_i}{S_i}, \quad (2.14)$$

где $\sum \frac{L_i}{S_i}$ определяется для всего напорного тракта. Коэффициент T_W ,

называется постоянной инерции (или постоянной времени) напорных водоводов и

представляет собой комплексный показатель инерционности напорной системы. В зависимости от значения T_w напорная система считается:

- малоинерционной при $T_w < 1.5$ сек;
- среднеинерционной при $1,5 < T_w < 3$ сек;
- высокоинерционной при $T_w > 3$ сек.

Чем выше инерционность, тем большее значение имеет учет динамических воздействий при проектировании и эксплуатации гидроагрегатов и напорных водоводов ГЭС [8].

2.2 Математическое описание гидротурбины в абсолютных величинах

Для разработки алгоритма управления мини-ГЭС необходима математическая модель гидротурбины, где можно промоделировать все ее режимы работы. Автором предлагается математическая модель РО гидротурбины со следующими допущениями:

- КПД системы для всего диапазона регулирования принята $\eta = const$;
- стенки водовода абсолютно жесткие;
- вода несжимаема.

На основании общепринятых формул в теории гидроэлектростанций, которые приводятся ниже, была построена математическая модель РО гидротурбины. В выражении (1.12) приведена основная формула, которая является базовой для модели гидротурбины,

$$P_T = 9,81HQ\eta_T.$$

Как видно из выражения (1.12), мощности гидротурбины зависит от напора H и расхода Q .

Напор ГА состоит из следующих составляющих:

$$H = H_H + \Delta H - h_{nom}, \quad (2.15)$$

где $H_H = const$ - номинальный напор мини-ГЭС, h_{nom} - потери напора в водоводе [5,20],

$$\Delta H = -\frac{L}{gS} \frac{dQ}{dt},$$

$$h_{ном} = A \cdot K_1 \cdot L \cdot Q^2, \quad (2.16)$$

где A - удельное сопротивление для стальных труб, K_1 - поправочный коэффициент к значениям A для стальных труб [72,73,74,75,76].

Расход воды через гидротурбину зависит от открытия направляющего аппарата. Относительное гидравлическое сопротивление гидротурбины μ определяется выражением вида,

$$\mu = \mu_{НА} - \mu_{цен}, \quad (2.17)$$

где $\mu_{НА}$ - гидравлическое сопротивление, обусловленное открытием направляющего аппарата; $\mu_{цен}$ - гидравлическое сопротивление, обусловленное действием центробежной силы,

$$\mu_{цен} = k_{цен} \cdot \omega, \quad (2.18)$$

где $k_{цен} = \frac{\Delta Q}{Q_H \omega_H}$ - коэффициент расхода.

Также мощность гидротурбины можно записать через механическую составляющую (1.11)

$$P_T = M_T \cdot \omega.$$

В установившихся режимах соблюдается условие $M_T = M_{\mathcal{E}}$, тогда выражение (1.11) запишем в следующем виде

$$P_T = M_{\mathcal{E}} \cdot \omega, \quad (2.19)$$

Движение ротора гидротурбины представлено виде выражения (1.8)

$$M_T - M_{\mathcal{E}} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

По полученным уравнениям составлена структура модели РО гидротурбины рисунок 2.3.

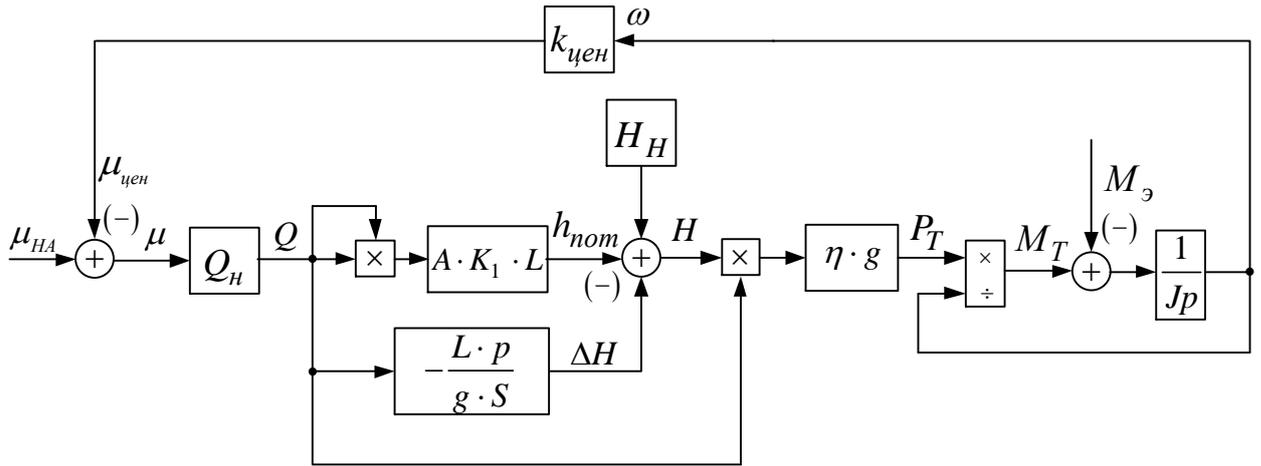


Рисунок 2.3 – Структурная схема математической модели радиально-осевой гидротурбины

Математическая модель гидротурбины была промоделирована и получены следующие переходные процессы, представленные на рисунках 2.4 – 2.7.

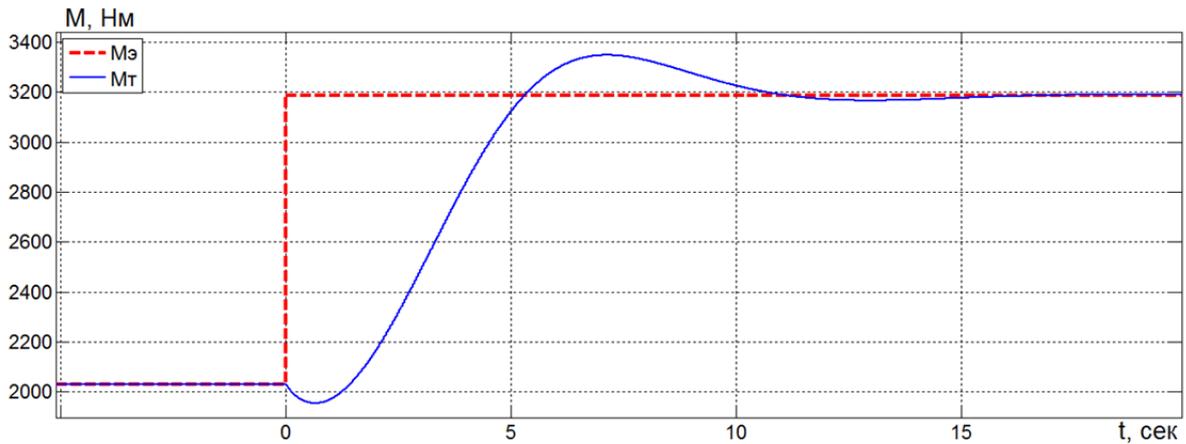


Рисунок 2.4 – Переходные процессы по моменту ГА на основе МДП

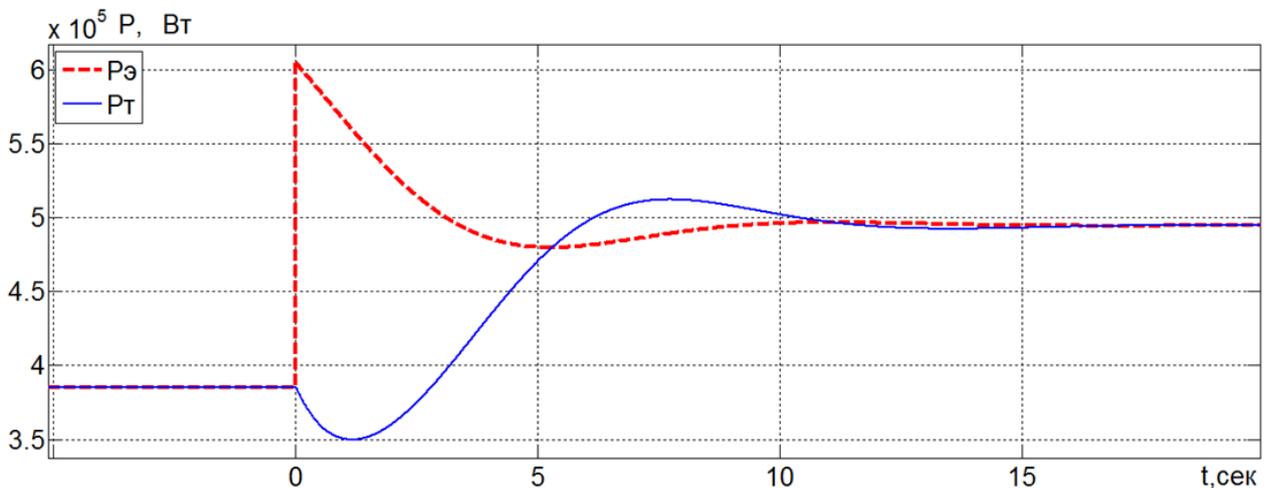


Рисунок 2.5 – Переходные процессы по активной мощности ГА на основе МДП

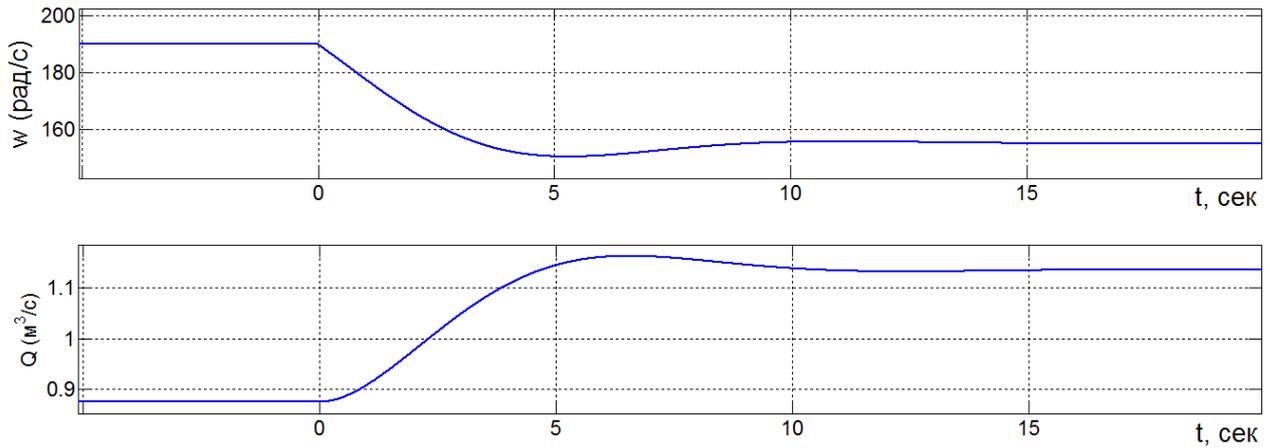


Рисунок 2.6 – Переходные процессы по угловой скорости вала и расходу воды ГА

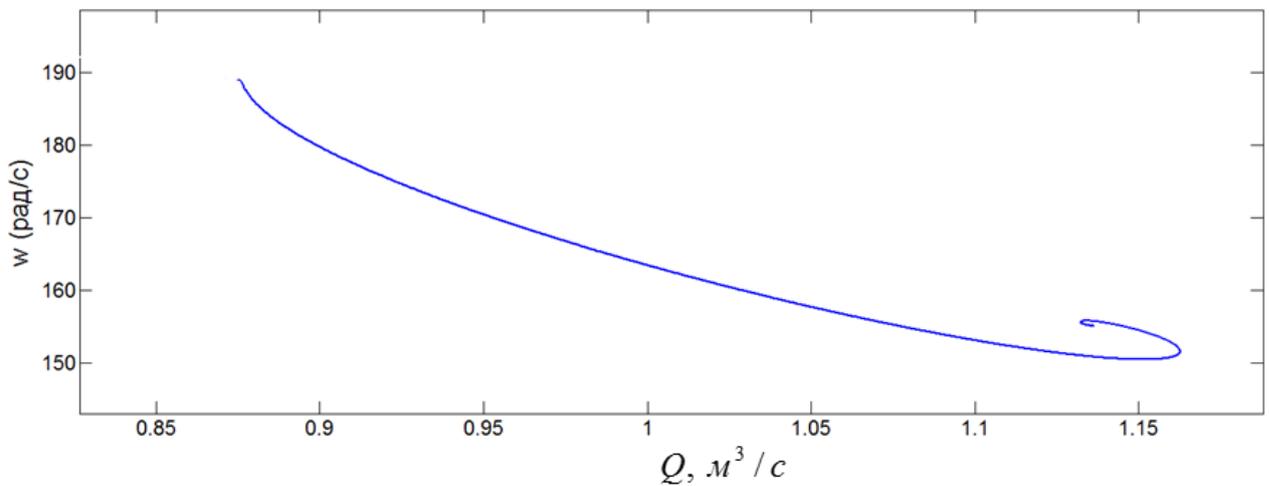


Рисунок 2.7 – Динамическая зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА

Результаты цифрового моделирования приведены на рисунке 2.4 - 2.7 ГА обрабатывает увеличения задания активной мощности. Как видно из рисунка 2.4 - 2.7 при увеличении электромагнитного момента $M_{\text{Э}}$ МДП в первый период времени мощность гидротурбины уменьшается и, затем, постепенно нарастает до установившегося значения. Этот эффект объясняется следующим образом: при увеличении электромагнитного момента МДП динамический момент ГА уменьшается, это приводит к торможению ГА, частота вращения уменьшаться. При этом центробежная сила уменьшается, не препятствуя прохождению воды через НА, что приводит к понижению давления перед НА (гидроудар). Понижение давления дальше приводит к уменьшению мощности гидротурбины

до тех пор пока расход воды не начинает увеличиваться. После того как расход воды начал увеличиваться, и частота вращения уменьшаться - мощность гидротурбины начинает увеличиваться за счет увеличения расхода воды, до установившегося значения.

2.3 Математическое описание радиально-осевой гидротурбины в относительных величинах

Гидромеханические переходные процессы можно представлять в форме траекторий мгновенных режимов, показанных на универсальной характеристике турбинного гидроагрегата (рисунок 2.8). Положение каждой точки траектории, соответствующей данному моменту времени, определяется двумя координатами: открытием направляющего аппарата a и приведенной частотой вращения n'_t . Изменения $a(t)$, задаваемые в зависимости от времени, представляют режим регулирования ГА. Координата n'_t зависит от динамического напора $H = H_H + \Delta H$ с учетом гидравлического удара и от частоты вращения n . Оба эти показателя определяются в результате расчетов переходных процессов, и задать их заранее невозможно.

Раздельный расчет удара $H(t)$ и изменения частоты вращения $n(t)$. Сначала принимают некоторые значения n'_t и по заданному режиму регулирования ГА находят динамический напор; далее по нему определяют изменение частоты вращения; затем с учетом результатов первого расчета строят линию мгновенных режимов.

Расчетные соотношения для определения гидравлического удара были приведены выше. Здесь рассмотрим зависимости, позволяющие определять изменение частоты вращения.

Гидроэнергетиками [77,10] было проведено исследования динамических режимов энергосистем, все гидротурбины рассматривают, как турбины с одним регулирующим органом.

Изменение мощности гидротурбины осуществляется направляющим аппаратом, изменяющим расход воды через турбину.

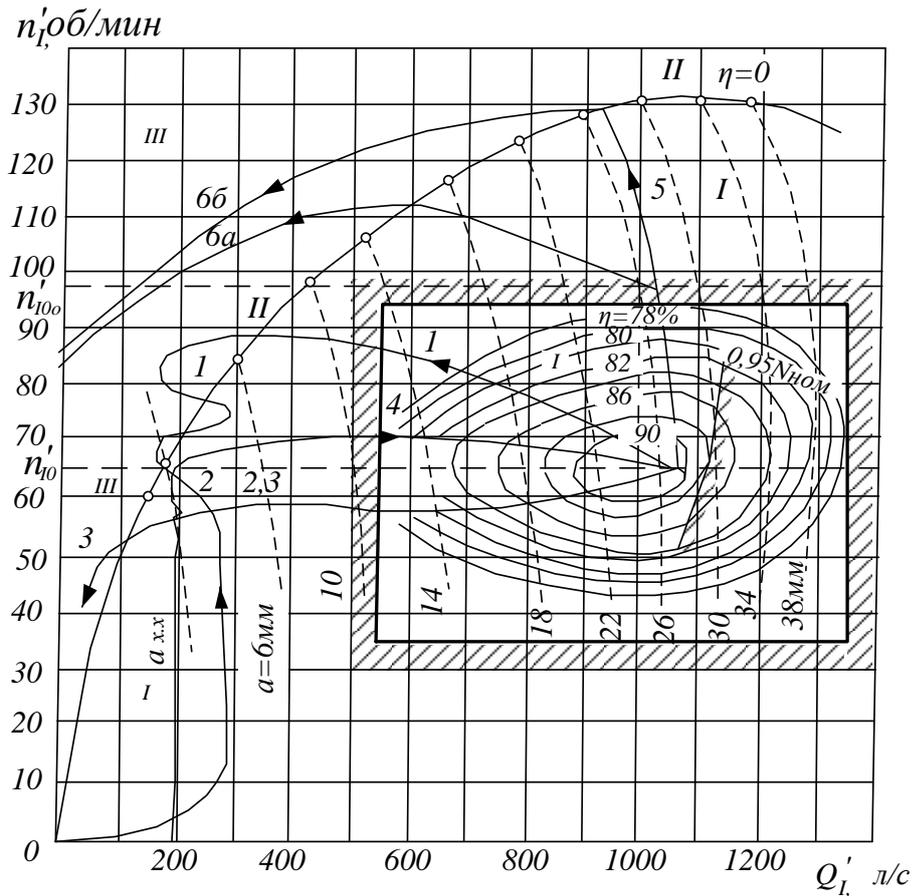


Рисунок 2.8 – Траектории мгновенных режимов гидроагрегата с радиально-осевой турбиной. Режимы:

I - турбинный; II – разгонный; III - тормозной. Процессы: 1 - сброс нагрузки; 2 - уменьшение нагрузки; 3 - остановка агрегата; 4 - увеличение нагрузки; 5 - выход в разгон при $a = const$; 6 - вывод из разгона (а - с разгонной частоты; б - с промежуточной частоты вращения); 7 - пуск агрегата

Для математического описания гидротурбины с одним регулирующим органом применяли модель [77,10], разработанную для решения задач динамики регулирования активной мощности гидроагрегатов (устойчивость регулирования при параллельной работе в энергосистеме на холостом ходе и под нагрузкой, при автономной работе на изолированную нагрузку). Эта модель учитывает переходные процессы в водоводе и явление гидравлического удара. В начальной стадии перемещения направляющего аппарата приводит к колебаниям давления в водоводе при увеличении расхода воды. Мощность гидротурбины вначале падает, затем начинает увеличиваться. И, наоборот, при уменьшении расхода воды

мощность гидротурбины вначале возрастает, а затем начинает снижаться. Поведение гидротурбины в динамике описывает следующая система уравнений [77]:

$$q = \mu(1 + 0,5h), \quad (2.20)$$

$$h = -W(p)q, \quad (2.21)$$

$$m_T = q(1 + h). \quad (2.22)$$

Влияние инерции потока воды и колебаний давления в водоводе на динамические свойства гидротурбины учитывается уравнением жесткого гидравлического удара

$$W(p) = T_w p. \quad (2.23)$$

Параметры упругого гидроудара обычно неизвестны, для их определения требуются специальные исследования. В этих условиях в практических расчетах используют выражение (2.21) для жесткого гидроудара, в котором фигурирует единственный параметр T_w , который или известен, или его можно рассчитать, имея параметры водовода.

На основании выражений (2.20 – 2.23) для ГА на основе СГ в литературном источнике [77] предлагается математическое описание гидротурбин при $\omega = const$. Передаточная функция гидротурбин, рассмотрена относительно управляющего воздействия μ , формируемого путём изменения угла открытия НА, при $\omega = const$,

$$W_T(p) = \frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \mu(p)} = M_T \frac{-T_w p + 1}{\frac{T_w}{2} p + 1}. \quad (2.24)$$

При регулировании мощности ГА путем воздействия на НА гидротурбины, передаточная функция объекта управления представляет собой неминимально-фазовое звено. Замкнутую систему на основании неминимально-фазового звена невозможно сделать быстрой, т.к. невозможно скомпенсировать правые нули в передаточной функции объекта управления (2.24).

Для разработки новой математической модели воспользуемся выражениями (2.20÷2.23). Данные выражения получены в для гидротурбины при $\omega = const$. Поэтому в (2.20 - 2.23) не учтено изменение частоты вращения ГА, что видно из выражения (2.20).

Для мини-ГЭС на основе МДП данный тип математического описания гидротурбины не подходит, т.к. частота вращения ГА $\omega = var$. Автором предлагается записать математическую модель гидротурбины с учетом изменения частоты вращения. Тогда математическое описание РО гидротурбины примет вид:

$$p_T = q(1 + h) \quad (2.25)$$

$$q = \mu \left(1 + \frac{h}{2} \right);$$

$$\mu = \mu_{HA} + \mu_\omega \quad (2.26)$$

$$h = -T_w \frac{dq}{dt};$$

Где:

$$p_T = \frac{P_T}{P_H}. \quad (2.27)$$

μ_{HA} - управляющее воздействие, представляющее собой гидравлическое сопротивление турбины, изменяемое при помощи НА (номинальному открытию НА соответствует значение $\mu_{HA} = 1$); μ_ω - переменная, учитывающая действие центробежной силы, препятствующей прохождению воды через направляющий аппарат. При $\omega = \omega_{ном}$ $\mu_\omega = 0$; при $\omega < \omega_{ном}$ $\mu_\omega > 0$; при $\omega > \omega_{ном}$ $\mu_\omega < 0$.

Переменная, учитывающая действие центробежной силы, определяется выражением вида

$$\mu_\omega = -k_\mu^\omega (\omega - \omega_H) = -k_\mu^\omega \Delta\omega, \quad (2.28)$$

$$k_\mu^\omega = \frac{\overline{k_\mu^\omega}}{\omega_H}, \quad (2.29)$$

Результаты цифрового моделирования приведены на рисунке 2.10 - 2.12. ГА обрабатывает увеличение задания активной мощности. Как видно из рисунков 2.10 - 2.12. при увеличении электромагнитного момента $M_{\text{э}}$ МДП в первый период времени мощность гидротурбины уменьшается и, затем, постепенно нарастает до установившегося значения. Этот эффект объясняется следующим образом. При увеличении электромагнитного момента МДП динамический момент ГА уменьшается. Это приводит к торможению ГА. При этом центробежная сила уменьшается, не препятствуя прохождению воды через НА, что приводит к понижению давления перед НА (гидроудар). Понижение давления дальше приводит к уменьшению мощности гидротурбины до тех пор пока расход воды не начинает увеличиваться. После того, как расход воды начал увеличиваться, а частота вращения уменьшаться, мощность гидротурбины начинает увеличиваться за счет увеличения расхода воды до установившегося значения.

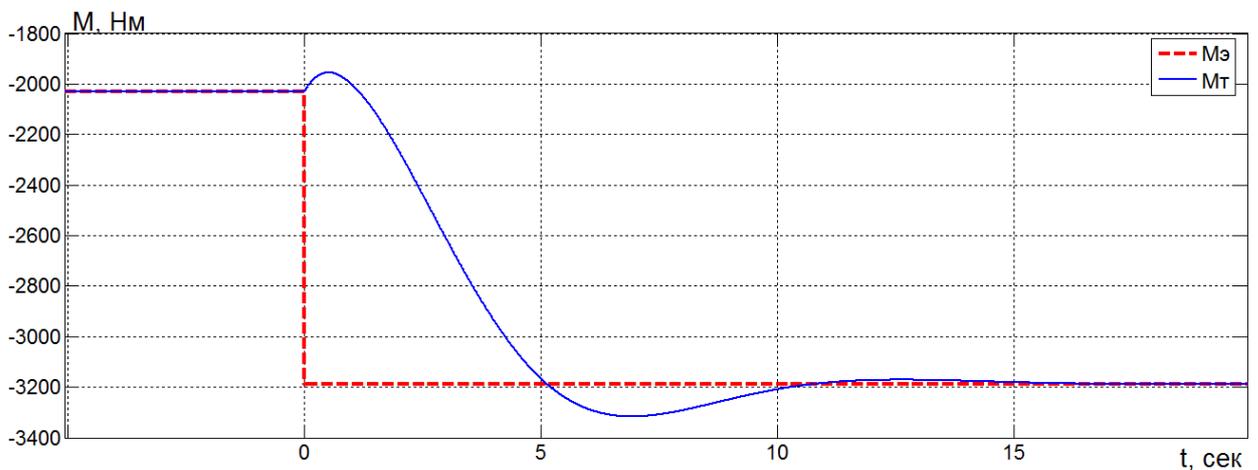


Рисунок 2.10 – Переходные процессы по моменту ГА на основе МДП

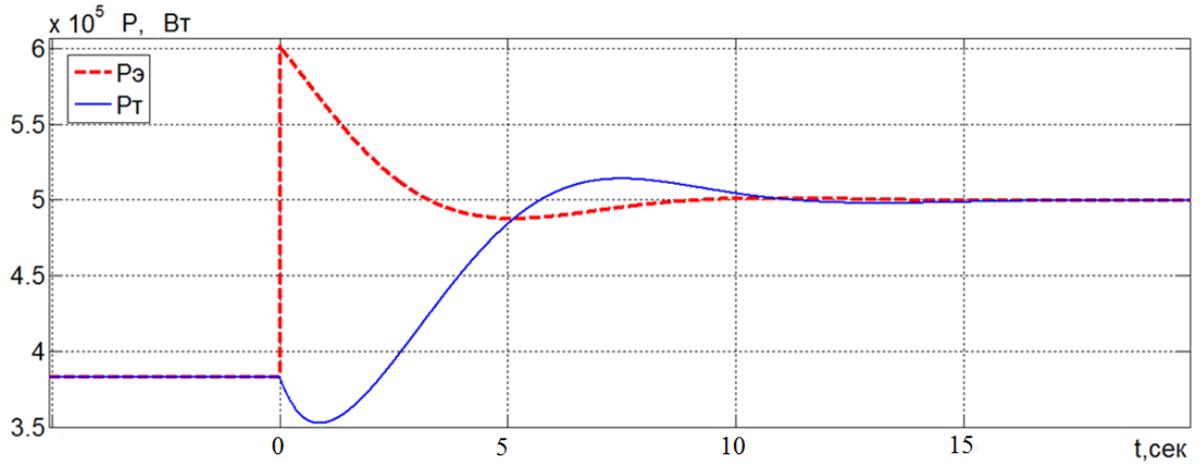


Рисунок 2.11 – Переходные процессы по активной мощности ГА на основе МДП

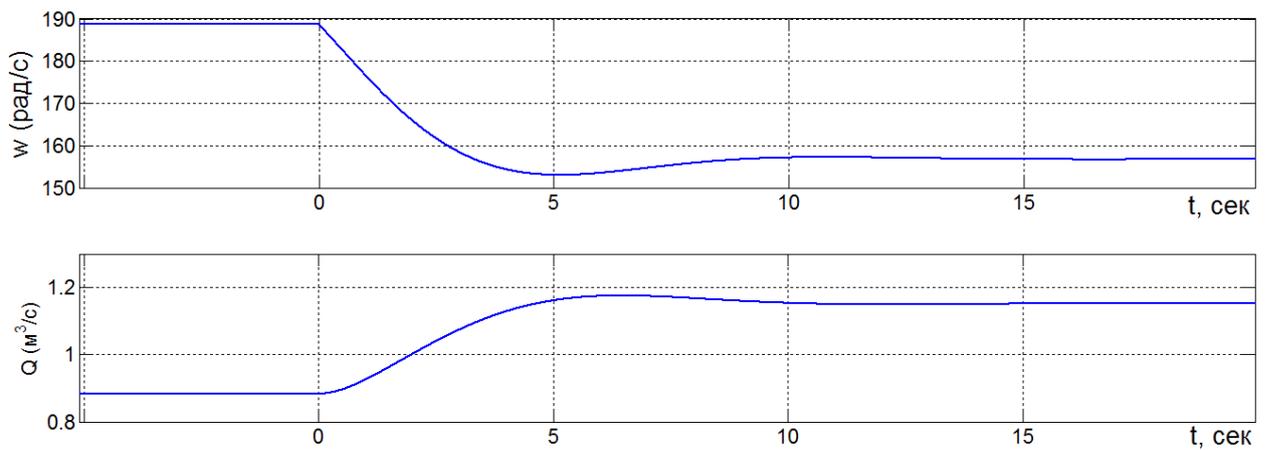


Рисунок 2.12 – Переходные процессы по угловой скорости вала и расходу воды ГА

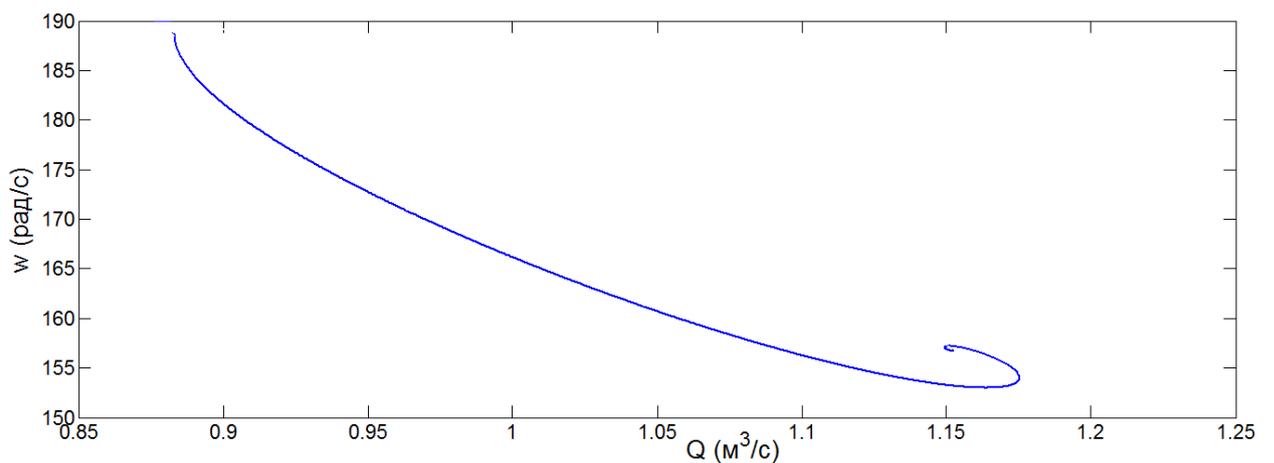


Рисунок 2.13 – Динамическая зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА

Сравнение результатов моделирования, представленных на рисунках 2.4 - 2.7), с результатами представленных на рисунках 2.10 - 2.13 подтверждает адекватность предложенной автором в разделе 2.2 принципиально новой модели РО гидротурбины.

