

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

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент  
**Глазырин Михаил Владимирович**

**Официальные оппоненты:**

**Островлянчик Виктор Юрьевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника» ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

**Филлюшов Юрий Петрович,**  
кандидат технических наук, инженер  
ФГУП ПО «Север» объединения  
«Росатом», г. Новосибирск

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирская государственная академия водного транспорта»

Защита состоится «5» марта 2015 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте <http://www.nstu.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_» января 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
профессор



Нейман Владимир Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современная электроэнергетика столкнулась с проблемой истощения традиционных энергоресурсов при одновременном росте потребления электроэнергии. В результате, в зимнее время Республика Таджикистан испытывает энергетический кризис. 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 сот метров. Предварительные исследования Таджикско-Норвежского Центра по развитию малой энергетики показывают, что в горных районах Республики Таджикистан технически возможно и экономически целесообразно строительство более 900 мини-ГЭС с мощностями гидроагрегатов от 100 до 3000 кВт.

Мини-ГЭС имеют водохранилище, которое следует использовать для запаса воды в ночное время суток и расхода её в часы пиковой электрической нагрузки. Традиционно изменение расхода воды через гидротурбину мини-ГЭС осуществляют вручную с помощью направляющего аппарата. Для работы гидроагрегата ГЭС в автоматическом режиме применяют гидромеханический привод направляющего аппарата, получающий энергию от маслonaпорной установки. Данное гидромеханическое оборудование требует квалифицированного обслуживания и присутствия на ГЭС дежурного персонала.

Анализ представленных в справочной литературе характеристик гидротурбин показывает, что радиально-осевые гидротурбины с низким коэффициентом быстроходности позволяют производить изменение расхода воды через турбину и мощности турбины в диапазоне 3:2 путём изменения частоты вращения вала гидроагрегата (ГА) при сохранении достаточно высоких значений КПД турбины.

Регулирование генерируемой активной мощности путём изменения частоты вращения вала генератора производят в ветроэнергетических установках, где основным техническим решением на сегодняшний день является применение машины двойного питания (МДП), подключенной по цепи статора к электроэнергетической системе. Питание цепи ротора МДП осуществляют через контактные кольца ротора с помощью полупроводникового преобразователя частоты (ПЧ).

Для ограничения напряжения ПЧ со стороны цепи ротора в переходных процессах необходимо построение быстродействующей САР угловой скорости вала ГА.

Повышение качества электроснабжения потребителей требует повышения манёвренности генерирующих мощностей электроэнергетической системы. Для оперативного изменения выработки активной мощности в аварийных режимах работы электроэнергетической системы необходимо обеспечить высокое быстродействие САР активной мощности ГА 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.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** произведен обзор литературы по ресурсосбережению и энергоэффективности в гидроэнергетике, обоснована необходимость применения МДП в гидроагрегатах мини-ГЭС, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, приведены научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**В первой главе** диссертационной работы произведён анализ рабочих характеристик гидротурбин (рисунок 1). Показано, что для регулирования мощности турбины без воздействия на направляющий аппарат (НА) в ГА мини-ГЭС следует применять гидротурбины радиально-осевого (РО) типа с низким коэффициентом быстроходности. При повышении частоты вращения ГА центробежная сила увеличивает противодавление, препятствующее прохождению воды через НА турбины на рабочее колесо, что позволит наполнять водохранилище ГЭС во время суток, когда потребление электроэнергии минимально.

Произведен обзор силовых схем генераторных комплексов переменного тока, предназначенных для работы при переменной частоте вращения вала на сеть бесконечной мощности. По результатам обзора принята силовая схема на основе МДП, рисунок 2.

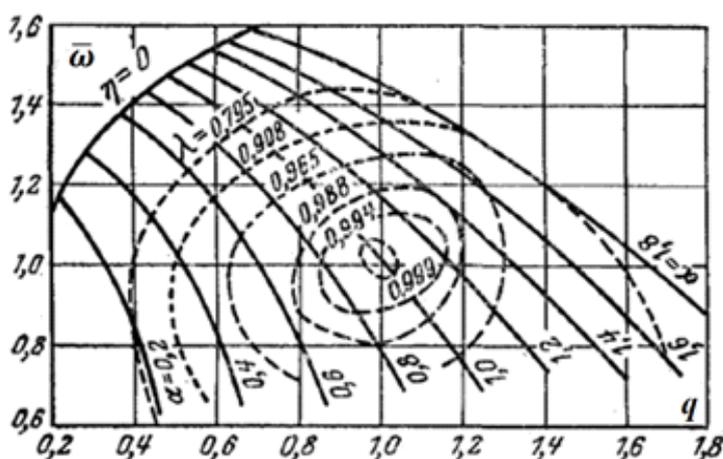


Рисунок 1 – Характеристики РО гидротурбины для установившихся режимов работы.  $\alpha$  – относительное значение угла поворота лопаток НА, номинальному открытию НА соответствует значение  $\alpha = 1$ ;

$\lambda = \eta / \eta_H$  – относительный КПД;

$q = Q / Q_H$  – относительный расход воды;

$\bar{\omega} = \omega / \omega_H$  – относительное значение угловой скорости вала ГА

ротором (АМ, рисунок 2) при помощи ПЧ в цепи ротора наиболее полно рассмотрены в работах научных коллективов под руководством М.М. Ботвинника, Ю.Г. Шакаряна и, в последние два десятилетия, О.С. Хватова.

Вышеупомянутые генераторные комплексы на основе МДП и системы управления ими ориентированы на их применение в ветроэнергетических установках. Применение же в качестве первичного двигателя гидротурбины потребует учета особенностей её статических и динамических характеристик при синтезе регуляторов системы управления МДП-генератором ГА.

В главе сформулированы цель исследования и задачи, требующие решения в диссертационной работе.

**Вторая глава** посвящена математическому описанию 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 РО гидротурбины при переменной частоте вращения вала ГА получено на основании применяемой проектными организациями

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 АМ. СВУ позволяет регулировать активную мощность МДП со стороны ротора путём изменения его электромагнитного момента независимо от частоты вращения вала.

