

На правах рукописи



Гуламов Шухрат Рахматуллоевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ
ЗАЩИТЫ ГИДРОАГРЕГАТОВ МАЛЫХ ГЭС ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ
ПОЛОМОК**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель:

Пугачев Емельян Васильевич

доктор технических наук, профессор;

Кипервассер Михаил Вениаминович

кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Гарганеев Александр Георгиевич

доктор технических наук, профессор, профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Тремясов Владимир Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Электрических станций и электроэнергетических систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Защита состоится «09» апреля 2020 года в конференц-зале в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего 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 организации www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» февраля 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность разработанной темы. В настоящее время расширяется использование одиночных установок для преобразования гидравлической энергии в электрическую энергию. Основными причинами использования таких агрегатов являются: отсутствие традиционных электрических сетей в удаленных и труднодоступных районах местности, низкая надежность электроснабжения в случаях протяженных сетей малой мощности, рост тарифов на электроэнергию, а также дефицит электроэнергии, вынуждающих использовать альтернативные источники электроэнергии.

Электротехнический комплекс, включающий в себя электрический генератор и приводной двигатель, подвергается воздействию большого количества различных механических и электрических нагрузок. К электрическим нагрузкам относят: действующее значение тока статора, вызывающее нагрев обмоток статора; ток в цепи ротора; коммутационные и иные перенапряжения в цепях статора и ротора. К механическим нагрузкам относятся передаваемый рабочий момент с вала двигателя на ротор генератора, усилия от веса вращающихся частей, воспринимаемые опорными подшипниками агрегата, возможные осевые усилия, возникающие при использовании в качестве двигателя разного рода турбин, в том числе водяных, дополнительные усилия, вызванные вибрационными и иными явлениями (кавитация).

Указанные воздействия приводят к постепенному износу отдельных узлов и деталей малых гидроэлектростанций (МГЭС), а в дальнейшем – к выходу из строя самого гидроагрегата (ГА) и нарушению электроснабжения потребителей.

Оценивая существующие способы защиты ГА можно отметить, что контроль за состоянием электрической части (синхронного генератора) осуществляется достаточно полно, включая мониторинг всех параметров генератора и большинства возможных аварийных ситуаций. Защита же механической части ГА ограничивается набором технологических защит, контролирующих параметры систем смазки и охлаждения (давление и температура масла, пр.). Анализируя возможные причины, приводящие к авариям механической части и тяжесть возможных последствий, следует признать защиту ГА стандартными методами недостаточной.

Таким образом, научно-техническая задача по разработке дополнительных средств защиты ГА МГЭС от аварийных режимов, которые позволят повысить надежность их функционирования, является актуальной.

Степень разработанности. Исследованием и разработкой систем защиты для ограничения динамических нагрузок и повышения надежности, производительности и безопасности функционирования ГА занимались такие ученые как Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов, М.А. Шабад, А.И. Абрамов, А.И. Борисенко, В.Г. Даньков, А.И. Яковлев, Е.Я. Гуревич, С.И. Гольденберг, Г. Готер, В.В. Домбровский, А.С. Еремеев, М.Я. Каплан, Э.В. Школьников, М.И. Зунделевич и др. Мировые концерны в области электротехники, такие как *ABB* и *Siemens*, также ведут исследования в данном направлении.

Однако, несмотря на большой объем исследований, задача разработки систем автоматизированных защит гидроагрегатов малых ГЭС от механических поломок до конца не решена.

Цель работы – заключается в исследовании величин гидроагрегата в аварийных режимах работы и разработке систем защит гидроагрегатов малых ГЭС от дефектов и поломок, возникающих в механической части гидроагрегатов.

Идея работы – заключается в распознавании аварийных режимов работы, связанных с механическим поломками или попаданием инородного тела в гидротурбину, путём контроля переходных процессов электрических, механических и гидравлических величин, инициированных возникновением аварийных режимов работы гидроагрегата.

Поставленная цель определяет следующие основные **задачи работы**:

1. Выполнить натурные исследования работы гидроагрегата малой ГЭС в нормальных режимах работы. Провести исследование работы гидроагрегата малой ГЭС в аварийных режимах путем их имитации на реальном объекте.

2. Разработать и исследовать математические модели гидротурбины и сопряженного синхронного генератора в переходных процессах, в том числе – вызванных аварийными событиями, связанными с механическими поломками и попаданием инородного тела в гидротурбину. Определить показатели диагностических признаков возникновения дефектов и аварийных режимов гидроагрегата.

3. Составить алгоритмы работы систем защиты гидроагрегатов малых ГЭС от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину.

4. Разработать функциональные и принципиальные электрические схемы систем защит гидрогенераторов малых ГЭС, работающих параллельно с сетью и на автономную нагрузку, от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину. Провести исследование экспериментальной системы защиты гидроагрегатов малых ГЭС от механических поломок или попадания инородного тела в гидротурбину

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана модель гидротурбины и сопряженного с ней синхронного генератора, предназначенная для исследования работы гидроагрегата в аварийных режимах работы, отличающаяся совместным моделированием процессов в механической и электрической части электромеханического комплекса.

2. Впервые получены зависимости относительного изменения значений электрических величин сопряженного с гидротурбиной синхронного генератора в аварийных режимах.

3. Разработан алгоритм выработки аварийного сигнала систем защиты от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину, отличающийся тем, что для формирования аварийного сигнала используется факт возникновения комбинации изменений электрических, механических и гидравлических параметров гидроагрегата.

4. Создана модифицированная система защиты гидроагрегата от дефектов и аварийных режимов механической части, отличающаяся тем, что диагностируется факт возникновения аварийной ситуации на основании анализа отклонения электрических, механических и гидравлических параметров гидроагрегата.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Теоретическая значимость работы заключается в исследовании влияния аварийных событий в механической части гидроагрегатов на величины электрических параметров электромашин в составе электромеханического комплекса, определении набора диагностических признаков и характера их изменений при возникновении механических поломок.

2. Практическая значимость заключается в применении полученных результатов исследования для разработки систем защиты гидроагрегатов от механических поломок или попадания инородного тела в гидротурбину с повышенной чувствительностью и быстродействием, что в свою очередь позволяет распознавать механические поломки и попадание инородного тела в гидротурбину на ранних стадиях и минимизировать последствия таких событий.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная совместная математическая модель синхронного генератора, сопряженного с гидротурбиной малой ГЭС, обеспечивает формирование зависимостей изменения величин диагностических признаков в аварийных режимах механической части электромеханического комплекса.

2. Полученные зависимости относительного изменения значений электрических величин сопряженного с гидротурбиной синхронного генератора позволяют идентифицировать аварийные режимы поломок механической части и попадания инородного тела в гидротурбину.

3. Разработанный алгоритм действия систем защит от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину с использованием факта возникновения определенной комбинации изменений электрических, механических и гидравлических параметров обеспечивает формирование аварийного сигнала при возникновении аварийных ситуации механической части.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются корректным применением математических методов теории электропривода, теории переходных процессов электрических машин, методов компьютерного моделирования, сравнением результатов компьютерного моделирования с результатами натурных экспериментов и достаточной сходимостью результатов с экспериментальными исследованиями (расхождение в пределах 4...6%), результатами промышленных испытаний.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в опытно-конструкторские разработки службы релейной защиты и автоматики «Байпазинской ГЭС» предприятия Открытой Акционерной Холдинговой Компании «Барки Точик» (ОАХК «Барки Точик») республики Таджикистан при проектировании систем защит и автоматики. Результаты, связанные с исследованием переходных и динамических режимов работы синхронного генератора и гидротурбины в аварийных режимах, легли в основу разработки систем защиты гидроагрегатов малых ГЭС, работающих параллельно с сетью и на автономную нагрузку.

Выполненные в диссертационной работе исследования нашли отражение в учебном процессе кафедры «Электротехники, электропривода и промышленной электроники» Сибирского государственного индустриального университета.

Апробация работы. Основное содержание работы, ее отдельные положения и результаты докладывались и получили одобрение на следующих семинарах и конференциях: международная научно - практическая конференция «Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимая в рамках выставки - ярмарки «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 2015 г.); Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития науки в России и мире» (Казань 8 октября 2015 г.); VI Всероссийская научно-практическая конференция «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк 2014 г.); VII Всероссийская научно-практическая конференция «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк 2016 г.); II Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Введение в энергетику» (Кемерово 23-25 ноября 2016 г.); Международная научно – практическая конференция «Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов», проводимая в рамках выставки – ярмарки «Уголь России и Майнинг» (Новокузнецк, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Исследования в области естественных и технических наук: междисциплинарный диалог и интеграция» (Белгород 2019 г.); на семинарах кафедры «электромеханики» и «Электротехники, электропривода и промышленной электроники» Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ).

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема исследований, изложенных в диссертационной работе, анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов, а также в личном участии в апробации результатов работы, и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 16 работах, в том числе в 4 статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в одной статье издания, индексируемого в наукометрической базе SCOPUS, в 2 патентах на изобретения.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, словаря терминов, списка литературы, включающего 108 наименований, 3 приложений. Диссертационная работа содержит 133 страницы, в том числе 55 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и научные положения, теоретическая и практическая значимость результатов исследований.

В первой главе диссертационной работы произведен анализ современного состояния и направлений развития малой гидроэнергетики в мире, в том числе – в республике Таджикистан, рассмотрены перспективные МГЭС в республике Таджикистан. Также рассмотрены основные причины и наиболее часто встречающиеся повреждения и неисправности в механической части ГА МГЭС. Проведен анализ распределения аварийных ситуаций ГА МГЭС по видам поломок в республике Таджикистан, результаты которого представлены на рисунке 1.

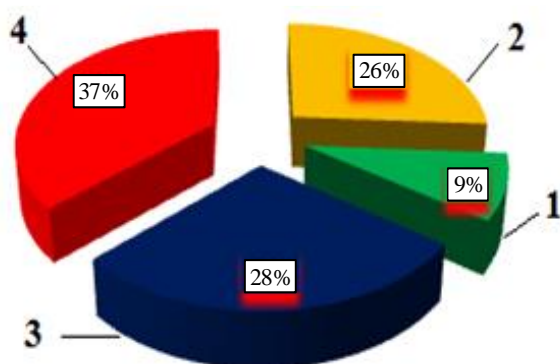


Рисунок 1 – Распределение аварийных ситуаций МГЭС республики Таджикистан по видам, где 1 – электрические поломки; 2 – аварии связанные с природными явлениями; 3 – попадание инородного тела в гидротурбину; 4 – поломки вращающихся частей

Во второй главе описаны натурные исследования реального объекта в нормальных и аварийных режимах работы, связанных с механическими поломками ГА МГЭС. Эксперимент проводился при работе ГА параллельно с сетью и на автономную нагрузку, при включении и отключении нагрузки. Также имитировались поломки механической части ГА.

