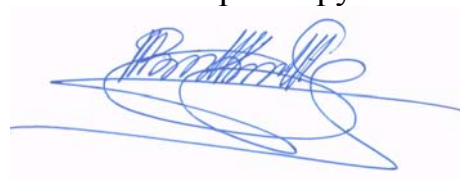


На правах рукописи



КАЗИНГУФУ ПАЛУКУ ЛУКАНДА

**СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ
МИКРОГЭС ДЛЯ ДЕМОКРАТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
КОНГО**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические
комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург-2006

Работа выполнена на кафедре “Системы автоматического управления” государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, профессор Кривцов Александр Николаевич

Официальные оппоненты :

доктор технических наук, профессор Бор - Раменский Арнольд
Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент Беляев Андрей Николаевич

Ведущая организация – ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

Защита состоится « 22 »_июня __2006г. в __16_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.20 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу: Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Главное здание, ауд. 150.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан ____ / ____ / 2006г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.20

А. Д. Курмашев

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Развитие экономики Демократической Республики Конго (Д.Р.Конго) на ближайшее десятилетие связано с освоением богатейших минеральных запасов золота, алмаза, меди и развитием агропромышленности восточных районов страны. Десятки, сотни малых предприятий получают лицензии на разведку и добычу полезных ископаемых или на переработку агропродукции. Но основным затруднением для развертывания работ является отсутствие электроэнергии в этом регионе.

Правительство Д.Р.Конго поставило перед компаний SENOKI (Société d'électrification du Nord Kivu) задачу по разработке сети маломощных мобильных источников энергии для указанных предприятий. Направляя меня в аспирантуру в Россию, SENOKI, в свою очередь, поставила задачу, используя опыт и разработки маломощных энергетических источников в России, найти наиболее экономичные и быстро окупаемые источники электроснабжения для таких потребителей как малые горнодобывающие предприятия со сроком пребывания на одном месте 2 – 4 года. Поэтому тема данной диссертационной работы является частью общей задачи, решаемой компанией SENOKI, в рамках развития энергетики в Д.Р.Конго.

В настоящее время основным источником электроэнергии для горнорудных предприятий и агропромышленности восточных районов страны являются дизель-электрические станции (ДЭС). Альтернативными источниками энергии могут служить фотоэлектрические (солнечные) станции (ФЭС), ветровые электрические станции (ВЭС) и малые и микрогидростанции (МКГЭС).

Установлено, что для этого региона, территория которого буквально пронизана, малыми и большими реками, а гидропотенциал составляет 13% от гидропотенциала всей Земли, наиболее целесообразно развивать микроГЭС.

Проведенный нами анализ технической документации и научно-технической литературы по разработкам микроГЭС показал, что эти публикации носят в основном, рекламный характер. Отсутствуют расчеты и описание моделей для объектов подобного типа. Результаты комплексных исследований, выполняемых на разных фирмах (LA SOCIETE HYDROTECHNIQUE DE FRANCE (Франция), RETScreen International (Канада), CEGELEC (Belgique) (Бельгия), РАО «НИИ ЛЕНГИДРОПРОЕКТ» (г. С-Петербург, Россия), НПО «ГИДРОЭНЕРГОПРОМ» (г. С-Петербург, Россия), ЗАО «МНТО ИНСЭТ» (г. С-Петербург, Россия), ЗАО «НПО РАНД» (г. С-Петербург, Россия), являются “know how” этих фирм и не публикуются.

Поэтому, для решения комплекса задач управления МКГЭС (в том числе задач синтеза, оптимизации и др.), в силу особенностей объектов данного класса, необходима разработка достаточно полной модели, которая представляла бы МКГЭС как объект управления, то есть отражала бы все требуемые управляющие, входные и возмущающие воздействия, учитывала бы все существенные с позиций управления особенности объекта и давала бы достаточно глубокое представление о реальных динамических процессах, протекающих в нем.

Задача разработки подробной модели для исследования и решения задач управления объектом подобного класса является актуальной и в подобной постановке в литературе не встречается.

Более того, в работе показано, что разработка полной модели МКГЭС имеет значение не только для исследования процессов самой МКГЭС, но и может служить основанием для разработки подобных моделей других типов автономных источников энергии, в силу того, что объекты эти имеют много общего, а в ряде случаев даже одинаковые элементы (например, электрогенератор).

Целью работы является научное обоснование принципов построения электротехнических комплексов автономного электроснабжения основных отраслей народного хозяйства Северо-Восточного региона Д.Р.Конго мощностью 5–300кВт, на базе современ-

ных средств и систем автоматизации. Для выполнения этой цели необходимо решить ряд **научных задач**:

1. На основании сравнительного анализа основных технико-экономических показателей возможных источников электроснабжения, пригодных для эксплуатации в условиях Д.Р.Конго выработать рекомендации по выбору наиболее эффективного и надежного источника энергии для автономных потребителей.

2. Провести исследование вариантов технических решений систем электрооборудования и систем стабилизации частоты различных классов микроГЭС и выбрать наиболее надежные, дешевые и простые в эксплуатации устройства.

3. Разработать имитационные модели МКГЭС в среде MatLab-Simulink и провести комплексные исследования их статических и динамических режимов.

4. Провести выбор рациональных структур регуляторов для стабилизации выходной частоты МКГЭС и варьируя их параметры, осуществить оптимизацию этих систем.

5. Разработать алгоритмы оптимального управления системами стабилизации частоты и программное обеспечение, ориентируясь на современные управляющие логические контроллеры (PLC).

6. Разработать методику проектирования систем стабилизации частоты для гаммы микроГЭС, предназначенных для эксплуатации в Д.Р.Конго.

Методы исследования. В работе используются методы теории гидротурбин, теории электромеханического преобразования энергии в синхронной машине, теории регулирования и вычислительного эксперимента. При решении задач исследования динамических режимов работы систем, определения структур и параметров предложенных моделей использовались методы моделирования, идентификации и оптимизации, использованы методы компьютерного моделирования с применением пакета MatLab-Simulink.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика сравнительного анализа технико-экономических показателей автономных источников электроснабжения на базе ДЭС, ФЭС, ВЭС и МКГЭС, эксплуатируемых в условиях Д.Р.Конго и методика оценки эффективности инвестирования средств в микроэнергетику.
- Установлено, что для географических условий эксплуатации в различных районах Д.Р.Конго необходимо использовать два различных по функциональному составу класса МКГЭС, требующих различных подходов к разработке систем стабилизации их выходных частот.
- создание имитационных моделей МКГЭС первого и второго класса в среде MatLab-Simulink.
- разработка оптимальной по быстродействию системы обработки возмущений со стороны нагрузки при ограничениях на скорость и ускорение перемещения затвора на базе методов идентификации приложенной нагрузки и прогнозирования траектории перемещения регулятора.

Практическая значимость полученных результатов, состоит в следующем:

- доказано, что в условиях восточных районов Д.Р.Конго наиболее перспективно использование микроГЭС, а инвестирование средств в микрогидроэнергетику Д.Р.Конго является высокоэффективным и эффективным направлением;
- разработаны математические и имитационные модели, позволяющие разработчикам МКГЭС рассчитывать их основные статические и динамические характеристики при варьированиях основных конструктивных параметров и условий эксплуатации (расход воды, напор, нагрузка); в частности для МКГЭС серий МГА фирмы ЗАО НПО «РАНД»;
- предложен регулятор балластной нагрузки по схеме «неуправляемый выпрямитель – широтно-импульсный регулятор – балластная нагрузка», обеспечивающий стабиль-

лизацию частоты. Определены оптимальные параметры настройки элементов регулятора;

- для МКГЭС второго класса разработано программное обеспечение, использующее принципы прогнозирования конечного значения перемещения затвора Джонсона и методика расчета параметров изменения скорости перемещения во времени с учетом начального положения затвора и ограничений по скорости и ускорению перемещения затвора. Разработан алгоритм управления перемещением затвора Джонсона с использованием метода идентификации приложенной нагрузки P_H . Определены оптимальные параметры настройки регуляторов объекта.

