

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический


Кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники

Направление подготовки 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов
и производств

Направленность (профиль) образовательной программы Автоматизация техно-
логических процессов и производств в энергетике

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

И.о. зав. кафедрой


 О.В. Скрипко

«26» июня 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

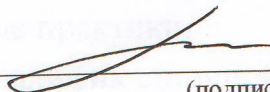
на тему: Автоматизированная система управления гидроагрегатом
Нижне-Бурейской ГЭС (комплексная выпускная квалификационная работа)

Исполнитель
студент группы 541 об

 25.06.2019
(подпись, дата)


В.Р. Сеницын

Руководитель
доцент, канд. техн. наук

 25.06.2019
(подпись, дата)

А.Н. Рыбалев

Консультант:
по безопасности и
экологичности
доцент, канд. техн. наук

 19.06.2019
(подпись, дата)

А.Б. Булгаков

Нормоконтроль
профессор, д-р техн. наук

 25.06.2019
(подпись, дата)

О.В. Скрипко

Благовещенск 2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический

Кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники

УТВЕРЖДАЮ

И.о. зав. кафедрой

 О.В. Скрипко

подпись

И.О. Фамилия

«26» июня 2019 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Синицына Владислава Романовича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Автоматизированная система управления гидроагрегатом Нижне-Бурейской ГЭС (комплексная выпускная квалификационная работа)

(утверждена приказом от 24.05.19 № 1168-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы 25.06.2019

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе:

- рабочая и конструкторская документация Нижне-Бурейской ГЭС;
- приказ об утверждении темы выпускной квалификационной работы;
- материалы, собранные в ходе практики.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов):

- характеристика объекта автоматизации;
- разработка модели системы регулирования основных параметров гидроагрегата;
- разработка прототипа программного симулятора системы управления гидроагрегатом;
- безопасность и экологичность.

5. Перечень материалов приложения:

- схема структурная имитационной модели;
- диаграммы изменения параметров системы;
- схемы управления техпроцессом;

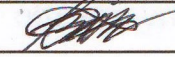
- интерфейс графической системы управления имитационной моделью;
- схема структурная модифицированной имитационной модели гидроагрегата, схема структурная блока «Турбина», настройки параметров соединения с OPC-сервером;
- диаграммы изменения параметров системы при регулировании мощности;
- листинг программы.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе:

Безопасность и экологичность – Булгаков А.Б., доцент, канд. техн. наук

7. Дата выдачи задания 15.04.19

Руководитель выпускной квалификационной работы: Рыбалёв Андрей Николаевич, доцент кафедры АППиЭ, канд. техн. наук.

Задание принял к исполнению (дата):  15.04.19

(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 87 с., 19 формул, 36 рисунков, 7 таблиц, 14 источников, 2 приложения.

ГИДРОАГРЕГАТ, СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, ГИДРОТУРБИНА, МОДЕЛЬ, ГЭС, АСУ ТП, SCADA, OPC, ПЛК.

В данной работе исследованы объект управления техпроцесса Нижне-Бурейской ГЭС, а также описаны его системы управления и регулирования.

Главной задачей является разработка автоматизированной системы управления гидроагрегатом. На основе математического описания синхронного генератора была разработана имитационная модель гидроагрегата НБ ГЭС в программной среде MATLAB Simulink.

Для управления и регулирования использовался программный эмулятор ПЛК, входящий в состав программного пакета CODESYS. Человеко-машинный интерфейс, позволяющий оператору удобно наблюдать и управлять моделью, представляет собой SCADA-систему. Разработка программы для эмулятора ПЛК и SCADA-системы выполнена в среде CODESYS. Связь между контроллером, SCADA-системой и моделью произведена с помощью OPC-сервера.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Характеристика объекта автоматизации	12
1.1 Общая информация	12
1.2 Структура и состав устройств управления гидроагрегатом. Гидромеханическая часть.	19
1.2.1 Колонка управления	21
1.2.2 Блок управления НА	22
1.2.3 Блок управления РК	23
1.2.4 Блок золотников	24
1.2.5 Система аварийного закрытия	26
1.2.6 Вспомогательное оборудование	28
2 Разработка модели системы регулирования основных параметров гидроагрегата	31
2.1 Структура модели системы	31
2.2 Математическое описание синхронного генератора	33
2.3 Модель синхронного генератора в Simulink	37
2.4 Суррогатная модель электросети	44
2.5 Разработка замкнутых систем регулирования частоты вращения и напряжения	48
2.6 Результаты моделирования	52
3 Разработка прототипа программного симулятора системы управления гидроагрегатом	54
3.1 Уточнение параметров модели	54
3.2 Разработка модели гидротурбины	55
3.3 Система управления гидроагрегатом	60
4 Безопасность и экологичность	74
4.1 Безопасность	74

4.2 Экологичность	77
4.3 Чрезвычайные ситуации	78
Заключение	82
Библиографический список	83
Приложение А	85
Приложение Б	86

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

АРЗ – аварийно-ремонтный затвор;

АРМ – автоматизированное рабочее место;

АРЧМ – автоматическое регулирование частоты вращения и мощности турбины;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

АСКУЭ – автоматизированная система контроля и учета электроэнергии;

АУГ – автоматическое управление гидроагрегатом;

ГА – гидроагрегат;

ГРАМ – группа регулирования активной мощности;

ГЭС – гидроэлектростанция;

ИНВ – инвертор напряжения постоянного тока;

КРУ – комплектное распределительное устройство;

КРУЭ – комплектное распределительное устройство элегазовое;

ЛВС – локальная вычислительная сеть;

МНУ – маслонапорная установка;

МОС – механизм обратной связи;

МП РЗиА – микропроцессорная релейная защита и автоматика;

НА – направляющий аппарат;

ОУ – общестанционные системы и устройства;

ПА – противоаварийная автоматика;

ПЛК – программно-логический контроллер;

ПМ – панель монитора;

ПТК – программно-технический комплекс;

ПО – программное обеспечение;

РК – рабочее колесо;

РПУ – резервный пульт управления;

РС – рабочая станция;

САБД – сервер архивирования и баз данных;

СБП – система бесперебойного питания и распределения оперативного тока;

СВД – система вибрационной диагностики гидроагрегата;

СК – синхронный компенсатор;

СОЕВ – система обеспечения единого времени;

СУ – система управления;

СУВ – система управления возбуждения генератора;

ТВС – система технического водоснабжения;

ТИСУ – термоконтроль, измерения, сигнализация, управление;

ТИ – телеизмерения;

ТС – термосопротивление;

УСО – устройство связи с объектом;

ЦПУ – центральный пульт управления;

ШУ – шкаф управления;

ШСО – шкаф сетевого оборудования;

ЭГР – электрогидравлический регулятор;

AI – канал ввода аналоговой информации (унифицированные сигналы тока и напряжения);

AO – канал вывода аналоговой информации (унифицированные сигналы тока и напряжения);

DI – канал ввода дискретной информации;

DO – канал вывода дискретной информации.

ВВЕДЕНИЕ

В современном производстве электроэнергии в России немаловажную роль играют гидроэлектростанции (ГЭС).

На данный момент доля выработки электроэнергии ГЭС составляет около 15 % [1]. Что, безусловно, значительно уступает доле выработки тепловых электростанций. Но, тем не менее, ГЭС занимают особо важное место в энергетической системе России, так как они выполняют регулирование её параметров в нестационарных режимах, а также покрывают наиболее неравномерные периоды нагрузки сети.

Из-за старения основных фондов ГЭС и электрической сети начнут возникать проблемы обеспечения надежности и безопасности гидроэлектростанций и электрических сетей, если не вводить новые мощности и не готовить молодых специалистов.

Подготовка молодых специалистов необходима для того, чтобы избежать возможных ошибок в работе персонала, чтобы быстрее им влиться в производственный процесс. Одним из возможных путей подготовки молодых специалистов являются различные обучающие тренажеры. Они позволяют изучить техпроцесс без какого-либо вреда реальному оборудованию предприятия, так как в основе тренажера лежит модель объекта управления, запускаемая на электронной вычислительной машине. Именно для этих целей произведена разработка модели гидроагрегата в бакалаврской работе.

В качестве основы взят техпроцесс Нижне-Бурейской ГЭС (НБ ГЭС) (рис. 1), находящейся на реке Буряя у посёлка Новобурейский Бурейского района Амурской области. ГЭС входит в Бурейский каскад, являясь контррегулятором крупной Бурейской ГЭС. Строительство станции велось ПАО «РусГидро» с 2010 по 2017 год [2]. Является крупнейшей гидроэлектростанцией России, строительство которой было начато в постсоветское время.

Нижне-Бурейский гидроузел строится в 84,6 км от устья р. Бурей, левобережного притока р. Амур, в 90 км ниже Бурейского гидроузла. Площадь водосбора в створе Нижне-Бурейской ГЭС 67100 км².



Рисунок 1 – НБГЭС

Нижне-Бурейская ГЭС имеет энергетическое назначение и позволяет ликвидировать зимние подтопления четырех поселков, возникающие при работе Бурейской ГЭС (БГЭС). Створ НБ ГЭС располагается в 84,6 км от устья р. Буреи в районе Долдыканского сужения.

Основные параметры ГЭС:

- установленная мощность – 320 МВт;
- среднегодовая выработка электроэнергии – 1,65 млрд. кВтч;
- максимальный статический напор – 28,3 м;
- расчетный напор – 26,1 м.

В здании ГЭС размещены 4 гидроагрегата (рис. 2) мощностью по 80 МВт с поворотно-лопастными турбинами ПЛ30-ВБ-630, работающими на расчётном напоре 26,1 м, и вертикальными синхронными гидрогенераторами. Для монтажа/демонтажа гидроагрегатов в машинном зале смонтированы два мостовых крана грузоподъёмностью 250 т каждый. Здание ГЭС оборудовано сороудер-

живающими решётками, ремонтными и аварийно-ремонтными затворами, двумя козловыми кранами (верхнего и нижнего бьефа). Пропускная способность здания ГЭС при расчётном напоре равна $1380 \text{ м}^3/\text{с}$ ($4 \cdot 345 \text{ м}^3/\text{с}$). Со стороны нижнего бьефа у стены машинного зала размещены четыре силовых трансформатора, с которых электроэнергия передаётся на КРУЭ.

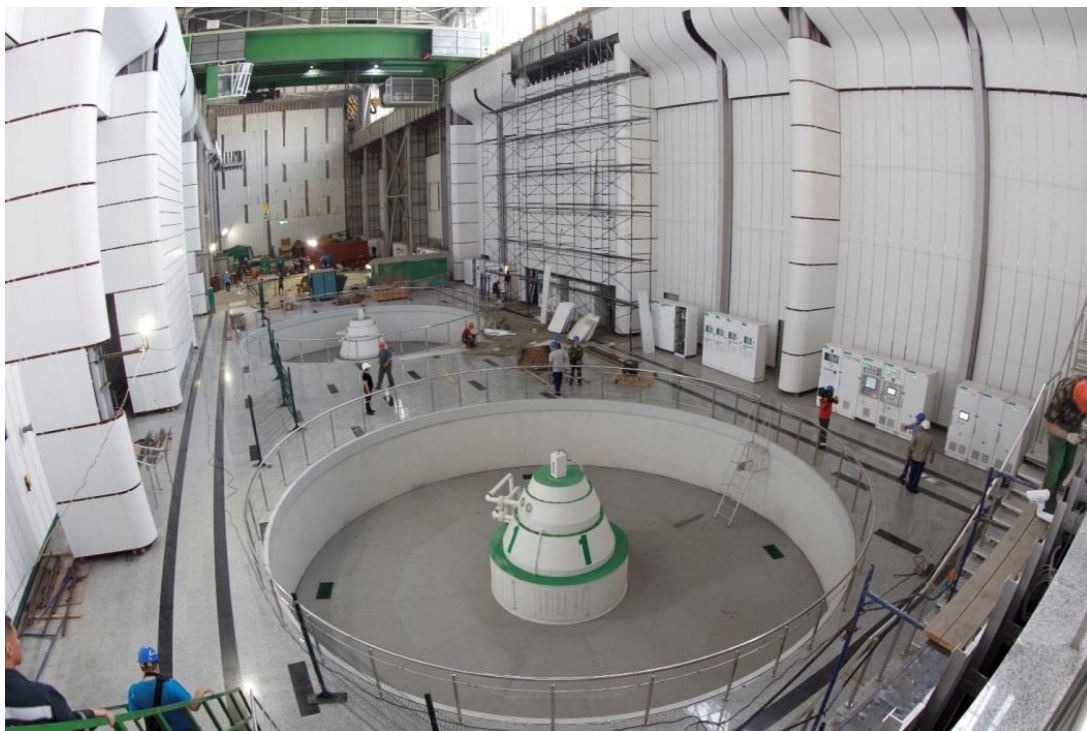


Рисунок 2 – Машинный зал

Нижне-Бурейская ГЭС является контррегулятором БГЭС, призванным сглаживать суточные колебания уровня воды в реке, образующиеся при работе этой мощной гидроэлектростанции. Это позволяет снять ограничения на режимы работы Бурейской ГЭС и ликвидировать зимние подтопления ряда посёлков, расположенных в нижнем бьефе этой станции.

Контррегулирующие функции НБГЭС заключаются в исключении опасных зон повышенных вибраций в работе гидроагрегатов Бурейской ГЭС и зимних подтоплений поселков в нижнем бьефе Бурейской ГЭС, а также снятие ограничений выработки её мощности и повышение защиты нижнего бьефа р. Буреи, р. Амур в случае аномально высоких сбросов на Бурейской ГЭС.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ

1.1 Общая информация

На Нижне-Бурейскую ГЭС возлагаются функции недельного и суточного регулирования стока, поступающего с Бурейской ГЭС (БГЭС), и покрытия базисной и полупиковой части суточного графика нагрузки системы. НБ ГЭС позволяет [2]:

– исключить или существенно сократить время работы гидроагрегатов Бурейской ГЭС в зонах повышенных вибраций;

– исключить зимние подтопления поселков в нижнем бьефе БГЭС;

– снизить (или снять) ограничения выработки и мощности БГЭС.

Оптимизация совместной работы Бурейской ГЭС с Нижне-Бурейской ГЭС позволит увеличить энергоотдачу этого каскада.

На НБ ГЭС установлено следующее основное оборудование:

а) четыре поворотно-лопастные турбины ПЛ30-ВБ-630 (82,5 МВт);

б) четыре вертикальных синхронных гидрогенератора (94,1 МВА/80 МВт, 13,8 кВ);

в) четыре тиристорные системы возбуждения (СТС-2Е-345-1600-2,5 УХЛ4), выполненные по схеме параллельного самовозбуждения;

г) четыре комплекса элегазового генераторного выключателя (15 кВ);

д) четыре блочных силовых трансформатора, двухобмоточных, трехфазных (мощность 125 МВА, 242 кВ, 13,8 кВ);

е) три трансформатора общестанционных собственных нужд, двухобмоточных, трехфазных (мощность 6,3 МВА, 13,8 кВ, 6,3 кВ);

ж) комплектное распределительное устройство элегазовое (КРУЭ) 220 кВ;

з) схема сети собственных нужд, включающая в свой состав: комплектное распределительное устройство (КРУ) 6 кВ, трансформаторы силовые трехфазные и однофазные, а также комплектные трансформаторные подстанции (КТП) 0,4 кВ и дизельгенераторы;

и) четыре системы гидропривода для маневрирования двумя плоскими аварийно-ремонтными затворами водоприемника НБ ГЭС, в составе одной маслососной установки и локальной системы управления (СУ АРЗ);

к) общестанционное оборудование и локальные системы управления:

• эксплуатационный водосброс Нижне-Бурейской ГЭС, который оснащен 5 сегментными затворами и системой гидропривода, в составе двух маслососных установок для маневрирования основными сегментными затворами эксплуатационного водосброса с локальной системой управления;

- системы откачки дренажных вод;
- системы воздухообеспечения высокого и низкого давления;
- системы вентиляции;
- системы хозяйственно-питьевого водоснабжения;
- системы отопления и горячего водоснабжения;
- системы пожарной сигнализации и пожаротушения и др.

Расположение ГА на примере первого ГА и соответствующих ему шкафов управления приведены на рис. 3, а основные характеристики – в табл. 1.

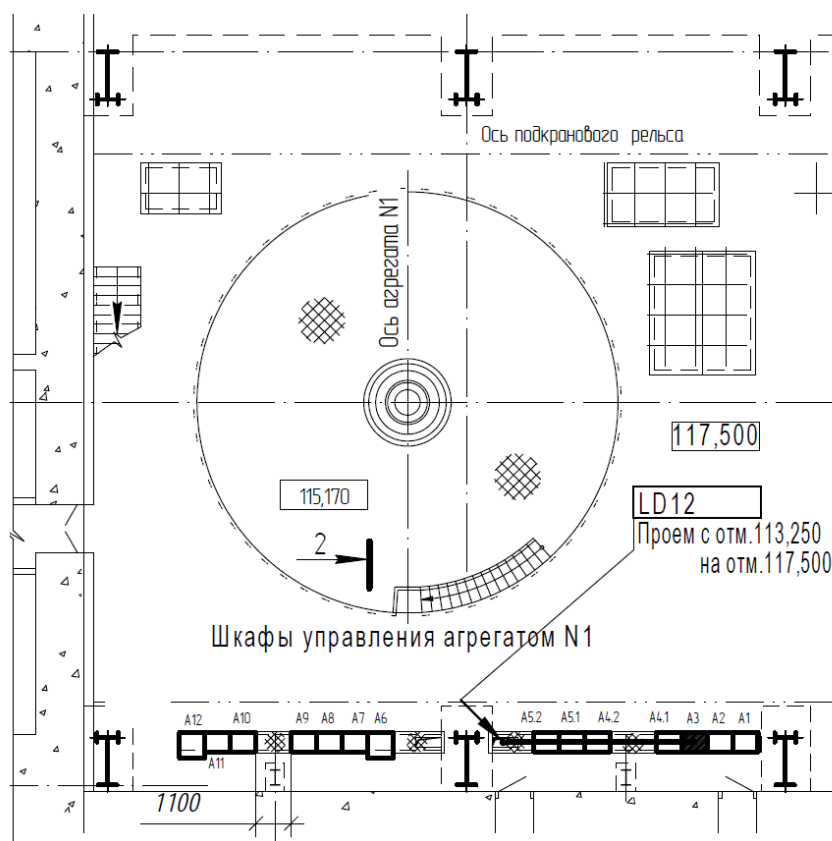


Рисунок 3 – Расположение первого ГА в машинном зале

Таблица 1 – Основные характеристики гидрогенераторов НБ ГЭС

Параметр	Значение
Количество гидроагрегатов	4
Установленная мощность ГЭС	330 МВт
Турбина поворотно-лопастная ПЛЗ0	
– мощность номинальная при расчетном напоре	82,5 МВт
– мощность максимальная при максимальном напоре	82,5 МВт
– частота вращения номинальная	107,1 об/мин
– частота вращения разгонная с сохранением комбинаторной зависимости	205,0 об/мин
– максимальный напор	28,2 м
– расчетный напор	26,1 м
– минимальный напор	17,6 м
Гидрогенератор типа СВ 965/160-56:	
– мощность номинальная полная	94,1 МВА
– мощность номинальная активная	80 МВт
– номинальное напряжение	13,8 кВ
Количество пусков в год	не более 750
Количество остановов в год	не более 750
Количество переводов из генераторного режима в режим синхронного компенсатора	не более 750
Количество переводов из режима синхронного компенсатора в генераторный режим	не более 750

Все ГА могут работать в режиме синхронного компенсатора (СК).

Вместе с основным технологическим оборудованием гидрогенераторов поставляются четыре ПТК АРЧМ – программно-технических комплекса автоматического регулирования частоты вращения и активной мощности турбины, разработанные ОАО «Силовые машины» [3].

ПТК АРЧМ должен обеспечивать переходные режимы турбины (пуск, останов и др.), регулирование частоты вращения и активной мощности турбины, контроль частоты вращения и положения регулирующих органов турбины, комбинаторную зависимость с коррекцией по напору, ручное и автоматическое управление оборудованием МНУ (насосы МНУ, лекажного агрегата, клапаны МНУ и пр.), формирование предупредительных и аварийных сигналов, обмен

информацией (получение директив управления и выдача информации) по ЛВС блока или физическими сигналами с другими ПТК АСУТП блока гидрогенератор-трансформатор.

ПТК АРЧМ интегрирован с ПТК группового регулирования частоты и активной мощности (ГРЧАМ).

Четыре системы управления возбуждением (СУВ) разработки ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила» в составе тиристорных систем возбуждения типа СТС-2Е-345-1600-2,5 УХЛ4. СУВ обеспечивает реализацию цифровых автоматических регуляторов возбуждения (АРВ).

СУВ обеспечивает:

- управление возбуждением в режимах пуска гидроагрегата и включения генератора в сеть;
- управление возбуждением в режиме электрического торможения гидрогенератора:
 - разгрузку генератора по реактивной мощности при нормальном остове;
 - ограничение перегрузки генератора по токам ротора и статора;
 - ограничение потребляемого генератором реактивного тока в зависимости от активного тока;
 - ограничение перевозбуждения;
 - изменение уставки регулятора напряжения;
 - контроль состояния элементов схемы системы возбуждения и электро-торможения;
 - формирование предупредительных и аварийных сигналов;
 - обмен информацией (получение директив управления и выдача информации) по ЛВС блока или физическими сигналами с другими ПТК АСУТП блока гидрогенератор-трансформатор.

СУВ (АРВ) интегрирована, соответственно, с ПТК группового регулирования напряжения и реактивной мощности (ГРНРМ).

СВК – система вибрационного контроля гидроагрегата и СМСВК – система мониторинга систем виброконтроля:

а) СВК (для каждого гидроагрегата) состоит из комплекта датчиков и ПТК вибрационного контроля (ПТК ВК).

б) СВК осуществляет постоянный контроль (мониторинг) вибрационного состояния гидроагрегата и при необходимости его защиту посредством выдачи управляющих воздействий на останов гидроагрегата в систему автоматического управления гидроагрегатом.

в) СВК должна быть интегрирована с ПТК АУГ и ПТК ТИСУ.

г) СМСВК представляет собой совокупность программно-технических комплексов, размещаемых, предположительно, на ЦПУ, в составе которой осуществляются централизованный контроль за вибрационным состоянием всех гидроагрегатов, долговременное архивирование информации и реализации задачи вибродиагностики (оценка технического состояния гидроагрегатов, выявления дефектов оборудования, приводящих к аварийной ситуации, выдача рекомендаций эксплуатационному персоналу по устранению различных дефектов основных узлов гидроагрегата).

Тиристорная система самовозбуждения типа СТС-2Е-345-1600-2,5 УХЛ4 обладает следующими параметрами (табл. 2):

Таблица 2 – Параметры СТС-2Е-345-1600-2,5 УХЛ4

Параметр	Значение
Номинальное выпрямленное напряжение	345 В
Номинальный ток	1600 А
Кратность форсировки	2,5 о.е.
Климатическое исполнение	УХЛ
Категория размещения	4

Системы выполнены по одnogрупповой схеме параллельного самовозбуждения без вольтодобавочных трансформаторов. В каждую систему входят два тиристорных преобразователя, включенных параллельно. Вентильное плечо

трехфазного мостового преобразователя содержит в зависимости от номинального тока системы от двух до пяти параллельных блоков тиристора с 630-амперным тиристором в каждом. Ток возбуждения регулируется полупроводниковым автоматическим регулятором АРВ-СДП1. Аппаратура системы возбуждения поставляется заводом-изготовителем смонтированной в шкафах с двусторонним обслуживанием.

Первая особенность системы серии СТС - многовариантность комплектов поставляемой аппаратуры. Системами возбуждения комплектуются все вновь вводимые турбогенераторы серии ТВФ ПО «Сибэлектротяжмаш» и гидрогенераторы средней мощности. В то же время системы поставляются и на действующие синхронные генераторы для замены устаревших возбудителей. Комплект поставки системы изменяется в зависимости от типа генератора, наличия или отсутствия на электростанции резервного возбудителя, специфических требований к системе возбуждения, а при замене возбудителя - и от аппаратуры, находящейся в эксплуатации и не требующей демонтажа.

Вторая особенность системы серии СТС, которую необходимо учитывать при анализе проекта системы возбуждения, - степень унификации оборудования, выпускаемого заводом-изготовителем. Например, шкаф ШУЗС поставляется как для систем возбуждения гидро- и турбогенераторов в составе систем с естественным воздушным охлаждением, так и для систем возбуждения с водяным охлаждением. Поскольку требования к возбудителям турбо- и гидрогенераторов неодинаковы, а для преобразователей с водяным охлаждением требуется дополнительная аппаратура контроля, схема шкафа ШУЗС (шкаф управления, защиты и сигнализации) в каждом конкретном случае оказывается избыточной.

Унифицированы также блоки питания и блок контроля БК, хотя нагрузка источников питания и алгоритм контроля исправности преобразователей больше всего зависят от количества тиристоров в вентильном плече, которое различно для разных типов систем.

Третья особенность системы серии СТС заключается в том, что заводом-изготовителем выпускается три модификации систем возбуждения. Номера модификаций системам не присваиваются и в структуре условного обозначения систем не учтены.

Несмотря на различия в комплектации и схемах, системы возбуждения серии СТС всех модификаций сохраняют преемственность в структуре, конструктивном исполнении, функциях и алгоритмах работы своих составных элементов. Упрощенная структурная схема системы серии СТС показана на рис. 4.

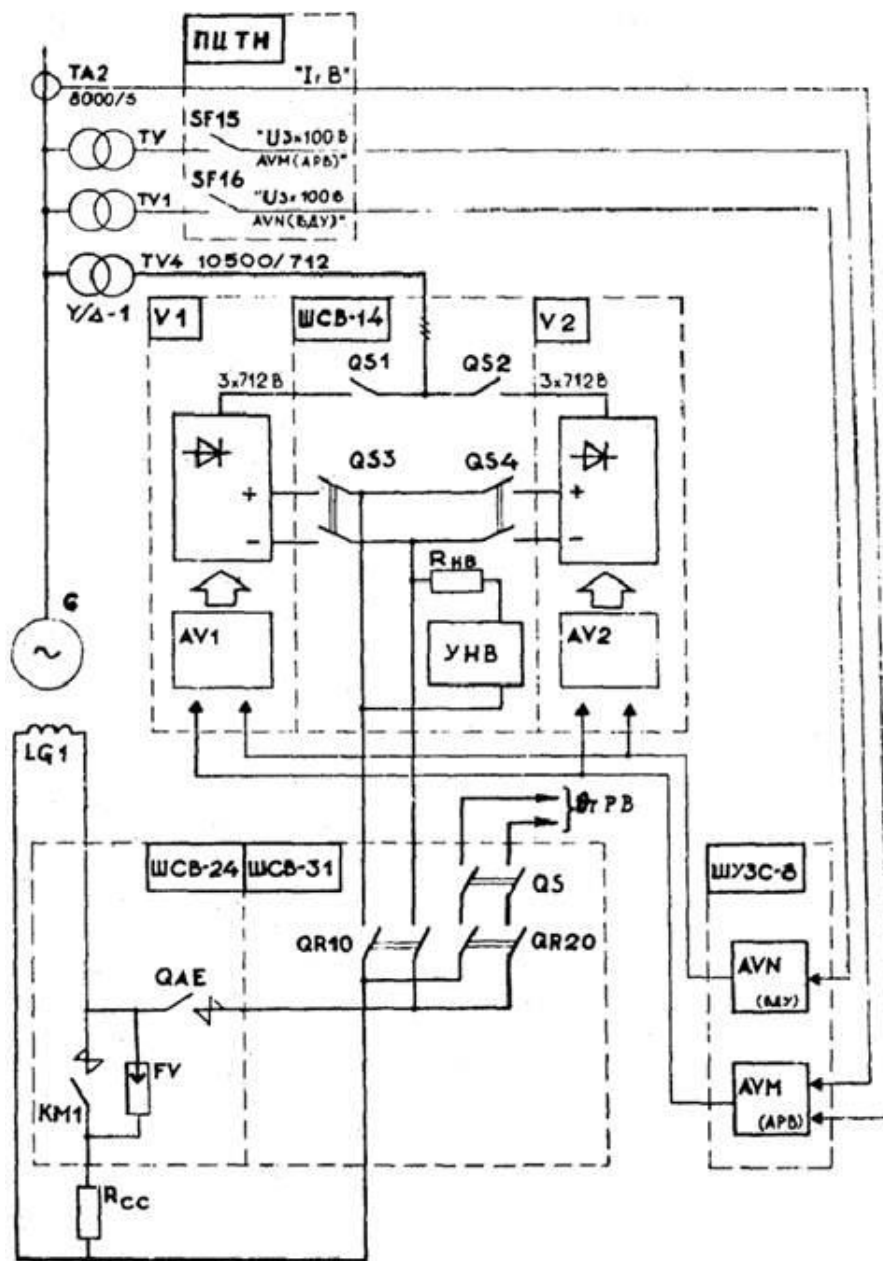


Рисунок 4 – Упрощенная структурная схема системы серии СТС

1.2 Структура и состав устройств управления гидроагрегата. Гидромеханическая часть

Входящая в состав «Нижнего уровня» управления АСУ ТП, система управления агрегата состоит из нескольких технологических систем, структура и состав которых приведены ниже [4].

Гидравлическая система регулирования и управления гидротурбиной (гидротурбинным оборудованием) (ГСР и УГТ соответственно) включает в себя:

- цифровой электрогидравлический регулятор частоты вращения и мощности для поворотных лопастных турбин (ЭГРК), реализуемый в ПТК АРЧМ-МНУ;
- цифровая система автоматического управления оборудованием МНУ, реализуемая в подсистеме (п/с) управления МНУ ПТК АРЧМ-МНУ;
- генераторы сигналов частоты вращения (4 шт.);
- гидромеханическая часть системы регулирования (ГМЧ ЭГРК);
- маслonaпорная установка;
- аппаратура автоматики турбины.

Система автоматического управления и технологических защит гидроагрегата САУ ГА

Система автоматического управления и технологических защит гидроагрегата, основным элементом которой является п/с управления ГА, реализуемая в ПТК АУГ предназначена для реализации функции управления, контроля и гидромеханической защиты агрегата.

Далее рассмотрим подробнее гидромеханическую часть гидравлической системы регулирования и управления гидротурбинным оборудованием.

Работа гидромеханической части системы регулирования (регулятора) основывается на принципе работы следящего гидравлического привода с дроссельным регулированием и электрической обратной связью. При этом цифровой аналоговый сигнал регулятора преобразуется (в колонке управления АС) в поступательное движение сервомоторов НА и РК.

В состав ГМЧ ЭГРК входят:

- колонка управления (АС);
- механизм обратной связи направляющего аппарата (МОС НА);
- механизм обратной связи рабочего колеса (МОС РК);
- система аварийного закрытия (ECS);
- устройство противоразгонной защиты (OSD);
- вспомогательное оборудование ГМЧ ЭГРК;
- сервомоторы НА и РК (SM1, SM2);
- лекажный агрегат с двумя насосами;
- стопорные устройства направляющего аппарата (L1-L4);

Все элементы гидравлической системы регулирования, обеспечивающие работу регулятора частоты вращения и мощности, а также системы управления МНУ объединяются принципиальной гидравлической схемой управления гидротурбиной.

ГМЧ ЭГРК совместно с регулятором обеспечивают выполнение следующих функций:

- автоматический программный пуск агрегата и вывод его на подсинхронную частоту вращения или на частоту энергосистемы в соответствии с заданным скольжением в режиме автоподгонки частоты;
- стабилизацию частоты вращения при работе на холостом ходу или на изолированную нагрузку;
- поддержание заданного уровня активной мощности;
- перемещение регулирующих органов при изменении мощности гидроагрегата;
- выполнение гарантий регулирования;
- устойчивую работу гидроагрегата во всех режимах;
- автоматическое изменение комбинаторной зависимости по напору;
- участие в регулировании частоты в энергосистеме с уставкой статизма в пределах от 4,5 % до 6,0 % и мёртвой зоной по частоте;
- астатическое регулирование частоты;

- автоматическое ограничение активной мощности гидроагрегата по напору;
- оптимальную комбинаторную зависимость во всём диапазоне изменения нагрузок и напоров;
- нормальную остановку агрегата (Стоп 1);
- аварийную остановку агрегата (Стоп 2);
- формирование аналоговых и дискретных сигналов для п/с автоматического управления ГА;
- регулировку минимального времени следующих процессов:
- закрытие направляющего аппарата до зоны демпфирования при сбросе нагрузки;
- открытие направляющего аппарата при наборе нагрузки с максимальной скоростью;
- разворота и свёртывания лопастей рабочего колеса;
- закрытия направляющего аппарата при срабатывании золотника аварийного закрытия.

1.2.1 Колонка управления

Колонка управления (АС) предназначена для управления сервомоторами (SM1, SM2) НА и РК по сигналам от п/с АРЧМ, п/с МНУ, п/с управления ГА. Колонка управления работает в двух режимах: «Автомат» и «Настройка». Она связана кабелями управления с ПТК АРЧМ-МНУ и трубопроводами с маслонапорной установкой (МНУ), аварийным золотником (ЕV), устройством противоразгонной защиты (OSD), маслоприемником.

Все механизмы и устройства колонки управления смонтированы на станине и закрыты металлическим дверным кожухом. На лицевой двери колонки управления расположены следующие необходимые для работы электроприборы:

- указатель активной мощности со шкалой от 0 % до 110 %;
- указатель частоты вращения агрегата со шкалой от 0 % до 200 %;
- указатель открытия НА со шкалой от 0 % до 100 %;

- указатель положения сервомотора РК со шкалой от 0 % до 100 %;
- сигнальные лампы положения стопоров НА;
- переключатель режимов работы;
- кнопка «Аварийный останов»;
- ключи ручного управления НА и РК.

В состав колонки управления входят следующие элементы:

- блок управления НА (CU1);
- блок управления РК (CU2);
- два датчика положения главного золотника НА (A1:BM, SM);
- два датчика положения главного золотника РК (A2:BM, SM);
- блок золотников НА (MDV), включающий вспомогательный сервомотор НА (SM1) и главный золотник НА (SV1);
- блок золотников РК (MDV), включающий вспомогательный сервомотор РК (SM2) и главный золотник РК (SV2);
- фильтр масла, поступающего от МНУ в ГМК (DF);
- гидрораспределитель управления главным золотником рабочего колеса при работе противоразгонной защиты для установки лопастей РК на максимальный угол (SV).

1.2.2 Блок управления НА

Блок управления направляющим аппаратом (CU1) предназначен для управления вспомогательным сервомотором НА (SM1) блока золотников (MDV), воздействующего на главный золотник НА (SV1). В состав блока входят гидрораспределители (DV1-DV3, PV), реле давления масла (PS), дроссельный клапан (FCV), контрольные клапаны (TP1-TP4).

Гидрораспределители блока реализуют следующие функции:

- функцию механизма «Пуск-останов» (МПО) осуществляет гидрораспределитель с электрическим и ручным управлением (DV1);
- функцию режимов «Автомат» и «Настройка» осуществляет гидрораспределитель с электрическим и ручным управлением (DV2);

- функцию управления главным золотником НА (SV1) в режиме «Настройка» осуществляет гидрораспределитель с ручным управлением и фиксацией позиций (DV3);

- функцию ЭГП НА осуществляет гидрораспределитель (PV), преобразующий сигнал 4-20 мА от п/с АРЧМ в перемещение главного золотника НА.

Реле давления (PS) блока управления НА осуществляет контроль наличия давления масла в колонке управления и участвует в формировании сигнала готовности к пуску.

Для измерения давления масла в гидролиниях блока управления НА при испытаниях устанавливаются контрольные клапаны (TP1-TP4).

Для визуального контроля наличия давления масла в блоке управления НА колонки управления устанавливается манометр (PG).

Для безударного перемещения тела главного золотника направляющего аппарата в положение «Открытие» или «Закрытие» в режиме «Настройка» системы регулирования на «Сухой спирали» устанавливается дроссельный клапан (регулятор скорости) (FCV), регулирующий скорость перемещения главного золотника НА (SV1). Полный ход поршня вспомогательного сервомотора НА (SM1) и движение тела главного золотника НА (SV1) регулируется его гайками настройки максимального расхода масла через блок золотников и, следовательно, временем открытия и закрытия сервомотора НА.

1.2.3 Блок управления РК

Блок управления рабочим колесом (CU2) предназначен для управления вспомогательным сервомотором РК (SM2) блока золотников, воздействующего на главный золотник РК (SV2).

В состав блока входят гидрораспределители (PV, DV1-DV3), дроссельный клапан (FCV), контрольные клапана (TP1-TP4).

Гидрораспределители блока реализуют следующие функции:

- функцию ЭГП РК. Гидрораспределитель (PV) осуществляет преобразование входного сигнала 4-20 мА п/с АРЧМ в перемещение главного золотника РК;

- функцию механизма разворота лопастей РК осуществляет гидрораспределитель (DV1) с электрическим и ручным управлением, имеющий режим управления «Автомат» и «Настройка». В режиме «Автомат» управление главным золотником осуществляется от п/с АРЧМ, в режиме «Настройка» управление осуществляется вручную. При аварийной остановке агрегата (без п/с АРЧМ) гидрораспределитель переводится в состояние управления от п/с управления ГА.

- функцию установки режима управления «Автомат» или «Настройка» осуществляет гидрораспределитель (DV2) с электрическим и ручным управлением;

- функцию управления главным золотником РК в режиме «Настройка» осуществляет гидрораспределитель с ручным управлением и фиксатором позиции (DV3).

Для безударного перемещения тела главного золотника РК (SV2) в положение «Открытие» или «Закрытие» в режиме «Настройка» системы регулирования на «Сухой спирали» устанавливается дроссельный клапан (FCV), назначение которого аналогично дроссельному клапану для главного золотника НА. Полный ход поршня вспомогательного сервомотора РК и время открытия/закрытия сервомотора РК регулируется гайками настройки на главном золотнике РК.

Контрольные клапаны (TP) служат для измерения давления масла в гидролиниях блока управления РК при наладке и испытаниях.

1.2.4 Блок золотников

Блок золотников (MDV) необходим для преобразования перемещения поршней вспомогательных сервомоторов (SM1, SM2) НА и РК в поток масла, направляемого в сервомоторы НА и РК. Этот блок объединяет в себе главный золотник НА и главный золотник РК (SV1, SV2).