В Российской научнотехнической литературе вопросы построения систем управления асинхронной машиной с фазным

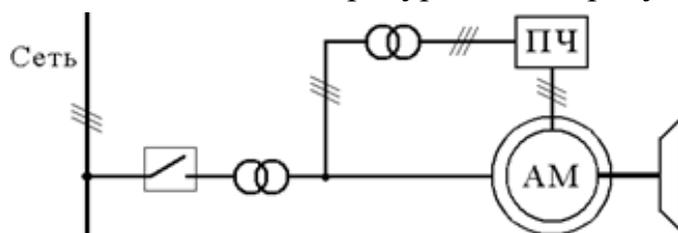


Рисунок 2 – Силовая схема генераторного комплекса на основе МДП

модели РО гидротурбины, работающей на одном валу с синхронным генератором при постоянном значении частоты сети:

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

$$h = -T_W \frac{dq}{dt}; \quad (2)$$

$$p_T = q(1+h); \quad (3)$$

где  $\mu$  – управляющее воздействие, реализуемое при помощи НА (при  $\alpha=1$   $\mu=1$ );

$p_T = P_T / P_H$ ;  $P_T$ ,  $P_H$  – мощность турбины и её номинальное значение;

$h = \frac{H - H_H}{H_H} = \frac{\Delta H}{H_H}$ ;  $H$ ,  $H_H$  – давление на турбине в метрах водяного столба и его номинальное значение;

номинальное значение;

$q = Q / Q_H$ ;  $Q$ ,  $Q_H$  – расход воды через турбину и его номинальное значение;

$T_W = \frac{Q_H}{gH_H} \frac{L_W}{S_W}$  – время изменения скорости воды в напорном водоводе от нуля до

номинальной под действием силы тяжести (постоянная времени водовода);  $S_W$  –

сечение напорного водовода;  $L_W$  – длина напорного водовода;  $g$  – ускорение

свободного падения.

Зависимость величины  $\mu$  от  $\omega$  предложено учитывать переменной  $\mu_\omega$ ,

$$\mu = \mu_{НА} + \mu_\omega, \quad (4)$$

где  $\mu_{НА}$  – относительное открытие направляющего аппарата (номинальному от-

крытию НА соответствуют значения  $\alpha=1$ ,  $\mu_{НА}=1$ );  $\mu_\omega$  – переменная, учитыва-

ющая действие центробежной силы, препятствующей прохождению воды через

НА. При  $\omega = \omega_H$   $\mu_\omega = 0$ . При  $\omega < \omega_H$   $\mu_\omega > 0$ . При  $\omega > \omega_H$   $\mu_\omega < 0$ .

Переменная  $\mu_\omega$ , учитывающая действие центробежной силы, определяется выражением вида

$$\mu_\omega = -k_\mu^\omega (\omega - \omega_H) = -\overline{k_\mu^\omega} \Delta\omega; \quad (5)$$

$$\overline{k_\mu^\omega} = \frac{k_\mu^\omega}{\omega_H},$$

где коэффициент  $\overline{k_\mu^\omega}$  представляет собой тангенс угла наклона касательной к характеристике  $\alpha = const$  РО гидротурбины (рисунок 1) в точке линеаризации.

Математическая модель (1-5) составлена при допущениях о неэластичности стенок водовода, несжимаемости воды и о том, что гидротурбина работает на участке характеристики (рисунок 1), где её КПД практически не зависит от частоты вращения вала.

Итак, известное из литературы математическое описание РО гидротурбины с напорным водоводом (уравнения 1, 2, 3) расширено уравнениями (4, 5) с целью

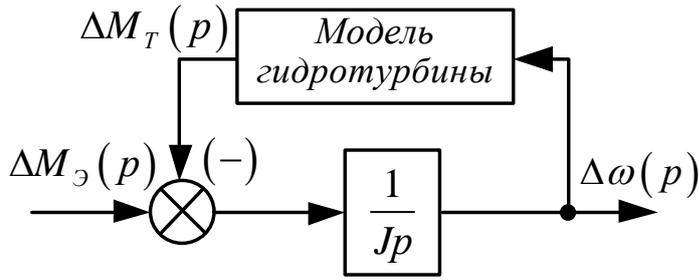


Рисунок 4 – Структурная схема линейной модели ГА

вольного прямолинейного участка характеристики  $\alpha = const$  (рисунок 1) приведена на рисунке 3.