Результаты натурных исследований ГА МГЭС, работающего на автономную нагрузку приведены на рисунке 2 и параллельно с сетью на рисунке 3 в момент механической поломки.

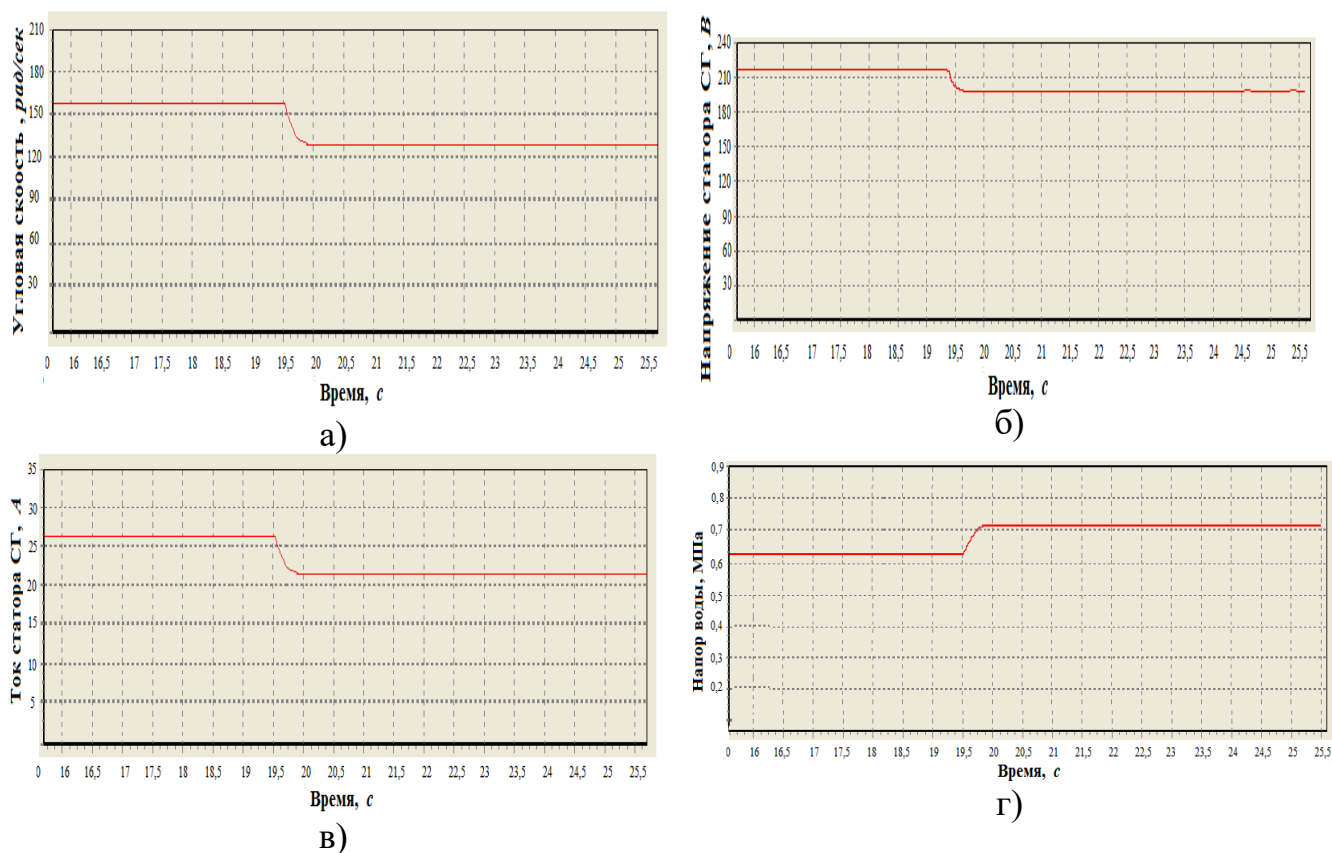


Рисунок 2 – Графики переходных процессов изменения скорости вращения (а), фазного напряжения (б), тока статора (в) и напора воды в напорном трубопроводе (г) в момент механической поломки ГА

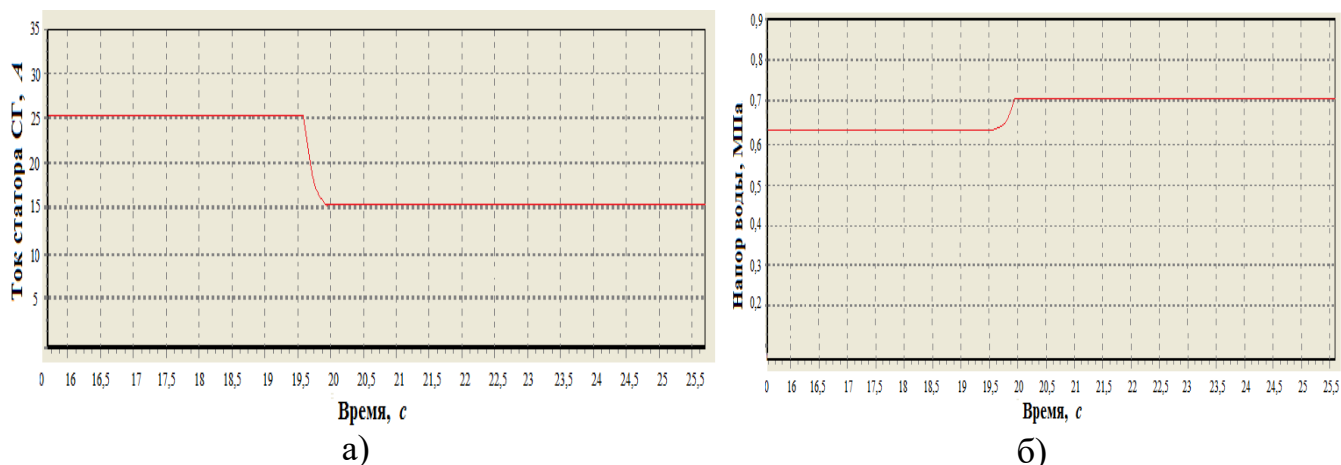


Рисунок 3 – Графики переходных процессов изменения тока статора (а) и напора воды в напорном трубопроводе (б) в момент механической поломки ГА

В ходе натурных экспериментов для режимов работы синхронного генератора параллельно с сетью и на автономную нагрузку были получены диапазоны отклонений электрических, гидравлических и механических величин, в том числе и в аварийных режимах, связанных с механическими поломками или попаданием инородного тела в гидротурбину.

В третьей главе составлено математическое описание ГА МГЭС, работающего параллельно с сетью и на автономную нагрузку.

Составлено математическое описание гидротурбины с напорным трубопроводом, сопряженной с синхронным генератором, работающим параллельно с сетью и на автономную нагрузку. В математическом описании учтён момент статического сопротивления, создаваемый механическими поломками или попаданием инородного тела в рабочий орган гидротурбины. Математическое описание синхронного генератора, работающего параллельно с сетью с учетом момента сопротивления, связанного с механической поломкой, составлено на основании известных уравнений и представлено на рисунке 4 структурой, составленной в среде *MATLAB/Simulink*. Математическая модель ГА, работающего на автономную нагрузку составлена аналогично и приведена на рисунке 5. Математические модели отличаются от известных тем, что содержат две взаимосвязанные составляющие: I – математическая модель входящей в состав электротехнического комплекса электрической машины – явнополюсного синхронного генератора; II – математическая модель гидротурбины с напорным трубопроводом.

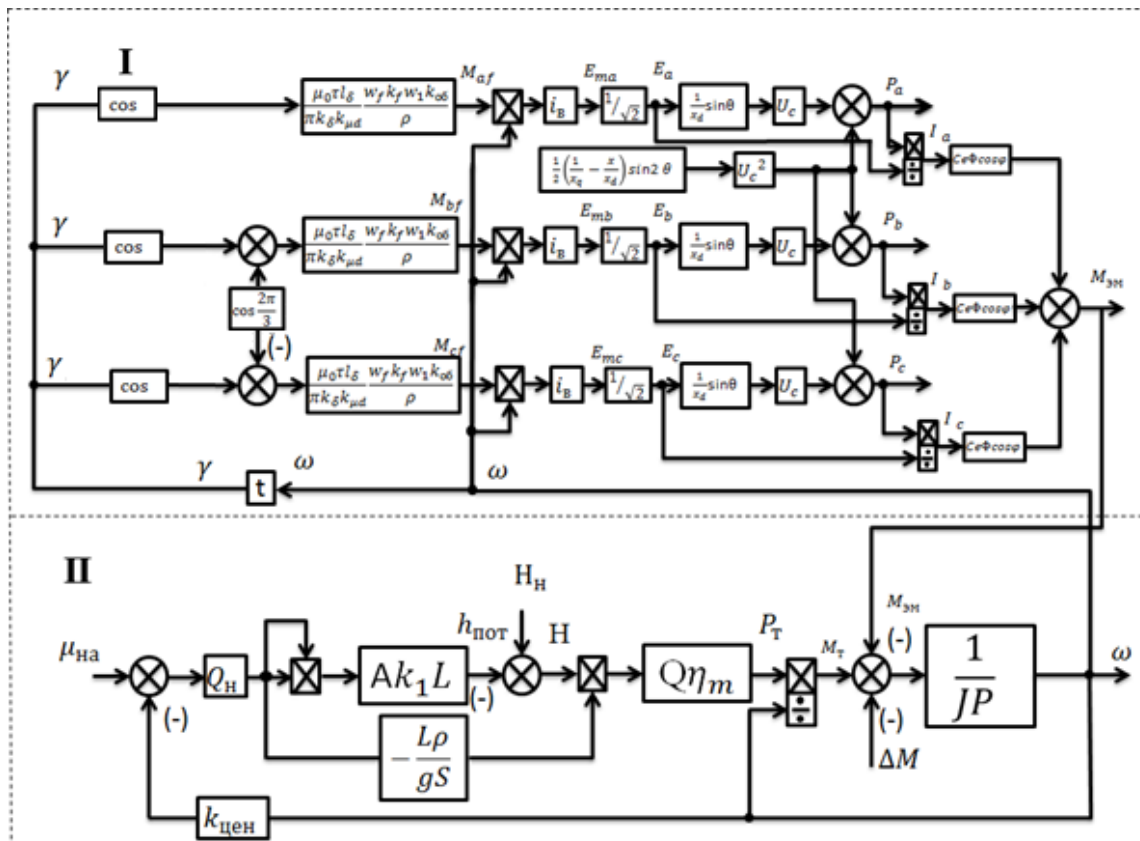


Рисунок 4 – Математическая модель ГА в среде MATLAB, работающего параллельно с сетью: I – электрическая часть; II – механическая часть