Датчики положения (A1, A2) главных золотников НА и РК служат для формирования сигналов обратной связи по положению тел главных золотников НА и РК. Контроль за смещением тела главного золотника НА «На закрытие»

осуществляет микропереключатель (индукционный датчик) «Главный золотник НА смещен на закрытие». Этот сигнал используется в САУ ГА для фиксации Разгона 1 ступени.

Также в систему входят: сдвоенный фильтр масла (DF) для тонкой очистки масла, поступающего к гидроаппаратуре; управляющий аварийный гидрораспределитель (SV), предназначенный для смещения тела главного золотника РК «На открытие» при срабатывании устройства противоразгонной защиты или потере питания в системе аварийного закрытия; обратные клапаны (NRV), препятствующие оттоку масла из трубопроводов колонки управления и проникновению в них воздуха; защитный клапан, предназначенный для подключения и отключения колонки управления от гидролинии давления трубопровода системы регулирования; датчики засорения фильтра тонкой очистки масла.

Механизм обратной связи НА (МОС НА) служит для преобразования положения сервомоторов НА в электрический сигнал управления, используемый в п/с АРЧМ в качестве сигнала обратной связи по положению НА, МОС НА включает в свой состав измеритель пути; магнит; детали крепления измерителя пути и магнита на сервомоторе НА. Положение магнита относительно корпуса измерителя пути определяет величину электрического выходного сигнала МОС НА, подаваемого в п/с АРЧМ в качестве сигнала обратной связи по положению НА. У измерителя пути токовый выходной сигнал 4-20 мА. При движении сервомотора НА на «закрытие» величина сигнала уменьшается, при движении на «открытие» - увеличивается.

Механизм обратной связи РК (МОС РК) служит для преобразования положения сервомотора РК в электрический сигнал управления, используемый в п/с АРЧМ в качестве сигнала обратной связи по положению лопастей РК. Конструктивно МОС РК выполнен аналогично МОС НА. Детали крепления измерителя пути и магнита устанавливаются на маслоприемнике РК. Измеритель пути также имеет токовый выходной сигнал 4-20 мА. Движение сервомотора РК на «закрытие» (сворачивание лопастей) приводит к уменьшению величины сигнала, а в сторону открытия (разворот лопастей) - к увеличению. Для повы-

шения надёжности регулятора и исключения его ложной работы в п/с АРЧМ устанавливаются два датчика МОС РК.

1.2.5 Система аварийного закрытия

В состав ГМЧ ЭГРК входит система аварийного закрытия (ECS), представляющая собой комплект электрических и гидравлических устройств, предназначенных для защиты агрегата от разгона, осуществляемой независимо от п/с АРЧМ, путем закрытия НА. Для реализации этой задачи в систему аварийного закрытия входят аварийный золотник (EV), блок управления аварийного золотника (CU1), золотник программного закрытия (PCV), реле давления (PS1, PS2).

Аварийный золотник (EV) предназначен для изменения потоков масла. При перемещении (срабатывании) аварийного золотника происходит отключение главного золотника НА (SV1) колонки управления от управления сервомоторами НА. Масло под давлением от МНУ через аварийный золотник (EV) поступает в полости закрытия сервомоторов НА (SM1-SM4), полости открытия сервомоторов НА через аварийный золотник (EV) и золотник программного закрытия (PCV) сообщаются со сливом. Подключение полости управления аварийного золотника (EV) к напорной или сливной гидролиниям происходит через блок управления с гидроприводом (CU1).

Золотник программного закрытия (PCV) служит для получения программного закона закрытия сервомоторов НА (SM1-SM4) и действия системы аварийной защиты. Выполняет роль дросселирующего устройства, когда сливной патрубков аварийного золотника (EV) соединяется со сливным баков МНУ через программный золотник (PCV). При этом на программном золотнике могут быть установлены две позиции, определяющие скорость движения сервомотора НА (SV1) на разных участках закрытия.

Блок (CU1) осуществляет управление аварийным золотником в автоматическом и ручном режимах, соединяя полость управления аварийного золотника с гидролинией давления.

В аварийной ситуации по команде от САУ ГА блок управления (CU1) соединяет полость управления аварийного золотника со сливом, НА закрывается золотником аварийного закрытия (EV) со скоростью, определяемой золотником программного закрытия (PCV).

Блок управления золотником программного закрытия (CU2) предназначен для управления золотником программного закрытия и выполнен на базе двухпозиционного гидрораспределителя с электронным управлением (DV1) и гидрораспределителя с ручным управлением (DV2).

Первый гидрораспределитель (DV1) имеет автоматический и ручной режим управления. В автоматическом режиме полость программного золотника всегда соединена со сливом, для чего электромагнит гидрораспределителя находится под напряжением постоянно и включается САУ ГА.

При отключении электромагнита гидрораспределитель переключается, создается полость управления золотником программного закрытия с давлением.

Блок управления (CU2) имеет также гидравлическое управление от золотника противоразгонной защиты (OSD:DV).

Для контроля давления в системе аварийного закрытия НА установлены два реле давления масла (PS1, PS2), контролирующие давление в управляющей полости аварийного золотника (EV) и золотника программного закрытия (PCV).

Для защиты гидроагрегата от разгона устанавливается устройство противоразгонной защиты (OSD), представляющее собой комплект гидромеханических устройств:

- центробежный выключатель (A);
- золотник противоразгонной защиты (DV);
- микропереключатели (SR1, SR2).

Центробежный выключатель (A) представляет собой механическое устройство, предназначенное для определения разгонных оборотов.

Центробежный выключатель состоит из основания, жестко связанного с валом гидротурбины, и корпуса подвижного относительно основания.

При увеличении частоты вращения под действием центробежной силы при превышении расчетного усилия происходит смещение корпуса. Смещение корпуса выключателя является входным сигналом для срабатывания золотника противоразгонной защиты (DV). Уставка срабатывания противоразгонной защиты должна быть на 5 % больше уставки второй ступени защиты от разгона.

Настройка величины расчетного усилия производится поджатием пружины выключателя. Возврат центробежного выключателя в исходное положение после срабатывания производится вручную.

Золотник противоразгонной защиты (DV) служит для преобразования входного сигнала (смещения корпуса центробежного выключателя «А») в поток масла.

Золотник противоразгонной защиты является гидрораспределителем, выход которого соединен с блоком управления золотником программного закрытия (CU2).

Золотник противоразгонной защиты имеет ручной привод для возврата в исходное положение после срабатывания, а также микропереключатели, предназначенные для передачи в САУ ГА информации о состоянии противоразгонной защиты.

1.2.6 Вспомогательное оборудование

В состав вспомогательного оборудования ГМЧ ЭГРК входят трубопроводы системы регулирования, блок управления стопорами НА (CU).

Трубопроводы системы регулирования осуществляют подачу масла под давлением в ЭГРК гидромеханической частью, слив масла из этих устройств и сбор протечек.

Блок управления стопорами НА (CU) предназначен для управления приводами стопорных устройств. Блок выполнен на базе двухпозиционного гидрораспределителя (DV) с электромагнитным и ручным управлением и с механическим фиксатором положения и дросселя (TV) с обратными клапанами. Блок управления стопорами НА управляется командами от САУ ГА при пуске и

остановке агрегата. Ручное управление блоком управления стопорами осуществляется путем нажатия кнопок ручного управления на электромагнитах.

Для контроля за частотой вращения агрегата на валу генератора устанавливается зубчатое колесо и четыре датчика частоты вращения индукционного типа (BR1-BR4), сигналы которых поступают в ПТК АРЧМ.

Лекажный агрегат включает в свой состав два насоса, датчики уровня масла, фильтр воздушный, два обратных клапана, пульта управления лекажными насосами

Установка маслоохладительная включает в себя электронасос, расходомер контроля охлаждающей воды, электромагнитный клапан подачи охлаждающей воды, сетчатый фильтр, два показывающих манометра.

Управление насосами МНУ осуществляется двумя пусковыми устройствами с контролем работы и пультом местного управления с ключами управления.

Управление насосом маслоохладительной установки осуществляется пускателем и комплектно поставляемым пультом управления.

Управление двумя лекажными насосами осуществляется двумя пускателями и ключами управления пульта управления.

Маслонапорная установка включает в свой состав основной и аварийный гидроаккумулятор, маслонасосный агрегат, маслоохладительную установку, лекажный агрегат.

Гидроаккумулятор включает в свой состав два датчика контроля давления масла, два датчика уровня масла, указатель уровня масла, электромагнитный клапан впуска воздуха, два предохранительных клапана, фильтр воздушный, грузовой клапан, показывающий манометр давления воздуха, подводимого от ресивера, манометр показывающий давление масла в гидроаккумуляторе.

Агрегат маслонасосный содержит в себе два насоса МНУ, сдвоенный фильтр масла, два воздушных фильтра, два датчика контроля температуры масла в сливном баке, указатель уровня масла в сливном баке со встроенным дат-

чиком уровня, два перепускных клапана, два обратных клапана, датчик наличия воды в масле, два электромагнита перепускных клапанов

Аппаратура автоматики гидравлической системы регулирования и управления гидротурбинным оборудованием включает в свой состав:

- датчики контроля срезных пальцев лопаток НА;
- аналоговый датчик давления воды в спиральной камере;
- аналоговый датчик давления воды под крышкой турбины;
- аналоговый датчик давления воды в отсасывающей трубе;
- три датчика температуры вкладышей втулок маслоприемника;
- дискретный датчик давления воды в ПШТ;
- аналоговый датчик уровня воды на крышке турбины;
- два дискретных датчика уровня воды на крышке турбины;
- датчик давления воздуха в ремонтном уплотнении вала;
- аналоговый датчик расхода воды через турбинный подшипник;
- аналоговый датчик расхода воды через турбину;
- автоматика откачки воды с крышки турбины, состоящая из двух насосов и шкафа управления насосами;
- два датчика уровня масла в подшипнике турбины;
- датчик контроля засоренности фильтра очистки воды на уплотнение вала;
- аналоговый датчик расхода воды на уплотнение вала;
- дискретный датчик давления воды на уплотнение вала;
- дискретный датчик контроля износа пар трения уплотнения вала;
- два датчика температуры сегментов ПШТ;
- три дискретных датчика уровня отжатия воды в режиме СК.

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАГРЕГАТА

2.1 Структура модели системы

В общем виде модель системы регулирования основных параметров гидроагрегата можно представить в виде схемы на рис. 5.

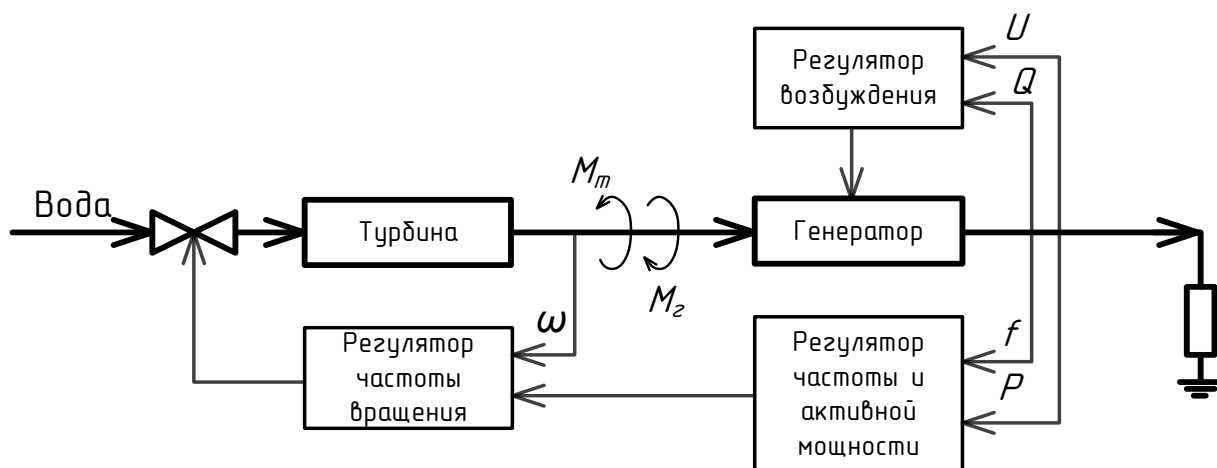


Рисунок 5 – Схема системы управления

Очевидно, что структура схемы соответствует технологическому процессу ГЭС: поток воды из водохранилища, ограничиваемый направляющим аппаратом (на схеме изображен в виде задвижки), передает свою кинетическую энергию лопастям турбины. Они, в свою очередь, полученную энергию преобразуют в момент турбины, передаваемый на общий для турбины и генератора вал. Стоит отметить, что синхронный генератор оказывает сопротивление вращению вала, представленное в виде момента генератора.

Для начала выработки генератором электроэнергии в энергосистему недостаточно только сообщить момент валу генератора – нужно также подать напряжение возбуждения на ротор.

В данной схеме также имеются три регулятора: регулятор возбуждения, регулятор частоты и активной мощности и регулятор частоты вращения.

Регулятор возбуждения принимает в качестве входных параметров напряжение статора и вырабатываемую реактивную мощность, а на выходе управляет возбуждением якоря генератора.

Регулятор частоты и активной мощности, как следует из названия, принимает на входе электрическую частоту и активную мощность, вырабатываемые генератором, а на выходе оказывает управление регулятором частоты вращения. Последний, в свою очередь, на входе также принимает угловую скорость вала генератора и формирует на выходе управление направляющим аппаратом.

В среде моделирования MATLAB Simulink в разделе Simscape Power Systems уже имеется готовая модель гидроагрегата, причем подключенного к энергосистеме. Модель представлена ниже на рисунке 6.

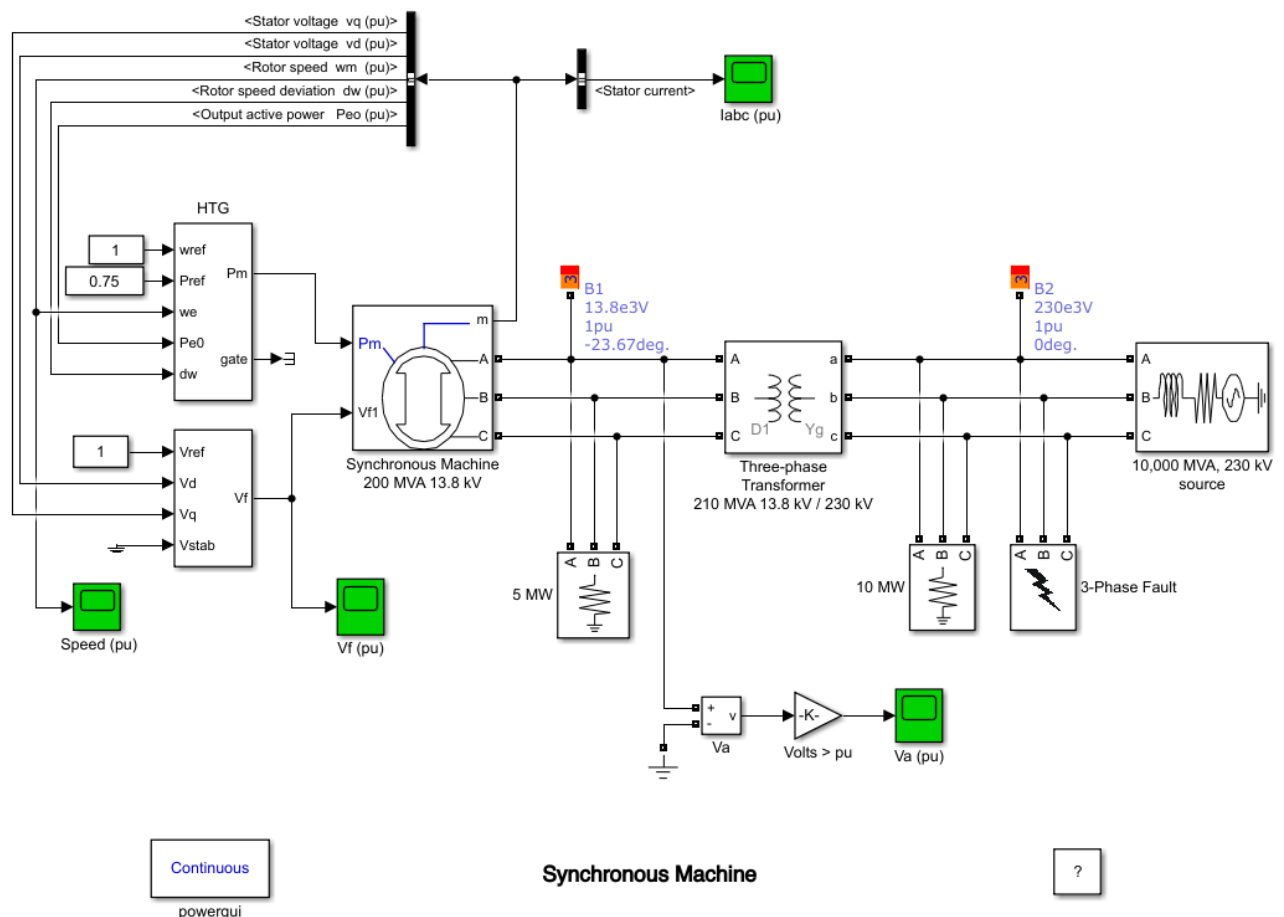


Рисунок 6 – Пример системы в Simscape Power Systems

Система содержит модель гидравлической турбины с регулятором скорости вращения, модель системы возбуждения, синхронный генератор, повышающий трансформатор и трехфазный источник напряжения, моделирующий энергосистему. Имеются также два блока нагрузки (в первичной и вторичной цепях трансформатора). С помощью блока 3-PhaseFault моделируется короткое замыкание в линии. Модель позволяет изучить переходные процессы, вызванные коротким замыканием и оценить качество работы регуляторов.

Simscape Power Systems – безусловно, прекрасный инструмент для моделирования энергетических систем, с помощью которого можно решать самые разные задачи, в том числе связанные с исследованием систем управления. Однако для разработки комбинированных моделей он не подходит по причине того, что расчет таких диаграмм требует высоких вычислительных мощностей и производится очень медленно. Следовательно, такую модель нельзя использовать для наших целей, так как нам необходимы вычисления в реальном масштабе времени.

Основная причина небольшой скорости вычислений состоит, по видимому, в том, что Simscape-модели не являются обычными Simulink-моделями. Simscape-блоки и Simscape-линии «передают» не «сигналы», как обычные Simulink-блоки, а токи и напряжения. Модель строится как электрическая схема, что конечно удобно, но за это приходится расплачиваться быстродействием. Другой причиной замедления расчета может быть учет «мелких деталей», который, наверное, в ряде случаев, и оправдан, но для наших целей не требуется.

2.2 Математическое описание синхронного генератора

Для того, чтобы ускорить расчет, необходимо построить модель в осях d, q , привязанных к вращающемуся ротору синхронной машины (рис. 7). При таком подходе удастся сократить число периодически изменяющихся величин, что упрощает вычисления [5].

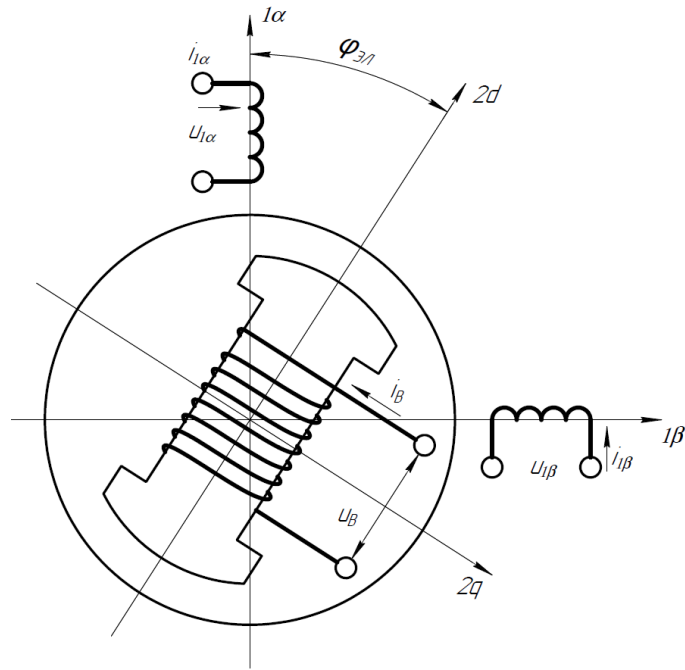


Рисунок 7 – Схема двухфазной модели синхронного генератора

Обмотка возмущения размещена на оси $2d$ и подключена к источнику постоянного напряжения $U_в$. Уравнения электромеханической характеристики для реальных переменных в осях 1α , 1β , $2d$, $2q$ имеют вид:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = R_1 i_{1\alpha} + \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} = R_1 i_{1\beta} + \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt}; \\ u_B = R_B i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

Особенностью синхронных машин является синхронное вращение ротора с вращающимся полем статора. Вектор напряжения отстает от вектора ЭДС на угол нагрузки $\theta_{эл} = \varphi_{0эл} - \varphi_{эл} = \omega_{0эл} t - \varphi_{эл}$. Далее необходимо привести напряжения $u_{1\alpha}, u_{1\beta}$ к осям d, q с помощью формул прямого преобразования (2):

$$\begin{cases} u_d = u_{1\alpha} \cdot \cos \varphi_{эл} + u_{1\beta} \cdot \sin \varphi_{эл} = U_{1m} \sin \theta_{эл}; \\ u_q = -u_{1\alpha} \cdot \sin \varphi_{эл} + u_{1\beta} \cdot \cos \varphi_{эл} = -U_{1m} \cos \theta_{эл}. \end{cases} \quad (2)$$

Для синхронной машины с явнополюсным ротором упрощенные уравнения динамической характеристики в осях d, q имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_d}{dt} + \omega p_n \Psi_q + R i_d = -u_d; \\ \omega p_n \Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - R i_q = u_q; \\ \frac{d\Psi_B}{dt} + R_B i_B = u_B; \\ M = \frac{3}{2} p_n (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d), \end{cases} \quad (3)$$

где ω , – угловая скорость вращения ротора;

M – электромагнитный момент машины;

p_n – число пар полюсов.

Потокосцепления обмоток можно выразить через их токи и соответствующие индуктивности следующим образом:

$$\begin{cases} \Psi_d = L_{1d} i_d + L_{12d} i_B; \\ \Psi_q = L_{1q} i_q; \\ \Psi_B = L_B i_B + L_{12d} i_d. \end{cases} \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) следует дополнить уравнением механического равновесия:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M, \quad (5)$$

где J – момент инерции гидроагрегата;

M_T – момент, развиваемый турбиной.

Если подставить (4) в (3) и избавиться от потокосцеплений, то получим:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d} (-u_d - \omega_{эл} L_q i_q - R i_d); \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q} (-u_q + \omega_{эл} L_d i_d + \omega_{эл} L_{12} i'_e + R i_q); \\ \frac{di_B}{dt} &= \frac{1}{L'_e} \left(U'_e - R_B i_B - L_{12} \frac{di_d}{dt} \right); \\ M &= \frac{3}{2} p_n (L_{12d} i'_e i_q + (L_{1d} - L_{1q}) i_d i_q). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Модель, построенная по уравнениям (6), будет иметь входы и выходы, показанные на рис. 8.



Рисунок 8 – Входы и выходы модели

В данном виде модель описывает что-то вроде управляемого напряжениями источника токов. Однако модель является неполной, так как проекции вектора напряжения на оси d и q зависят от угла нагрузки

$$\theta = p_n \varphi - \omega_{эл}, \quad (7)$$

где $\omega_{эл} = 2\pi f$ – круговая скорость;

φ – угол поворота ротора.

Круговая скорость соответствует частоте сети f . Угол поворота ротора может быть найден из решения уравнения:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega. \quad (8)$$

Построенную по этим уравнениям модель можно использовать в имитационной системе регулирования активной и реактивной мощности, вырабатываемой гидроагрегатом при работе на сеть бесконечной мощности.

2.3 Модель синхронного генератора в Simulink

Несмотря на то, что данная бакалаврская работа целиком и полностью основывается на структуре и устройстве Нижне-Бурейской ГЭС, нам пришлось прибегнуть к замене синхронного генератора на альтернативный. Причиной является отсутствие в документации НБ ГЭС необходимых данных для составления модели генератора. Таким образом, вместо синхронного генератора типа СВ 965/160-56 принят генератор СВ 1470/149-104УХЛ4 [6], параметры которого приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры синхронного генератора СВ 1470/149-104УХЛ4

Параметр	Значение
Полная мощность	91,8 МВА
Напряжение статора	13,8 кВ
Ток статора	3840 А
Сos φ	0,85
Частота вращения	57,7 об/мин
Ток возбуждения	1185 А
Напряжение возбуждения	345 В
КПД	0,979
Число полюсов	104
Момент инерции ротора	$15,5 \cdot 10^6$ кг·м ²
Постоянная времени T _{d0}	5,3 с
Индуктивные сопротивления:	о.е.
X _σ	0,143
X _d	0,72
X _q	0,51

Индуктивные сопротивления выражены в относительных единицах. Чтобы получить абсолютные значения, необходимо в начале вычислить базовое сопротивление, определяемое как отношение номинального напряжения к номинальному току [6]:

$$R_b = \frac{U_n}{I_n} = \frac{13800}{3840} = 3,5938 \text{ Ом.} \quad (9)$$

Далее, умножая индуктивные сопротивления в относительных единицах, получим абсолютные:

$$\begin{aligned} x_\sigma &= 0,143 \cdot 3,5938 = 0,5139 \text{ Ом;} \\ x_d &= 0,72 \cdot 3,5938 = 2,5875 \text{ Ом;} \\ x_q &= 0,51 \cdot 3,5938 = 1,8328 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (10)$$

Для получения остальных необходимых величин был написан код в среде MATLAB, приведенный в приложении А.

Согласно уравнениям, полученным в разделе 2.2, была построена модель в среде моделирования MATLAB Simulink (рисунок 9).

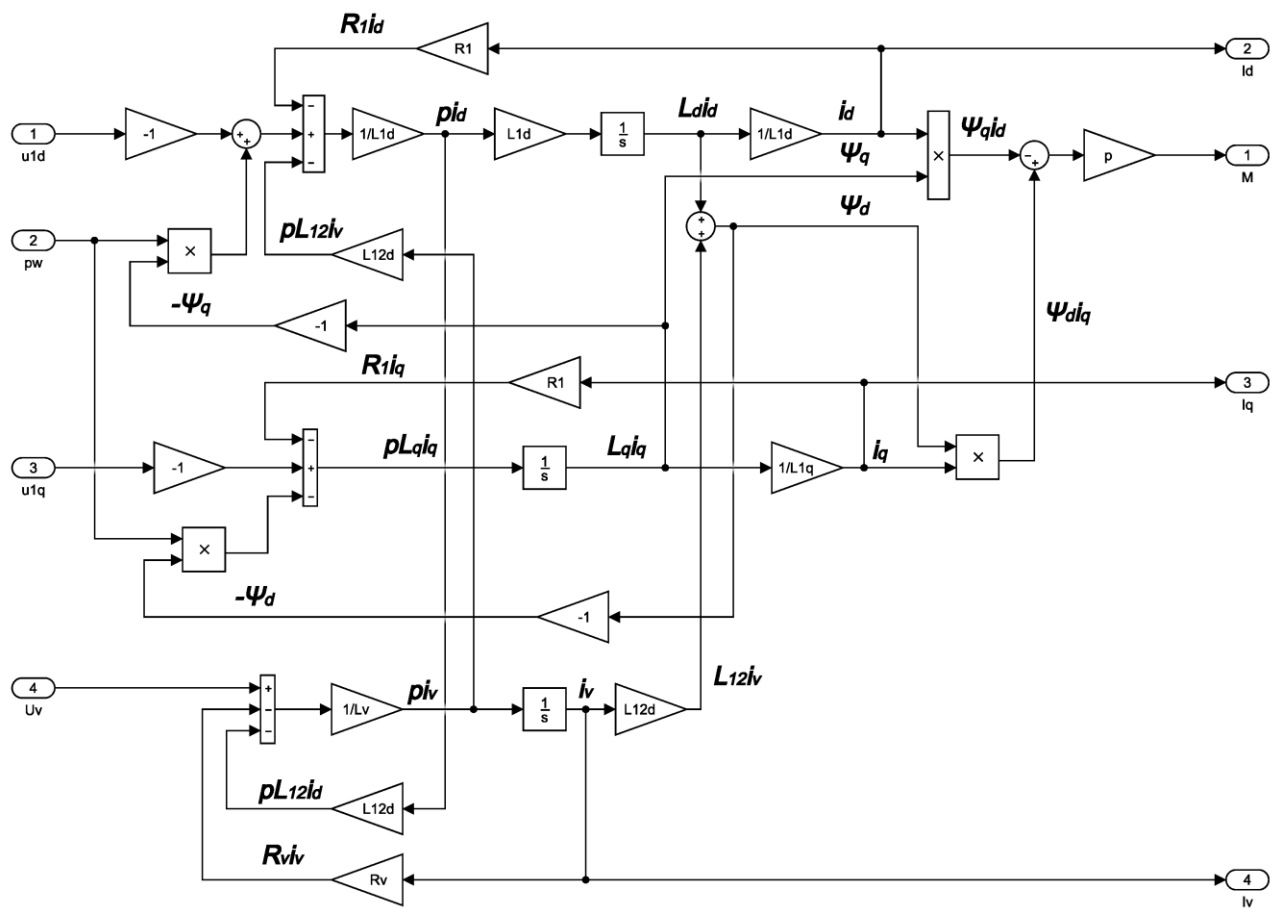


Рисунок 9 – Структура модели синхронного генератора

Данная модель для компактности объединена в блок-подсистему «Subsystem» и является элементом общей схемы, представленной на рисунке 9.

Тот факт, что модель является упрощенной, вынуждает некоторые параметры задавать в виде констант, используя соответствующие блоки. Подобными параметрами являются максимальное напряжение статора U_{Imax} , напряжение возбуждения U_v , угловая скорость поля статора ω_0 и момент турбины M_t .

Как и в подсистеме, здесь связи между блоками соответствуют полученным ранее уравнениям.

Помимо этого добавлены блоки Score для построения диаграмм. С их помощью появляется возможность отследить выдаваемые моделью параметры. Блок Score4 отображает значение угла нагрузки θ в градусах, блоки Score6-Score8 предназначены для отображения токов i_d , i_q , i_v соответственно, а блок Score1 – угловую скорость ротора (рис. 10).

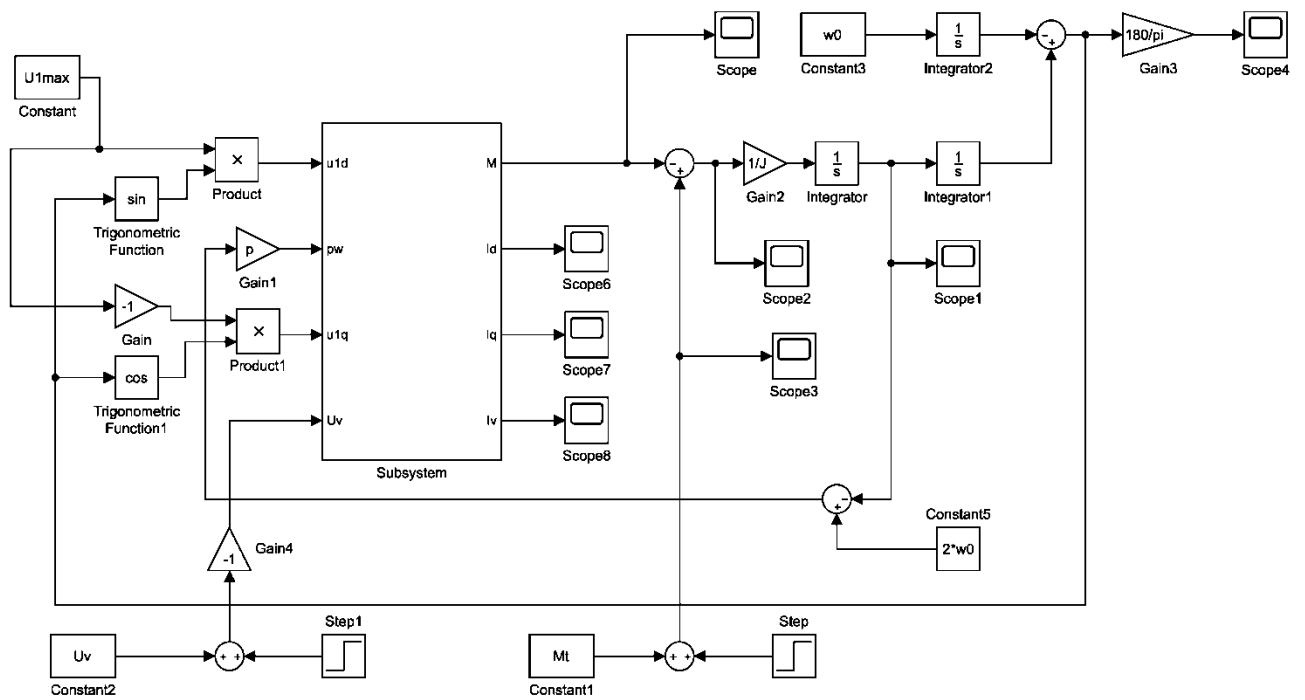


Рисунок 10 – Общая схема модели

Вынужденной необходимостью была установка начальных значений на каждом из интеграторов. Причина кроется в упрощении системы, из-за чего она не позволяет моделировать запуск из остановленного состояния. Поэтому при запуске система начинает свою работу сразу с номинальных значений всех параметров, без разгона.

Судя по полученным диаграммам (рис. 11, 12), система запускается и работает в установившемся режиме без колебаний, как и предполагалось. Это видно из полученных прямых линий на блоках Scope, что говорит о постоянных значениях измеряемых ими величин.

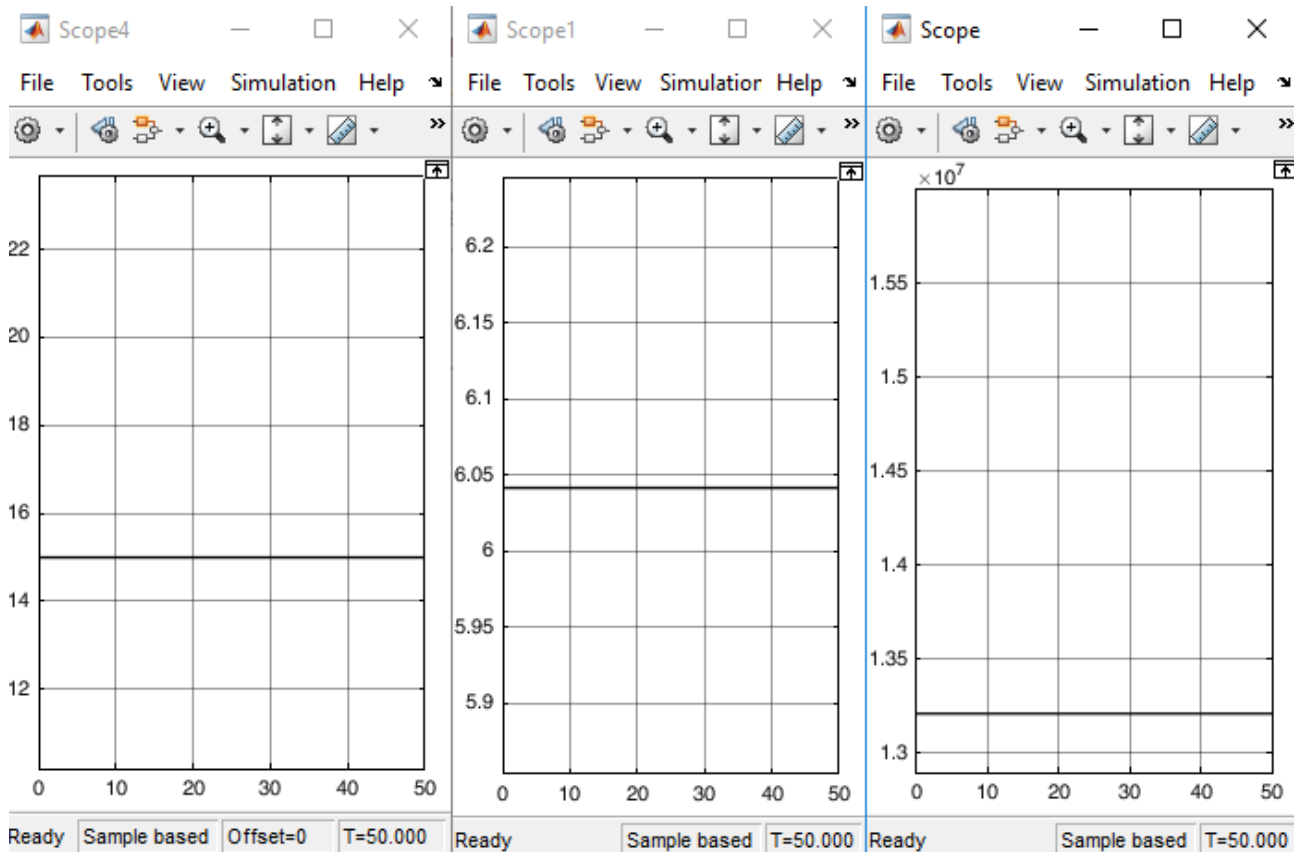


Рисунок 11 – Диаграммы угла θ (град), угловой скорости ротора (рад/с), момента генератора (Н·м)

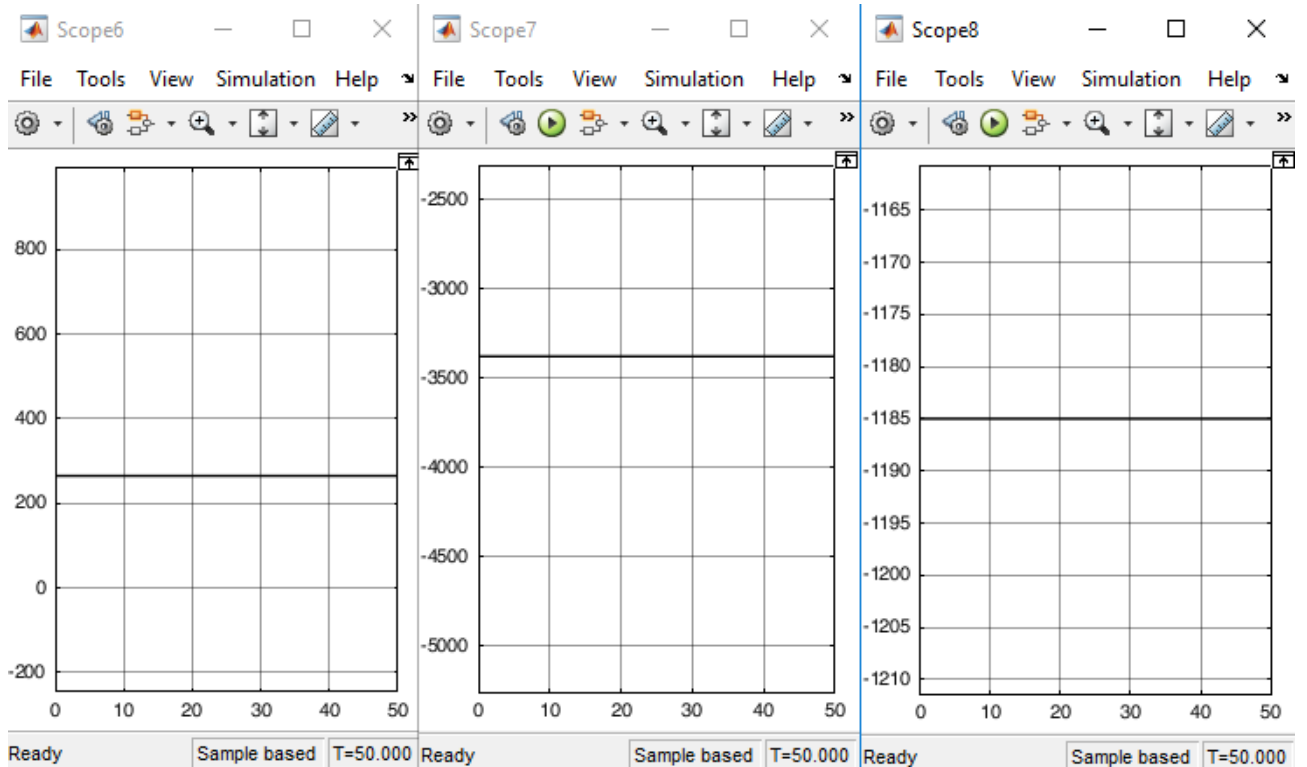


Рисунок 12 – Диаграммы токов i_d , i_q , i_v (А)

Также для тестирования введены два блока Step. Их цель заключается в определенных моменты времени изменить подаваемые на входы подсистемы значения напряжения возбуждения и момента гидротурбины.