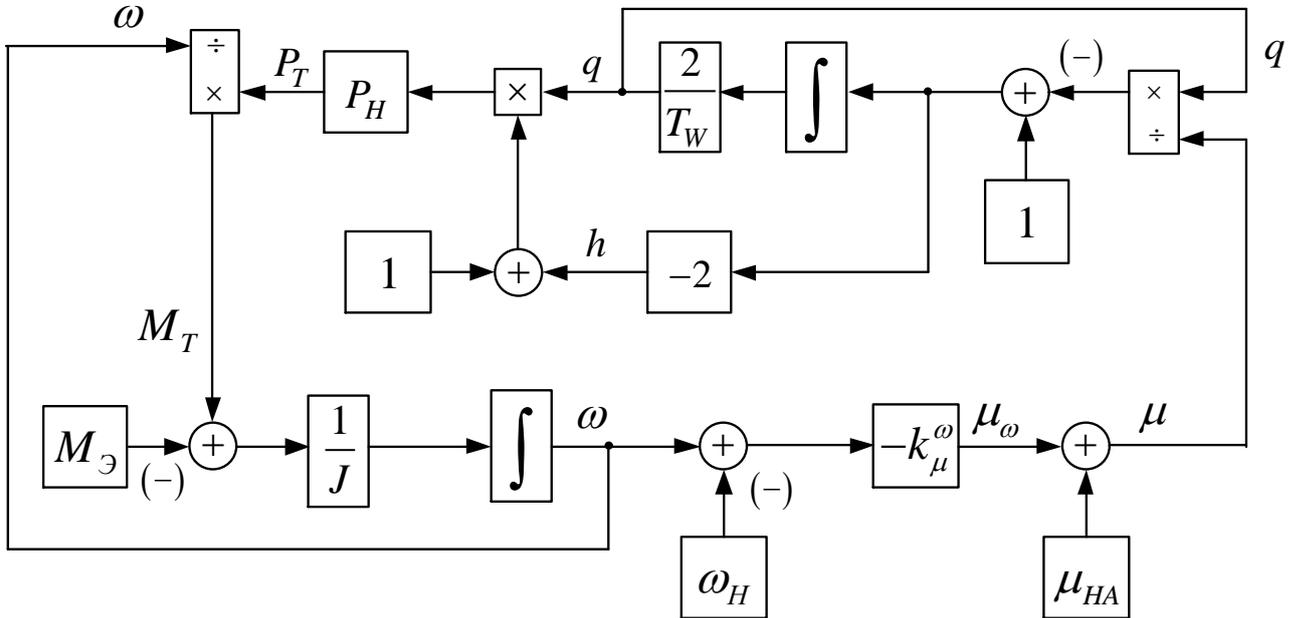


Рисунок 3 – Структурная схема модели РО гидротурбины с напорным водоводом.

$M_{\text{Э}}$  - электромагнитный момент МДП-генератора;  $M_T$  - момент гидротурбины;

$J$  - суммарный момент инерции на валу ГА

**В третьей главе** произведена линеаризация динамической модели ГА в малой окрестности рабочей точки. Получена передаточная функция ГА, описывающая его динамические свойства по угловой скорости вала ГА в зависимости от электромагнитного момента МДП-генератора,

$$W_{\text{ГА}}(p) = \frac{\Delta\omega(p)}{\Delta M_{\text{Э}}(p)} = \frac{\omega_0}{P_H k_{\mu}^{\omega} + M_T^0} \frac{1 + \mu_0 \frac{T_W}{2} p}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (6)$$

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

где  $\mu_0$ ,  $M_T^0$ ,  $\omega_0$  – значения  $\mu$ ,  $M_T$  и  $\omega$  в точке линеаризации.

учёта изменения частоты вращения вала ГА. Данная математическая модель (1-5) необходима для исследования динамических свойств РО гидротурбины с целью последующего учёта их при синтезе регуляторов САР активной мощности ГА.

Структурная схема математической модели РО гидротурбины с напорным водоводом для произ-

Анализ устойчивости линейной модели объекта управления (рисунок 4) в режиме ограничения электромагнитного момента произведён по коэффициентам характеристического полинома передаточной функции (6).

Устойчивость замкнутой системы (рисунок 4) определяется неравенством,

$$\frac{J}{T_W} > \left( k_\mu^\omega \mu_0 P_H - \frac{\mu_0}{2} M_T^0 \right) / \omega_0. \quad (7)$$

Данное условие обеспечивается увеличением соотношения  $J/T_W$ . Более строгим является условие отсутствия свободных колебаний,

$$\left( \omega_0 J + \mu_0 \frac{T_W}{2} M_T^0 - T_W k_\mu^\omega \mu_0 P_H \right)^2 \geq 2 T_W \omega_0 J \mu_0 (M_T^0 + k_\mu^\omega P_H). \quad (8)$$

Выполнение данного неравенства (8) должно обеспечить демпфирование колебаний угловой скорости вала ГА, опасных с точки зрения возникновения гидроудара.

На рисунке 5 приведены результаты сравнения переходных характеристик двух моделей: линейной (рисунок 4) и нелинейной (рисунок 3).

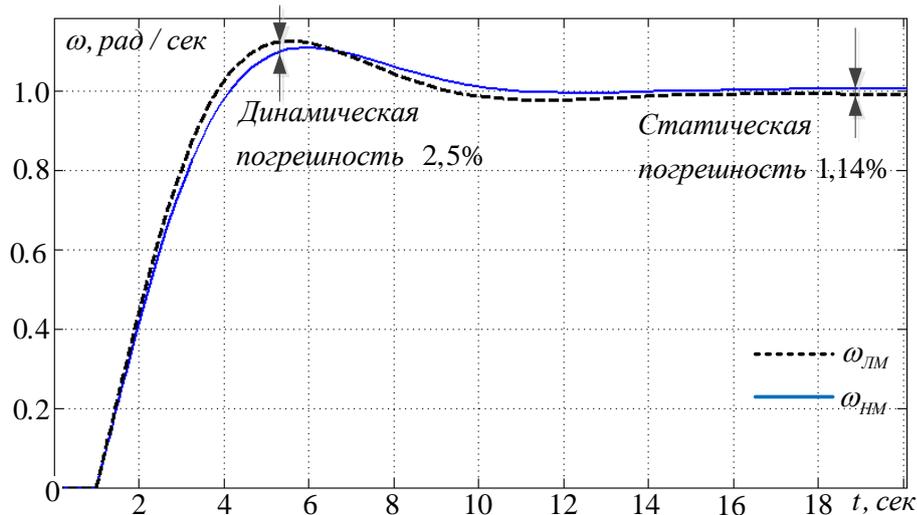


Рисунок 5 – Переходные характеристики ГА.  $\omega_{ЛМ}(t)$  - переходная характеристика рассчитана по линеаризованной модели ГА;  $\omega_{НМ}(t)$  - переходная характеристика рассчитана по нелинеаризованной модели ГА

Из литературы по гидроэнергетике известно, что для традиционно применяемых ГА на основе синхронного генератора, работающих с  $\omega = const$  и генерируемой активной мощностью ГА ( $P_\Omega$ ),  $P_\Omega = P_T$ , передаточная функция РО гидротурбины рассматривается относительно управляющего воздействия  $\mu$ ,

$$W_T(p) = \frac{\Delta p_T(p)}{\Delta \mu(p)} = \frac{-T_W p + 1}{\frac{T_W}{2} p + 1}.$$

Данная передаточная функция представляет собой неминимально-фазовое звено. Замкнутую систему на основании неминимально-фазового звена невозможно сделать быстродействующей, т.к. физически невозможно скомпенсировать правые нули в передаточной функции объекта управления.

