

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«**СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**»  
**САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ**

институт  
Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и  
электрических сетей  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

А.А. Ачитаев

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

подпись

инициалы, фамилия

« \_\_\_\_ »

\_\_\_\_\_ 2022г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОАГРЕГАТА В СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTESN**

тема

13.04.02. Электроэнергетика и электротехника

код и наименование направления

13.04.02.06. Гидроэлектростанции

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

ст. преп. кафедры  
ГГЭЭС Саяно-  
Шушенского филиала  
СФУ

А.В. Букатов

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

подпись, дата

должность

инициалы, фамилия

Выпускник

С.К. Кобылецки

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

подпись, дата

инициалы, фамилия

Рецензент

Начальник ССИиТС  
филиала ПАО  
«РусГидро» - «Саяно-  
Шушенская ГЭС имени  
П.С. Непорожного»

А.В. Чепиков

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

подпись, дата

должность, ученая степень

инициалы, фамилия

Нормоконтроллер

К.П. Синельникова

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2022

## АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается среда динамического моделирования SimInTech и ее применение для гидроэнергетики. Разрабатывается, отсутствующая, в программном комплексе, модель гидротурбины.

Инструменты компьютерного моделирования повсеместно применяются в энергетике. Данный факт делает необходимым наличие подобного инструмента среди отечественного программного обеспечения. SimInTech являясь таким инструментом, к сожалению, не имеет такого мощного пользовательского сообщества как зарубежное ПО.

Для решения поставленных задач использовался анализ существующих моделей, применяемых для моделирования гидроагрегатов. На основе данных математических моделей, разрабатывается компьютерная модель и производится численное моделирование с оценкой полученных результатов.

В результате, получена модель гидроагрегата, учитывающая основные гидравлические процессы в гидротурбине. Подтверждена адекватность полученной модели на основании результатов численного моделирования.

Сделан вывод о возможном применении модели и предложены дальнейшие шаги для работы в данном направлении.

Ключевые слова: моделирование гидротурбин, динамическое моделирование технических систем в SimInTech, переходные процессы, гидроэнергетика, разработка блока «Гидротурбина» для SimInTech, гидроэлектростанции, компьютерное моделирование, инерция водяного потока.

## АВТОРЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа в форме магистерской диссертации на тему «Моделирование гидроагрегата в среде динамического моделирования SimInTech» содержит 39 страниц, 23 иллюстраций, 3 таблиц, 3 приложений и 19 использованных источников.

Ключевые слова: МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОТУРБИН, ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В SIMINTECH, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ГИДРОЭНЕРГЕТИКА, РАЗРАБОТКА БЛОКА ГИДРОТУРБИНА ДЛЯ SIMINTECH, ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИНЕРЦИЯ ВОДЯНОГО ПОТОКА.

Объект исследования: Математическая модель электромеханической системы, состоящей из гидроагрегата и электроэнергетической системы.

Цель работы:

- получение динамической модели гидроагрегата в среде SimInTech;
- возможность исследования переходных процессов на ГЭС.

Задачи:

- анализ существующих моделей;
- построение полной модели ГЭС;
- численное моделирование;
- анализ и сравнение полученных результатов.

Актуальность работы: Проектирование современной гидроэлектростанции или теоретические исследования в области гидроэнергетики немислимы без широкого применени математического моделирования на всех стадиях разработки. Наиболее перспективной отечественной средой моделирования является среда динамического моделирования технических систем SimInTech, разработчиком которой является ООО «ЗВ Сервис».

На сегодняшний день в среде SimInTech отсутствуют библиотеки для моделирования гидроэнергетических объектов. Этот программный пакет

разрабатывался в первую очередь для нужд атомной энергетической промышленности. Ориентация пакета на смежную с гидроэнергетикой отрасль позволяет довольно быстро адаптировать его для нужд гидроэнергетики, просто добавив в него библиотеки моделей технических систем, применяемых на ГЭС. Такой мощный инструмент, позволяющий унифицировать как научные исследования, так и работы в области практического проектирования, безусловно, будет востребован в отечественной энергетике.

Научная новизна и прикладная польза: сейчас SimInTech уже используется в энергетике и помогает решать задачи по проектированию атомных станций. Однако, отсутствие готовых решений позволяющих модульно смоделировать гидроэлектростанцию является большим пробелом, создающим трудности для применения данного инструмента в гидроэнергетике.

Выводы: В ходе работы разработана модель гидроагрегата, охватывающая несколько уровней технологического процесса, как основное оборудование, так и различные его системы управления и средства ЧМИ. Предложены рекомендации по дальнейшему развитию рассмотренной модели и отказу от принятых допущений.

## ABSTRACT

Graduation qualification work in the form of a master dissertation on the topic «Modeling of a hydraulic unit in a SimInTech dynamic modeling environment» contains 39 pages, 23 illustrations, 3 tables, 3 appendices and 19 sources.

Keywords: MODELING OF HYDRAULIC TURBINES, DYNAMIC MODELING OF TECHNICAL SYSTEMS IN SIMINTECH, TRANSIENTS, HYDROPOWER, DEVELOPMENT OF A HYDRAULIC TURBINE UNIT FOR SIMINTECH, HYDROELECTRIC POWER PLANTS, COMPUTER MODELING, INERTIA OF WATER FLOW.

The object of research: A mathematical model of an electromechanical system that consists of a hydraulic unit and an electric power system.

The purpose of the work:

- obtaining a dynamic model of a hydraulic unit in the SimInTech environment;
- the possibility of studying transients at hydroelectric power plants.

Tasks:

- analysis of existing models;
- construction of a complete hydroelectric power plant model;
- numerical simulation;
- analysis and comparison of the results obtained.

Relevance of the work: The design of a modern hydroelectric power plant or theoretical research in the field of hydropower is unthinkable without the widespread use of mathematical modeling at all stages of development. The most promising domestic modeling environment is the SimInTech dynamic modeling environment for technical systems, developed by 3B Service LLC.

To that date, SimInTech environment has no libraries for modeling hydropower facilities. This software package was developed primarily for the needs of the nuclear power industry. The orientation of the package to the branch adjacent to hydropower makes it possible to adapt it quite quickly to the needs of hydropower by simply adding libraries of models of technical systems used at hydroelectric power plants to it. Such

a powerful tool, which allows to unify both scientific research and work in the field of practical design, will certainly be in demand in the domestic energy sector.

Scientific novelty and application: nowadays SimInTech is already used in the energy sector and helps to solve the problems of designing nuclear power plants. However, the lack of ready-made solutions that allow modularly modeling a hydroelectric power plant is a big gap that creates difficulties for the use of this tool in hydropower.

Summary: In this paper, a model of a hydraulic unit was developed. Designed model covers several levels of the technological process, both the main equipment and its various control systems and HMI facilities. Also, the recommendations for further development of the considered model and rejection of the accepted assumptions were proposed.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 Основы динамического моделирования ГЭС .....	14
2 Построение расчетной модели.....	18
2.1 Разработка модели гидротурбины для SimInTech .....	18
2.2 Построение модели гидроагрегата .....	21
2.2.1 Блок Гидротурбина .....	21
2.2.2 Модель основного оборудования.....	22
2.2.3 Модель автоматики.....	23
2.2.4 Модель регулятора.....	24
2.2.5 Видеокадр .....	26
2.2.6 База данных сигналов .....	27
3 Численное моделирование. Изучение построенной модели. ....	29
3.1 Холостой ход турбины и холостой ход генератора. ....	29
3.2 Работа под нагрузкой. наброс нагрузки .....	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	34
ПРИЛОЖЕНИЕ А Схема автоматического управления.....	36
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Схема автоматического регулирования частоты.....	37
ПРИЛОЖЕНИЕ В Список сигналов базы данных .....	38

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование современной гидроэлектростанции или теоретические исследования в области гидроэнергетики немыслимы без широкого применения математического моделирования на всех стадиях разработки. В настоящее время широкое распространение получили следующие программные продукты зарубежных разработчиков SimuLink (MathWorks), AMESim (Siemens), SCADE (ANSYS), VisSim (Visual Solutions), LabVIEW (National Instruments) и другие. Среди отечественных программ наибольшего внимания заслуживает SimInTech. Основным преимуществом SimInTech перед конкурентами является приспособленность к Российским реалиям, что важно для русскоязычного пользователя. Внешний вид проектируемых систем легко подстроить под соответствие с ГОСТ, присутствует русский интерфейс, возможность получить доступ к исходному коду, что важно для безопасности при применении на промышленных предприятиях и, в частности, на энергетических предприятиях. Помимо этого, к преимуществам можно отнести готовность разработчика предоставить версию с полным функционалом для студентов и научных работников.

Существуют и другие программы отечественного производства, например УМ (Универсальный механизм), однако этот пакет имеет высокую стоимость и направлен в первую очередь на моделирование механизмов и машин, что затрудняет его применение в гидроэнергетике. Разрабатываются и бесплатные программы, имеющие схожий функционал с MatLab, например SMath Studio, однако ее возможности ограничиваются расчетом формул и построением графиков.

Таким образом, наиболее перспективной отечественной средой моделирования является среда динамического моделирования технических систем SimInTech, разработчиком которой является ООО «ЗВ Сервис».

На сегодняшний день в среде SimInTech отсутствуют библиотеки для моделирования гидроэнергетических объектов. Этот программный пакет



разрабатывался в первую очередь для нужд атомной энергетической промышленности. Ориентация пакета на смежную с гидроэнергетикой отрасль позволяет довольно быстро адаптировать его для нужд гидроэнергетики, просто добавив в него библиотеки моделей технических систем, применяемых на ГЭС. Такой мощный инструмент, позволяющий унифицировать как научные исследования, так и работы в области практического проектирования, безусловно, будет востребован в отечественной энергетике.

Целью работы является разработка библиотеки моделей технических систем гидроэнергетики для среды SimInTech.

В данной работе предполагается, на основании анализа работ других авторов [3, 6-8,10], выполненных на базе других сред моделирования, составить модель гидротурбины и системы регулирования в среде SimInTech.

На данный момент средства программного моделирования широко используются для изучения и анализа переходных процессов энергетике. Гидроэнергетика, конечно, не является исключением. За последние годы распространение получили следующие ПБК: MATLAB Simulink, RastrWin, Eurostag [11]. RastrWin и Eurostag наиболее применимы для анализа электроэнергетических систем и не могут полноценно использоваться для изучения процессов отличных от тех, что протекают в энергосистеме. Комплекс Simulink, наоборот позволяет решать большой спектр задач от водоэнергетических расчетов, до проектирования устройств автоматического управления агрегатом.

По этой причине SimuLink широко используется как для проведения научных исследований, так и для решения прикладных задач (например, в НИИПТ и ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева). Однако, такое широкое распространение и отсутствие аналогов, вместе с географической принадлежностью разработчика (Главный офис MathWorks расположен в штате Массачусетс) ставит под угрозу независимость этих работ.

По этим причинам, стоит рассмотреть вариант применения отечественного аналога Simulink - SimInTech. Необходимо понять, какие инструменты

предоставляет данный ПВК для расчетов в гидроэнергетике и насколько сложно адаптировать решения применяемые в Simulink для отечественной среды динамического моделирования.