Таким образом, в момент времени 50 секунд происходит скачок момента турбины на 10 %, а в момент 150 секунд – скачок напряжения возбуждения на 10 %.

После этих скачков модель стабилизируется, хотя переходный процесс является сильно колебательным. Изменения параметров можно проследить на рисунках 13 и 14.

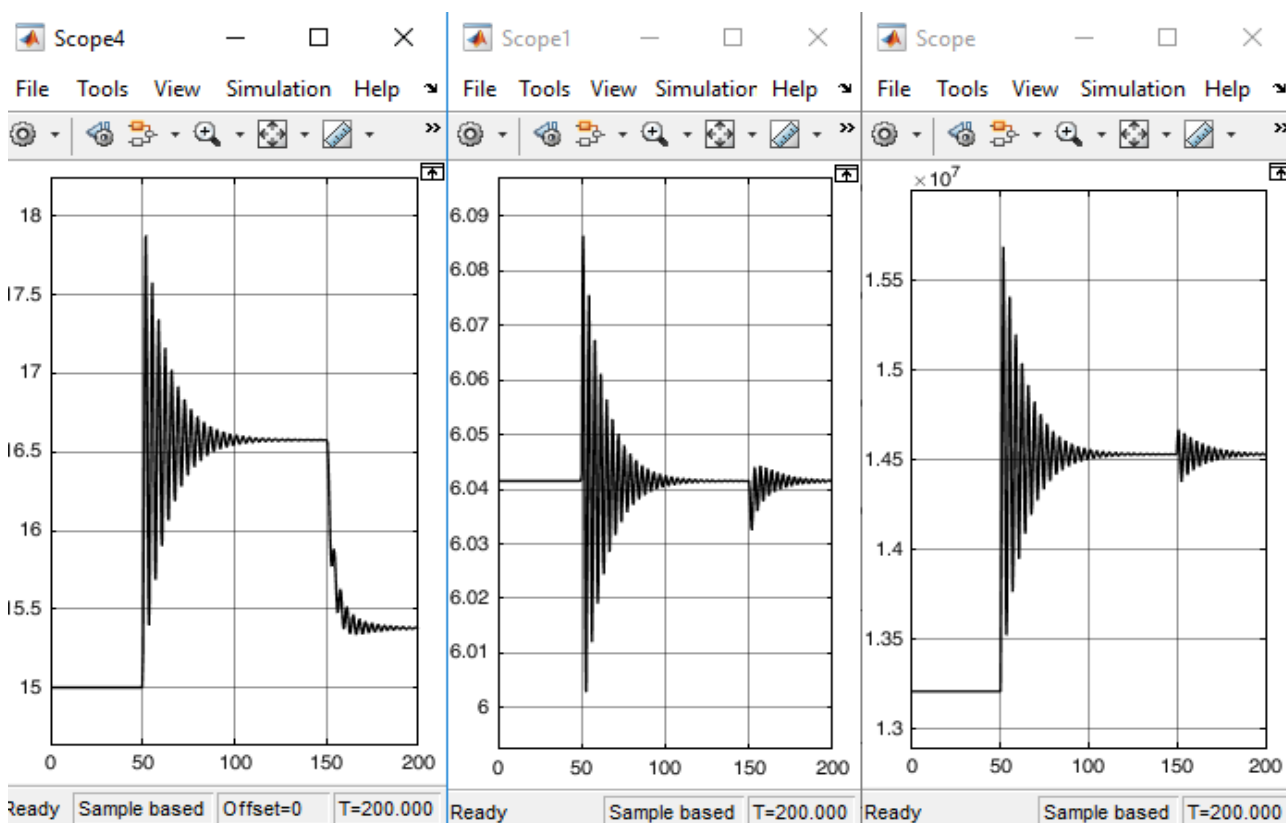


Рисунок 13 – Диаграммы угла θ (град.), угловой скорости ротора (рад/с), момента генератора (Н·м)

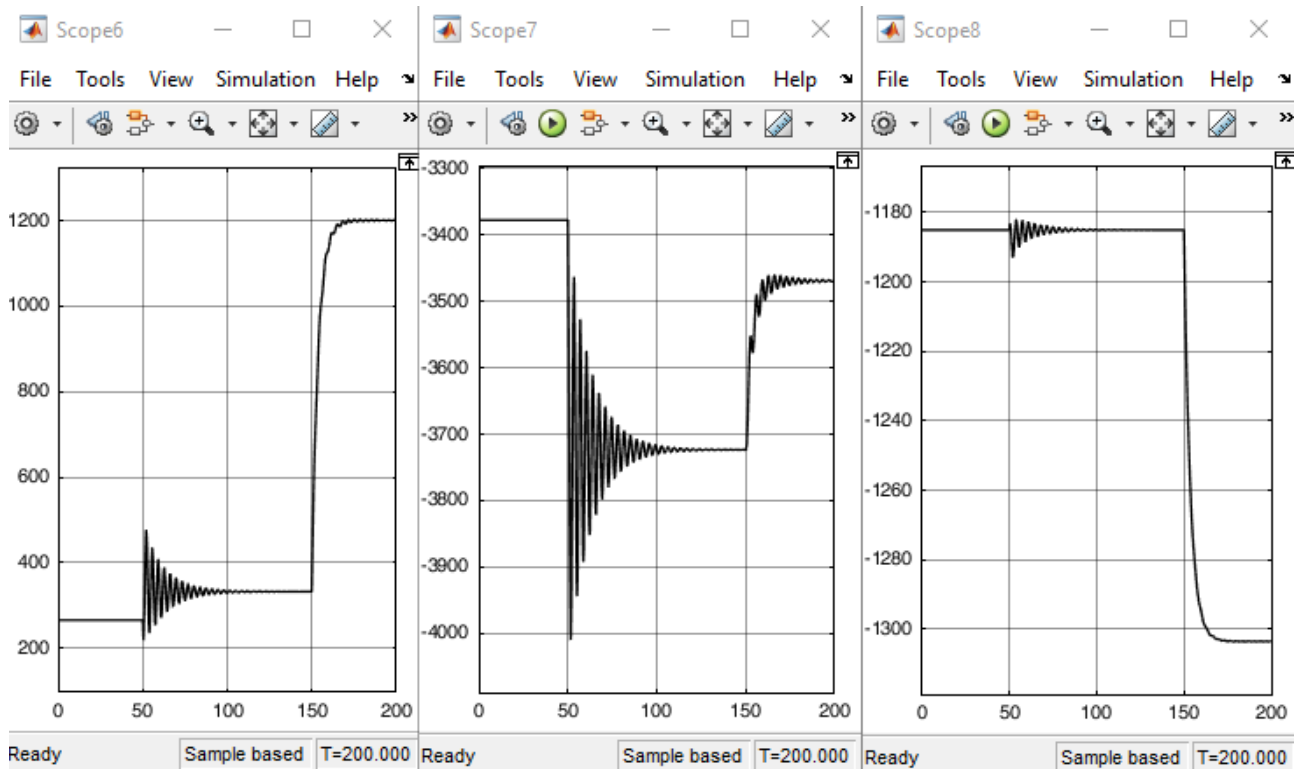


Рисунок 14 – Диаграммы токов i_d, i_q, i_v (A)

Для того, чтобы модель приобрела более удобную форму, текущая система была выделена в отдельный блок Synchronus Generator. Входами блока являются максимальное напряжение статора U_{1max} , напряжение возбуждения U_v , момент турбины M_t и угловая скорость поля статора ω_0 . В качестве выходов блока определены момент генератора M_g , угловая скорость ротора ω_0 , а также угол θ для удобства отслеживания.

Из токов i_d и i_q можно получить реактивную и активную мощности соответственно формулам (11) и (12):

$$Q = i_d \cdot U_{1max}; \quad (11)$$

$$P = i_q \cdot U_{1max}. \quad (12)$$

Данные мощности также вынесены в качестве выходов. Структура полученного блока представлена на рисунке 15.

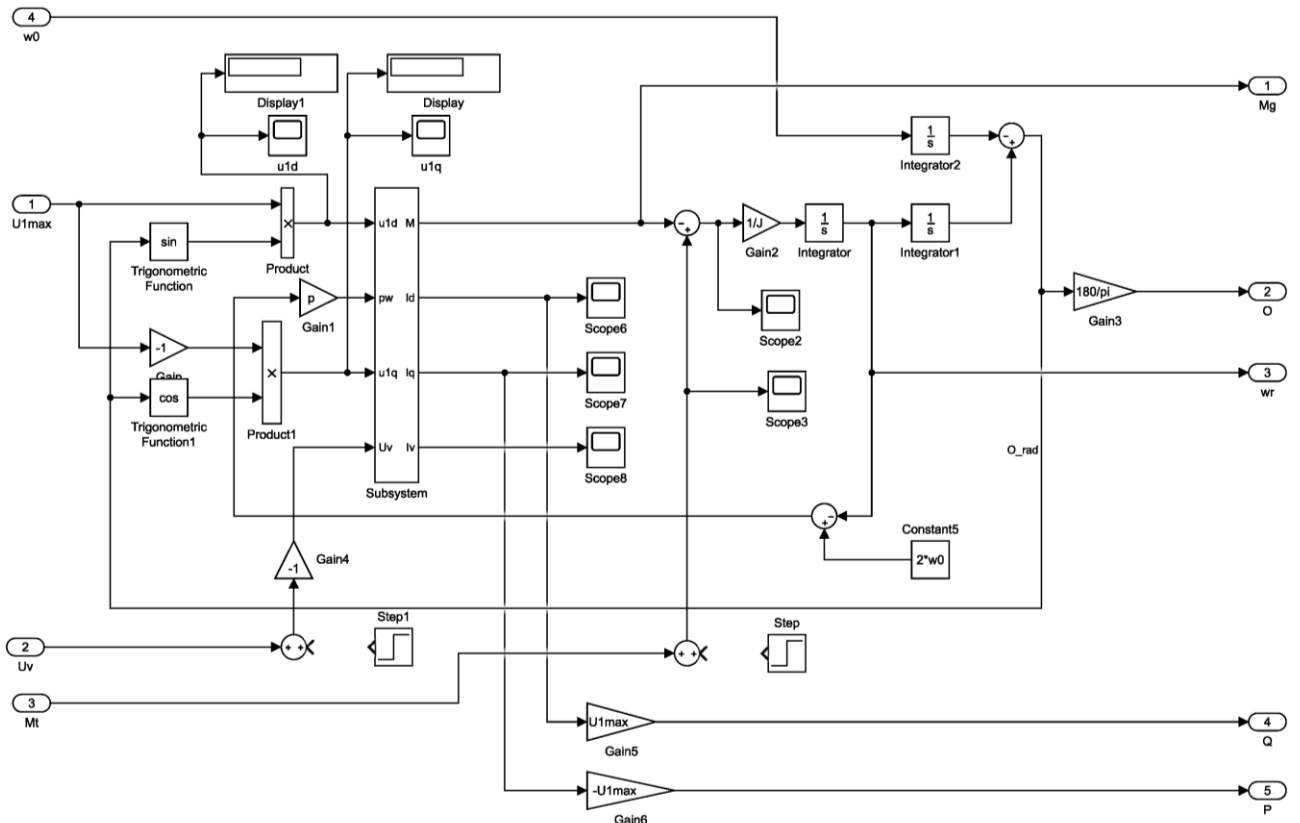


Рисунок 15 – Структура блока Synchronys Generator

2.4 Суррогатная модель электросети

Следующим этапом является добавление модели электросети. К сожалению, по изложенным в пункте 2.1 причинам, моделирование целой энергосистемы не представляется возможным. Вместо этого вводится «суррогатная» модель.

Суть её работы заключается в отклонении активной и реактивной мощности на заданную величину. Затем это отклонение уменьшается в 10^5 раз с помощью блока Gain и накапливается интегратором. Полученный сигнал от реактивной мощности подается в качестве отрицательной обратной связи на вход U_{1max} , а от активной – на вход ω_0 . Для отключения данной обратной связи предусмотрены блоки ручного переключения Manual Switch в каждом канале. Полученная модель представлена на рисунке 16.

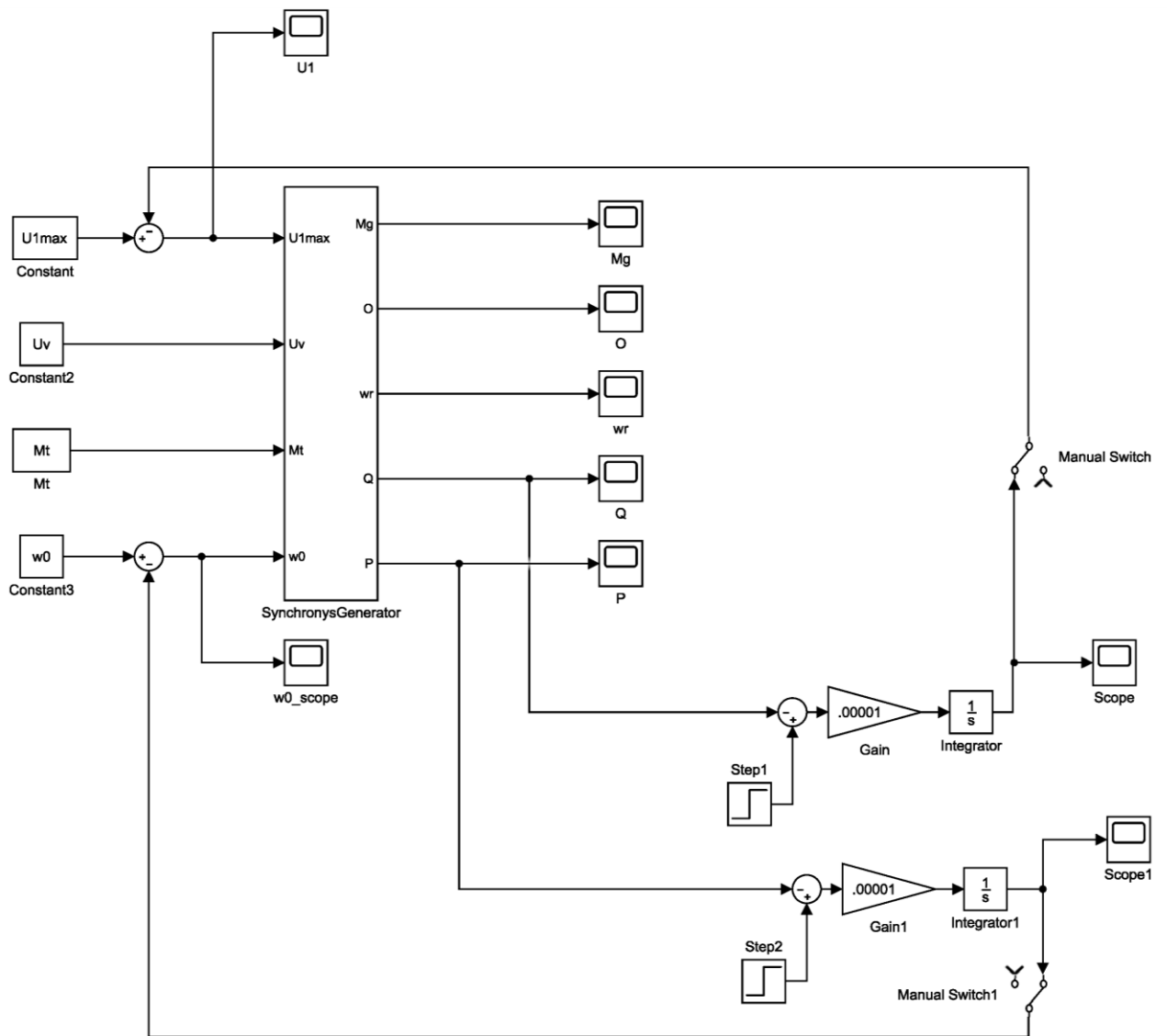


Рисунок 16 – Модель системы с имитацией энергосистемы

Отклонения по мощностям производятся не сразу, а в определенные моменты времени, для наглядности реакции системы.

Так, в момент времени 50 секунд происходит отклонение по реактивной мощности, а в момент времени 100 секунд – по активной. Реакцию системы можно проследить по диаграммам на рисунке 17.

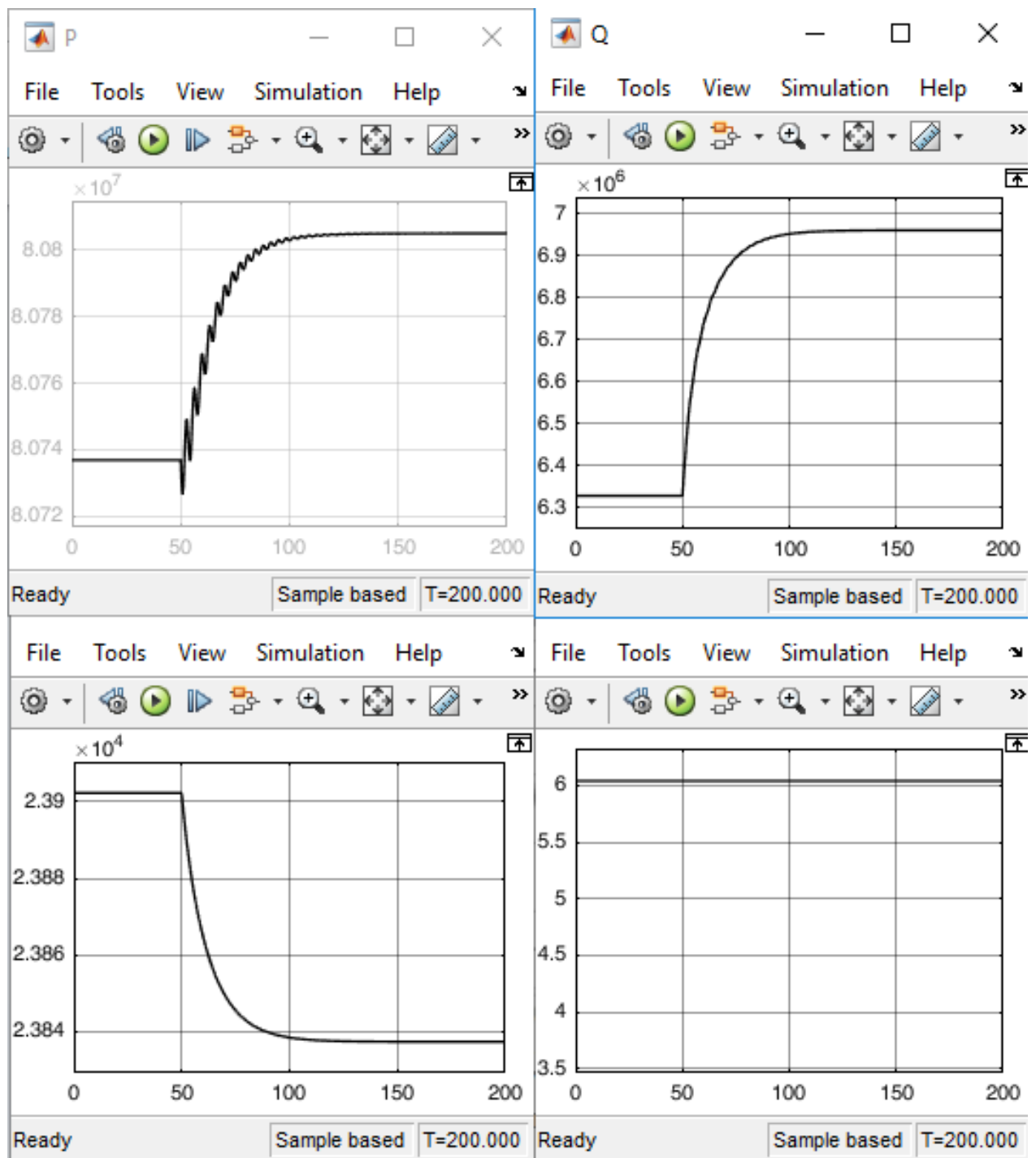


Рисунок 17 – Диаграммы изменения активной мощности (Вт), реактивной мощности (ВАР), напряжения статора (В) и угловой скорости (рад/с) при отклонении по реактивной мощности

По диаграммам на рисунке 17 можно сделать вывод, что система стабилизируется и выходит на новый уровень мощности, хотя и значительно уменьшается угловая скорость, что является негативным эффектом.

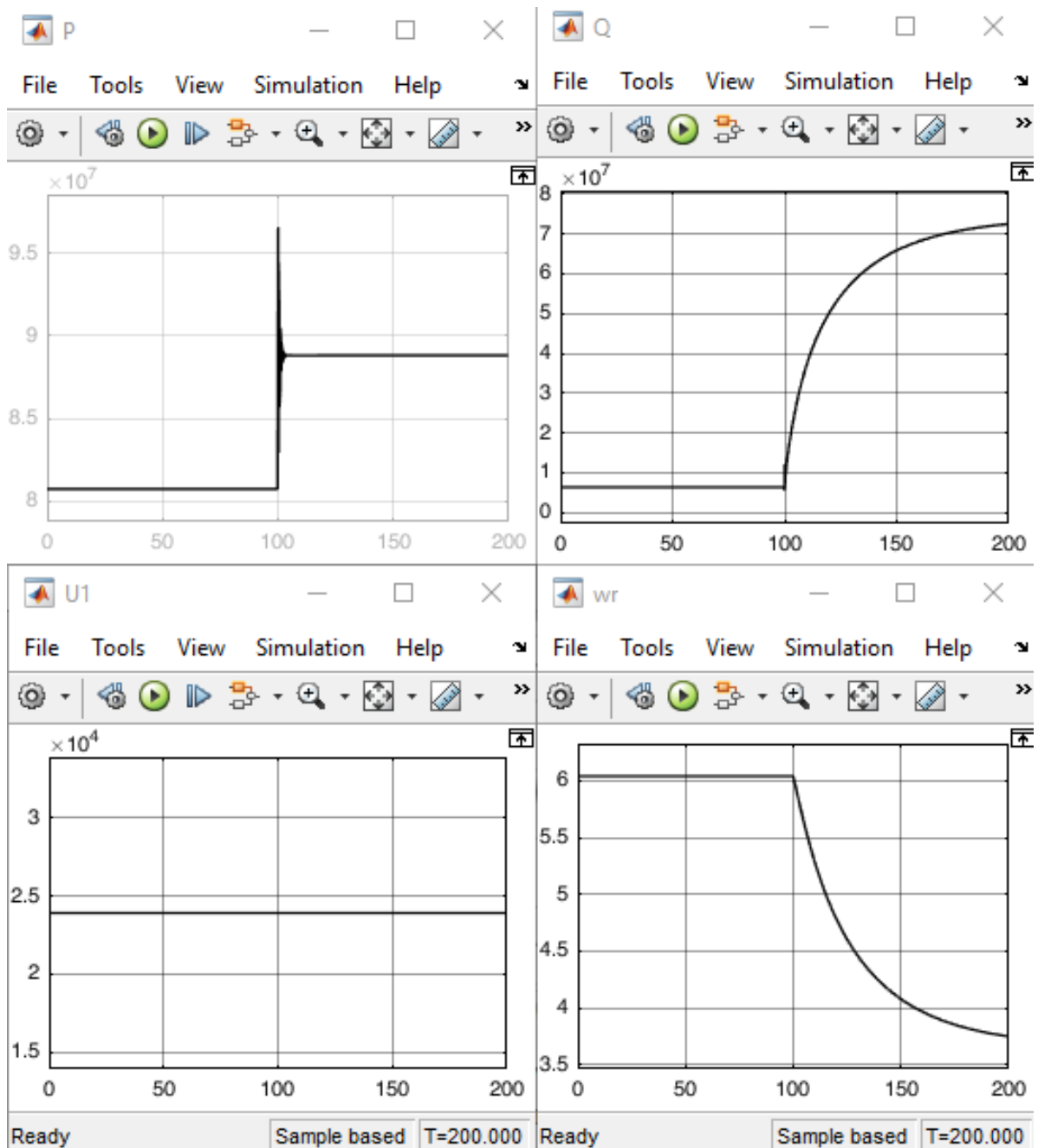


Рисунок 18 – Диаграммы изменения активной мощности (Вт), реактивной мощности (ВАР), напряжения статора (В) и угловой скорости (рад/с) при отклонении по реактивной мощности

По диаграммам на рисунке 18 можно сделать вывод, что система выходит на новый уровень выработки мощности, но при этом снижается напряжение статора, что так же является негативным эффектом.

Решением данной проблемы является введение в каналы обратной связи регуляторов по напряжению возбуждения и по моменту турбины.

2.5 Разработка замкнутых систем регулирования частоты вращения и напряжения

Для решения проблемы, описанной в предыдущем пункте, в систему внедрены два блока ПИД регуляторов PID Controller. Система приняла вид, показанный на рисунке 19.

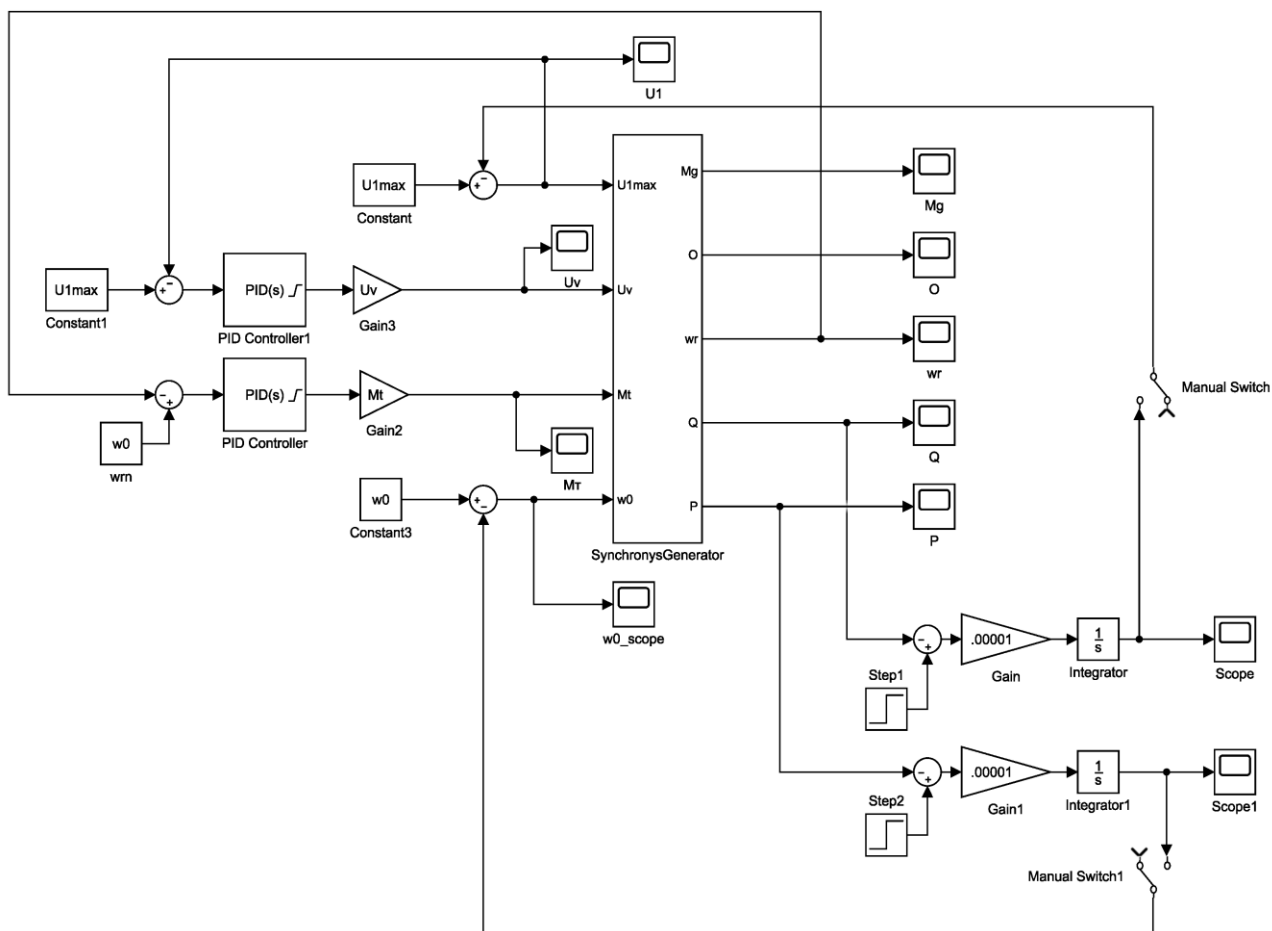


Рисунок 19 – Модель с замкнутыми системами регулирования

Для компенсации изменения напряжения статора необходимо регулировать напряжение возбуждения якоря, а для компенсации изменения угловой скорости – момент турбины. Для работы ПИД контроллера необходим сигнал ошибки, который можно получить, вычитая из уставки регулируемую величину.

В номинальном режиме на выходе ПИД регуляторов формируется сигнал равный единице, который, проходя через блок Gain, становится равен номи-

начальному значению соответствующей входной величины блока Synchronous Generator.

В случае отклонений от задания, регулируемая величина будет изменена ПИД регулятором в определенном диапазоне. Эти ограничения заданы в свойствах блока (рис. 20 и 21). Коэффициенты регуляторов подобраны с помощью встроенного настройщика pidTuner.

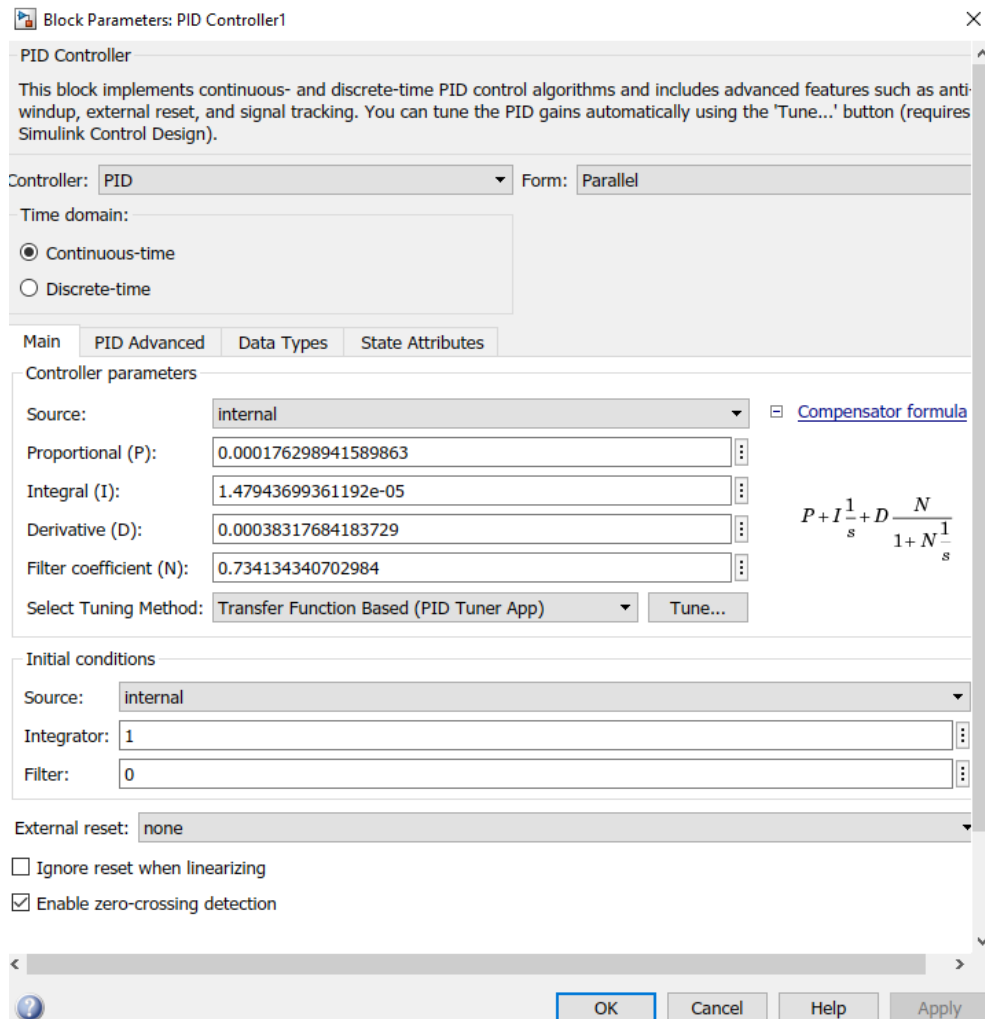


Рисунок 20 – Параметры блока PID Controller1 (начало)

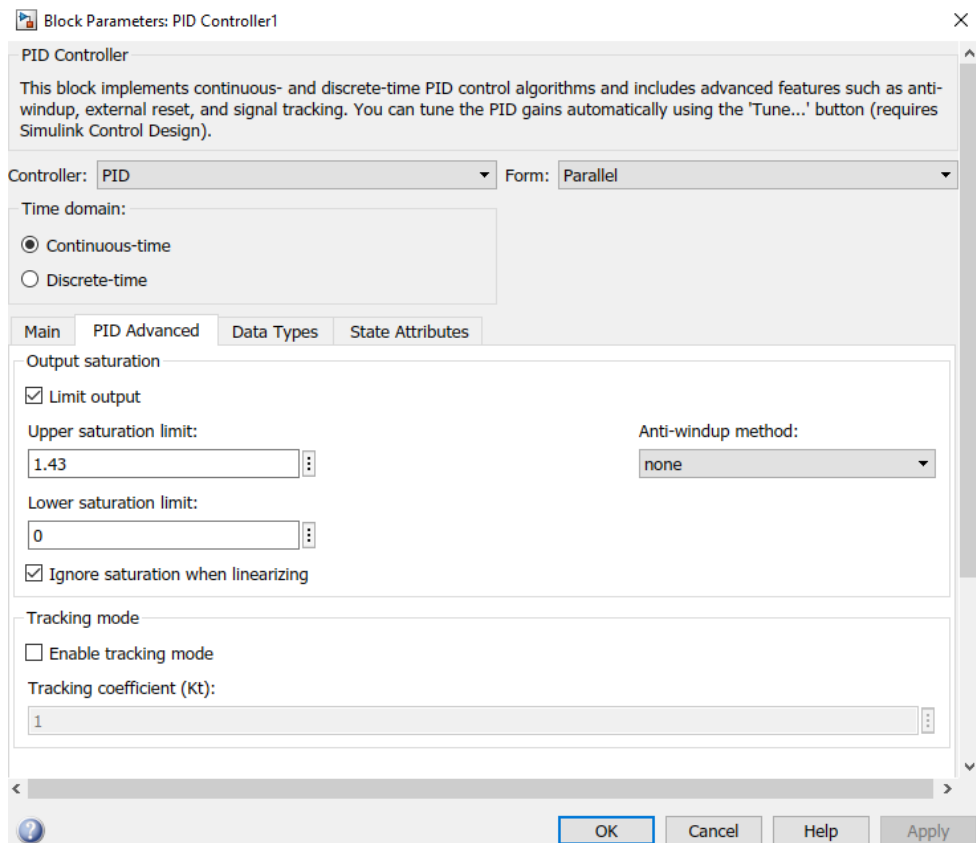


Рисунок 21 – Параметры блока PID Controller1 (продолжение)

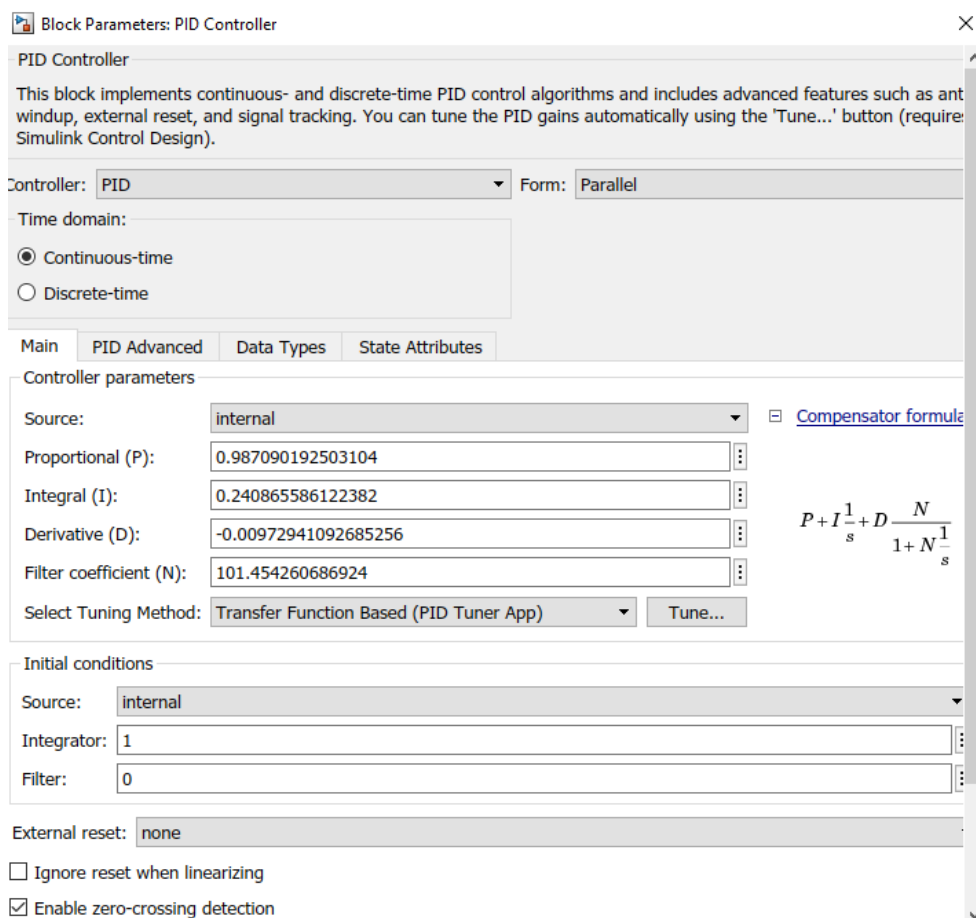


Рисунок 22 – Параметры блока PID Controller (начало)

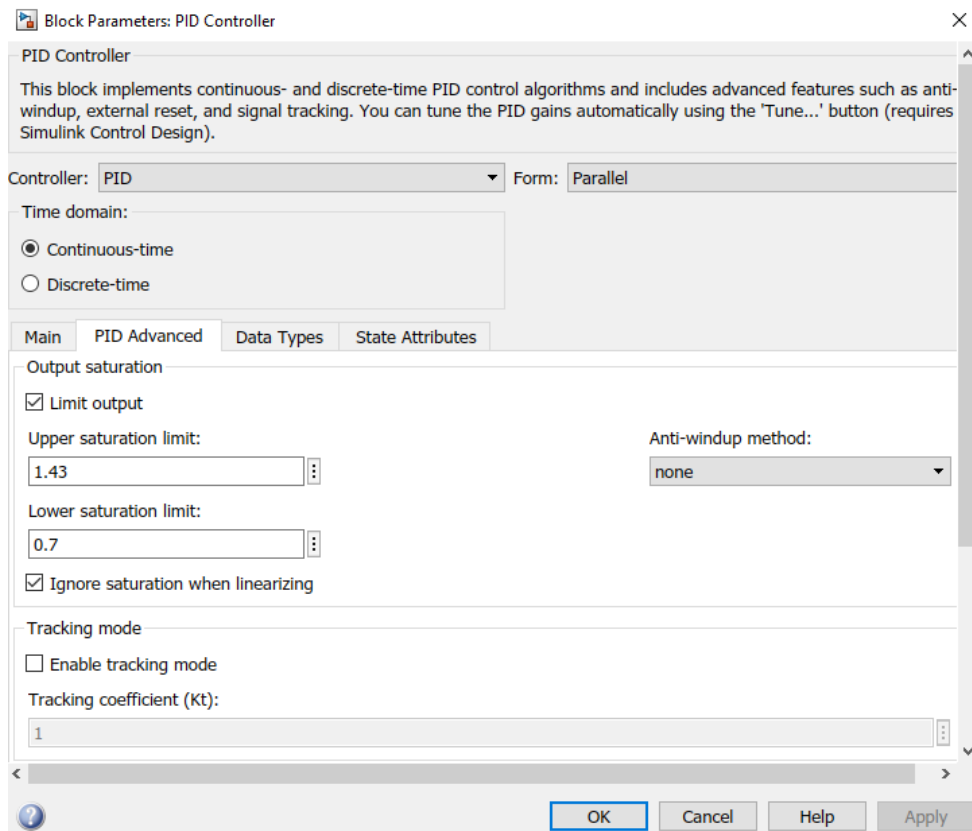


Рисунок 23 – Параметры блока PID Controller (продолжение)

На данном этапе значения регулятора не являются окончательными, так как в дальнейшем необходимо детализировать систему, например, интегрируя модель гидротурбины.