Регулирование  $P_{\mathcal{E}}$  путем изменения электромагнитного момента МДП-генератора при переменной частоте вращения вала ГА,

$$P_{\mathcal{E}} = M_{\mathcal{E}} \omega,$$

позволяет существенно повысить быстродействие по  $P_{\mathcal{E}}$  благодаря тому, что в динамических режимах имеется возможность работать с неравными друг другу значениями  $P_{\mathcal{E}}$  и  $P_T$ , изменяя кинетическую энергию маховых масс ГА.

В данной главе получены условия устойчивости (7) и аperiodического характера переходных процессов по угловой скорости вала ГА (8). Данные условия позволяют производить выбор значений суммарного момента инерции и сечения напорного водовода ГА.

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

Систему управления мини-ГЭС с одним ГА предложено строить в виде многоконтурной системы подчиненного регулирования координат. САУ ГА (рисунок 6) содержит внутренний контур регулирования скорости, внешний контур регулирования уровня воды в водохранилище и контур регулирования активной мощности, от которого требуется высокое быстродействие при отработке внепланового задания  $P_{внеп}^Z$  в аварийных режимах работы ЭЭС.

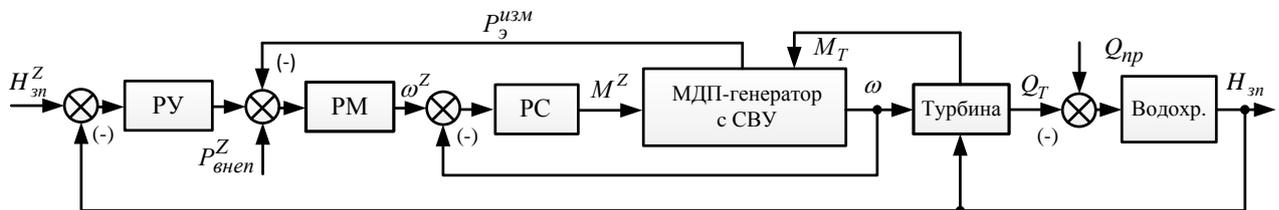


Рисунок 6 – Функциональная схема САУ мини-ГЭС с одним ГА. РУ, РМ, РС – регуляторы уровня воды, активной мощности и угловой скорости вала  $\omega$ , соответственно;  $H_{зн}^Z$ ,  $\omega^Z$ ,  $M_{\mathcal{E}}^Z$  – сигналы задания уровня, угловой скорости и электромагнитного момента, соответственно;  $P_{\mathcal{E}}^{изм}$  – измеренное значение  $P_{\mathcal{E}}$ ;  $Q_T$  – расход воды через турбину;  $Q_{пр}$  – приток воды в водохранилище ГЭС;  $H_{зн}$  – превышение уровня воды в водохранилище над минимально-допустимым по условиям эксплуатации гидротурбины

Структурная схема контура регулирования скорости (КРС), рисунок 7, получена для линеаризованного объекта управления.

Передаточная функция РС выбрана таким образом, чтобы в установившихся режимах обеспечивалось астатическое поддержание угловой скорости. В динамических режимах САУ скорости должна ограничивать скольжение АМ для защиты ПЧ от повышенного напряжения со стороны цепи ротора.

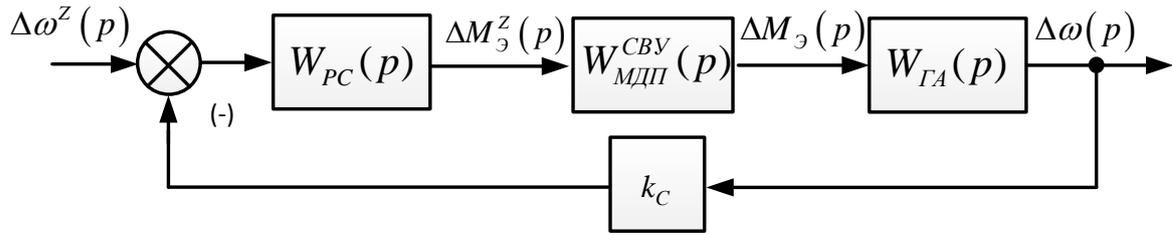


Рисунок 7 – Структурная схема КРС.  $W_{PC}(p)$  – передаточная функция регулятора скорости;  $W_{MДП}^{CBV}(p)$  – передаточная функция СВУ МДП по моменту;  $W_{ГА}(p)$  – передаточная функция ГА;  $k_C$  – коэффициент передачи в канале обратной связи по угловой скорости

При синтезе РС передаточная функция замкнутого контура скорости с достаточной степенью точности описывается выражением,

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

где  $T_\mu$  – постоянная времени, численно равная сумме некомпенсированных постоянных времени разомкнутого КРС.

Передаточная функция РС получена в виде,

$$W_{PC}(p) = W_{ИИД}(p)W_\Phi(p),$$

$$W_{ИИД}(p) = k_{II} + \frac{k_{II}}{p} + k_{Д}p,$$

где  $k_{II} = \frac{J\omega_0 - T_W\mu_0 P_H k_\mu^\omega + \mu_0 M_T^0 \frac{T_W}{2}}{\omega_0 k_\varepsilon k_C 2T_\mu}$  – коэффициент усиления пропорциональной части РС;

$k_{II} = \frac{M_T^0 + k_\mu^\omega P_H}{k_\varepsilon k_C \omega_0 2T_\mu}$  – коэффициент усиления интегральной части РС;

$k_{Д} = \frac{J\mu_0 T_W}{k_\varepsilon k_C 4T_\mu}$  – коэффициент усиления дифференциальной части РС;

$$W_\Phi(p) = \frac{1}{\frac{T_W}{2} p + 1}.$$

Структурная схема контура регулирования мощности (КРМ) имеет вид, рисунок 8.