На текущий момент, нет научных работ, рассматривающих применение SimInTech для гидроэнергетики.

Учитывая одно из основных направлений развития РусГидро - развитие технологий повышения надежности и экономичности эксплуатации оборудования [12], работы по моделированию агрегата и его системы автоматического управления представляет интерес, так как могут быть использованы при проведении реконструкции действующих регуляторов турбин.

Несмотря на то, что ПК SimInTech разработан в 1994 году, только в последние несколько лет к нему появился интерес со стороны научного сообщества. Например, в работе [13] было рассмотрено применение программы для моделирования пневмогидравлической системы, а также сравнение результатов с результатами расчета той же задачи в ПК Simulink. Московский завод «ФИЗПРИБОР» использует SimInTech для реализации алгоритмов управления и видеоклипов АРМ при разработке систем автоматического управления для энергоблоков АЭС [14].

Для того чтобы показать, что SimInTech применим и для проведения расчетов в гидроэнергетике, проведем водо-энергетический расчет ГЭС годичного регулирования с заданным годовым графиком нагрузки. В качестве примера воспользуемся работой [15], в которой была разработана модель для расчета каскада, состоящего из нескольких ГЭС.

В качестве исходных данных примем:

Период расчета – 12 месяцев

Отметка НПУ – 102м

Характеристики связи для уровней верхнего и нижнего бьефа приведены в таблицах 1 и 2. В таблице 3 даны исходные данные для проведения расчета.

Таблица 1 – Кривая связи нижнего бьефа

$Z_{НБ}, м$	81	83	85	87	89	91
$Q_{НБ}, м^3/с$	100	460	1200	2250	3800	5100

Таблица 2 – Кривая связи верхнего бьефа

$Z_{ВБ}, м$	87	89	91	93	95	97	99	101	103
$V_{км^3}$	0,1	0,4	0,9	2,3	4,6	8,8	14,6	21	29,3

Таблица 3 – Исходные данные

<b>Месяц</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>N, МВт</b>	130	130	135	220	200	140	50	50	50	140	140	140
<b>Qприток</b>	540	450	740	2850	3500	1100	750	630	450	465	560	410
<b>Qлед</b>	-19	-13	-12	-15	+19	+36	-	-	-	-	-12	-13
<b>Qфильтр</b>	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
<b>Qиспарение</b>	-	-	-	-	5	5	5	5	-	-	-	-

Используя компоненты математической модели ГЭС из работы [15], построим модель для расчета, представленную на рисунке 1.

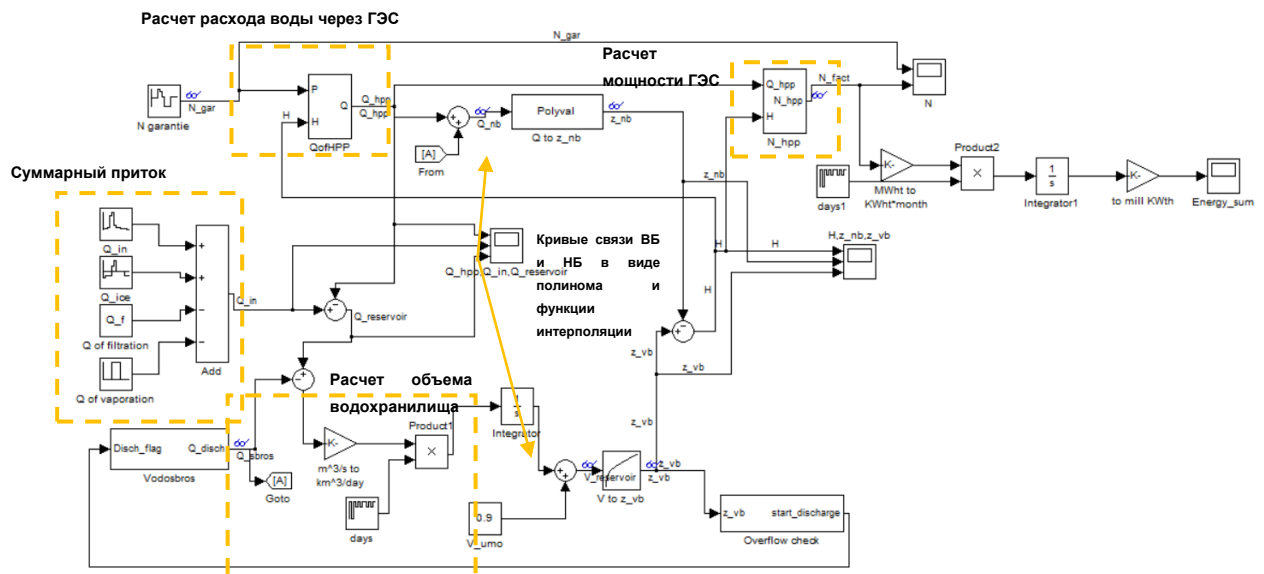


Рисунок 1 – Схема ГЭС, работающей по гарантированной мощности в ПК Simulink

Для сравнения, перенесем полученную схему в SimInTech, воссоздав ее, с помощью функционала, который предлагает программа. Результат построения в SimInTech показан на рисунке 2.

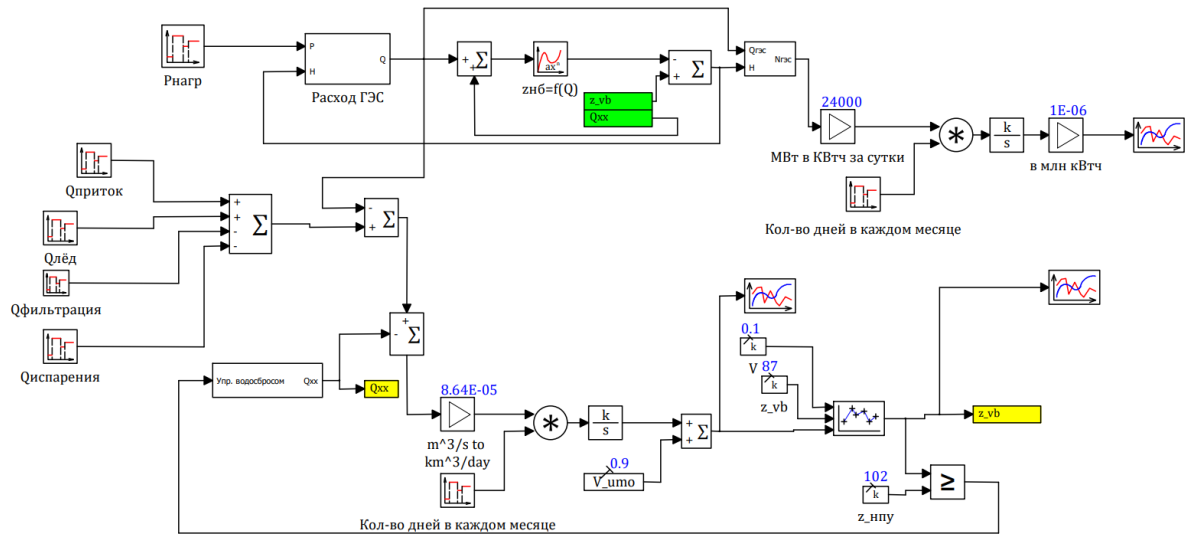


Рисунок 2 – Схема ГЭС, работающей по гарантированной мощности в ПК SimInTech

После построения схемы в обоих программных комплексах, перейдем к численному моделированию и сравнению результатов. Для представленных схем представлены графики объема водохранилища ГЭС и графики выработанной электроэнергии за год. Данные графики представлены на рисунках 3 и 4, соответственно.

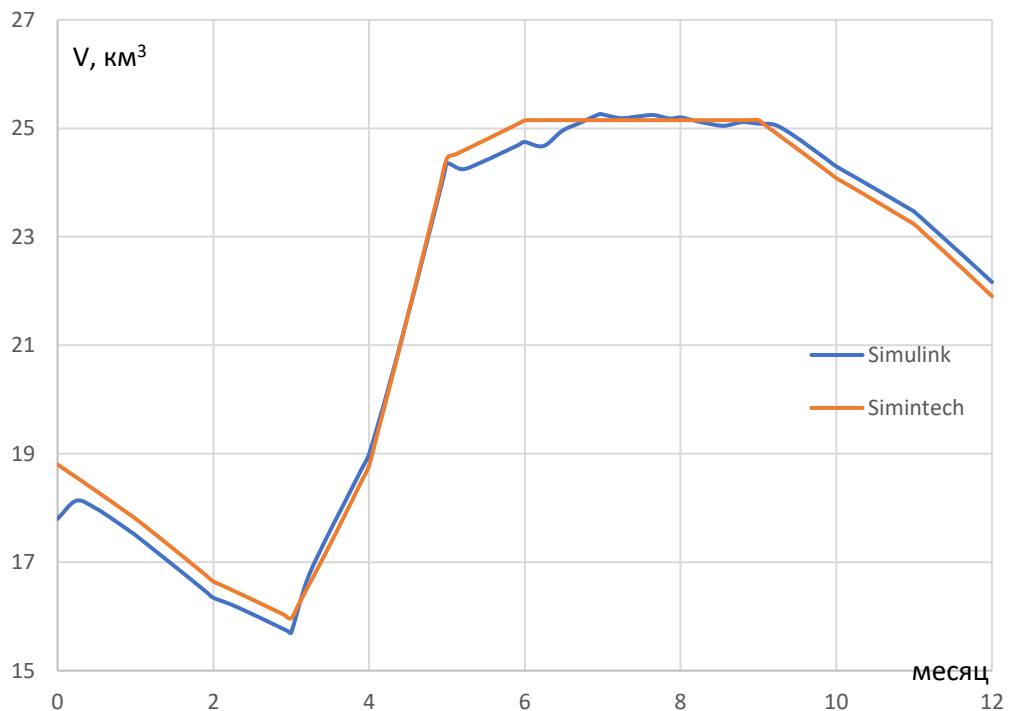


Рисунок 3 – График сработки/наполнения водохранилища

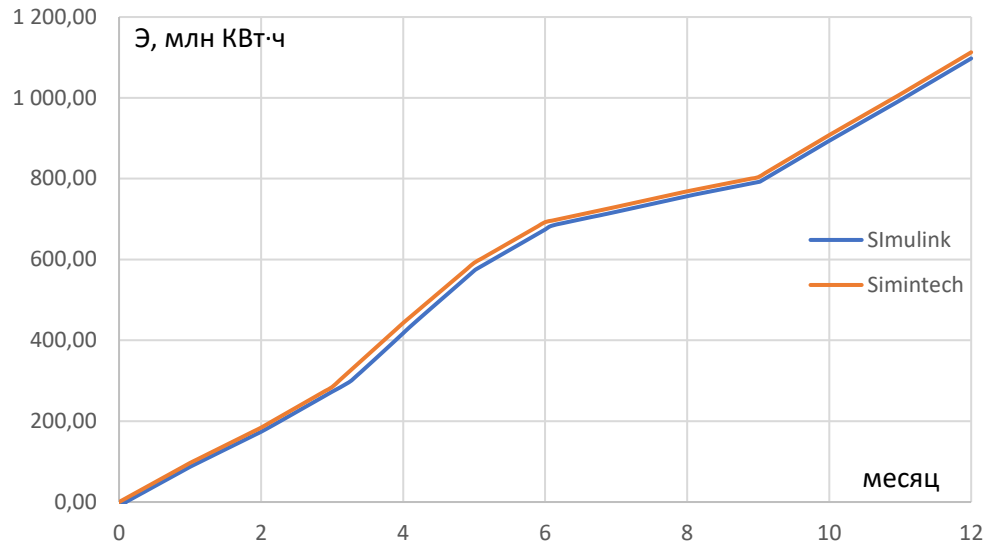


Рисунок 4 – График выработанной электроэнергии

При сопоставлении результатов моделирования видна небольшая разница в полученных результатах, изображенных на рисунке 3. Так в ПК Simulink при расчете расхода ГЭС пропущен момент времени 0, что начальный момент времени водохранилище наполняется. Также объем водохранилища разнится в месяцы половодья (5-8), что вызвано, тем, что программы по-разному рассчитывают холостые сбросы в нижний бьеф.