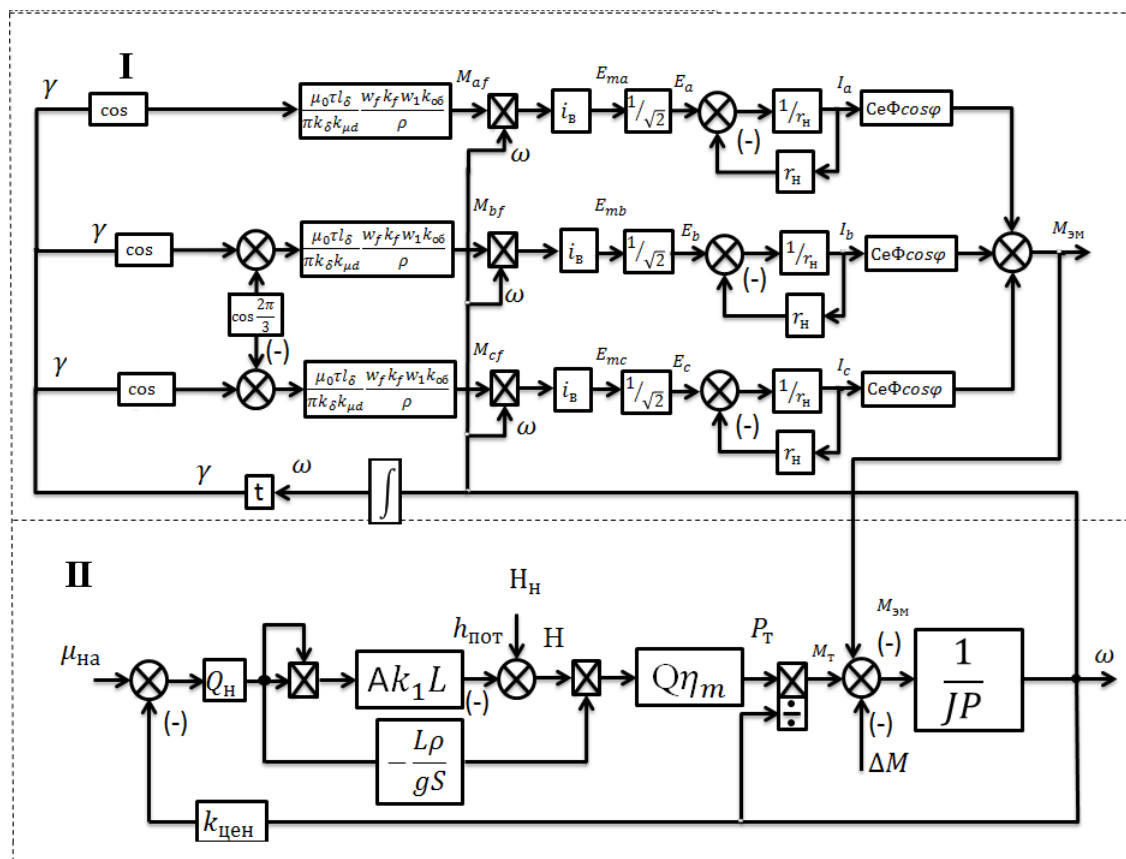
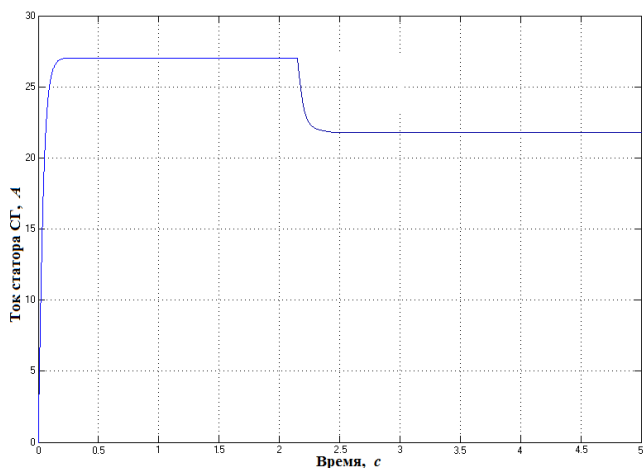


Рисунок 5 – Математическая модель ГА в среде MATLAB, работающего на автономную нагрузку: I – электрическая часть; II – механическая часть

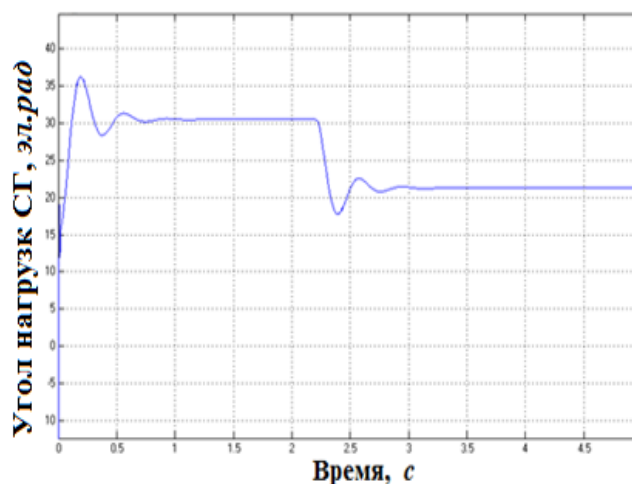
Переходные процессы электрических, гидравлических и механических параметров синхронного ГА, работающего параллельно с сетью и на автономную нагрузку, вызванные возникновением неисправностей и дефектов механической части (разрушение опорного подшипника или попаданием инородного тела в гидротурбину), показаны на рисунке 6.

Из графиков рисунка 6 видно, что в момент механической поломки при работе генератора на автономную нагрузку изменяются: ток статора СГ; напор воды в напорном трубопроводе; напряжение статора СГ; скорость вращения ГА. При работе СГ параллельно с сетью изменяются ток статора, угол нагрузки генератора и напор в напорном трубопроводе. Напряжение и скорость не изменяются, соответствуя величинам мощной сети.

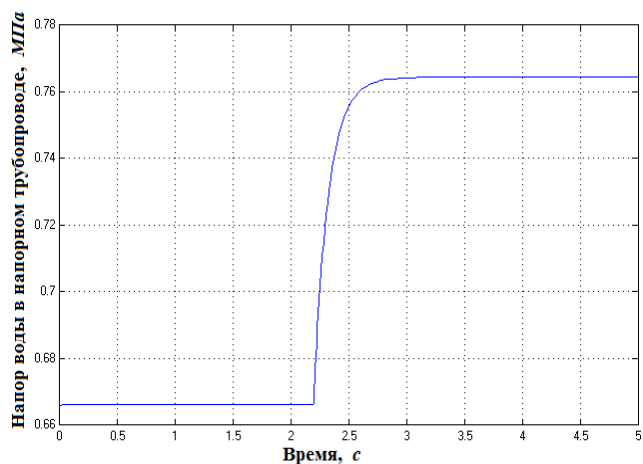
Полученные в ходе моделирования значения величин синхронного генератора, работающего параллельно с сетью и на автономную нагрузку, сопряженного с гидравлической турбиной, позволяют установить наличие устойчивой связи между происходящими аварийными событиями в механической части и электрическими параметрами агрегата.



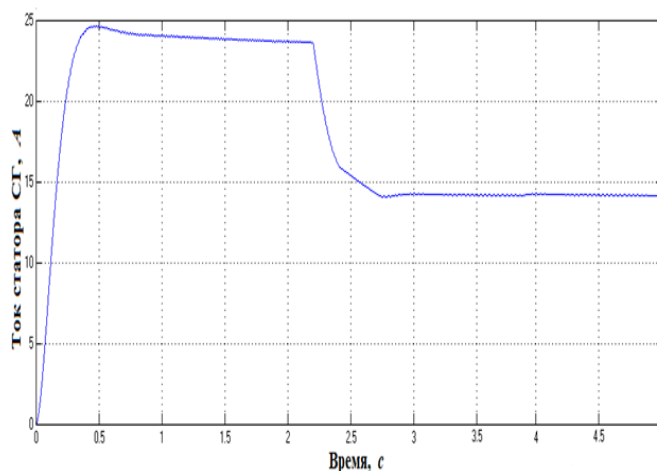
а) Изменение тока статора при работе ГА на автономную нагрузку



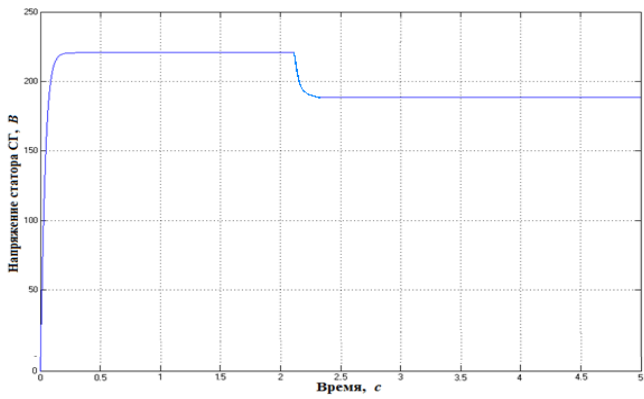
б) Изменение угла нагрузки при работе ГА параллельно сети



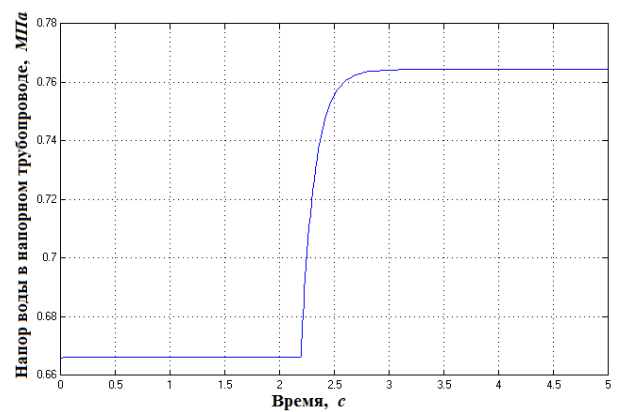
в) Изменение напора воды в напорном трубопроводе при работе ГА на автономную нагрузку



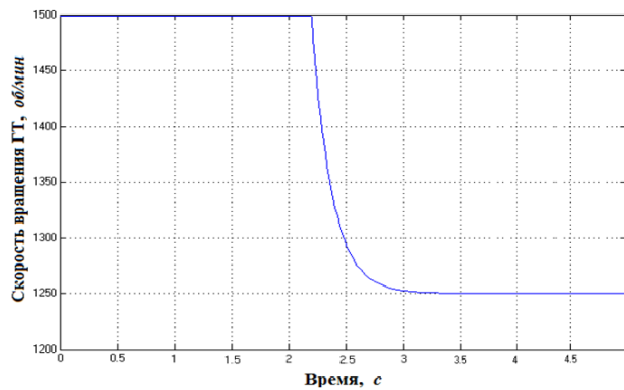
г) Изменение фазного тока статора при работе ГА параллельно с сетью