На рисунке 8,

$$W_{ГАМ}(p) = \frac{\Delta P_\varepsilon(p)}{\Delta\omega(p)} = \frac{(M_T^0 + k_\mu^\omega P_H)(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)}{\mu_0 \frac{T_W}{2} p + 1} \text{ – передаточная функция ГА}$$

по активной мощности.

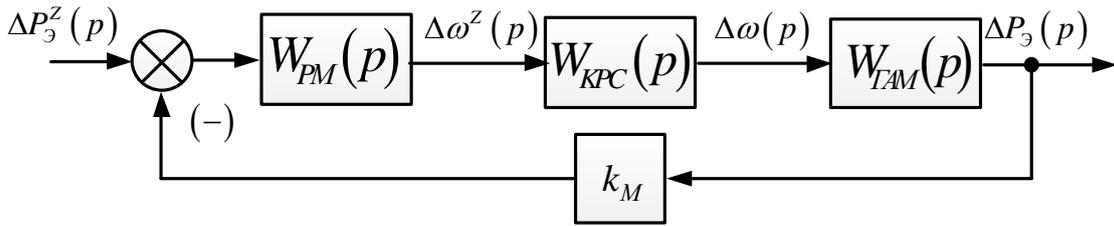


Рисунок 8 – Структурная схема КРМ.  $W_{PM}(p)$  – передаточная функция РМ;  $W_{KPC}(p)$  – передаточная функция КРС;  $k_M$  – коэффициент передачи в канале обратной связи по мощности;  $P_э^z$  – суммарное задание на выработку  $P_э$

При синтезе РМ передаточная функция замкнутого контура скорости с достаточной степенью точности аппроксимируется выражением

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

Передаточная функция КРМ, настроенного на модульный оптимум, имеет вид

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

Передаточная функция синтезированного РМ имеет вид

$$W_{PM}(p) = W_{ПИ}(p)W_{ФPM}(p),$$

$$W_{ПИ}(p) = k_{II} + \frac{k_{II}}{p},$$

где  $k_{II} = \frac{\mu_0 k_C T_W}{4T_\mu k_M}$  – коэффициент усиления пропорциональной части РМ;

$k_{II} = \frac{k_C}{4T_\mu k_M}$  – коэффициент усиления интегральной части РМ;

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

– передаточная функция фильтра, компенсирующего собственные динамические свойства ГА.

Методом структурного моделирования произведена проверка работоспособности предлагаемой инженерной методики синтеза регуляторов для ГА мини-ГЭС номинальной мощностью 500 кВт в характерных режимах работы. Постоянная времени водовода  $T_W$  принята равной 2 секунды; значение махового момента ГА  $J = 0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Результаты цифрового моделирования САР ГА, представленной на рисунке 9, при ступенчатом увеличении заданного значения  $P_э$  с 500 кВт до 525

кВт приведены на рисунках 10-13. При синтезе РС и РМ значение постоянной времени  $T_\mu$  принято равным 0,01с.

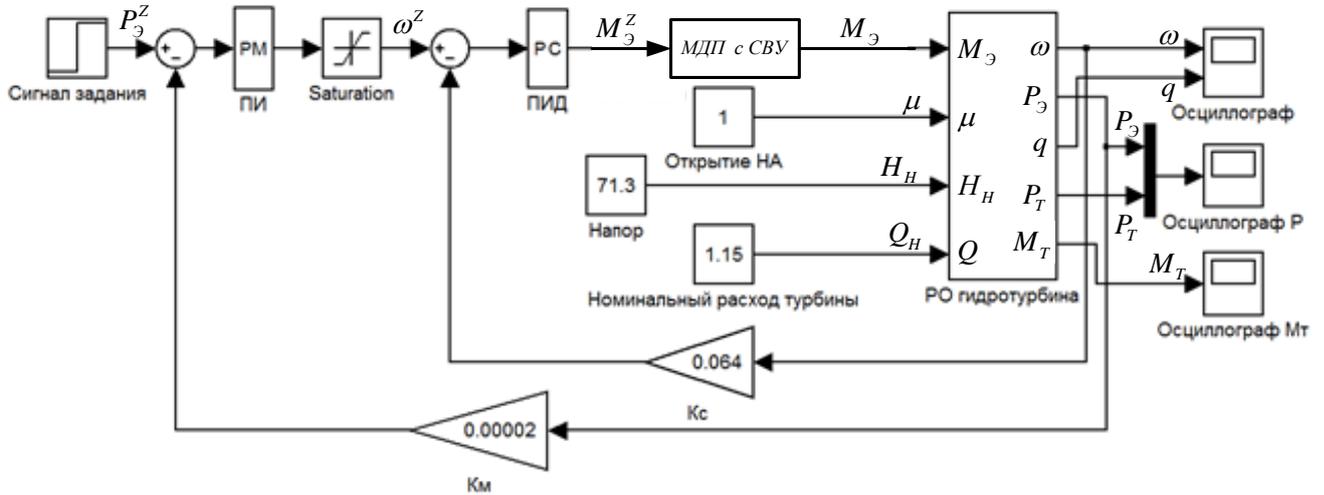


Рисунок 9 – Структура модели синтезированной двухконтурной САР активной мощности ГА