2.6 Результаты моделирования

С помощью внедрения в систему ПИД регуляторов удалось компенсировать просадки по напряжению и угловой скорости, которые возникали при отклонениях мощностей, что видно по полученным диаграммам на рисунке 22.

При моделировании отклонения по мощности производились в те же моменты времени, что и ранее: в момент времени 50 секунд происходит отклонение по реактивной мощности, а в момент времени 100 секунд – по активной.

Стоит отметить, что на данном этапе поведение модели отличается от поведения реальной системы. Причиной этого является обобщенность схемы, например, в области задания момента турбины. В данном случае необходимо также ввести в систему модель гидротурбины, направляющего аппарата и систем их управления. Эти подсистемы также придется упрощать, чтобы моделирование было способно проводиться в масштабе реального времени.

Несмотря на то, что модель нуждается в уточнении и доработке, система работоспособна, о чем говорят результаты её моделирования.

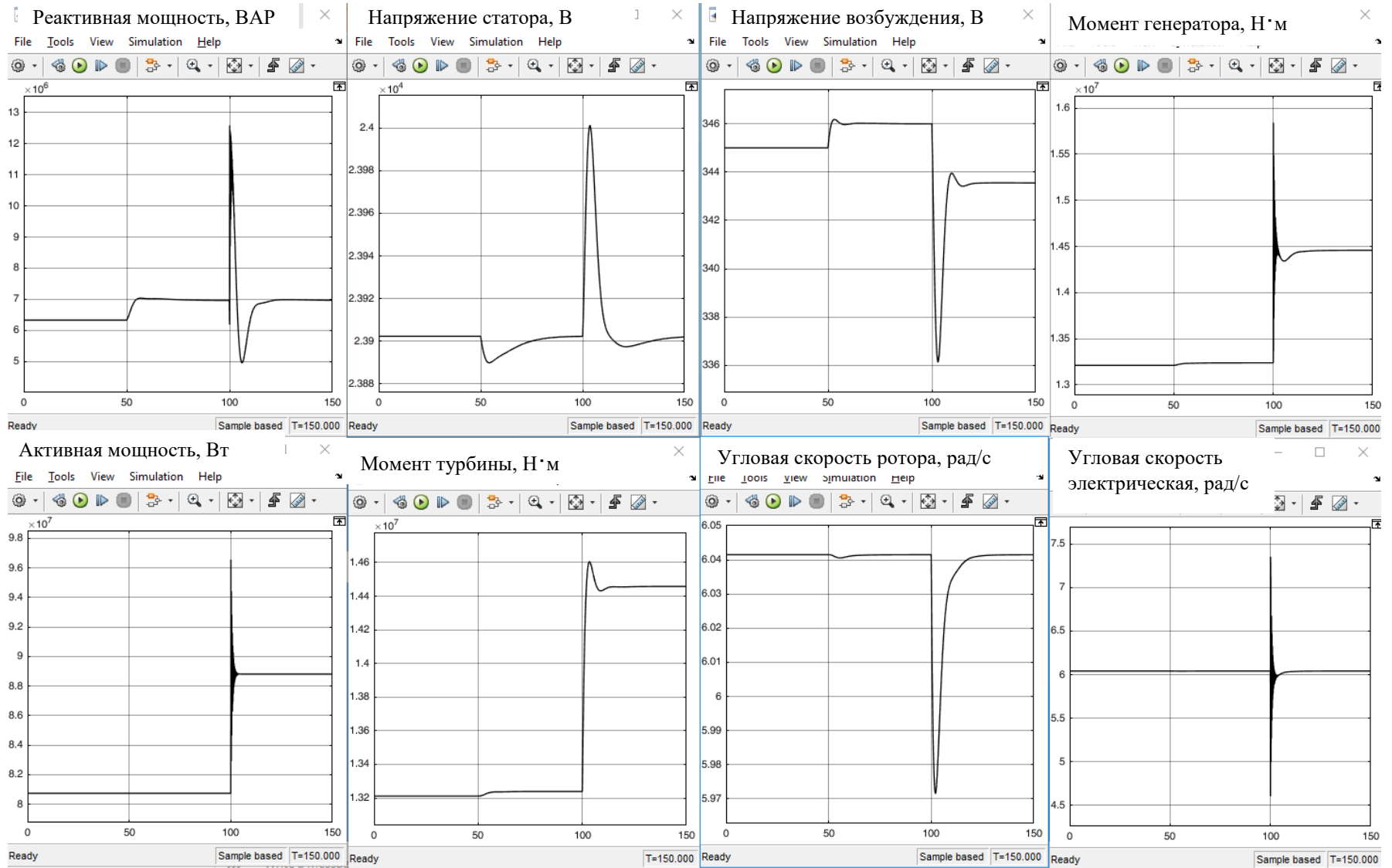


Рисунок 24 – Результаты моделирования

3 РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ПРОГРАММНОГО СИМУЛЯТОРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОАГРЕГАТОМ

3.1 Уточнение параметров модели

В ходе прохождения преддипломной практики была получена информация, с помощью которой удалось уточнить и доработать модель системы, тем самым приблизив её поведение к поведению реального объекта. Полученные недостающие ранее параметры гидроагрегата [7] приведены в таблице 4. Модифицированный программный код Matlab, необходимый для моделирования в среде Simulink, приведён в приложении А.

Таблица 4 – Дополнительные параметры гидроагрегата

Параметр	Значение
Полная мощность	94,1 МВА
Активная мощность	80,0 МВт
Напряжение статора	13,8 кВ
Ток статора	3937 А
Cos φ	0,85
Частота вращения	107,14 об/мин
Ток возбуждения	1450 А
Напряжение возбуждения	300 В
КПД	0,983
Число полюсов	56
Маховый момент, GD^2	$15 \cdot 10^6$ кг·м ²
Постоянная времени T_{d0}	7 с
Индуктивные сопротивления:	
X_d	1,05 о.е.
X_q	0,69 о.е.
Допустимое отклонение частоты вращения от номинальной	5 %
Допустимое отклонение напряжения возбуждения от номинального	5 %
Скорость открытия/закрытия НА	4 процента в секунду

3.2 Разработка модели гидротурбины

Ранее в модели для приведения в движение вала генератора в движение использовался блок ПИД-регулятора, который формировал на своем выходе момент. Чтобы приблизить к реальности поведение модели необходимо также моделировать гидротурбину.

Для описания работы гидротурбины можно использовать формулу её мощности (13) [8]:

$$N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta, \quad (13)$$

где N – мощность, развиваемая турбиной, Вт;

$\rho=1000$ кг/м³ – плотность воды;

$g=9,81$ м/с² – ускорение свободного падения;

Q – расход, м³/с;

H – напор, м;

$\eta=0.92$ – коэффициент полезного действия.

Учитывая значения ρ и g , а также, что 1 кВт = 1000 Вт, получим:

$$N = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta, \quad (14)$$

где N – мощность, кВт.

Если принять напор H и КПД η постоянными, то мощность турбины N будет прямо пропорционально зависеть только от расхода Q .

Для поддержания постоянного КПД необходимо выполнение комбинаторной зависимости. Она задаёт соответствие между степенью открытия НА и углом поворота лопастей РК [8]. Расчётная комбинаторная зависимость для гидротурбины ПЛ30-В-630 приведена на рисунке 25 [9].

Напор находится как разность между верхним и нижним бьефами и изменяется в течение длительного времени. Для упрощения модели можно принять напор равным номинальному $H=26,1$ м.

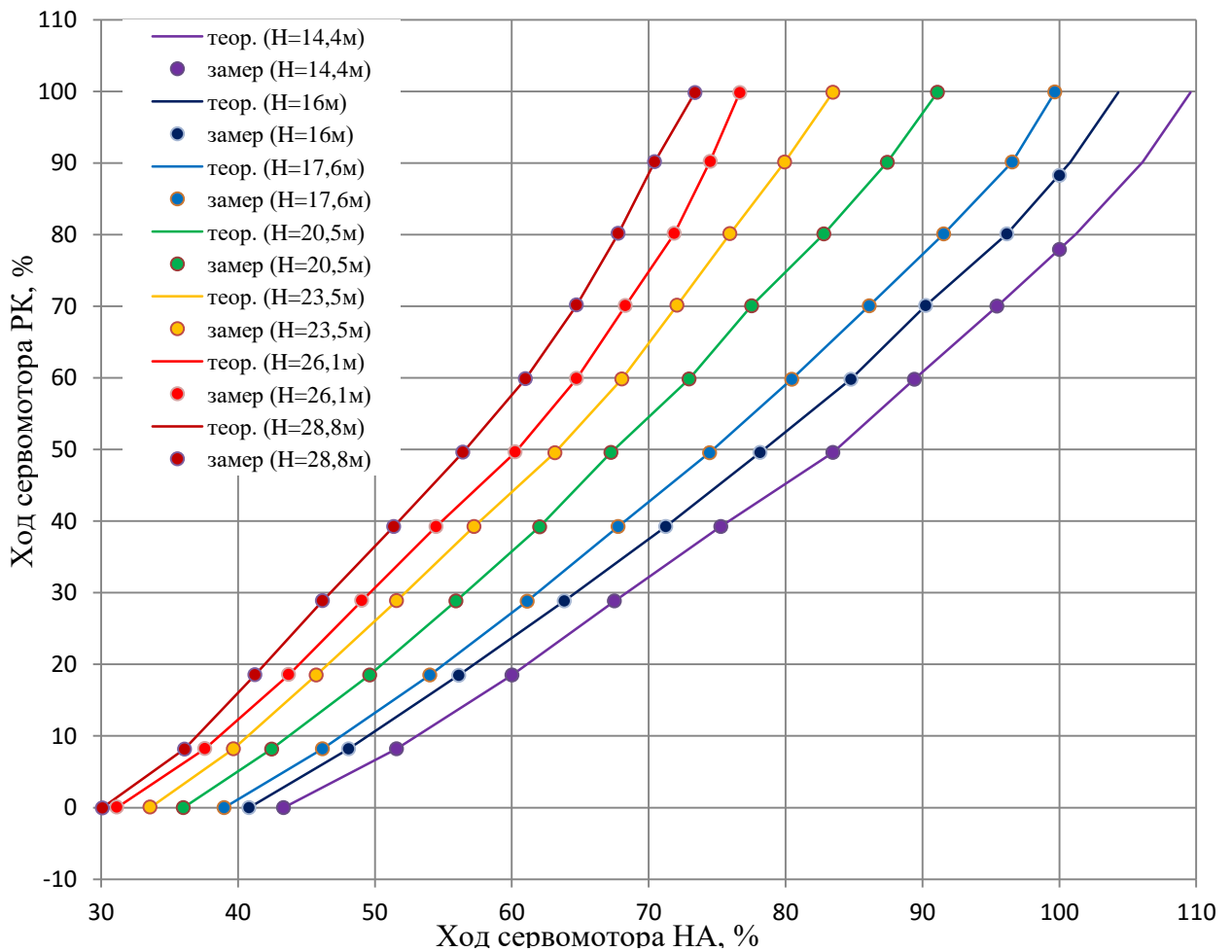


Рисунок 25 – Комбинаторная зависимость

Произведем аппроксимирование комбинаторной зависимости при напоре $H=26,1$ м с помощью Matlab:

```

NApr=[31.14 37.57 43.68 49.03 54.46 60.23 64.72 68.3 71.86 74.49 76.66];
RKpr=[0.1 8.3 18.63 28.96 39.28 49.71 59.97 70.15 80.25 90.26 99.9];
p=polyfit(NApr,RKpr,2);
f=polyval(p,NApr);
plot(NApr,RKpr,'o',NApr,f);

```

В результате выполнения кода получена квадратичная зависимость (15), которая будет реализована в модели.

$$y(x) = 0,0241 \cdot x^2 - 0,4959 \cdot x - 6,7333, \quad (15)$$

где y – ход сервомотора РК, %;

x – ход сервомотора НА, %.

Как видно по рисунку 26, аппроксимированная кривая довольно точно соответствует точкам комбинаторной характеристики.

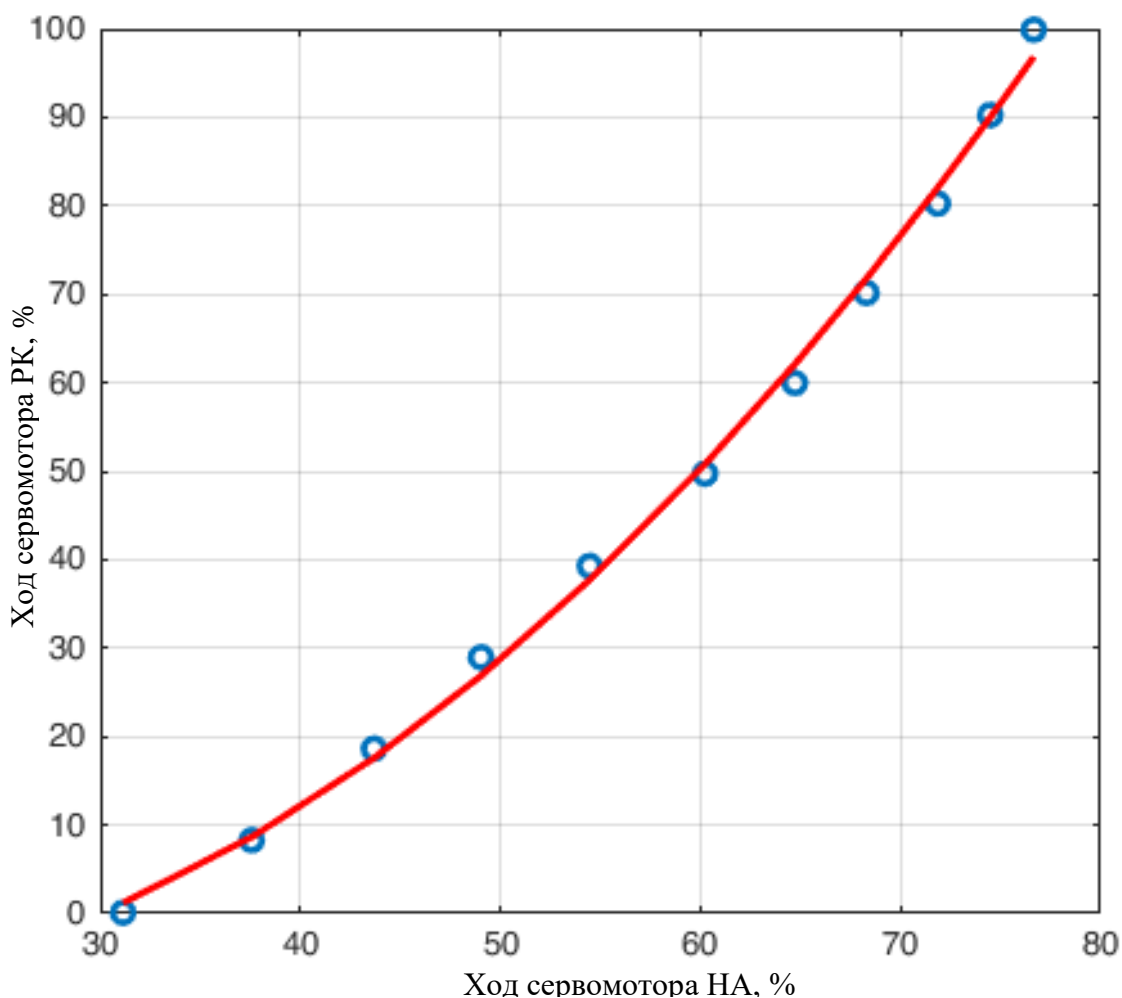


Рисунок 26 – Аппроксимированная комбинаторная зависимость

Регулировать расход можно, управляя направляющим аппаратом [8]. То есть, определенный процент хода сервомотора НА соответствует конкретному расходу, при условии, что напор постоянный. К сожалению, подобной зависимости в документации НБ ГЭС обнаружено не было. Но, тем не менее, можно предположить, что зависимость линейна.

Тогда, по расходной характеристике (рисунок 27), можно сказать, что расход при максимальной мощности соответствует максимально открытому направляющему аппарату. Ограничение НА задано комбинаторной зависимостью. Следовательно, зависимость между открытием НА NA и расходом Q можно выразить через коэффициент K_{NA_Q} :

$$K_{NA-Q} = \frac{Q}{NA} = \frac{345,32}{76,33} = 4,524 \quad (16)$$

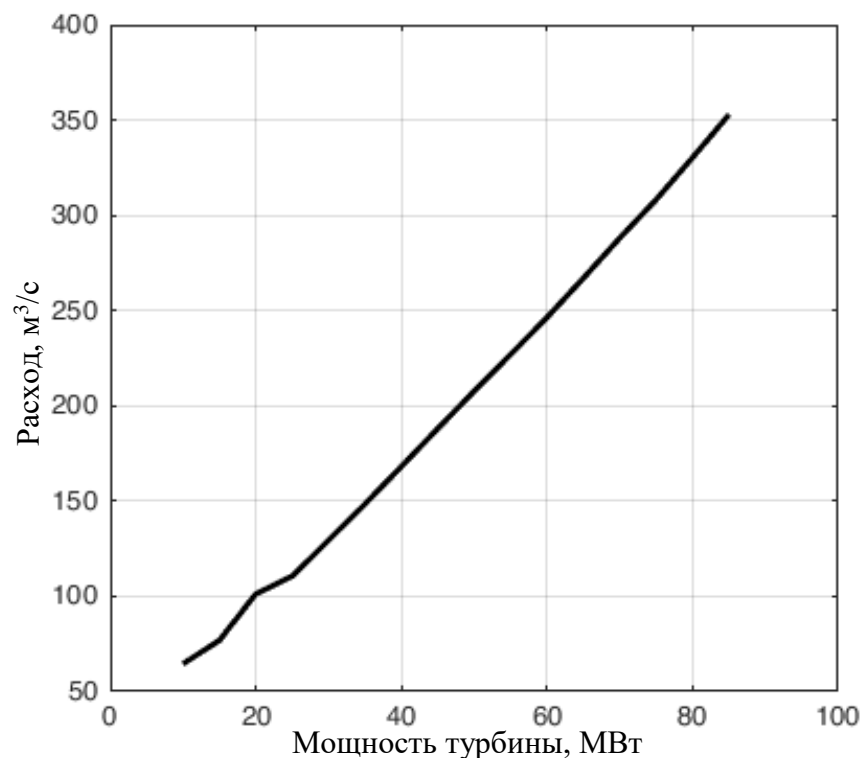


Рисунок 27 – Расходная характеристика турбины

Тогда номинальное открытие НА NA_n :

$$NA_n = \frac{Q_n}{K_{NA-Q}} = \frac{343,3}{4,524} = 75,88 \% \quad (17)$$

На основе вышеперечисленных данных был составлен блок, выполняющий роль модели гидротурбины (рисунок 28).

В данном блоке также учтена постоянная скорость открытия (закрытия) направляющего аппарата. Она реализована с помощью ограничения сигнала управления до единицы и интегратора с подобранной постоянной времени, обеспечивающий накопление сигнала со скоростью в четыре процента в секунду. На выходе интегратора формируется значение текущей степени открытия НА, которое также ограничено в соответствии с комбинаторной зависимостью.

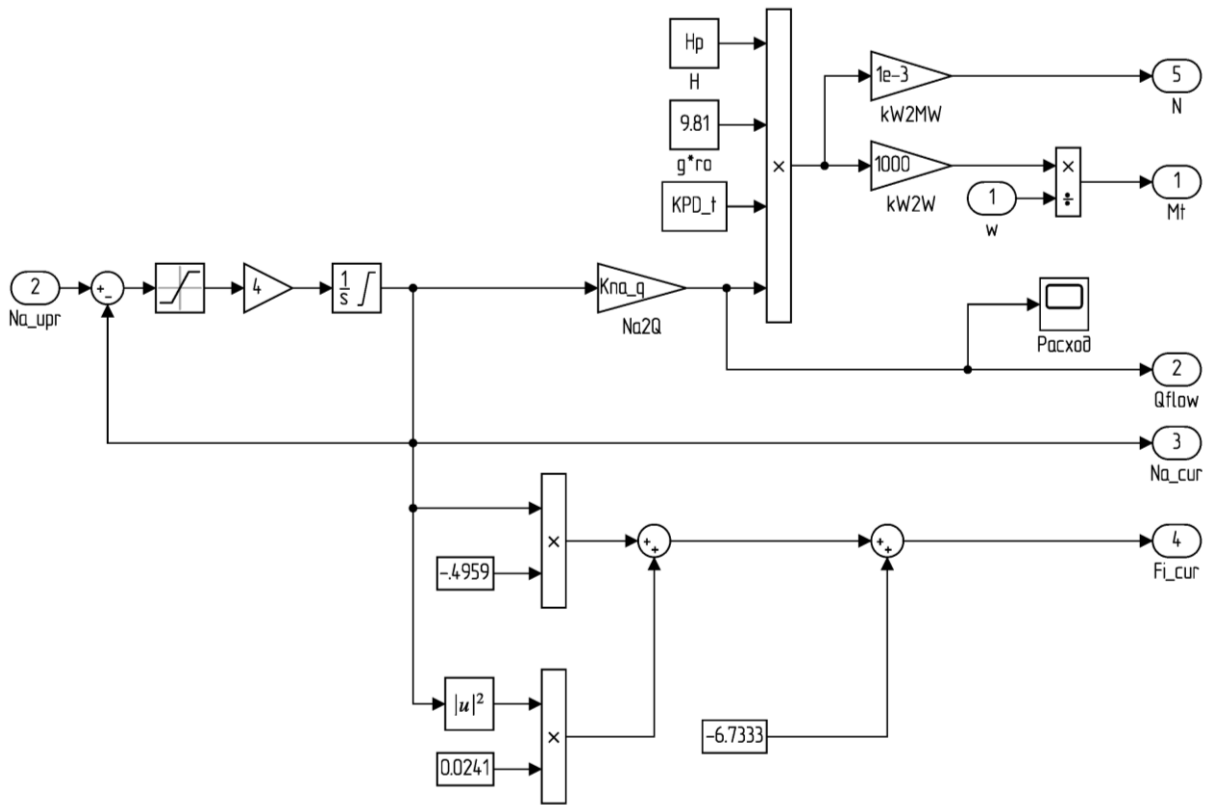


Рисунок 28 – структура блока «Турбина»

Затем в верхней части происходит преобразование степени открытия НА в расход с помощью блока Gain, который реализует умножение сигнала на коэффициент K_{NA_Q} . Блоки, находящиеся далее, реализуют формулу 14, что позволяет нам получить мощность в киловаттах. Чтобы получить момент, необходимый для передачи в блок генератора, были добавлены блоки в соответствии с формулой 18 [8]:

$$M_t = \frac{N}{\omega_r}, \quad (18)$$

где M_t – момент турбины, Н·м;

N – мощность турбины, Вт;

ω_r – угловая скорость ротора генератора, рад/с.

В нижней части реализовано преобразование степени открытия НА в поворот лопастей РК, согласно формуле 15.

3.3 Система управления гидроагрегатом

Дальнейшее развитие модели в систему управление не представляется возможным без дополнительных программных средств. Было решено использовать инструментальный программный комплекс промышленной автоматизации CODESYS [10], применяемый для программирования логических контроллеров отечественной фирмы «Овен». Причинами выбора именно этого комплекса программ является то, что он содержит в себе все необходимые инструменты для реализации системы управления.

На реальном объекте для регулирования параметров гидроагрегата применяются программируемые логические контроллеры. Для приближения к этому можно использовать эмулятор ПЛК, предоставляемый в пакете программ CODESYS. Также имеется удобная среда программирования для создания программы и её последующей загрузкой в эмулятор. Поддерживаются все пять языков программирования стандарта МЭК 61131-3.

Связь с объектом управления осуществляется посредством технологии OPC (Open Platform Communications), поддерживаемой как эмулятором контроллера, так и средой Matlab Simulink. Сервер для реализации этой технологии также входит в пакет программ CODESYS.

Также CODESYS располагает средствами для создания человеко-машинного интерфейса. С его помощью можно реализовать сбор и отображение информации о состоянии системы, а также управлять ей. Следовательно, полученную систему можно назвать SCADA-системой.

SCADA (supervisory control and data acquisition, диспетчерское управление и сбор данных) - программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления.

С учётом вышеперечисленного, в разработанную ранее модель был внесён ряд изменений. В первую очередь, была внедрена турбина. С её помощью появилась возможность регулировать активную мощность генератора и частоту вращения ротора, управляя направляющим аппаратом.

Всё управление и регулирование реализовано на базе виртуального ПЛК, аналогично с реальной системой, применяемой в НБГЭС. Исключение составляет автоматический регулятор возбуждения (АРВ), реализованный на базе AVR микроконтроллера и тиристорной системы самовозбуждения. Поэтому АРВ реализован в качестве ПИД-регулятора внутри самой модели, но задание ему передает контроллер. Также на базе виртуального ПЛК реализованы регуляторы активной и реактивной мощности.

Модифицированная модель представлена на рисунке 29. Для обеспечения взаимодействия с контроллером применяются блоки OPC Config, OPC Read и OPC Write. С помощью блока OPC Config выполняется первоначальная настройка связи модели с OPC-сервером, вывод возможных ошибок чтения или записи, обрыва связи. Также он обеспечивает работу модели в масштабе реального времени.

Блок OPC Read позволяет считывать значения выбранных переменных из OPC-сервера. Использовать эти значения можно с помощью блока Demux, выполняющего роль демультиплексора, разделяющего вектор на отдельные сигналы. Сигналы, считываемые из OPC-сервера приведены ниже в таблице 5.

Таблица 5 – Описание входных сигналов модели

Имя переменной	Назначение
Q_dev_enable	Включить режим небаланса реактивной мощности
P_dev_enable	Включить режим небаланса активной мощности
U1max	Уставка напряжения статора, В
Uv_upr	Коррекция управления регулятора возбуждения
Na_upr	Уставка НА, %
w0	Уставка частоты вращения, рад/с
P_shift	Задание небалансной активной мощности, Вт
Q_shift	Задание небалансной реактивной мощности, ВА

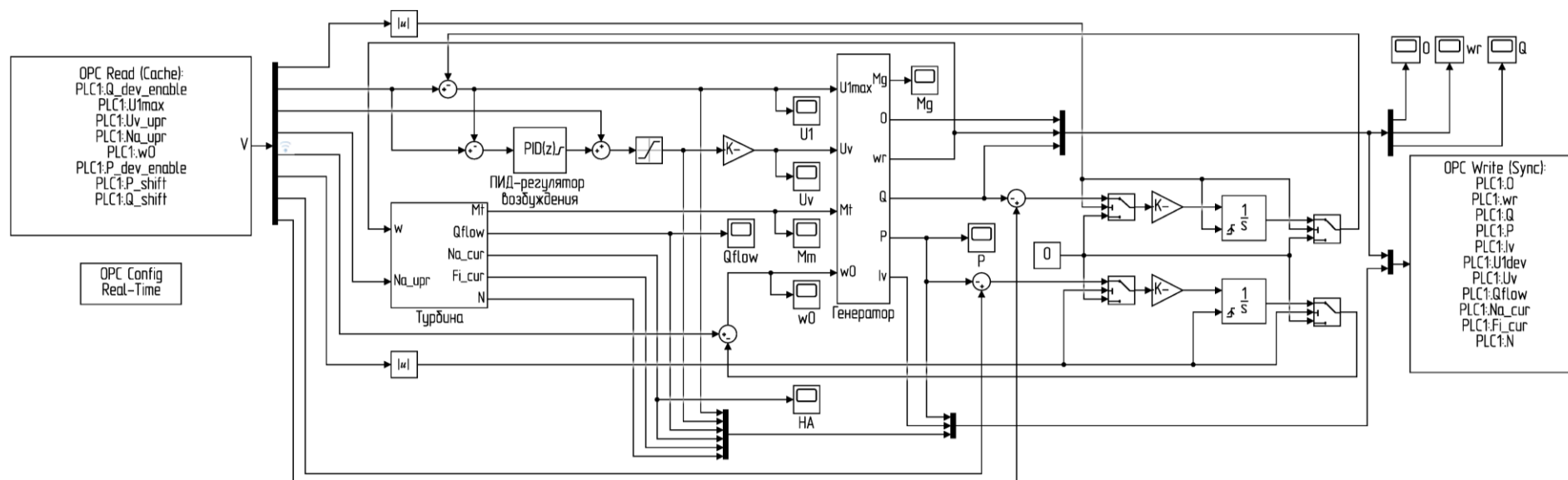


Рисунок 29 – Модифицированная модель

В свою очередь, блок OPC Read предназначен для сбора сигналов и передачи их в OPC-сервер. Они играют роль датчиков, подключенных к ПЛК. Описание передаваемых сигналов приведено в таблице 6.

Таблица 6 – Описание выходных сигналов модели

Имя переменной	Назначение
O	Угол нагрузки, град
wr	Угловая скорость ротора, рад/с
Q	Реактивная мощность генератора, ВАР
P	Активная мощность генератора, Вт
Iv	Ток возбуждения, А
U1dev	Напряжение статора, В
Uv	Напряжение возбуждения, о.е.
Qflow	Расход, м ³ /с
Na_cur	Положение НА, %
Fi_cur	Положение лопастей РК, %
N	Мощность гидротурбины, Вт

Человеко-машинный интерфейс представлен на рисунках 29 и 30. Основной экран представляет собой главный пульт управления. На нём отображаются текущие значения переменных системы, собранных из модели Simulink. Обозначения графических элементов соответствуют именам переменных (см. таблицы 5 и 6) и их величинам измерения.

Стрелочные индикаторы отображают основные параметры системы. Индикатор 1 отображает текущее положение лопаток РК в процентах; 2 – текущее положение НА в процентах; 3 – текущую угловую скорость вала ротора, рад/с; 4 – напряжение возбуждения, В; 5 – ток возбуждения, А.