д) Изменение фазного напряжения при работе ГА на автономную нагрузку



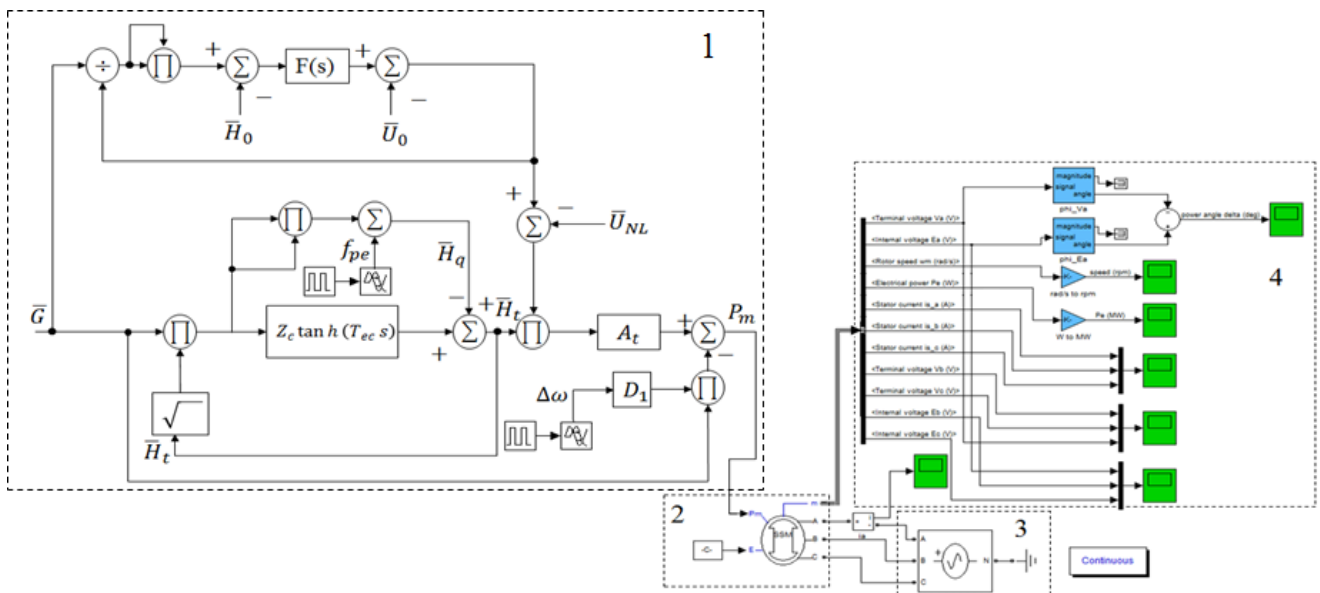
е) Изменение напора в напорном трубопроводе при работе ГА параллельно с сетью



ж) Изменение скорости при работе ГА на автономную нагрузку

Рисунок 6 – Переходные процессы ГА

Для расширения диапазона исследуемых режимов и получения, мгновенных значений исследуемых величин в среде MATLAB составлены имитационные модели ГА, работающего параллельно с сетью и на автономную нагрузку, приведенные на рисунке 7. Модель синхронного генератора в переходных режимах реализована в стандартном блоке из библиотеки программной среды.



а)

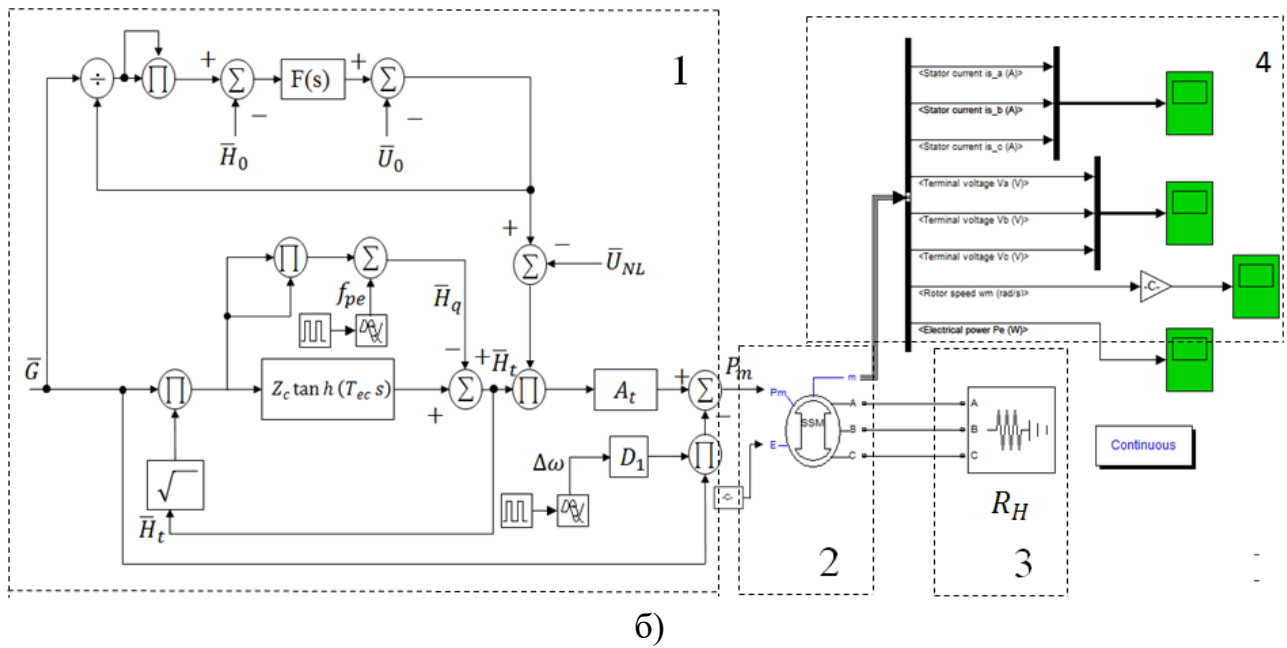


Рисунок 7 – Имитационные модели ГА работающего параллельно с сетью (а) и на автономную нагрузку (б)

Результаты моделирования переходных процессов синхронного генератора, работающего параллельно сетью в момент возникновения механической поломки приведены на рисунке 8.

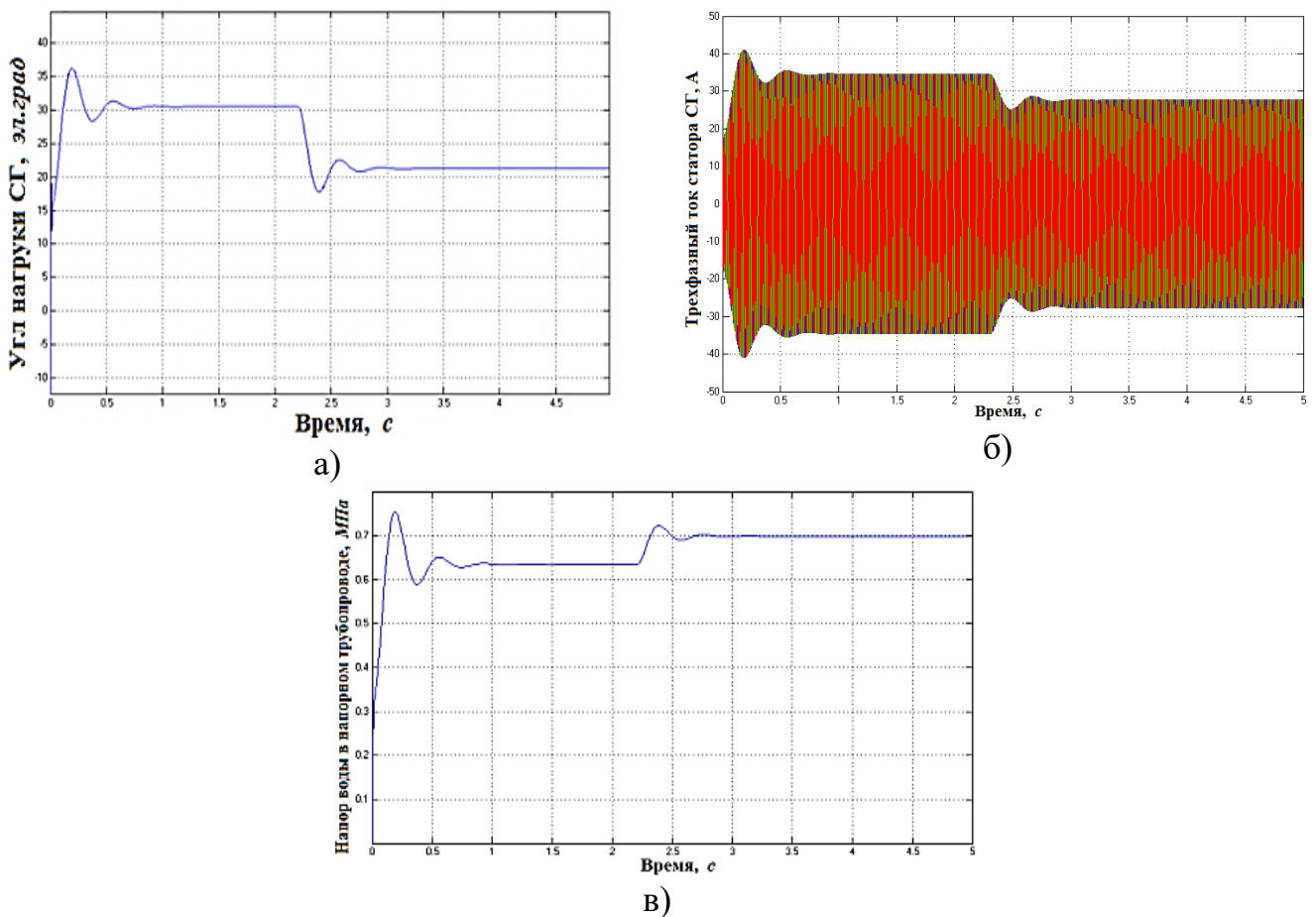


Рисунок 8 – Графики переходных процессов ГА работающего параллельно сетью в момент возникновения механической поломки: угла нагрузки (а), тока статора (б) и напора воды в напорном трубопроводе (в)

В момент возникновения механической поломки происходит уменьшения момента гидротурбины, что приводит к уменьшению тока статора, угла нагрузки и увеличению напора воды в напорном трубопроводе. Напор увеличивается вследствие увеличения сопротивления при прохождении воды через ГТ.

Результаты моделирования переходных процессов синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку в момент возникновения механической поломки, приведены на рисунке 9.