Апробация работы.

Основные научные и практические результаты работы докладывались на межвузовских научных конференциях СПбГПУ «Неделя науки - 2002», «Неделя науки - 2003», «Неделя науки - 2004» и на научном семинаре кафедры "Системы автоматического управления" СПбГПУ.

Положения выносимые на защиту:

1. Доказательство перспективности электрификации восточных и северо-восточных районов Д.Р.Конго путем создания сети МКГЭС на основании проведенного сравнительного анализа всех основных возможных вариантов источников автономного электроснабжения.

2. Комплексные имитационные модели микроГЭС, включающие модели механических, электромеханических и электронных узлов, разработанные в среде Matlab – Simulink и основанные, как на результатах математического описания, так и на экспериментальных характеристиках узлов.

3. Системы электрооборудования и системы стабилизации выходной частоты микроГЭС двух классов, разработанные на базе сравнительных исследований статических и динамических режимов двух классов микроГЭС, и использования методов оптимизации из библиотеки программ Matlab.

4. Алгоритмы компьютерного управления для двух классов микроГЭС, реализующие разработанные принципы управления

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 125 наименований и трех приложений. Работы содержит 203 страницы, включая 82 рисунка и 21 таблицу.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследований, определена научная ценность результатов, дается краткое содержание работы.

В первой главе рассматриваются перспективы использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире, мощность возобновляемых источников энергии и направления их использования.

Основное преимущество возобновляемых источников энергии их неисчерпаемость и экологическая чистота. Их использование не изменяет энергетический баланс планеты. Эти качества и послужили причиной бурного развития возобновляемой энергетики за рубежом и весьма оптимистических прогнозов их развития в ближайшем десятилетии. Рассмотрена общая перспектива развития использования ВИЭ. По оценке Американского общества инженеров-электриков, если в 1980 году доля производимой электроэнергии на ВИЭ в мире составляла 1 %, то к 2005 году она достигнет 5%, к 2020 г. -13% и к 2060 г. - 33%. Чтобы ощутить масштаб цифр, укажем, что электрическая мощность электростанций на возобновляемых источниках энергии (без крупных ГЭС) в 2005 г составит 380-390 ГВт, что превышает мощность всех электростанций России (215 ГВт) в 1,8 раза.

Проанализированы потенциальные энергетические ресурсы Восточного района ДРК и показано, что при создании малой энергетики можно опираться на почти неограниченные ресурсы возобновляемых источников: солнечная радиация, ветровая энергия и гидро-ресурсы малых рек.

Результаты сравнительного анализа технико-экономических показателей автономных электростанции на базе ДЭС, ФЭУ, ВЭУ и МКГЭС. Как мы видим из табл.1 себестоимость 1 кВт·ч энергии от микро ГЭС на порядок ниже, чем у других источников питания. Капитальные вложения для микро ГЭС также оказываются наименьшими.

Таблица 1

№	Источник энергии	Себестоимость 1 кВт·ч, у.е.	Капитальные вложения, у.е./кВт
1	ДЭС	0,57	2565
2	СЭС	0,40	50600
3	ВЭС	0,29	35466
4	МКГЭС	0,045	2237

В результате расчётов, проведённых в данной главе по оценке целесообразности строительства микро ГЭС для энергоснабжения потребителей энергией, были получены следующие результаты:

1. Себестоимость единицы электрической энергии микро ГЭС составит в среднем 0,045 у.е./ кВт·ч. Тариф же на электроэнергию в результате маркетинговых исследований установлен в размере 0,20 у.е./ кВт·ч.

2. Средняя прибыль микро ГЭС составила – 505,55 у.е./ год на 1кВт установленной мощности

3. Значения критериев эффективности инвестиций в проект следующие: индекс доходности (ИД) равен 5,07; срок окупаемости данного проекта – 2,07 года; внутренняя норма доходности ВНД = 52,5%, при норме дисконтирования $E_n = 8\%$; рентабельность данного проекта 48,19 %; чистому дисконтированному денежному потоку ЧДДП = 4274 у.е. в год на 1 кВт. Значения ЧДДП > 0, ИД > 1 и ВНД > E_n говорят о высокой эффективности вложения инвестиций в микроэнергетику Д.Р.Конго.

Во второй главе выполнен сравнительный анализ вариантов гидротурбин и систем электрооборудования микроГЭС, что позволило обосновать состав электрооборудования и структуры регуляторов для двух классов МКГЭС, в наибольшей степени отвечающих эксплуатационным условиям в Д.Р.Конго.

Особенность МКГЭС первого класса – применение на реках с неограниченными гидроресурсами водного потока. Для МКГЭС первого класса характерно отсутствие регуляторов расхода воды (РРВ). Для данного класса МКГЭС, можно выделить следующие варианты систем электроснабжения:

1. “Генератор постоянного тока – полупроводниковый инвертор”.

2. “Синхронный генератора – выпрямитель – инвертор–фильтр”. Данный вариант часто используется в ветроэнергетике. Система обладает наилучшими показателями качества электроэнергии на выходе. Но она сложна и весьма дорогостояща.

3. С использованием систем стабилизации выходной частоты и напряжения МКГЭС на базе асинхронной машины с фазным ротором. Отличительной особенностью данного варианта является существенно меньшая мощность полупроводниковых преобразователей: управляемого выпрямителя (УВ) и автономного инвертора (АИ) с выходным фильтром.

Данный вариант при ограниченном диапазоне изменения ω_r может оказаться существенно дешевле, так как мощность, преобразуемая с помощью УВ и АИ, втрое меньше,

чем в I и II вариантах. Стоимость системы регулирования частоты и напряжения генератора по данному варианту может составить от 40 до 50 % от стоимости турбины.

4. С использованием синхронного генератора и регулируемой балластной нагрузки. Стабилизация выходного напряжения генератора осуществляется регулятором напряжения, а стабилизация частоты вращения, измеряемой датчиком частоты, производится блоком регулирования нагрузки. В зависимости от величины возмущающих воздействий – полезной нагрузки и энергии водяного потока система автоматически выбирает необходимую мощность балластной нагрузки так, чтобы отклонение частоты вращения не превышало допустимых пределов.

На основании сопоставления вариантов регуляторов частоты автономных МКГЭС первого класса и на основании технико-экономического сравнения и собственного опыта проектирования выбран вариант электрооборудования с использованием бесконтактного синхронного генератора и регулирования частоты за счет изменения мощности, поступающей на балластную нагрузку. Этот вариант в наибольшей степени отвечает требованиям, предъявляемым к МКГЭС первого класса: высокая надежность, простота и минимальная стоимость.

Второй класс микроГЭС применяется в климатических зонах с ограниченными гидроресурсами водного потока и с использованием плотин, осуществляющих накопление дождевых вод. Для этих микроГЭС применяются регуляторы расхода воды (РРВ), дозирующие поступление воды на турбину в функции нагрузки у потребителя, т.е. осуществляется режим экономии расходуемой воды.