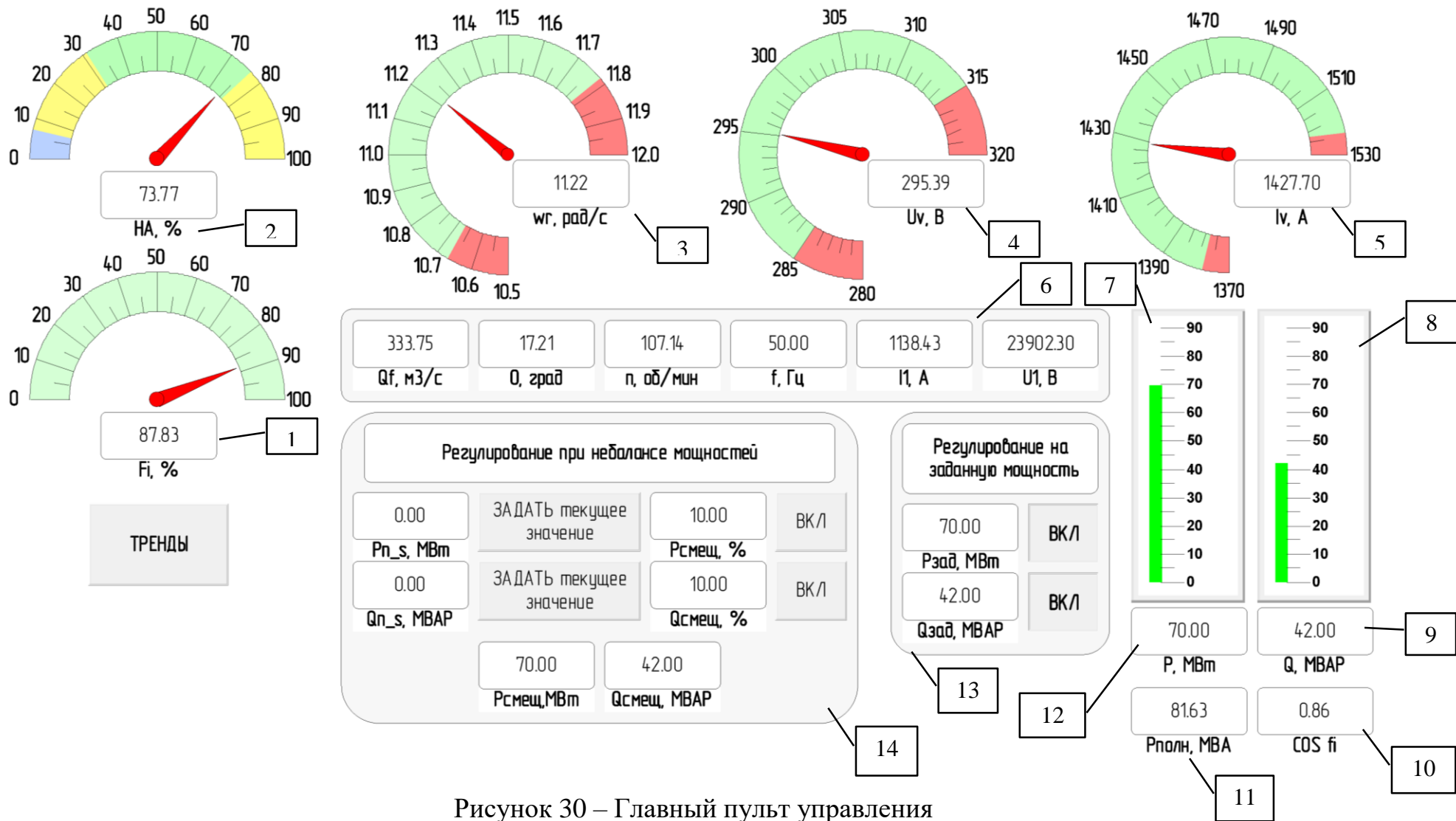
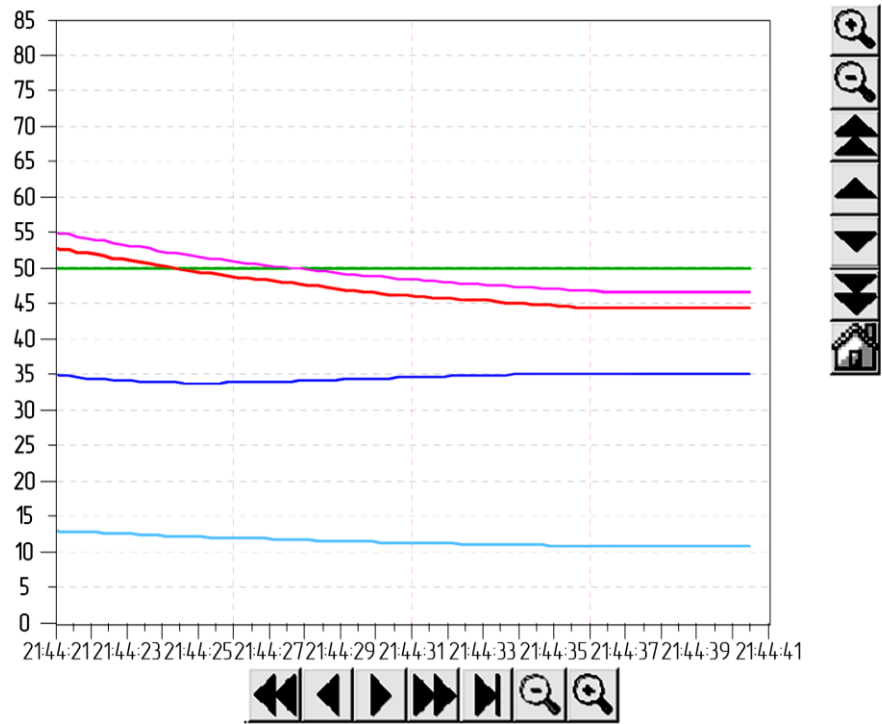
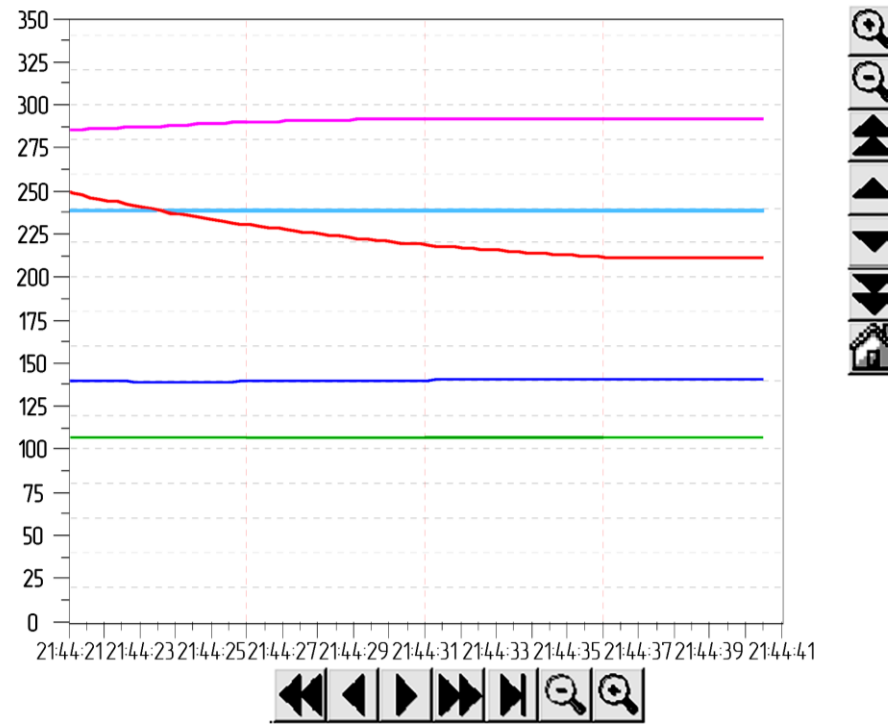


Рисунок 30 – Главный пульт управления



43.57	45.87	35.08	10.61	50.00
P, МВт	HA, %	Q, МВАР	O, град	f, Гц



207.54	291.34	1407.69	23902.30	107.13
Qf, м3/с	Uv, В	Iv, А	U1, В	n, об/мин
		*10	*100	

ГПУ

Рисунок 31 – Тренды

Остальные параметры, за исключением мощностей, сведены в колонку 6. Активная мощность отображается в индикаторе 12 и шкале 7, а реактивная – в индикаторе 9 и шкале 8. Также рядом с мощностями отображены текущие значения $\cos(\varphi)$ и полной мощности в индикаторах 10 и 11 соответственно.

Колонка управления 13 позволяет задать желаемое значение активной и реактивной мощности и включить регулирование по выбранной мощности. Данная колонка реализует режим работы гидроагрегата на энергосистему бесконечной мощности.

Колонка управления 14 позволяет моделировать возникновение небаланса мощностей. Причем величину небаланса необходимо задать вручную. Для того, чтобы эта колонка была работоспособна, в модели были заменены блоки ручного переключения Manual Switch на управляемые переключатели Switch.

Кнопка «Тренды» закрывает текущий экран и открывает экран с диаграммами изменения измеряемых параметров системы. Список параметров, их текущее значение и цветовое обозначение приведены под трендами. Параметры сгруппированы таким образом, чтобы за ними было удобно наблюдать, используя всего две системы координат в единичном масштабе. Исключение составляют величины тока возбуждения I_v и напряжения статора U_1 . Их масштаб указан ниже.

Возле трендов также есть горизонтальные и вертикальные панели инструментов, позволяющие изменять масштаб осей и выполнять перемещение по диаграммам. Кнопка «ГПУ» возвращает оператора к экрану главного пульта управления.

Управление моделью, регулирование её параметров, сбор и обработка информации с датчиков реализованы на базе эмулятора ПЛК CODESYS SP PLCWinNT V2.4 (рис. 32). В него через протокол TCP/IP загружается скомпилированная средой разработки CODESYS программа.

Основная часть программы для ПЛК написана на языке программирования ST (Приложение Б). Регуляторы мощности и частоты написаны на языке SFC.

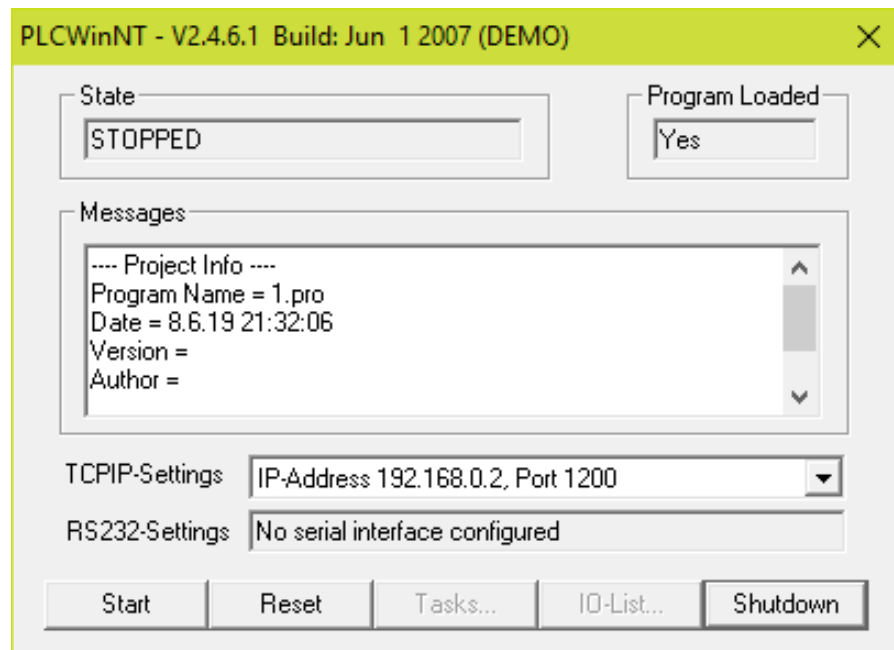


Рисунок 32 – Эмулятор ПЛК

Вначале задаются глобальные переменные, доступные для всех создаваемых подпрограмм. Также все глобальные переменные настроены таким образом, чтобы они были доступны для OPC-сервера и, следовательно, модели. Для большей читаемости кода, переменные разделены на несколько групп с помощью комментариев. Таким образом, часть кода с входными и выходными сигналами приведена ниже:

```

VAR_GLOBAL
(*Input signals*)
  Qflow, Na_cur, Fi_cur, N, wr, O, Q, P, U1dev, Uv, Iv: REAL;
(*Output signals*)
  Na_upr, U1max, Un, w0: REAL;
  P_dev_enable, Q_dev_enable: BOOL := FALSE;
  P_shift, Q_shift: REAL := 0;

```

Названия и назначение переменных было описано ранее в таблицах 5 и 6. Далее производится объявление переменных, необходимых для работы ПИД-регуляторов.

```

Na_man: REAL := 75.88; (*Значение задания НА в ручном режиме*)
Na_offset: REAL := 0; (*смещение задания НА в ручном режиме*)
Na_upr1, Na_upr2: REAL; (*сигналы управления НА для двух регуляторов*)
Pn, P_zad: REAL := 7.1421E7; (*По умолчанию мощность номинальная*)
Uv_upr, Uv_man: REAL; (*задание Напряжение возбуждения*)
Qn, Q_zad: REAL := 4.5258E7; (*По умолчанию мощность номинальная*)

```

Последняя группа глобальных переменных используется для обеспечения работы графического интерфейса, а именно кнопок управления и установки задания мощности с помощью текстовых блоков.

```
(*Buttons*)
  P_zad_M:REAL:=71.421; (*задание активной мощности для колонки 13*)
  Q_zad_M:REAL:=45.258; (*задание реактивной мощности для колонки 13*)
  COSf,Pfull,I1:REAL; (*объявление переменных для cosφ, полной мощности и линейного тока*)
  Q_reg_zad,P_reg_zad:BOOL:=FALSE; (*кнопки включения регулирования мощности*)
  Q_dev_perc,P_dev_perc:REAL:=10; (*смещения мощностей в процентах для колонки 14*)
  P_dev_enable_b,Q_dev_enable_b:BOOL:=FALSE; (*кнопки включения небаланса мощностей для колонки 14*)
  Qn_s,Pn_s:REAL:=0; (*переменные задания мощностей для колонки 14*)
  P_set_curr,Q_set_curr:BOOL:=FALSE; (*кнопки «ЗАДАТЬ текущее значение» для колонки 14*)
END_VAR
```

Основная программа ПЛК начинает свою работу с задания номинального напряжения статора U_n и вычисления на его основе максимального напряжения статора. Также здесь производится задание номинальной частоты ротора. После этого вызывается подпрограмма, представляющая собой ПИД-регулятор частоты вращения.

Далее выполняется перевод введенных значений мощностей в колонке 13 из мегаватт в ватты; производится вычисление полной мощности, величины $\cos(\varphi)$ и линейного тока.

```
PROGRAM PLC_PRG
Un:=13800;
U1max:=SQRT(3)*Un;
w0:=11.22;
PID_Na; (*Регулятор частоты вращения*)
P_zad:=P_zad_M*1E6; (*Перевод задания мощности на ГПУ из МВт в Вт*)
Q_zad:=Q_zad_M*1E6;
Pfull:=SQRT(P*P+Q*Q); (*Полная мощность*)
COSf:=P/Pfull;
I1:=P/(3*U1dev*COSf); (*Ток статора*)
```

Затем реализована работа кнопок управления на экране оператора. Важно отметить, что в коде учтена защита от одновременного включения режимов регулирования мощности по заданию и режима небаланса. Например, если нажа-

та кнопка, включающая регулирования мощности по заданию, то режим небаланса мощности должен быть выключен и наоборот.

В случае с регулированием мощности по заданию в успешном случае будет запущена подпрограмма, представляющая собой ПИД-регулятор активной, либо реактивной мощности. В противном случае, выход регулятора и кнопка будут обнулены.

Так как регулятор активной мощности и регулятор частоты управляют одним и тем же органом, то их сигналы складываются в один. Полученный сигнал ограничивается допустимым рабочим диапазоном, характерным для модели с текущими параметрами.

```
IF NOT P_dev_enable AND NOT Q_dev_enable AND P_reg_zad THEN
    PID_P_Na; (*Регулятор активной мощности*)
ELSE
    Na_upr2:=0;
    P_reg_zad:=FALSE;
END_IF
(*Сумматор сигналов регуляторов частоты и активной мощности*)
Na_upr:=Na_upr1+Na_upr2;
(*Клиппинг управляющего сигнала НА*)
IF Na_upr>76.33 THEN
    Na_upr:=76.33;
END_IF
IF Na_upr<31.14 THEN
    Na_upr:=31.14;
END_IF

IF NOT P_dev_enable AND NOT Q_dev_enable AND Q_reg_zad THEN
    PID_Q_Uv; (*Регулятор реактивной мощности*)
ELSE
    Q_reg_zad:=FALSE;
    Uv_upr:=0;
END_IF
```

Во фрагменте кода, приведенного ниже, реализована работа кнопок «ЗАДАТЬ текущее значение». Если кнопка была нажата, то, в зависимости от выбора кнопки, текущее значение активной или реактивной мощности присваивается соответствующей мощности небаланса.

```
IF P_set_curr THEN
    Pn_s:=P/1000000;
END_IF
```

```

IF Q_set_curr THEN
    Qn_s:=Q/1000000;
END_IF

```

В активном режиме небаланса мощностей происходит установка сигнала включения переключателей модели для соответствующей мощности. Они активируют переключатели в активный режим и сбрасывают интегратор. Затем вычисляется полная величина небалансной мощности, которая вычисляется как сумма заданной небалансной мощности и процента отклонения. Полученное значение также ограничивается предельно допустимыми значениями мощности для модели. В противном случае переменные кнопки и переключателя обнуляются, а величина небаланса устанавливается в текущее значение мощности.

```

IF NOT P_reg_zad AND NOT Q_reg_zad AND P_dev_enable_b THEN
    P_dev_enable:=TRUE;
    P_shift:=Pn_s*10000*(100+P_dev_perc);
    (*Клиппинг небалансной активной мощности*)
    IF P_shift>71.65E6 THEN
        P_shift:=71.65E6;
    ELSIF P_shift<30E6 THEN
        P_shift:=30E6;
    END_IF
ELSE
    P_dev_enable_b:=P_dev_enable:=FALSE;
    P_shift:=P;
END_IF

```

```

IF NOT P_reg_zad AND NOT Q_reg_zad AND Q_dev_enable_b THEN
    Q_dev_enable:=TRUE;
    Q_shift:=Qn_s*10000*(100+Q_dev_perc);
    IF Q_shift>51.92E6 THEN
        Q_shift:=51.92E6;
    ELSIF Q_shift<32.63E6 THEN
        Q_shift:=32.63E6;
    END_IF
ELSE
    Q_dev_enable_b:=Q_dev_enable:=FALSE;
    Q_shift:=Q;
END_IF

```

Как уже было сказано выше, ПИД-регуляторы написаны на языке CFC и представляют собой отдельные подпрограммы. Функциональный блок реализует следующий закон регулирования (19):

$$Y = Y_OFFSET + K_P \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_N} \int_0^{T_N} e(t) + T_V \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (19)$$

где Y – выход регулятора;

Y_OFFSET – стационарное значение Y ;

K_P – коэффициент передачи;

T_N – постоянная интегрирования, с;

T_V – постоянная интегрирования, с;

$e(t)$ – сигнал ошибки.

Описание входов и выходов блока приведено в таблице 7.

Таблица 7 – описание входов и выходов блока PID

Наименование	Тип	Описание
ACTUAL	REAL, вход	Текущее значение контролируемой переменной.
SET_POINT	REAL, вход	Задание.
KP	REAL, вход	Коэффициент передачи.
TN	REAL, вход	Постоянная интегрирования, в секундах (т.е. "0.5" для 500 мс).
TV	REAL, вход	Постоянная дифференцирования, в секундах (т.е. "0.5" для 500 мс).
Y_MANUAL	REAL, вход	Определяет значение выхода Y , если MANUAL = TRUE.
Y_OFFSET	REAL, вход	Стационарное значение Y .
Y_MIN, Y_MAX	REAL, вход	Значение выхода Y ограничено Y_MIN и Y_MAX . При достижении Y границ ограничения, выход LIMITS_ACTIVE, (BOOL) принимает значение TRUE. Ограничение работает только при $Y_MIN < Y_MAX$.
MANUAL	BOOL, вход	Значение TRUE, включает режим ручного регулирования по входу Y_MANUAL .
RESET	BOOL, вход	TRUE сбрасывает регулятор; в это время $Y = Y_OFFSET$
Y	REAL, выход	Выход регулятора
LIMITS_ACTIVE	BOOL, выход	TRUE означает что Y ограничивается пределами (Y_MIN, Y_MAX).
OVERFLOW	BOOL, выход	TRUE - признак переполнения.

Регулятор частоты вращения ротора синхронного генератора (рис. 33) на вход принимает значения текущей частоты вращения ротора и уставку. Коэффициент передачи и постоянные времени подобраны так, чтобы обеспечить максимальное быстродействие и точность. Так как ручное управление регуля-

тором не используется, то на этот вход подается ноль. Ограничения выхода выставлены в соответствии с крайне допустимыми значениями степени открытия направляющего аппарата.

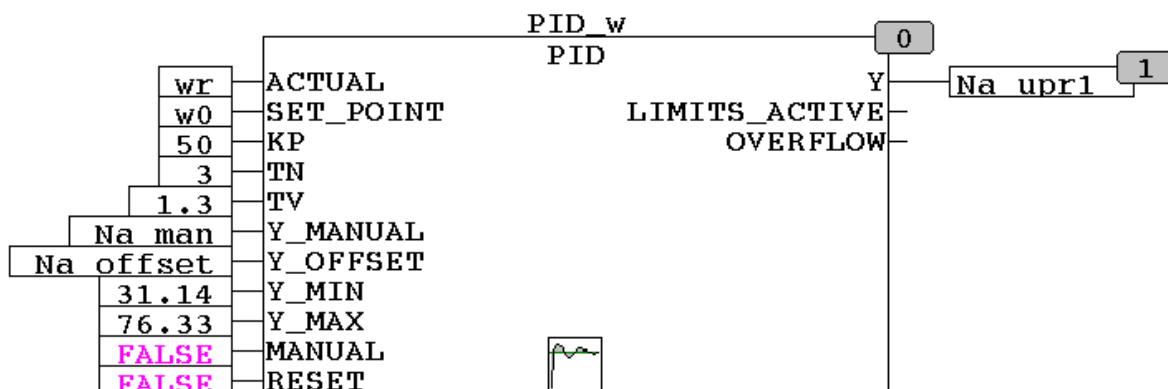


Рисунок 33 – ПИД-регулятор частоты

Регулятор частоты и регулятор активной мощности (рисунок 34) регулируют разные параметры системы, но оказывают воздействие на один и тот же рабочий орган – направляющий аппарат. Поэтому их параметры подобраны таким образом, чтобы каждый из регуляторов мог выполнять свою функцию и при этом не мешать друг другу.

Коэффициент передачи, постоянные времени и ограничение выхода обеспечивают более низкую скорость регулирования мощности. Величина крайних значений соответствует диапазону перемещения направляющего аппарата. Таким образом, частота вращения ротора не дестабилизируется. На вход сброса подается инверсный сигнал с кнопки включения. То есть, когда кнопка не нажата (выключен регулятор), то выход регулятора обнуляется.

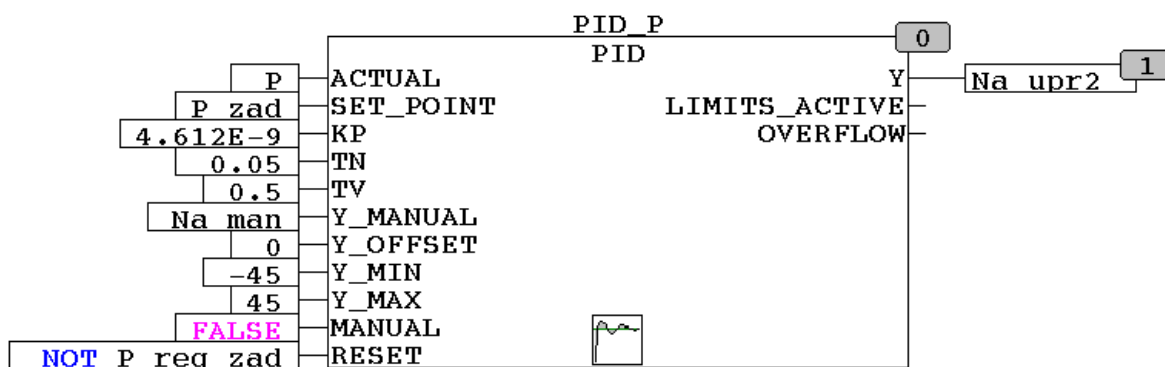


Рисунок 34 – ПИД-регулятор активной мощности

Регулятор реактивной мощности (рис. 35) управляет величиной напряжения возбуждения совместно с автоматическим регулятором возбуждения, встроенного в модель. Поэтому его параметры тоже подобраны с учетом этих особенностей.

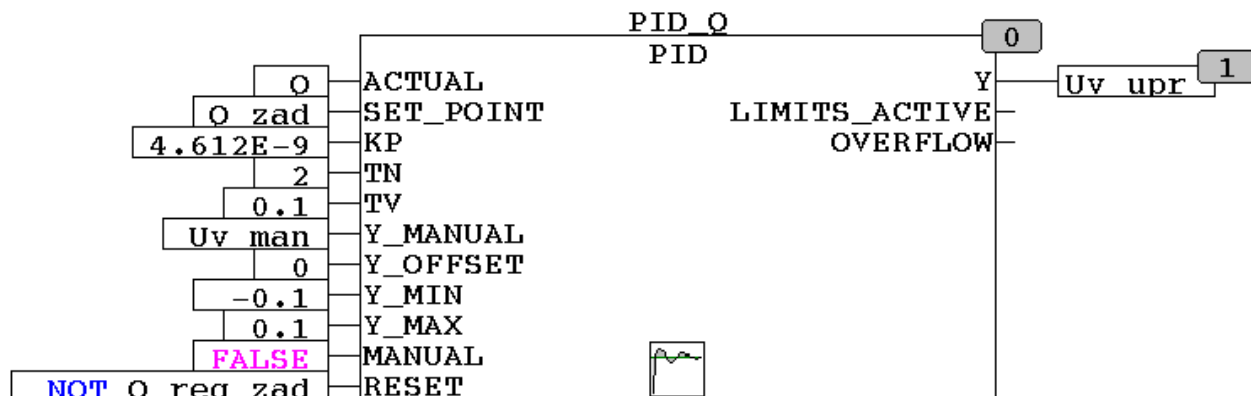


Рисунок 35 – ПИД-регулятор реактивной мощности

Величина ограничений выхода данного регулятора соответствует диапазону изменения напряжения возбуждения. Решение выставить такие ограничения, как и в случае с регулятором активной мощности, в первую очередь являются причиной того, что регуляторы мощности являются вторичными. Они выступают в роле устройств, корректирующих управляющие сигналы главных регуляторов.

Другими словами, регулятор активной мощности корректирует управление регулятора частоты вращения таким образом, чтобы не дестабилизировать частоту, но в то же время изменять активную мощность. Работа регулятора реактивной мощности носит аналогичный характер в отношении регулятора возбуждения.

4 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ

4.1 Безопасность

Конечным итогом данной бакалаврской работы является виртуальная система управления моделью гидроагрегата. Система представляет собой совокупность программных средств диспетчеризации, мониторинга, управления и моделирования.

Основной задачей модели, лежащей в основе работы, является имитация поведения реального гидроагрегата для дальнейшего управления этим объектом в SCADA системе. Организованные подсистемы в программе Simulink выполняют эти функции.

Графический интерфейс SCADA-системы, созданный в среде CODESYS, обеспечивает взаимодействие пользователя с виртуальной моделью объекта с целью обучения молодых специалистов или студентов технологическому процессу ГЭС. Основные компоненты – это средства отображения информации (СОИ) и органы управления.

Средства отображения информации (приборы, экраны и т.п.) предназначены для предъявления работающему человеку данных, характеризующих объект управления, ход технологического процесса, энергетические ресурсы, состояние средств автоматизации, каналов связи и пр. Эти данные предъявляются человеку в количественной и качественной форме.

Органы управления (кнопки, клавиши, рычажные и поворотные переключатели, маховики, педали и т.п.) предназначены для передачи управляющих воздействий от работающего человека к производственному оборудованию и играют роль связующего звена между ними. С их помощью осуществляются ввод информации, ее вызов на СОИ, приведение в действие исполнительных органов объекта управления.

Проектирование и разработка графического интерфейса оператора производилась в соответствии с государственным стандартом ГОСТ Р ИСО 14915-1-2016 «Эргономика мультимедийных пользовательских интерфейсов» [11].

Интерфейс программы позволяет наблюдать за изменяющимися параметрами модели гидроагрегата, а также оказывать управляющее воздействие на определенные параметры системы.

В верхней части основного экрана отображается текущее значение наиболее важных величин, таких как процент хода сервомотора рабочего колеса, процент хода сервомотора направляющего аппарата, угловая скорость ротора, напряжение и ток возбуждения. Отображение данных величин выполнено в виде виртуальных стрелочных приборов, расположенных в ряд. Для лучшей различимости показаний стрелка окрашена в насыщенный красный цвет. Шкалы приборов также имеют цветовую окраску в соответствии с зоной допустимого значения.

Для упрощения чтения показаний возле каждого стрелочного прибора расположены блоки с текущим числовым значением отображаемой величины, а так же её краткое обозначение и единица измерения. При наведении курсора мыши на обозначение оператор имеет возможность прочитать полное название отображаемой величины с помощью всплывающей подсказки.

Менее важные параметры системы отображаются только в численном виде в отдельных блоках. Под каждым блоком подписано обозначение величины и единица измерения. Эти параметры расположены в ряд и образуют отдельный блок, выделенный контуром для понятности интерфейса. Блок расположен под стрелочными приборами.

Так как регулирование мощности выполняется в двух режимах, то было решено разнести необходимые для каждого режима СОИ и органы управления в отдельные блоки, находящиеся в центре основного экрана. Каждый блок имеет основную надпись, соответствующую имени режима регулирования. Для установки задания применяются те же блоки, что и для численного отображения параметров системы, но была добавлена возможность изменения значения параметра. Для того, чтобы изменить какой-либо параметр, необходимо нажать левую кнопку мыши, наведя курсор на численное значение и ввести желаемую величину с помощью всплывающей клавиатуры.

Активная и реактивная мощности вынесены отдельно от остальных величин в правую часть экрана. Помимо численного представления и подписи, текущее значение мощностей отображается в виде линейных вертикальных шкал. Диапазон значений шкал соответствует диапазону изменения мощностей, что позволяет наглядно видеть развиваемую мощность от максимально возможной.

Помимо этого под блоками активной и реактивной мощностей расположены блоки, отображающие в численном виде полную мощность и коэффициент мощности.

Интерфейс программы также содержит в себе альтернативный способ представления значений основных параметров системы – в виде временных диаграмм, именуемых трендами. Для перехода из основного окна в окно с трендами необходимо нажать кнопку «Тренды», расположенную в левой части основного экрана, отдельно от всех остальных блоков экрана.

Окно с трендами также показано в предыдущем разделе данной работы. В виде трендов отображаются только основные параметры системы. Для улучшения читаемости применены контрастные цвета линий трендов. Для отображения диаграмм используются две системы координат с разным масштабом. В нижней части окна расположены легенды для каждой системы координат. Для большей понятности для каждой величины в легенде отображается текущее численное значение с помощью отдельных блоков.

Для возвращения в основной экран необходимо нажать кнопку, расположенную по центру в нижней части данного экрана.

Экраны визуализации, созданные в программе CODESYS, отображают ход процесса или состояние объекта наблюдения в форме, удобной для восприятия человеком. Индикаторы должны позволять считывать информацию с требуемой точностью.

Тренды используются для записи непрерывных графических данных. Вычерчиваемые диаграммы легко видимы. Контраст между вычерчиваемой линией и фоном составляет 50 %.

Таким образом, графический интерфейс оператора обладает необходимыми качествами для легкого восприятия и понимания, что, в свою очередь, упрощает работу оператора с системой.

4.2 Экологичность

Так как разрабатываемая система является исключительно программным продуктом, то её экологичность зависит только от используемого на предприятии оборудования, необходимого для функционирования системы.

Система позволяет избежать теоритически возможных чрезвычайных ситуаций, так как она позволяет обучить технологическому процессу неопытных специалистов на виртуальной модели, без риска опасного воздействия на реальный объект управления.

Следовательно, разработку можно назвать безопасным и экологически чистым продуктом.

Тем не менее, экологичность ПЭВМ – немаловажный фактор. В настоящий момент наиболее строгим из существующих мировых стандартов экологичности для компьютерной техники является стандарт ТСО99, содержащий в себе дополнительные ограничения по части экологии, эргономичности, энергопотребления и эмиссии устройств [12].

Кроме того, энергетические затраты на производство и перевозку продукции также необходимо учитывать при оценке экологической эффективности. Ведь времена, когда техника изготавливалась только на одном заводе, давно прошли.

Сегодня отдельные комплектующие закупаются на различных предприятиях по всему миру, после чего осуществляется сборка устройств. Поэтому зачастую даже сами компании не могут знать, какие вредные вещества попадают в атмосферу при изготовлении их продукции и какие именно металлы или токсины в ней содержатся

ЖК-экраны - один из источников парниковых газов, которые намного вреднее диоксида углерода. Жидкокристаллические мониторы быстро обрели популярность, придя на смену громоздким ЭЛТ-моделям. И это неудивительно,

ведь они обладают тонкими корпусами и потребляют значительно меньше электроэнергии. По другим аспектам экологической безопасности дисплеи на основе жидких кристаллов также считались прорывом, потому что в них не использовался газ, содержащий свинец.

Таким образом, выбор ПЭВМ должен производиться в соответствии с действующими стандартами, регламентирующими экологически чистое производство продукта.

4.3 Чрезвычайные ситуации

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – состояние, при котором в результате возникновения источника ЧС на объекте, определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде. В нашем случае ЧС рассматривается как возникновение пожара.

Оператор ПЭВМ должен строго выполнять требования к порядку работы и поведению при возникновении чрезвычайных ситуаций в соответствии с инструкцией по охране труда предприятия.

Помещение, в котором расположены ПК, в соответствии с санитарными и другими нормами безопасности должно быть оборудовано [13]:

- системами освещения (естественного или искусственного, общего или комбинированного - по необходимости);
- системой вентиляции, кондиционирования и отопления;
- устройствами защиты от поражения электрическим током (защитным заземлением, занулением), защитным отключением - УЗО;
- устройствами обеспечения нормального аэроионного режима, обеспыливателями и устройствами, обеспечивающими содержание в воздухе патогенной микрофлоры не выше нормы;
- средствами автоматического пожаротушения и связи в больших помещениях и (или) первичными средствами пожаротушения, согласно нормам, приведенным в приложении 8 к настоящей Инструкции;

Кроме технических устройств, в помещении операторов ПК должны быть:

- инструкции по охране труда и пожарной
- нормативно-техническая документация и методические материалы, необходимые для работы;
- плакаты по охране труда (в том числе и при работе на ПК);
- аптечка первой помощи.
- план эвакуации из здания.

При чрезвычайной ситуации (авария, пожар, несчастный случай, резкое ухудшение самочувствия, природное явление, иное опасное для жизни и здоровья людей событие) оператор обязан немедленно:

- сообщить о ситуации своему непосредственному руководителю;
- отключить питание ПК при обнаружении обрыва провода питания, неисправности заземления и других повреждений электрооборудования, задымления, загорания, появления сильного запаха в помещении при поражении молнией и т.п.;
- до прибытия врача оказать пострадавшим первую медицинскую помощь в соответствии с Инструкцией по оказанию первой помощи;
- вызвать представителя инженерно-технической службы эксплуатации вычислительной техники при любых случаях сбоя в работе технического оборудования или программного обеспечения;
- покинуть рабочее место и обратиться к врачу в случае появления рези в глазах, резкого ухудшения видимости (невозможности сфокусировать взгляд или навести его на резкость), появления боли в пальцах и кистях рук, усиления сердцебиения;
- отключить питание ПК и принять меры к тушению очага пожара при помощи углекислотного или порошкового огнетушителя, вызвать пожарную команду при возгорании оборудования.

Анализ пожарной опасности заключается в определении наличия горючих веществ и возможных источников зажигания, вероятных путей распростра-

нения пожара, необходимых средств технической и конструктивной защиты, а также систем сигнализации и пожаротушения, имеющих параметры инерционности срабатывания, соответствующие динамике развития пожара на предприятии.

Лаборатория оснащена большим числом электроприборов, работающих как с напряжением 220 В и 24 В. Необходимо соблюдать технику безопасности при работе с ПЭВМ.

Каждый объект должен иметь такое объемно-планировочное и техническое исполнение, чтобы эвакуация людей из него была завершена до наступления предельно допустимых значений опасных факторов пожара, а при нецелесообразности эвакуации была обеспечена защита людей в объекте.

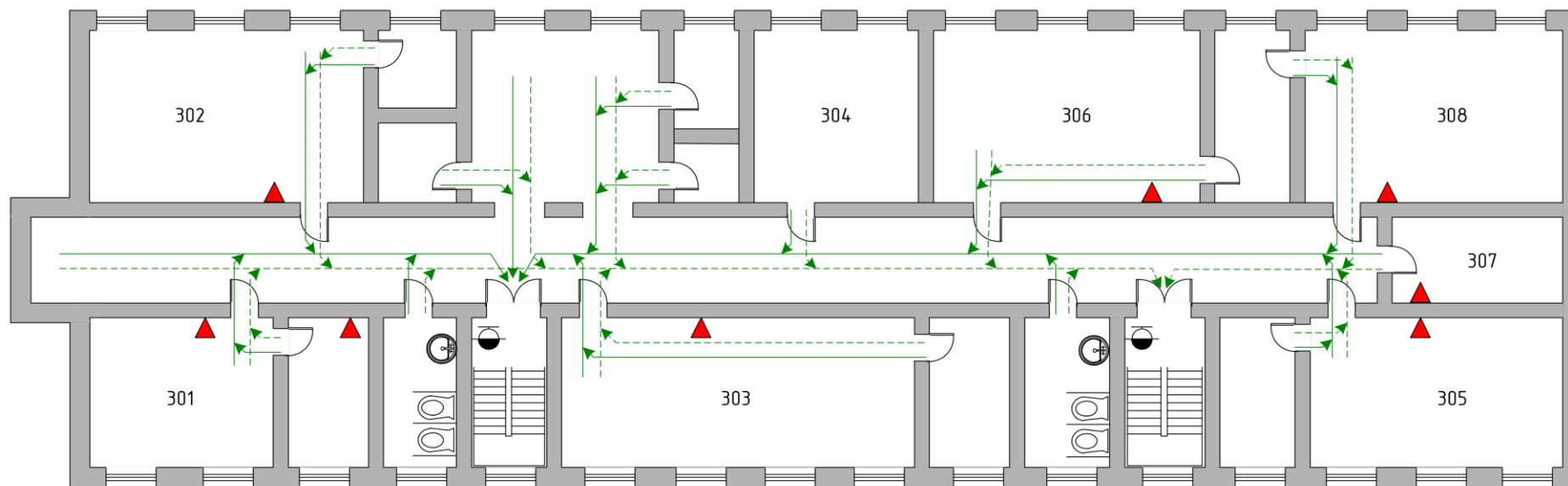
На каждом объекте должно быть обеспечено своевременное оповещение людей и (или) сигнализация о пожаре в его начальной стадии техническими или организационными средствами.

Требования к путям эвакуации приведены в СНиП 21-01-97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений» [14].

Проанализировав шестой учебный корпус и аудиторию 306 с точки зрения правил пожарной безопасности, можно сделать вывод, что данное здание и аудитория полностью соответствуют рассмотренным санитарным нормам и правилам. План эвакуации третьего этажа изображен на рисунке 42.

В данном разделе были рассмотрены основные аспекты безопасной работы с виртуальной системой управления. Проанализировано и рассмотрено влияние эргономических показателей на работу человека. Выполнен анализ графического интерфейса разработанной системы управления.

При соблюдении правил работы с ПЭВМ безопасность жизни и здоровья студентов обеспечены. Также был проанализирован имеющийся план эвакуации при возникновении ЧС.



Условные обозначения

- > основной путь эвакуации
- - -> запасной путь эвакуации
- ▲ огнетушитель
- пожарный кран

Рисунок 36 – План эвакуации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы было произведено описание объекта управления технологическим процессом Нижне-Бурейской ГЭС, а также его систем управления и регулирования.

Была разработана имитационная модель гидроагрегата НБ ГЭС в программной среде MATLAB Simulink, выполненная на основе разработанного математического описания синхронного генератора. Человеко-машинный интерфейс, созданный для наглядного управления моделью оператором, выполнен в среде программной разработки CODESYS. Управление моделью осуществлено на базе виртуального программируемого логического контроллера, входящего в состав пакета программ CODESYS.

Конечным результатом бакалаврской работы является автоматизированная система управления гидроагрегатом НБ ГЭС. Система состоит из модели гидроагрегата, созданной в среде моделирования MATLAB Simulink, а также SCADA система и виртуальный ПЛК, входящие в состав программного комплекса CODESYS. Полученную систему можно использовать в качестве тренажера для обучения молодых специалистов на предприятии или студентов в высшем учебном заведении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Системный оператор единой энергетической системы. Информационный обзор. «Единая энергетическая система России: промежуточные итоги» (оперативные данные). Январь 2019 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.so-cdu.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2019/ups_review_0119.pdf. – 03.02.2019.