2.4 Выводы

1. На основании анализа физических процессов в гидросистеме ГА разработана новая математическая модель РО гидротурбины (рисунок 2.3). Адекватность данной модели подтверждают результаты цифрового моделирования.

2. В традиционных ГА на основе синхронного генератора частота вращения ГА определена постоянным значением частоты сети, а генерируемая активная мощность равна мощности на валу турбины (за вычетом потерь в генераторе). Управление мощностью на валу турбины осложняется необходимостью изменять расход воды через турбину, значение которого определяет кинетическую энергию масс воды в напорном водоводе. Применение генератора с регулируемой частотой вращения вала даёт возможность преобразовывать изменение кинетической энергии масс воды в напорном водоводе в изменение кинетической энергии вращающихся масс ГА. В результате появляется возможность работать с разными значениями генерируемой активной мощности и мощности на валу турбины в динамических режимах. Это позволяет быстро изменять активную мощность генератора, управляя его электромагнитным моментом.

3. Известное из литературы математическое описание РО гидротурбины (2.20, 2.21, 2.22, 2.23) расширено с целью учёта изменения частоты вращения вала ГА (2.20, 2.21, 2.23, 2.25, 2.26).

ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

3.1 Вывод передаточных функции гидроагрегата, управляемого по частоте вращения вала

Для разработки методики синтеза контуров регулирования, частоты вращения и генерируемой активной мощности ГА, необходимо получить соответствующие передаточные функции ГА. Исходным материалом для этого послужит обоснованная в главе 2 система уравнений (2.8, 2.20, 2.21, 2.23, 2.25, 2.26, 2.27) при $\omega = var$. Так как ГА является нелинейным объектом управления, рассмотрим наиболее распространенную для такого случая форму описания свойств систем. Для получения передаточных функции необходимо линеаризовать систему уравнений (2.8, 2.20, 2.21, 2.23, 2.25, 2.26, 2.27).

Рассмотрим работу ГА вблизи некоторой рабочей точки P_0, Q_0 . Используем уравнения, приведенные в главе 2 (2.8, 2.20, 2.21, 2.23, 2.25, 2.26, 2.27),

$$p_T = q(1 + h),$$

$$q = (\mu_{HA} + \mu_\omega) \left(1 + \frac{h}{2} \right),$$

$$h = -T_w \frac{dq}{dt},$$

где:

$$T_w = \frac{Q_H}{gH_H} \sum_i^n \frac{L_i}{S_i};$$

$$h = \frac{H - H_H}{H_H} = \frac{\Delta H}{H_H};$$

$$p_T = \frac{P_T}{P_H}$$

и в главе 1 (1.17 а, 1.17 г):

$$q = \frac{Q}{Q_H};$$

$$m_T = \frac{M_T}{M_H}.$$

Перейдем к уравнениям в отклонениях. Тогда выражения (1.17 г), (2.8), (2.27) примут вид:

$$q = \frac{Q}{Q_H} = \frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_H}, \quad (3.1)$$

$$p_T = \frac{P_T}{P_H} = \frac{P_T^0 + \Delta P_T}{P_H}, \quad (3.2)$$

$$\frac{\Delta H}{H_H} = -\frac{T_W}{Q_H} \frac{d\Delta Q}{dt}. \quad (3.3)$$

Произведём подстановку выше приведённых выражений (3.1), (3.2), (3.3) в выражения (2.25), (2.20):

$$\frac{P_T^0 + \Delta P_T}{P_H} = \frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_H} \left(1 + \frac{\Delta H}{H_H} \right); \quad (3.4)$$

$$\frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_H} = (\mu_0 - k_\mu^\omega \Delta \omega) \left(1 + \frac{\Delta H}{2H_H} \right). \quad (3.5)$$

Преобразуем выражение (3.4) и подставим в него (3.3), исключив $\frac{\Delta H}{H_H}$,

$$\frac{\Delta P_T}{P_H} = \frac{\Delta Q}{Q_H} - \frac{Q_0}{Q_H} \frac{T_W}{Q_H} \frac{d\Delta Q}{dt}. \quad (3.6)$$

Уравнение (3.6) представим в операторной форме, заменив символ дифференцирования оператором p ,

$$\frac{d}{dt} = p,$$

тогда

$$\frac{\Delta P_T(p)}{\Delta Q(p)} = \frac{P_H}{Q_H} \left(1 - \frac{Q_0}{Q_H} T_W p \right). \quad (3.7)$$

Используя (3.5) преобразуем выражение (3.3), и исключив из него $\frac{\Delta H}{H_H}$,

$$\frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_H} = \mu_0 - \frac{\mu_0 T_W}{2Q_H} \frac{d\Delta Q}{dt} - k_\mu^\omega \Delta \omega + k_\mu^\omega \Delta \omega \frac{T_W}{2Q_H} \frac{d\Delta Q}{dt}.$$

При $\frac{Q_0}{Q_H} = \mu_0$ выражение (3.5) примет вид,

$$\frac{\Delta Q}{Q_H} = -\frac{\mu_0 T_W}{2Q_H} \frac{d\Delta Q}{dt} - k_\mu^\omega \Delta \omega. \quad (3.8)$$

Уравнение (3.8) представим в операторной форме, заменив символ дифференцирования оператором p ,

$$\frac{d}{dt} = p,$$

тогда

$$\frac{\Delta Q(p)}{\Delta \omega(p)} = -\frac{k_\mu^\omega Q_H}{1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p}. \quad (3.9)$$

Перемножим выражения (3.7), (3.9) и получим передаточную функцию гидротурбины

$$\frac{\Delta P_T(p)}{\Delta \omega(p)} = \frac{\Delta P_T}{\Delta Q} \frac{\Delta Q}{\Delta \omega} = -\frac{P_H}{Q_H} \left(1 - \frac{Q_0}{Q_H} T_W p \right) \frac{Q_H k_\mu^\omega}{1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p}.$$

Зная, что $\frac{Q_0}{Q_H} = \mu_0$, окончательно получим,

$$\frac{\Delta P_T(p)}{\Delta \omega(p)} = -P_H k_\mu^\omega \frac{1 - \mu_0 T_W p}{1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p}. \quad (3.10)$$

Получив передаточную функцию по мощности гидротурбины, найдем передаточную функцию по моменту гидротурбины, $\frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \omega(p)}$. Для этого

воспользуемся выражением

$$\Delta P_T = \Delta M_T \omega_0 + \Delta \omega M_T^0 + \Delta M_T \Delta \omega, \quad (3.11)$$

где M_T^0 - значение момента турбины в точке линеаризации.

Слагаемым второго порядка малости $\Delta M_T \Delta \omega$ в выражении (3.11) пренебрегаем.

Решим (3.10) совместно с (3.11). В результате имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \omega(p)} &= -\frac{P_H k_\mu^\omega}{\omega_0} \frac{1 - \mu_0 T_W p}{1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p} - \frac{M_T^0}{\omega_0}, \\ \frac{\Delta M_T(p) \omega_0 + \Delta \omega(p) M_T^0}{\Delta \omega(p)} &= -P_H k_\mu^\omega \frac{(1 - \mu_0 T_W p)}{\left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)}, \\ \frac{\Delta M_T(p) \omega_0}{\Delta \omega} &= -P_H k_\mu^\omega \frac{(1 - \mu_0 T_W p)}{\left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)} - M_T^0, \\ \frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \omega(p)} &= -\frac{P_H k_\mu^\omega (1 - \mu_0 T_W p) - M_T^0 \left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)}{\omega_0 \left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)}, \\ \frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \omega(p)} &= \frac{-(P_H k_\mu^\omega + M_T^0) - T_W p \left(\frac{\mu_0 M_T^0}{2} - P_T^0 k_\mu^\omega\right)}{\omega_0 \left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Преобразуем полученную передаточную функцию (3.12) к более удобному виду,

$$W_T(p) = \frac{\Delta M_T(p)}{\Delta \omega(p)} = -\frac{(P_H k_\mu^\omega + M_T^0)}{\omega_0} \frac{T_W \frac{\mu_0 M_T^0}{2} - P_T^0 k_\mu^\omega}{(P_H k_\mu^\omega + M_T^0)} p + 1 \cdot \quad (3.13)$$

$$\left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)$$

В выражение (3.13) представляет собой передаточную функцию гидротурбины в виде отношения изображения по Лапласу момента гидротурбины к изображению по Лапласу угловой скорости рабочего колеса. Промоделируем

ГА мини-ГЭС. Параметры ГА приведены в Приложении А. Математическая модель гидротурбины представлена на рисунке 3.1.

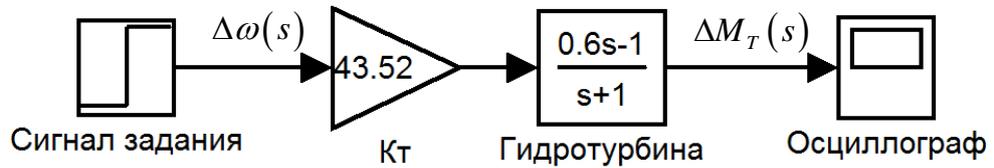


Рисунок 3.1 – Математическая модель гидротурбины.

s - оператор Лапласа

Проанализируем реакцию гидротурбины на ступенчатый сигнал. Из рисунка 3.2. видно, что переходная функция имеет аperiodический вид. Гидротурбина входит в 5% зону установившегося режима за 5 секунд.

Рассмотрим структурную схему ГА, приведенную на рисунке 3.3.

Для радиально-осевых гидротурбин с низким коэффициентом быстроходности имеется возможность оперативно изменять выработку активной мощности путём изменения частоты вращения гидроагрегата [78,79]. Поэтому можно организовать полноценное функционирование такого ГА в автоматическом режиме, имея обычное для мини-ГЭС гидромеханическое оборудование с ручным приводом направляющего аппарата, то есть без использования гидроприводов НА и маслостанции.

Управление электромагнитным моментом МДП ($M_{\text{э}}$) производят в системах автоматического регулирования МДП [80] с ориентированием по вектору потокосцепления статора ($\bar{\Psi}_s$). Максимальный $M_{\text{э}}$, который может создавать МДП, равен произведению модуля $\bar{\Psi}_s$, $|\bar{\Psi}_s| = \Psi_s$, на предельно допустимое значение тока ротора, $M_{\text{э}}^{\text{max}} = -p_n k_s \Psi_s I_r^{\text{max}}$. Значение Ψ_s практически полностью определяется соотношением амплитуды и частоты напряжения сети. Поэтому при просядках напряжения сети будут происходить внезапное уменьшение Ψ_s и снижение $M_{\text{э}}^{\text{max}}$.

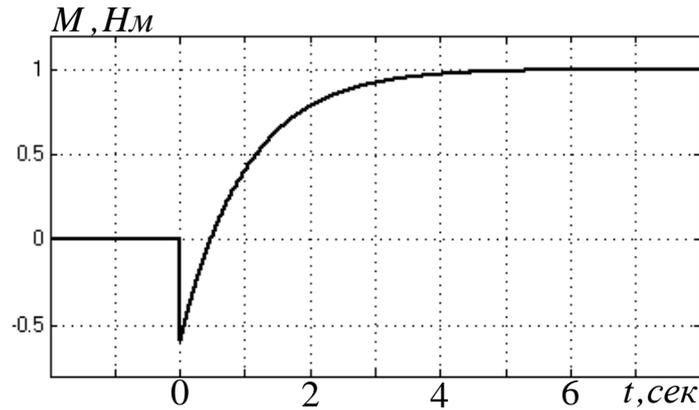


Рисунок 3.2 – Переходная функция гидротурбины при мгновенном изменении угла открытия НА

В режимах ограничения тормозящего электромагнитного момента $M_{\mathcal{E}}$ МДП, при достижении потолочного значения $M_{\mathcal{E}} = M_{\mathcal{E}}^{\max}$, переходные процессы по скорости вала ГА (ω) будут обусловлены собственными динамическими свойствами ГА. В таком режиме МДП-генератор имеет абсолютно мягкую механическую характеристику, то есть развивает один и тот же тормозящий момент во всём диапазоне скоростей вращения вала.

Крайне нежелательным является колебательный характер процессов $\omega(t)$, поскольку в водоводах мини-ГЭС имеются условия для распространения продольных волн расхода и давления. В результате наложения волн, отраженных от неоднородностей трубопровода, и волн, создаваемых гидромашинной, может возникать разрушение гидромеханического оборудования. Данное явление носит название гидроудара.

С целью изучения влияния основных параметров ГА на колебательность переходных процессов по скорости вращения, $\omega(t)$, поставлена задача исследования динамических свойств ГА.

Структурная схема объекта управления приведена на рисунке 3.3.

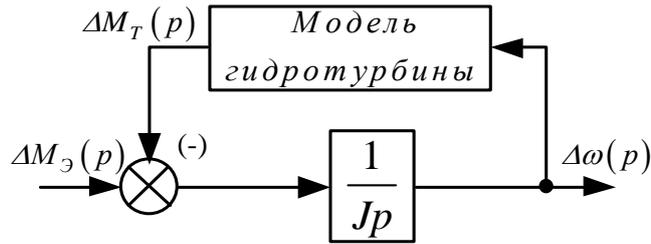


Рисунок 3.3 – Структурная схема динамической модели ГА

На основании структурной схемы (рисунок 3.3) передаточную функцию ГА запишем в виде

$$W_{ГА}(p) = \frac{\omega_0}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \frac{\left(1 + \frac{\mu_0 T_W}{2} p\right)}{\frac{J \omega_0 \frac{\mu_0 T_W}{2} p^2}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} + \frac{1}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \left(J \omega_0 - P_T^0 k_\mu^\omega T_W + M_T^0 \frac{\mu_0 T_W}{2} \right) p + 1}, \quad (3.14)$$

$$W_{ГА}(p) = \frac{\Delta \omega(p)}{\Delta M_\varepsilon(p)} = \frac{\omega_0}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \frac{1 + \mu_0 \frac{T_W}{2} p}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1},$$

$$\text{где } T^2 = \frac{J \omega_0 \frac{\mu_0 T_W}{2}}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0}, \quad 2\xi T = \frac{1}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \left(J \omega_0 - P_T^0 k_\mu^\omega T_W + M_T^0 \frac{\mu_0 T_W}{2} \right),$$

ξ – коэффициент демпфирования; M_T^0 – значение момента турбины в точке линеаризации.

Найдем передаточную функцию ГА по электрической мощности ГА. Зная, что $P_\varepsilon = M_\varepsilon \omega_0$ используем выражение (3.14) и запишем передаточную функцию ГА по электрической мощности относительно угловой скорости данное выражение будет иметь

$$W_{ГАМ}(p) = \frac{\Delta P_\varepsilon(p)}{\Delta \omega(p)} = \omega_0 \frac{\Delta M_\varepsilon(p)}{\Delta \omega(p)}.$$

$$W_{ГЛМ}(p) = \frac{(M_T^0 + k_\mu P_H) \left(\frac{J\omega_0\mu_0 \frac{T_W}{2} p^2}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} + \frac{1}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \left(J\omega_0 - T_W P_T^0 k_\mu^\omega + \mu_0 M_T^0 \frac{T_W}{2} \right) \cdot p + 1 \right)}{\left(\mu_0 \frac{T_W}{2} p + 1 \right)}. \quad (3.15)$$

Полученная передаточная функция необходима для синтеза контура регулирования генерированной активной мощности.

3.2 Анализ динамических свойств объекта управления

Условие устойчивости ГА (рисунок 3.3) Поскольку устойчивость системы определяется корнями знаменателя $T_1^2 p^2 + 2\xi T_2 p + 1$ передаточной функции (3.14). Условию устойчивости $2\xi T > 0$ соответствует неравенство,

$$\omega_0 J > T_W k_\mu^\omega P_T^0 - \mu_0 T_W \frac{M_T^0}{2}. \quad (3.16)$$

Условие (3.16) обеспечивается уменьшением соотношения $\frac{T_W}{J}$.

Условие аperiodического характера процессов ГА более строгое, чем (3.16) – условие отсутствия свободных колебаний, $\xi \geq 1$. Выполнение неравенства $\xi \geq 1$ должно обеспечить демпфирование колебаний скорости вала ГА, опасное с точки зрения возникновения гидроудара. Данное условие имеет вид

$$\left(\omega_0 J + \mu_0 \frac{T_W}{2} M_T^0 - T_W k_\mu^\omega P_T^0 \right)^2 \geq 2 T_W \omega_0 J \mu_0 (M_T^0 + k_\mu^\omega P_H). \quad (3.17)$$

С учётом соотношений

$$\frac{P_T^0}{P_H} = \frac{Q_0}{Q_H} = \mu_0,$$

неравенство (3.17) может быть представлено в виде,

$$(\omega_0 J)^2 + \left(\mu_0 \frac{T_W}{2} M_T^0 \right)^2 + (T_W k_\mu^\omega P_T^0)^2 \geq T_W \omega_0 \mu_0 \left(J M_T^0 + T_W k_\mu^\omega (M_T^0)^2 + 4 J k_\mu^\omega P_H \right). \quad (3.18)$$

Покажем, что выполнение условия (3.18) обеспечивается уменьшением соотношения $\frac{T_w}{J}$, для чего разделим правую и левую части на J^2

$$\omega_0^2 + \left(\mu_0 \frac{T_w}{2J} M_T^0 \right)^2 + \left(k_\mu^\omega \frac{T_w}{J} P_T^0 \right)^2 \geq \frac{T_w}{J} \omega_0 \mu_0 \left(M_T^0 + \frac{T_w}{J} k_\mu^\omega (M_T^0)^2 + 4k_\mu^\omega P_H \right). \quad (3.19)$$

Затем, устремив в (3.19) $\frac{T_w}{J}$ к нулю, получаем неравенство

$$\omega_0^2 \geq 0,$$

справедливость которого очевидна.

Итак, выполнение условий (3.16, 3.17) обеспечивается путём увеличения J и уменьшения T_w . Изменение других коэффициентов (3.16, 3.17) означает либо изменение режима гидротурбины путём воздействия на НА, либо изменение конструктивных параметров гидротурбины.

Уменьшение постоянной времени водовода, T_w , на начальной стадии проектирования мини-ГЭС возможно за счёт выбора гидросооружения с наименьшей длиной водовода. На последующих стадиях создания мини-ГЭС для уменьшения T_w можно увеличивать S_i – площади поперечного сечения отдельных участков проточного тракта ГА.

ГА мини-ГЭС, как правило, имеет водовод в виде металлического трубопровода постоянного сечения S длины L . Вклад проточной части турбины в величину T_w для рассматриваемых мини-ГЭС незначителен по сравнению с водоводом. Согласно (2.14), T_w практически прямо пропорциональна соотношению $\frac{L}{S}$. В то же время, и кинетическая энергия, запасённая водой в

водоводе – E_K^w , прямо пропорциональна соотношению $\frac{L}{S}$,

$$E_K^w = \frac{WV_w^2}{2} = \frac{\rho}{2} Q^2 \frac{L}{S}.$$

Таким образом, можно считать, что E_K^w , прямо пропорциональна T_w .

Дополнительное увеличение момента инерции, J , ГА осуществляют установкой маховика. Кинетическая энергия, запасаемая вращающимися массами ГА (E_K^J), увеличивается прямо пропорционально J ,

$$E_K^J = \frac{J\omega^2}{2}.$$

Уменьшение $\frac{T_W}{J}$ для выполнения условия демпфирования колебаний (3.17) означает уменьшение соотношения кинетических энергий, запасаемых водой в водоводе и вращающимися массами на валу ГА, $\frac{E_K^W}{E_K^J}$.

Промоделируем полученную передаточную функцию ГА (рисунок 3.3) и структурную модель ГА (рисунок 2.9) в программе Matlab/Simulink.

При моделировании математической модели мини-ГЭС (исходные данные в приложении А), получена реакция системы на ступенчатый сигнал, рисунок 3.5.

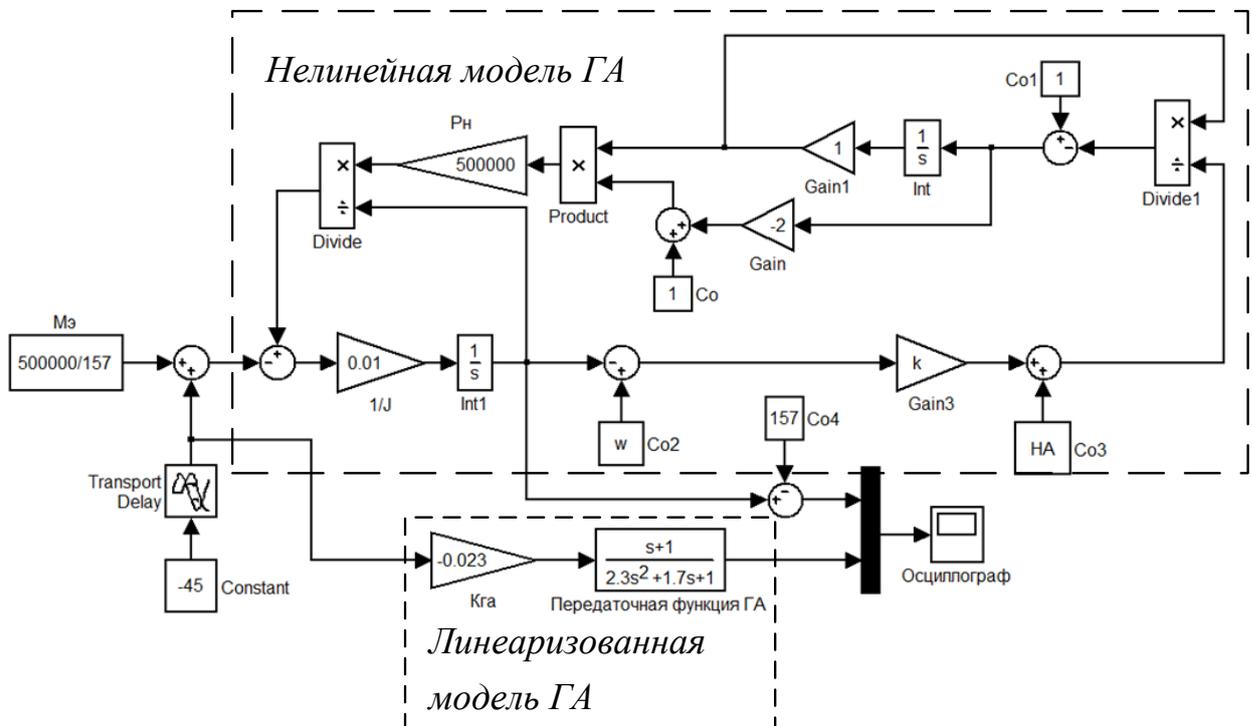


Рисунок 3.4 – Структурная модель ГА и передаточная функция ГА

Из рисунка 3.5 видно, что реакции моделей на ступенчатый сигнал задания практически идентичные.

Переходная функция, рассчитанная по $W_{ГА}(p)$ (3.14):

- время достижения максимальной точки на 5,5 секунде;
- время достижения 5% зоны устойчивости на 8 секунде;
- перерегулирование составляет $\sigma = 15,7\%$

переходной процесс структурной модели ГА (рисунок 2.10.)

- время достижения максимальной точки на 5 секунде;
- время достижения 5% зоны устойчивости на 8,8 секунде;
- перерегулирование составляет $\sigma = 12,8\%$.

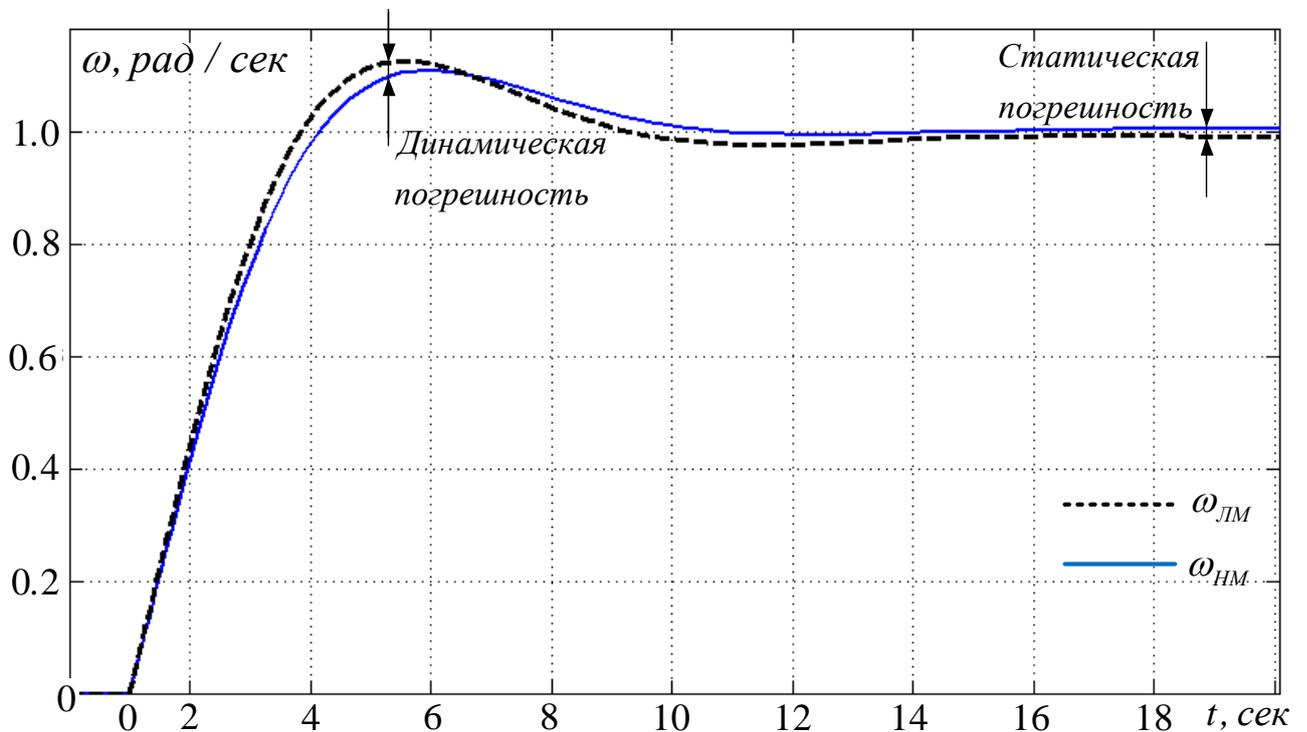


Рисунок 3.5 – Переходные функции ГА. $\omega_{ЛМ}(t)$ - переходная функция рассчитана по линеаризованной модели ГА, $\omega_{НМ}(t)$ - переходная функция по нелинеаризованной модели ГА

Промоделировав и сравнив результаты линейной и нелинейной модели ГА по ступенчатому воздействию электромагнитного момента видим, что линеаризация дает статическую погрешность 1,14%, максимальная динамическая погрешность составила 2,5%.