Для МКГЭС второго класса на основании обобщения данных литературных источников была синтезирована блок-схема электрооборудования МКГЭС с регулятором расхода воды, представленная на рис.1. Канал регулирования расхода воды включает в себя: БИЧН – блок измерения частоты и напряжения на выходе генератора (G), БИТ – блок измерения тока нагрузки; эти данные поступают в управляющий контроллер (PLC), в котором осуществляется расчет текущей мощности нагрузки и вырабатывается по заданному алгоритму управляющий сигнал u_{y2} . При отклонении частоты необходимо осуществлять механическое перемещение рабочего органа РРВ на величину смещения X либо на угол поворота α . Это осуществляется двигателем следящей системы расхода воды (ССРВ).

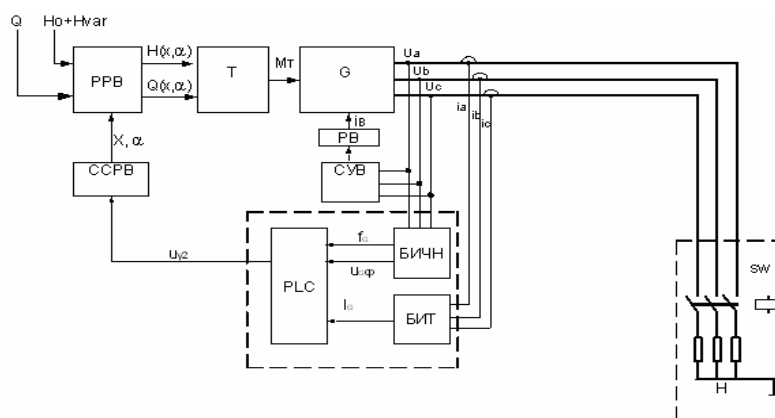


Рис 1. Блок схема МКГЭС с регулятором расхода воды

Подробный литературный обзор позволил констатировать, что методы исследований МКГЭС и методики расчета их регуляторов в открытой технической литературе и Internet не приводятся. Даже в весьма обширных обзорах по микроГЭС, выпущенных в 2002 ÷ 2005г.г. ассоциациями инженеров гидротехников Канады (Natural resources Canada-RETScreen International), Англии (British hydropower association) и Европы (Blue energy for a green Europe, Strategic study for the development of Small Hydro Power in the Euro-

pean Union) о методах расчета регуляторов и алгоритмах управления лишь косвенно упоминается. Это сфера является «know how» фирм разработчиков. Это вынуждает нас провести подробные исследования свойств и характеристик регуляторов в комплексе с микроГЭС и нагрузкой.

Третья глава посвящена разработке системы стабилизации частоты для МКГЭС первого класса (без РРВ). В настоящее время из технической литературы нам известны два схемных решения данного варианта регулятора:

- ступенчатое подключение балластной нагрузки на выход генератора с помощью релейно-контакторной схемы, обеспечивающее подключение дополнительных секций R_B при увеличении ω_T , либо, снижая мощность на R_B при уменьшении ω_T . Но очевидные недостатки регулятора – низкая надежность и малая точность регулирования при ограниченном числе ступеней R_B , привели к прекращению использования данного варианта.

- подключение R_B на выход управляемого выпрямителя (УВ), который, в свою очередь, подсоединяется к выходным клеммам синхронного генератора. Измерив отклонение частоты Δf_g от номинальной f_{1n} , преобразуем Δf_g в сигнал управления выпрямителем, который изменяет напряжение на выходе УВ и регулирует мощность, выделяемую на R_B .

При высоком статическом коэффициенте контура регулирования и, обеспечив устойчивую систему, можно добиться приемлемого качества стабилизации частоты генератора.

Но при использовании обычного тиристорного выпрямителя с регулированием выходного напряжения путем изменения угла управления преобразователь становится потребителем реактивного тока. Это существенно снизит эквивалентный коэффициент мощности полной нагрузки генератора, и может вызвать неустойчивость работы системы стабилизации напряжения, так как ее устойчивая работа обеспечивается только при $\cos\varphi > 0,8$, согласно паспортным данным генераторов серии БГ.

Нами предложено иное, более современное решение регулятора мощности балластной нагрузки, показанное на рис.2.

Трехфазное напряжение генератора СГ выпрямляется трехфазным мостовым выпрямителем на диодах ТМВ1. Напряжение с выхода ТМВ1 (U_d) подается через транзисторный ключ VT1 на балластную нагрузку. VT1 работает в режиме ШИМ регулятора, а выходное напряжение на нагрузке R_B изменяется по закону:

$$U_{RБ} = U_d \frac{t_{и}}{T_{ц}} = U_d \cdot \gamma, \quad (1.1)$$

где $t_{и}$ – продолжительность импульса управления, $T_{ц}$ – период коммутации ключа VT1, γ – коэффициент широтно-импульсной модуляции (далее – коэффициент модуляции).

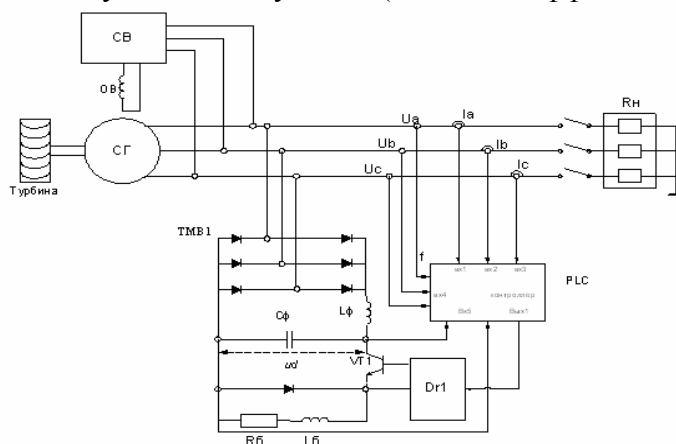


Рис.2. Автономная микроГЭС с системой стабилизации частоты на транзисторах –(IGBT).

Относительная продолжительность проводящего (замкнутого) состояния ключа VT1 пропорциональна отклонению частоты от номинального значения $f_{1н}$, которое измеряется и преобразуется в длительность управляющего импульса $t_{и}$ в программируемом логическом контроллере PLC1. Для повышения запаса устойчивости в управляющий сигнал, вырабатываемый PLC1, используется ПИД регулирование. Мощность балластной нагрузки R_B изменяется по закону:

$$P_B = \frac{(K_{сх} \cdot U_d \cdot \Gamma)^2}{R_B}; \quad (1.2)$$

где $K_{сх}$ - коэффициент схемы выпрямителя.

Так как в регуляторе балластная нагрузка подключена через неуправляемый ТМВ, то коэффициент мощности регулятора во всем диапазоне изменения R_B остается практически равным 1.

Целью последующего расчета является разработка модели системы «гидротурбина – генератор с его системой стабилизации напряжения – полезная нагрузка и регулируемая балластная нагрузка с PLC регулятором».

Турбину пропеллерного типа можно описать звеном первого порядка с помощью дифференциального уравнения вида:

$$M_D [\psi_T(t), H] - M_c(t) = J_{\Sigma} \frac{d\psi_T(t)}{dt} \quad (1.3)$$

где J_{Σ} – суммарный момент инерции генератора, соединительных узлов и ротора гидротурбины, $M_c(t)$ – момент сопротивления, является случайной функцией и может быть представлен в самом тяжелом случае, как ступенчатая функция при включении нагрузки и ее отключении; $M_D(\omega, H)$ – движущий момент гидротурбины, зависящий от напора и от скорости вращения вала гидротурбины (рис.3).

Для решения данного уравнения необходимо найти зависимость $M_D(\omega, H)$. Полученные при испытании гидротурбины зависимости имеют нелинейный характер и их можно аппроксимировать, используя метод интерполяции. Достаточно точную аппроксимацию данных кривых дает интерполяционный полином второго порядка. В общем виде зависимость можно представить в следующем виде:

$$M_D(\omega, H) = k_1 \cdot \omega^2 - k_2 \cdot \omega + k_3 \cdot H + k_4, \quad (1.4)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты интерполяционного полинома.