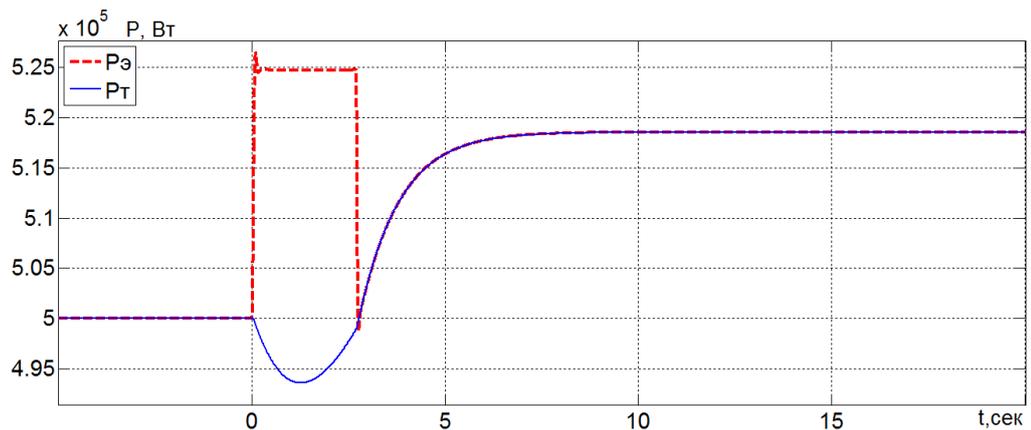


Рисунок 10 – Переходные процессы по мощности ГА на основе МДП

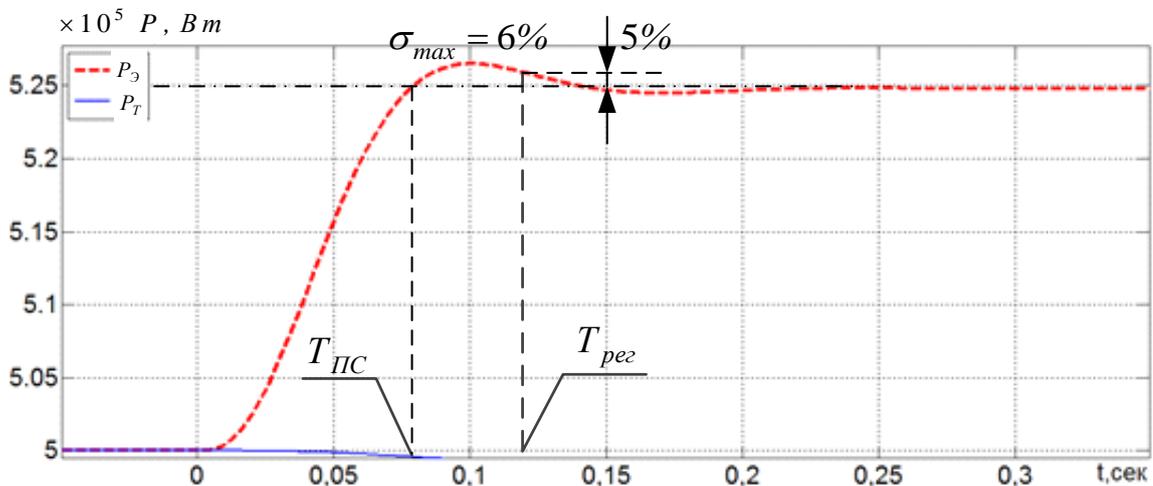


Рисунок 11 – Начальный участок переходного процесса  $P_э(t)$ , показанного на рисунке 10

Полученный в результате моделирования переходный процесс  $P_{\mathcal{G}}(t)$  (рисунок 11), имеет следующие показатели качества: время первого согласования  $T_{ПС} = 0,076 \text{ с} = 7,6 T_{\mu}$ ; время достижения максимального значения регулируемой величины –  $0,1 \text{ с}$ , что численно равно  $10 T_{\mu}$ ; время регулирования  $T_{рег} = 0,12 \text{ с}$ ; перерегулирование –  $6\%$ .

Таким образом, КРМ практически мгновенно (за  $0,12$  секунды) обрабатывает ступенчатое изменение задания по активной мощности. Далее, как видно из рисунка 10, КРМ продолжает стабилизировать заданное значение  $P_{\mathcal{G}}$ . Однако при этом мощность, развиваемая турбиной ( $P_T$ ), значительно меньше  $P_{\mathcal{G}}$ . Соответственно, и значение движущего момента, развиваемого турбиной ( $M_T$ ), меньше тормозящего момента  $M_{\mathcal{G}}$ , создаваемого МДП-генератором. Требуемое значение  $P_{\mathcal{G}}$  обеспечивается за счёт преобразования кинетической энергии вращающихся масс ГА в электрическую. Угловая скорость ГА уменьшается. Уменьшение  $\omega$  ГА сопровождается увеличением расхода воды через турбину (рисунок 12).

Как видно из рисунка 10, САР активной мощности ГА обеспечивала заданное значение  $P_{\mathcal{G}} = 525 \text{ кВт}$  до тех пор, пока звено насыщения на выходе РМ (рисунок 9) не ограничило уменьшающуюся угловую скорость ГА на уровне, соответствующем  $\omega_{min} = 151,6 \text{ рад/с}$ . Это произошло в момент времени  $t = 2,7 \text{ с}$  (рисунки 10, 12). Таким образом, с момента времени  $t = 2,7$  секунды РМ перестал действовать и, далее, поведение САР ГА определялось работой КРС, обрабатывающего заданное значение скорости  $\omega = 151,6 \text{ рад/с}$ .

Переходный процесс по  $\omega$  закончился к моменту времени  $t = 2,9 \text{ с}$  (рисунки 10, 12), после чего САР ГА застabilizировала угловую скорость  $\omega$  и генерируемая активная мощность  $P_{\mathcal{G}}$  стала равна мощности, развиваемой турбиной,  $P_{\mathcal{G}} = P_T$  (рисунок 10). Далее,  $P_{\mathcal{G}}$ ,  $P_T$  и расход воды через турбину,  $Q$ , продолжают возрастать. Переходные процессы  $Q(t)$ ,  $P_T(t)$ ,  $P_{\mathcal{G}}(t)$  завершаются новым установившимся режимом:  $Q = 1,181 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\omega = 151,6 \text{ рад/с}$  (рисунки 12, 13);  $P_{\mathcal{G}} = P_T = 518,5 \text{ кВт}$  (рисунок 10).