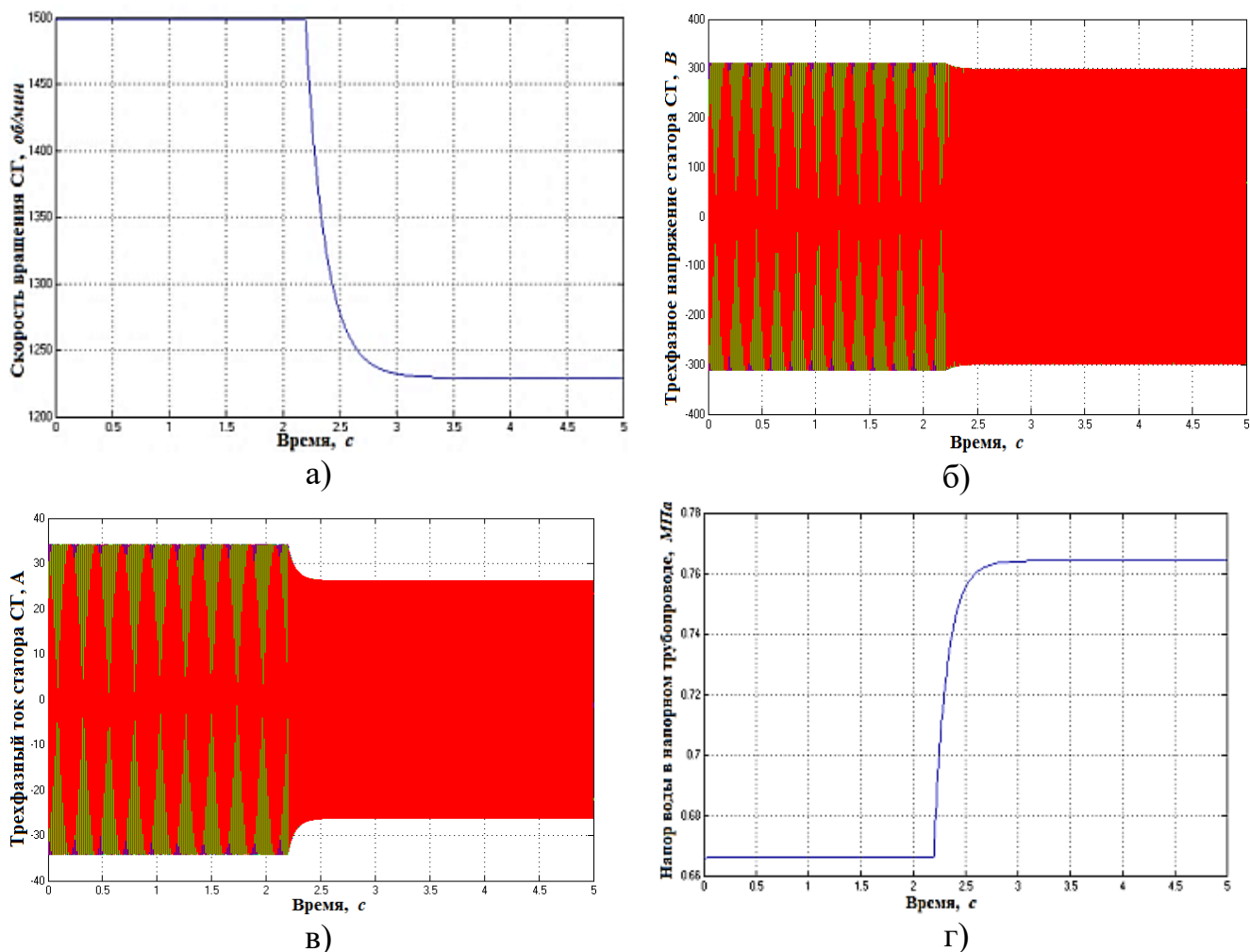


Рисунок 9 – Графики переходных процессов изменения скорости вращения (а), фазного напряжения (б), тока статора (в) и напора воды в напорном трубопроводе (г) в момент механической поломки

При работе СГ на автономную нагрузку изменяются так же напряжение СГ и скорость вращения ГТ.

Из полученных в ходе исследования математических моделей ГА, работающего параллельно с сетью и на автономную нагрузку, результатов следует, что переходные процессы величин ГА в случаях появления механических поломок или попадания инородного тела в гидротурбину отличаются от переходных процессов, вызванных изменениями нагрузки, ее включением или отключением.

Сравнение результатов натуральных экспериментов с результатами компьютерного моделирования приведено на рисунке 10.

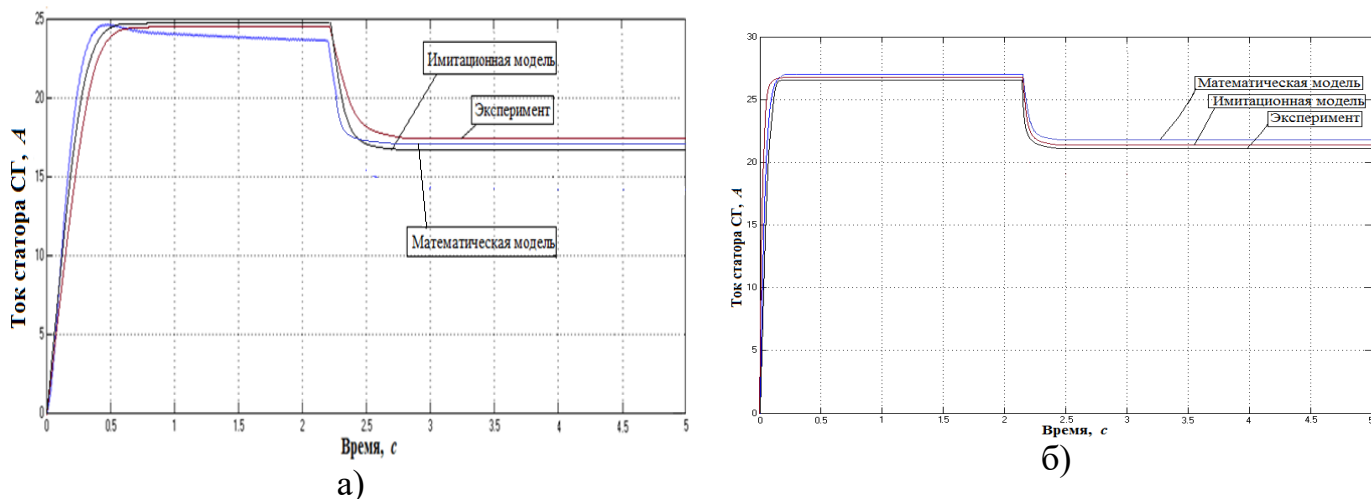


Рисунок 10 – Величины тока статора, полученные в натурном эксперименте и при помощи моделирования генератора работающего параллельно сетью (а) и на автономную нагрузку (б) при возникновении механической поломки

Сравнение результатов натурных экспериментов и компьютерного моделирования показывает их достаточную сходимость. Расхождение не превышает 5%.

Результаты натурных экспериментов и исследования математических моделей в различных режимах работы ГА показывают устойчивую связь между аварийными событиями в механической части и параметрами ГА. Эту связь можно использовать для распознавания механических поломок или попадания инородного тела в гидротурбину.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритма выработки аварийного сигнала, функциональных и электрических схем устройств защиты.

На основании проведенных исследований был разработан алгоритм выработки аварийного сигнала для ГА, работающих параллельно с сетью. Алгоритм выработки аварийного сигнала для ГА, работающего параллельно сетью, в момент возникновения поломок и дефектов механической части приведен на рисунке 11.

Данный алгоритм позволяет получать аварийный сигнал в момент возникновения механической поломки или попадания инородного тела в рабочий орган гидротурбины с учетом предварительной оценки всех параметров ГА, работающего параллельно с сетью.

В представленном алгоритме значения контролируемых параметров ГА сравниваются с нормальными значениями и определяется величина отклонения параметров от нормальных значений. Нормальные значения параметров подаются из блока систем управления ГА. Далее, после сравнения и определения величин отклонений, последние сравниваются с нормальными отклонениями (уставками) параметров ГА и определяются величины и знаки отклонения. После определения величины и знака отклонения параметров ГА, последнее подаются в блок выработки аварийного сигнала. Блок выработки аварийного сигнала по совокупности изменения параметров ГА вырабатывает аварийный сигнал в моменты механических поломок или попадания инородного тела в рабочий орган гидротурбины.

Алгоритм выработки аварийного сигнала в момент возникновения поломок механической части гидроагрегата, работающего на автономную нагрузку приведен на рисунке 12.

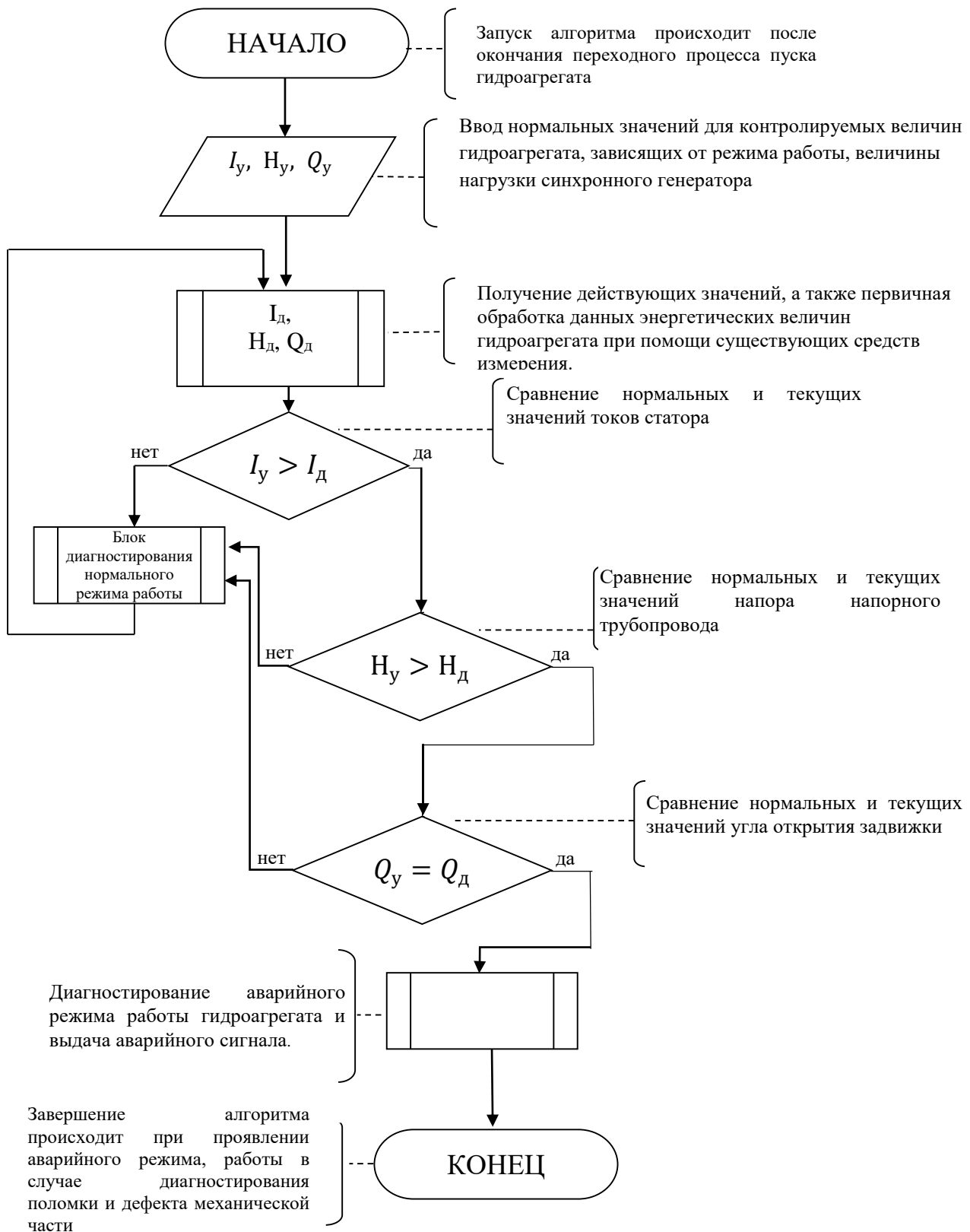


Рисунок 11 – Алгоритм выработки аварийного сигнала в момент возникновения поломок и дефектов механической части ГА, работающего параллельно сети