При всем этом на рисунке 4 видно, что итоговый результат расчета практически полностью совпадает, что говорит о том, что несмотря на различия в исполнении, SimInTech позволяет так же, как и Simulink производить расчеты для гидроэнергетики. Из всего выше сказанного, следует, что на данный момент мы имеем отечественный программный продукт, который позволяет производить расчеты и получать результаты не хуже, чем аналогичные в зарубежном ПО. При этом главной проблемой остается малое количество работ в данной тематике, касательно гидроэлектростанций.

## 1 Основы динамического моделирования ГЭС

При исследовании переходных процессов, возникающих в гидроагрегате или энергосистеме во время аварий или при резких изменениях режима работы важно точное моделирование всех компонентов системы. Например, в работе [8] была составлена модель гидроагрегата, работающего на изолированную нагрузку. Структурная схема этой модели изображена на рисунке 1.1. Здесь напряжения статора по продольной и поперечной осям обозначены  $V_d$  и  $V_q$ , соответственно.

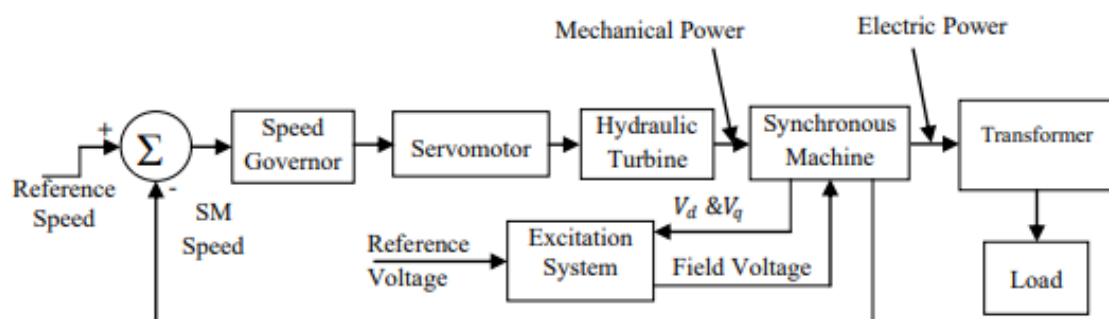


Рисунок 1.1 – Структурная схема ГА, работающего на изолированную нагрузку

Большинство компонентов, необходимых для построения такой модели уже имеются в библиотеках SimInTech. Однако компоненты, описывающие гидравлическую систему, здесь отсутствуют.

В большинстве работ [2,3,6] связь между открытием направляющего аппарата и выходной мощностью турбины устанавливается из рассмотрения упругого гидроудара в напорном водоводе. Например, для идеальной турбины Френсиса, авторы [4,16,17] приводят следующую передаточную функцию:

$$W_T(p) = (1 - a_{уст} T_B p) / (1 + 0,5 a_{уст} T_B p) \quad (1.1)$$

где  $a_{уст}$  – открытие направляющего аппарата, о.е.;

$T_B$  – постоянная времени вязкого гидроудара, с, определяется как:

$$T_B = L/(A \cdot g) \quad (1.2)$$

где  $L$  – длина водовода, м;

$A$  – площадь водовода, м<sup>2</sup>;

$g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}$  - ускорение свободного падения.

В работе [2] рассматривается необходимость детального моделирования гидроагрегата и сравнивается работа моделей агрегата учитывающего и не учитывающего модель гидротурбины и ее регулятора. На основании исследования делается вывод, о необходимости детального моделирования системы, что позволяет помимо электромеханических колебаний учитывать собственные колебания гидроагрегата.

В работе [8] была использована модель, описывающая напорный водовод и гидравлическую турбину. Модель показана на рисунке 1.2. Такая нелинейная модель хорошо подходит для исследований переходных процессов при больших изменениях мощности и частоты в системе.

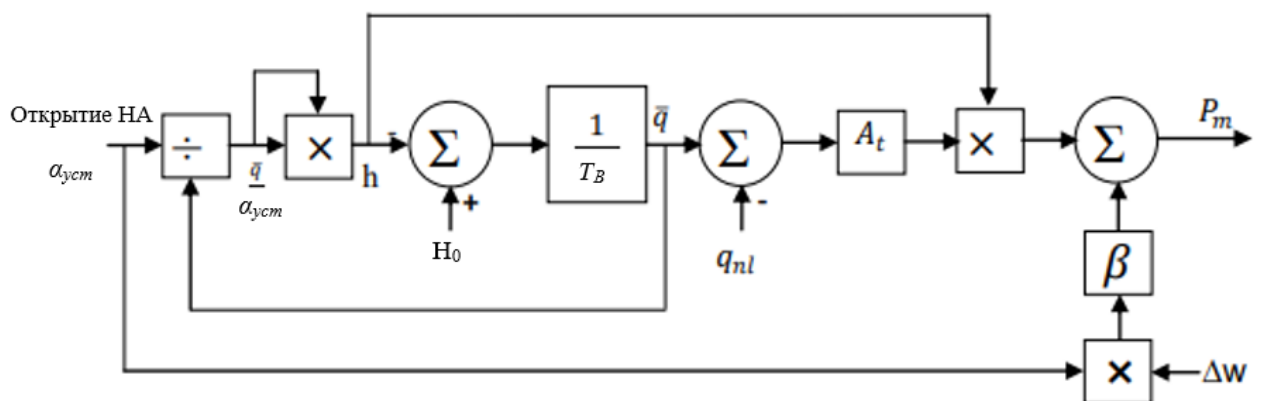


Рисунок 1.2 – Математическая модель турбины и водовода в виде структурной схемы

В модели, представленной на рисунке 1.2 все параметры приведены в относительных единицах. Здесь  $\alpha_{уст}$  – открытие направляющего аппарата,  $q$  – расход через турбину,  $q_{nl}$  расход холостого хода турбины,  $H_0$  – напор брутто (без

движения жидкости),  $h$  – рабочий напор турбины,  $T_B$ - постоянная времени гидравлического удара для напорного водовода,  $A_t$  – коэффициент, учитывающий пределы регулирования расхода турбины,  $\Delta\omega$  -изменение частоты вращения,  $\beta$  – коэффициент демпфирования изменения частоты вращения,  $P_m$ - выходная механическая мощность турбины.

Система управления турбиной обычно строится на принципах ПИД-регулирования. Выходной сигнал регулятора при этом [5,7]:

$$y = k_p \cdot u(p) + \frac{k_i}{p} u(p) + k_d \cdot p \cdot u(p) \quad (1.3)$$

где  $k_p$ – пропорциональный, интегральный и коэффициент ПИД-регулятора;

$k_i$ - интегральный коэффициент;

$k_d$  - дифференциальный коэффициент;

$y$  – выходной сигнал регулятора;

$u$  – управляющее воздействие.

Изодромный регулятор, использованный авторами [2] представлен следующей передаточной функцией и его вывод приведен в [4]:

$$W_p(p) = (ni \cdot T_i \cdot p)/(T_i p + 1) \quad (1.4)$$

где  $ni$ -коэффициент усиления изодрома;

$T_i$ - постоянная времени изодрома, с.

Сервопривод, на который оказывает воздействие регулятор, описывается функцией апериодического звена первого порядка:

$$W_p(p) = 1/(T_C p + 1) \quad (1.5)$$

где  $T_C$ - постоянная времени сервомотора.



Для турбин Каплана, имеющих 2 органа регулирования режима работы турбины, модель также должна быть дополнена, подобная работа была проведена в [6]. В данной статье изменение положение лопастей рабочего колеса введено как увеличение расхода через турбину. Модель, полученная в работе, позволит создать модель турбины Каплана и исследовать не только регулирование направляющего аппарата, но и механизма поворота лопастей.

В статье [7] предложено улучшение модели за счет добавление в нее реакции на пульсации давления в отсасывающей трубе гидротурбины, которые неизбежно возникают в процессе ее эксплуатации. С помощью результатов симуляции доказана значимость влияния данных пульсаций на работу агрегата, в частности на его основные параметры, такие как выходная мощность, рабочий напор и расход. Использование результатов этих исследований позволит исследовать не только работу в модели при номинальных параметрах, но также и при нерасчетных режимах работы, при которых проявляется кавитации и пульсации давления в отсасывающей трубе.

В работе [3], по сравнению с [8] усложнена модель направляющего аппарата, а также учтена электрическая нагрузка на гидроагрегат, с помощью уравнений генератора. За счет детализации модели получилось исследовать динамическое поведение агрегата под влиянием изменяющийся нагрузки и отклонений частоты. Использование модели генератора и его связи с турбиной, приведенной в данном исследовании, позволит более точно исследовать работу агрегата.

В стандарте IEEE [9] предлагаются рекомендованные математические модели систем возбуждения трехфазных синхронных генераторов, для проведения компьютерных симуляций. В SimInTech уже есть реализации некоторых систем в соответствии с данным стандартом, но так как их немного, то возможно придется прибегнуть к построению необходимой модели на основании данных из стандарта.

## 2 Построение расчетной модели

### 2.1 Разработка модели гидротурбины для SimInTech

На рисунке 2.1 представлена модель, построенная в среде SimInTech, по структурной схеме, приведенной на рисунке 1.2.  $\Delta w=0.05$ ,  $q_{nl}=0.05$ ,  $H_0=1$ ,  $T_B=0.1$ ,  $\beta=1$ .