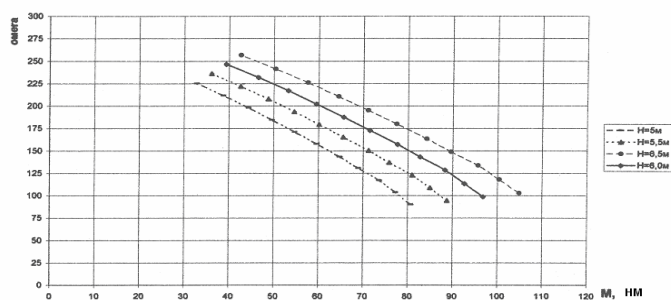


Рис.3. Механические характеристики турбины (МАГ–55–30–0,26).

В системе используется синхронный генератор типа БГ с системой стабилизации напряжения. Стабилизация напряжения осуществляется регулятором возбуждения компандного типа с использованием бесщеточного возбудителя. Принципиальная схема регулятора возбуждения показана упрощенно на рис. 4.

ОВГ – обмотка возбуждения генератора получает питание через трехфазный мостовой выпрямитель ТМВ1 от вращающейся трехфазной роторной обмотки возбудителя (ОРВ). В свою очередь возбудитель, представляющий собой обращенную синхронную машину, получает возбуждение от задающей обмотки (ЗО), обмотки отрицательной об-

ратной связи по напряжению (ООСН) и обмотки положительной обратной связи по току (ПОСТ).

В последней МДС (магнитодвижущая сила) пропорциональна току нагрузки, измеряемому с помощью 3-х трансформаторов тока (ТТ1 ÷ ТТ3) и дополнительному сигналу по производной от тока, условно вырабатываемого с помощью конденсатора С1.

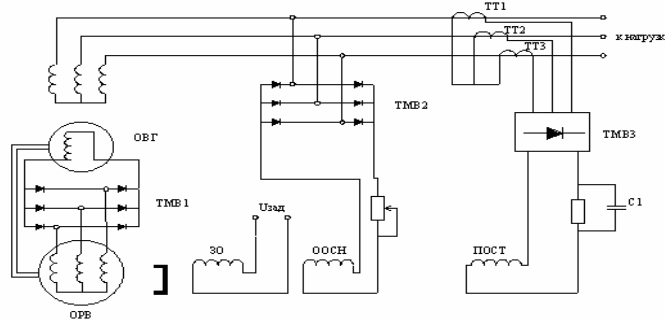


Рис.4. Система стабилизации выходного напряжения.

Составим систему дифференциальных уравнений, описывающих электромеханические переходные процессы при заданной скорости вращения вала генератора.

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{U_d \cdot K_1 - I_d}{T_1}, \quad \frac{dI_{pos}}{dt} = \frac{U_{pos} \cdot K_2 - I_{pos}}{T_2}, \quad \frac{dI_{oos}}{dt} = \frac{U_{oos} \cdot K_3 - I_{oos}}{T_3}, \quad (1.5)$$

где U_b - напряжение возбуждения генератора, U_{pos} - напряжение возбуждения возбудителя по каналу ПОС по току, U_{oos} - напряжение возбуждения возбудителя по каналу ООС по напряжению генератора, I_b - ток возбуждения, I_{pos} - ток возбуждения возбудителя по каналу ПОС по току нагрузки, I_{oos} - ток возбуждения возбудителя по каналу ООСН. T_1, T_2, T_3 - постоянные времени соответствующих обмоток возбуждения. Значения коэффициентов K_1, K_2, K_3 : $K_1 = \frac{1}{R_b}$, $K_2 = \frac{1}{R_{b1}}$, $K_3 = \frac{1}{R_{b2}}$, где R_b, R_{b1}, R_{b2} - сопротивления соответствующих обмоток возбуждения.

Рассмотренные выше соотношения были использованы при разработке модели синхронного генератора с самовозбуждением, представленной на рис.5.

Для исследования режимов работы системы стабилизации частоты с импульсным регулятором балластной нагрузки (рис.2) модель системы «турбина-генератор» должна быть дополнена моделью регулятора.

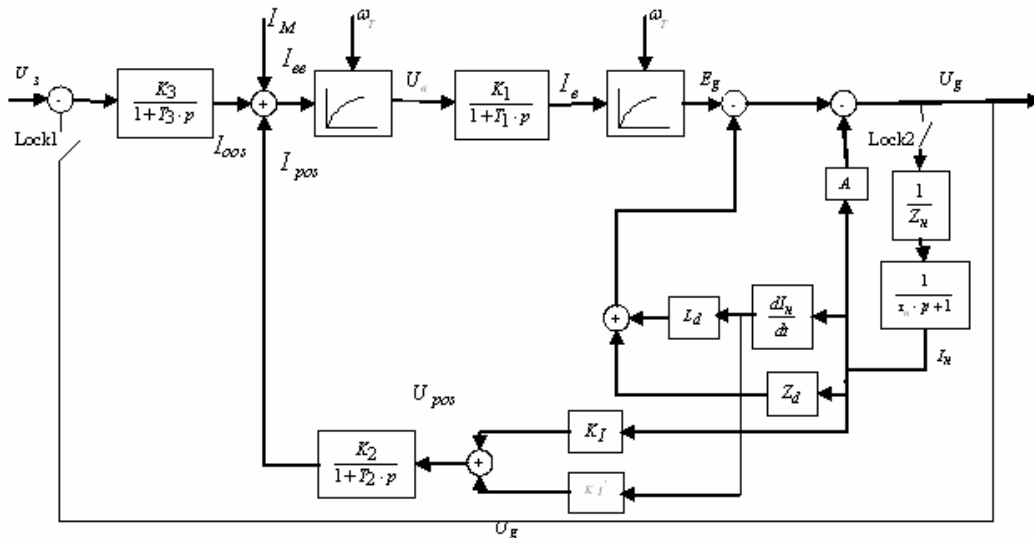


Рис.5. Модель синхронного генератора с самовозбуждением

Рассмотрим алгоритм выработки управляющего сигнала для регулирования мощности в балластной нагрузке.

На базе PLC происходит измерение периода фазного напряжения генератора и выявление отклонения текущей частоты $f_g(t)$ от эталонной $f_{гр}=50\text{Гц}$. Отклонение частоты Δf преобразуется во входной сигнал PLC с коэффициентом преобразования K_f . Реализация ПИД регулирования, осуществляется в PLC в цифровой форме. В модели регулятор представлен звеном вида:

$$W_P(p) = \frac{U_y(p)}{U_{yf}(p)} = K_{II} + K_{II} \cdot p + \frac{K_{II}}{p} \quad (1.6)$$

Управляющий сигнал $u_y(t)$ преобразуется в PLC в коэффициент модуляции γ . Так как γ ограничено значением $\gamma_{\max}=1$, то в модели это преобразование осуществлена введением нелинейного звена НЭ1, обладающего свойствами звена насыщения.

Ток балластной нагрузки в звене постоянного тока определяется уравнением:

$$i_B(t) = \frac{\gamma \cdot K_{схu} u_g(t)}{R_B} \cdot \frac{1}{1 + p \cdot \tau_B}, \quad (1.7)$$

где $K_{схu}=2,34$ – коэффициент преобразования напряжения трехфазного мостового выпрямителя ТМВ1, а $\tau_B=L_B/R_B$ – постоянная времени балластной нагрузки.