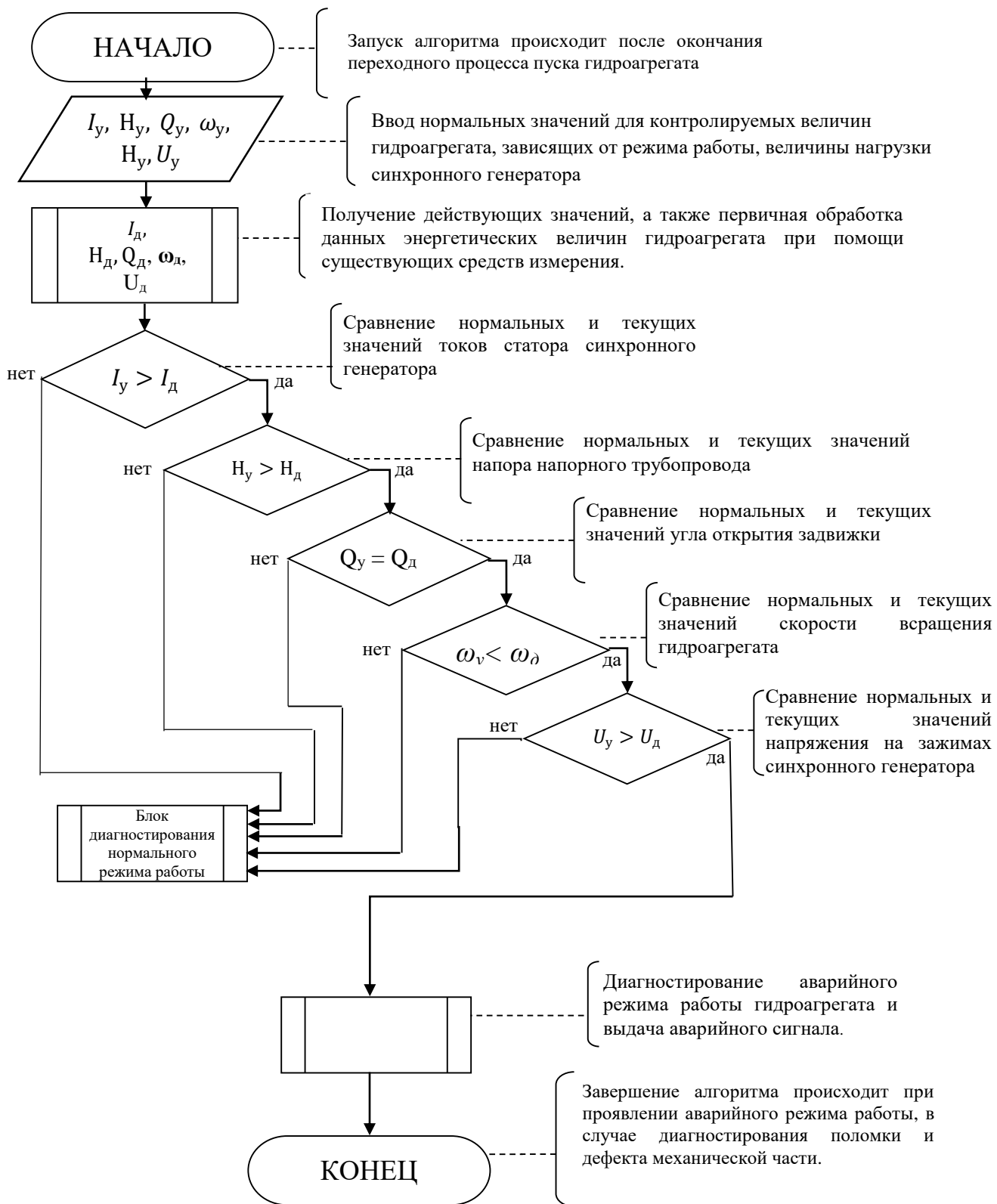


Рисунок 12 – Алгоритм выработки аварийного сигнала, в момент возникновения поломок механической части гидроагрегата, работающего на автономную нагрузку

Система защиты ГА малой ГЭС, работающего параллельно с сетью, от механических поломок использует сигналы от следующих измерительных приборов ГА: датчиков тока, давления и угла открытия задвижки водонапорного трубопровода.

На рисунке 13 представлена функциональная схема системы защиты ГА, работающего параллельно с сетью, которая состоит из: ДТ – датчики тока; ВЗ – водяная задвижка; ДВЗ – датчик водяной задвижки; ДД – датчик давления; СГ – синхронный генератор; ГТ – гидротурбина; БСНЗТ – блок сравнения с нормальными значениями тока; БСНЗЗ – блок с сравнения с нормальными значениями угла открытия задвижки; БСУТ – блок сравнения уставок по току; БСУЗ – блок сравнения с уставками по углу открытия задвижки; БСУД – блок сравнения с уставками по давлению; БЗНЗТ – блок задания нормальных значений по току; БЗНЗД – блок задания нормальных значений по давлению; БЗНЗЗ – блок задания нормальных значений по углу открытия задвижки; БЗУТ – блок задания уставок по току; БЗУД – блок задания уставок по давлению; БЗУЗ – блок задания уставок по углу открытия задвижки; БВАС – блок выработки аварийного сигнала; БУСГ – блок управления синхронным генератором.

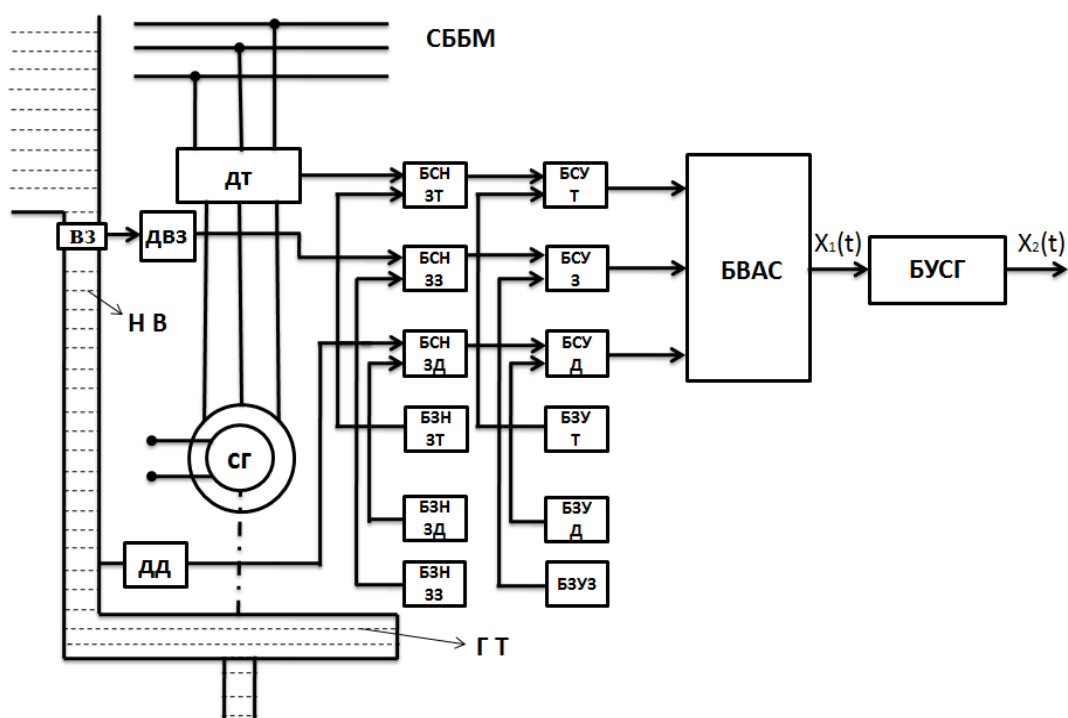


Рисунок 13 – Функциональная схема системы защиты ГА, работающего параллельно с сетью, от механических поломок

Аварийные ситуации, связанные с механическими поломками, приведут к увеличению момента сопротивления на валу ГА, что приведет к увеличению давления в водонапорном водоводе. Увеличение момента сопротивления на валу ГА приведет к уменьшению угла нагрузки синхронного генератора, что приведет к уменьшению тока статора и электромагнитного момента. На выходе блока выработки аварийного сигнала вырабатывается аварийный сигнал.

Система защиты ГА, работающего параллельно с сетью, реализует логические функции, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Комбинации изменений величин, используемых для выработки сигнала системы защиты ГА, работающего параллельно с сетью

№	Выходной сигнал системы защиты	Отклонения контролируемых параметров ГА (ток, напор, угол открытия задвижки)			Характеристика режима работы
		ΔI	ΔP	ΔQ	
1	$X_1(t)_1$	0	0	0	Установившийся режим работы ГА
2	$X_2(t)_2$	↑	↑	↑	Режим увеличения вырабатываемой мощности ГА
3	$X_3(t)_3$	↓	↓	↓	Режим уменьшения вырабатываемой мощности ГА
4	$X_4(t)_4$	↓	↑	0	Аварийный режим работы, связанный с механическим поломкой

На рисунке 14 представлена функциональная схема системы защиты ГА, работающего на автономную нагрузку. От предыдущей система отличается тем, что дополнительно содержит следующие блоки: ДН – датчик напряжения статорной обмотки СГ; БСНЗН – блок сравнения с нормальными значениями напряжение статорной обмотки СГ; БСУН – блок сравнения с уставками по напряжению; БЗНЗН – блок задания нормальных значений напряжение СГ; БЗУН – блок задания уставок по напряжению статора СГ.