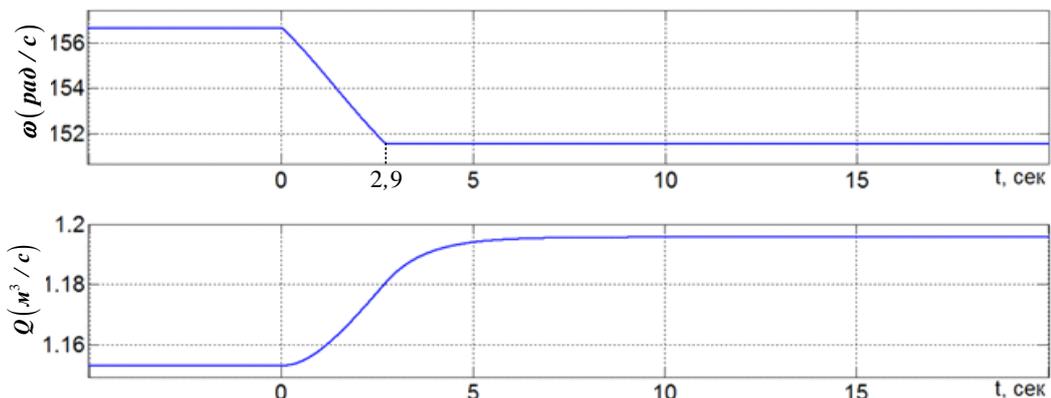


Рисунок 12 – Переходные процессы ГА по угловой скорости и расходу воды

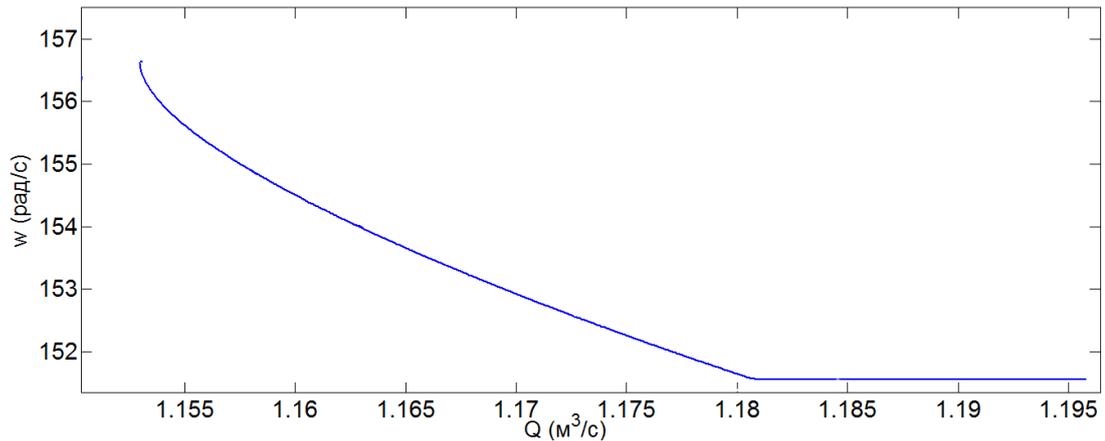


Рисунок 13 – Динамическая зависимость расхода воды от угловой скорости вала ГА

Результаты моделирования подтверждают адекватность предложенной автором инженерной методики синтеза регуляторов САР активной мощности ГА.

**Пятая глава** посвящена описанию экспериментальных исследований САР активной мощности ГА (рисунок 14) на микро-ГЭС.

Экспериментальным путем были получены следующие статические характеристики:  $Q = f(\omega)$ ,  $\omega = f(M_{\text{э}})$ ,  $\omega = f(P_{\text{э}})$ ,  $Q = f(P_{\text{э}})$ .

РО гидротурбина реализована на базе стандартного центробежного насоса типа 1К. Стандартное рабочее колесо насоса заменено на уменьшенную копию рабочего колеса РО гидротурбины, изготовленную автором (рисунок 14, б).

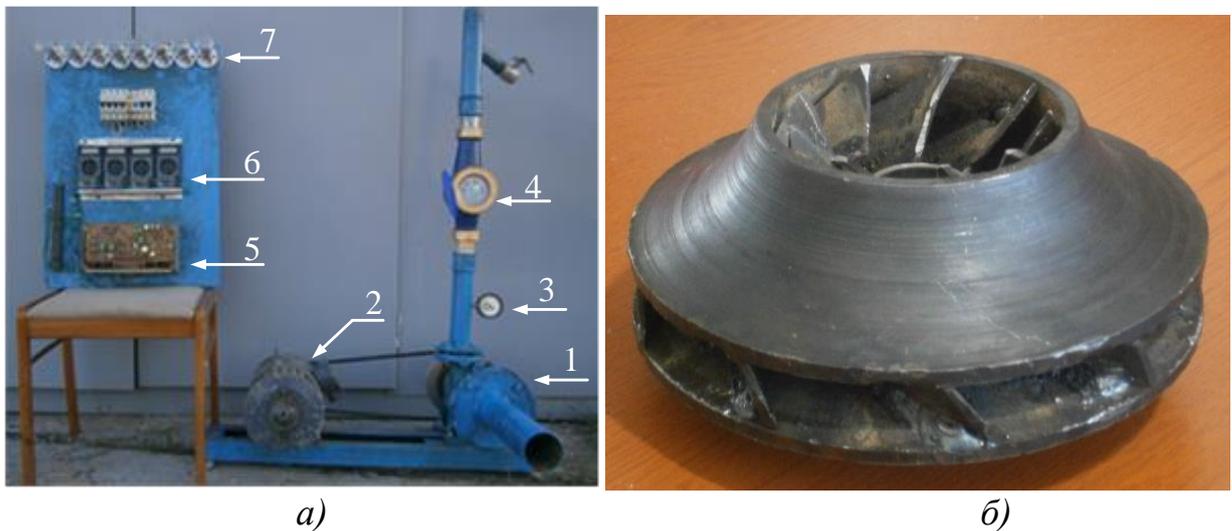


Рисунок 14 – Экспериментальный ГА с номинальной мощностью генератора 300 Вт.