Были определены оптимальные параметры регулятора, при установке которых отклонение частоты Δf при набросе номинальной нагрузки минимально ($\Delta f_{\min} \approx 2,5\text{Гц}$) при апериодическом характере изменения частоты во времени. Было исследовано влияние на работу микроГЭС и других факторов: изменение напора H , и амплитуды ступенчатого возмущения нагрузки.

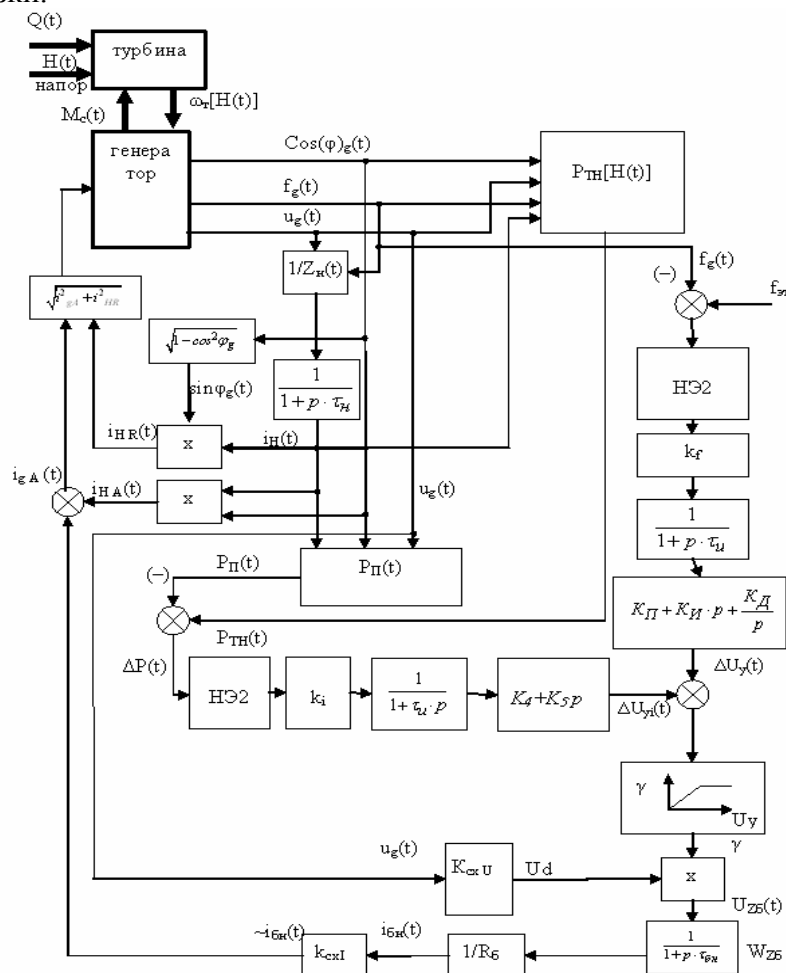


Рис.6. Полная модель микроГЭС с двухконтурной системой стабилизации частоты.

Моделирование показало, что регулятор балластной нагрузки по отклонению выходной частоты генератора обеспечивает требуемые показатели системы только в очень узком диапазоне изменения параметров регулятора и возмущений.

Для повышения статической и динамической точности стабилизации частоты автономных МКГЭС нами предложено использовать двухконтурный регулятор частоты с использованием внутреннего токового регулятора, обеспечивающего постоянство токовой нагрузки системы (Рис.6). Схемное решение практически не меняется. Меняется алгоритм управления реализуемый микроконтроллером PLC.

За счет высокого быстродействия токового регулятора удалось устранить влияние больших постоянных времени, определяемых инерционными свойствами турбины и системы возбуждения генератора при обработке мгновенных возмущений при подключении и отключении нагрузки.

Внешний контур обработки отклонений частоты обеспечивает компенсацию отклонений, вызванных изменениями напора турбины, а это возмущение является весьма медленным и легко обрабатывается даже инерционным регулятором.

Исследования динамических и статических отклонений частоты при набросах и сбросах номинальной нагрузки были выполнены для всего диапазона изменения условий эксплуатации. Доказано, что для расчетных оптимальных значений параметров регуляторов динамические отклонения выходной частоты при ступенчатых возмущениях по нагрузке не превышают $\Delta f \leq \pm 2 \text{ Гц}$. См. рис.7.

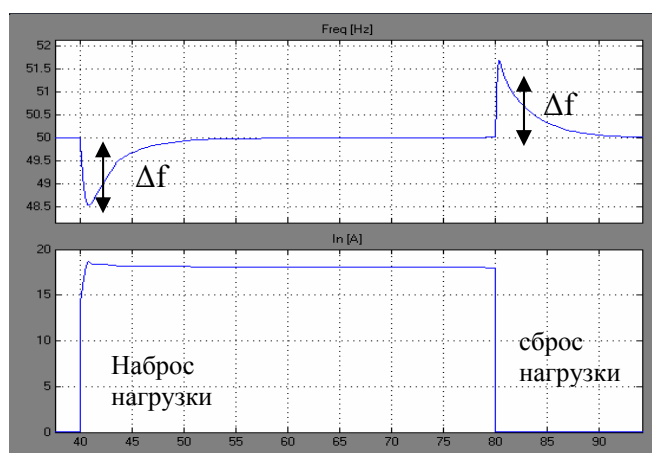


Рис.7. Зависимость частоты напряжения от изменения нагрузки

В четвертой главе осуществляется разработка системы стабилизации частоты для МКГЭС второго класса с РРВ.

В НПО «РАНД» для удешевления регулятора расхода воды и стабилизации частоты вращения турбины было предложено использовать регулятор типа затвор Джонсона (ЗД). Принцип работы этого регулятора показан на рис. 8.

Данное техническое решение обеспечивает стабилизацию скорости вращения турбины при изменении нагрузки в широких пределах и обладает технологической простотой и низкой стоимостью. Регулятор ЗД повышает стоимость маломощных МКГЭС не более, чем на 20÷30%. К недостаткам регулятора следует отнести использование в нем принципа дросселирования водного потока, что снижает КПД МКГЭС.

Было предложено использовать для перемещения РРВ электромеханическую следящую систему с микроконтроллерным управлением. Функциональная схема регулятора представлена на рис. 8. Нами была разработан управляемый регулятор расхода воды для гаммы турбин фирмы НПО «РАНД», содержащий следящую систему регулятора расхода воды (ССРВ) и РРВ. РРВ, в свою очередь, содержит: затвор Джонсона (ЗД), и шарико-винтовую пару (ШВП), то есть передаточный механизм, в котором осуществляется пре-

образование угла поворота вола двигателя следящей системы $\alpha_{дв}$ в поступательное перемещение X с коэффициентом передачи (редукции) – j [м/рад]. На ССРВ входной сигнал поступает от блока измерения частоты $f_g(t)$ и напряжения на выходе генератора (БИЧН). Преобразователь частоты с усилителем мощности ПЧ получает сигнал управления u_y от PLC через систему управления СУ-ПЧ. PLC – определяет отклонения выходной частоты $\Delta f = f_{гт} - f_g(t)$ и преобразует это отклонение в сигнал управления следящей системы $U_y(t)$ в соответствии с наиболее рациональным законом регулирования (могут использоваться пропорциональной, ПИ, ПИД регуляторы). При отсутствии напряжения на выходе генератора (затвор Джонсона закрыт) следящая система получает питание от резервной аккумуляторной батареи (АБ), а после выхода турбины на номинальную частоту вращения от выпрямителя В1, подключенного к генератору.

Научные задачи, которые были решены при разработке системы стабилизации:

1. Идентификация регулятора типа затвор Джонсона, как объекта регулирования.
2. Разработка математической модели системы турбина – генератор – регулятор Джонсона с учетом реальных ограничений, накладываемых для предотвращения возможного гидравлического удара по турбине.
3. Формирование законов управления перемещением затвора и регулятором в целом.
4. Обоснование структуры регуляторов и осуществление их параметрической оптимизации.
5. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для управления и системы стабилизация частоты МКГЭС в целом.