2 ТЗ Р73.2014.001. Поставка оборудования АСУТП и РЗИА для Нижне-Бурейской ГЭС. АСУТП Нижне-Бурейской ГЭС. – ООО «НПФ «Ракурс», 2015. – 155 с.

3 РД 1352-26-112 г-АРЗ. Нижне-Бурейская ГЭС. Автоматизированная система управления. Программно-технический комплекс автоматического управления гидроагрегатом ПТК АУГ. Технологические алгоритмы управления и гидромеханических защит. – АО «Ленгидпроект», 2015. – 155 с.

4 РД 1352-26-111т-АРЗ Нижне-Бурейская ГЭС. Автоматизированная система управления. Управление гидроагрегатом. Функциональные схемы технологических алгоритмов управления агрегатом. – АО «Ленгидпроект», 2015. – 90 с.

5 Чиликин М.Г. – Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер – М.: Энергия, 1979. – 616с.

6 Справочник по электрическим машинам / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

7 РЭ ОБС.461.217. Нижне-Бурейская ГЭС. Гидрогенератор типа СВ 965/160-56 УХЛ4. – ОАО «Силловые Машины», 2014. – 46 с.

8 Кравченко Г.И. Гидравлические машины: Турбины и насосы. Учебник для вузов / Г.И. Кравченко – М.: Энергия, 1978 – 320 с.

9 РЭ 2317562. Турбина гидравлическая ПЛ30-В-630. ОАО «Нижне-Бурейская ГЭС». – ОАО «Силловые машины», 2014. – 66 с.

10 Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys 2.3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.5ichai.com/pdf/Gateway%20Manual.pdf>. – 14.05.2019.

11 ГОСТ Р ИСО 14915-1-2016 Эргономика мультимедийных пользовательских интерфейсов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200141132>. – 02.06.2019.

12 Волков Н.В. Влияние компьютерной техники на окружающую среду [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://anti.esrae.ru/pdf/2017/1\(2\)/26.pdf](http://anti.esrae.ru/pdf/2017/1(2)/26.pdf). – 03.06.2019.

13 РД 153-34.0-03.298-2001 Типовая инструкция по охране труда для пользователей персональными электронно-вычислительными машинами ПЭВМ в электроэнергетике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gostrf.com/normadata/1/4294816/4294816351.pdf>. – 05.06.2019.

14 СНиП 21-01-97 Пожарная безопасность зданий и сооружений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001022>. – 05.06.2019.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программный код в среде MATLAB

```
clc
clear
Pfull=94.1*1e6;
Un=13.8*1000; %B
%Un=18000; %Pa/sqrt(3)/Id
In=3937; %A
CosF=0.85;
nn=107.14; %rpm
Iv=1450; %A
Uv=300; %? В
KPD=0.983;
p=56/2; %пар полюсов
Rb=Un/In; %Ом
%индуктивные сопротивления
x_d=1.05*Rb;
x_q=0.69*Rb;
Rl=0.0052; %Ом
Rv=0.145; %Ом
Td0=7; %с
GD2=15000; %ГМ^2
J=GD2*1000; %кг*м^2

O=17.5*pi/180;
w0el=2*pi*50;
w0=w0el/p;
%Найдем индуктивности
Llq=x_q/w0el;
Lld=x_d/w0el;
Rv=Uv/Iv;
Lv=Td0*Rv;
Pa=Pfull*CosF;
Pmeh=Pa/KPD;
Mg_n=Pmeh/w0;
U1max=Un*sqrt(3);
Emax=(Mg_n-((U1max^2)/(2*w0))*(1/x_q-1/x_d)*sin(2*O))*w0*x_d/(U1max*sin(O));
Ll2d=Emax/w0el/Iv;
Ivn = -Iv;
A = [-Rl -w0el*Llq; w0el*Lld -Rl];
B = [U1max*sin(O); -U1max*cos(O)-w0el*Ll2d*Ivn];
I1=A\B;
I1dn = I1(1); I1qn=I1(2);
Mt = p*(Ll2d*Ivn*I1qn + (Lld-Llq)*I1dn*I1qn);
Pn=-I1qn*U1max;
Qn=I1dn*U1max;
Q=sqrt(Pfull^2-Pa^2);
%%
Hr=26.1; %Напор расчётный, м
KPD_t=0.92864;
Qv_n=343.3; %расход номинальный
Qq=[64.581392 76.909237 101.32785 110.5443 129.46198 148.50557 168.18271
188.09692 207.77405 226.97704 246.41711 267.04254 288.14212 308.29341 330.34128
352.86331];
Pp=[10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85];
t=[0:1:15];
Qapprox=19.68*t+50.12; %упрощение Q
Kna_q=Qapprox(16)/76.33;
Na_n=75.88;
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Программный код в среде CODESYS

```
VAR_GLOBAL
(*Input signals*)
    Qflow,Na_cur,Fi_cur,N,wr,O,Q,P,U1dev,Uv,Iv:REAL;
(*Output signals*)
    Na_upr,U1max,Un,w0:REAL;
    P_dev_enable,Q_dev_enable:BOOL:=FALSE;
    P_dev,Q_dev:REAL;
(**)
    w_error:REAL;
    Na_n:REAL:=75.88;
    Na_man:REAL:=75.88;
    Na_offset:REAL:=0;
    Na_upr1,Na_upr2:REAL;
    Pn,P_zad:REAL:=7.1421E7;
    Uv_upr,Uv_man:REAL;
    Qn,Q_zad:REAL:=4.5258E7;
    P_shift,Q_shift:REAL:=0;
(*Buttons*)
    P_zad_M:REAL:=71.421;
    Q_zad_M:REAL:=45.258;
    COSf,Pfull,I1:REAL;
    Q_reg_zad,P_reg_zad:BOOL:=FALSE;
    Q_dev_perc,P_dev_perc:REAL:=10;
    P_dev_enable_b,Q_dev_enable_b:BOOL:=FALSE;
    Qn_s,Pn_s:REAL:=0;
    P_set_curr,Q_set_curr:BOOL:=FALSE;
END_VAR

PROGRAM PLC_PRG
Un:=13800;
U1max:=SQRT(3)*Un;
w0:=11.22;
PID_Na;
P_zad:=P_zad_M*1E6;
Q_zad:=Q_zad_M*1E6;
Pfull:=SQRT(P*P+Q*Q);
COSf:=P/Pfull;
I1:=P/(3*U1dev*COSf);

IF NOT P_dev_enable AND NOT Q_dev_enable AND P_reg_zad THEN
    PID_P_Na;
ELSE
    Na_upr2:=0;
    P_reg_zad:=FALSE;
```

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