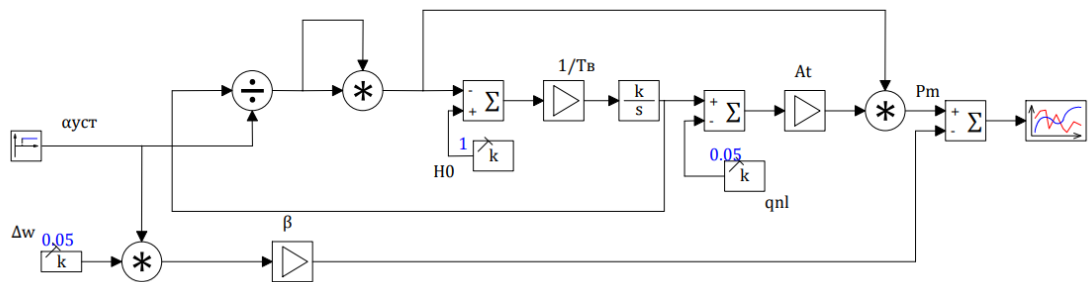


Рисунок 2.1 – Схема гидротурбины из SimuLink построенная в SimInTech

Переходная характеристика турбины при резком ступенчатом изменении открытия НА ( $\alpha_{уст}$ ) с 0.5 до 0.9 приведена на рисунке 2.2. На графике виден провал в момент открытия НА ( $t=10$ с), что объясняется резким изменением скорости потока воды в напорном водоводе, вызывающем гидравлический удар. Таким образом в начальный момент большая часть энергии потока идет на повышение давления и мощность турбины падает.

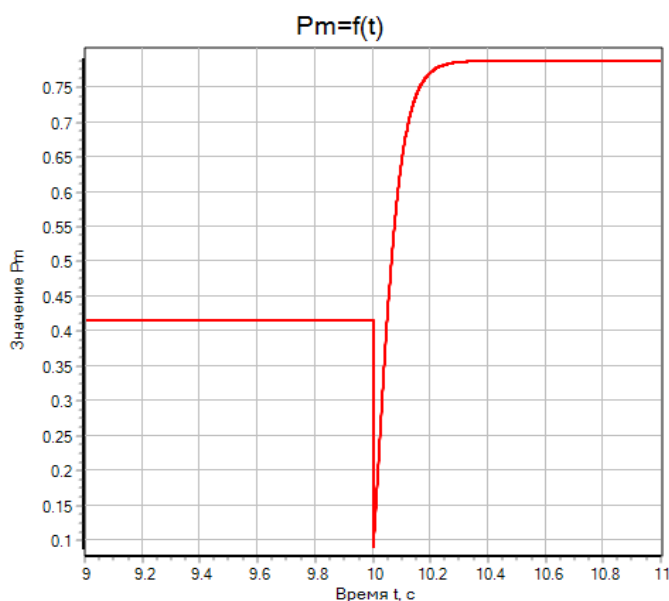


Рисунок 2.2 – Изменение мощности при открытии НА с 0.5 до 0.9 о.е

На практике такого резкого провала не происходит, за счет инерционности системы регулирования. Перемещение лопаток направляющего аппарата занимает несколько секунд, а не происходит мгновенно. Добавим на вход турбины сервопривод (1.5), с постоянной времени  $T_c=1$ с. Схема ГТ с апериодическим инерционным звеном, учитывающим сервопривод показана на рисунке 2.3. Результат изображен на рисунке 2.4. Провал мощности вызванный изменением уставки (в момент  $t=10$ с), значительно меньше в сравнении с предыдущим результатом. При этом возросло время переходного процесса.

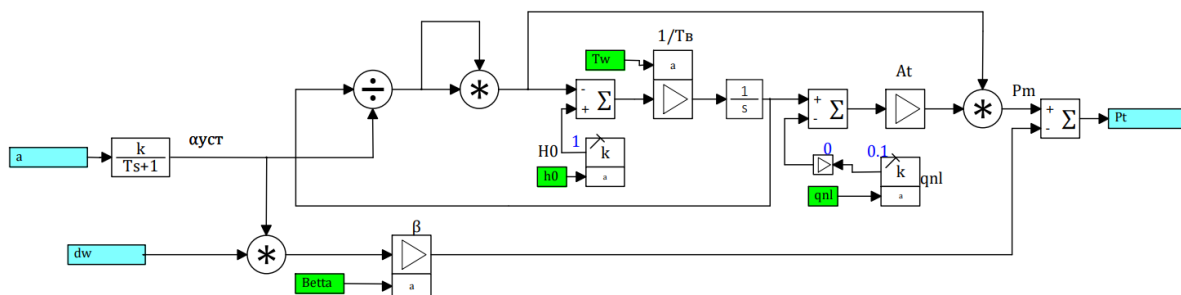


Рисунок 2.3 – Схема гидротурбины с сервоприводом

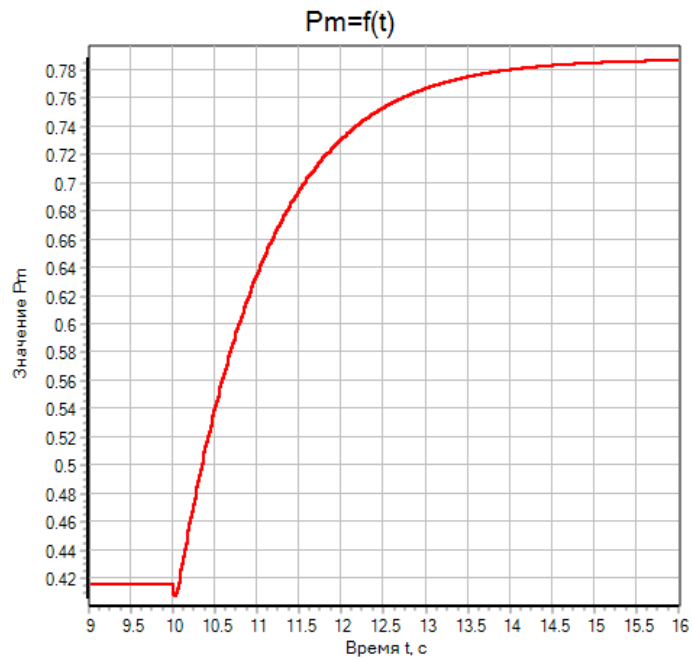


Рисунок 2.4 -Переходный процесс при плавном открытии НА.

На основании результатов проведенного моделирования можно сделать вывод о работоспособности модели.

Опираясь на зависимости, приведенные в [6], построенную модель можно использовать для моделирования как радиально-осевых, так и поворотно-лопастных турбин.

Регулятор частоты и мощности гидротурбины может быть смоделирован с помощью стандартного ПИД-регулятора, однако в дальнейшем необходимо составить подробные модели регуляторов.

В качестве модели гидрогенератора можно применять модель синхронного генератора из библиотеки SimInTech, при необходимости, уравнение, описывающее гидрогенератор, можно составлять, опираясь на исследования [7 и 3].

## 2.2 Построение модели гидроагрегата

### 2.2.1 Блок Гидротурбина

Для ранее разработанной и проверенной схемы гидравлической турбины в SimInTech [18], необходимо создать блок, который позволит легко подключать алгоритм расчета мощности турбины к блоку синхронного генератора из стандартных библиотек SimInTech. Для этого используется блок «Субмодель». Для связи модели турбины с моделью генератора используется блок «двунаправленная шина» (по которой передаются значения мощности на валу, задания частоты вращения и фактической частоты вращения). Внутренняя структура блока «Гидротурбина» показана на рисунке 2.5.

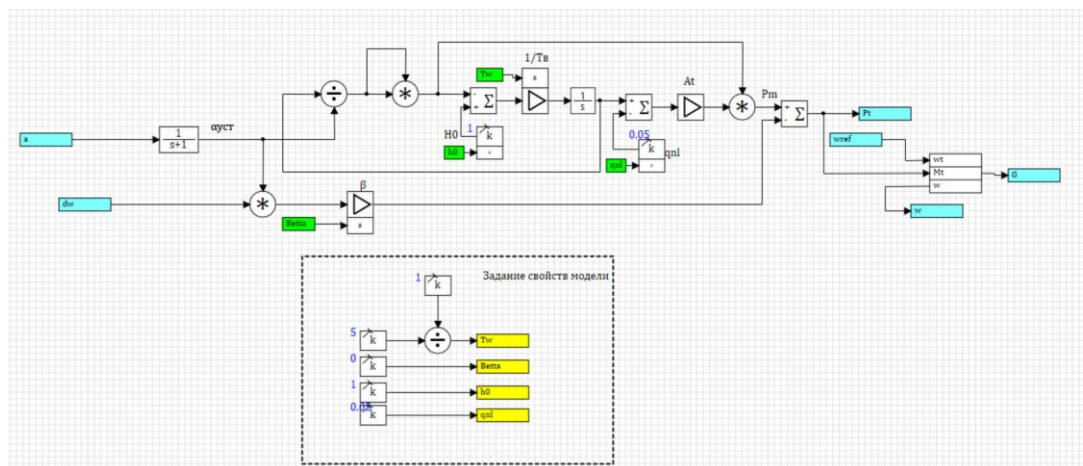


Рисунок 2.5 – Схема блока «Гидротурбина» для SimInTech

Внешний вид полученного блока и его параметры изображены на рисунках 2.6 и 2.7.

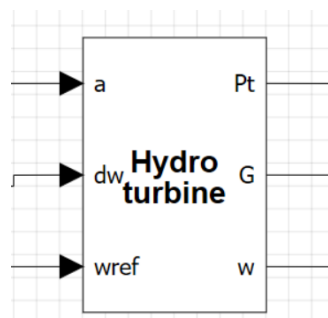


Рисунок 2.6 – Внешний вид блока «гидротурбина»

Название	Имя	Формула	Значение
Постоянная времени для геометрии водовода	Tw	5	5
Коэффициент демпфирования	Betta	0	0
Напор	h0	1	1
Расход холостого хода	qnl	0.05	0.05

Рисунок 2.7 – свойства блока «гидротурбина»

На рисунке 2.6  $a, dw, w_{ref}$  – входы блока: задание угла открытия, отклонение частоты и задание частоты, соответственно.  $w$  – фактическая частота вращения, используется для регуляторов с обратной связью.  $G$  – порт связи с синхронным генератором.  $P_t$  – выходной порт, значение мощности на валу.

### 2.2.2 Модель основного оборудования

Используя, описанный выше элемент, строится электрическая схема, приведенная на рисунке 2.8. Схема моделирует энергетический блок «гидроагрегат – трансформатор», работающий на изолированную нагрузку и состоит из следующих элементов:

1. Гидротурбина, производящая расчет мощности на валу ротора гидроагрегата, в зависимости от открытия направляющего аппарата.
2. Синхронный генератор для расчета электрических параметров агрегата
3. Простая модель системы возбуждения (апериодическое инерционное звено, обеспечивающее требуемый ток ротора для поддержания номинального напряжения).
4. Генераторный выключатель для коммутации рабочих и токов КЗ.
5. Силовой трансформатор для трансформации напряжения до уровня высшего напряжения.
6. Нагрузка, активное или активное-реактивное сопротивление.
7. Трансформаторы напряжения – для измерения напряжения на различных участках электрической цепи для передачи в цепи измерения, сигнализации и автоматики.