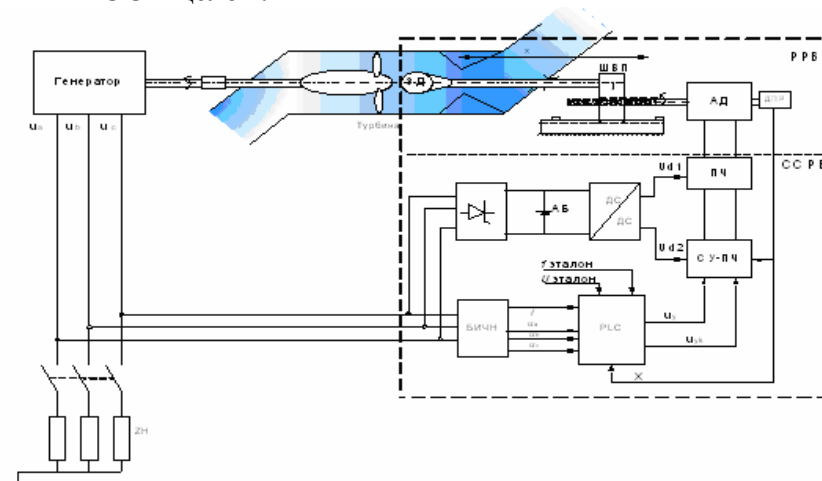


Рис.8. Схема регулятора расхода воды затвора Джонсона.

На основании гидравлических испытаний системы «турбина – затвор Джонсона – генератор», выполненных в фирме НПО «РАНД», мы располагаем статическими характеристиками зависимости момента, развиваемого турбиной в функции положения X регулятора Джонсона и зависимостью гидравлического усилия сопротивления, действующего на затвор при изменениях X .

В общем виде эти зависимости можно представить в следующем виде:

$$M_T(x) = A_1 \cdot x^3 + A_2 \cdot x^2 + A_3 \cdot x + A_4, \quad (1.8)$$

$$F_{сТ}(x) = B_1 \cdot x^3 + B_2 \cdot x^2 + B_3 \cdot x + B_4. \quad (1.9)$$

где $A_i, B_i, i = \overline{1,4}$ – коэффициенты интерполяционного полинома.

Усилие $F_{сТ}$, создаваемое потоком, действует как потенциальная однонаправленная сила при любом направлении движения. Вязкое трение зависит от формы ЗД и скорости водного потока. При движении ЗД скорость водного потока и скорость перемещения затвора $V_{дв} = dx/dt$ складываются (при заперении) и вычитаются при открытии ЗД.

Исследования выполнялись при предельно допустимой скорости перемещения ЗД, $(dx/dt)_{\text{доп}} = V_{\text{доп}}$. Значение $V_{\text{доп}}$ для турбины НПО РАНД серии МГА-55-30-0,26 составляет 0,05 м/с а для турбины большего диаметра оценивалось по выражению:

$$V_{\text{доп},i} = V_{\text{доп},1} \frac{D_1}{D_i} \quad (1.10)$$

Значения допустимого ускорения $\epsilon_{\text{доп}} = \left(\frac{dV}{dt}\right)$ численно ограничено разработчиками турбин значением $\epsilon_{\text{доп}} = (0,02-0,06) \text{ м/с}^2$, причем большие значения относятся к турбинам максимального диаметра 0,9 м.

Выполнены расчеты составляющих сил статического и динамического сопротивления движению ЗД включая: паскалеву составляющую напора воды, составляющую сухого трения в опорах, составляющую динамического ускорения подвижных масс при ускорениях.

Жесткие ограничения по скорости перемещения ЗД и её первой производной, накладываемые для предотвращения возникновения гидродинамического удара, резко снижают скорость отработки провалов частоты, возникающих при мгновенном подключении номинальной нагрузки. Ограничения возрастания мощности водного потока происходит не только за счет действия нелинейных блоков по dx/dt и d^2x/dt^2 , ограничивающих управляющее воздействие в следящей системе затвора Джонсона, но и за счет ряда временных задержек в полном контуре регулирования.

Предварительно, на полной модели системы МКГЭС были исследованы переходные процессы в МКГЭС замкнутой по отклонению частоты с использованием регулятора ПИД – типа, реализованного на PLC. Используя подпрограмму оптимизации были найдены оптимальные значение параметров регулятора, обеспечивающие минимально возможное динамическое отклонение частоты при набросе номинальной нагрузки.

Результаты, полученные при исследованиях полных моделей МКГЭС показали, что использование регуляторов Джонсона с регулированием по отклонению частоты даже при оптимизации параметров регуляторов не позволяет решить задачу ограничения динамических провалов частоты в пределах $\pm 2,5$ Гц, допустимых для автономных источников электроснабжения. См. Рис.9-10.

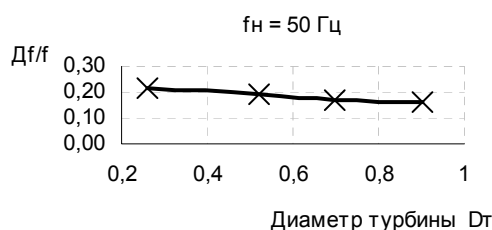


Рис.9. Зависимость отклонения частоты от диаметра турбины

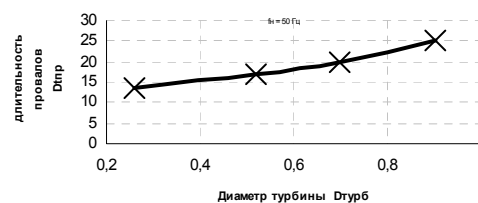


Рис.10. Зависимость длительности провала частоты от диаметра турбины. Величина трубки точности при определении $t_{\text{пр}}$ принята равной ± 1 Гц.

При поиске варианта технического решения регулятора стабилизирующего частоту на выходе микроГЭС мы обратили внимание на благоприятный вид статической характеристики системы "турбина — затвор Джонсона", представленной на рис. 11.

Даже при небольших начальных смещениях ЗД мощность турбины существенно возрастает. При смещении ЗД на $\Delta x_i = 0,3 x_{\text{max}}$ имеем $P_{\text{т1}} = 0,78 P_{\text{тн}}$ (для МГА-55-20-0,26, рис.11).

Если ввести параметр $K_{\text{зт}}$ (коэффициент усиления системы "затвор — турбина")

$$K_{\text{зт}} = \frac{dP_{\text{т}}}{dx} \quad (1.11)$$

то этот параметр показывает на неоднозначность реакции турбины на смещение затвора. Следовательно, основная доля регулирования мощности турбины осуществляется на начальном участке смещения ЗД.

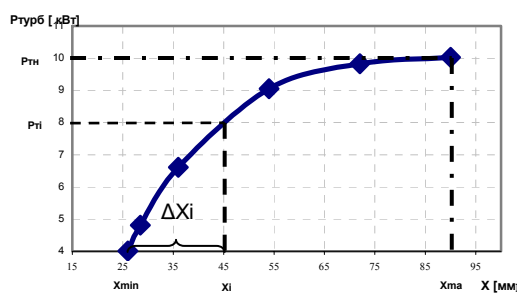


Рис.11. Статическая характеристика системы "турбина - Затвор Джонсона" для МГА–55–30–0,26 при n=1500 об/мин.

Мы предположили, что в момент подключения нагрузки её численное значение $P_{нагр_i}$ может быть определено тем или иным способом и эта информация безынерционно предается в регулятор (PLC) затвора Джонсона.