3.3 Выводы

1. Произведён вывод передаточных функций ГА на основе МДП как объекта управления по угловой скорости вала (3.14) и по генерируемой активной мощности (3.15). В качестве управляющего воздействия рассматривается электромагнитный момент МДП-генератора, заданное значение которого практически безынерционно воспроизводится современными системами векторного управления МДП.

2. При просадках напряжения сети система автоматического управления МДП-генератором может переводить его в режим работы с абсолютно мягкой механической характеристикой вследствие автоматического ограничения токов преобразователя частоты по цепям ротора. Возникновение режимов ГА, при которых генератор имеет абсолютно мягкую механическую характеристику, нежелательно, поскольку такая электрогидромеханическая система может быть колебательной и даже неустойчивой.

3. На основании анализа полинома знаменателя передаточной функции линеаризованной модели управляемого по угловой скорости ГА получены условия устойчивости (3.16) и апериодического характера переходных процессов по угловой скорости вала ГА (3.17) в режиме ограничения электромагнитного момента. Данные условия позволяют производить выбор значений суммарного момента инерции и сечения напорного водовода ГА.

4. Повышение запасов устойчивости и демпфирование колебаний скорости вала ГА в режиме ограничения электромагнитного момента МДП-генератора обеспечивается увеличением суммарного момента инерции на валу ГА и уменьшением постоянной времени водовода T_w . Практически уменьшение T_w реализуется увеличением площади поперечного сечения водовода S_w . Величина T_w обратно пропорциональна S_w .

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДИКИ СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРОВ ГИДРОАГРЕГАТА МИНИ-ГЭС НА ОСНОВЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Как уже было показано в первой главе, мини-ГЭС Таджикистана работают с неизменным открытием направляющих аппаратов турбин. При этом значительная часть воды проходит по обводному руслу, минуя гидротурбину. Ситуация когда естественный приток воды в верхний бьеф меньше, чем расход воды через ГА недопустима, т.к. она будет проводить к понижению уровня воды в водохранилище ниже допустимого и к последующему разрушению гидротурбины.

Предлагаемый в диссертационной работе способ повышения эффективного использования мини-ГЭС позволит:

- вырабатывать электроэнергию в соответствии с потребностями потребителя;
- автоматически осуществлять внеплановую выработку электроэнергии в соответствии сигналом задания, приходящим от диспетчера;
- использовать аккумулирующую способность водохранилища;
- ограничивать минимальное значение уровня воды в водохранилище.

Для осуществления рассмотренных возможностей, автором предложен алгоритм управления расходом воды путем изменения частоты вращения ГА на основе системы подчиненного регулирования угловой скорости и активной мощности ГА мини-ГЭС.

Для реализации данного алгоритма (без воздействия на направляющие аппараты гидротурбин) необходимо применение ГА с переменной частотой вращения вала на основе радиально-осевой гидротурбины с низким коэффициентом быстроходности и генераторного комплекса по схеме машина двойного питания.

Применение на мини-ГЭС РО гидротурбины с ГК на основе МДП позволит нам достичь рационального использования, как электроэнергии, так и гидроресурсов.

Мини-ГЭС с ГА на основе МДП подключена статором МДП к сети бесконечной мощности, а ротор через ПЧ к сети бесконечной мощности. Это позволяет отдавать электроэнергию в сеть бесконечной мощности, как со стороны статора, так и ротора. При изменении задания мощности P_9^Z , должна изменяться выработка активной мощности P_9 МДП-генератора, что реализуется за счет регулирования электромагнитного момента M_9 МДП.

Уменьшение вырабатываемой активной мощности МДП P_9 будет сопровождаться увеличением скорости гидроагрегата. При этом расход воды ГА будет падать за счет центробежного эффекта РО гидротурбины. Из универсальной характеристики РО гидротурбины (рисунок 1.10) видно, что увеличение частоты вращения турбины, работающей с номинально открытым направляющим аппаратом, приводит к уменьшению расхода воды.

За счет запасенной в водохранилище воды ГА будет способен отработать сигнал внеплановой нагрузки приходящей из ОДУ.

Кроме того, появляется возможность кратковременно увеличивать выработку активной мощности мини-ГЭС, расходуя запасённую в водохранилище воду.

4.1 Разработка структуры системы управления гидроагрегата мини-ГЭС

Благодаря современному развитию электроники, создаются электроприводы с высокими динамическими характеристиками. В системе управления электроприводами наибольшее распространение получили структуры с подчинённым регулированием координат (СПР).

Систему управления мини-ГЭС на основе МДП целесообразно строить в виде многоконтурной системы подчиненного регулирования координат.

Для построения СПР необходимо:

1. Произвести выбор регулируемых переменных и законов их взаимосвязанного управления.
2. Осуществить компенсацию основных внутренних перекрестных связей между каналами объекта регулирования путем введения компенсирующих сигналов в САР.
3. Осуществить компенсацию статических нелинейностей объекта регулирования посредством включения в САР нелинейных элементов, воспроизводящих функциональные зависимости, обратные соответствующим зависимостям между регулируемыми переменными.
4. Определить передаточные функций регуляторов в соответствии с принципом подчиненного регулирования с последовательной коррекции параметров.

Система подчиненного регулирования координат характеризуется последовательным включением регуляторов, число которых соответствует количеству регулируемых координат [81,80,82]. Для управления ГА мини-ГЭС целесообразно принять трехконтурную систему регулирования координат: внутренний контур скорости ГА, контур активной мощности ГА и внешний контур регулирования уровня воды в водохранилище мини-ГЭС.

Предлагаемая функциональная схема, построенная по указанному принципу, представлена на рисунке 4.1. На входе регулятора каждого из контуров сравниваются сигналы, пропорциональные заданному и действительному значениям выходной координаты данного контура, а выходной сигнал регулятора служит задающим сигналом для последующего контура. Важным достоинством данной структуры является также возможность простыми средствами осуществлять ограничение любой из регулируемых координат системы. В зависимости от конкретных условий пределы ограничения могут изменяться по заданному закону [83].

бьефе водохранилища. Сумма выходного сигнала РУ с $P_{дисп.}^Z$ является сигналом задания мощности для подчиненного внутреннего контура мощности.

Оптимизация предлагаемой системы методом последовательной коррекции справедлива в соблюдении следующих условий: переменные САУ ГА должны изменяться в малых пределах; регуляторы не должны входить в режим ограничения.

4.2 Методика синтеза контура регулирования скорости гидроагрегата на основе МДП

Мини-ГЭС на основе МДП является нелинейным объектом управления, характеризующимся совокупностью линейных подобъектов, связанных между собой нелинейной функциональной зависимостью. Возможна реализация регуляторов в виде линейных активных фильтров, исходя из оптимальной передаточной функции замкнутых контуров регулирования.

Систему регулирования ГА мини-ГЭС на основе МДП нужно синтезировать таким образом, чтобы система обеспечивала в установившихся режимах поддержание частоты вращения. В динамике САР должна обеспечивать быстрый выход скорости $\omega(t)$ на уровень задания. В динамических режимах САР скорости должна обеспечивать ограничение скольжения ротора асинхронной машины на заданном уровне, исходя из условия ограничения напряжения преобразователя частоты со стороны цепей ротора.

Эти требования достигаются при синтезе САР за счет максимального уточнения динамических свойств ГА мини-ГЭС.

Рассмотрим функциональную схему САР ГА мини-ГЭС, приведенную выше (рисунок 4.1), по контурам.

Как было сказано в разделе 4.1, САУ ГА мини-ГЭС система состоит из нескольких контуров. Рассмотрим внутренний контур – контур регулирования скорости (КРС).

На рисунке 4.2 приведена структурная схема внутреннего контура скорости, содержащая линеаризованную модель объекта управления в малых отклонениях.

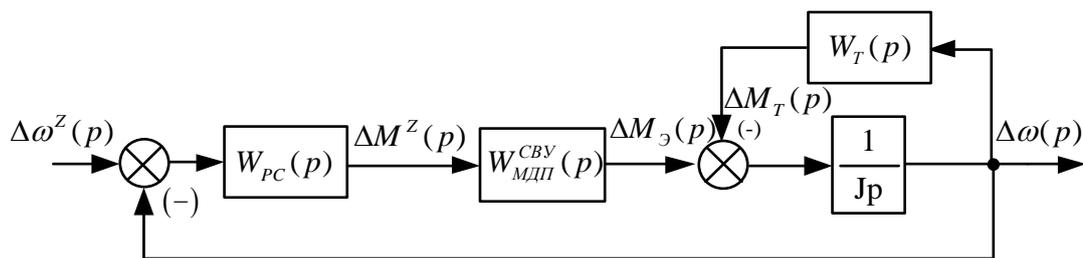


Рисунок 4.2 – Структурная схема КРС

Исследуемый объект управления сам по себе является нестандартным объектом управления для систем управления электроприводами. Для безаварийной работы ГК необходимо ограничивать частоту вращения ГА, из-за ограничений напряжения ПЧ по цепям ротора. Увеличение выработки электроэнергии, в рассмотренном ЭП требует увеличения электромагнитного момента, что приводит к уменьшению угловой скорости ω и, соответственно, к изменению ЭДС в роторной части электрической машины.

На этапе синтеза КРС принято допущение о безынерционности СВУ управления МДП-генератора по моменту. Структурная схема синтезируемого КРС при указанном допущении приведена на рисунке 4.3.

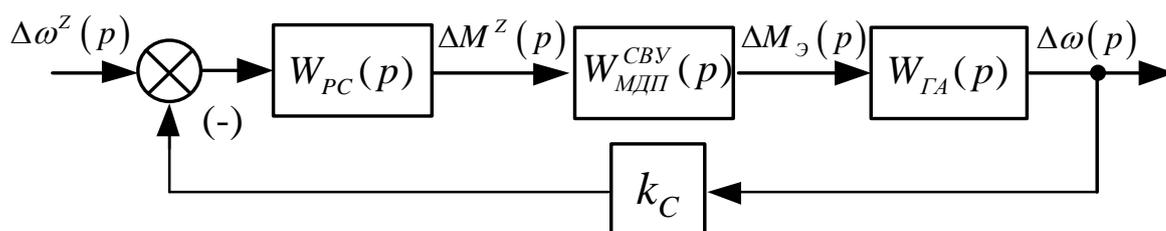


Рисунок 4.3 – Структурная схема контура регулирования скорости

На рисунке 4.3 $W_{PC}(p)$ – передаточная функция регулятора скорости; $W_{MДП}^{СВУ}(p)$ – передаточная функция МДП с СВУ; $\Delta M_{э}(p)$ – электромагнитный момент МДП; $W_{ГА}(p)$ – передаточная функция ГА; k_C – коэффициент обратной связи по скорости.

Для создания методики синтеза контура регулирования скорости, воспользуемся методом последовательной коррекции.

В структуру регулятора введем звено, передаточная функция которого обратна по отношению к передаточной функции компенсируемого звена,

$$W_{PCП}(p) = [W_{ГА}(p)]^{-1}. \quad (4.1)$$

Для обеспечения астатизма КРС в структуру регулятора последовательно введем интегрирующее звено,

$$W_{ПСИ}(p) = \frac{1}{T_1 p}. \quad (4.2)$$

Приведем передаточную функцию регулятора скорости к виду,

$$W_{PC}(p) = [W_{ГАС}(p)]^{-1} \cdot \frac{1}{T_1 p}. \quad (4.3)$$

Параметры компенсирующей части регулятора полностью определяются параметрами гидроагрегата. Единственный варьируемым параметром регулятора будет являться постоянная времени его интегрирующего звена T_1 .

Здесь $T_1 = a \cdot T_\mu$. T_1 выразили в долях от некомпенсируемой постоянной времени, используя коэффициент $a = 2$. Некомпенсированная постоянная времени $T_\mu = \Sigma T_c = T_{ЭМ}$ равна сумме некомпенсированных постоянных времени системы. Учитывая сказанное в первой главе, величину T_μ примем равной 0,01 секунды.

В результате, передаточная функция регулятора скорости примет вид,

$$W_{PC}(p) = \frac{P_H k_\mu^\omega + M_T}{\omega_0} \cdot \frac{\frac{J \omega_0 \frac{\mu_0 T_W}{2} p^2}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} + \frac{1}{P_H k_\mu^\omega + M_T^0} \left(J \omega_0 - P_H k_\mu^\omega \mu_0 T_W + M_T^0 \frac{\mu_0 T_W}{2} \right) p + 1}{k_\varepsilon k_c \left(\mu_0 \frac{T_W}{2} p + 1 \right) 2 T_\mu p}.$$

Для синтеза последующего регулятора - регулятора активной мощности, необходимо определить передаточную функцию замкнутого КРС. Сначала определим передаточную функцию разомкнутой системы. Для получения

передаточной функции разомкнутой системы размыкаем главную обратную связь и точку разрыва считаем входом и выходом системы рисунке 4.3. Затем преобразуем структурную схему САУ. По правилу определения передаточной функции нескольких последовательно соединённых звеньев найдем результирующую передаточную функцию.

Определим передаточную функцию разомкнутого КРС:

Получим выражение

$$W_{раз}(p) = W_{PC}(p) \cdot W_{МДП}(p) \cdot W_{ГА}(p) \cdot W_{OC}(p), \quad (4.4)$$

где $W_{МДП}^{CBY}(p) = \frac{k_{\mathcal{E}}}{T_{\mathcal{EM}}p + 1}$ - передаточная функция по электромагнитному

моменту СВУ МДП;

$W_{OC}(p) = k_C$ - коэффициент обратной связи по скорости.

При синтезе регулятора скорости передаточную функцию замкнутого контура скорости с достаточной степенью точности можно принять в виде,

$$W_{KPC}(p) = \frac{1/k_C}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu}p + 1}. \quad (4.5)$$

При $a = 2$ (4.5) соответствует колебательному звену с коэффициентом демпфирования $\xi = 1/\sqrt{2} = 0.707$.

Получаем передаточную функцию регулятора скорости

$$W_{PC}(p) = W_{ПДД}(p) \cdot W_{\Phi}(p),$$

$\frac{J\omega_0 - T_W P_H \mu_0 k_{\mu}^{\omega} + \mu_0 M_T^0 \frac{T_W}{2}}{\omega_0 k_{\mathcal{E}} k_C 2T_{\mu}}$ - коэффициент усиления пропорциональной части

регулятора скорости,

$\frac{M_T^0 + k_{\mu}^{\omega} P_H}{k_{\mathcal{E}} k_C \omega_0 2T_{\mu}}$ - коэффициент усиления интегральной части регулятора скорости,

$\frac{J\mu_0 T_W}{k_{\mathcal{E}} k_C 4T_{\mu}}$ - коэффициент усиления дифференциальной части регулятора скорости,

$W_{\phi}(p) = \frac{1}{\mu_0 \frac{T_w}{2} p + 1}$ - передаточная функция, компенсирующая инерционность

воды в водоводе.

Коэффициент обратной связи по скорости определяется из соотношения

$$k_{OC} = \frac{U_{PM \max}}{\omega_H},$$

где - $U_{PM \max} = 10 \div 15 B$ максимальное значение задающего сигнала напряжения на выходе РМ.

Промоделируем синтезированный контур регулирования скорости в среде Simulink. На рисунке 4.4 приведена математическая модель КРС ГА мини-ГЭС на основе МДП с СВУ, состоящая из блока сигнала задания с ОДУ, регулятора скорости, МДП с СВУ и передаточной функции ГА.

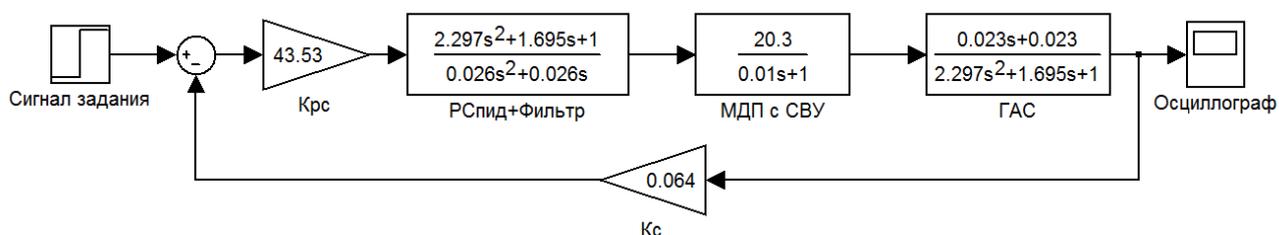


Рисунок 4.4 – Математическая модель КРС ГА на основе МДП

На вход системы подается единичный ступенчатый сигнал задания скорости и КРС обрабатывает заданный сигнал. Переходная характеристика КРС приведена на рисунке 4.5.

Переходный процесс (рисунок 4.5) имеет незначительное перерегулирование. Прямые показатели качества синтезированной САУ КРС, полученные из графика переходного процесса:

время вхождения 5% зону - 0,041 сек.;

перерегулирование - 4,3%;

время достижения максимальной точки - 0,0624 сек.

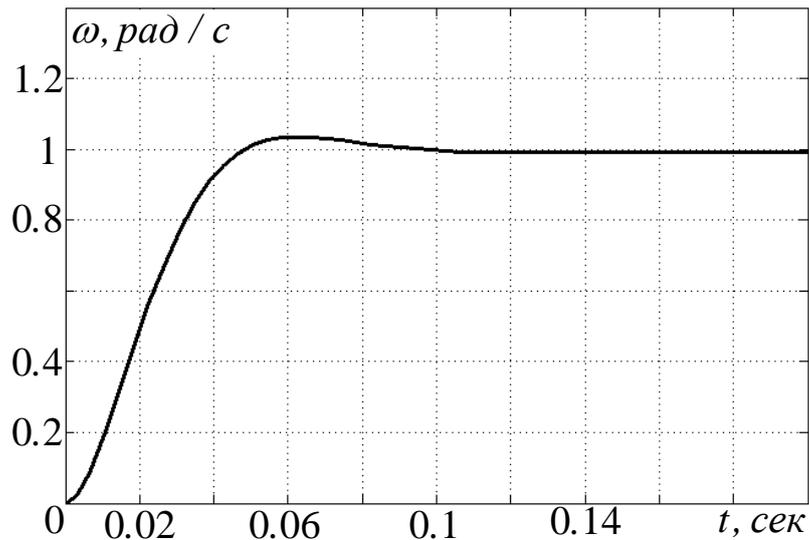


Рисунок 4.5 – Переходная функция КРС ГА на основе МДП

Для точного ограничения скольжения асинхронной машины в динамических режимах целесообразно применение КРС в системе автоматического регулирования активной мощности. Кроме того, КРС позволит избежать волновых процессов изменения давления в водоводе, которые могут негативно влиять на ГА.

4.4 Методика синтеза контура регулирования активной мощности гидроагрегата на основе МДП

Произведём синтез второго контура СПР - контура регулирования мощности (рисунок 4.6). Контур мощности является внешним по отношению к внутреннему контуру - контуру регулирования скорости. Расчетная схема контура регулирования мощности мини-ГЭС на основе МДП содержит в себе регулятор мощности с передаточной функцией $W_{PM}(p)$, оптимизированный контур скорости с передаточной функцией $W_{KPC}(p)$ и объект управления с передаточной функцией $W_{ГАМ}(p)$. Выходной сигнал регулятора мощности следует ограничить из-за ограниченной способности силового преобразователя по напряжению, так как напряжение преобразователя по цепям ротора зависит от диапазона регулирования скольжения. Из-за технических (из рассмотрения статических

характеристик гидротурбин - Глава 1 и экономических показателей рекомендован диапазон регулирования скорости 1:2.

В данном контуре регулируемой величиной является активная мощность МДП-генератора.

Как было показано выше, структура КРМ состоит из передаточной функции регулятора мощности, оптимизированного КРС и регулируемой по мощности гидротурбины. Воспользуемся передаточной функцией (3.19) по активной мощности МДП-генератора, приведенной в главе 3, $W_{ГМ}(p)$.

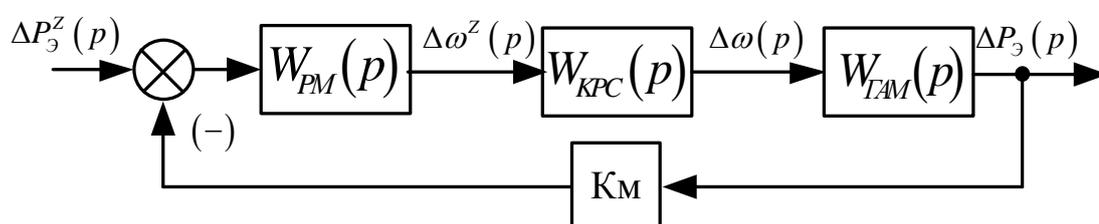


Рисунок 4.6 – Структурная схема контура регулирования активной мощности

Запишем передаточную функцию регулятора мощности

$$W_{PM}(p) = [W_{ГМ}(p)]^{-1} \cdot \frac{1}{T_2 p}.$$

Как и ранее было рассмотрено, единственным варьируемым параметром регулятора является величина постоянной времени T_2 его интегрирующего звена. Настроим систему на модульный оптимум по условию

$$T_2 = 2T_1 = 4T_\mu.$$

Рассмотрим передаточную функцию контура регулирования мощности (КРМ) при настройке на модульный оптимум.

При синтезе регулятора мощности передаточная функция замкнутого контура скорости с достаточной степенью точности (ввиду малости некомпенсируемой постоянной времени T_μ) аппроксимируется выражением

$$W_{KPC}(p) = \frac{1/k_C}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1} = \frac{1/k_C}{2T_\mu p + 1}. \quad (4.6)$$

Тогда некомпенсируемой малой постоянной времени в контуре мощности является величина $T_{\mu m} = 2T_1$.

Запишем передаточную функцию для САР мощности в разомкнутом состоянии,

$$\begin{aligned} W_{PA3.KPM}(p) &= W_{PM}(p) \cdot W_{KPC}(p) \cdot W_{ГAM}(p) = \\ &= [W_{ГAM}(p)]^{-1} \cdot \frac{1}{T_{\mu m} p} \cdot \frac{1/\kappa_c}{2T_{\mu} p + 1} \cdot W_{ГAM}(p). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Найдем передаточную функцию замкнутой системы, настроенной на модульный оптимум

$$W_{KPM}(p) = \frac{1/k_{OM}}{8T_{\mu}^2 p^2 + 4T_{\mu} p + 1}. \quad (4.8)$$

В итоге получаем регулятор мощности с передаточной функцией вида,

$$W_{PM}(p) = \frac{\mu_0 k_C \frac{T_W}{2} p + k_C}{(M_T^0 + k_{\mu}^{\omega} P_H) \left(\frac{J \omega_0 \mu_0 \frac{T_W}{2} p^2}{P_H k_{\mu}^{\omega} + M_T^0} + \frac{1}{P_H k_{\mu}^{\omega} + M_T^0} \left(J \omega_0 - T_W \mu_0 P_H k_{\mu}^{\omega} + \mu_0 M_T^0 \frac{T_W}{2} \right) p + 1 \right) 4T_{\mu} k_{OM} p},$$

где $\frac{\mu_0 k_C \frac{T_W}{2}}{4T_{\mu} k_{OM}}$ - коэффициент усиления пропорциональной части регулятора

мощности;

$\frac{k_C}{4T_{\mu} k_{OM}}$ - коэффициент усиления интегральной части регулятора мощности;

$$W_{\Phi GA}(p) = \frac{1}{(M_T^0 + k_{\mu}^{\omega} P_H) \left(\frac{J \omega_0 \mu_0 \frac{T_W}{2} p^2}{P_H k_{\mu}^{\omega} + M_T^0} + \frac{1}{P_H k_{\mu}^{\omega} + M_T^0} \left(J \omega_0 - T_W \mu_0 P_H k_{\mu}^{\omega} + \mu_0 M_T^0 \frac{T_W}{2} \right) p + 1 \right)}$$

передаточная функция фильтра, который компенсирует собственные динамические свойства ГА.

Расчетное значение коэффициента обратной связи по мощности определяется из выражения,

$$k_{OM} = \frac{U_{\max}^z}{P_H},$$

где $U_{\max}^z = 10 \div 15B$ - максимальное значение напряжения задания генерируемой активной мощности; P_H - номинальное значение генерируемой активной мощности ГА мини-ГЭС.

Для проверки расчетных параметров и определения работоспособности синтезированного КРМ, синтезированная САП была промоделирована в среде Matlab/Simulink (рисунок 4.7).

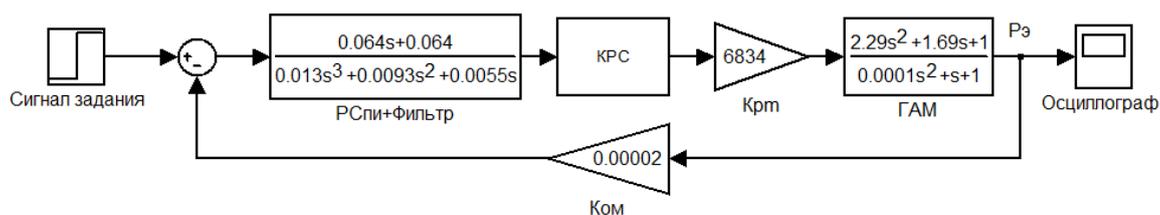


Рисунок 4.7 – Математическая модель КРМ ГА на основе МДП

Модель состоит из источника сигнала задания, регулятора мощности (РМ), контура регулирования скорости, передаточной функции РО гидротурбины.

Сигнал задания мощности КРМ складывается из двух сигналов, местный сигнал и внешний, поступающий из ОДУ. Местный сигнал задания мощности устанавливается непосредственно на мини-ГЭС, а внешний сигнал задания приходит из ОДУ.

На вход системы подается единичный ступенчатый сигнал задания мощности, и система обрабатывает заданный сигнал. Переходный процесс исследуемой системы приведен на рисунке 4.8.

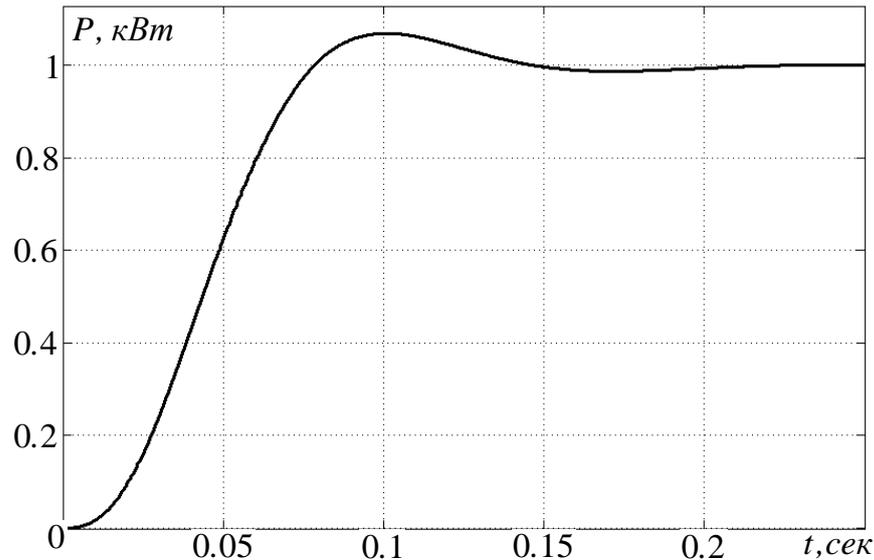


Рисунок 4.8 – Переходная функция КРМ ГА мини-ГЭС на основе МДП

На рисунке 4.8 представлен переходной процесс по мощности ГА на основе МДП-генератора. Переходной процесс имеет незначительное перерегулирование. Прямые показатели качества синтезированной САР КРМ, полученные из графика переходного процесса:

- время вхождения в 5% зону – 0,1с;
- перерегулирование $\sigma = 6.8\%$.

По полученным результатам моделирования можно с уверенностью говорить о целесообразности применения предлагаемой САР для оперативного изменения вырабатываемой активной мощности в динамических режимах работы электроэнергетической системы.

Создание мини-ГЭС на основе предлагаемого алгоритма управления позволит:

- повысить эффективность использования гидроэнергоресурсов без применения приводов для воздействия на направляющие аппараты турбин;
- уменьшить время восстановления баланса между потребляемой и генерируемой активными мощностями при внезапных изменениях режимов работы энергосистемы.

4.5 Моделирование динамических режимов работы двухконтурной САР активной мощности гидроагрегата на основе МДП

В данном разделе представлены результаты цифрового моделирования САР активной мощности ГА мини-ГЭС на основе МДП номинальной мощностью $P_H = 500 \text{ кВт}$, расположенной в населенном пункте Артуч Республики Таджикистан [Приложение А].

Для подтверждения полученных результатов был промоделирован предлагаемый алгоритм управления на основе СПР для ГА мини-ГЭС с предлагаемым методом решения поставленной задачи в программе MATLAB/Simulink. В дальнейшем модель ГА на основе МДП рассматривалась в динамике при ступенчатом изменении сигнала задания по мощности. Пуск ГА является отдельным вопросом и в данной диссертационной работе не рассматривается.