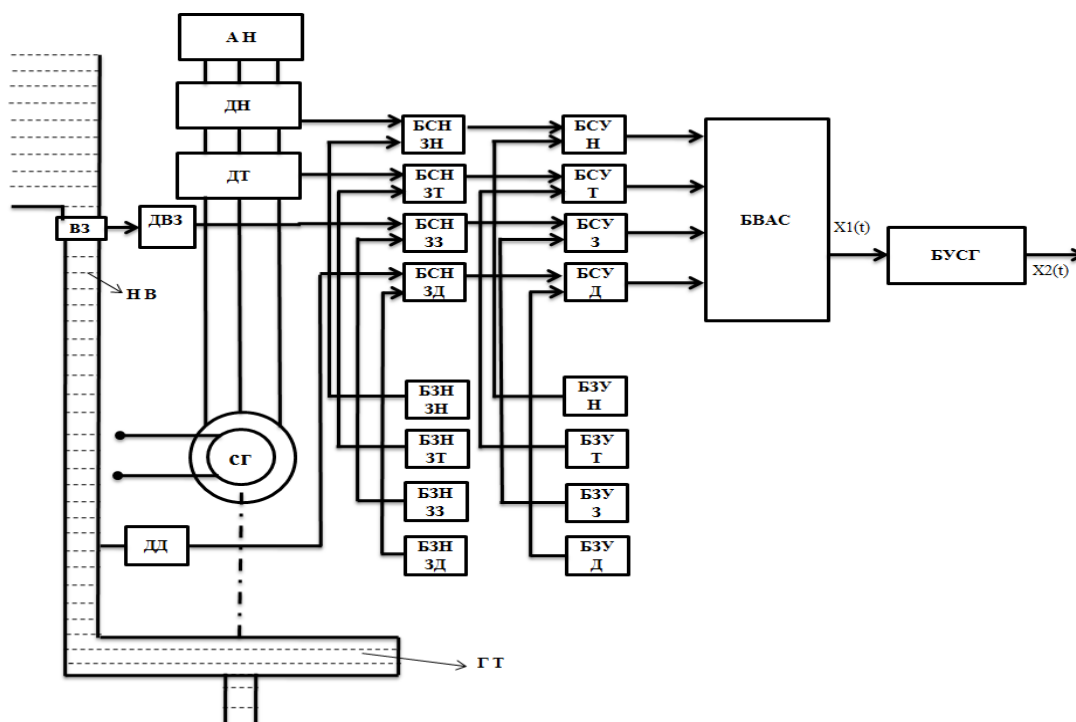


Рисунок 14 – Функциональная схема системы защиты ГА, работающего на автономную нагрузку, от механических поломок

Система защиты ГА, работающего на автономную нагрузку, реализует логические функции, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Комбинации изменений величин, используемых для выработки сигнала системы защиты ГА, работающего на автономную нагрузку

№	Выходной сигнал системы защиты	Отклонения контролируемых параметров ГА				Характеристика режима работы
		ΔI	ΔP	ΔQ	ΔU	
1	$X_1(t)_1$	0	0	0	0	Установившийся режим работы ГА
2	$X_2(t)_2$	↑	↑	↑	↑	Режим увеличения вырабатываемой мощности ГА
3	$X_3(t)_3$	↓	↓	↓	↓	Режим уменьшения вырабатываемой мощности ГА
4	$X_4(t)_4$	↓	↑	0	↑	Аварийный режим работы, связанный с механическим поломкой

На основании функциональных схем разработаны принципиальные электрические схемы систем защиты ГА МГЭС, работающих параллельно сетью (рисунок 15) и на автономную нагрузку (рисунок 16), от механических поломок.

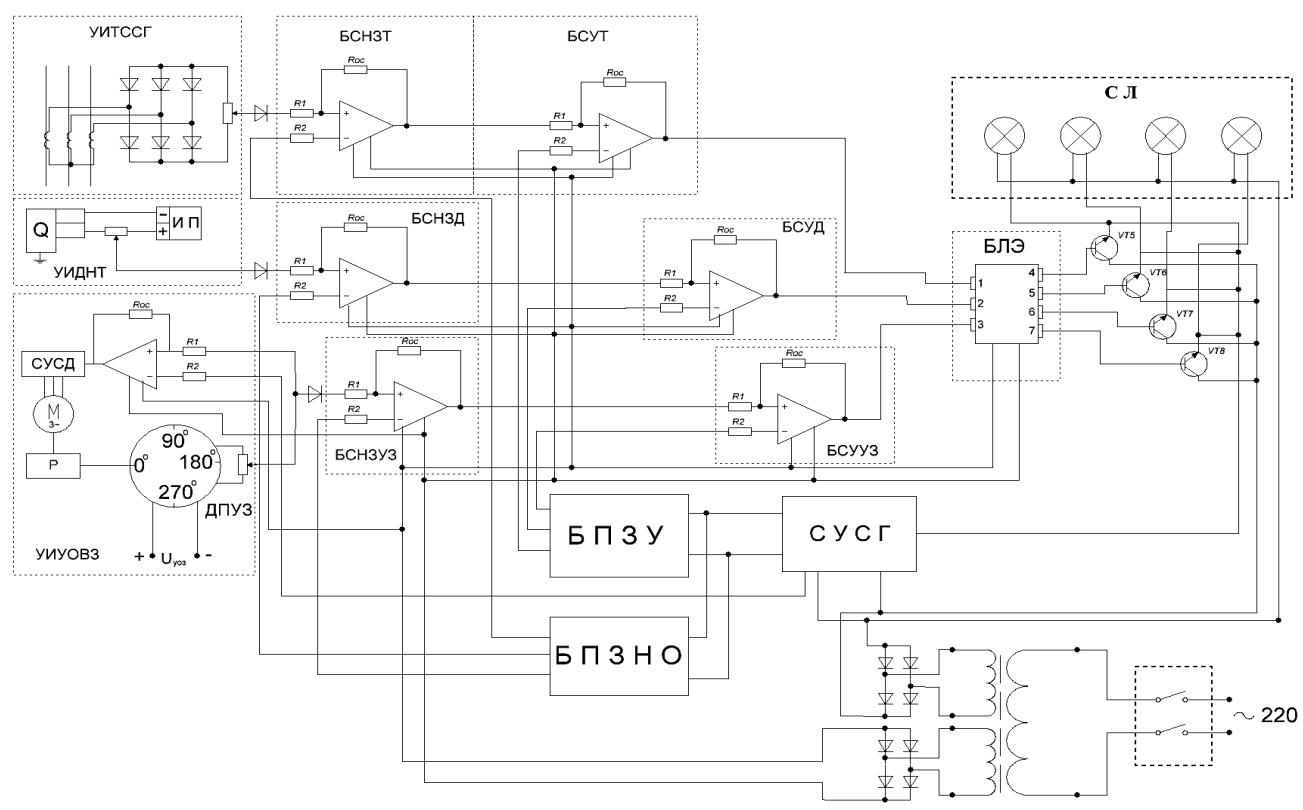


Рисунок 15 – Принципиальная электрическая схема системы защиты ГА МГЭС, работающего параллельно сетью

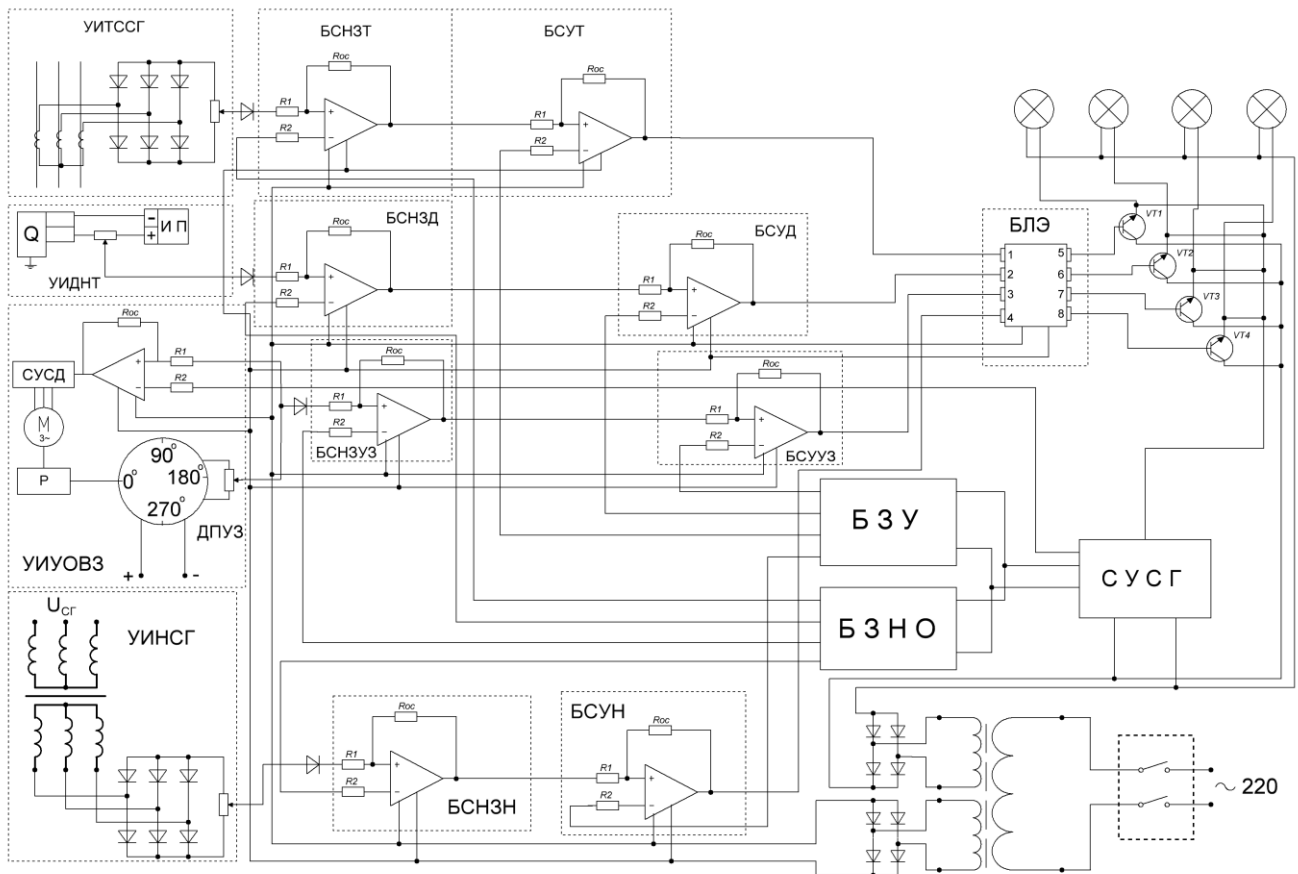


Рисунок 16 – Принципиальная электрическая схема системы защиты ГА МГЭС, работающего на автономную нагрузку

Принципиальные схемы устройств защиты реализованы с использованием аналоговых микросхем и полупроводниковых приборов. Оба устройства реализованы на базе одной платформы с возможностью переключения в зависимости от режима работы СГ. Появление аварийного сигнала для ГА, работающих параллельно сетью и на автономную нагрузку, обеспечивается последовательным срабатыванием семи и девяти блоков соответственно. При собственном времени срабатыванием аналоговых блоков $5 \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$ с., полное время срабатывания устройств будет определяться в основном собственными временами срабатывания блока управления системами гидротурбины и синхронного генератора, составляющим 0,07 – 0,09 с, и датчика давления. Время срабатывания датчика давления составляет 0,12 – 0,14 с. Тогда полное время срабатывания устройства составит 0,19 – 0,23 с.