Каковы же будут максимальный динамический провал частоты в МКГЭС Δf_{max} и длительность этого провала $\Delta t_{дин}$ при набросе нагрузки P_{Hi} и отработке x_i , определенного по статической характеристике. Очевидно, что минимизация времени установки x_i будет

обеспечена при изменении $\frac{dx(t)}{dt}$ по закону трапеции, либо треугольника, где нарастание

скорости отработки от 0 до $\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)_{доп} = V_{max}$ ограничено граничным значением допустимо-

го ускорения ЗД, т.е. $\left(\frac{d^2x(t)}{dt^2}\right)_{дон} = \varepsilon_{дон}$. Графики отработки представлены на рис. 12. Гра-

фик изменения $x(t)$ является оптимальным, так как обеспечивает открытие ЗД в предельно допустимом по условиям предотвращения гидродинамического удара водного потока по лопастям пропеллерной турбины режиме. Исходя из предположения, что отработка расчетного значения x_i обеспечена по оптимальной трапецидальной (либо треугольной) траектории изменения $dx(t)/dt$, были определены динамические режимы изменения выходной частоты МКГЭС при ступенчатом набросе номинальной нагрузки P_{Hn} (наиболее тяжелый режим). Результаты моделирования для гаммы турбин РАНД приведены на рис 13.

Динамические отклонения по частоте, как следует из анализа результатов, моделирования не превышают 2,7Гц. Существенное улучшение динамических свойств системы происходит за счет отработки X по оптимальному по быстродействию закону и за счет практически безынерционного изменения момента турбины в соответствии с характеристикой $M_T(t)=f[X(t)]$.

При разработке оптимальной по быстродействию траектории перемещения ЗД при обеспечении стабилизации частоты под воздействием внезапных подключений (отключений) нагрузки мы исходили из предположения, что параметры нагрузки известны.

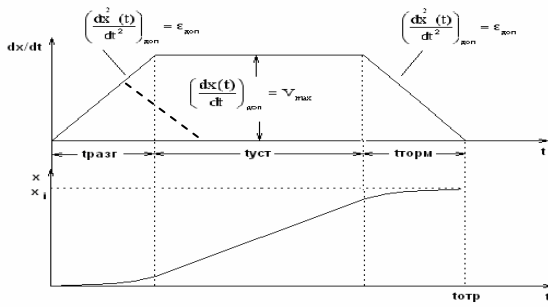


Рис.12. Графики отработки скорости и перемещения

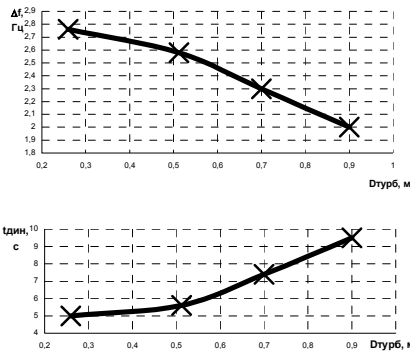


Рис.13. Изменения частоты при набросе номинальной нагрузки для гаммы турбин РАНД.

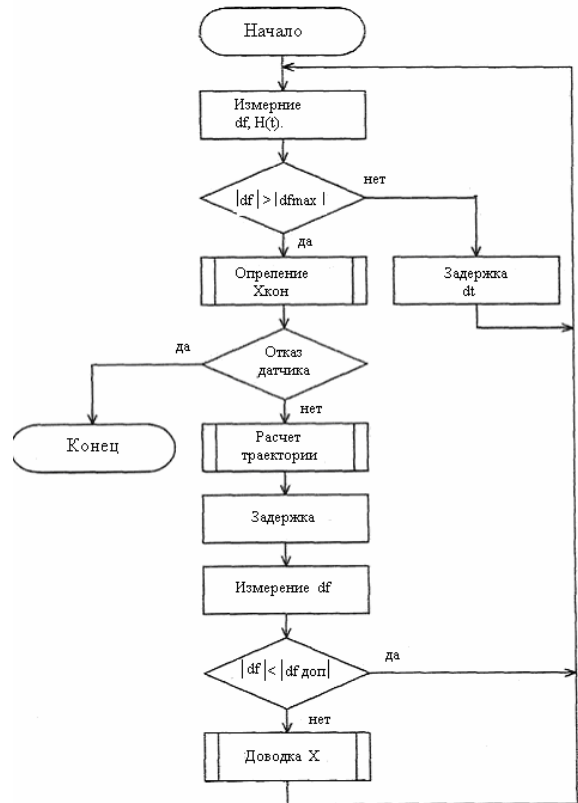


Рис.14. Блок-схема алгоритма управляющей программы

В действительности величина нагрузки является случайной величиной, как по значению её мощности, так и по моменту её подключения (отключения) к генератору МКГЭС. Можно только указать диапазон изменения мощности нагрузки

$$0,3 \cdot P_{\text{НН}} \leq P_{\text{Н}} \leq P_{\text{НН}} \quad (1.12)$$

Было установлено однозначное соответствия между начальным отклонением Δf и приложенной (подключенной к генератору) нагрузкой. Следовательно, при идентификации нагрузки мы используем матрицу одномерного соответствия $P_{\text{нагр}} = P(\Delta f)|_{x=x_{\text{нач}}}$.

Пример численных значений матрицы идентификации для МКГЭС МГА-55-30-0,26 рассчитанный по полной модели последней при набросе нагрузки в пределах от $0,3 \cdot P_{\text{НН}} \leq P_{\text{Н}} \leq P_{\text{НН}}$ приведен в табл. 2. Начальное положение ЗД может быть случайным и определяется предшествующим значением нагрузки.

Таблице № 2

$P_{\text{Н}}$	$P_{\text{НН}}=10 \text{ кВт}, P_{\text{НГ}}=12 \text{ кВт}, \Delta t_{\text{ИМЗМ}}=0,15 \text{ сек}, X_{\text{нач}}=26 \text{ мм (экспериментальное)}, X_{\text{мин}}=21,63 \text{ мм (расчетное)}$											
	$X_0=21,63 \text{ мм}$		$X_1=X_{\text{нач}}$		$X_2=1,25X_{\text{нач}}$		$X_3=1,5X_{\text{нач}}$		$X_4=1,75X_{\text{нач}}$		$X_5=2X_{\text{нач}}$	
кВт	Δf Гц	$X_{\text{уст}}$ мм	Δf Гц	$X_{\text{уст}}$ мм	Δf Гц	$X_{\text{уст}}$ мм	Δf Гц	$X_{\text{уст}}$ мм	Δf Гц	$X_{\text{уст}}$ мм	Δf Гц	$X_{\text{уст}}$ мм
$0,3P_{\text{НН}}$	0,4	31,05	0,47	37,73	0,467	46	0,416	55,05	0,382	65,59		
$0,37P_{\text{НН}}$	0,5	33,8	0,58	40,88	0,578	49,87	0,525	60,23	0,484	74,92		
$0,44P_{\text{НН}}$	0,61	36,7	0,69	44,27	0,685	54,2	0,634	66,77				
$0,51P_{\text{НН}}$	0,718	39,79	0,8	47,95	0,8	59,22	0,798	74,66				
$0,58P_{\text{НН}}$	0,826	43,09	0,91	52,04	0,905	65,43						
$0,65P_{\text{НН}}$	0,935	46,66	1	56,69	1,016	74,63						
$0,72P_{\text{НН}}$	1,045	50,2	1,13	62,23								
$0,79P_{\text{НН}}$	1,154	55,03	1,241	69,54								
$0,86P_{\text{НН}}$	1,263	60,22	1,35	90								

0,93P _{нн}	1,372	66,75										
P _{нн}	1,5	80,2										

Решения задачи идентификации нагрузки, было начато с определения минимально достаточного времени идентификации Δt_{\min} . На полной модели МКГЭС, были исследованы кривые $U_g(t)$ и $f_g(t)$ при подключении к генератору максимального сопротивления нагрузки R_{\max} , приводящей в установившиеся режиме системы к нагрузке, равной $0.3 \cdot P_{\text{нн}}$ и при подключении R_{\min} , приводящей в установившиеся режиме системы к нагрузке, равной $P_{\text{нн}}$. Задавшись погрешностью измерения частоты $\delta f = 2,5\%$, определено для конкретного измерителя частот минимальное время $\Delta t_{\text{изм}}$ при котором измеряемое значение частоты Δf было бы не менее, чем в 40 раз больше дискреты измерения частоты. Для этого $\Delta t_{\text{изм}}$ определены помещенные в табл.2 величины отклонений Δf , определенные на модели для ряда значений мощности подключаемой нагрузки.