```
END_IF
Na_upr:=Na_upr1+Na_upr2;
IF Na_upr>76.33 THEN
    Na_upr:=76.33;
END_IF
IF Na_upr<31.14 THEN
    Na_upr:=31.14;
END_IF
IF NOT P_dev_enable AND NOT Q_dev_enable AND Q_reg_zad THEN
    PID_Q_Uv;
ELSE
    Q_reg_zad:=FALSE;
    Uv_upr:=0;
END_IF
IF P_set_curr THEN
    Pn_s:=P/1000000;
END_IF
IF Q_set_curr THEN
    Qn_s:=Q/1000000;
END_IF
IF NOT P_reg_zad AND NOT Q_reg_zad AND P_dev_enable_b THEN
    P_dev_enable:=TRUE;
    P_shift:=Pn_s*10000*(100+P_dev_perc);
    IF P_shift>71.65E6 THEN
        P_shift:=71.65E6;
    ELSIF P_shift<30E6 THEN
        P_shift:=30E6;
    END_IF
ELSE
    P_dev_enable_b:=P_dev_enable:=FALSE;
    P_shift:=P;
END_IF
IF NOT P_reg_zad AND NOT Q_reg_zad AND Q_dev_enable_b THEN
    Q_dev_enable:=TRUE;
    Q_shift:=Qn_s*10000*(100+Q_dev_perc);
    IF Q_shift>51.92E6 THEN
        Q_shift:=51.92E6;
    ELSIF Q_shift<32.63E6 THEN
        Q_shift:=32.63E6;
    END_IF
ELSE
    Q_dev_enable_b:=Q_dev_enable:=FALSE;
    Q_shift:=Q;
END_IF
```

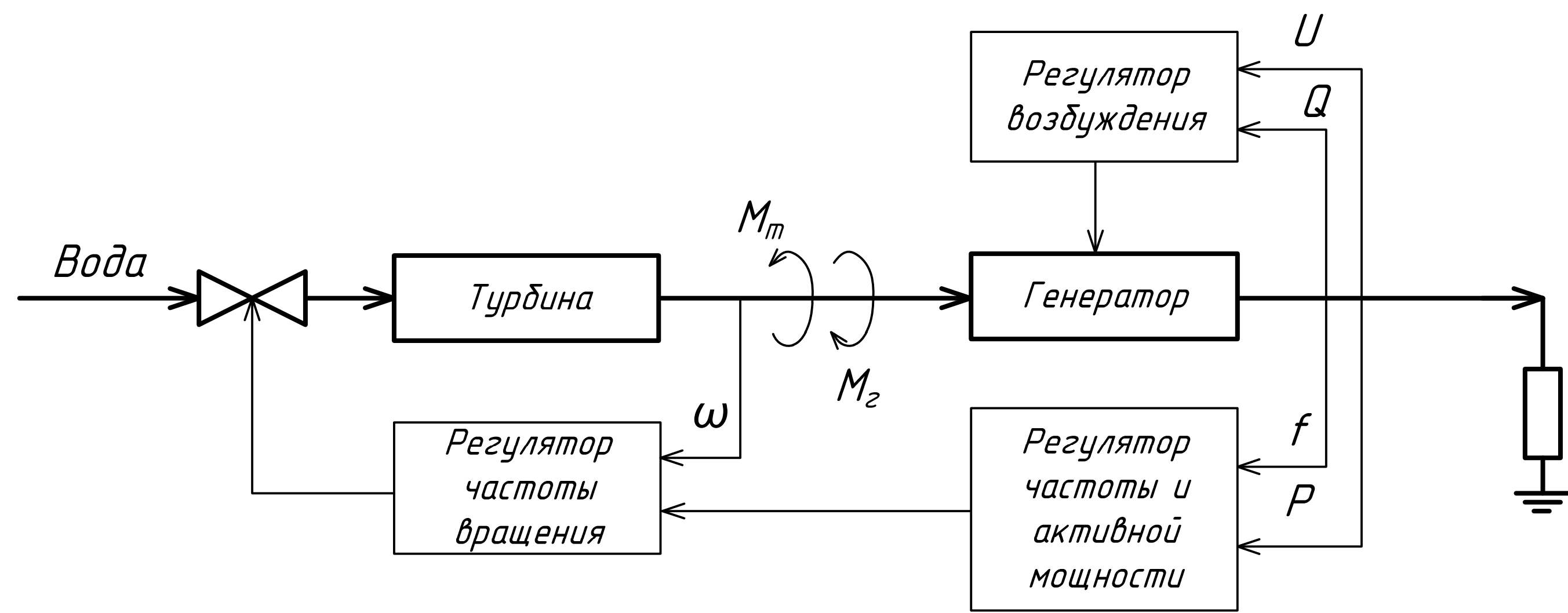



Схема структурная системы управления

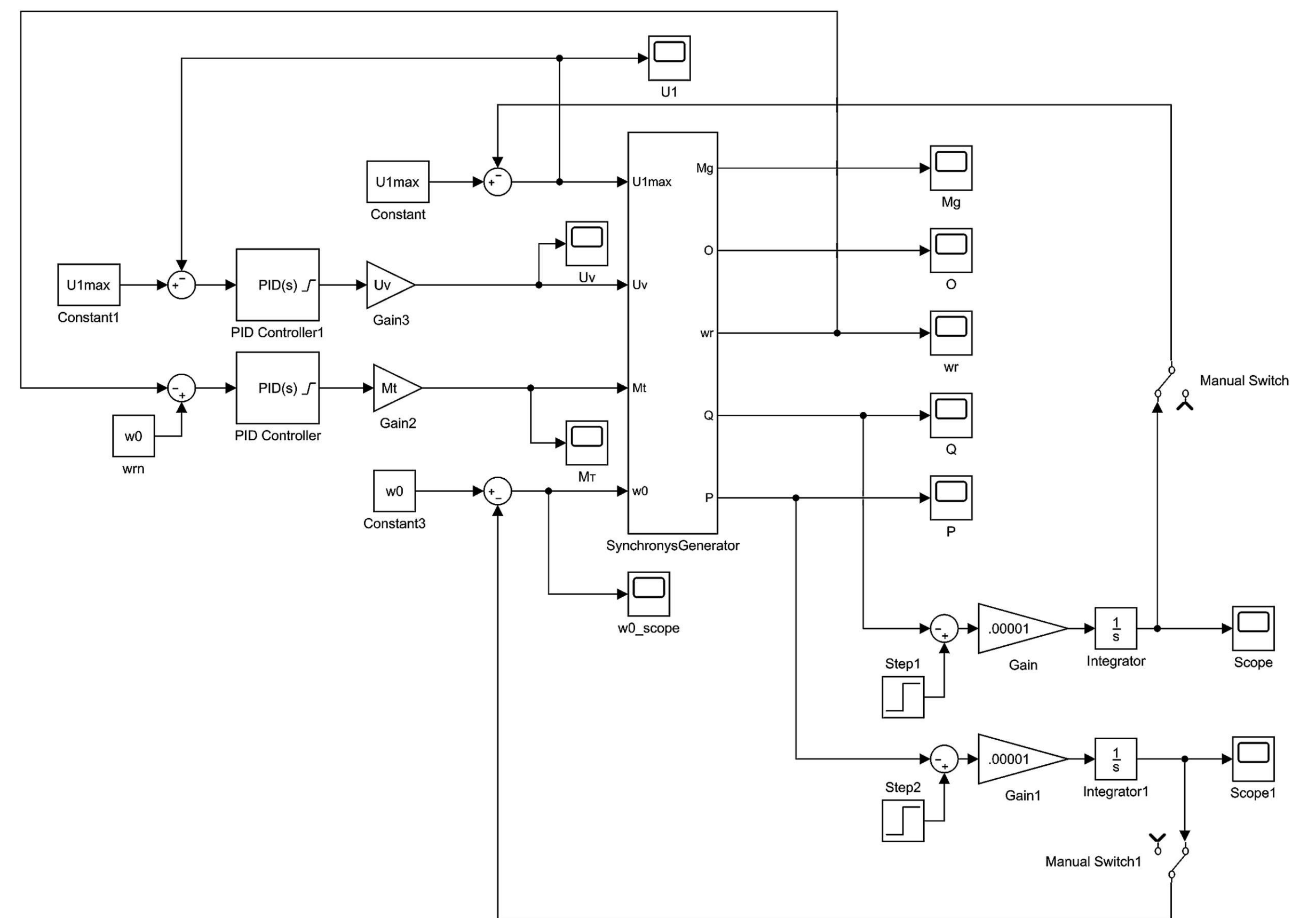


Схема структурная имитационной модели системы

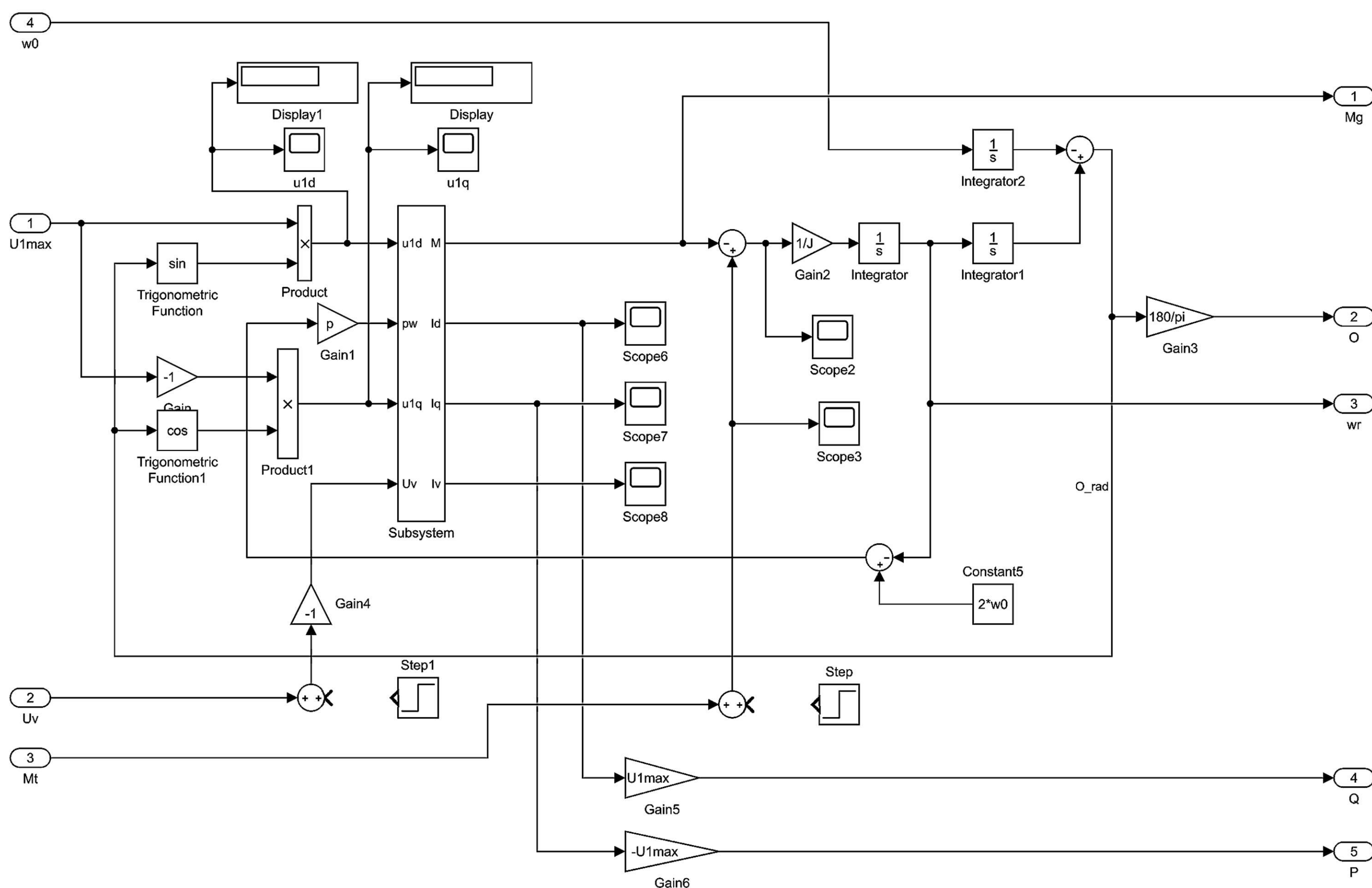


Схема структурная блока SynchronysGenerator

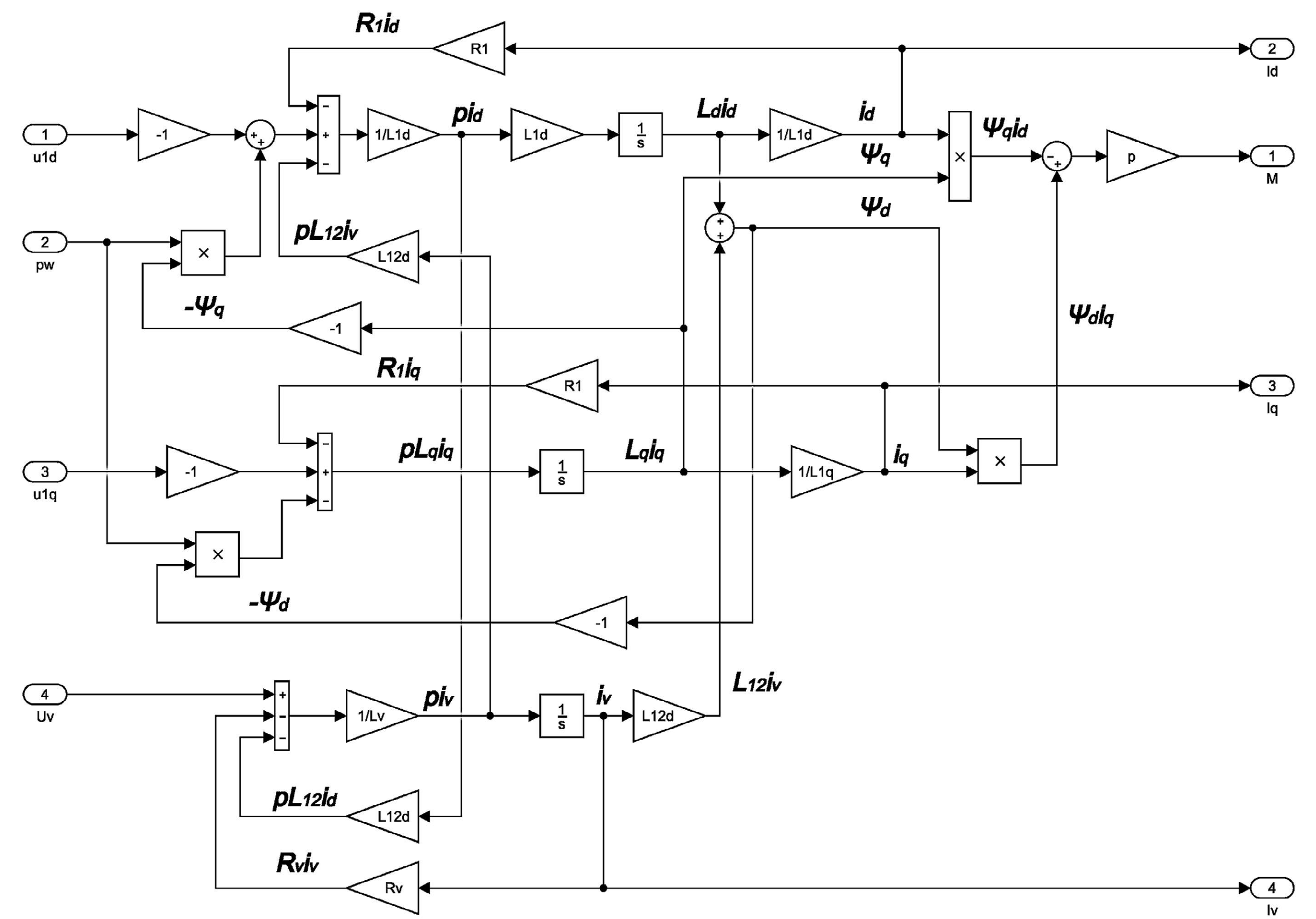


Схема структурная блока Subsystem

				BKP.154.022.15.03.04.171			
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Литера	Масса	Масшт.
Разраб.	Синицын В.Р.				у		
Пробер.	Рыбалева А.Н.						
Т.контр.	Рыбалева А.Н.				Лист 1	Листов 6	
И.контр.	Скрипка О.В.				Автоматизированная система управления гидроагрегатом Нижне-Бурейской ГЭС (комплексная выпускная квалификационная работа)		
Утв.	Скрипка О.В.				АМГУ зр. 541 од		

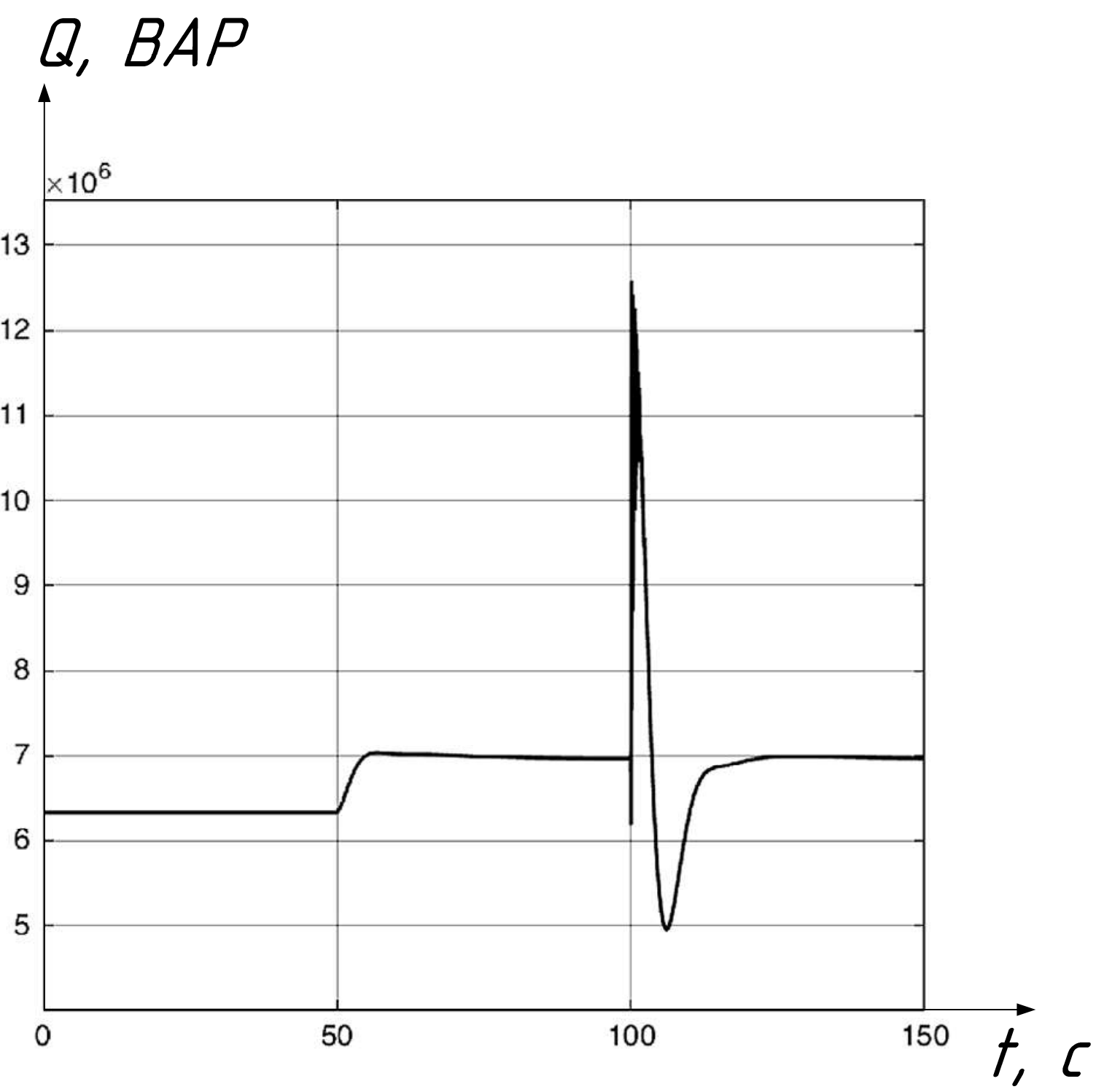


Диаграмма изменения реактивной мощности

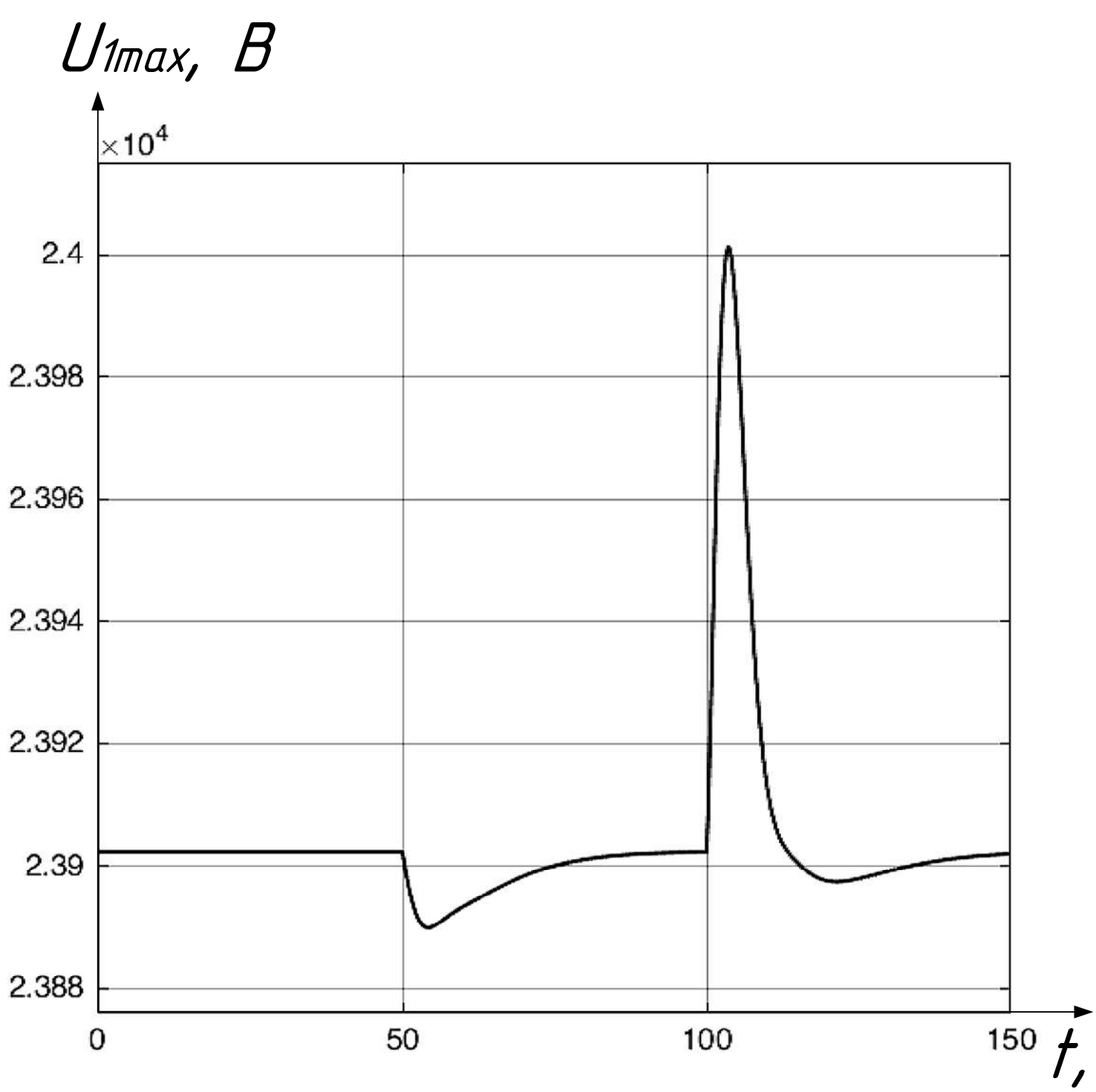


Диаграмма изменения напряжения

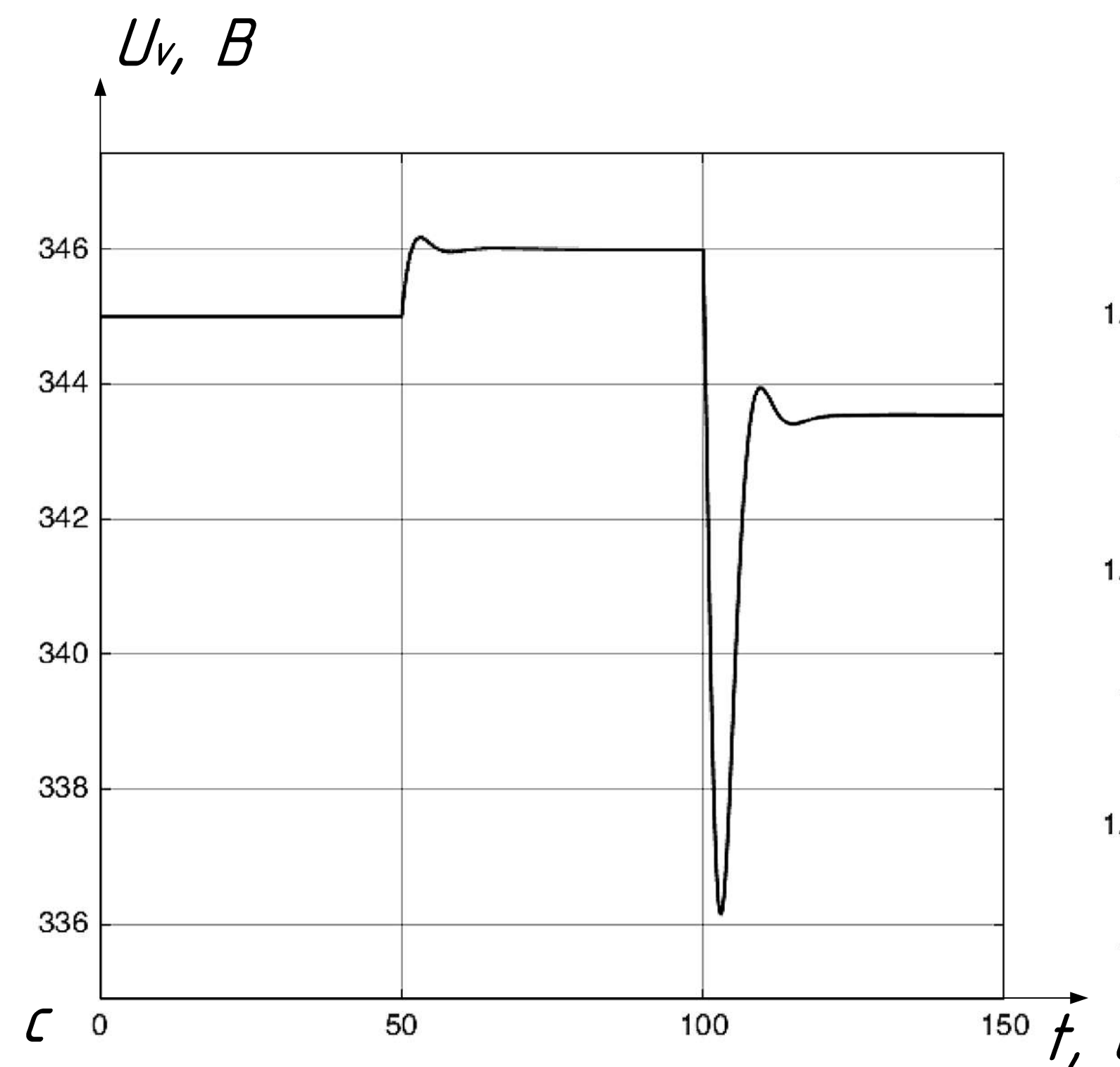


Диаграмма изменения напряжения возбуждения

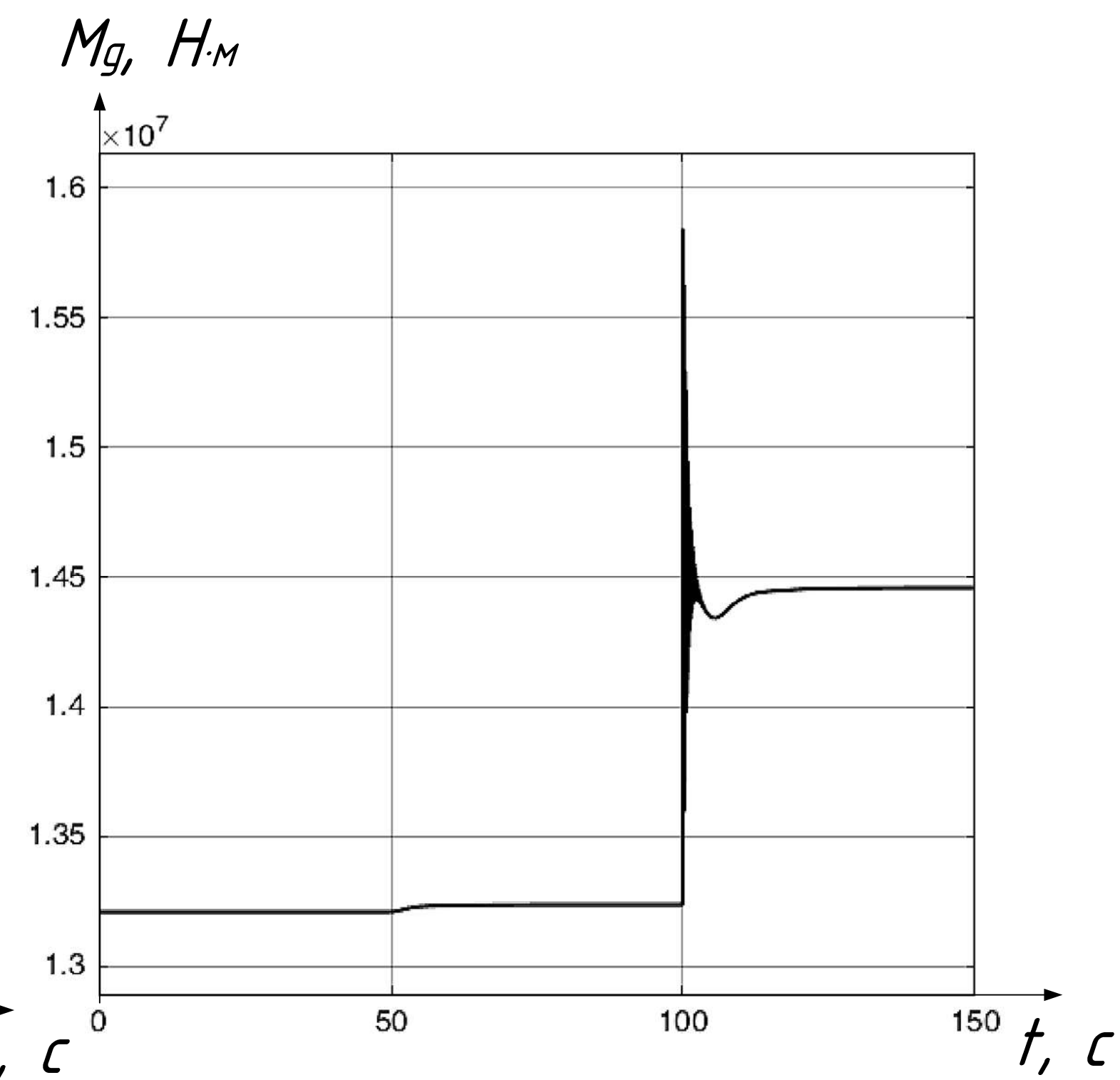


Диаграмма изменения момента генератора

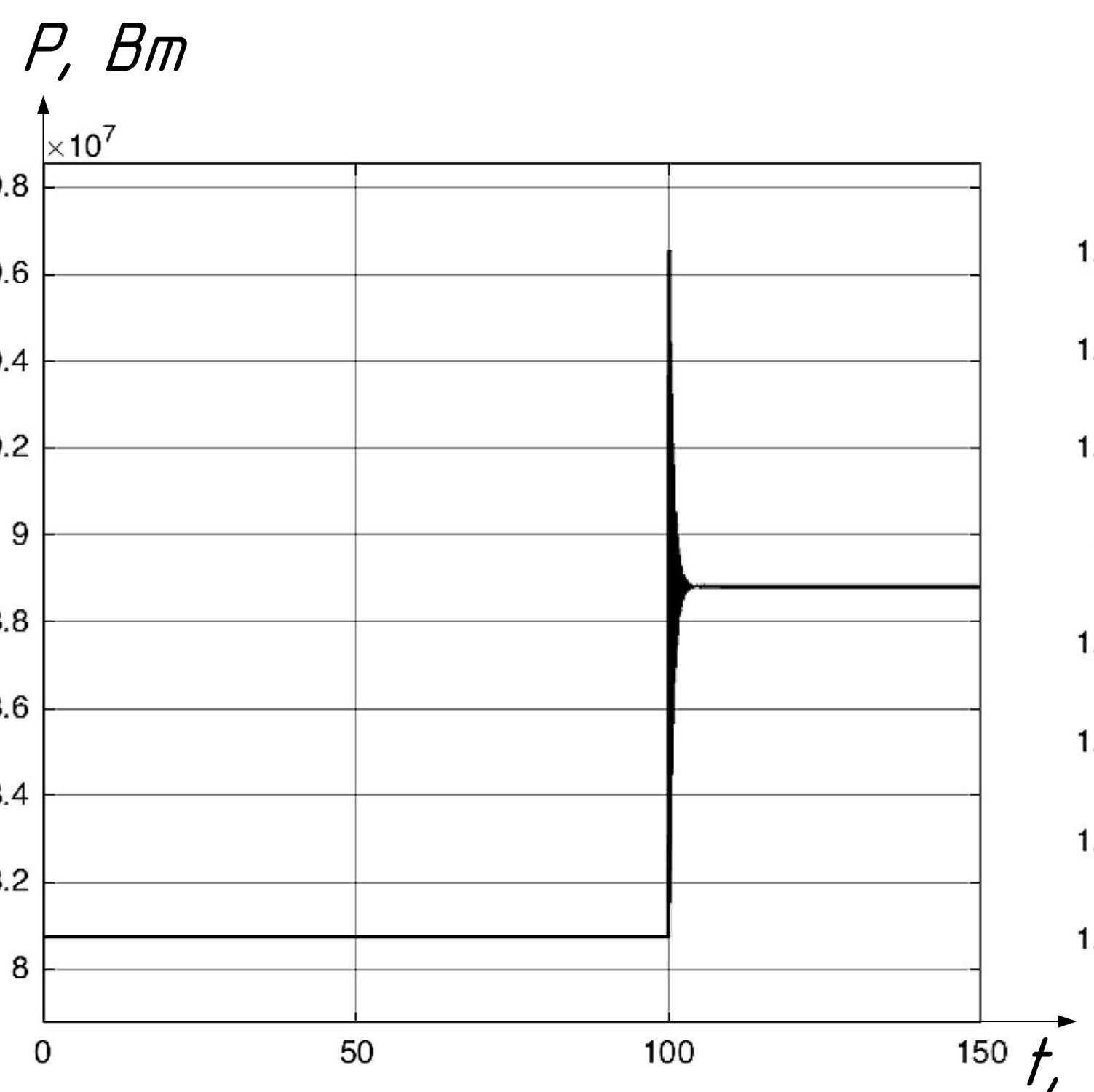


Диаграмма изменения активной мощности

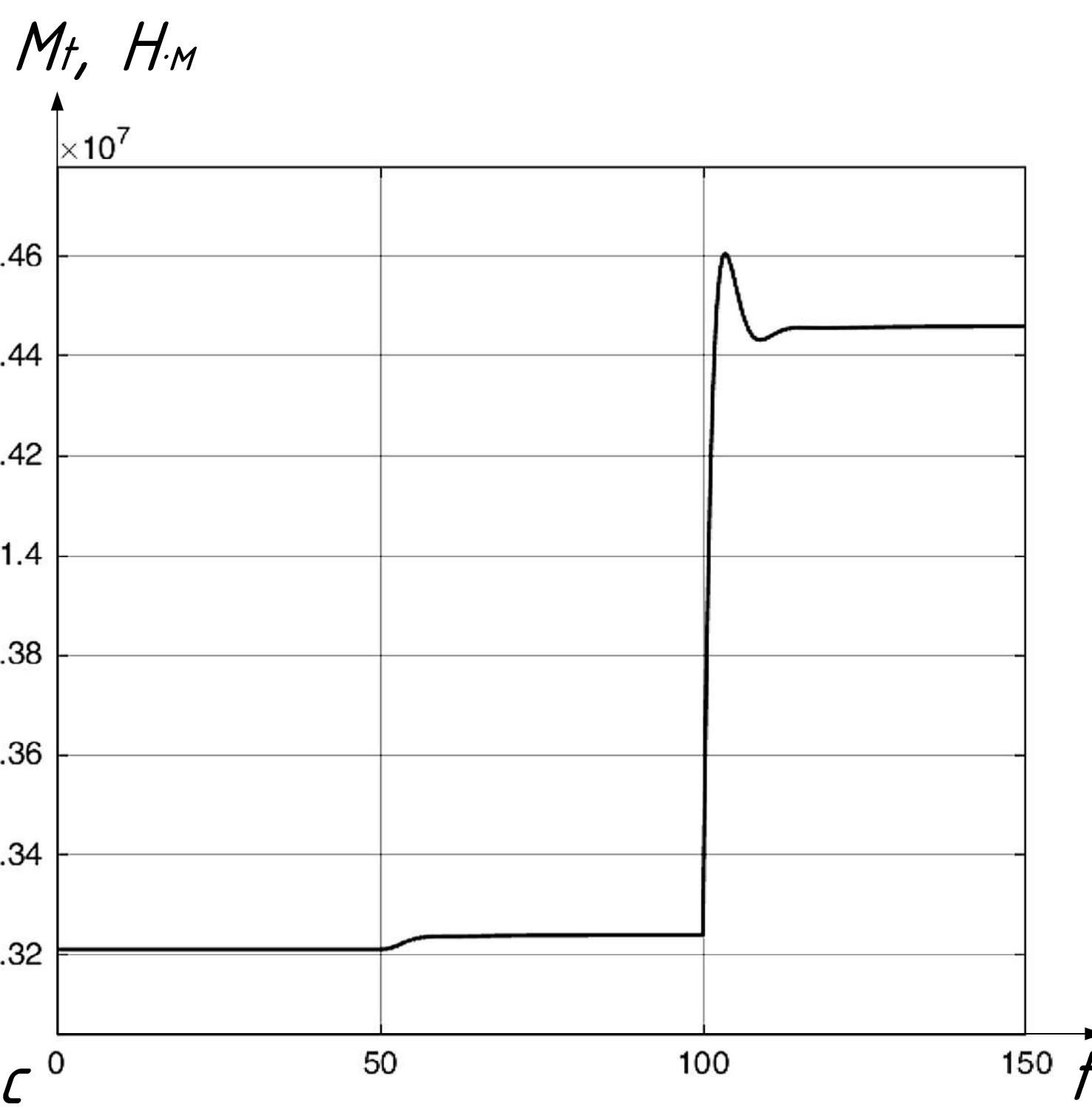


Диаграмма изменения момента турбины

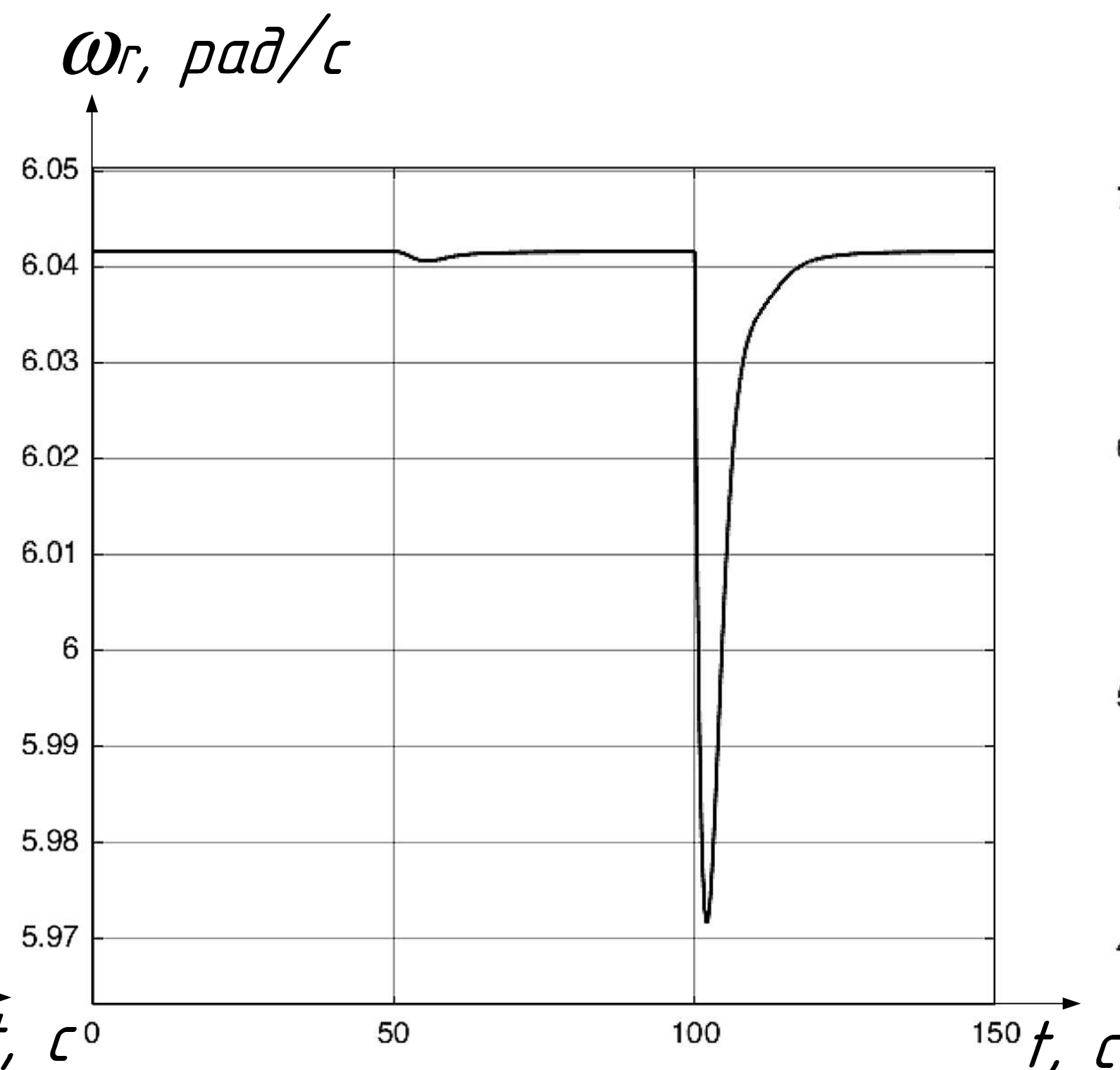


Диаграмма изменения угловой скорости ротора

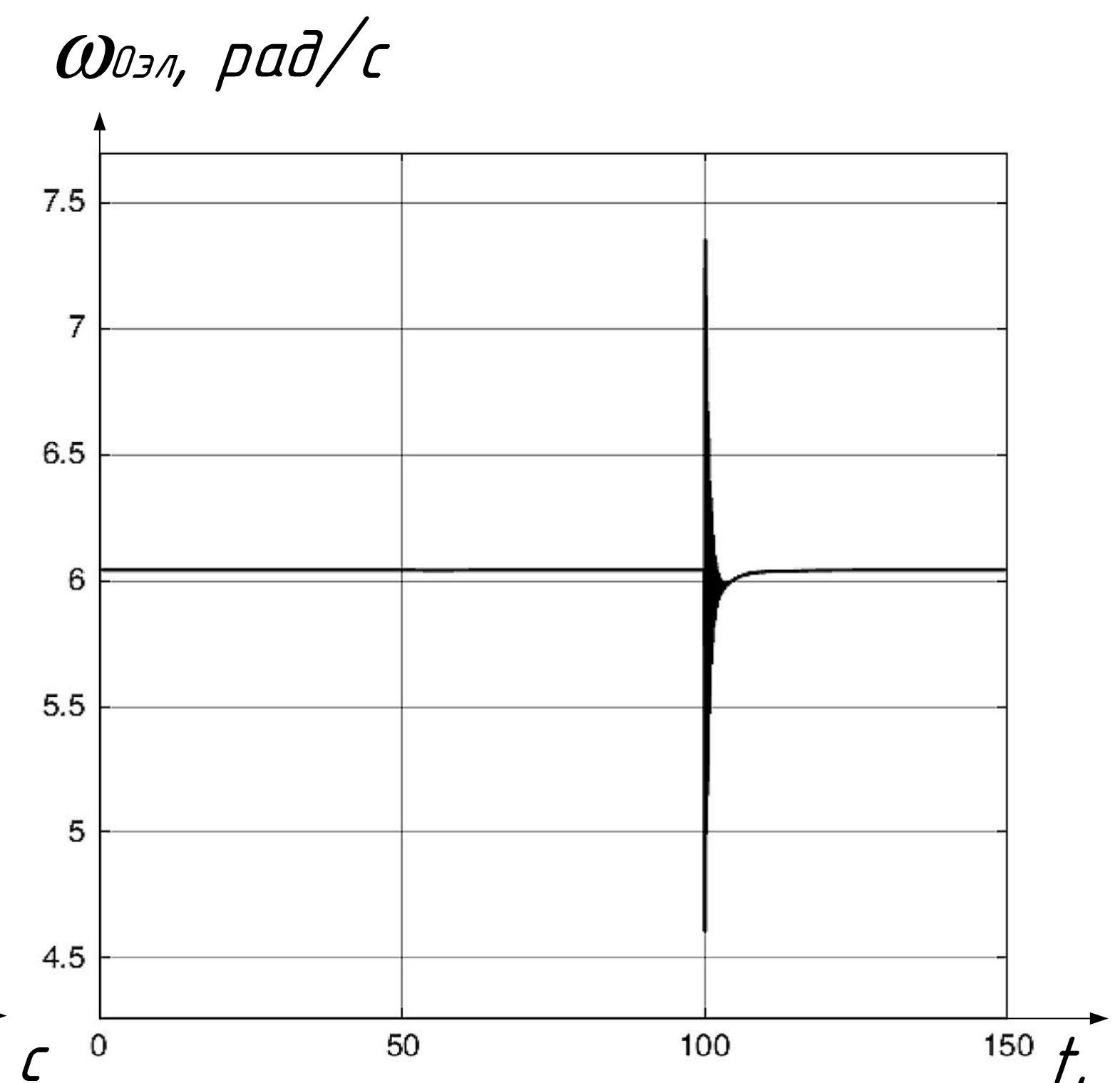


Диаграмма изменения электрической угловой скорости

				ВКР.154.022.15.03.04.П1			
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Литера	Масса	Масшт.
					у		
Разраб.		Симичин В.Р.					
Провер.		Рыбалева А.Н.					
Т.контр.		Рыбалева А.Н.			Лист 2	Листов 6	
Исполн.		Скрипка О.В.			Автоматизированная система управления гидроагрегатом Нижне-Бурейской ГЭС (комплексная выпускная квалификационная работа)		
Утв.		Скрипка О.В.			АМГУ зр. 541 од		

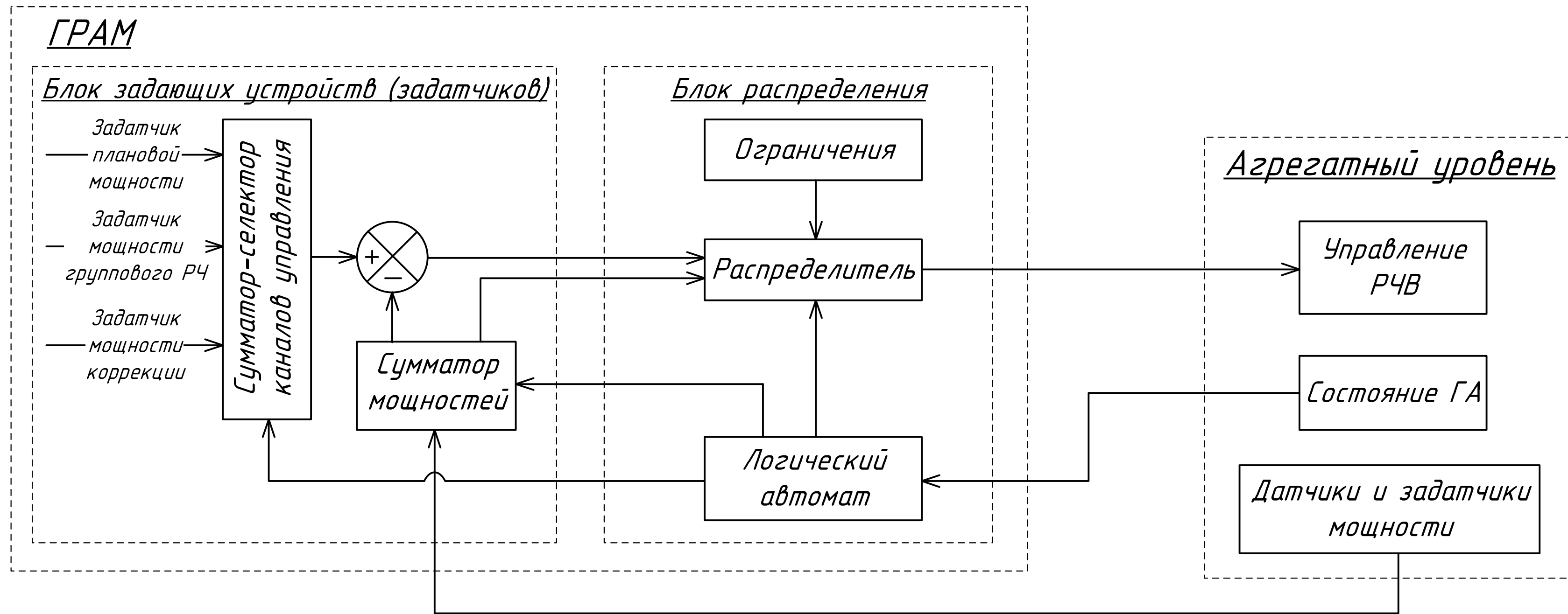


Схема вывода сигнала управления активной мощностью

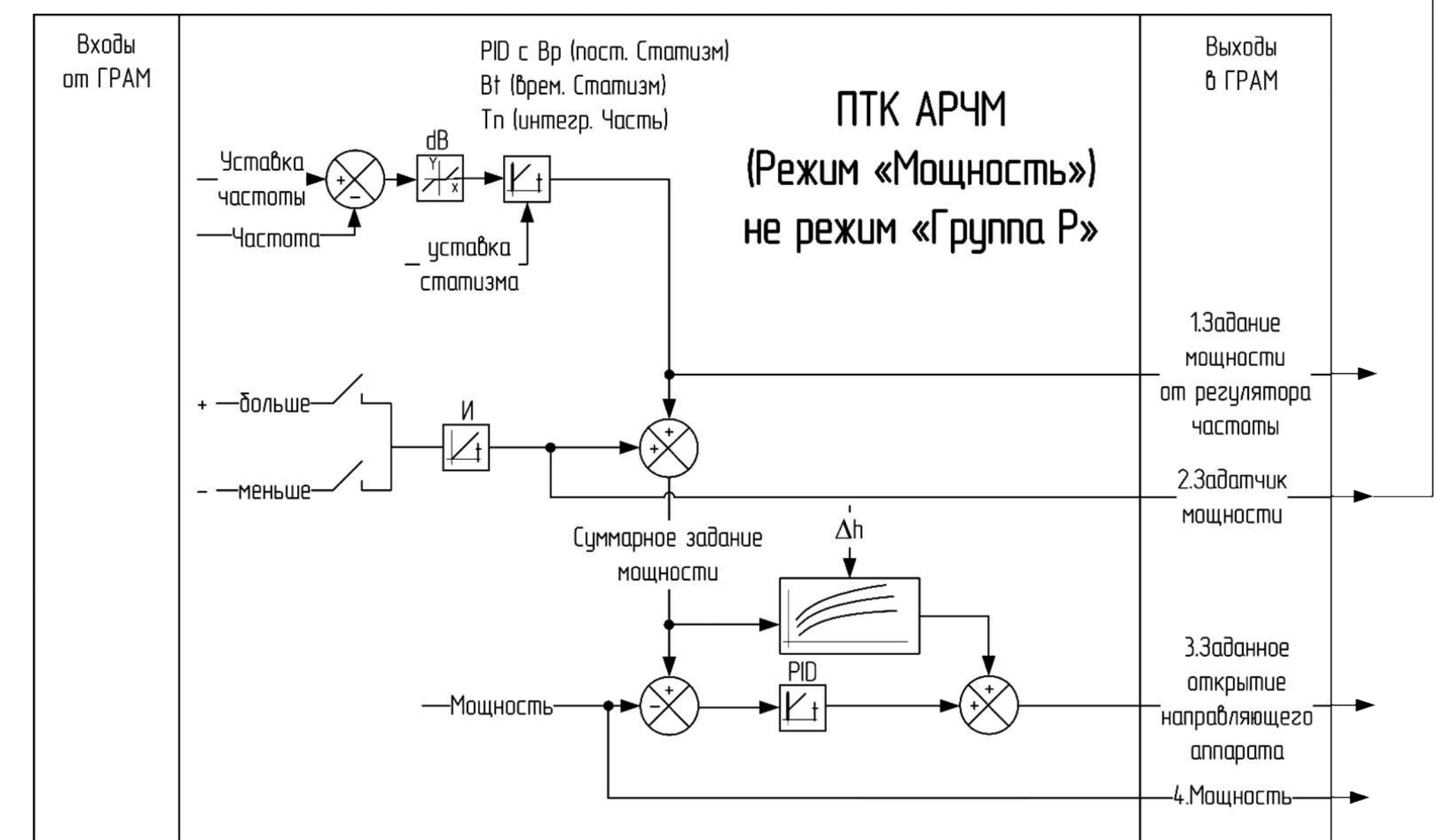