Основные параметры схемы: Полная мощность гидроагрегата  
 Номинальное напряжение генератора  
 Номинальная частота вращения 100 об/мин  
 Полная мощность трансформатора  
 Напряжения ВН и НН трансформатора  
 Мощность нагрузки

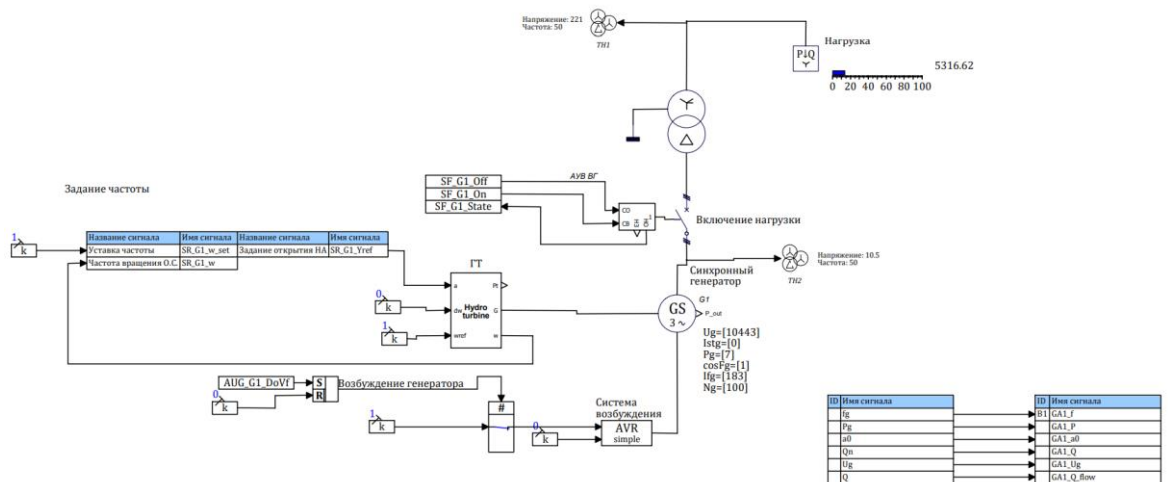


Рисунок 2.8 – Модель блока «гидроагрегат – трансформатор», работающий на изолированную нагрузку

### 2.2.3 Модель автоматики

Для задания режима работы гидроагрегата, формирования обратной связи (ОС) о текущем режиме используются схемы автоматического управления, которые на основе массива входных сигналов, формируют выходные сигналы по заданному алгоритму.

Алгоритмы формируются с помощью функциональных блоков (И, ИЛИ, НЕ, БОЛЬШЕ, МЕНЬШЕ, триггеры).

Предусмотрены следующие режимы:

1. ГА остановлен
2. ГА на холостом ходу турбины (ХХТ)
3. ГА на холостом ходу генератор (ХХГ)
4. ГА в работе.

Условием перехода в другой режим является наличие соответствующей команды. Описанная схема изображена на рисунке 2.9.

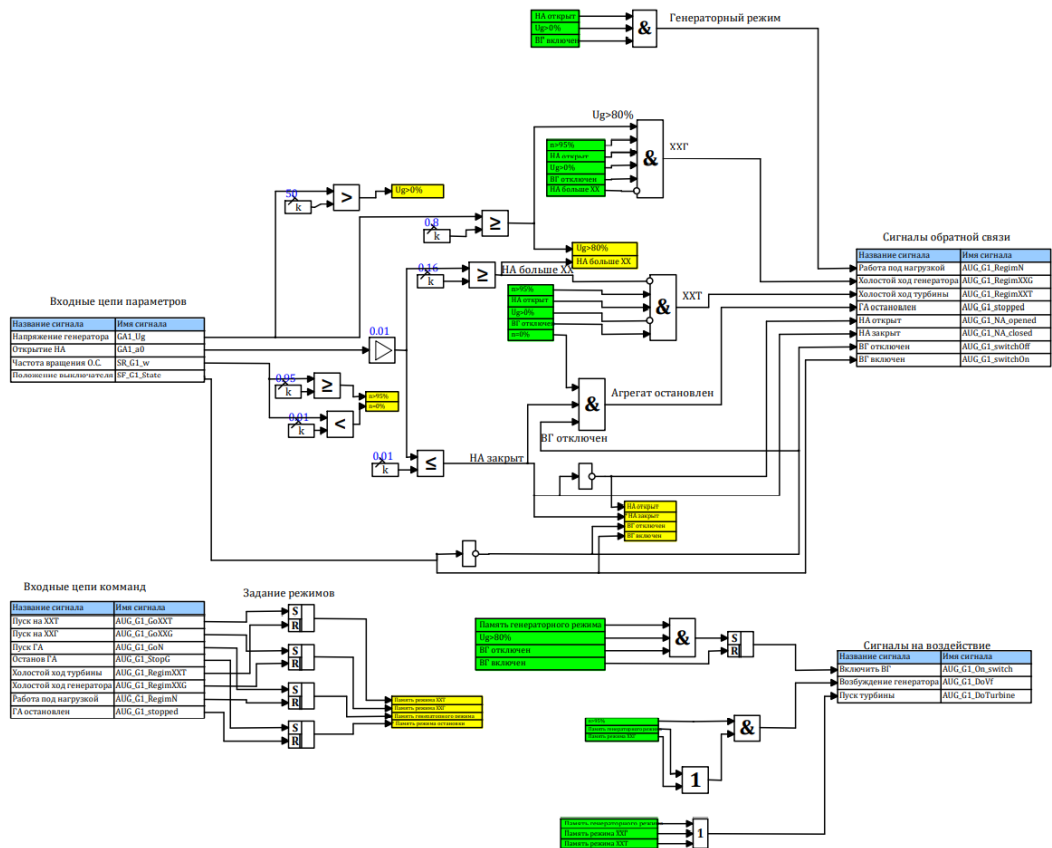


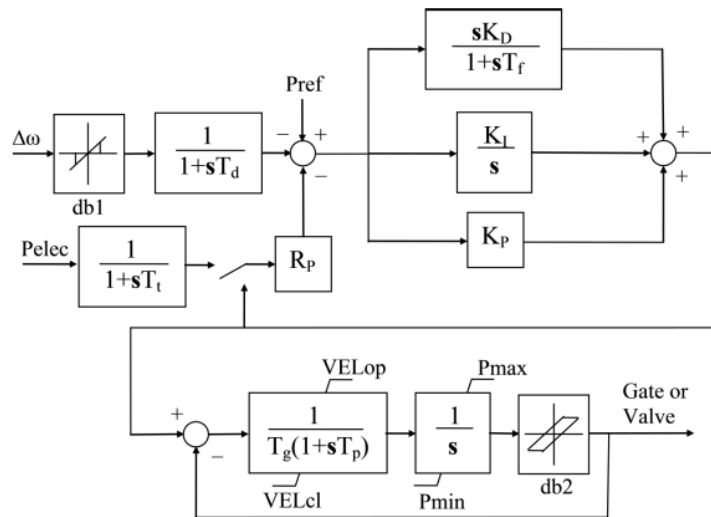
Рисунок 2.9 – Схема автоматического управления турбины режимом

Схема управления, изображенная на рисунке 2.9, также приведена в приложении А в более читаемом масштабе.

## 2.2.4 Модель регулятора

Для регулирования мощности гидротурбины и поддержания заданной частоты вращения необходимо использовать регулятор. Поэтому используем ПИД-регулятор с обратной связью по частоте вращения, схема такого регулятора описана в работе [19] и показана на рисунке 2.10.





$\Delta\omega$ - отклонение частоты; db1,db2 – зона нечувствительности; Pref – заданная мощность; Pelec – фактическая мощность; Td – демпфирующий коэффициент; Tt – постоянная фильтра ОС; Kp – коэффициент пропорциональный; KI – коэффициент интегральный; KD – коэффициент дифференцирования; Tf-постоянная времени ограничения дифференцирования; Rp – коэффициент обратной связи; VELop – максимальная скорость открытия; VELcl – максимальная скорость закрытия; Pmax, Pmin – ограничение открытия направляющего аппарата; Tg, Tp – постоянные времени сервомотора

Рисунок 2.10 – Рекомендуемая модель регулятора частоты и мощности

Подобный ПИД-регулятор для поддержания частоты гидротурбины, реализован в SimInTech, показано на рисунке 2.11. Помимо регулирования частоты, реализованы механизмы ограничения максимального и минимального открытия направляющего аппарата. Уставки минимального и максимального открытия зависят от режима работы агрегата. Так, например, при наборе частоты вращения с 0 до 100%, ограничение открытия составляет 40%, что не позволяет регулятору форсировать открытие направляющего аппарата, в следствии большого отклонения частоты от уставки. Такое действие регулятора привело бы к значительному перерегулированию и повышению времени выхода на установившееся значение.

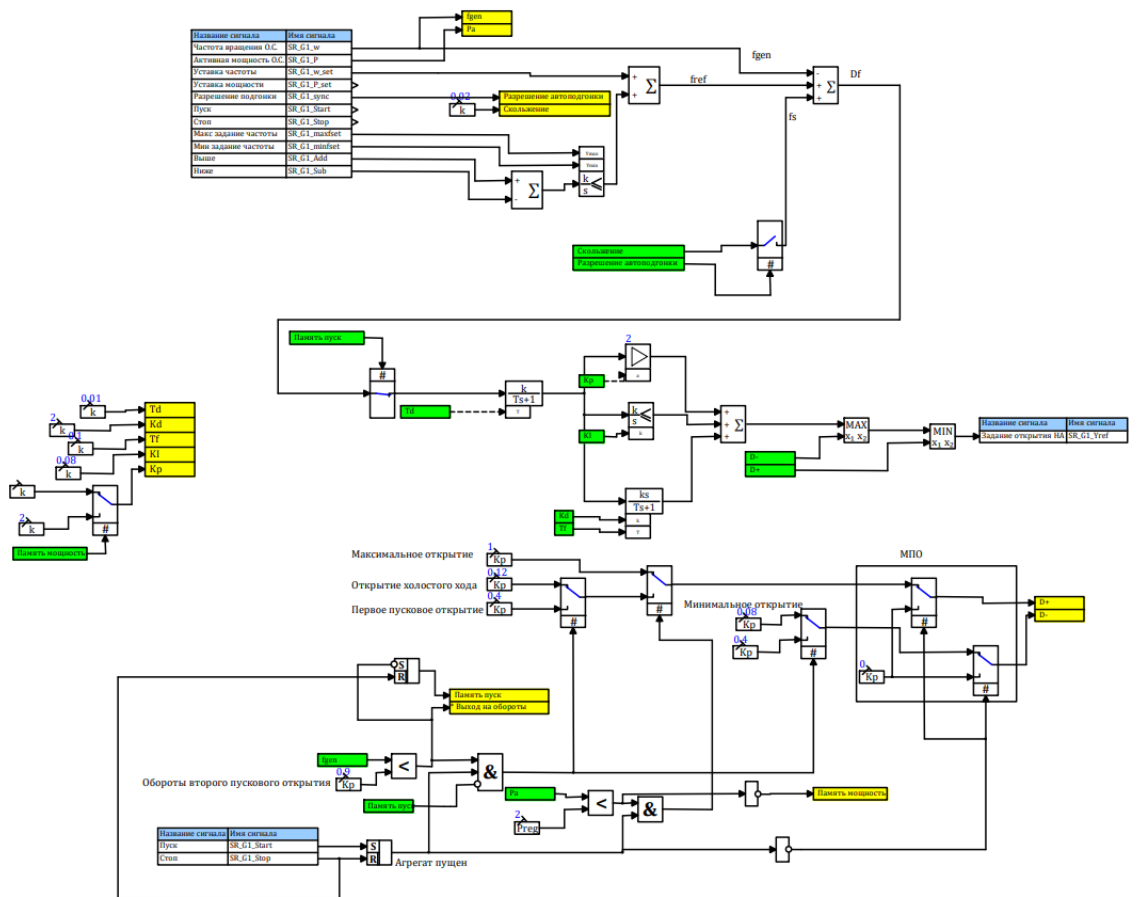


Рисунок 2.11 – Модель регулятора частоты

Схема регулятора частоты изображенная на рисунке 2.11, также приведена в приложении А в более читаемом масштабе.