В данной работе рассматривается только отработка изменения задания мощности от ОДУ.

Современный уровень развития цифровой техники позволяет моделировать сложные процессы на ЭВМ для адекватной оценки проектируемой системы. В данном разделе используется математическая модель ГА при $\omega = var$ с учетом массы воды в напорном водоводе, полученная в главе 2.

Данный раздел посвящен исследованию новой методики расчета регуляторов мини-ГЭС на основе МДП с использованием разработанной в главе 2 математической модели гидротурбины.

На рисунке 4.9 представлена структурная модель ГА на основе МДП с СВУ с применением алгоритма управления на основе принципа подчиненного регулирования координат.

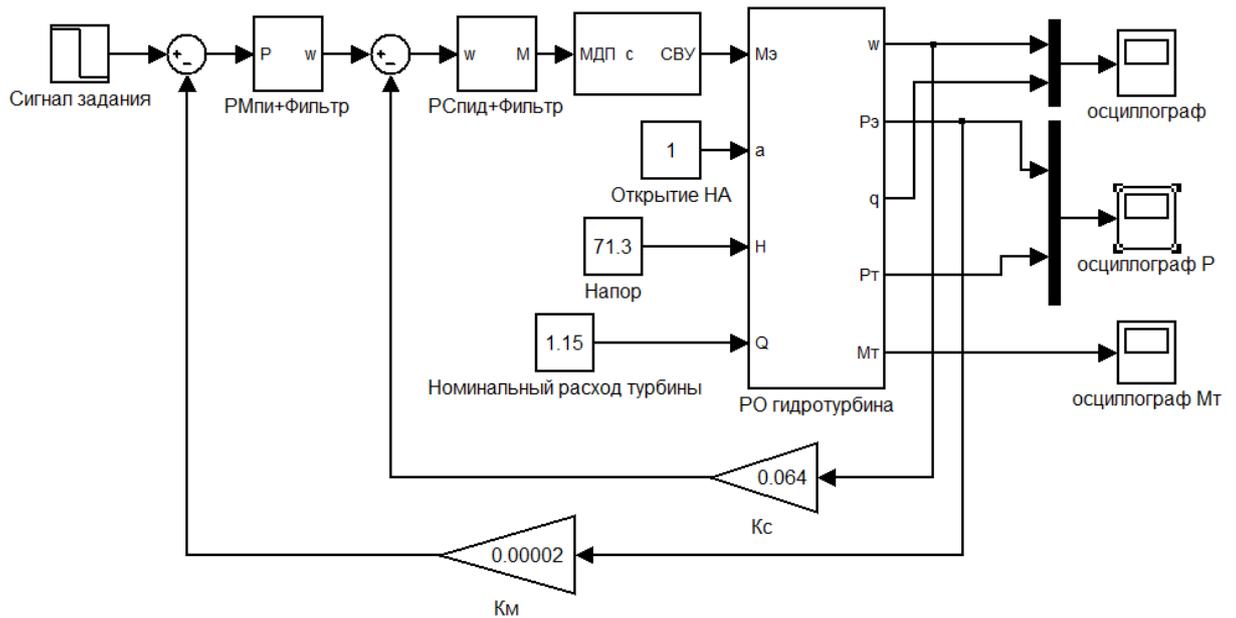


Рисунок 4.9 – Структура модели ГА на основе МДП с СВУ

На предлагаемой автором модели были промоделированы все возможные режимы работы ГА. Данная модель позволяет визуально увидеть влияние изменения любого из параметров системы, что позволяет лучше настроить систему и позволит сократить время наладки гидроагрегатов.

Для подтверждения (или проверки) эффективности предлагаемой методики синтеза САР ГА мини - ГЭС на основе МДП. Рассмотрим двухконтурную систему подчиненного реагирования координат для ГА мини - ГЭС без ограничения регулируемых координат: скорости и момента.

Результаты цифрового моделирования приведены на рисунках 4.10 - 4.13 ГА обрабатывает увеличение задания активной мощности. Как видно из рисунков 4.10 - 4.13, при увеличении сигнала задания мощности увеличивается электромагнитный момент $M_{э}$ МДП-генератора. В начальный период времени мощность гидротурбины уменьшается, а затем, постепенно нарастает до установившегося значения. Этот эффект объясняется следующим образом. При увеличении электромагнитного момента МДП динамический момент ГА уменьшается. Это приводит к торможению ГА. Угловая скорость вала начинает уменьшаться (рисунок 4.12). При этом центробежная сила препятствующая

прохождению воды через НА, уменьшается, что приводит к понижению давления перед НА. Понижение давления, далее, приводит к уменьшению мощности гидротурбины до тех пор, пока расход воды не увеличится (рисунок 4.12). После того как расход воды увеличивается, мощность гидротурбины начинает увеличиваться за счет увеличения расхода воды до нового установившегося значения. Из динамической характеристики рисунок 4.13 можно видеть зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА.

Из переходных характеристик (рисунок 4.10) видно, что система практически мгновенно обрабатывает сигнал задания по активной мощности, что также иллюстрирует на рисунок 4.11 (за 0.1 секунды система обрабатывает сигнал задания по активной мощности).

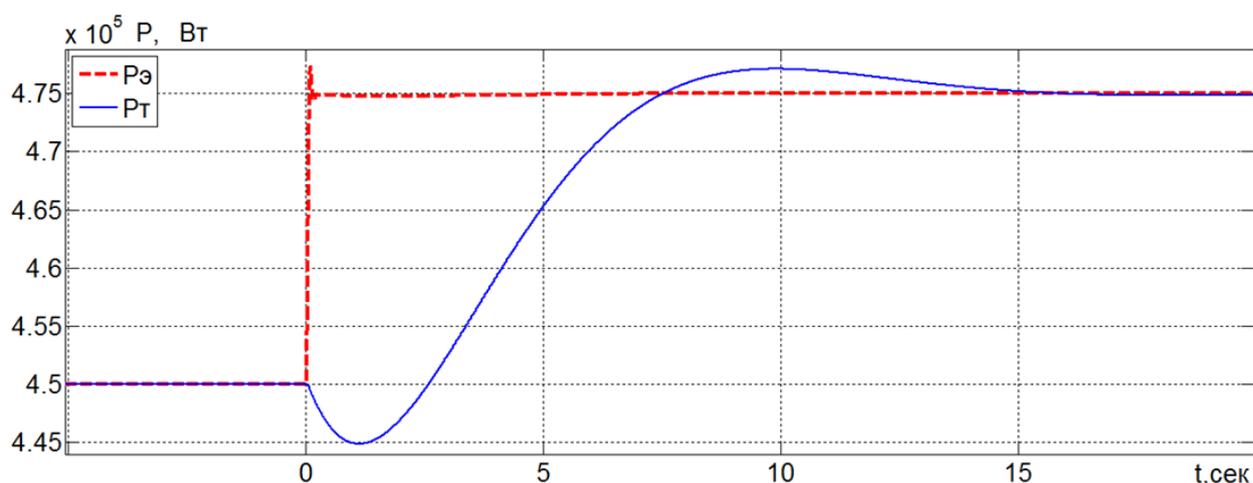


Рисунок 4.10 – Переходные процессы по активной мощности ГА на основе МДП

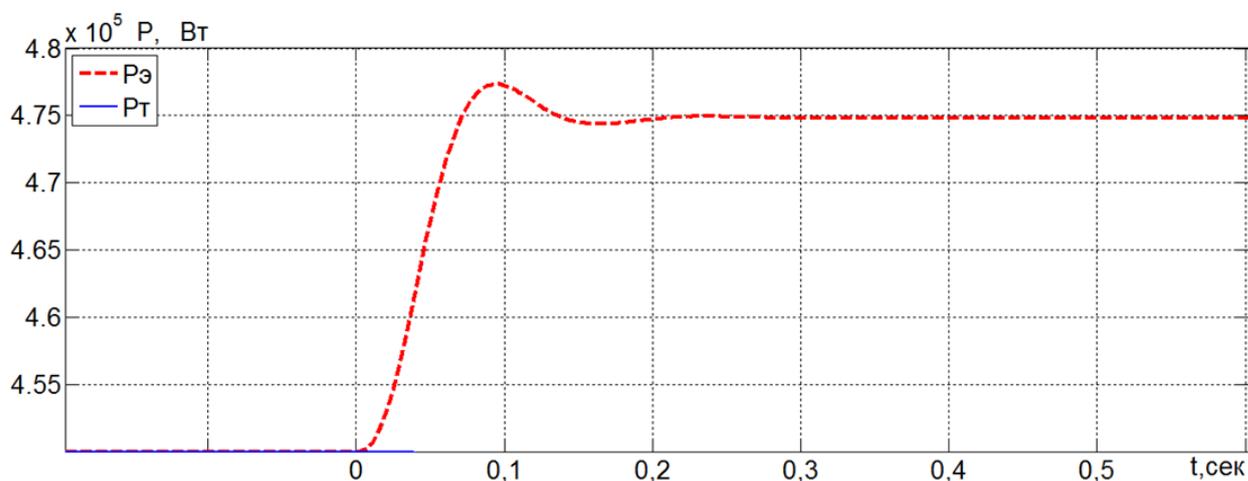


Рисунок 4.11 – Начальный участок переходного процесса рисунок 4.10

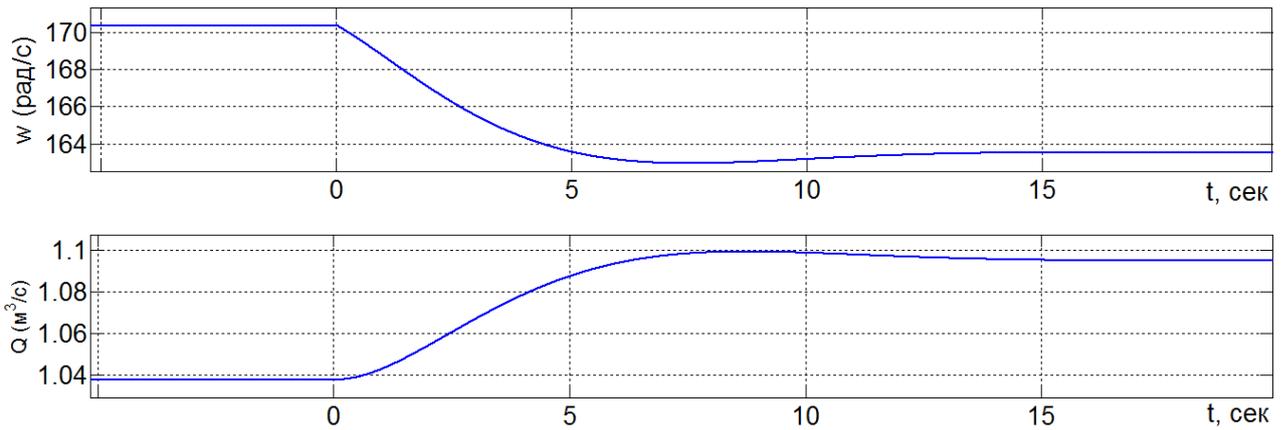


Рисунок 4.12 – Переходные процессы ГА по угловой скорости вала и расходу воды

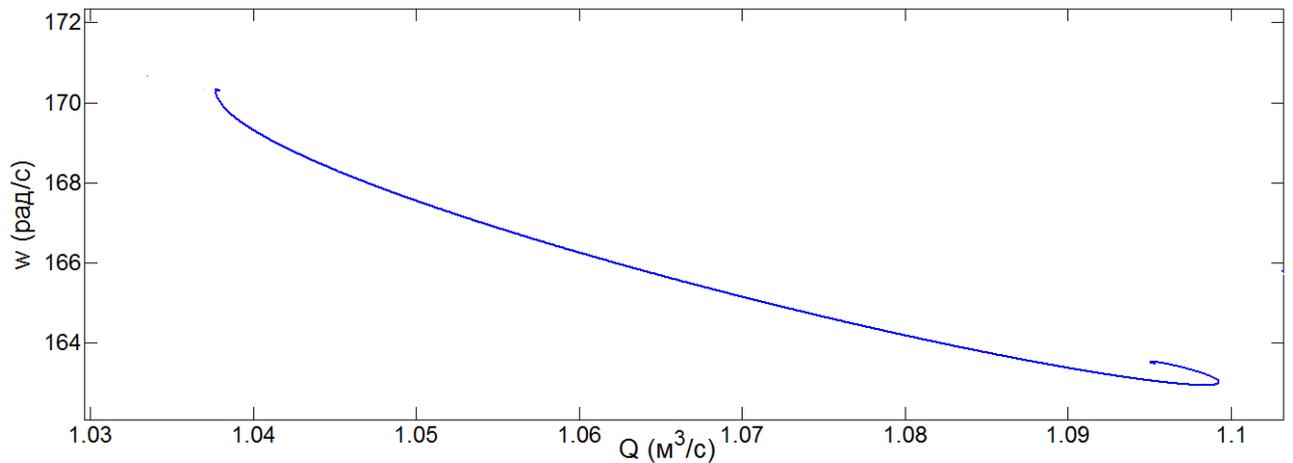


Рисунок 4.13 – Динамическая зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА

На рисунках 4.14-4.16 приведены переходные характеристики при уменьшении сигнала задания по мощности (быстро обрабатывается сигнал задания по мощности).

Как видно из рисунков 4.14 - 4.16, при уменьшении сигнала задания по активной мощности уменьшается электромагнитный момент $M_{\text{э}}$ МДП. В начальный период времени мощность гидротурбины увеличивается, а затем, постепенно снижается до нового установившегося значения. Этот эффект объясняется следующим образом. При уменьшении электромагнитного момента МДП динамический момент ГА увеличивается. Это приводит к ускорению ГА, угловая скорость вала увеличивается (рисунок 4.15). При этом центробежная

сила, препятствующая прохождению воды через НА, увеличивается, что приводит к повышению давления перед НА. Повышение давления, далее, приводит к увеличению мощности гидротурбины до тех пор, пока расход воды не уменьшится (рисунок 4.14). После того как расход воды начал уменьшаться, мощность гидротурбины начинает снижаться за счет уменьшения расхода воды до нового установившегося значения. Из динамической характеристики (рисунок 4.16) можно видеть зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА.

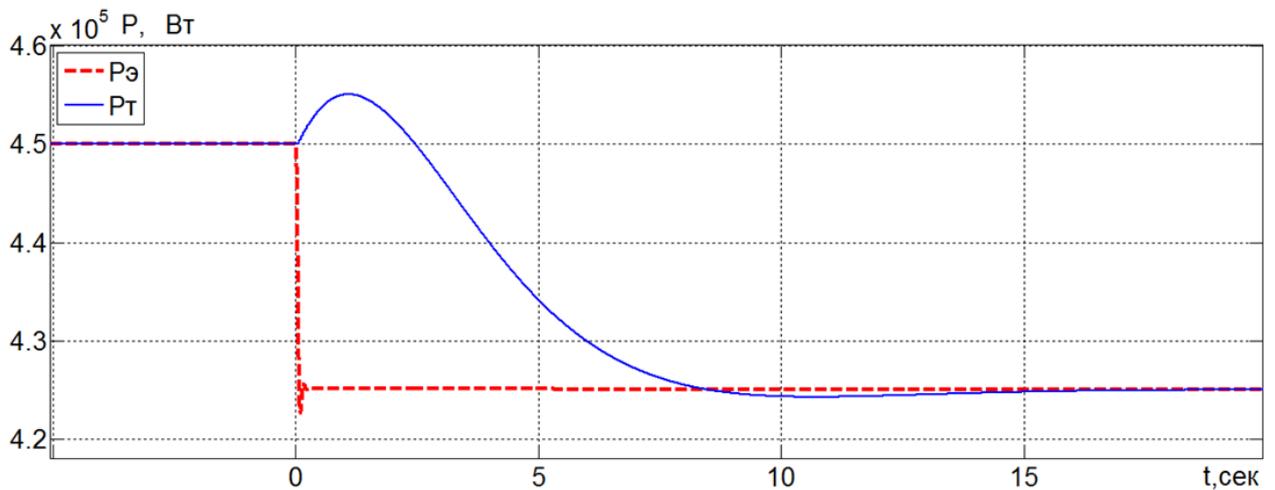


Рисунок 4.14 – Процессы ГА на основе МДП по активной мощности

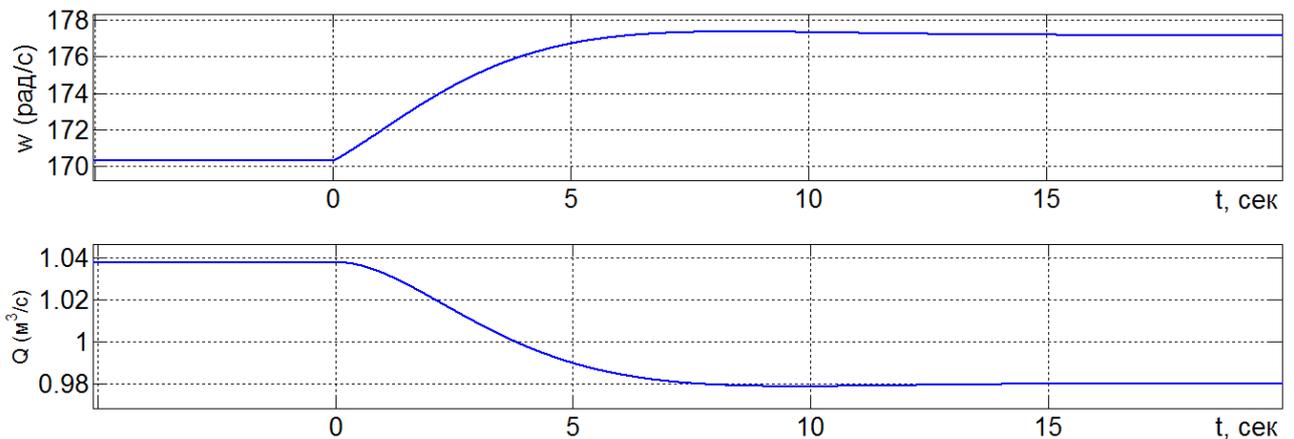


Рисунок 4.15 – Переходные процессы ГА по угловой скорости вала и расходу воды

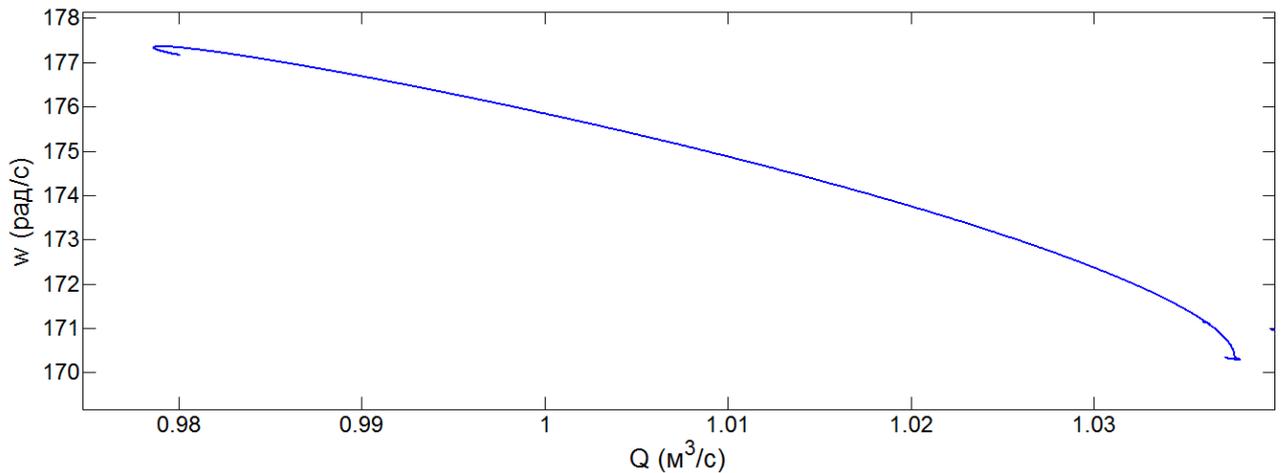


Рисунок 4.16 – Динамическая зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА

Отработка сигнала задания моменту

Рассмотрим работу ГА при отсутствии замкнутых контуров регулирования. На вход МДП с СВУ подаётся ступенчатый сигнал задания по моменту. СВУ МДП безынерционно обрабатывает данный сигнал. Реакция основных переменных (координат) системы на ступенчатый сигнал задания показана на рисунках 4.18 - 4.25.

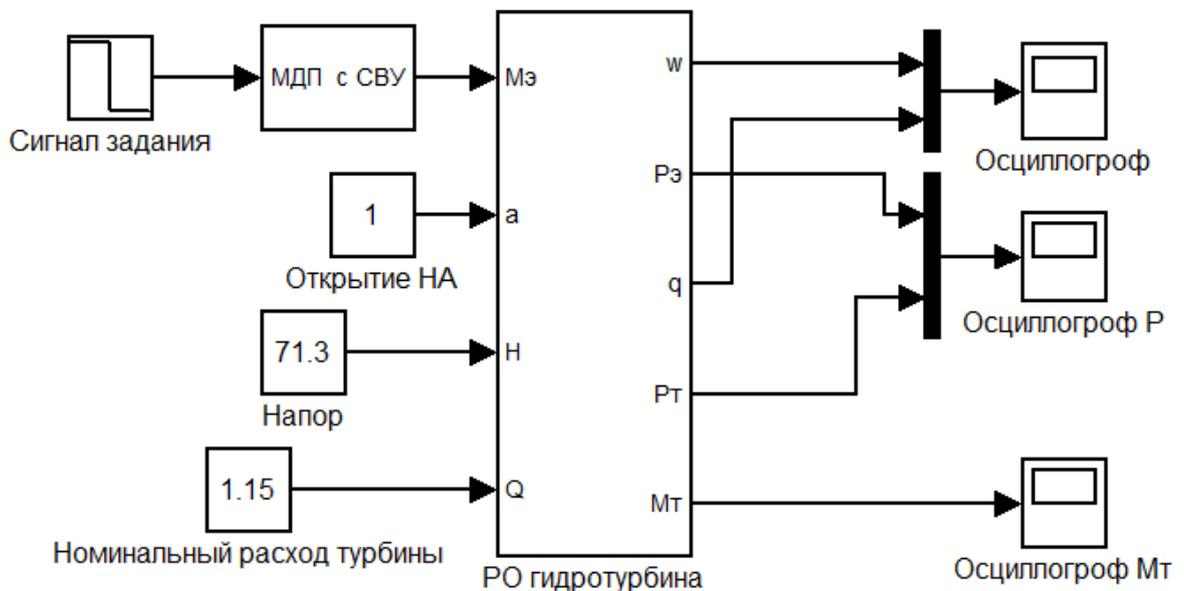


Рисунок 4.17 – Структура модели ГА на основе МДП с СВУ без ограничения по моменту

Из переходного процесса по моменту (рисунок 4.18) видно, что система мгновенно обрабатывает сигнал задания по электромагнитному моменту. При этом отсутствует перерегулирование. Момент гидротурбины достигает установившегося значения примерно через 10 секунд (рисунок 4.18).

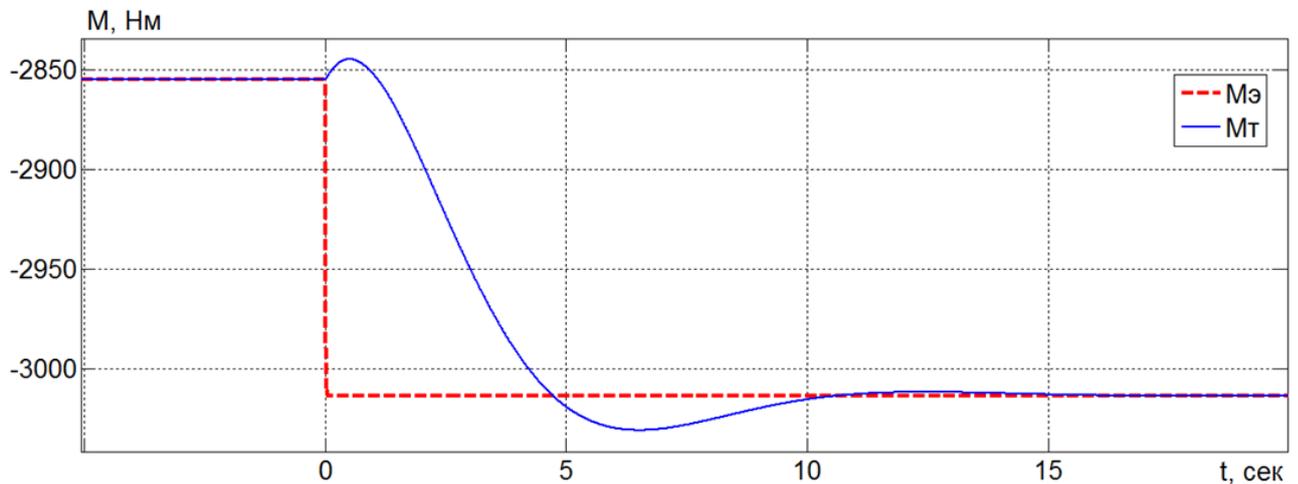


Рисунок 4.18 – Переходные процессы по моменту ГА на основе МДП

Из переходных процессов по мощности (рисунок 4.19) видно, что электрическая мощность ГА изменяется мгновенно, т.к. этому не препятствуют какие либо инерционности. Максимальное значение по электрической мощности достигается в первый момент начала переходного процесса, а затем, за счет уменьшения угловой скорости вала ГА, электрическая мощность спадает до установившегося значения. На рисунке 4.20 представлены переходные процессы по угловой скорости и расходу воды. При увеличении электромагнитного момента гидротурбина начинает тормозиться. При этом уменьшается центробежная сила, препятствующая прохождению воды через НА. При увеличении расхода воды повышается момент гидротурбины, что приводит к росту мощности ГА.