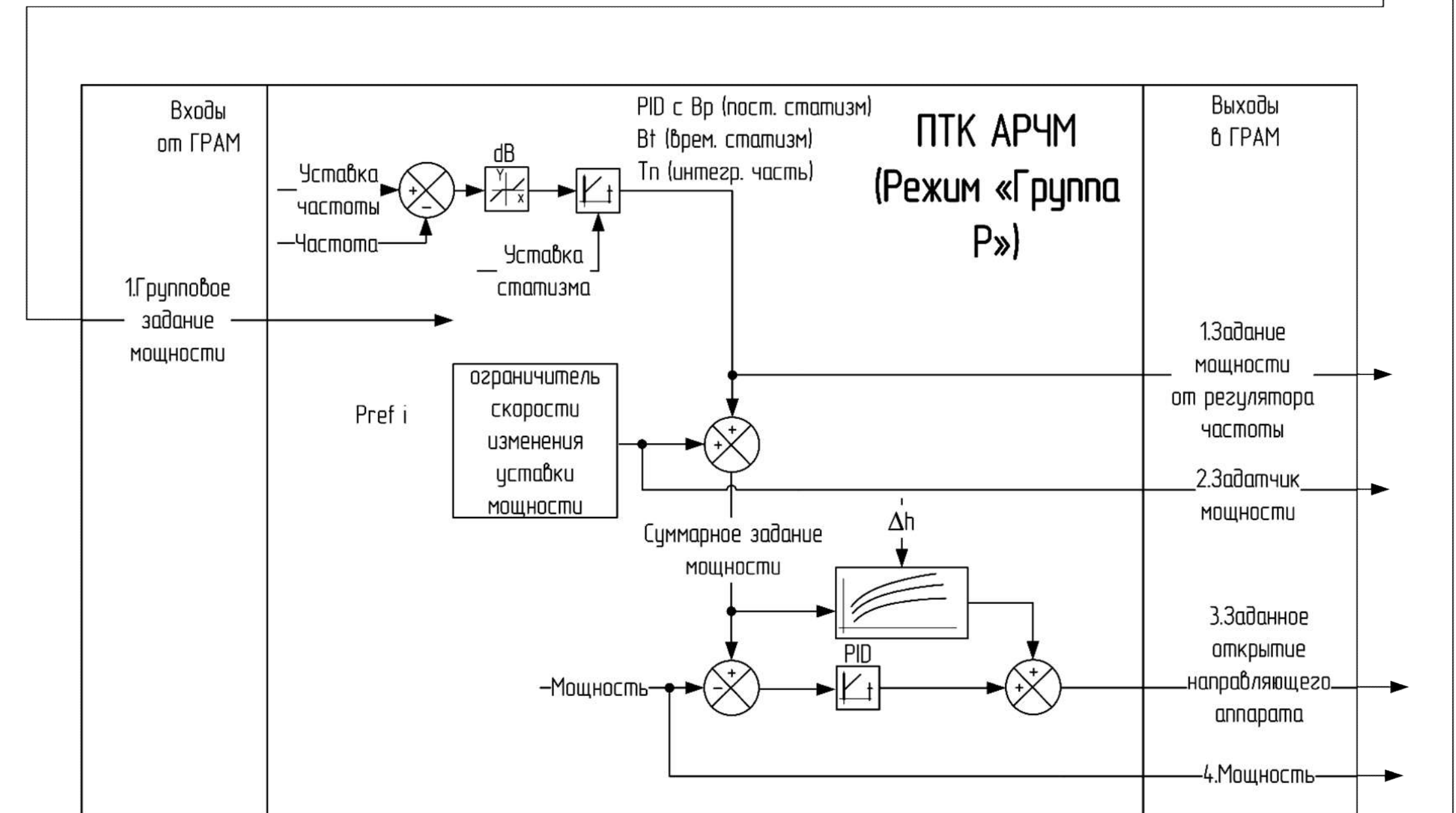
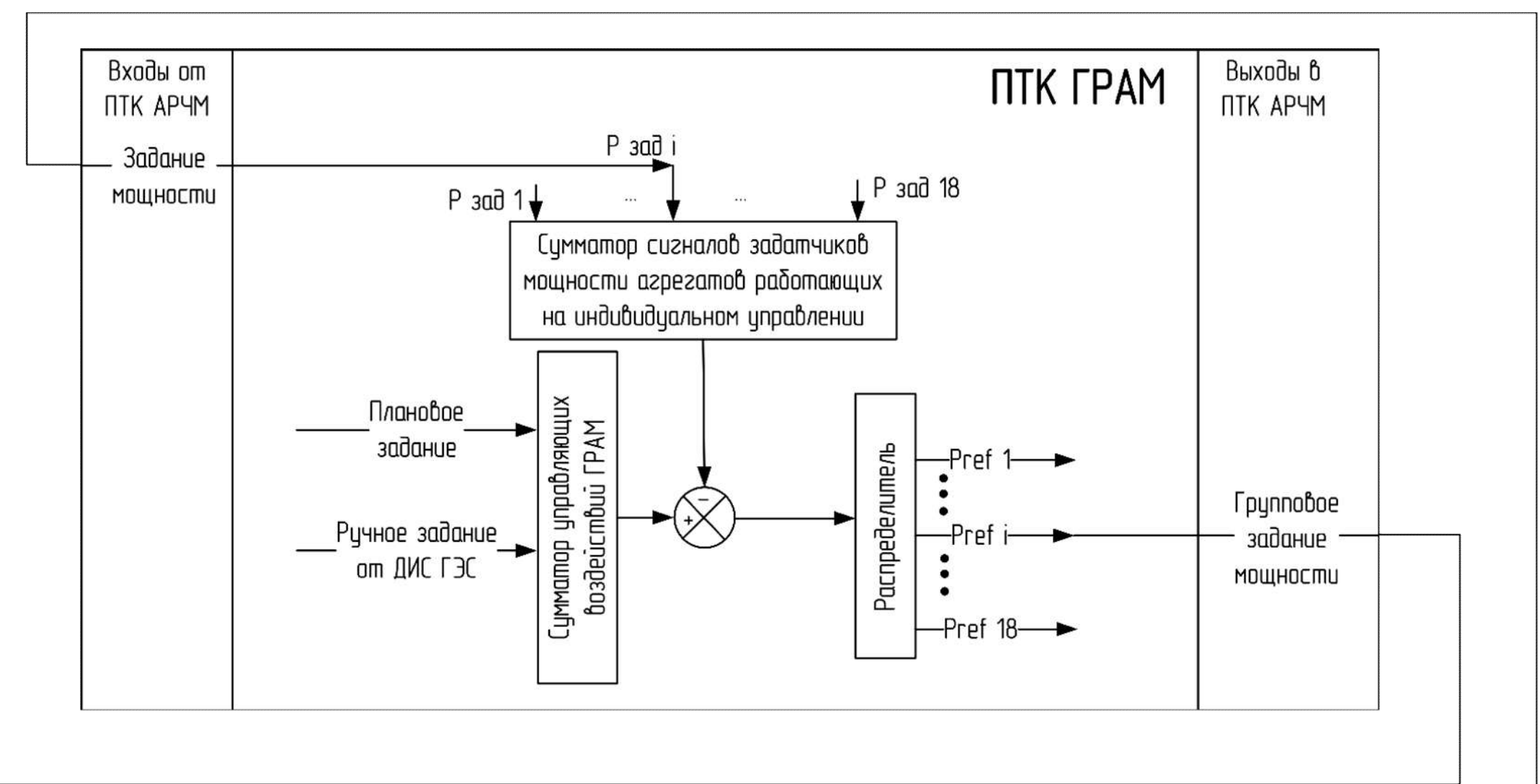


Схема управления активной мощностью ГЭС

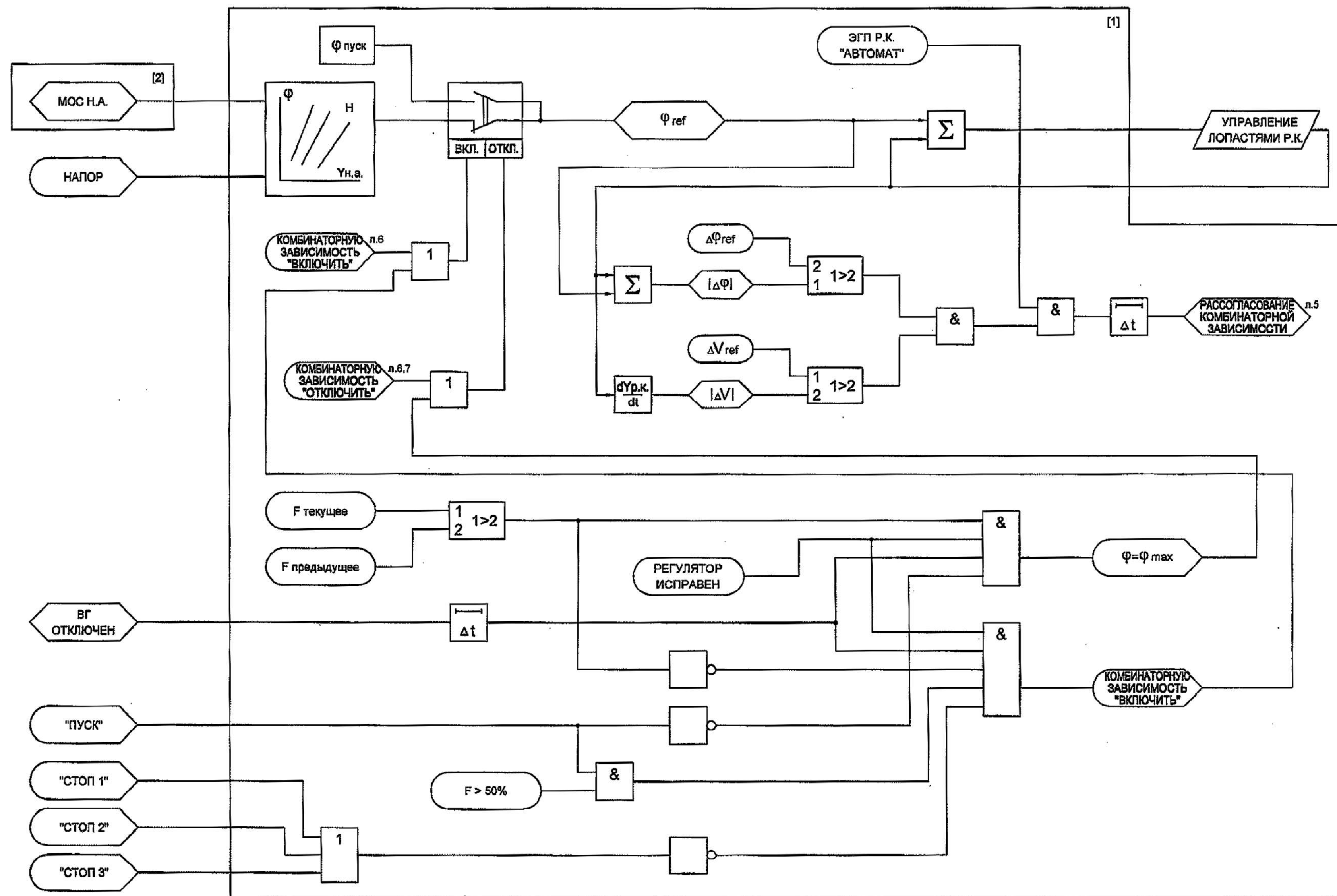


Схема управления лопастями рабочего колеса

				ВКР.154.022.15.03.04.П1		
Изм./Лист	№ документа	Подпись	Дата	Литера	Масса	Масшт.
Разраб.	Симонин В.Р.			У		
Пробер.	Рыбалева А.Н.					
Т.контр.	Рыбалева А.Н.					
Исполн.	Скрипка О.В.					
Утв.	Скрипка О.В.					
Схема вывода сигнала управления активной мощностью, схема управления активной мощностью ГЭС, схема управления лопастями рабочего колеса				Лист 3	Листов 6	
Автоматизированная система управления гидроагрегатом Нижне-Бурейской ГЭС (комплексная выключенная квалификационная работа)				АМГУ зр. 541 од		

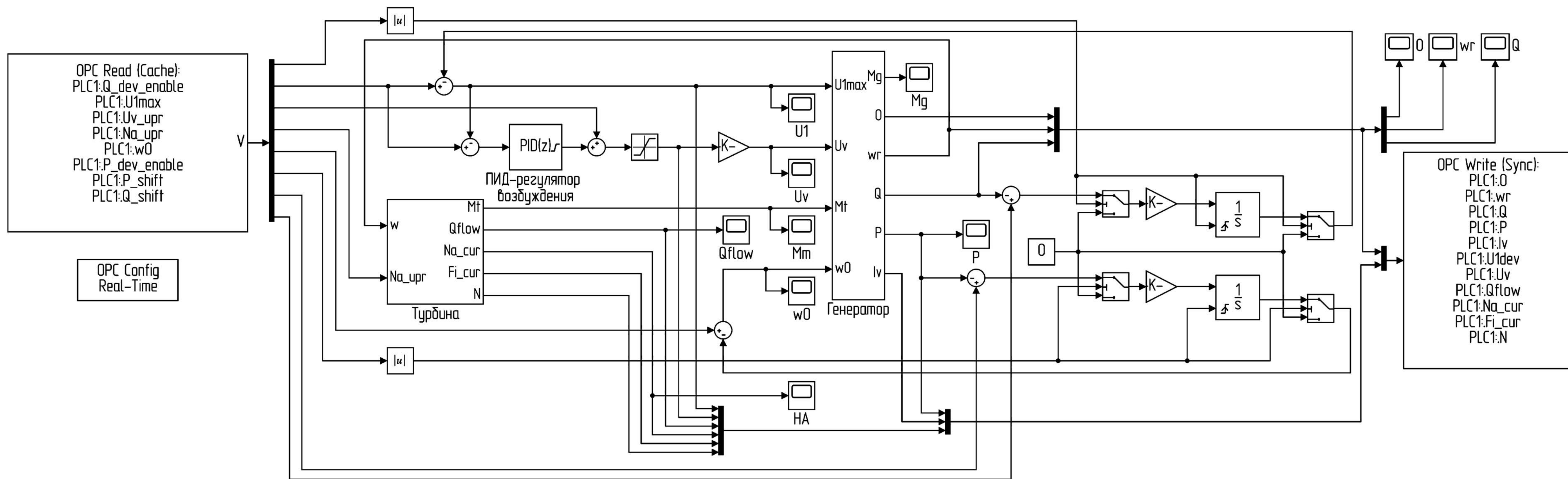


Схема структурная модифицированной имитационной модели гидроагрегата

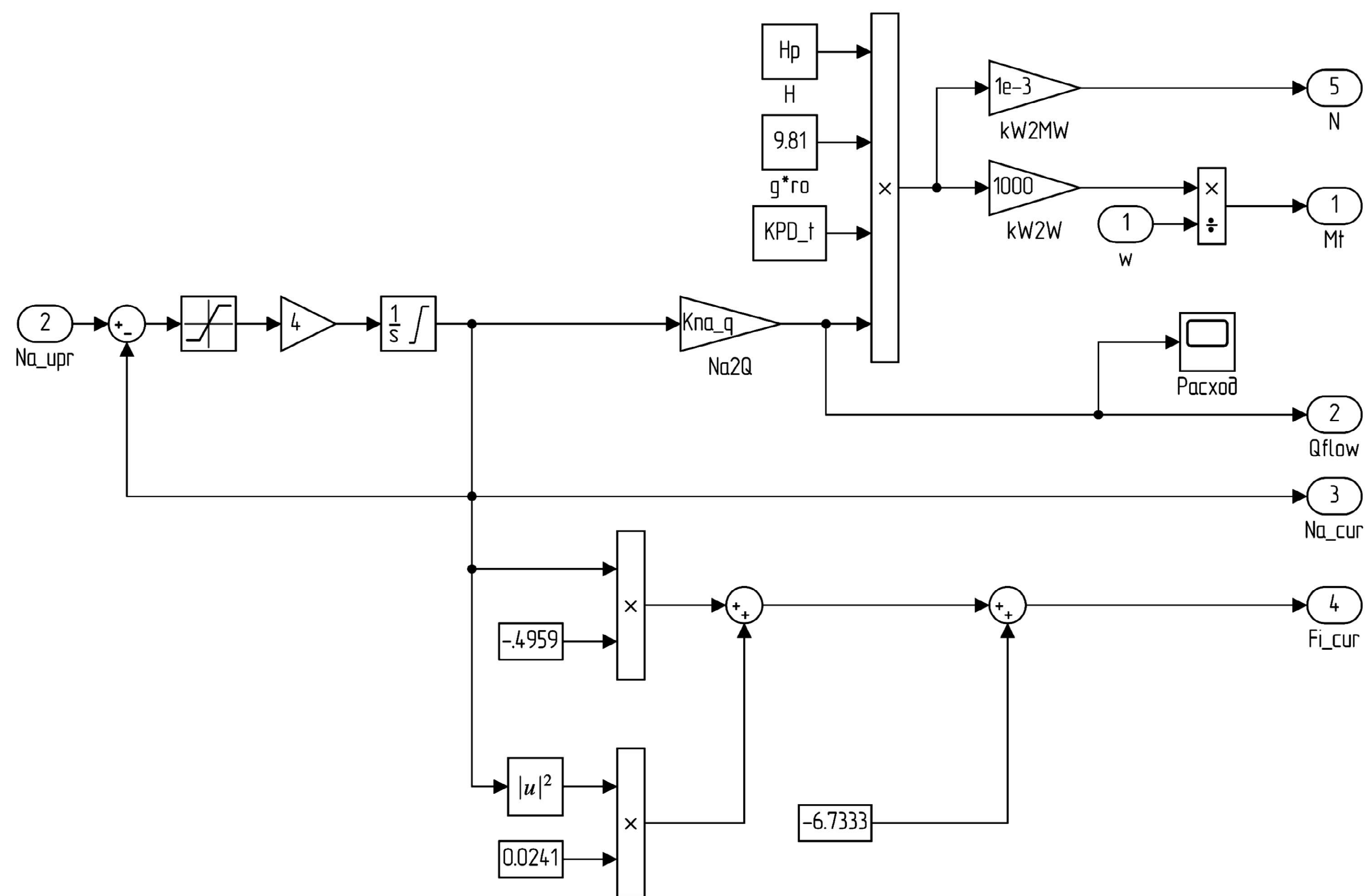
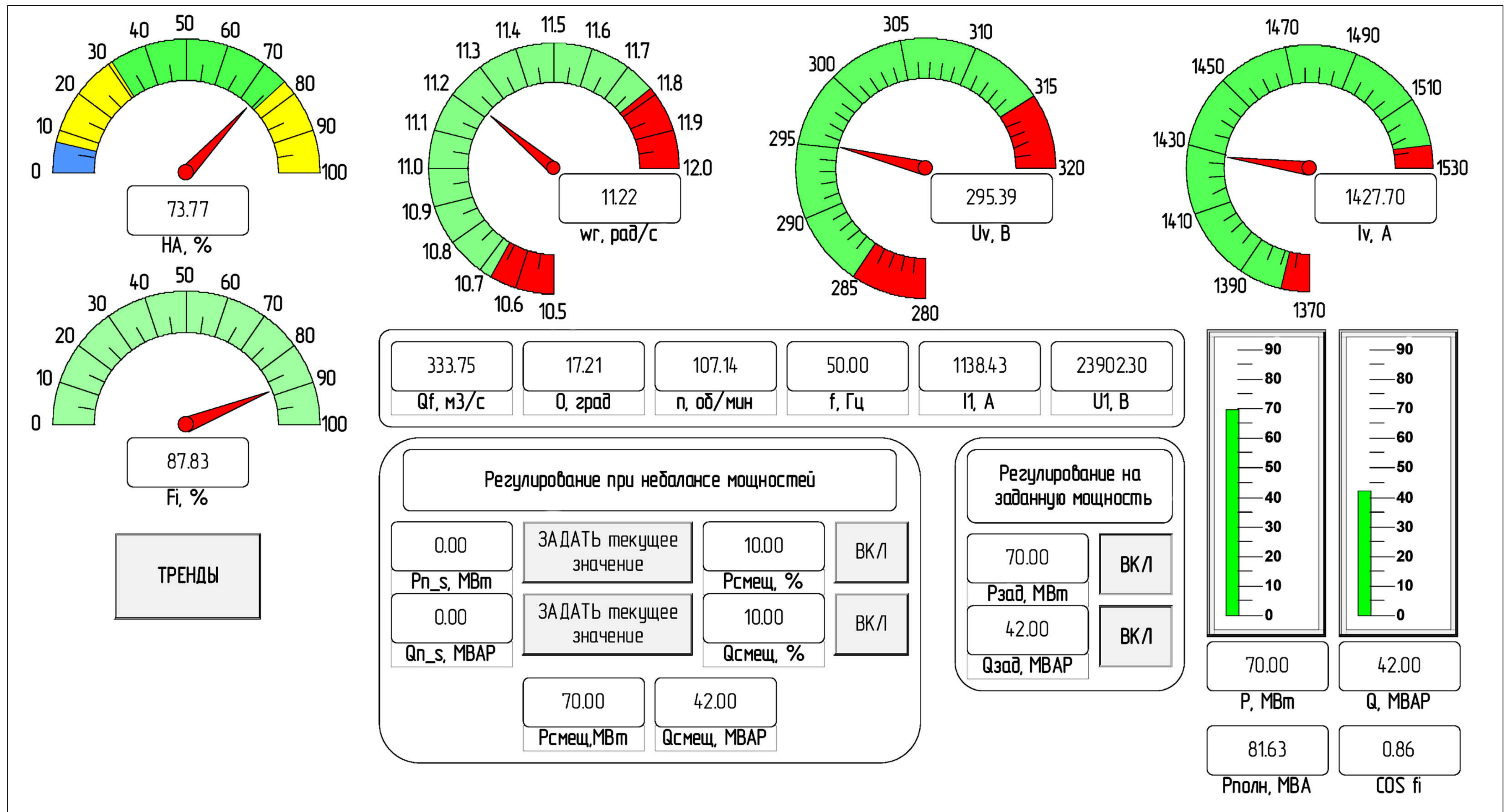


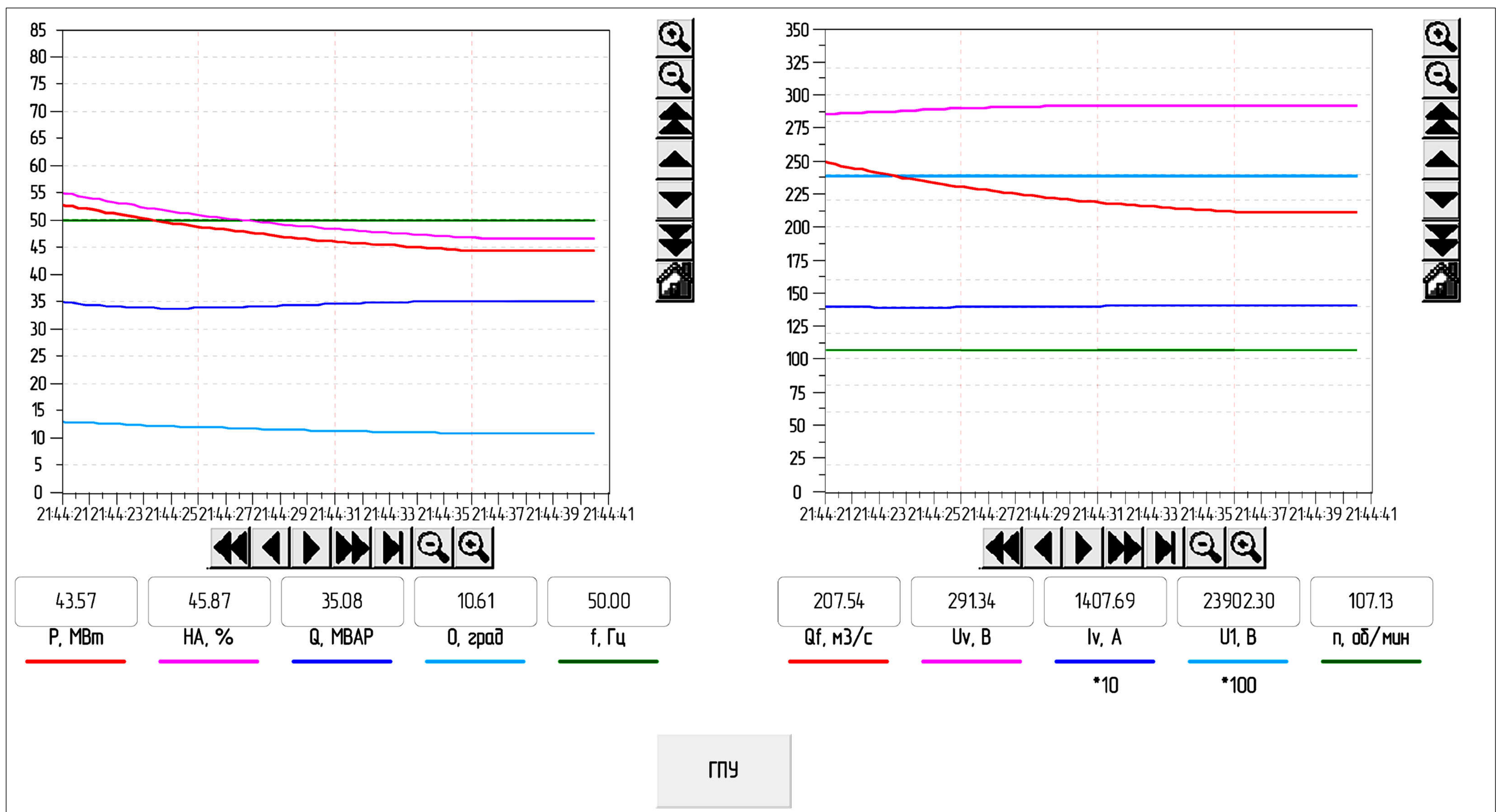
Схема структурная блока «Турбина»

Параметры соединения с OPC-сервером

				BKP.154.022.15.03.04.171				
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Схемы структурные модифицированной имитационной модели гидроагрегата, блока «Турбина», параметры соединения с OPC-сервером	Литера	Масса	Масшт.
						y		
Разраб.		Симонин В.Р.						
Провер.		Рыбалева А.Н.						
Т.контр.		Рыбалева А.Н.						
Исполн.		Скрипка О.В.			Автоматизированная система управления гидроагрегатом Нижне-Бурейской ГЭС (комплексная выделенная квалификационная работа)	Лист 4	Листов 6	
Утв.		Скрипка О.В.						АМГУ зр. 541 од



Экран главного пульта управления



Экран диаграмм параметров системы

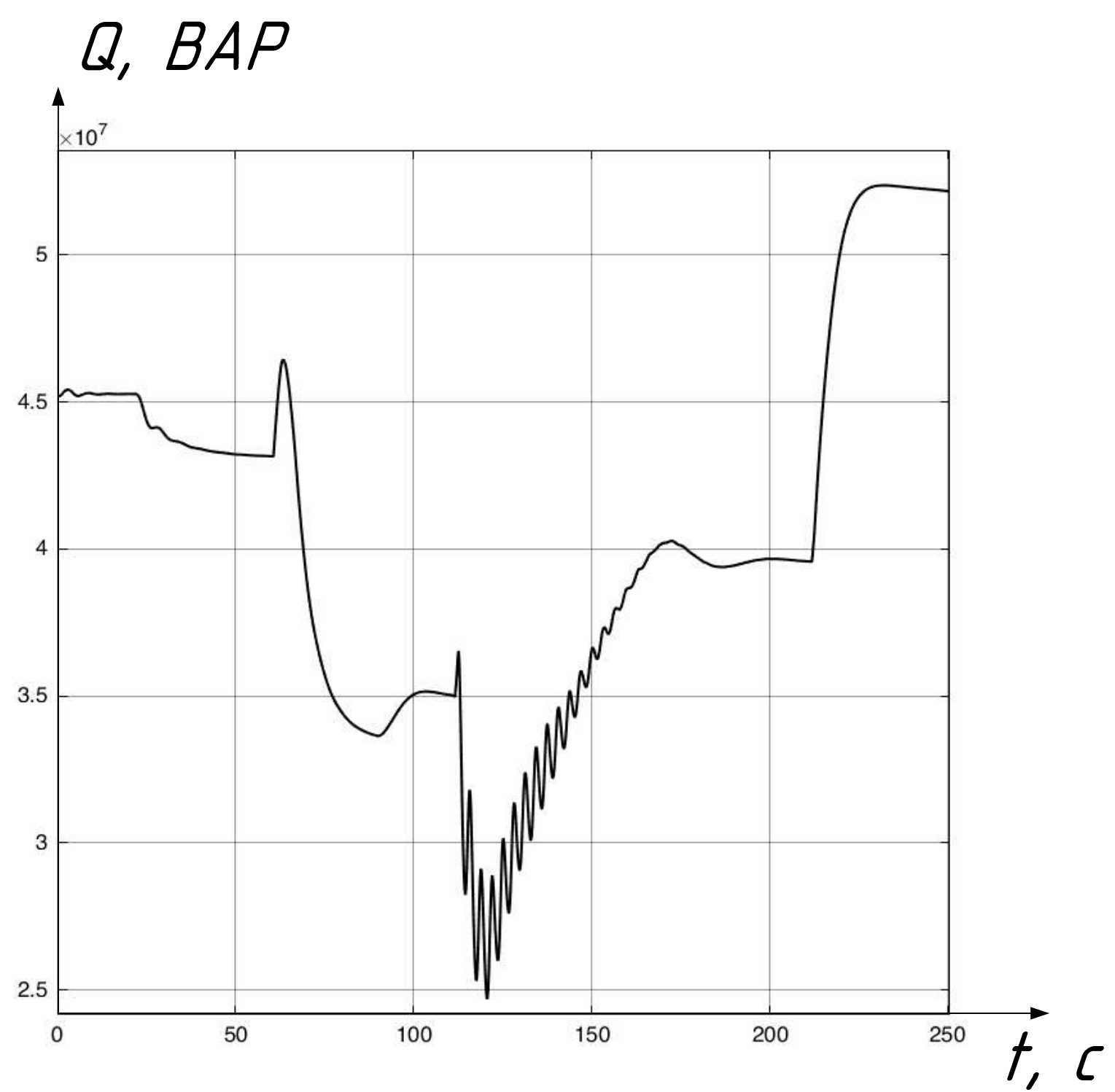


Диаграмма изменения реактивной мощности

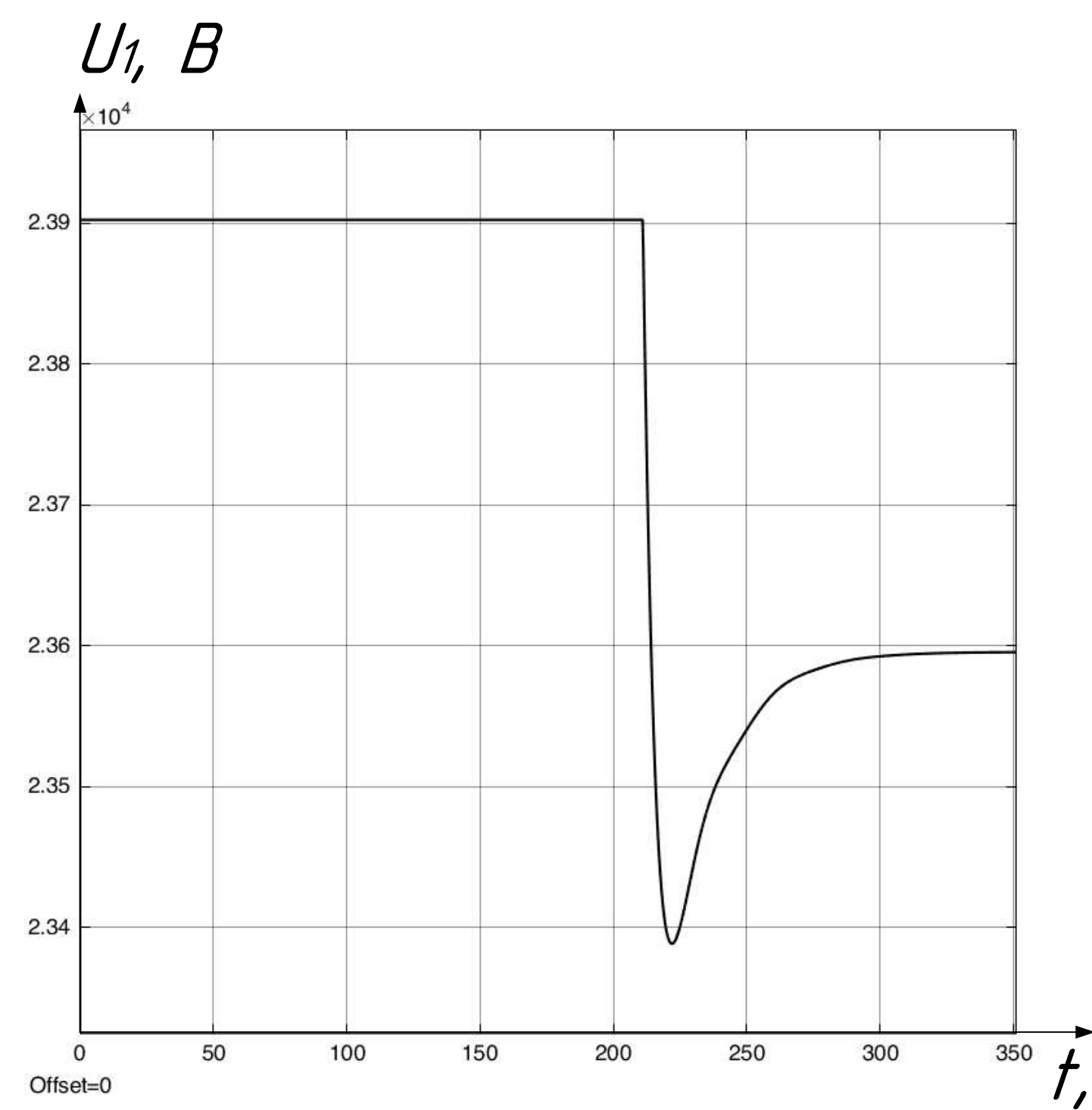


Диаграмма изменения напряжения

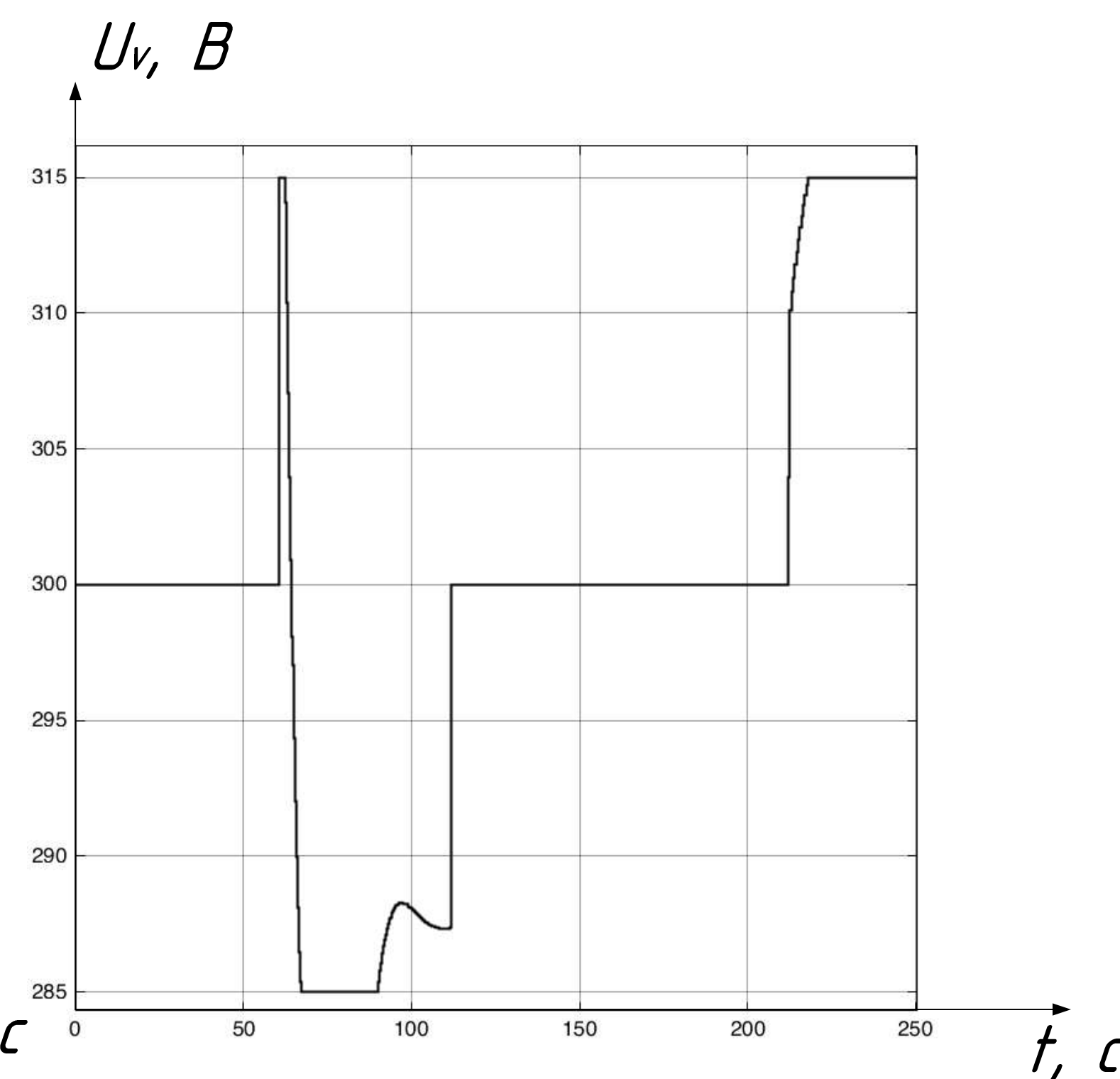


Диаграмма изменения напряжения возбуждения

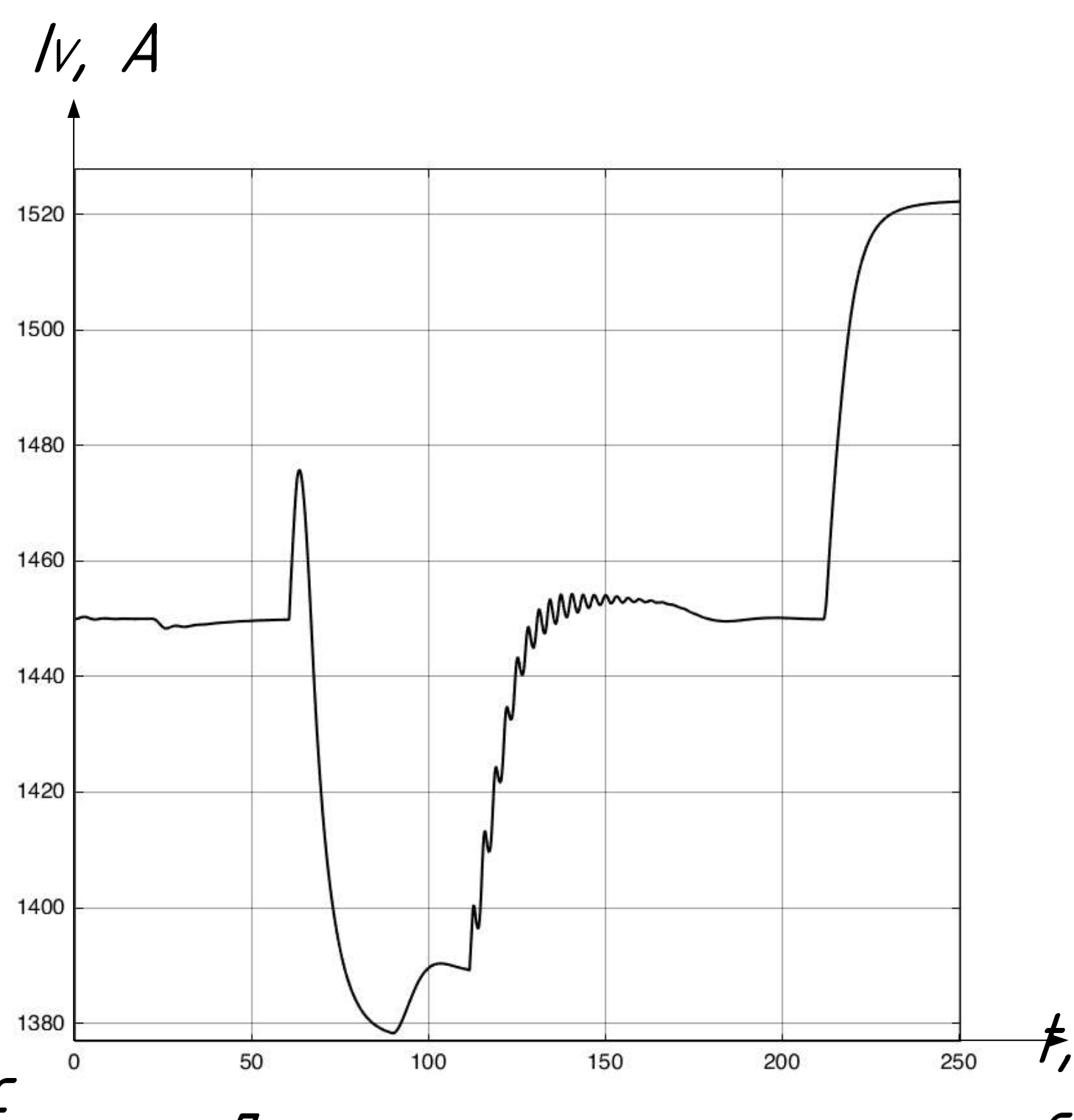


Диаграмма изменения тока возбуждения

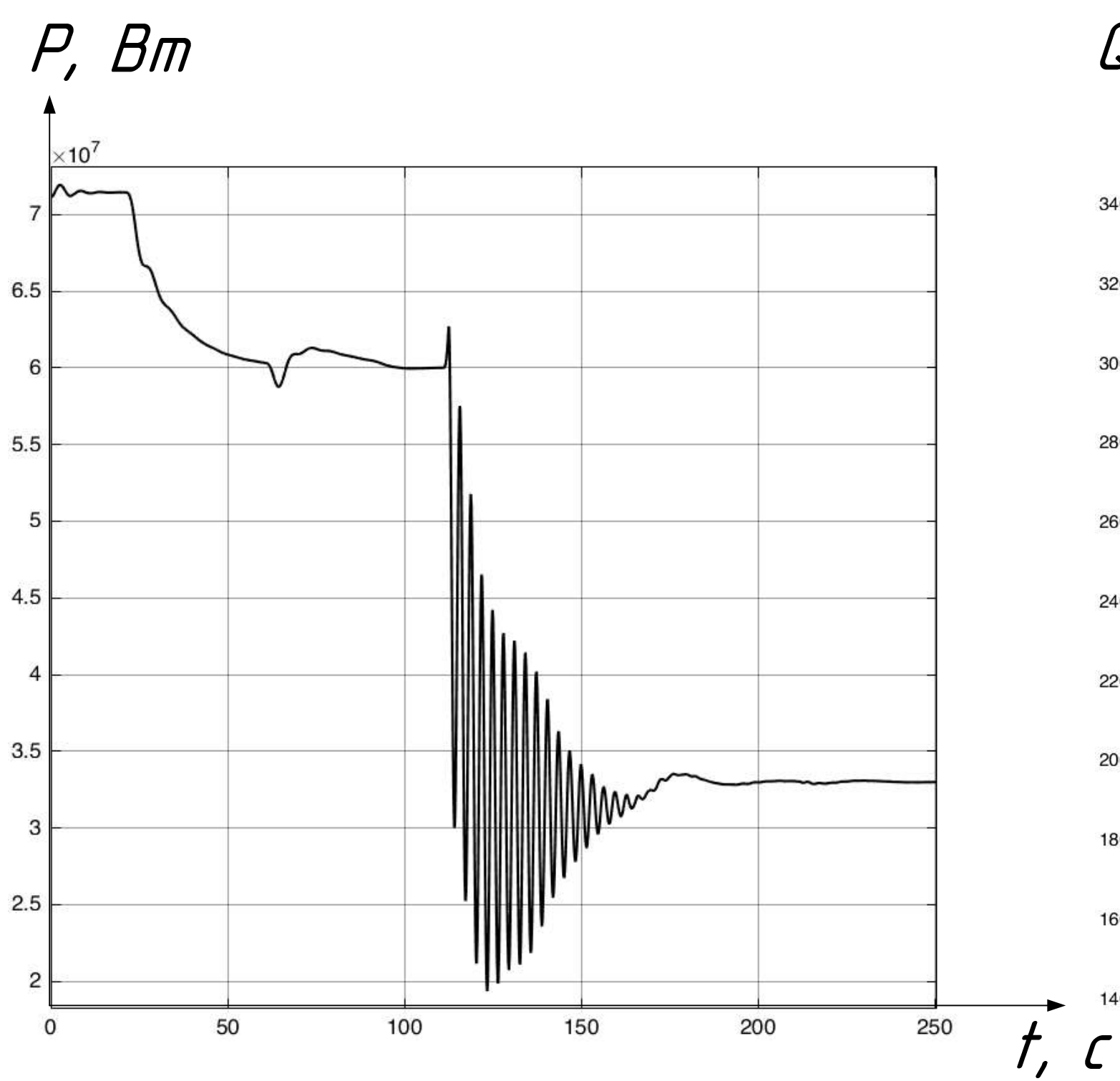


Диаграмма изменения активной мощности

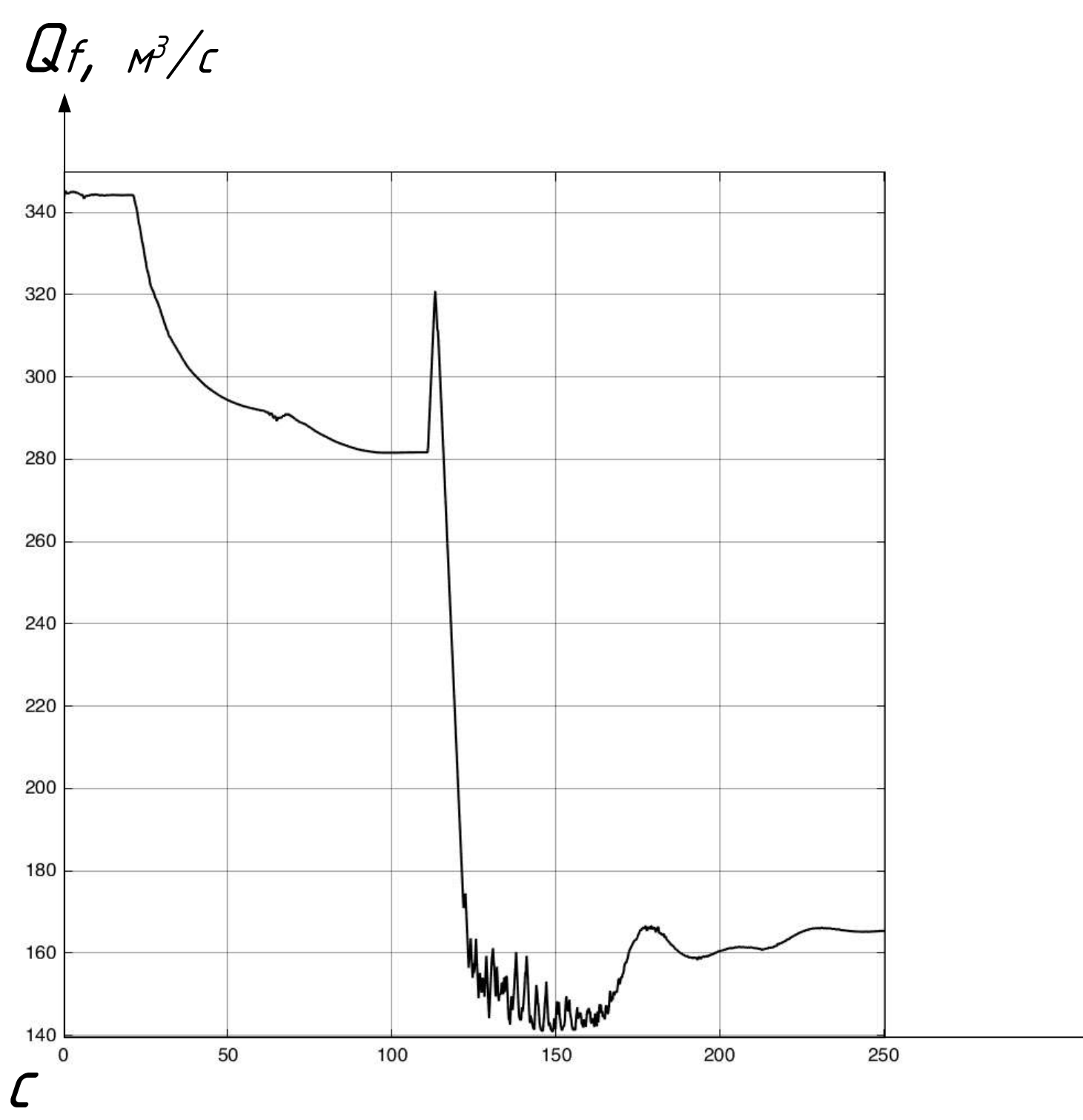


Диаграмма изменения расхода

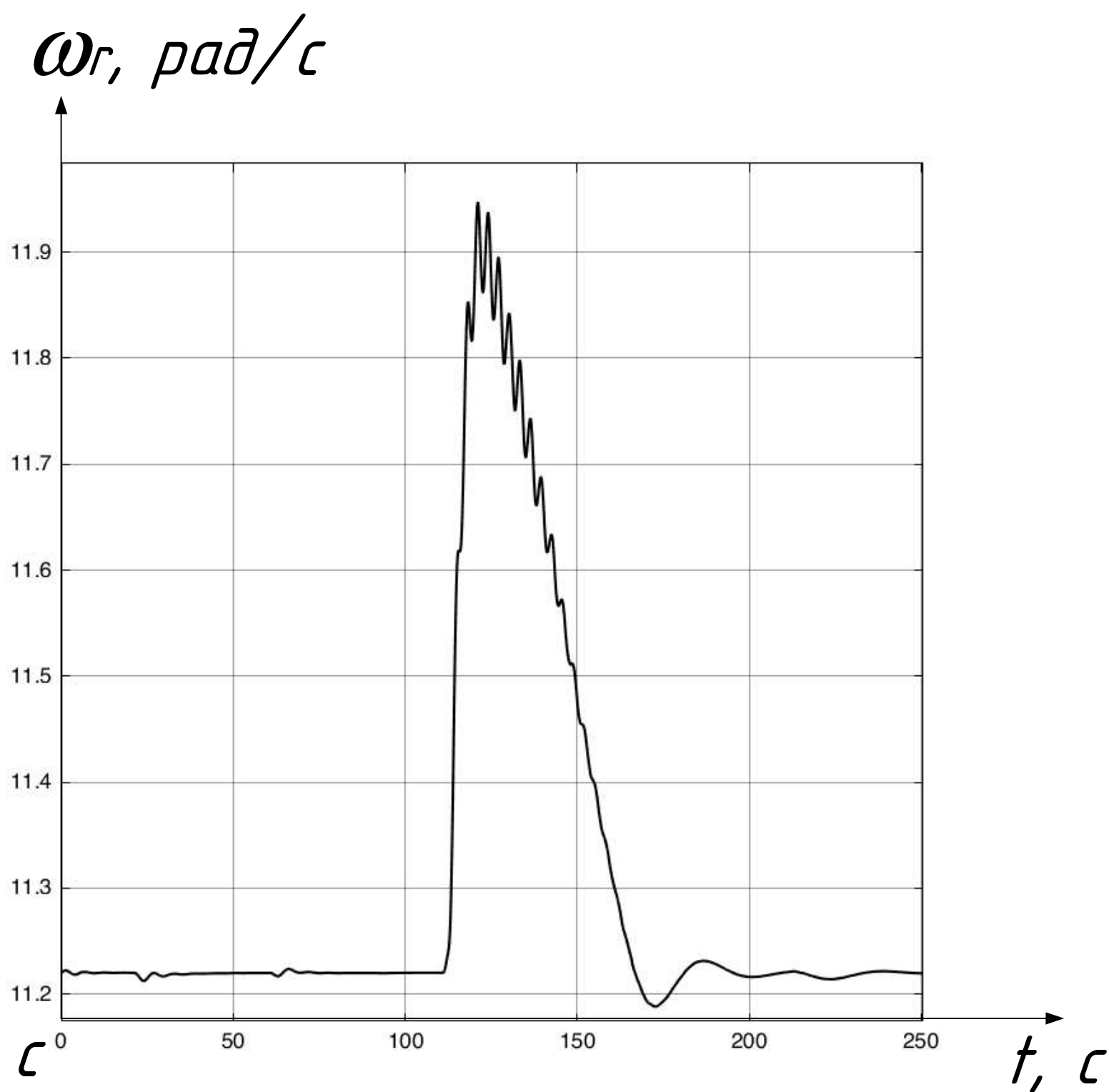


Диаграмма изменения угловой скорости ротора

Протокол моделирования:

0 с: Система запущена, регуляторы мощности отключены
 20 с: Включен регулятор активной мощности, уставка P=60 МВт
 60 с: Включен регулятор реактивной мощности, уставка Q=35 МВАР
 110 с: Регуляторы мощностей выключены, включен режим небаланса по активной мощности, Ps=30 МВт
 210 с: включен режим небаланса по реактивной мощности, Qs=51 МВАР

				ВКР.154.022.15.03.04.171			
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Литера	Масса	Масшт.
Разраб.	Смичин	В.Р.			У		
Провер.	Рыбалева	А.Н.					
Т.контр.	Рыбалева	А.Н.			Лист 6	Листов 6	
Исполн.	Скрипка	О.В.			Автоматизированная система управления гидроагрегатом Нижне-Бурейской ГЭС (комплексная выпускная квалификационная работа)		
Утв.	Скрипка	О.В.					