### 2.2.5 Видеоквадр

Для управления симуляцией в реальном времени используется видеоквадр, построенный стандартными средствами SimInTech. Видеоквадр имитирует экранную форму АРМ оперативного персонала и обладает следующим функционалом:

1. Графическое анимированное отображение управляемым оборудованием в виде мнемосхемы.
2. Окно сигнализации для получения информации о текущем состоянии основного оборудования

3. Панель измерения с аналоговыми и цифровыми приборами для контроля основных параметров оборудования
4. Элементы управления агрегатом (задание режима)
5. Экран трендов (для построения временных графиков исследуемых параметров).

Описанный видеокادر изображен на рисунке 2.12.

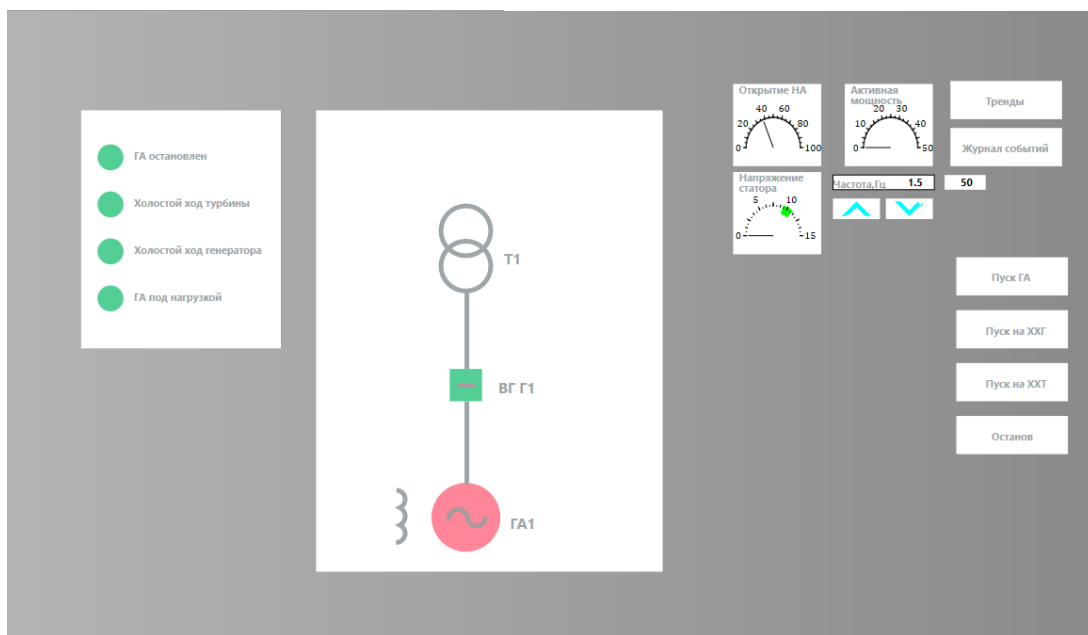


Рисунок 2.12 – Экранная форма управления агрегатом

### 2.2.6 База данных сигналов

Для проведения расчетов модель разделена на несколько отдельных проектов, которые связаны через единую систему сигналов (базу данных сигналов). Модель состоит из следующих проектов, показанных на рисунке 2.13. Главная схема (расчет переходных процессов), алгоритмы автоматики (режимы работы агрегата), регулятор (управление турбиной) и видеокادر для управления моделью.

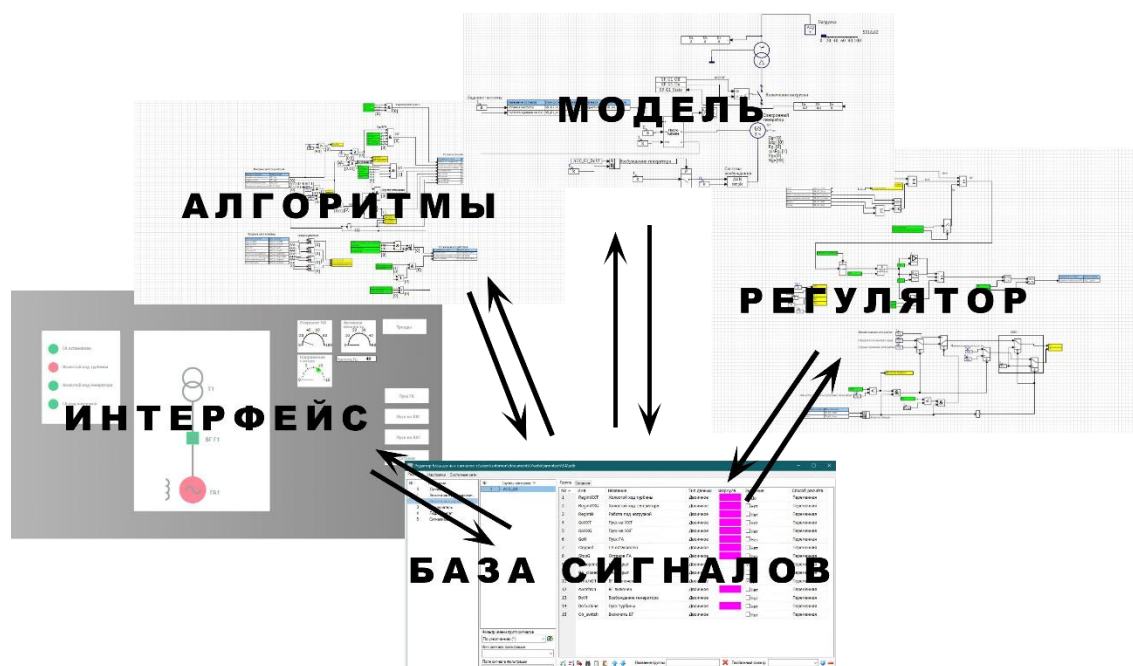


Рисунок 2.13 – Состав модели

Подобное разделение позволяет приблизить модель к реальному гидроагрегату, где данные функции так же выполняются отдельно (регулирование частоты и мощности, автоматика агрегата, SCADA система, БД).

Окно базы данных проекта показано на рисунке 2.14. В базе данных описаны следующие категории сигналов: Автоматика регулирования, Автоматика управления, Выключатель, Гидроагрегат. Категория в базе данных сигналов – является прототипом, который определяет какие сигналы содержатся в данной группе. Полный список использованных сигналов проекта приведен в приложении В.

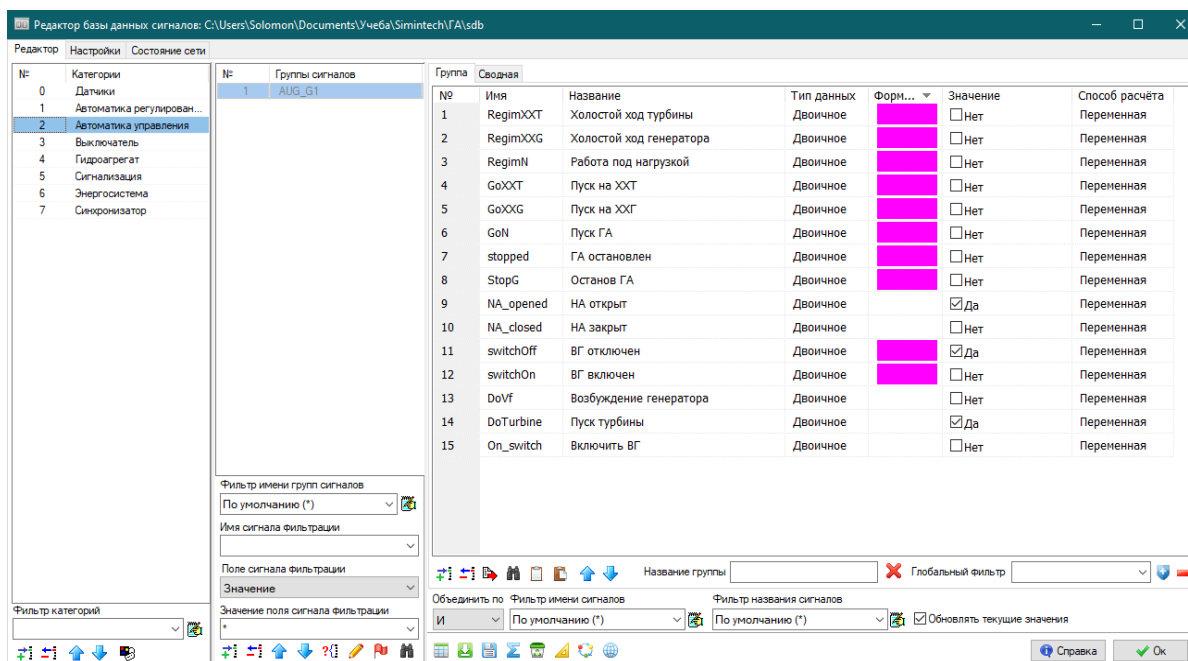


Рисунок 2.14 – База данных сигналов проекта

### 3 Численное моделирование. Изучение построенной модели.

#### 3.1 Холодный ход турбины и холостой ход генератора.

В первую очередь проверим работу агрегата на холостом ходу. При подаче команды «Холодный ход генератора» агрегат последовательно перейдет в режим ХХТ, а после в режим ХХГ, подав ток возбуждения в обмотку ротора. На рисунке 3 изображены параметры данного переходного процесса. В первый момент времени направляющий аппарат (НА) открывается на пусковое открытие (40%), затем при приближении к номинальным оборотам прикрывается до открытия холостого хода. В этот же момент включается возбуждение синхронной машины и напряжение статора поднимается до номинального (10,5кВ). Отклонение частоты менее 2%.