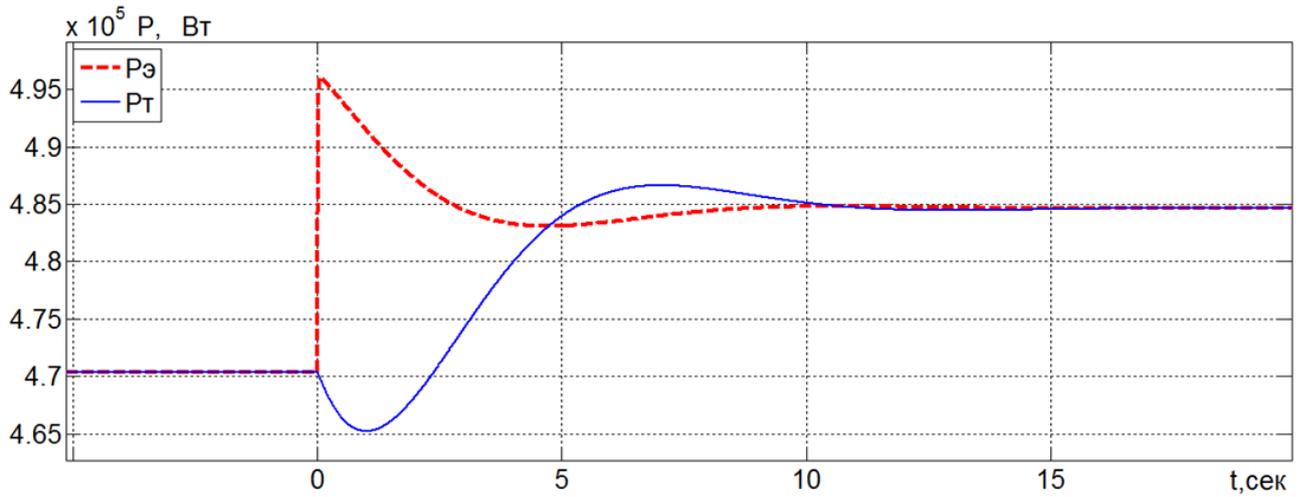


Рисунок 4.19 – Переходные процессы по активной мощности ГА на основе МДП

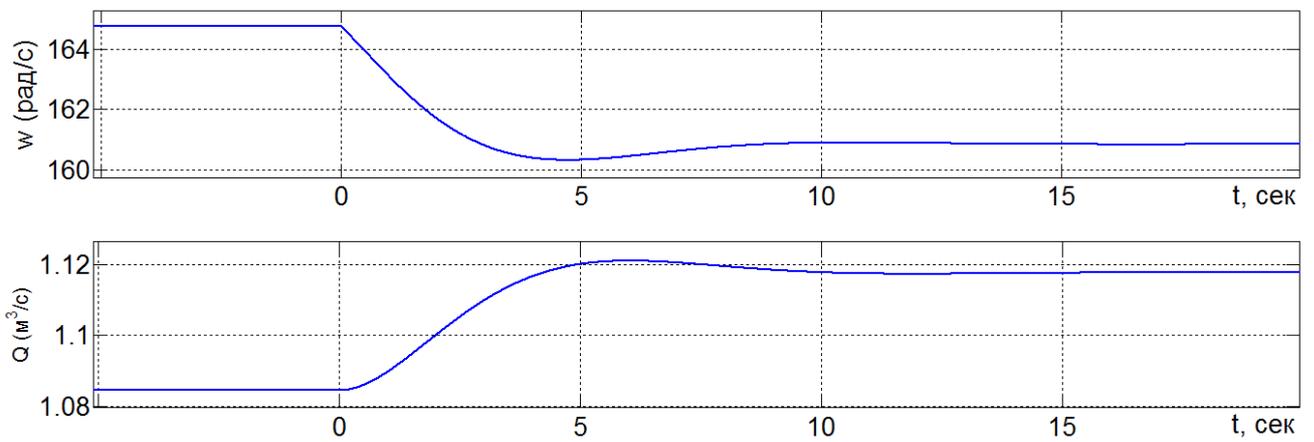


Рисунок 4.20 – Переходные процессы ГА по угловой скорости вала и расходу воды

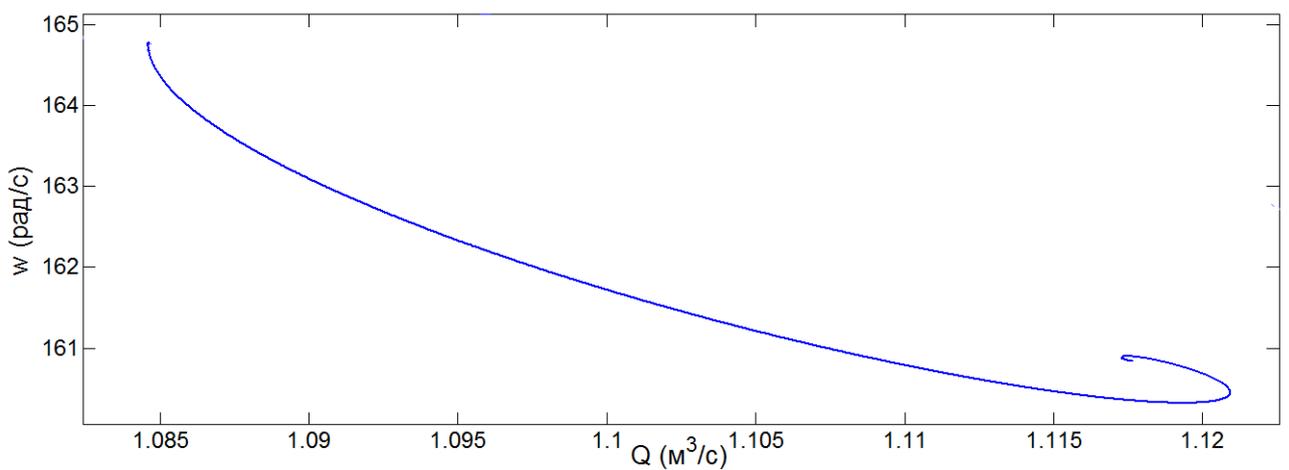


Рисунок 4.21 – Динамическая зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА

На рисунках 4.22 - 4.25 представлены переходные процессы при уменьшении сигнала задания по моменту. На временных диаграммах можно видеть процессы, аналогичные тем, что и при увеличении сигнала задания по моменту.

Рассмотрим переходные процессы основных переменных (координат), полученные при моделировании работы разомкнутой по скорости и активной мощности САР ГА мини - ГЭС на основе МДП.

Как видно из рисунков 4.22 - 4.25, при уменьшении электромагнитного момента $M_{\text{Э}}$ МДП, электрическая активная мощность мгновенно подает до минимального значения, а мощность гидротурбины в начальный период времени увеличивается а, затем, постепенно снижается до нового установившегося значения. В то же время, до установившегося значения возрастает электрическая активная мощность. Из динамической характеристики (рисунок 4.25) можно увидеть зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА.

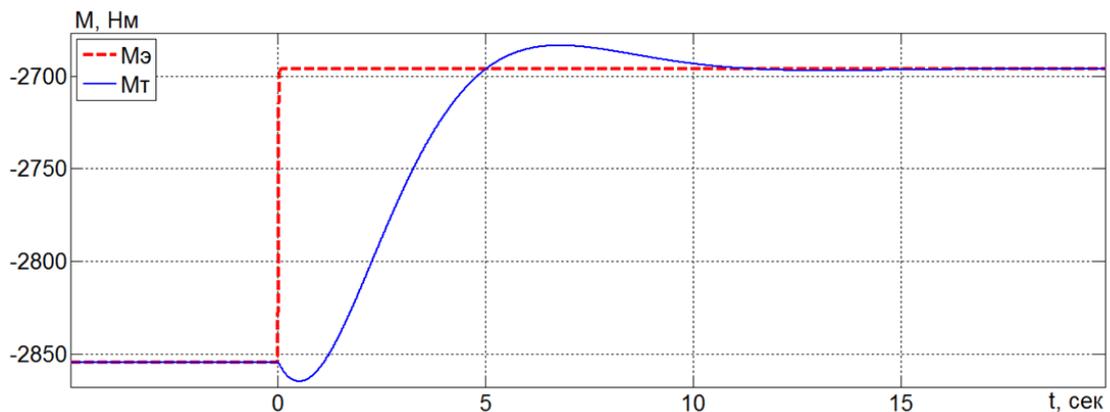


Рисунок 4.22 – Переходные процессы по моменту ГА на основе МДП

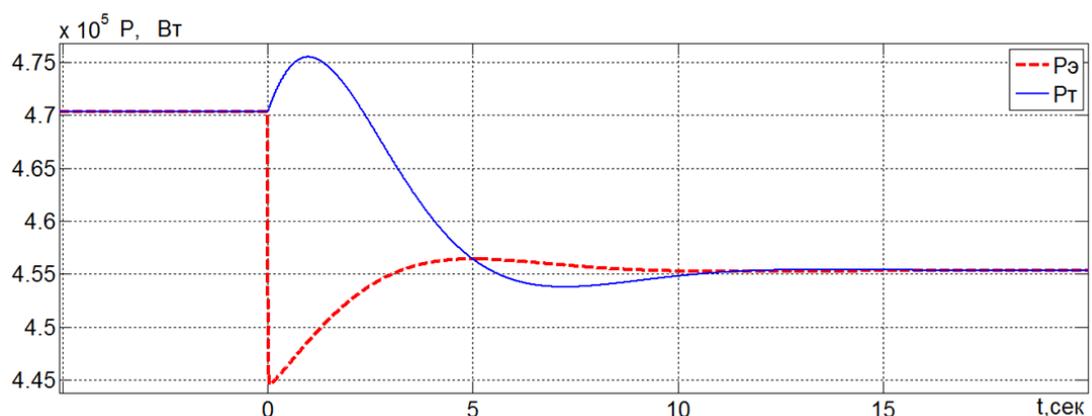


Рисунок 4.23 – Переходные процессы по активной мощности ГА на основе МДП

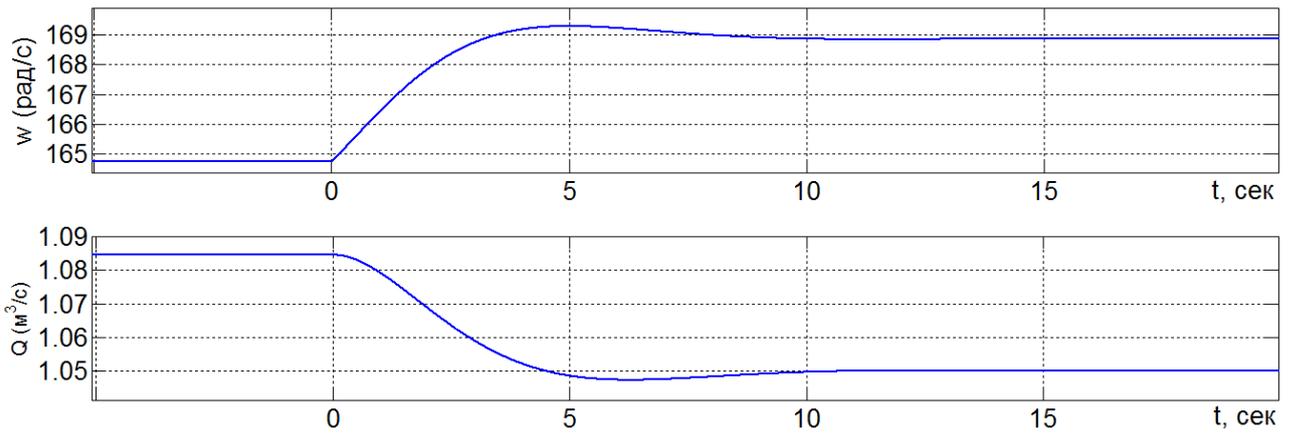


Рисунок 4.24 – Переходные процессы ГА по угловой скорости вала и расходу воды

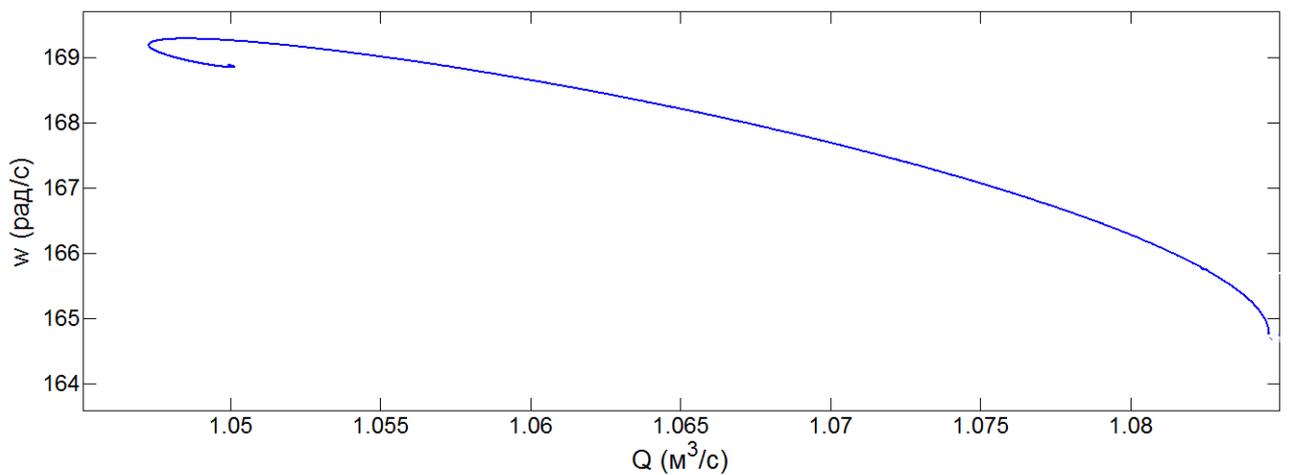


Рисунок 4.25 – Динамическая зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА

Обработка сигнала задания по скорости вала ГА.

Рассмотрим работу контура регулирования скорости. САР скорости вала ГА состоит из ПИД – регулятора скорости, МДП с СВУ, математической модели гидротурбины с учетом водовода и обратной связи по скорости. Как уже было показано выше, КРС необходим для ограничения угловой скорости ГА на основе МДП с СВУ, чтобы ограничивать напряжение преобразователя частоты по цепям ротора.

ГА мини-ГЭС работает на угловой скорости $\omega = 157, \text{ рад} / \text{с}$ (рисунок 4.27). Ступенчато уменьшаем сигнал задания по угловой скорости вала ГА и САР ГА

обрабатывает данный сигнал с большим быстродействием по скорости, как видно из рисунка 4.28.

На рисунке 4.27 приведены переходные процессы по угловой скорости вала ГА и расходу воды. Из переходного процесса по угловой скорости видно, что у контура скорости высокое быстродействие. Максимальная точка достигается за 0,063 секунды, как видно из рисунка 4.28.

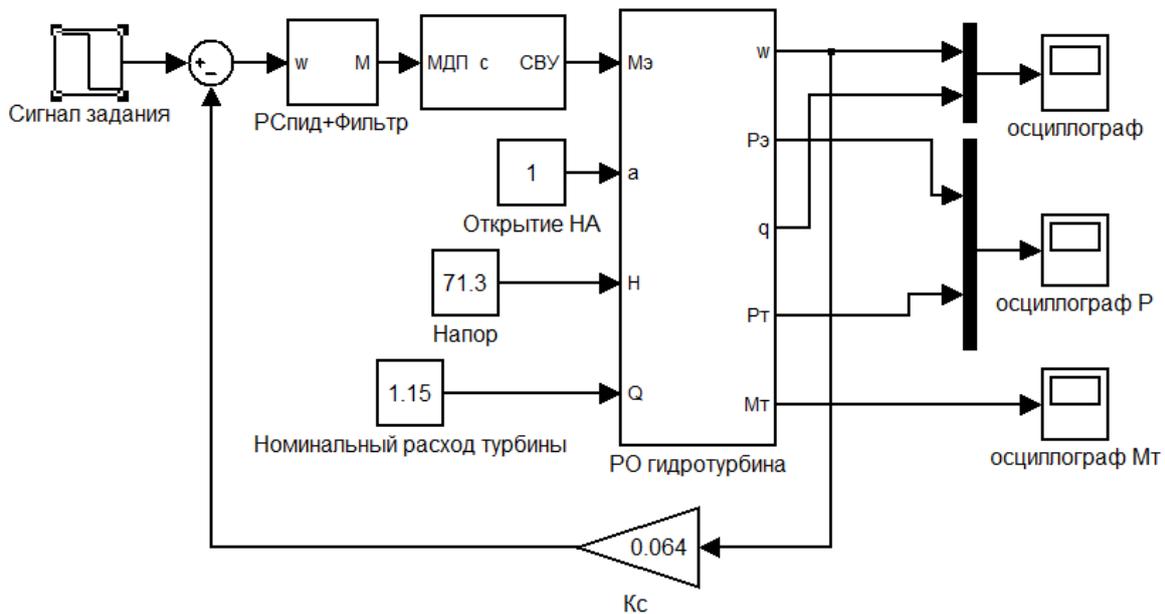


Рисунок 4.26 – Структура модели ГА на основе МДП с СВУ с обратной связью по скорости

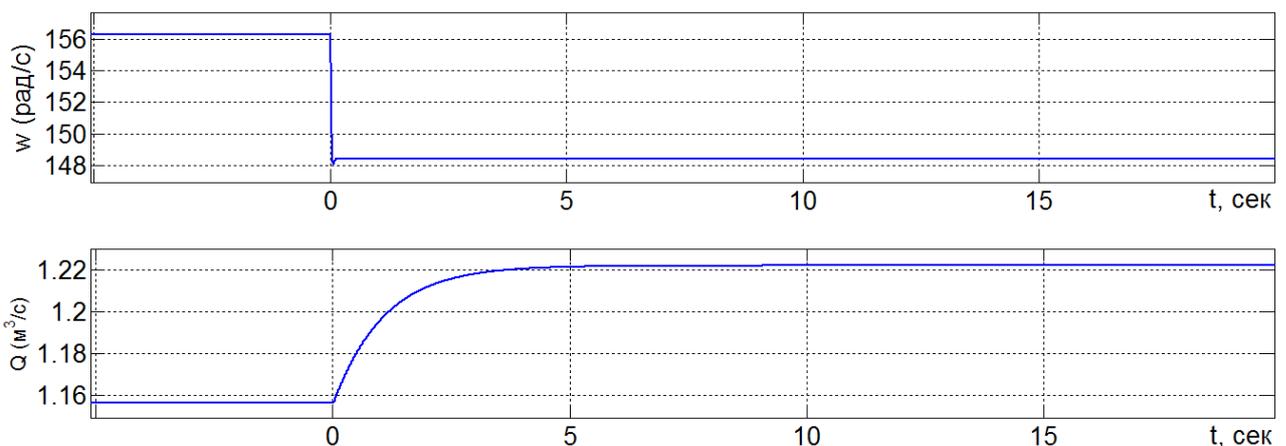


Рисунок 4.27 – Переходные процессы ГА по угловой скорости вала и расходу воды

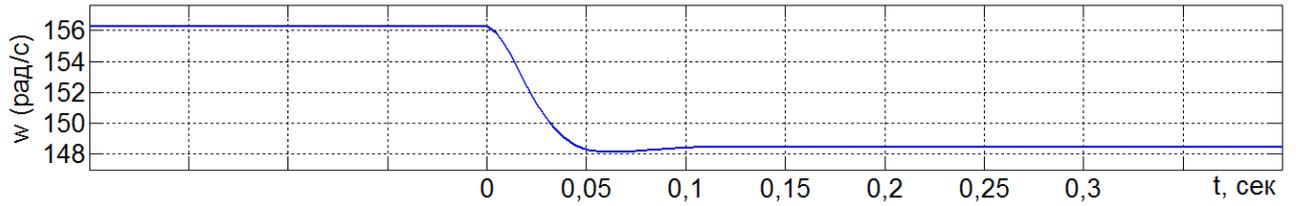


Рисунок 4.28 – Начальный участок переходного процесса по угловой скорости вала ГА рисунок 4.27

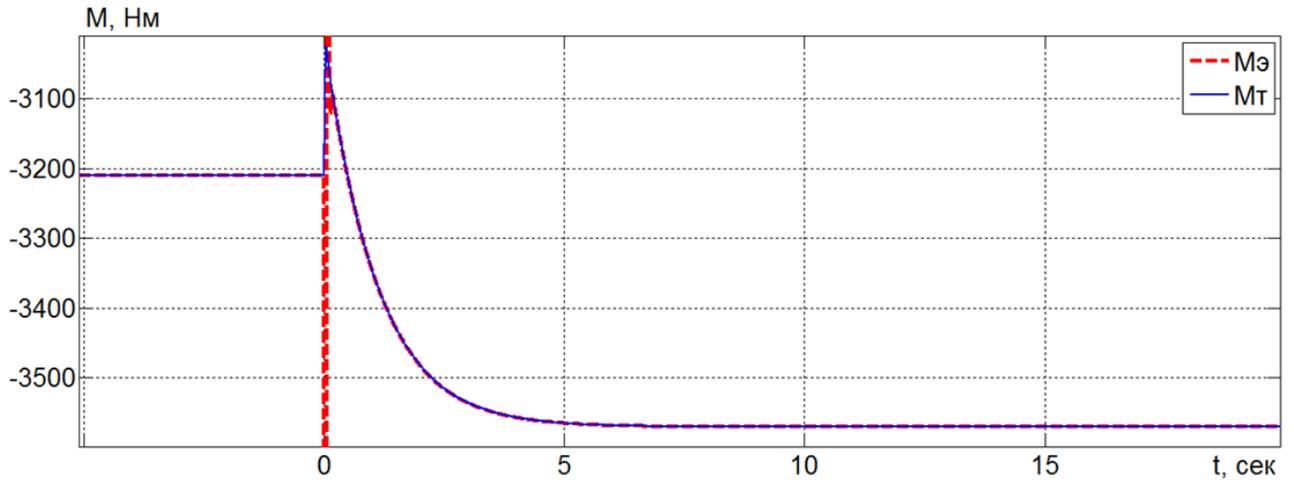


Рисунок 4.29 – Переходные процессы по моменту ГА на основе МДП

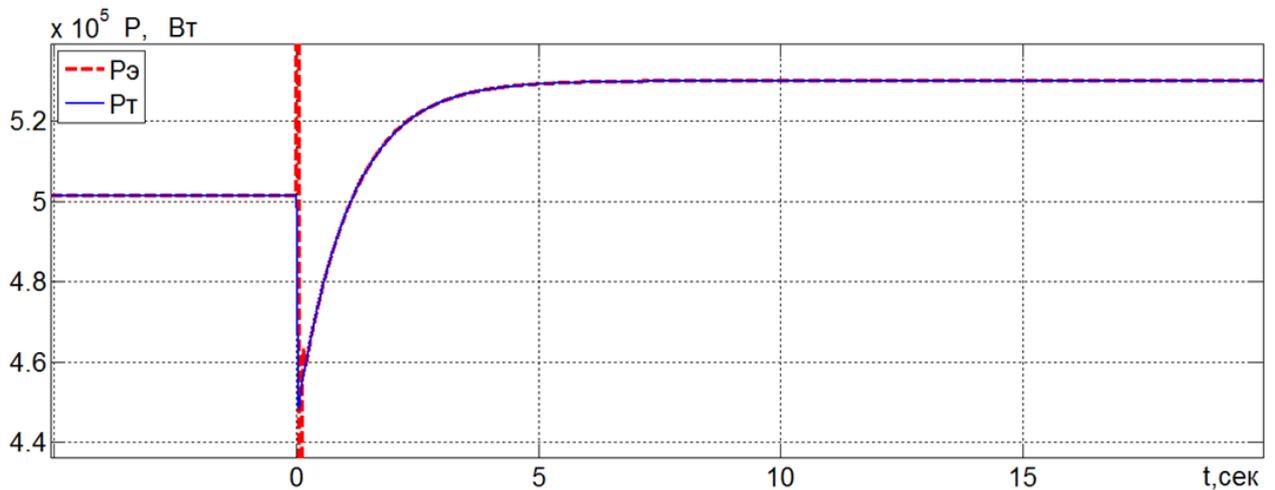


Рисунок 4.30 – Переходные процессы по активной мощности ГА на основе МДП

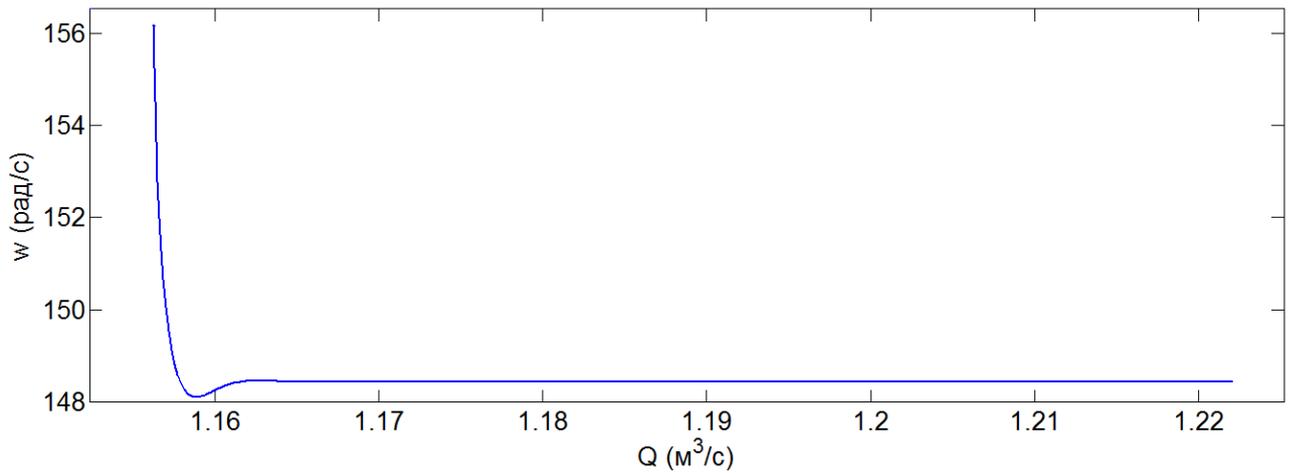


Рисунок 4.31 – Динамическая зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА

ГА мини-ГЭС работает на угловой скорости $\omega = 157$, *рад / с* (рисунок 4.32). Ступенчато увеличиваем сигнал задания по угловой скорости ГА и САР ГА обрабатывает данный сигнал с высоким быстродействием по скорости, как видно из рисунка 4.33. При этом из сети для обеспечения быстродействия по скорости потребляется электрическая энергия (рисунок 4.35).

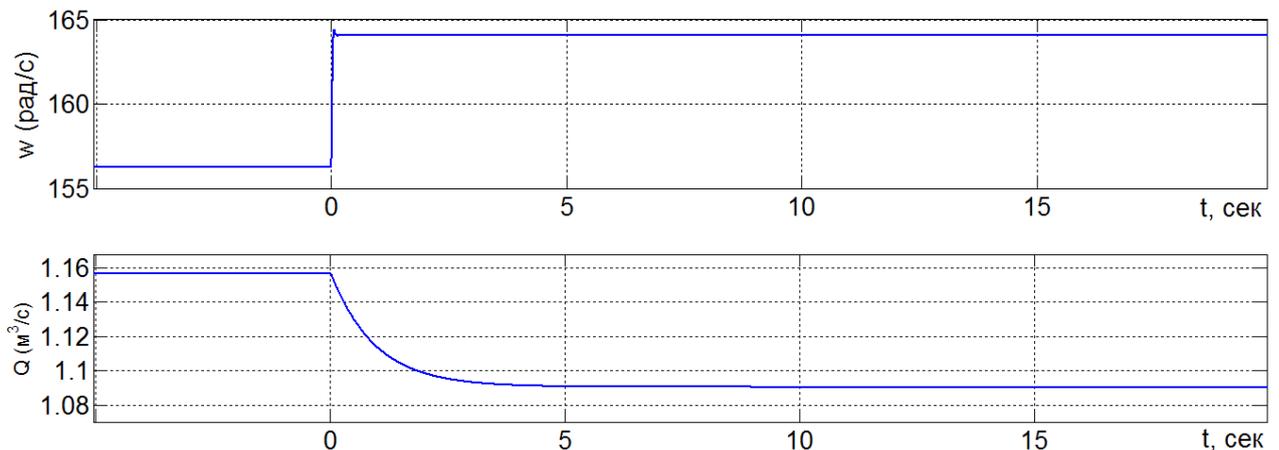


Рисунок 4.32 – Переходные процессы ГА по угловой скорости вала и расходу воды

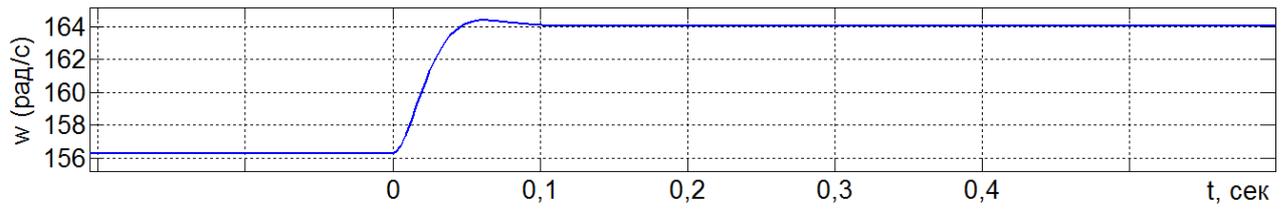


Рисунок 4.33 – Начальный участок переходного процесса по угловой скорости вала ГА рисунок 4.32

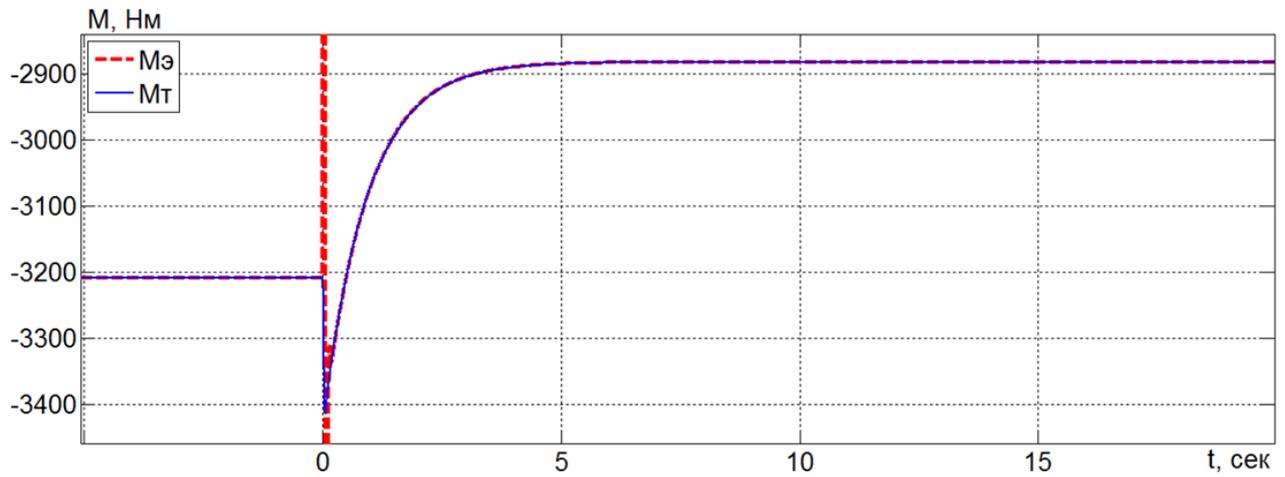


Рисунок 4.34 – Переходные процессы по мощности ГА на основе МДП

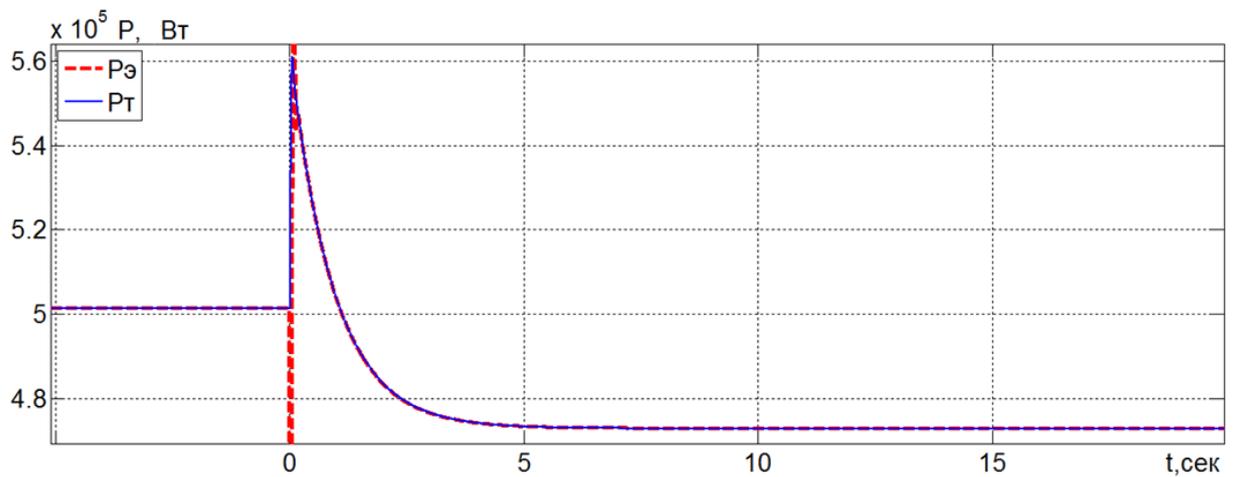


Рисунок 4.35 – Переходные процессы по активной мощности ГА на основе МДП

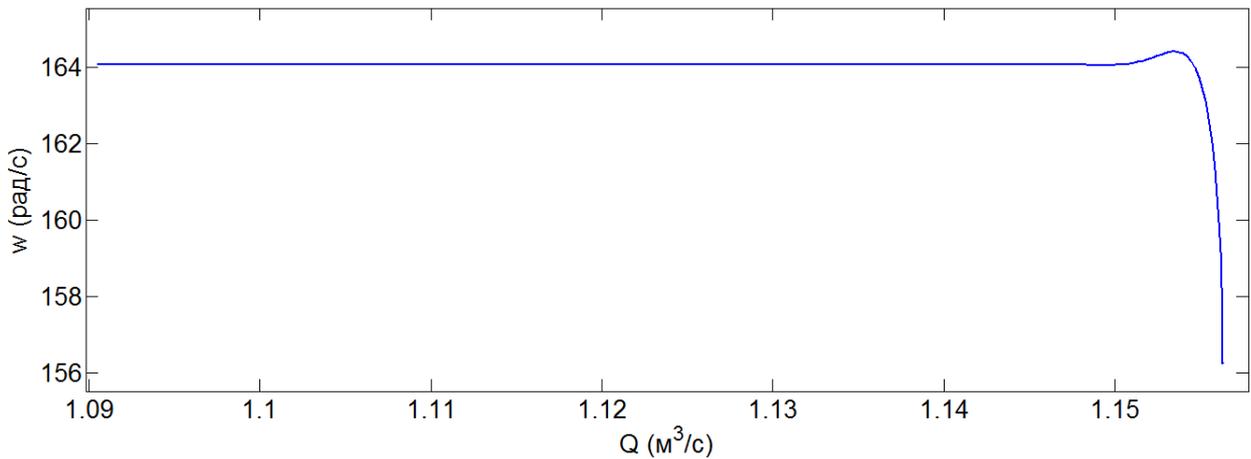


Рисунок 4.36 – Динамическая зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА

Обработка сигнала задания по активной мощности с ограничением по частоте вращения по вала ГА

Убедившись путем цифрового моделирования в работоспособности предлагаемой методики синтеза регуляторов скорости и активной мощности, рассмотрим теперь данную САУ МДП в режимах ограничения по частоте вращения вала ГА.