Для повышения статической и динамической точности стабилизации частоты малых автономных ГЭС нами предложено ввести в систему дополнительный финитный регулятор отработки по отклонению частоты Δf . Этот контур вступает в работу, если при достижении $X = X_{\text{уст}}$ отклонения частоты выходного напряжения генератора находится вне диапазона $|\Delta f| \leq 1 \text{Гц}$. Эта коррекция осуществляется контуром частоты с помощью ПИ регулятора.

Разработан принцип прогнозирования конечного значения перемещения затвора Джонсона и методика расчета параметров закона изменения $X = X(t)$ с учетом начального положения затвора. Разработан алгоритм управление перемещением затвора Джонсона с использованием метода идентификации приложенной нагрузки P_H (см. Рис.14).

Выводы

1. Доказано, что для физико – географических и экономических условий Демократической Республики Конго наиболее целесообразным и экономически обоснованным является использование для автономного электроснабжения потребителей ограниченной мощности (до 300 кВт) МКГЭС. Стоимость производства электроэнергии на последних в 6÷8 раз ниже, чем у ветроэлектростанции и в 10÷11 раз ниже, чем у фотоэлектростанции и в 13÷15 раз меньше, чем у дизельных электростанций.

2. Анализ эксплуатационных условий в различных регионах Д.Р. Конго позволил установить необходимость использования двух классов микроГЭС, существенно отличающихся по своему функциональному составу. Обоснован функциональный состав электрооборудования и структуры систем стабилизации частоты для микроГЭС первого и второго класса.

3. Опираясь на теорию гидротурбин, электрических генераторов и экспериментальные характеристики гаммы гидроагрегатов фирмы НПО «РАНД» был разработан в среде MatLab-Simulink пакет программ, позволяющих разработчикам МКГЭС рассчитывать их основные статические и динамические характеристики при варьированиях основных конструктивных параметров и условий эксплуатации (расход воды, напор, нагрузка).

4. Результаты исследований статических и динамических режимов работы микроГЭС при набросе нагрузки и изменении напора воды, являющиеся результатом моделирования, сопоставлены с экспериментальными и расчетными параметрами и характеристиками, полученными группой разработчиков турбин НПО «РАНД». Расхождение результатов по основным характеристикам и параметрам лежит в пределах (3–7)%, что подтверждает, правильность математического описания узлов системы и модели МКГЭС в целом и возможность широкого использования разработанного пакета программ в практике проектирование микроГЭС.

5. Наиболее экономичной и дешевой реализацией регулятора балластной нагрузки является схема «неуправляемый выпрямитель – широтно-импульсный регулятор– балластная нагрузка».

Моделирование показало, что статический регулятор балластной нагрузки по отклонению выходной частоты генератора обеспечивает требуемые показатели системы, в узком диапазоне параметров регулятора. Незначительные изменения условий работы (изменения напора или нагрузки) могут вызвать появление колебательного характера отработки с длительностью в несколько секунд и потерю устойчивости.

6. Для расширения области устойчивости системы при изменении ее параметров предложено использовать систему компенсации (тока нагрузки) по возмущению, что повысит также быстродействие. Исследования на полной модели микроГЭС с использованием предложенного варианта регулятора показали, что статическое и динамическое точность системы стабилизации частоты отвечает всем техническим требованиям, предъявляемым к маломощным автономным системам электроснабжения.

7. Модель системы «турбина – генератор – нагрузка», дополнена моделью регулятора расхода воды (РРВ) типа затвора Джонсона. Данный вариант предназначен для микроГЭС, к которым предъявляется требование экономии гидроресурсов.

8. На модели микроГЭС выполнен комплекс исследований, позволивший установить статические и динамические отклонения выходной частоты микроГЭС при ступенчатом подключении активных и активно-индуктивных нагрузок, с учетом ограничений по скорости и ускорению перемещения затвора Джонсона. Установлено, что динамические отклонения частоты в системе с использованием оптимизированных регуляторов, пропорционального, пропорционально-интегрального и ПИД типа превышают при подключении номинальной нагрузки допустимые значения для маломощных автономных источников электроснабжения.

9. Разработан принцип прогнозирования конечного значения перемещения затвора Джонсона и методика расчета параметров закона изменения $X=f(t)$ с учетом начального положения затвора. Разработан алгоритм управления перемещением затвора Джонсона с использованием метода идентификации приложенной нагрузки P_n . Исследования на полной модели микроГЭС с использованием данного типа регулятора показали, что динамические показатели системы резко улучшились. Динамические провалы частоты при подключении к микроГЭС номинальной нагрузки не превышают $2,5 \div 2,7$ Гц, т.е. уменьшились в $4 \div 6$ раз.

10. Разработанные на основании выполненных исследований системы стабилизации частоты для гаммы микроГЭС могут быть рекомендованы к практическому внедрению, а автоматизированные микроГЭС серии МГА фирмы НПО «РАНД» на мощность от единиц до сотен кВт будут предложены министерству энергетики Д.Р.Конго и компании SENOKI для широкого практического использования.

По теме диссертаций опубликованы следующие работы:

1. Палуку Казингуфу, А.Н. Кривцов. Малая энергетика на возобновляемых источниках энергии для демократической республики Конго. //XXXI неделя науки СПбГПУ. /Материалы межвузовской научной конференций –СПб., Изд-во СПбГПУ, 2003. – С.119-121.
2. Палуку Казингуфу, А.Н. Кривцов. Методика обоснования вида автономного источника электроснабжения для удаленных объектов. 2003 г. // Проблемы машиноведения и машиностроения : Межвуз. сб науч. тр. Вып. 30-СПб.: СЗТУ. 2003. С.106-119.
3. Палуку Казингуфу, А.Н. Кривцов, К.А. Холопова. Качество напряжения в автономных энергосистемах малой мощности при пиковых нагрузках // XXXIII неделя науки СПбГПУ. /Материалы межвузовской научной конференций –СПб., Изд-во СПбГПУ, 2004. –С.87-89.

4. Палуку Казингуфу, А. Н. Кривцов. Разработка и исследование модели для системы стабилизации частоты малой автономной ГЭС.// Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 35–СПб.:, Изд-во СЗТУ, 2006. –С.95-114.
5. Палуку Казингуфу, А. Н. Кривцов. Система стабилизации частоты малой автономной ГЭС с двухконтурным регулятором.// Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 35–СПб.:, Изд-во СЗТУ, 2006. –С115-121с.

Диссертанту принадлежат в вышеперечисленных публикациях разработка концепции, выбор исходных данных для моделирования, анализ идеи разработок, а также постановка задач. Доля автора составляет: в публикациях 1, 2, 4, 5 – 40%; в публикациях 3 – 30%.