Проведены экспериментальные исследования разработанной системы защиты ГА МГЭС от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину.

Внешний вид устройства защиты от механических поломок или попадания инородного тела в гидротурбину приведен на рисунке 17.



Рисунок 17 – Внешний вид экспериментальной установки с системой защиты от механических поломок или попадания инородного тела в гидротурбину

После установки и настройки экспериментальной системы защиты от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину для ГА МГЭС, была произведена имитация механических поломок 16 раз. В ходе имитации механических поломок экспериментальная система защиты от механических поломок сработала шестнадцать раз из шестнадцати.

Экспериментальная система защиты от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину работала в ГА МГЭС сейсмологической станции в течение семи месяцев. В период работы системы защиты от механической поломки ГА устройство защиты сработало 8 раз. В ходе изучения причин срабатывания системы защиты было определено следующее: одно срабатывание связано с заклиниванием одного из направляющих подшипников; семь срабатывание связаны с попаданием инородного тела в гидротурбину.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной задачи – распознавания дефектов и аварийных ситуаций, возникающих в механической части гидроагрегатов малых ГЭС и разработки систем защит, позволяющих идентифицировать на ранних стадиях возникающие дефекты и аварийные ситуации механической части гидроагрегата, имеющей важное практическое значение для повышения надежности функционирования объектов малой электроэнергетики.

Основные результаты выполненного исследования:

1. Выполненные натурные исследования реального объекта в аварийных режимах, связанных с поломками и дефектами механической части или попаданием инородного тела в рабочий орган гидротурбины, показали, что возникновение указанных событий сопровождается изменениями электрических величин электрогенератора, механических и гидравлических параметров гидротурбины. Определены в ходе натурных экспериментов отклонения электрических величин электрогенератора при возникновении неисправностей и аварийных ситуаций гидроагрегата малой ГЭС.

2. Исследованы математические модели, составленные на основе математического описания гидроагрегатов, работающих параллельно с сетью и на автономную нагрузку в переходных процессах, в том числе – вызванных аварийными режимами, связанными с механическими поломками и попаданием инородного тела в гидротурбину. Исследование показали, что механические поломки и попадания инородного тела в гидротурбину приводят к возникновению переходных процессов электрических, механических и гидравлических параметров гидроагрегата. Для исследуемого гидроагрегата диапазон отклонения величины скорости составляет 8-17%; отклонений величин тока и напряжения статора 7-14%; напора воды в напорном трубопроводе 9-11%, при работе синхронного генератора на автономную нагрузку. При работе гидроагрегата параллельно сетью диапазон отклонений величин тока статора 12-34%; напора воды в напорном трубопроводе 8-11%. Отклонение контролируемых величин достаточны для фиксации их схемами контроля.

3. Проведены исследования имитационных моделей, составленных с использованием стандартного блока синхронного генератора, гидроагрегатов, работающих параллельно с сетью и на автономную нагрузку, в переходных процессах, в том числе – вызванных аварийными событиями, связанными с механическими поломками и попаданием инородного тела в гидротурбину. Результаты исследования в динамических процессах показали изменения величин гидроагрегата в момент возникновения механической поломки. Изменения величин гидроагрегата в аварийных режимах близки к результатам натурного эксперимента и результатами исследования математических моделей, составленных на основе математического описания.

4. Составлены алгоритмы работы систем защиты гидроагрегатов малых ГЭС от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину, обеспечивающее выработку аварийных сигналов посредством распознавания совокупностей изменения электрических, механических и гидравлических величин гидроагрегата, присущих только аварийным ситуациям в механической части.

5. Разработаны функциональные и принципиальные электрические схемы систем защиты гидроагрегатов малых ГЭС от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину. Проведены экспериментальные исследования опытного образца системы защиты гидроагрегата от механических поломок и попадания инородного тела в гидротурбину. По итогам промышленных испытаний систем защиты показала достаточные чувствительность и надежность срабатывания.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Пугачев Е.В. Динамические характеристики системы гидротурбины – синхронный генератор работающий на автономную нагрузку в аварийных режимах / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Вестник Таджикского национального университета. – 2014 г. – № 1-2. (130). – С. 117-123.

2. Пугачев Е.В. Косвенное оценивание неисправностей механической части гидрогенераторов / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015 г. – № 2 (108). – С. 122-126.

3. Кипервассер М.В. Разработка системы защиты гидроагрегатов, работающих на автономную нагрузку, от механических поломок / М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Вестник Чувашского университета. – 2016 г. – №3 (124). – С. 68-75.

4. Семькина И.Ю. Исследование влияния попадания постороннего предмета в рабочее колесо насоса на энергетические характеристики приводного двигателя / И.Ю. Семькина, М.В. Кипервассер, А.В. Герасимук, Ш.Р. Гуламов // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 177–184

Публикация в издании индексируемое в наукометрической базе SCOPUS:

5. M V Kipervasser. A study of the system «thyristor exciter – synchronous motor of a pump unit» in the conditions of a deep voltage drop [Electronic resource] / M. V. Kipervasser, S. A. Laktionov, S. D. Davydov and Sh. R. Gulamov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 377. [012043, 7 p.]. – URL: <http://library.sibsiu.ru>. doi:10.1088/1755-1315/377/1/012043

Работы в сборниках всероссийских и международных конференций:

6. Пугачев Е.В. Особенности математического моделирования электротехнических комплексов, имеющих в составе технологический агрегат и электрическую машину / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Д.С. Аниканов, Ш.Р. Гуламов // Академическая наука - проблемы и достижения Материалы VI международной научно-практической конференции. н.-и. ц. «Академический». – North Charleston, USA, CreateSpace 2015. – С. 58-61.

7. Пугачев Е.В. Моделирование аварийных режимов в приводе турбокомпрессора / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Вестник Таджикского национального университета. – 2016 г. – № 1-1 (192). – С. 228-233.

8. Пугачев Е.В. Влияние аварийных режимов на переходные процессы системы гидротурбина – синхронный генератор работающей на автономную нагрузку / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды Шестой Всероссийской научно – практической конференции. / Под общей редакцией В.Ю. Островляничика. – Новокузнецк; СибГИУ, 2014 г. – С. 300-305.

9. Пугачев Е.В. Способы контроля неисправности механической части гидроагрегатов / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Современные тенденции в науке и образовании Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 5 частях. –Москва; ООО "АР-Консалт". 2015. – С. 50-52.

10. Пугачев Е.В. Алгоритм и математическая модель для исследования аварийных режимов в электротехническом комплексе «турбина – гидрогенератор» / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк; СибГИУ, 2015 г. –№ 2. – С. 231-235.

11. Пугачев Е.В. Диагностика неисправностей механической части гидротурбины малой гидроэлектростанции / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Интеграционные процессы в науке в современных условиях. Сборник статей Международной научно-практической конференции. / Ответственный редактор Сукиасян Асатур Альбертович. – Уфа; Омега Сайнс, 2015 г. – С. 33-36.

12. Пугачев Е.В. Диагностика неисправностей механической части воздушного турбокомпрессора / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Новая наука:

Современное состояние и пути развития. – Уфа; Общество с ограниченной ответственностью; Агентство международных исследований, 2015 г. № 5. – С. 141-144.

13. Гуламов Ш.Р. Переходные процессы в цепи статора синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку, при авариях механической части приводной гидротурбины. / Ш.Р. Гуламов. // Введение в энергетику. Материалы II Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-практической конференции, 23-25 ноября 2016 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф.Горбачева»; под ред. С.Г. Костюк. – Кемерово, 2016. – С. 1-5.

14. Гуламов Ш.Р. Моделирование гидроагрегата малой ГЭС с напорным трубопроводом в аварийных режимах работы, связанных с механическими поломками / Ш.Р. Гуламов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды Шестой Всероссийской научно – практической конференции. / Под общей редакцией В.Ю. Островляничка. – Новокузнецк; СибГИУ, 2016 г. – С. 115-122.

15. Герасимук А.В. Сигнатура токовая защита турбокомпрессоров железорудных шахт от помпажа / А.В. Герасимук, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов // Научно-технологические разработки и использования минеральных ресурсов: науч. Журнал / сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянов. – Новокузнецк, 2018 г. – № 4. – С. 357-361.

16. Кипервассер М.В. Разработка системы защиты гидроагрегата от механических поломок работающего параллельно с сетью / М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов. // Исследования в области естественных и технических наук: междисциплинарный диалог и интеграция: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. / Под общ. ред. Е. П. Ткачевой. – Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2019 г. – С. 147-152.

Объекты интеллектуальной собственности:

1. Патент №2566613 RU. Устройство защиты гидротурбины от выхода из строя опорного подшипника / Е.В. Пугачев, М.В. Кипервассер, Ш.Р. Гуламов., ГОУ ВПО «СибГИУ» – №201450744/06 (081372): заявл. 15.12.2014, опубл. 27.10.2015. – 17 с.: ил.

2. Малый патент №796. Устройство защиты синхронного гидроагрегата работающего на автономную нагрузку, от механических поломок и попадания инородного тела, в гидротурбину. Патентообладатель Гуламов Ш.Р., Пугачев Е.В., Кипервассер М.В., Мирзоаминов Х.М, Гуломзода А.Х. Заявка №1500994 от 15.12.2015. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Республики Таджикистан, опубл. 17.10.2016. – 23 с.: ил.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1], [2], [3], [5], [12], [13], [14] – построение моделей, обработка полученных результатов; [4], [16] – проведение аналитического обзора; [6], [7], [8], [9], [15] – выработка идеи публикации, обработка полученных результатов, разработка основных теоретических положений; [10], [11] – проведение аналитического обзора, формулировка выводов.

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 1.5 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ 2025. Подписано в печать 30.01.2020 г.