Вследствие ограничения напряжения ПЧ по цепям ротора, обусловленных техническими и экологическими причинами, было введено ограничение по угловой скорости.

Рассмотрим работу предлагаемой САУ ГА мини-ГЭС. На вход системы подается сигнал задания по активной мощности $U_p^z = 10B$, что соответствует номинальному значению активной мощности ГА мини - ГЭС $P_H = 5 \cdot 10^5 \text{ Вт}$. Из ОДУ приходит ступенчатый сигнал задания на увеличение активной мощности. Система начинает обрабатывать данный сигнал задания до тех пор, пока угловая скорость не войдет в ограничение (рисунок 4.39). Контур мощности размыкается, и в системе продолжается действовать только один контур - контур скорости. Значение активной мощности на 4,3 секунде становится равным значению мощности гидротурбины и продолжает увеличиваться вместе с мощностью гидротурбины (рисунок 4.38). САУ так и не выходит из ограничения по скорости.

Из рисунков 4.39 - 4.40 видно, как система входит в режим ограничения по скорости.

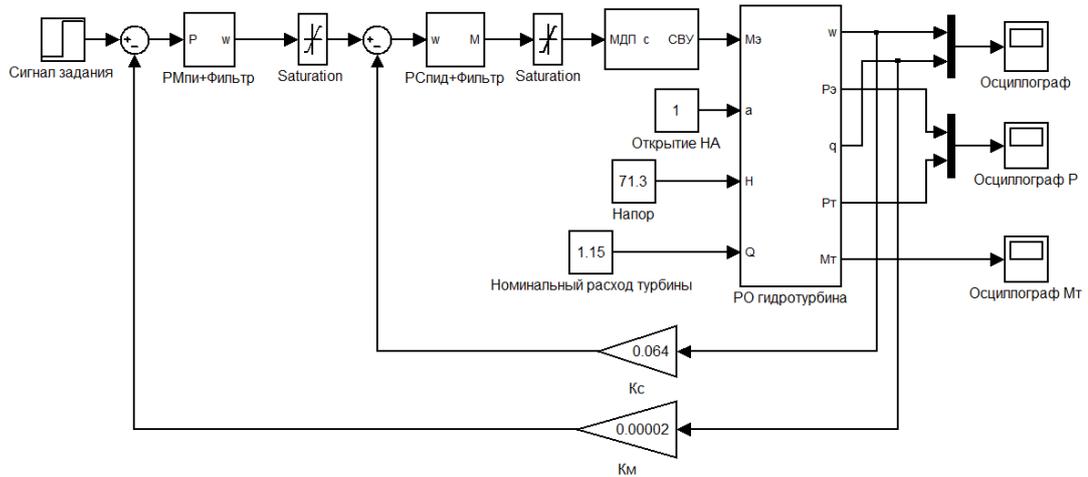


Рисунок 4.37 – Структура модели ГА с обратной связью по мощности и скорости с ограничением момента и скорости вала ГА

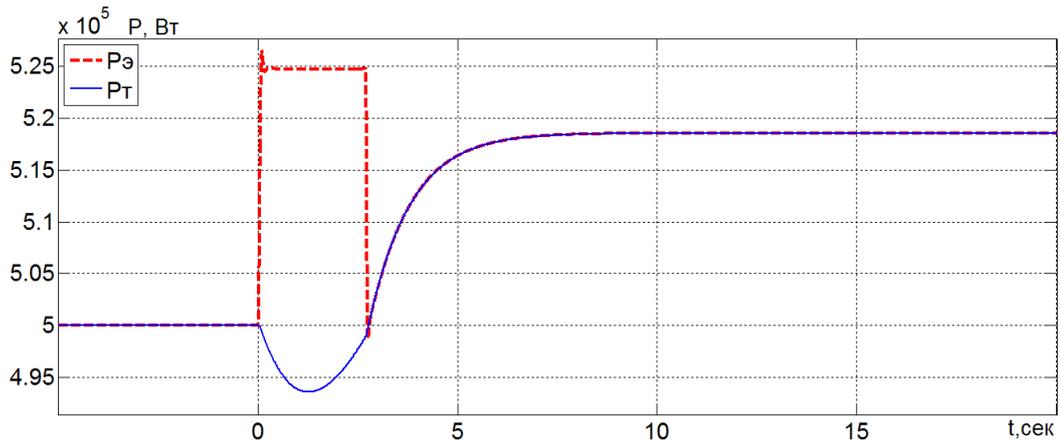


Рисунок 4.38 – Переходные процессы по мощности ГА на основе МДП

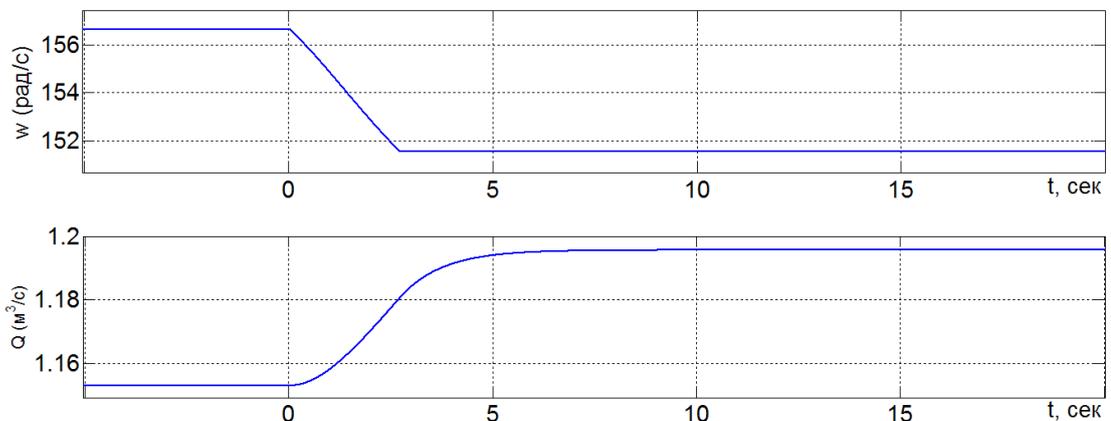


Рисунок 4.39 – Переходные процессы ГА по угловой скорости вала и расходу воды

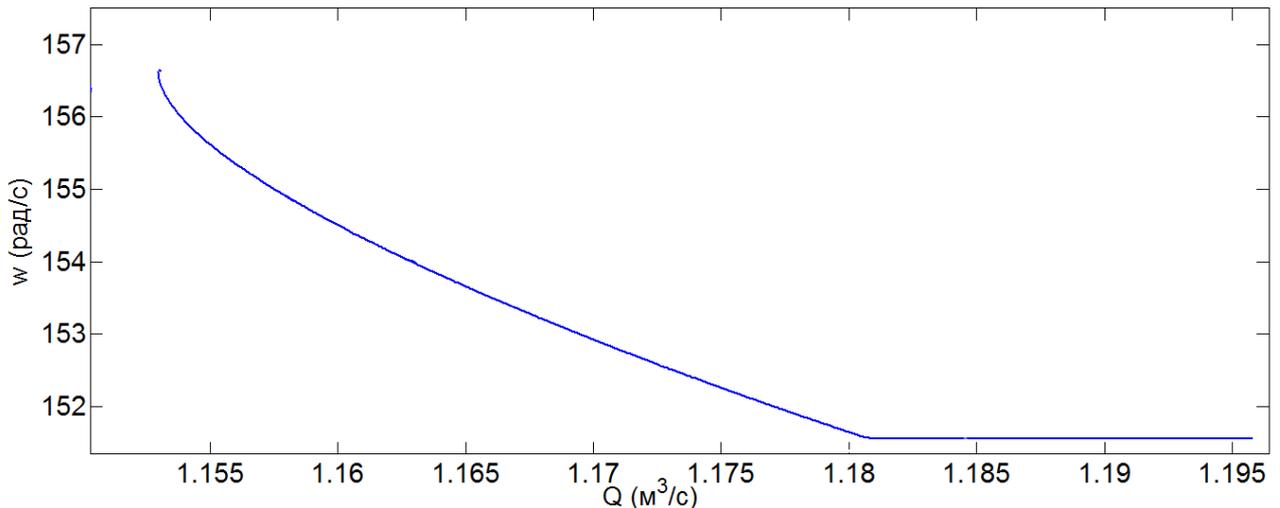


Рисунок 4.40 – Динамическая зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА

Рассмотрим работу предлагаемой САР ГА мини-ГЭС. На вход системы подается сигнал задания по активной мощности $U_p^z = 10B$, что соответствует номинальному значению активной мощности ГА $P_H = 5 \cdot 10^5 \text{ Вт}$. Из ОДУ приходит ступенчатый сигнал задания на уменьшение активной мощности. Система начинает обрабатывать данный сигнал задания до тех пор, пока угловая скорость не войдет в ограничение (рисунок 4.42). Тогда контур мощности размыкается, и в системе продолжает действовать только один контур – контур скорости вала ГА. Значение активной мощности мгновенно повышается на 4,3 секунды до значения мощности гидротурбины и продолжает уменьшаться вместе с мощностью гидротурбины (рисунок 4.41). Система не выходит из режима ограничения по скорости вала ГА. Из рисунка 4.42 - 4.43 видно, как система вошла в режим ограничения по скорости вала ГА.

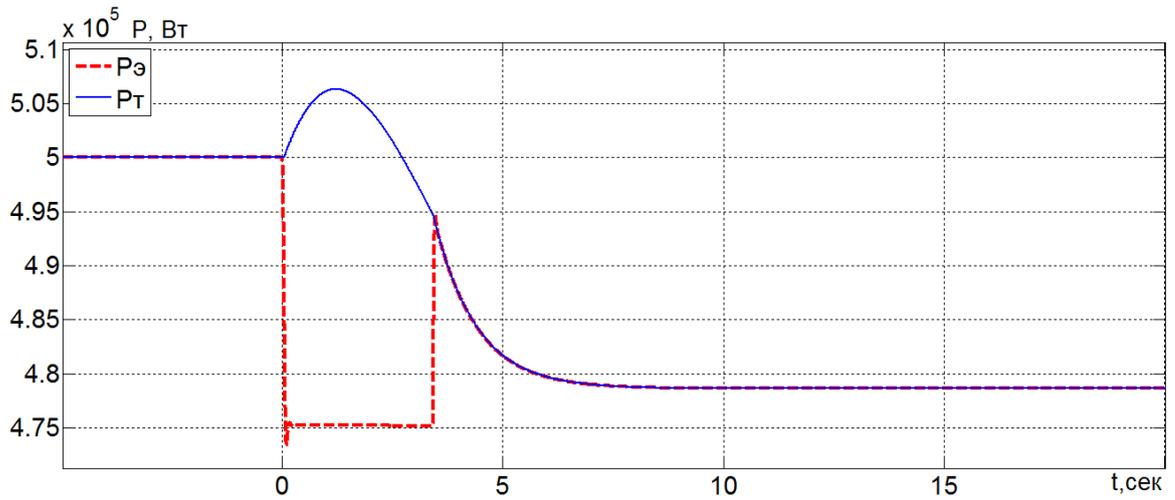


Рисунок 4.41 – Переходные процессы по мощности ГА на основе МДП

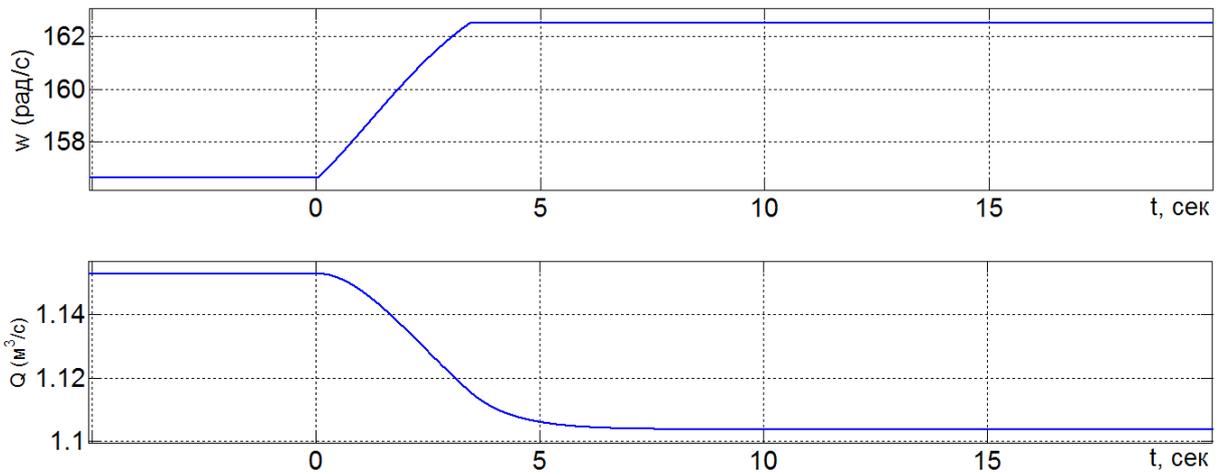


Рисунок 4.42 – Переходные процессы ГА по угловой скорости вала и расходу воды

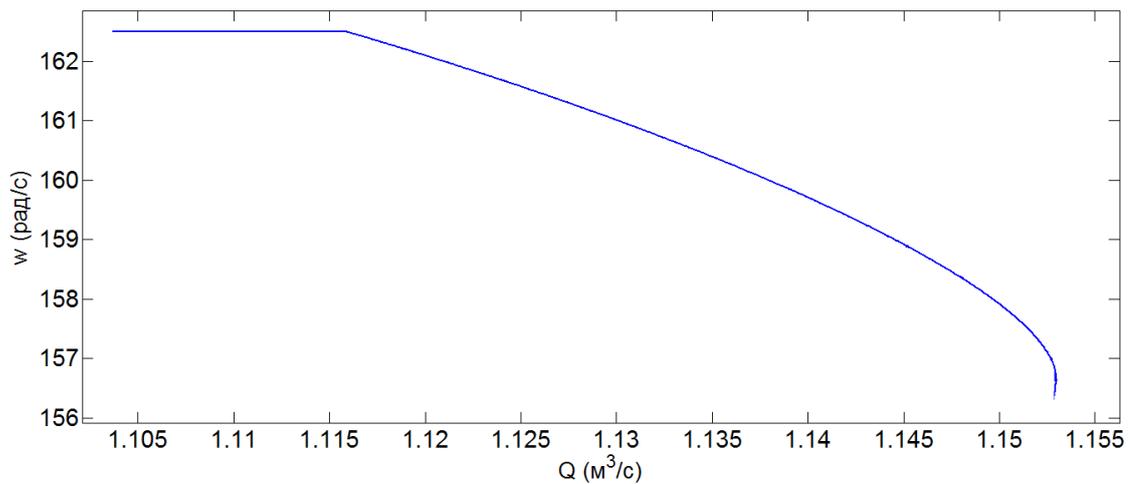


Рисунок 4.43 – Динамическая зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА

Промоделировав САР активной мощности ГА мини-ГЭС в различных режимах работы, и получив при этом осциллограммы для различных режимов, на основании полученных результатов можно с уверенностью сказать, что предлагаемая САР активной мощности ГА мини-ГЭС с поставленными перед нею задачами справляется, как видно из рисунков 4.10 - 4.43.

Полученные переходные процессы полностью согласуются с положениями теории гидроэлектростанций [3,8] и подтверждают работоспособность предложенной инженерной методики построения САР активной мощности ГА на основе МДП.

Способ пуска гидроагрегата мини-ГЭС с предлагаемой системой управления приведен в Приложении В.

4.6 Выводы

1. Предложен алгоритм управления гидроагрегатом мини-ГЭС на основе МДП. Предлагаемый алгоритм основан на принципе подчиненного регулирования координат. Внешним по отношению к контуру регулирования активной мощности должен быть контур регулирования уровня воды в водохранилище. Внутренним по отношению к контуру регулирования активной мощности должен быть контур регулирования угловой скорости вала ГА.

2. Разработана инженерная методика синтеза регуляторов скорости и генерируемой активной мощности. Данная методика учитывает статические и динамические свойства гидротурбины и инерцию масс воды в напорном водоводе. Быстродействие САР по генерируемой активной мощности ограничено суммой некомпенсированных постоянных времени в контуре регулирования скорости ГА.

3. Проведены исследования предлагаемой инженерной методики синтеза регуляторов методом цифрового моделирования. При практической реализации разработанной в диссертации методики синтеза значение постоянной времени регулирования САР активной мощности ГА мини-ГЭС будет составлять от 0,06 до 0,25 секунд. Данные исследования подтвердили работоспособность предлагаемой методики, в том числе и при выходе САР в режимы ограничения скольжения асинхронной машины.

4. Постоянная времени напорного водовода, T_w , момент инерции ГА, J , и значение коэффициента линеаризации главной универсальной характеристики гидротурбины в рабочей точке, k_μ^ω , являются основными исходными данными для разработанной методики синтеза регуляторов скорости вала и активной мощности ГА.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОАГРЕГАТА С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА

Первый раздел главы посвящен описанию экспериментальной установки по исследованию гидроагрегата и алгоритма управления.

В системах векторного управления МДП [80], магнитное состояние асинхронной машины определено параметрами напряжения сети, подключенной к выводам обмотки статора. Электромагнитный момент МДП прямо пропорционален активной составляющей тока ротора i_{r2} (аналогично зависимости электромагнитного момента от тока якоря $I_{Я}$ в машине постоянного тока). [63]. На основании сказанного в экспериментальной установке вместо МДП использована машина постоянного тока, т.к. в машине постоянного тока регулирование электромагнитного момента осуществляется за счет тока якоря, а в МДП с системой векторного управления регулирование электромагнитного момента осуществляется за счет активной составляющей вектора тока ротора.

САР активной мощности ГА экспериментальной установки представляет собой систему подчиненного регулирования координат для микро-ГЭС на основе машины постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения.

Во втором и третьем разделах главы 5 приводятся результаты экспериментального исследования разработанной САР активной мощности, проведенные на территории Республики Таджикистан. Испытания основных узлов предварительно производились в лаборатории автоматизированного электропривода и электрических машин ТТУ. Для исследований была спроектирована и создана экспериментальная установка микро-ГЭС мощностью 300 Вт (рисунок 5.1). Эксперимент проводился в ущелье Алмоси на южных отрогах Гиссарского хребта, на сравнительно небольшой высоте - приблизительно 2100 метров над уровнем моря. Наладка алгоритма управления на основе системы подчиненного регулирования для мини-ГЭС проводилась на кафедре автоматизированного электропривода и электрических машин Таджикского

технического университета им. акад. М.С. Осими (рисунок 5.2) и в дальнейшем были проведены экспериментальные исследования налаженного блока управления на микро-ГЭС.

Исследования микро-ГЭС проводились в два этапа:

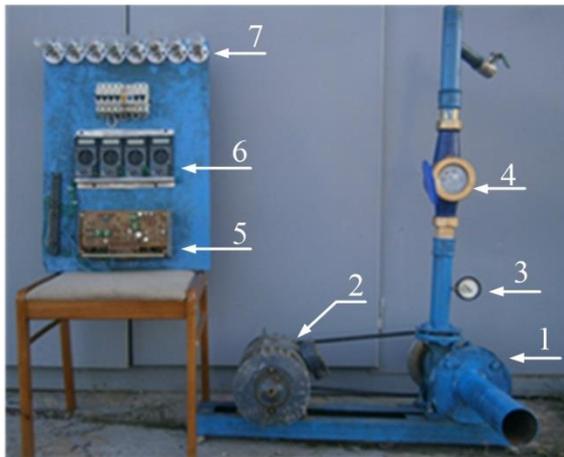
- сначала были проведены испытания гидромеханической части микро-ГЭС (рисунок 5.1) с учетом напорного водовода и полученные экспериментальные результаты были сопоставлены с проверяемой математической моделью;

- затем были произведены экспериментальные исследования алгоритма управления на основе системы подчиненного регулирования координат для подтверждения разработанной автором инженерной методики синтеза контуров мини-ГЭС. Полученные экспериментальным путем результаты были сопоставлены с теоретическими.

5.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальный стенд представляет собой универсальную систему для исследования работы микро-ГЭС. На рисунках 5.1, 5.2 приведен общий вид экспериментального стенда. Экспериментальная установка собрана на основе серийно выпускаемого унифицированного тиристорного преобразователя серии БУ 3609. В качестве ГА использован стандартный центробежный насос типа 1К. Стандартное рабочее колесо насоса заменено на уменьшенную копию рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины, изготовленную автором вручную по чертежам [84] на оборудовании мастерской Таджикского алюминиевого завода «TALCO».

В качестве генератора была использована машина постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения. Технические данные стенда приведены в таблицах 5.1- 5.2.



а)



б)

Рисунок 5.1 – Экспериментальная микро-ГЭС мощностью 300 Вт

а) 1 – РО гидротурбина, 2 – генератор, 3 – манометр, 4 – счетчик расхода воды, 5 – блок управления, 6 – комплекс измерительных приборов, 7 – нагрузка
 б) рабочее колесо гидротурбины

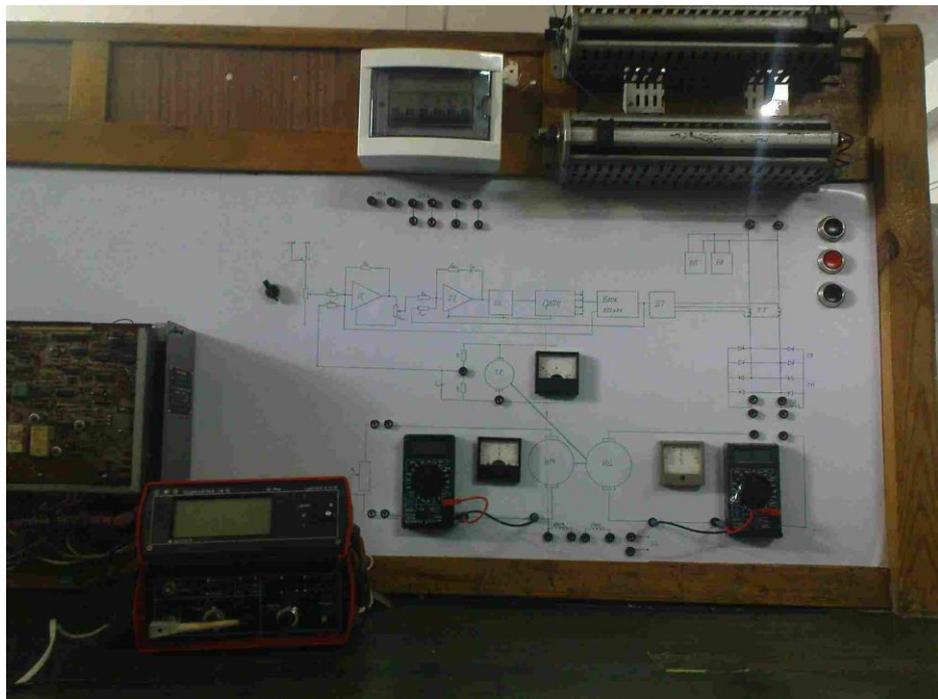


Рисунок 5.2 – Внешний вид лабораторного отладочного комплекса для экспериментальной установки

На экспериментальном стенде получены следующие результаты:

1. Получены статические характеристики $\omega = f(Q)$, $\omega = f(M)$, $\omega = f(P)$, $Q = f(P)$ для ГА на основе РО гидротурбины;

2. Исследованы динамические характеристики ГА.

В задачи данного исследования входили получения экспериментальным путем статических и динамических характеристик указанного ГА после изменения нагрузки. Открытие направляющего аппарата соответствовало номинальному для РО гидротурбины, т.к. поскольку насос не имеет возможности изменять степень открытия НА.

В таблицах 5.1, 5.2 приводятся технические данные исследуемого ГА.

Таблица 5.1 – Технические данные экспериментальной установки микро-ГЭС

Наименование	Обозначение	Размер	Величина
Место расположения	Экспериментальная установка.		
Напор расчетный	H_p	м	20
Номинальная мощность при расчетном напоре	P_H	Вт	300
Номинальная частота вращения	N	об/мин	1500
Частота вращения холостого хода	n_z	об/мин	2900
Расход при расчетном напоре и мощности	Q_p	м ³ /с	0,006
Диаметр входного сечения спиральной камеры	$d_{ск}$	мм	32
Длина водопровода	L	м	150
Перепад высот водопровода	H	м	20
Диаметр рабочего колеса	$d_{рк}$	мм	125
Число лопастей рабочее колесо	$z_{рк}$	шт	9
Диаметр водовода	$d_{вод}$	м	0.15

Таблица 5.2 – Технические данные системы управления экспериментальной установки микро-ГЭС

	Наименование	Ед.из.	Количество	Технические характеристики.
	Тиристорный преобразователь БУ 3609	шт.	1	$U=380/230В$ $I_d=10А$
	Тиристорный преобразователь БУ 3509	шт.	1	$U=380/230В$ $I_d=5А$
	Электродвигатель постоянного тока тип П11	шт	2	$P=0,3кВт$ $U=220В$ $I_H=2,1А$ $n=1500об/мин.$
	Нагрузочные резисторы	шт	2	
	Осциллограф тип С8-19	шт	1	

5.2 Статические характеристики экспериментального гидроагрегата

Экспериментальным путем были полученные статические характеристики, приведенные на рисунках 5.2-5.5: $\omega = f(Q)$, $\omega = f(M)$, $\omega = f(P)$, $Q = f(P)$.