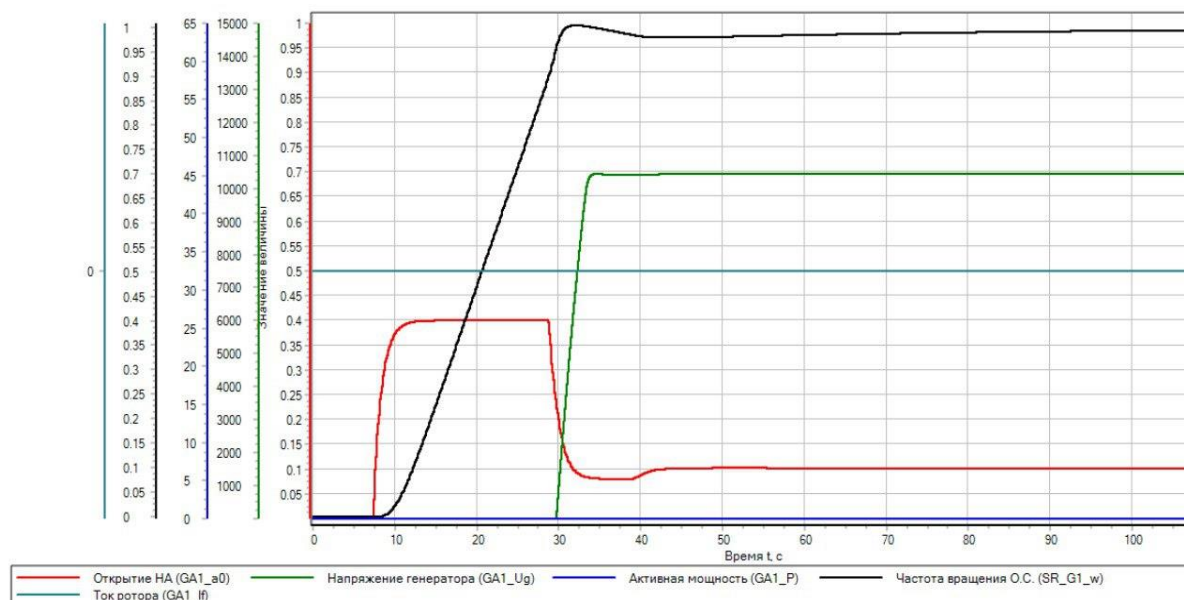


Рисунок 3.1 – Параметры переходного процесса при разгоне до холостого хода турбины

### 3.2 Работа под нагрузкой. Наброс нагрузки

Еще один режим для исследования – наброс нагрузки. На рисунке 3.2 изображен переходный процесс при разгоне гидроагрегата до номинальных оборотов на холостом ходу с последующим включением нагрузки в 12 МВт.

При подаче команды «Пуск ГА», гидроагрегат выход на режим холостого хода, аналогично предыдущему пункту, затем при номинальном напряжении на выводах статора, включается генераторный выключатель (момент 27с.). При этом возникает медленно затухающий колебательный процесс с размахом в 12,5Гц (25%).

В реальных системах регулирования часто изменяют коэффициенты регулятора для различных режимов. Поэтому, также введем изменение пропорционального изменения коэффициента регулятора с 4 до 2 при переходе в режим мощность. Результат показан на рисунке 3.3. При набросе нагрузки частота понизилась до 43 Гц и восстановилась до номинальной в течении 50 с, при этом колебания частоты отсутствуют.

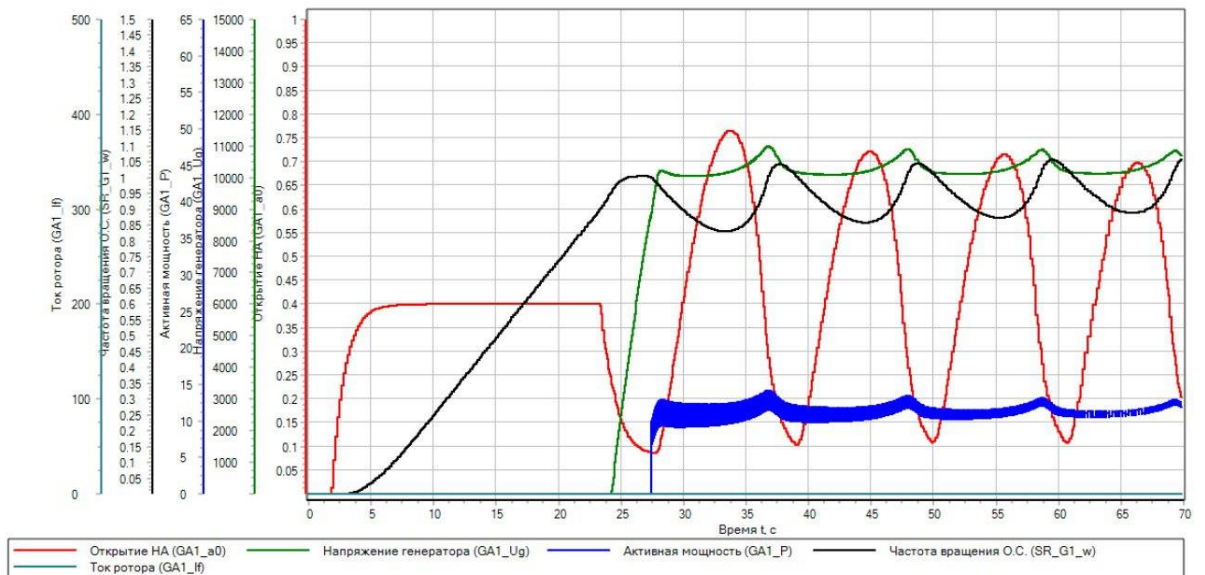


Рисунок 3.2 – Параметры переходного процесса при набросе нагрузки

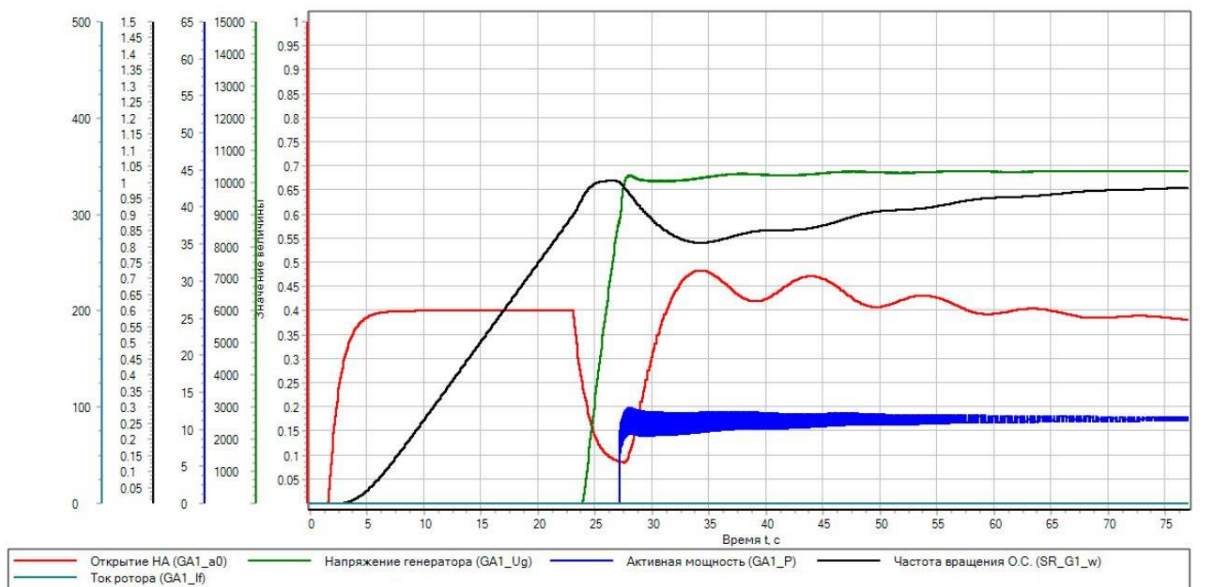


Рисунок 3.3 – Параметры переходного процесса при набросе нагрузки после настройки регулятора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая то, как распространены методы моделирования для изучения переходных процессов, наличие такого мощного инструмента среди отечественного ПО, как SimInTech, является неоспоримым преимуществом.

Результаты моделирования, могут использоваться не только для изучения, но и для настройки регуляторов и отладки автоматических систем, применяющихся на ГЭС. Более того, подобные симуляции в реальном времени могут быть использованы для построения тренажеров, на которых персонал станции сможет изучать все нюансы технологической автоматики гидроагрегата и его вспомогательного оборудования.

Вместе с тем, требуется дальнейшая работа по улучшению динамической модели ГЭС, построение моделей вспомогательных систем, добавление в модель гидротурбины механизмов, позволяющих учитывать более сложные гидродинамические процессы, помимо описанных в данной статье.



## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ГА	-	Гидроагрегат
ГТ	-	Гидротурбина
НА	-	Направляющий аппарат
ОС	-	Обратная связь
ПИД	-	Пропорционально-Интегральный-Дифференциальный
ХХГ	-	Холостой ход генератора
ХХТ	-	Холостой ход турбины
ЧМИ	-	Человеко-машинный интерфейс

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеенков, А.С. Разработка математической модели и исследование режимов работы пневмогидравлического источника энергии в составе ААКУ/ Алексеенков А.С., Беклемищев Ф.С., Беляев А.Н. [и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №3.-С.320-329.
2. Булатов, Ю.Н: Моделирование гидротурбин и автоматических регуляторов частоты и активной мощности в среде Matlab/ Ю.Н. Булатов, И.В. Игнатъев// СИСТЕМЫ. МЕТОДЫ. ТЕХНОЛОГИИ. – 2009.-С.67-70.
3. Кобылецки, С.К. Моделирование гидроагрегата в среде динамического моделирования SimInTech/С.К. Кобылецки, А.В. Букатов// Сборник материалов VIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов, студентов и школьников «ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В XXI ВЕКЕ». 2021 – С.335-341.
4. Овчаренко, Н. И. Автоматика энергосистем : учеб. для вузов / Н. И. Овчаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2007. – 476 с
5. О Программе инновационного развития Группы РусГидро [сайт]//URL: [http://www.rushydro.ru/sustainable\\_development/program\\_innovation/about/](http://www.rushydro.ru/sustainable_development/program_innovation/about/) (дата обращения 08.12.21).
6. Прохоренко, Д.С.. Моделирование работы каскада ГЭС в MATLAB Simulink: магистерская диссертация : 13.04.02 / Д. С. Прохоренко. — Саяногорск, Черемушки : СФУ; Саяно-Шушенский филиал СФУ, 2020.
7. Перечень отчетов по научно-исследовательским работам/г.Санкт-Петербург.:ОАО «НИИПТ». - 2010.-35с.
8. Сафонов, С.И. Опыт и современные и современные подходы предприятия к построению систем, важных для безопасности АЭС/ Сафонов С.И // Форум поставщиков атомной отрасли «АТОМЕКС 2014», 2014 -34с.
9. Справочная система SimInTech [сайт]// URL: <https://help.simintech.ru/> (дата обращения 15.12.20)