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

В качестве генератора была задействована машина постоянного тока типа П11 с независимой обмоткой возбуждения:  $P_H = 0,3$  кВт,  $U_H = 220$  В,  $I_H = 2,1$  А,

$n_H = 1500$  об/мин. В качестве силового преобразователя был задействован унифицированный тиристорный преобразователь серии БУ 3609. Синтез РС и РМ произведён в соответствии с методикой, разработанной в главе 4 диссертации. Передаточная функция контура регулирования тока якоря представляла собой апериодическое звено с постоянной времени  $0,022$  с.

Переходные процессы в трёхконтурной САР активной мощности ГА (внутренний – контур регулирования тока якоря; промежуточный – КРС; внешний – КРМ) сняты с помощью цифрового осциллографа С8-19. Реакция САР на ступенчатое увеличение задания мощности показана на рисунках 15, 16, 17.

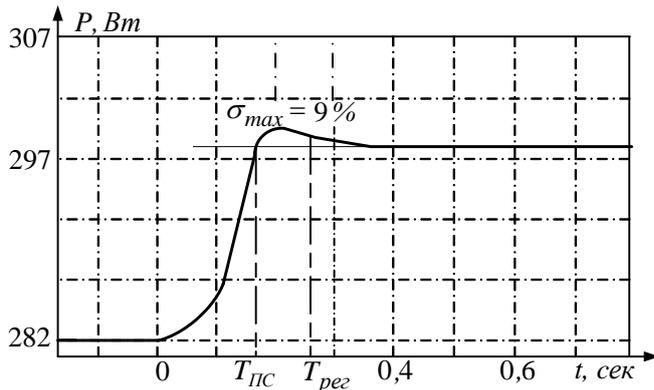


Рисунок 15 – Переходный процесс по активной мощности ГА микро-ГЭС

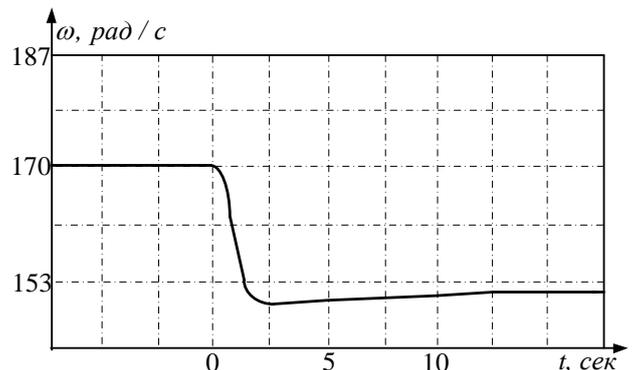


Рисунок 16 – Переходный процесс по угловой скорости вала ГА микро-ГЭС

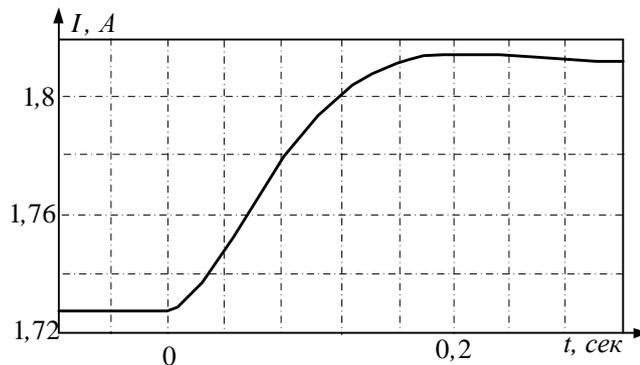


Рисунок 17 – Переходный процесс по моментобразующему току (току якоря) генератора микро-ГЭС

График, представленный на рисунке 15, показывает, что время первого согласования  $T_{ПС} = 0,17$  с  $\approx 7,6 T_{\mu}$ ; время достижения максимального значения регулируемой величины составило  $0,22$  с, что численно равно  $10 T_{\mu}$ ; время регулирования  $T_{рег}$  составило  $0,26$  с; перерегулирование –  $9\%$ .

Результаты экспериментальных исследований, проведённых на микро-ГЭС, подтвердили адекватность принятых допущений и основные теоретические положения диссертации.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические результаты работы.

**В приложении** к диссертации содержатся материалы, подтверждающие внедрение и использование результатов исследований.

## **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 установ-

кой 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.

#### **Работы, опубликованные в центральных журналах, рекомендованных списком ВАК:**

1. М.В. Глазырин. Перспективы применения генераторных комплексов на основе машины двойного питания для малых ГЭС/ М.В. Глазырин, Р.Х. Диёров // Известия вузов. Электромеханика №6. 2012. С. 78-82.

2. М.В. Глазырин. Анализ и исследование радиально-осевой гидротурбины для МГЭС с машинами двойного питания/ М.В. Глазырин, Р.Х. Диёров // Вестник Таджикского технического университета №4. 2012. С. 73-77.

3. М.В. Глазырин. Построение системы регулирования активной мощности гидроагрегата с переменной частотой вращения вала/ М.В. Глазырин, Р.Х. Диёров, Е.А. Краснопеев // Вестник Таджикского технического университета №2. 2013. С. 54-59.

4. М.В. Глазырин. Анализ динамических свойств гидроагрегата на основе машины двойного питания/ М.В. Глазырин, Р.Х. Диёров // Известия вузов. Электромеханика №6. 2013. С. 28-31.

#### **Прочие публикации**

5. Диёров Р.Х. Анализ динамических свойств реактивной гидротурбины при переменной частоте вращения/ Диёров Р.Х., Глазырин М.В.// Современные техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1 / Томск ТПУ. – Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2012. - С. 43-44.

6. Диёров Р.Х. Способы повышения эффективности использования МГЭС на основе машины двойного питания / Глазырин М.В., Диёров Р.Х., Гуломов Ш.Р.// Материалы Восьмой Международной теплофизической школы «Теплофизические исследования и измерения в энерго- и ресурсосбережении при контроле и управлении качеством процессов, продукции и услуг». Душанбе – Тамбов 2012. - С. 536 - 540.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57  
Формат 60 x 84/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 120 экз.  
Заказ 60. Подписано в печать 22.12.2014 г.