Полученные статические характеристики экспериментальной установки повторяют форму статических характеристик крупных ГЭС.

Проведя анализ полученных данных видно, что для одной изначально поставленных задач - аккумуляирования гидроресурсов при работе на холостом ходу, был достигнут эффект аккумуляирования гидроресурсов благодаря предложенному автором типу гидротурбины. Как видно из эксперимента, гидротурбина позволяет сэкономить около 20 % гидроресурсов при холостом ходе [85]. Излишки воды предполагается аккумуляировать в суточном водохранилище, а при повышении потребности в электроэнергии использовать запасённую воду, что повышает максимальное значение генерируемой активной

мощности мини-ГЭС. В зимний период сток рек, как показано в главе 1, в 5 - 7 раз меньше летнего стока воды.

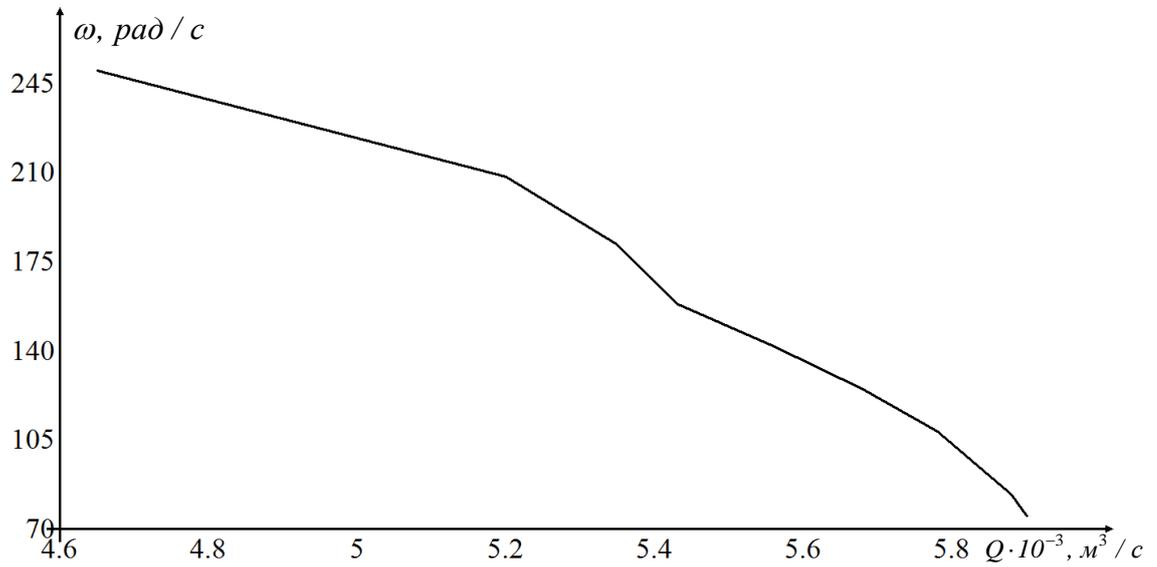


Рисунок 5.3 – Расходная характеристика ГА, $Q = f(\omega)$

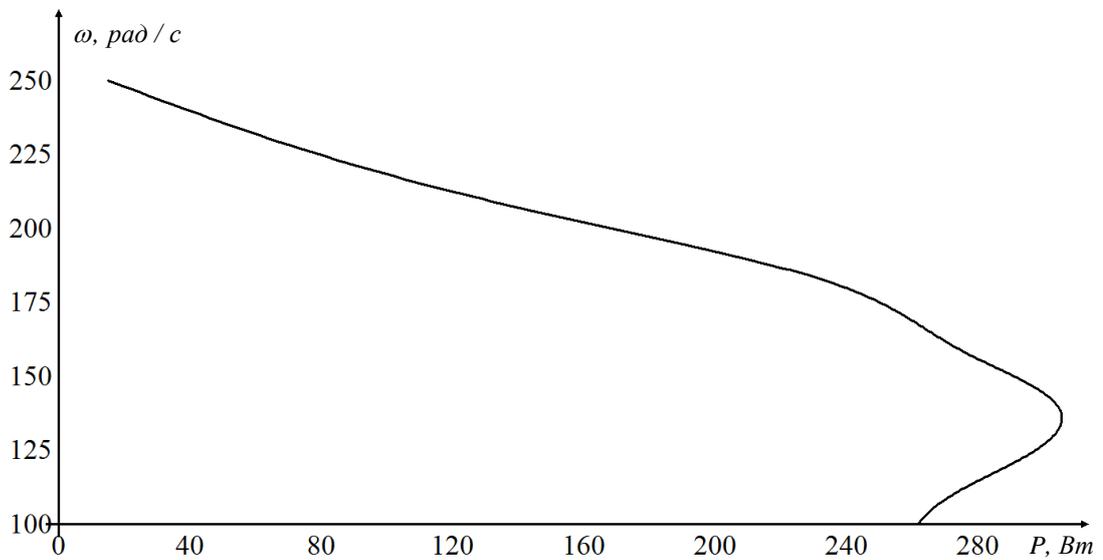


Рисунок 5.4 – Зависимость мощности от угловой скорости вала ГА микро-ГЭС, $P = f(\omega)$

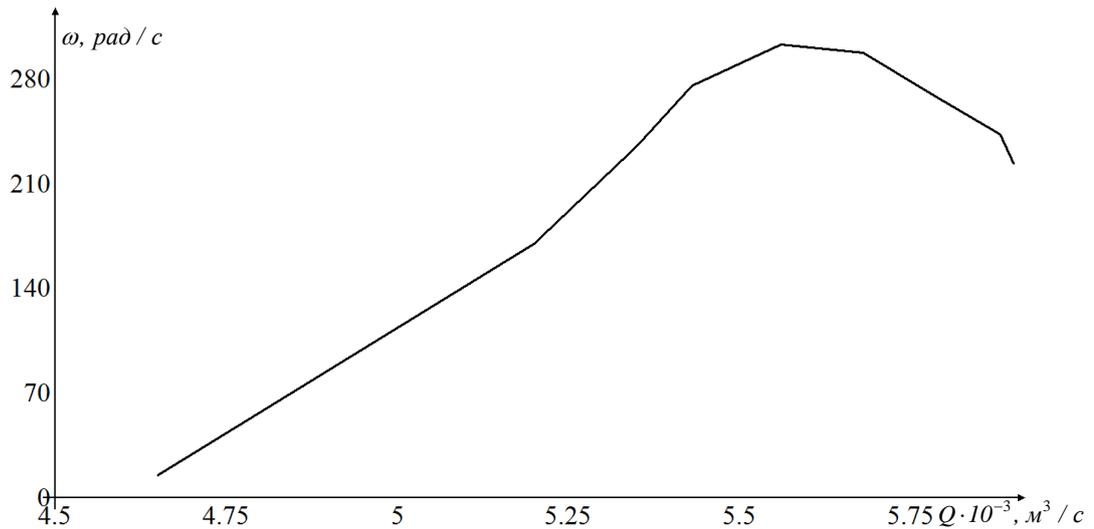


Рисунок 5.5 – Зависимость мощности от расхода ГА микро-ГЭС $P = f(Q)$

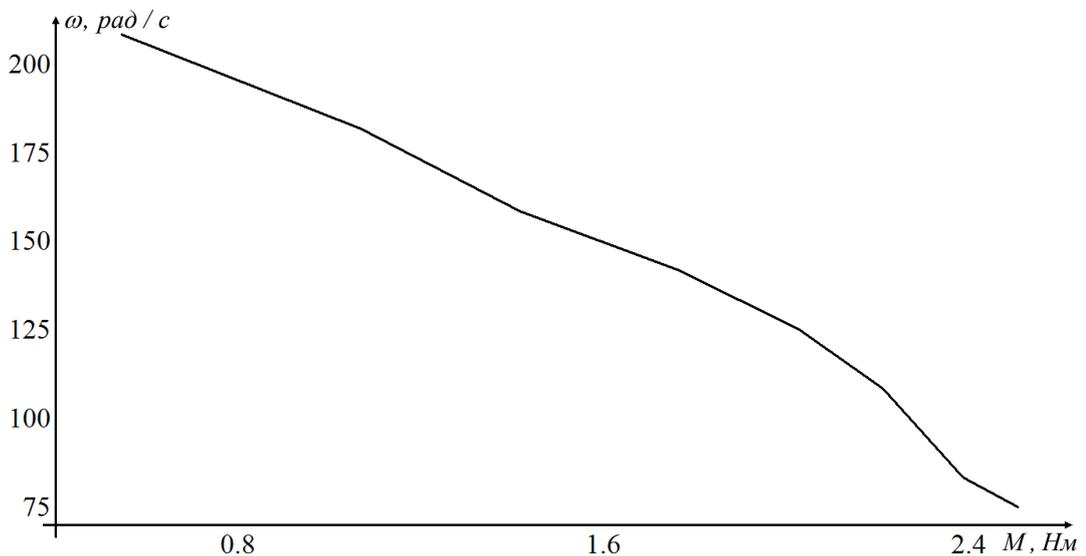


Рисунок 5.6 – Механическая характеристика ГА

5.3 Результаты экспериментального исследования динамических характеристик двухконтурной САР активной мощности

Данный раздел главы посвящается описанию экспериментальной установки для исследования алгоритма управления на основе системы подчиненного регулирования координат ГА микро-ГЭС. Для наладки регуляторов и дальнейшего использования блока управления была выбрана экспериментальная установка: лабораторный стенд кафедры Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими.

Автор диссертации разрабатывал и налаживал данный лабораторный стенд еще по дипломной работе квалификации специалиста. Данный стенд был модернизирован для проведения исследования алгоритма управления на основе системы подчиненного регулирования координат ГА мини-ГЭС. В данную экспериментальную установку был внедрен дополнительный контур мощности. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 5.2.

Лабораторный стенд собран на основе серийно выпускаемого унифицированного тиристорного преобразователя серии БУ 3609 и представляет собой автоматизированный электропривод постоянного тока по системе ТП-Д.

Функциональная схема лабораторной установки приведена на рисунке 5.7.

Электропривод состоит из реверсивного однофазного тиристорного преобразователя с отдельным управлением ТП, машины постоянного тока ИМ, нагрузочной машины постоянного тока НМ, сглаживающего дросселя, аппаратуры защиты от нештатных режимов. Стенд питается от сети напряжением $\sim 380\text{В}$, которое подается непосредственно на преобразователь с помощью автоматического выключателя и от источника постоянного напряжения 220В .

Для контроля электрических параметров и снятия характеристик на стенде установлен комплекс измерительных приборов. В цепи якоря двигателя генератора включен амперметр РА для измерения тока якоря и вольтметр РV для измерения напряжения на силовых выводах ИМ. Частота вращения электропривода контролируется с помощью тахогенератора и отображается вольтметром PV_{BR} (рисунок 5.7). Для снятия осциллограмм на переднюю панель стенда выведены контрольные точки.

При наладке экспериментальной установки в лабораторных условиях были выявлены и устранены технические недостатки. После проведения наладки блок управления был использован уже на самой экспериментальной установке микро-ГЭС для подтверждения методики расчета регуляторов (Глава 4).

При проведении эксперимента были получены следующие переходные процессы при ступенчатом малом отклонении от номинальной нагрузки

[Приложение В]. На рисунках 5.7-5.10 приведен переходной процесс по частоте вращения исследуемого объекта.

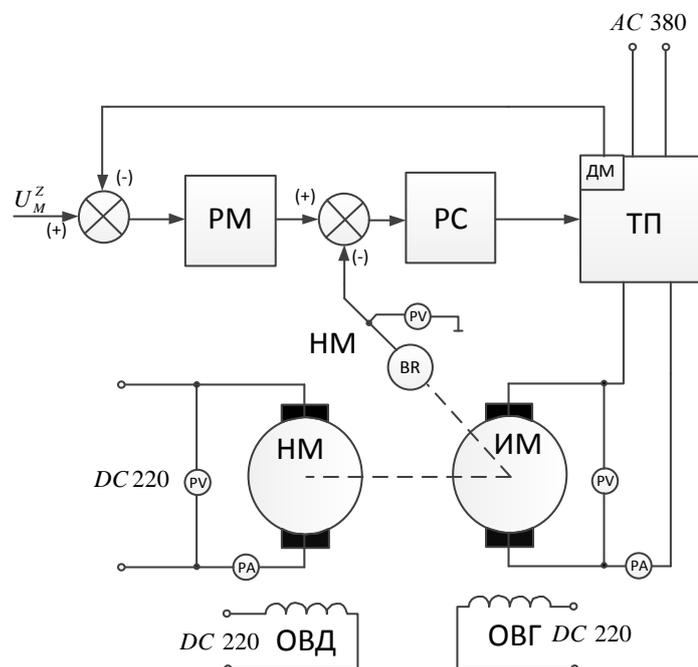


Рисунок 5.7 – Функциональная схема лабораторной экспериментальной установки ($T_w = 0$)

На рисунке 5.8 приведен переходный процесс по активной мощности микро-ГЭС. Данная характеристика имеет следующие показатели:

перерегулирование $\sigma = 9,3\%$;

время достижения максимальной точки 0,2 секунд.

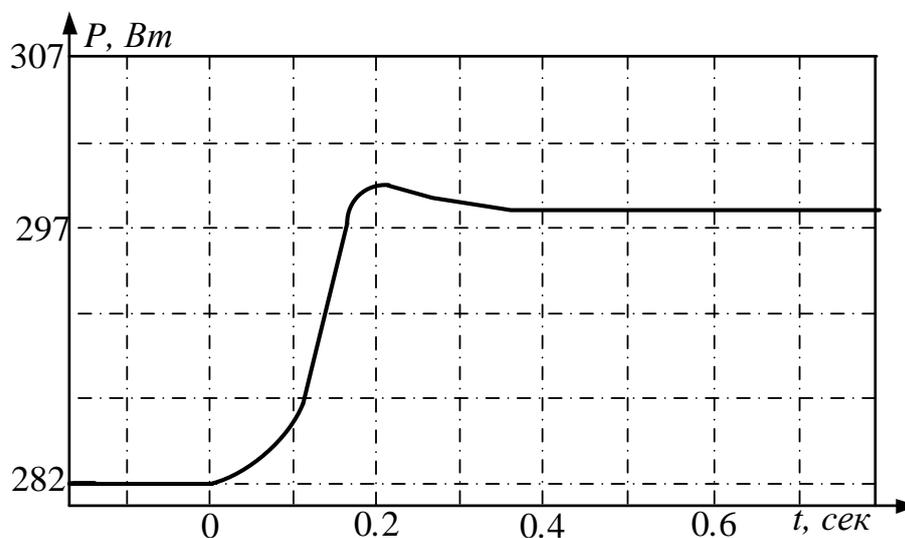
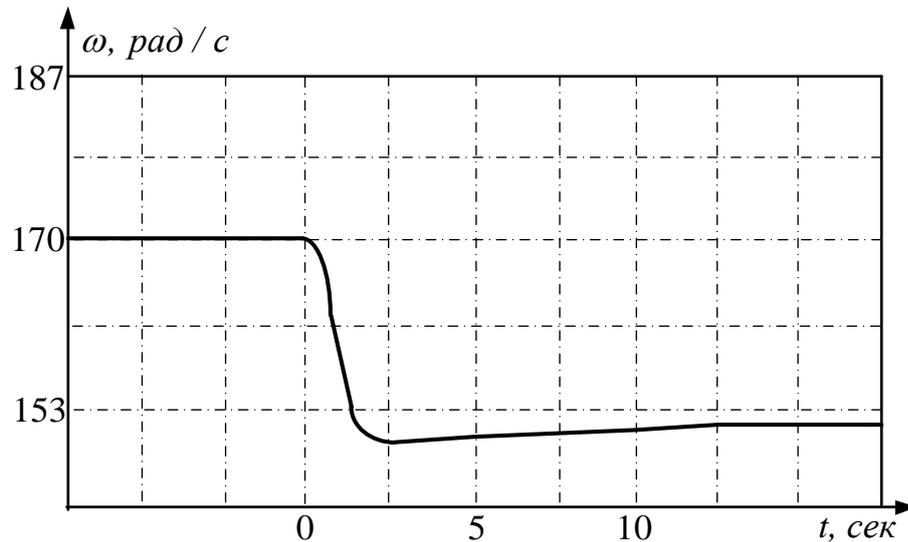


Рисунок 5.8 – Переходный процесс по активной мощности ГА микро-ГЭС

На рисунке 5.9. приведен переходный процесс по частоте вращения микро-ГЭС. Данная характеристика имеет следующие показатели:

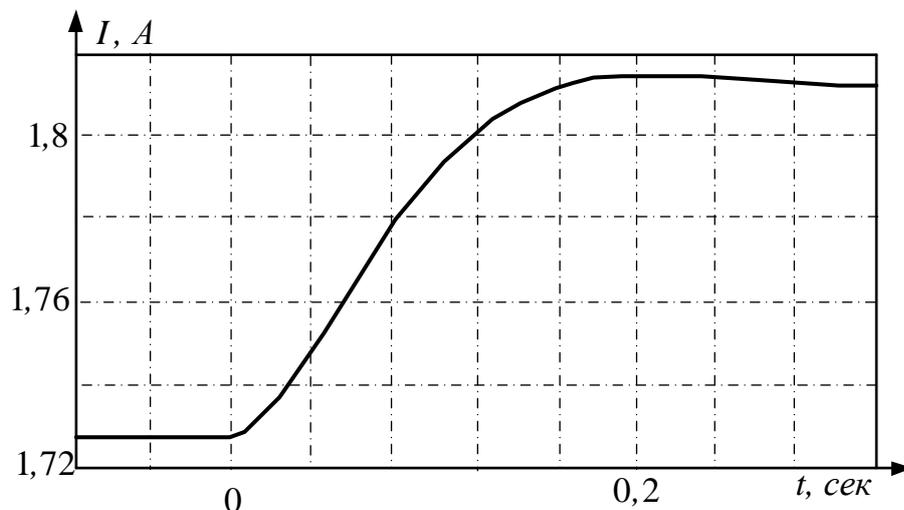
- перерегулирование $\sigma_{max} = 11,2\%$;
- время достижения максимальной точки 0,2 секунд.



Рисунке 5.9 – Переходный процесс по скорости вала ГА микро-ГЭС

На рисунке 5.10 приведен переходный процесс по току якоря генератора микро-ГЭС. Данная характеристика имеет следующие показатели:

- перерегулирование $\sigma_{max} = 3,4\%$;
- время достижения максимальной точки - 0,2 секунд.



Рисунке 5.10 – Переходный процесс по току генератора постоянного тока микро-ГЭС

5.4 Выводы

Графическое сопоставление экспериментально полученных результатов (рисунки 5.8, 5.9, 5.10.), с результатами математического моделирования (рисунок 4.10, 4.11, 4.12) показало следующее.

1. Характер расчетных и экспериментальных зависимостей идентичен, а уровень их отличия весьма невелик, на основании чего можно сделать вывод о достоверности результатов моделирования на ЭВМ при изучении переходных процессов в ГА с РО гидротурбинами.

Из полученных переходных процессов исследуемых мини-ГЭС видно, что характер полученного переходного процесса по угловой скорости вала ГА, рассчитанного в программе MATLAB/Simulink (глава 4) для мини-ГЭС Артуч практически повторяет вид переходных характеристик, полученных экспериментальным путем.

Некоторые расхождения в полученных расчетным путем и экспериментальных результатах объясняются, прежде всего, неточностью исходных данных, используемых в расчетах.

2. В экспериментальной установке расход воды за счет применения РО гидротурбины с низким коэффициентом быстроходности при холостом ходе меньше, чем в номинальном режиме приблизительно на 20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что применение в ГА радиально-осевой гидротурбины с низким коэффициентом быстроходности позволяет производить регулирование генерируемой активной мощности путём изменения угловой скорости вала генератора при значениях КПД гидротурбины, несущественно меньших номинального.

2. Увеличению частоты вращения гидротурбины соответствует увеличение её гидравлического сопротивления вследствие действия центробежной силы в спиральной камере и камере рабочего колеса. Поэтому имеется возможность изменять расход воды через турбину и мощность на валу путем изменения числа оборотов, вследствие чего можно использовать аккумулирующую способность водохранилища не изменяя положение направляющего аппарата гидротурбины.

3. На основании применяемой проектными организациями модели радиально-осевой гидротурбины, работающей на одном валу с синхронным генератором при постоянном значении частоты сети, получено математическое описание радиально-осевой гидротурбины при переменной частоте вращения вала ГА.

4. Нецелесообразно производить регулирование угловой скорости ГА в диапазоне шире, чем 1:2, вследствие нарастающего снижения КПД радиально-осевой гидротурбины при отклонении её угловой скорости от основной. Имея такой диапазон регулирования угловой скорости вала ГА значение генерируемой активной мощности можно изменять в диапазоне от нуля до номинального как в динамических, так и в установившихся режимах работы.

5. Современному уровню развития техники соответствует применение в ГА мини-ГЭС генератора на основе МДП с системой векторного управления электромагнитным моментом генератора.

6. В традиционных ГА на основе синхронного генератора частота вращения вала ГА определена постоянным значением частоты сети, а генерируемая активная мощность равна мощности на валу турбины (за вычетом потерь в генераторе). Управление мощностью на валу турбины осложняется

необходимостью изменять расход воды через турбину, значение которого определяет кинетическую энергию масс воды в напорном водоводе.

7. Показано, что применение генератора с регулируемой частотой вращения вала даёт возможность преобразовывать изменение кинетической энергии масс воды в напорном водоводе в изменение кинетической энергии вращающихся масс ГА. В результате появляется возможность работать с разными значениями генерируемой активной мощности и мощности на валу турбины в динамических режимах. Это позволяет быстро изменять активную мощность генератора, управляя его электромагнитным моментом.

8. Система управления МДП-генератором может переводить его в режим работы с абсолютно мягкой механической характеристикой вследствие ограничения токов ротора. В данных режимах работы устойчивость, а также и апериодический характер гидромеханических переходных процессов ГА обеспечиваются установкой дополнительных маховых масс на вал ГА и/или увеличением сечения напорного водовода.

9. На основании анализа полинома знаменателя передаточной функции линеаризованной модели управляемого по угловой скорости вала ГА получены условия устойчивости и апериодического характера переходных процессов по угловой скорости вала ГА в режиме ограничения электромагнитного момента. Данные условия позволяют производить выбор значений суммарного момента инерции и сечения напорного водовода ГА.

10. На основе метода последовательной коррекции автором разработана инженерная методика синтеза регуляторов для двухконтурной САР активной мощности ГА мини-ГЭС. Быстродействие САР по генерируемой активной мощности ограничено суммой некомпенсированных постоянных времени в контуре регулирования скорости вала ГА.

11. Синтез САР генерируемой активной мощности ГА мини-ГЭС следует производить на основе метода последовательной коррекции с внутренним контуром регулирования скорости для ограничения напряжения на выводах ПЧ со стороны колец ротора асинхронной машины. Контур регулирования угловой

скорости МДП-генератора должен иметь высокое быстродействие для ограничения напряжения на кольцах ротора в динамических режимах работы.

12. Первоначальным этапом построения САР активной мощности ГА является выбор момента инерции ГА и постоянной времени водовода из условий приемлемого качества переходных процессов в режимах с абсолютно мягкой характеристикой генератора и диапазона возможных значений коэффициента, характеризующего зависимость расхода воды через турбину от частоты вращения вала ГА.

13. Работоспособность предлагаемой методики синтеза регуляторов САР генерируемой активной мощности ГА подтверждена результатами цифрового моделирования и серией экспериментов на микро-ГЭС. При практической реализации разработанной в диссертации методики синтеза значение времени регулирования САР активной мощности ГА мини-ГЭС будет составлять от 0,06 до 0,25 секунд.

Список литературы

1. // Таджикско - Норвежского Центра по развитию малой энергетики: [сайт]. URL: <http://www.tajhydro.tj/>
2. Киселев Г.С. Автоматическое регулирование мощности гидроэлектростанций по водотоку. М.: Энергия, 1973. 121 с.
3. Кривченко Г.И. Гидромеханические процессы в гидроэнергетических установках. 1975. 367 с.
4. Грановский С. А., Малышев В.М., Орго В.М., Смоляров Л. Г. Конструкции и расчет гидротурбин. Л.: Машиностроение, 1974. 408 с.
5. ГОСТ 4.171-85 Система показателей качества продукции. Турбогенераторы, гидрогенераторы, синхронные компенсаторы и их системы возбуждения.
6. Карелин В.Я., Волшаник В.В. Сооружения и оборудование малых гидроэлектростанций. М.: Энергоатомиздат, 1986. 200 с.
7. Кривченко Г. И. Гидравлические машины: Турбины и насосы. Учебник для вузов М.: Энергия, 1978. 320 с.
8. Кривченко Г. И. Расчеты на микрокалькуляторах переходных процессов в гидроэлектростанциях. М.: Энергоатомиздат, 1989. 136 с.
9. Общие требования к программно-техническим комплексам для автоматизированных систем управления гидроэлектростанций: РД 153-34.2.-35.520-99. М.: СПО ОРГРЭС. 1999. 57 с.
10. Соколов Н.И. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов. М.: Энергия, 1970. 400 с.
11. Смирнов И.Н. Гидравлические турбины и насосы. М.: Учебное пособие. Высшая школа, 1969. 400 с.
12. Бронштейн Л.Я., Герман А.Н., Гольдин В.Е., и др. Справочник конструктора гидротурбин. Л.: Машиностроение, 1971. 304 с.
13. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. 4-е изд. М.: Энергия,

1972. 312 с.
14. Андреев В.Б., Бронковский Г.А., Веремеенко И.С., и др. Справочник по гидротурбинам. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. 496 с с.
 15. Филипова Т.А., Мисриханов М.Ш., Сидоркин Ю.М., Русина А.Г. Гидроэнергетика. Новосибирск: учеб. Пособие. изд-во НГТУ, 2012. 620 с.
 16. Гаркави Ю.Е., Смирнов М.И. Регулирование гидротурбин. М.-Л.: Машгиз, 1954. 348 с.
 17. Волков Д. Р. Разработка алгоритмических и аппаратных средств исследования, реализации и настройки цифровой многофункциональной системы автоматического управления радиально-осевой гидротурбиной: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.05/ Волков Дамир Ральевич. Ульяновск, 2006. 21 с.
 18. Михайлов Л.П., Фельдман Б.Н., Марканова Т. К., и др. Малая Гидроэнергетика. М.: Энергоатомиздат, 1989. 184 с.
 19. Барский С.З. Некоторые вопросы теории и расчета автономного асинхронного генератора стабильной частоты // Электричество. 1966. № 8. С. 63-69.
 20. Ващенко А.П., Онищенко Г.Б. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод. Итоги науки и техники. Сер. "Электропривод и автоматизация промышленных установок". ВИНТИ АН СССР, 1988.
 21. Филюшов Ю. П. Оптимизация электромагнитных процессов в асинхронной короткозамкнутой машине // Электричество. 2011. № 5. С. 42 - 47.
 22. Костырев М.Л., Скоропешкин А.И. Автономные генераторы с вентильным возбуждением. М.: Энергоатомиздат, 1993. 160 с.
 23. Загорский А.Е., Шакарян Ю.Г. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока. М.: Энергоатомиздат, 1986. 176 с.
 24. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. М.: Наука, 1969. 142 с.
 25. Блоцкий Н.Н., Шакарян Ю.Г. Сравнение законов регулирования асинхронизированных синхронных машин в установившемся режиме //

- Электротехника. 1963. № 9. С. 35-39.
26. Филюшов Ю. П. Оптимальное по быстродействию управление машиной переменного тока // Электричество. 2011. № 2. С. 46 - 51.
 27. Ботвинник М.М. Регулирование возбуждения и статическая устойчивость синхронной машины. М.: Госэнергоиздат, 1960. 70 с.
 28. Филюшов Ю. П. Оптимизация электромагнитных процессов в синхронной машине // Электричество. 2011. № 8. С. 57 - 62.
 29. Лукутин Б.В. Режимы работы синхронных и асинхронных генераторов микрогидроэлектростанций: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.09.01/ Лукутин Борис Владимирович. 1993. 38 с.
 30. Брускин Д.Э. Генераторы, возбуждаемые переменным током. М.: Высш. шк, 1974. 156 с.
 31. Хватов О.С. Управляемые генераторные комплексы на основе машины двойного питания. Монография. Нижегород. гос. техн. ун-т. Н.Новгород, 2000. 204 с.
 32. Титов В.Г., Хватов О.С. Генераторные комплексы на основе машины двойного питания // Тез. докл. 12 НТК конференции “Электроприводы переменного тока с полупроводниковыми преобразователями”/ УПИ, Екатеринбург. 2001.
 33. Титов В.Г., Хватов О.С. Автономный генератор по схеме машины двойного питания // Электротехника. 1998. № 8. С. 31-34.
 34. Харитонычев М.Ю. Автономная судовая вал генераторная установка на основе машины двойного питания: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.03/ Харитонычев Михаил Юрьевич. Нижний Новгород. 2007. 19 с.
 35. Блоцкий Н.Н., Лабунец И.А., Шакарян Ю.Г. Машины двойного питания. Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР, 1979.
 36. Ioannidou M.G., Tegopoulos J.A. Performance of a doubly-fed induction motor with controlled rotor voltage magnitude and phase angle. // IEEE Trans. Energy Convers. 1987. No. 2. pp. 301-307.

37. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Genertion, First Edition. By G. Abad, J. Lo´pez, M. A. Rodriguez, L. Marroyo, and G. Iwanski. 2011 the Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. Published 2011 by JohnWiley&So. 633 pp.
38. Сандлер А.С., Щукин Г.А. Об энергетических показателях регулируемого электропривода переменного тока с машиной двойного питания // Электричество. 1973. № 4. С. 44-47.
39. Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике. Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЭС и изолированно работающих энергосистемах России. ОАО РАО «ЕЭС России», 2007. 68 с.
40. Отчет о научно-исследовательской работе: Анализ режима работы каскада Вахшских ГЭС и Кайракумской ГЭС. Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими. Душанбе. 2009. 55 с.
41. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. Томск: Монография, 2001. 104 с.
42. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники электроэнергии. Томск. 2008. 187 с.
43. Обухов С.Г. Микрогидроэлектростанции. Томск. 2009. 63 с.
44. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 3. Синхронные машины. М.: Учебное пособие для вузов. МГАУ, 2008. 195 с.
45. Szaflarski Aleksander, Samcik Leszek, Gwozdz Michat. Zasady sterowama uktadu dwustronne zasilaj trojfazowej maszyny pierscieniowej z transystorowa przetwomica czestotliwoosci // Prz. elektroteclm. 1992. No. 12. pp. 269-273.
46. Бояр-Созонович С.П. Альтернативность асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением // Электричество. 1993. № 12. С. 39-44.
47. Дементьев Ю.Н., Обрусник В.П. Оптимальное управление преобразователем машины двойного питания. I Международная (XII Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу: Тез. докл. С. П.: Санкт- Петерб. гос. электротехн. ун-т., 1995. 96 с.

48. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: Энергия, 1979. 200 с.
49. Иванов А.А. Справочник по электротехнике. Киев: Вища шк., 1979. 359 с.
50. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами. Новосибирск: Учеб. пособие. Изд-во НГТУ, 1999. 66 с.
51. Панкратов В.В., Зима Е.А. Энергооптимальное векторное управление асинхронными электроприводами. Новосибирск: Учеб. пособие. Изд-во НГТУ, 2005. 120 с.
52. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы автономных систем. Знак, 1997. 288 с.
53. Шакарян Ю.Г. Исследование режимов работы управляемой машины переменного тока в электрических системах. Автореф. дис. д-ра техн. наук. М.: ЭНИИ, 1974.
54. F. Blaschke. Das prinzip der Feldorientierung, die Grundlage fur die TRANSVEKTOR-Regelung von Drehfeldmaschinen. Siemens Z. 1971. Vol. 45. pp. 757-760.
55. Plunkett A.B. Direct flux and torque regulation in-PWM inverter induction motor drive // IEEE Trans. Ind. Appl. 1977. Vol. 13. No. 3. pp. 470- 478.
56. Walker L.H., Espelage P.M. A high-performance controlled-current inverter drive // IEEE Trans. Ind. Appl. 1980. Vol. 16. No. 2. pp. 193-202.
57. FRICON-A new frequency controlled shaft generator from Siemens Machinery 1988. No. №17/18. pp. 974-978.
58. Островляничик В. Ю. Развитие теории и практика создания автоматического электропривода большой мощности в составе технологических комплексов. Новокузнецк: Дисс. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук.: 05.13.07. В.Ю. Островляничик, 1997. 420 с.
59. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоатомиздат, 1984. 192 с.

60. Nguyen Phung Quang, Jörg-Andreas Dittrich. Vector Control of Three-Phase AC Machines. System Development in the Practice. p.340.
61. Аршеневский Н.Н. Обратимые гидромашины гидроаккумулирующих электростанций. М.: «Энергия», 1977. 240 с.
62. Глазырин М.В. Построение систем векторного управления электроприводов на базе машины двойного питания. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук.:05.09.03. М.В. Глазырин; науч. рук. А.С. Востриков – Новосибирск: НГТУ, 1997. 148 с.
63. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. 298 с.
64. Барлит. В. В. Гидравлические турбины. Киев, издательское объединение "Вища школа", 1977. 360 с.
65. Васильев Ю.С., Саморуков И.С., Хлебников С.Н. Основное энергетическое оборудование гидроэлектростанций. Состав и выбор основных параметров. Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. 134 с.
66. Гончаров А.Н. Гидроэнергетическое оборудование гидроэлектростанций и его монтаж. М.: Энергия, 1972. 319 с.
67. Новкунский А.А. Разработка усовершенствованной методики расчета и исследование переходных процессов в агрегатах ГЭС после сброса нагрузки. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук.:05.04.13. Новкунский А. А.; науч. рук. В.А. Умов – Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2010. 256 с.
68. Пивоваров В.А. Проектирование и расчет систем регулирования гидротурбин. Л.: Машиностроение, 1973. 283 с.
69. Аронович Г.В., Картвелишвили Н.А., Любимцев Я.К. Гидравлический удар и уравнительные резервуары. М.: Наука, 1968. 250 с.
70. Мостков М.А., Башкиров А.А. Расчеты гидравлического удара. М.: Госэнергоиздат, 1952. 200 с.

71. Жмудь А.Е. Гидравлический удар в гидротурбинных установках. М.: Государственное энергетическое издательство, 1953. 236 с.
72. Фрейшист А.Р., Хохарин А.Х., Шор А.М. Стальные трубопроводы гидроэлектростанций. М.: Энергоиздат, 1982. 247 с.
73. Альтшуль А.Д. Гидравлические потери на трение в трубопроводах. М. – Л.: Госэнергоиздат. 256 с.
74. Асарин А. Е., Бестужева К. Н. Водоэнергетические расчеты. М.: Энергоатомиздат, 1986. 224 с.
75. Шевелев Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб. 5-е изд. М.: Строй издат., 1973. 112 с.
76. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
77. Меркурьев Г.В., Шаргин Ю.М. Устойчивость энергосистем. СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. 369 с.
78. Глазырин М.В., Диёров Р.Х. Анализ динамических свойств гидроагрегата на основе машины двойного питания // Известия вузов. Электромеханика. 2013. № 2. С. 28-31.
79. Глазырин М.В., Диёров Р.Х. Перспективы применения генераторных комплексов на основе машины двойного питания для малых ГЭС // Известия вузов. Электромеханика. 2012. № 6. С. 78-82.
80. Слежановский О.В., Дацковский Л.Х., Кузнецов И.С., и др. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.
81. Симаков, Г.М. Системы автоматического управления электроприводами: Учеб. пособие по курсовому проектированию. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 116 с.
82. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов.

Екатеринбург: учеб. пособие. ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. 279 с.

83. Глазырин М.В., Диёров Р.Х., Краснопеев Е.А. Построение системы регулирования активной мощности гидроагрегата с переменной частотой вращения вала // Вестник Таджикского технического университета. 2013. № 2. С. 73-77.
84. Бронковский Г. А., Гольдфарб А. И., Фасулати Р. К. Технология гидротурбиностроения. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. 192 с.
85. Глазырин М.В., Диёров Р.Х. Анализ и исследование радиально-осевой гидротурбины для МГЭС с машинами двойного питания // Вестник Таджикского технического университета. 2012. № 4. С. 54-59.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМОГО ГИДРОАГРЕГАТА МОЩНОСТЬЮ 500 кВт
МИНИ-ГЭС АРТУЧ, РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН**

1. Исходные данные

Мини-ГЭС предназначена для работы параллельно с промышленной электросетью. Работа на изолированную нагрузку и в режиме синхронного компенсатора не предусмотрена.

1.	Установленная мощность ГЭС, кВт	500
2.	Количество гидроагрегатов, шт.	1
3.	Напор расчетный (нетто), м	71,3
4.	Расход максимальный, м ³ /с	1,15
5.	Высота расположения ГЭС на уровне моря, м	2025

На водоприемнике перед водоводом устанавливается ремонтный плоский затвор и сороудерживающая решетка.

Нормальный пуск и останов гидроагрегата должен производиться открытием и закрытием предтурбинного затвора (рисунок А.1).

2. Общие технические требования к гидроагрегату

Выходная мощность гидроагрегата при напоре нетто 71,5 м и расходе не более 1,15 м³/с должна быть, кВт не менее 500

3. Требования к гидротурбине

1.	Тип гидротурбины - радиально-осевая, горизонтальная	
2.	Диаметр рабочего колеса, м	0,4
3.	Частота вращения, об/мин:	
	- номинальная.....	1500
	- разгонная.....	не более 2900
4.	Номинальная мощность на валу турбины при напоре 71,3 м, кВт	538

4. Требования к генератору

1.	Мощность активная-номинальная, кВт	не менее 500
2.	Мощность полная-номинальная, кВА.....	не менее 625
3.	Коэффициент мощности номинальный.....	0,8
4.	Напряжение номинальное, В	400

5.	Частота вращения - номинальная, об/мин	1500
6.	Частота тока, Гц	50
7.	Коэффициент полезного действия-номинальный, %	не менее 93

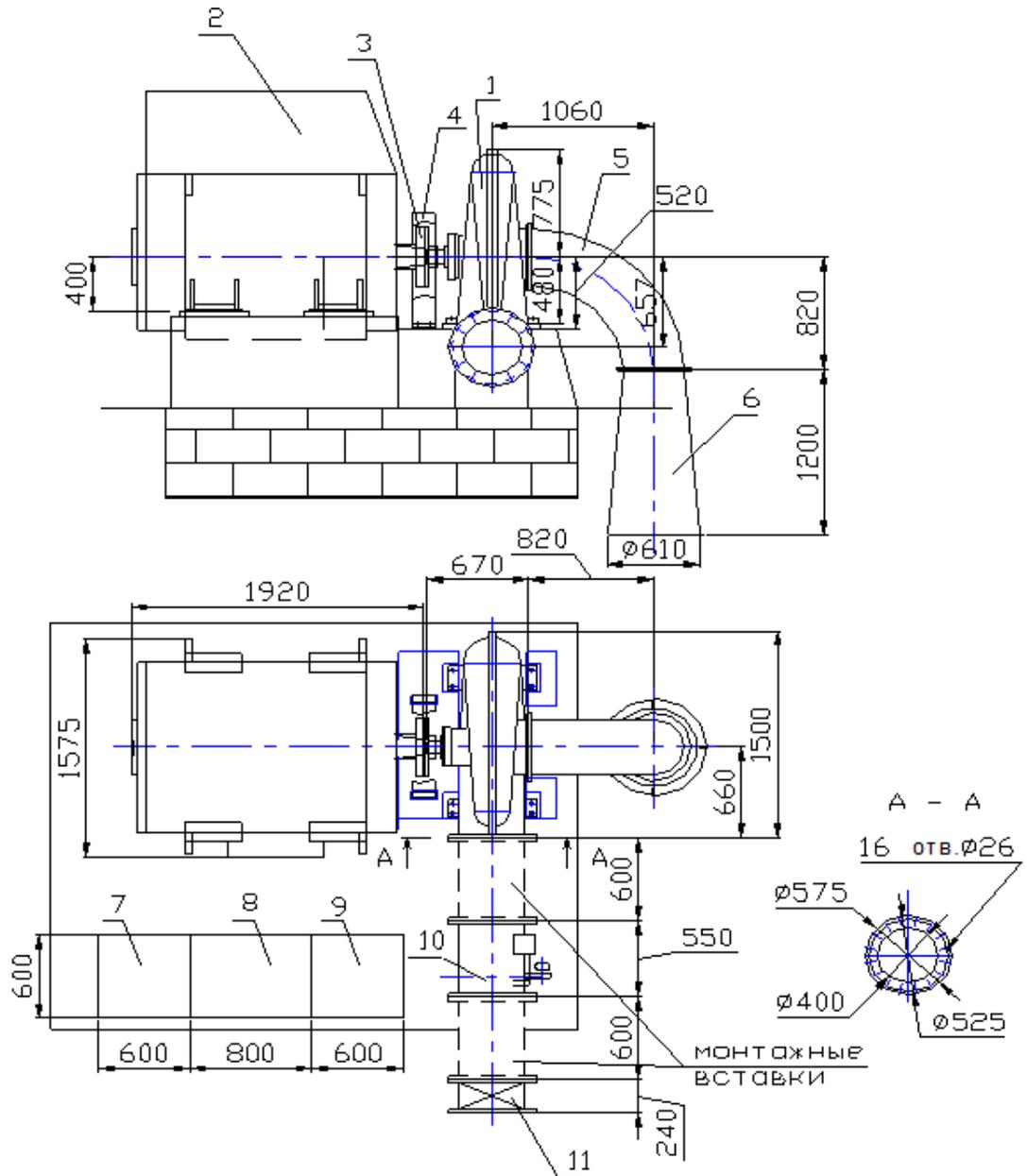


Рисунок А.1 – Габаритные и установочные размеры гидроагрегата с радиально-осевой турбиной PO100-40

1-Гидротурбина; 2-Генератор; 3-Муфта (Маховик); 4- Кожух; 5-Колено; 6- Диффузор; 7,8,9-Шкаф управления; 10-Противоразгонное устройство; 11- Предтурбинный затвор

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

СПОСОБ ПУСКА ГИДРОАГРЕГАТА МИНИ-ГЭС НА ОСНОВЕ МАШИНЫ
ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Пуск ГА мини-ГЭС на основе МДП.

Порядок запуска ГА мини-ГЭС на основе МДП:

1. Включить питание цепей управления;
2. Открыть предтурбинную задвижку;
3. Медленно начать приоткрывать НА;
4. Разгонять ГА до минимального значения диапазона частоты вращения;
5. Подать питание на силовую часть ГК;
6. Система управления тиристорным короткозамыкателем (ТК) подключит кольца ротора к ПЧ, если напряжение U_r на кольцах ротора меньше допустимого. Напряжение на кольцах ротора должно быть меньше максимального допустимого напряжения ПЧ $U_r < U_{ПЧ}^{max\ доп}$ (ТК в любой момент готов закоротить роторную цепь между ПЧ и МДП (рис. П2.1). ТК предназначен для защиты системы от превышения напряжения при $|s| > |s_{доп}|$ и защищает ПЧ от перегрузки по току при коротком замыкании в цепях статора);
7. Автоматически вступают в работу контуры фазных токов ПЧ. Сигналы задания фазных токов ПЧ формирует СВУ МДП.

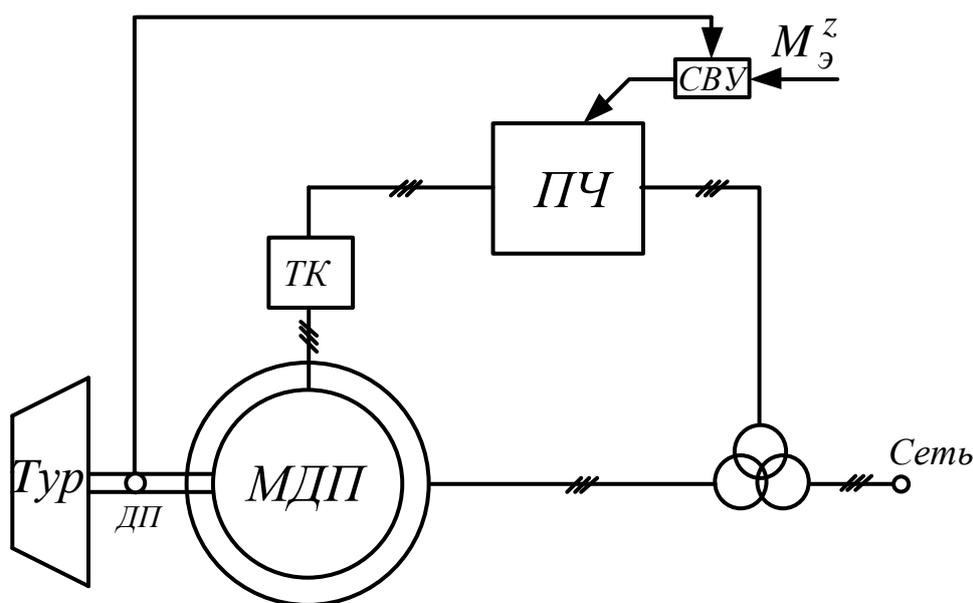


Рисунок Б.1 – Функциональная схема ГК с ТК

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ОСЦИЛОГРАММЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
УСТАНОВКЕ – МИКРО-ГЭС МОЩНОСТЬЮ 300 Вт

Результаты обработки ступенчатого увеличения сигнала задания по мощности.

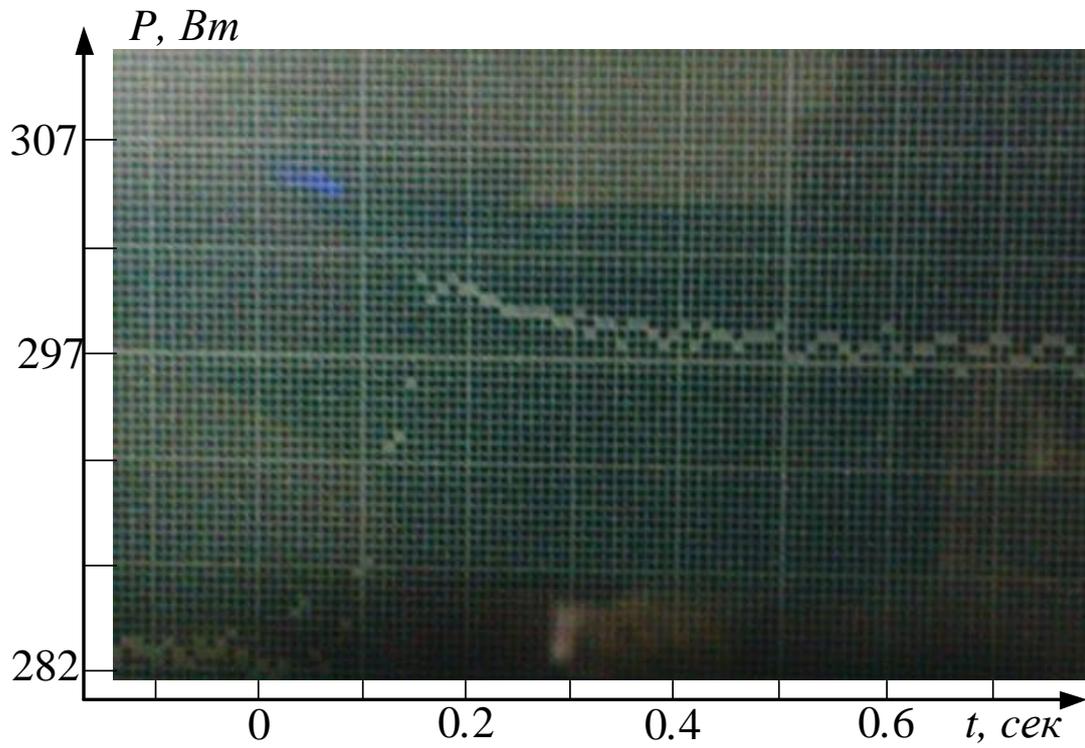


Рисунок В.1 – Переходный процесс по активной мощности ГА микро-ГЭС

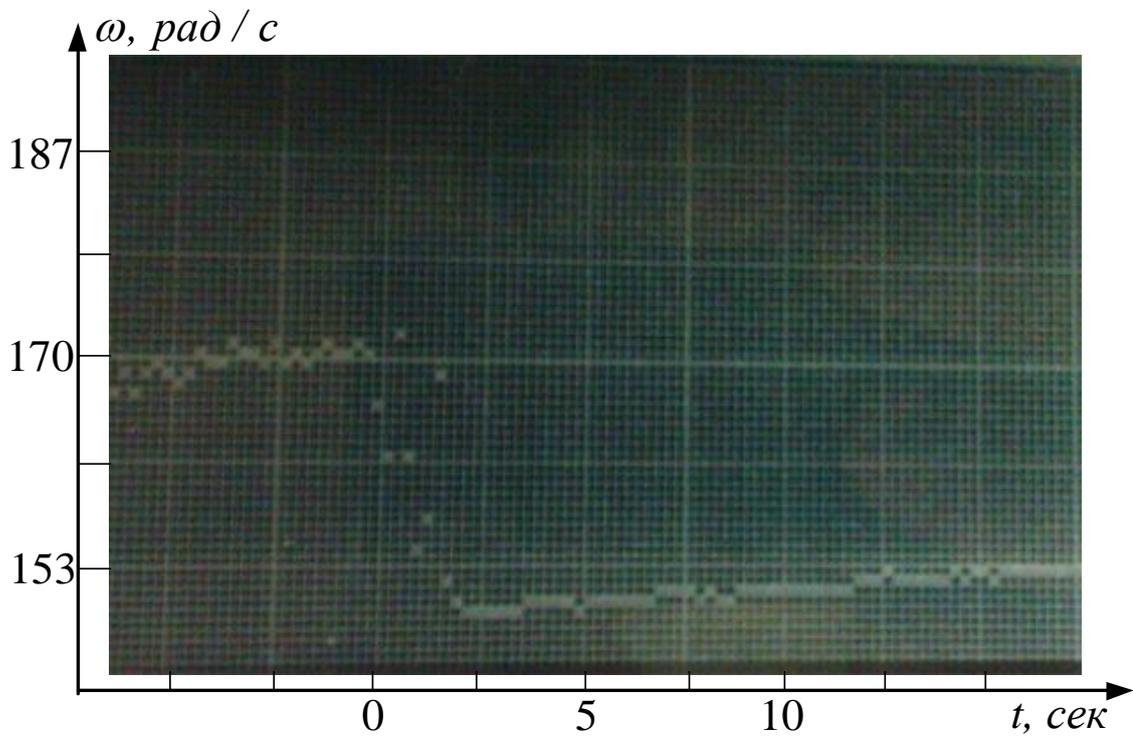


Рисунок В.2 – Переходный процесс по угловой скорости вала ГА микро-ГЭС

Результаты обработки ступенчатого уменьшения сигнала задания по мощности.

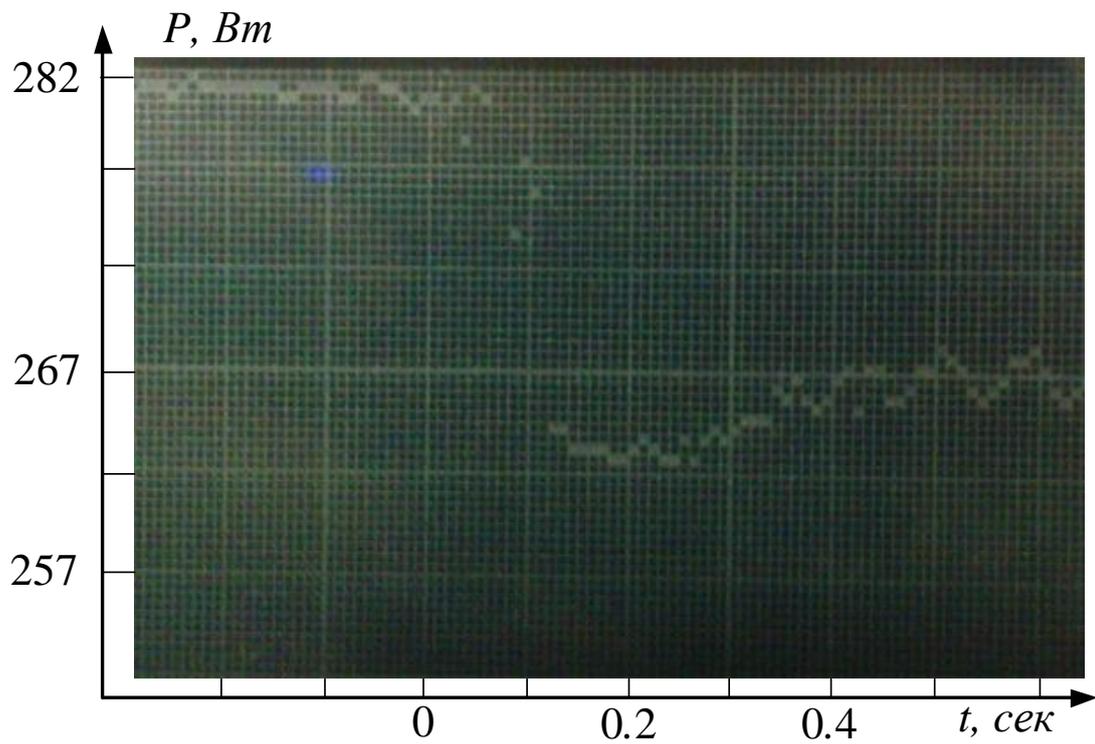


Рисунок В.3 – Переходный процесс по активной мощности ГА микро-ГЭС

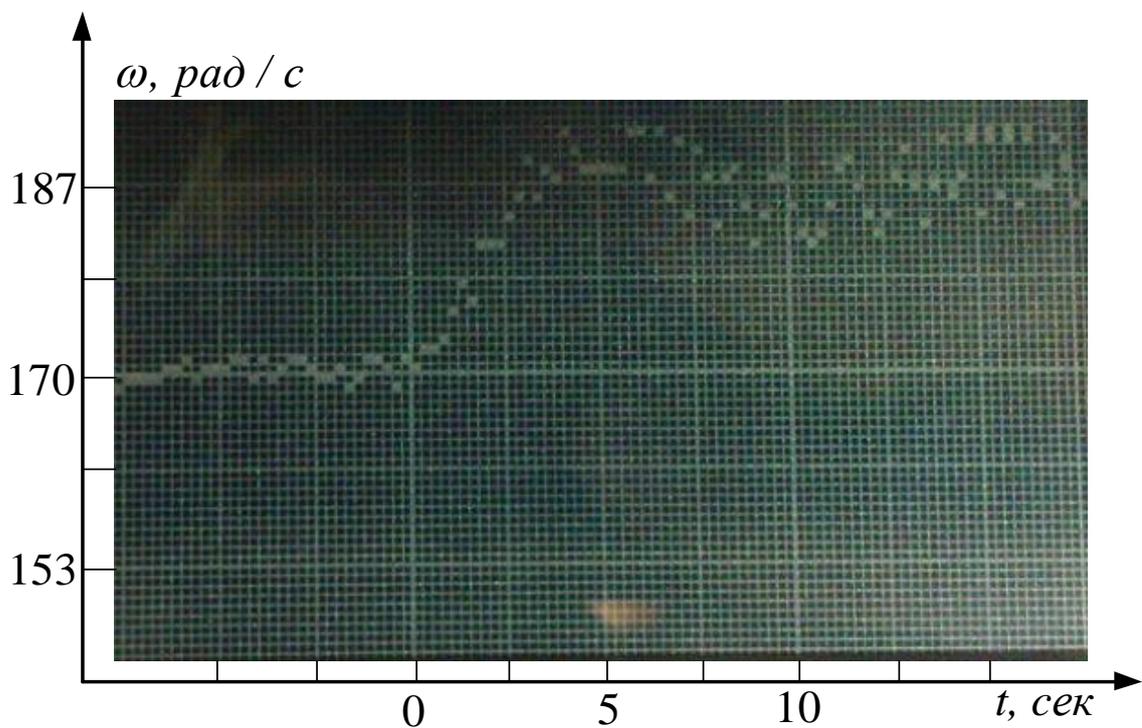


Рисунок В.4 – Переходный процесс по угловой скорости вала ГА микро-ГЭС

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по учебной работе
профессор д.т.н. А.А. Батаев

« 23 » _____ 2014 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Диёрова Р.Х. в учебный процесс

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы аспиранта Диёрова Рустама Хакималиевича используются в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» НГТУ:

1. При чтении курсов лекций по дисциплинам «Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов», «Моделирование электромеханических систем» студентам 3-5 курсов и магистрантам 1-2 года обучения факультета мехатроники и автоматизации по направлению 140600 - «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», а так же в курсовом и дипломном проектировании.

2. В научно-исследовательских работах студентов кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» НГТУ.

Зав. кафедрой «Электропривод
и автоматизация промышленных
установок» НГТУ, д.т.н, доцент

Аносов В.Н.