10. Стернинсон, Л. Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах: учебник / Л. Д. Стернинсон. – М.: Энергия, 1975.-С.216
11. Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies./ Power System Dynamic Performance Committee // TECHNICAL REPORT PES-TR1 2013 -С.53-65.
12. IEEE 421.5-2016 - IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2016 – 207c
13. Jaeger, E. De. Hydroturbine model for system dynamic studies / Jaeger E. De, Janssens N., Malfliet B., Van De Meulebroeke F.// IEEE Trans. Power Syst.-1994.-vol. 9, no.4, P.1705-1709
14. Jie Z. Dynamic Model of Kaplan Turbine Regulating System Suitable for Power System Analysis Mathematical Problems in Engineering//Volume 2015.-P1-12
15. Nanaware R. A, Sawant S. R., Jadhav B. T. Modeling of Hydraulic Turbine and Governor for Dynamic Studies of HPP/ Nanaware R. A, Sawant S. R., Jadhav B. T// ICRTITCS, 2012.-P.6-11.
16. Pengcheng G. Dynamic characteristics of a hydro-turbine governing system considering draft tube pressure pulsation/ Pengcheng Guo, Hao Zhang , Dongming Gou// IET Renewable Power Generation.- Volume 14.- 2020.-P. 1210 – 1218
17. SimPowerSystems For Use with Simulink. User's guide// The MathWorks, Inc, Version 2.-2000 – P.522
18. Working Group Prime Mover and Energy Supply, "Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, no. 1.-1992.- P. 167-179
19. Yin C.C. Modelling of hydraulic governor-turbine for control stabilization/ Yin Chin Choo, Kashem M. Muttaqi, M. Negnevitsky// ANZIAM Journal V.49.-2008.-P681-696

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Схема автоматического управления

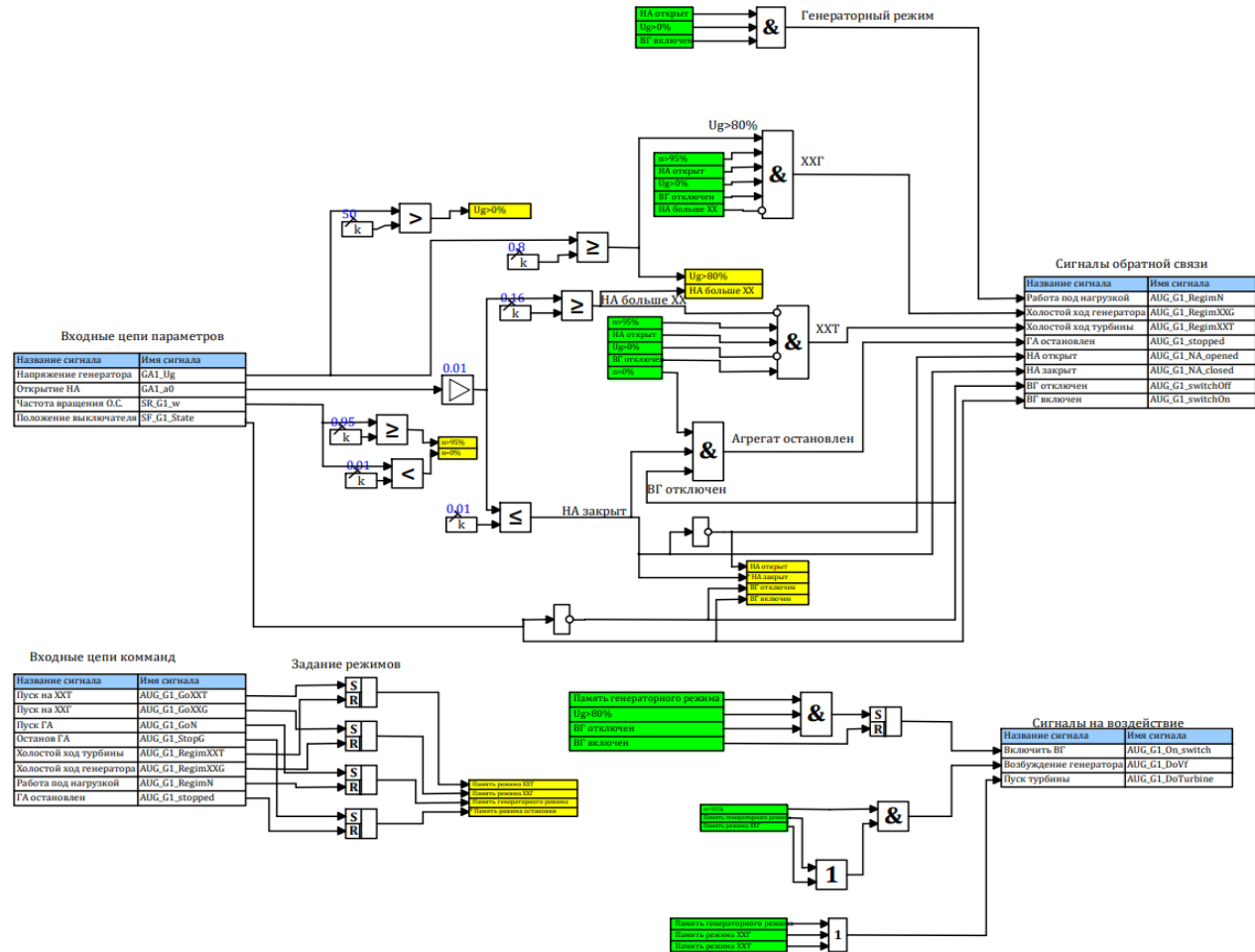


Рисунок А.1 – Схема автоматического управления

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Схема автоматического регулирования частоты

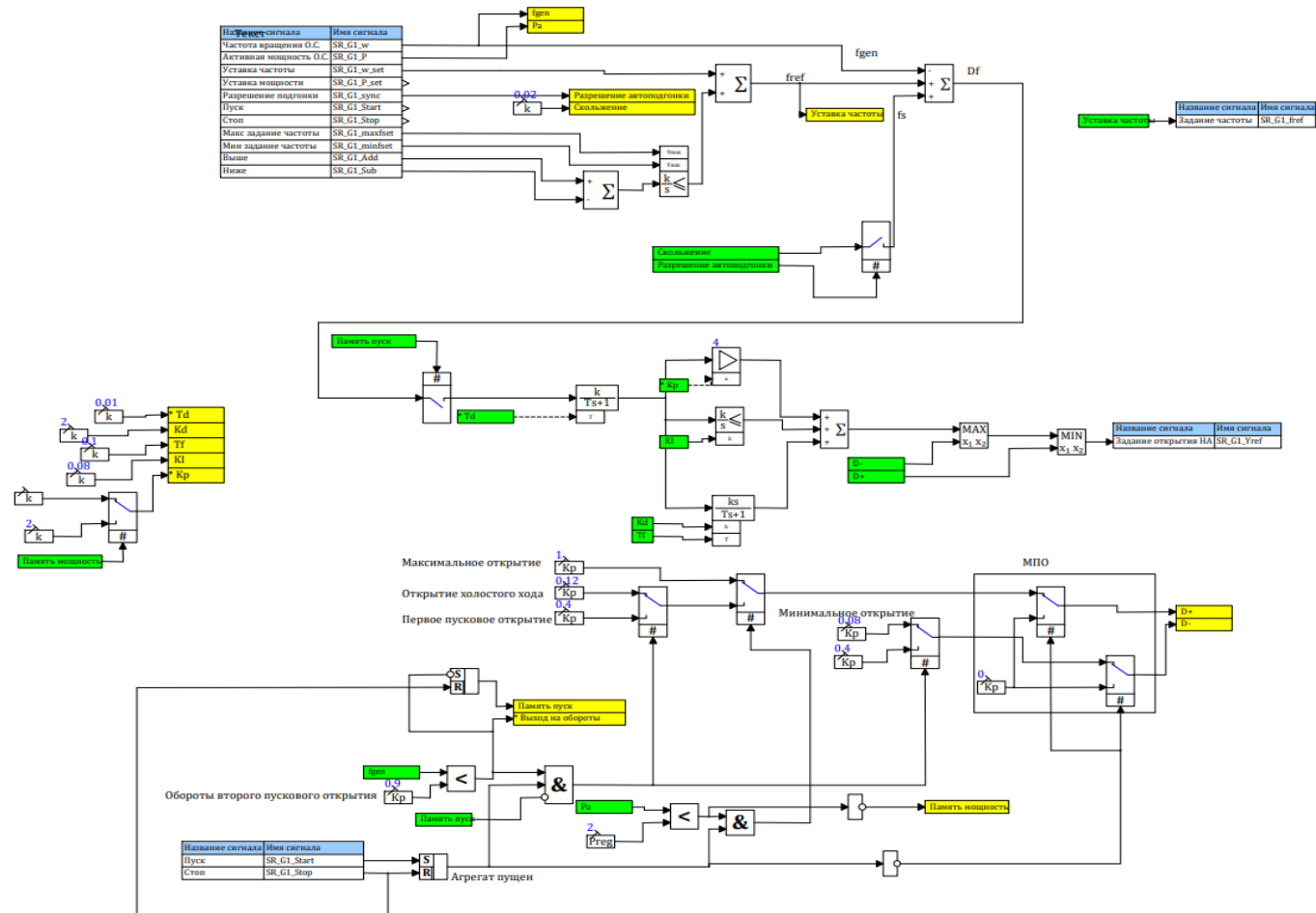


Рисунок Б.1 – Схема автоматического регулирования частоты

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Список сигналов базы данных

Таблица В.1 – Сигналы для категории гидроагрегат

Имя	Название
P	Активная мощность
Q	Реактивная мощность
Ug	Напряжение генератора
Q_flow	Расход воды
A0	Открытие НА
f	Частота

Таблица В.2 – сигналы для категории выключатель

Имя	Название
State	Положение выключателя
On	Команда включить
Off	Команда выключить

Таблица В.3 – сигналы для категории автоматика управления

Имя	Название
RegimXHT	Холостой ход турбины
RegimXXG	Холостой ход генератора
RegimN	Работа под нагрузкой
GoXHT	Пуск на ХХТ
GoXXG	Пуск на ХХГ
GoN	Пуск ГА
Stopped	ГА остановлен
StopG	Останов ГА
NA_opened	НА открыт
NA_closed	НА закрыт
switchOff	ВГ отключен
switchOn	ВГ включен
DoVf	Возбуждение генератора
DoTurbine	Пуск турбины
On_switch	Включить ВГ

## Окончание приложения В

Таблица В.4 – сигналы для категории автоматика регулирования

<b>Имя</b>	<b>Название</b>
w	Частота вращения О.С.
P	Активная мощность О.С.
w_set	Уставка частоты
P_set	Уставка мощности
sync	Разрешение автоподгонки
start	Пуск
stop	Стоп
Y	Положение сервомотора О.С.
Yref	Задание открытия НА
Add	Частота выше
Sub	Частота ниже
maxfset	Макс. задание частоты
minfset	Мин. задание частоты
fref	Задание частоты

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

институт

Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и  
электрических сетей  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



А.А. Ачитаев

подпись

инициалы, фамилия

« 16 »



2022г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОАГРЕГАТА В СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTESN

тема

13.04.02. Электроэнергетика и электротехника

код и наименование направления

13.04.02.06. Гидроэлектростанции

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

ст. преп. кафедры

ГГЭЭС Саяно-

Шушенского филиала

СФУ



подпись, дата

должность

А.В. Букатов

инициалы, фамилия

Выпускник



подпись, дата

С.К. Кобылецки

инициалы, фамилия

Рецензент

Начальник ССИиТС

филиала ПАО

«РусГидро» - «Саяно-

Шушенская ГЭС имени

П.С. Непорожного»



подпись, дата

должность, ученая степень

А.В. Чепиков

инициалы, фамилия

Нормоконтроллер



подпись, дата

К.П. Синельникова

инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2022