

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

Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических
систем и электрических сетей»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ _____
подпись, дата инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МАЛЫМИ ГЭС
ЮЖНЫХ РЕГИОНОВ СИБИРИ**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный
руководитель

подпись, дата

доцент,
канд. тех. наук.
должность

Л.В. Толстихина
инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Н.С. Фроленко
инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

начальник
оперативно-
диспетчерской
службы Филиала
ПАО «РусГидро» —
«Саяно-Шушенская
ГЭС имени П.С.
Непорожного»
должность

И.Ю. Погоняйченко
инициалы, фамилия

Нормоконтролёр

подпись, дата

А.А. Чабанова
инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2019

АННОТАЦИЯ

Тема магистерской диссертации: Искусственный интеллект для управления малыми ГЭС южных регионов Сибири.

Объем диссертации составляет 85 страниц, содержит 87 иллюстраций и 47 формул. Список литературы состоит из 65 наименований.

Объектом исследования при написании работы послужила схема с функциональными блоками для управления проектируемых малых ГЭС.

Целью работы является создание интеллектуальной модели по обеспечению автономной работы станции.

Научная новизна.

– Разработана нелинейная модель гидравлической турбины для динамических исследований гидроэлектростанций;

– Разработаны модели для различных компонентов в программном обеспечении Matlab / Simulink;

– Модернизирована модель гидроэлектростанции для режима в реальном времени в среде RT-LAB;

– Разработана имитационная модель малой гидроэлектростанции в среде Matlab / Simulink и анализ её поведения в различных режимах работы.

Ключевые слова: малые ГЭС, гидроэнергетический потенциал, интеллектуальные сети, алгоритм работы, электроэнергетическая система, система дистанционного управления, гидротурбина, система возбуждения, синхронный генератор, моделирование.

Магистерская диссертация состоит из аннотации, автореферата, содержания, введения, четырех глав, заключения, номенклатуры и списка используемой литературы.

Во введении рассматривается актуальность исследования по выбранному направлению, указывается его значимость, ставятся цели и задачи, необходимые для её реализации.

Первая глава посвящена литературному поиску за период 15-20 лет в России и за рубежом по использованию искусственному интеллекта в управлении гидроэлектростанций.

Вторая глава посвящена введению в математическое моделирование, о его преимуществах и недостатках, и о возможном применении программного комплекса Matlab / Simulink.

В третьей главе произведено математическое моделирование гидравлической системы, гидравлической турбины, регулятора, синхронного генератора, системы возбуждения, линии электропередач.

В главе 4 представлены результаты моделирования малой гидроэлектростанции, выполненной в среде Matlab / Simulink и в среде OPAL RT-LAB при различных условиях эксплуатации.

В заключении приведены выводы.

АВТОРЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа на тему «Искусственный интеллект для управления малыми ГЭС южных регионов Сибири». В программе развития гидроэнергетики России на период до 2050 года предполагается увеличение потребления электроэнергии, в том числе за счет освоения имеющихся гидроэнергетических ресурсов Сибири и Дальнего Востока. В связи с этим возможно строительство малых ГЭС в Республике Алтай, Тыва, Хакасия и юг Красноярского края. В настоящее время принята программа проекта РусГидро «Малые ГЭС Алтая». Отмечается важность строительства малых гидроэлектростанций в статье института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск.

Актуальность работы.

Проблема обеспечения дешевой электроэнергией, как промышленных объектов, так и населенных пунктов, была и остается весьма актуальной. Более 20 млн. человек за Уралом живет в зонах децентрализованного электроснабжения. Особенно значима она для отдаленных районов Сибири и Крайнего Севера, где нет развитой сети линий электропередач, и население получает электроэнергию по 3-4 часа в сутки от дизель-электрической станции (ДЭС). Строительство малых ГЭС (МГЭС) может изменить условия жизни этих людей, обеспечить энергетическую безопасность регионов и способствовать развитию экономики [1].

Единственный источник получения электроэнергии в таких условиях – это дизель-электрические станции. Однако известно, что для получения 1 кВт·ч электроэнергии при этом расходуется около 250 г. дизельного топлива, которое постоянно дорожает. На сегодня, например, себестоимость 1 кВт·ч, произведенной на ДЭС, на одном из предприятий Республики Тыва уже достигает 20 – 40 руб. При такой цене электроэнергии значительно возрастают эксплуатационные затраты, и по этой причине многие месторождения становятся нерентабельными для освоения.

При замещении ДЭС перспективным направлением является сооружение ГЭС небольшой мощности, которые не требуют больших капитальных затрат при сооружении, имеют небольшие сроки окупаемости и могут обеспечить потребителя недорогой электроэнергией. Поэтому проблема обеспечения дешевой электроэнергией остается весьма актуальной. Особенно значима данная проблема для отдаленных районов. На малых ГЭС для эффективного их управления и защиты должны быть предусмотрены функциональные возможности. В связи с этим необходимо внедрение автоматизации и дистанционного управления за работой малых ГЭС, что обеспечит в свою очередь автономную работу без постоянного присутствия обслуживающего персонала.

Цель работы.

Создать интеллектуальную модель по обеспечению автономной работы станции. Интеллектуальное устройство должно быть компактным и

интегрированным с контролем электрических и механических элементов, включая систему подачи воды, передачи данных, мониторинга и защиты для малых гидроэлектростанций.

Цель работы:

- Разработать модель гидроэлектростанции в Matlab / Simulink.
- Моделирование и анализ работы гидроэлектростанции в различных условиях эксплуатации: увеличение и снижение нагрузки, короткое замыкание на выводах генератора.
- Моделирование и анализ работы гидроэлектростанции в различных условиях в режиме реального времени в среде OPAL RT-LAB.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Внедрение систем автоматического управления гидроагрегатами МГЭС;
2. Реализация дистанционного управления и контроля за малыми ГЭС;
3. Разработка имитационной модели для управления работой станции.

Объект и предмет исследования. Объект исследования – схема с функциональными блоками для управления проектируемых малых ГЭС.

Предмет исследования – управление искусственным интеллектом режимом работы малых ГЭС.

Методы исследования. Для решения поставленной цели и задач использовались методы математического моделирования, имитационная модель устройства дистанционного управления в Simulink.

Достоверность полученных результатов. Обоснованность и достоверность результатов проведенных исследований определяются реализацией интеллектуальной основой для управления малых ГЭС в имитационной модели Simulink. В процессе работы над диссертацией был выполнен анализ алгоритмов и методов по управлению режимами малых ГЭС.

Научная новизна.

- Разработана нелинейная модель гидравлической турбины для динамических исследований гидроэлектростанций;
- Разработаны модели для различных компонентов в программном обеспечении Matlab / Simulink;
- Разработана имитационная модель малой гидроэлектростанции в среде Matlab / Simulink и анализ её поведения в различных режимах работы

Апробация работы.

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены:

- на V Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Гидроэлектростанции в XXI веке» (р.п. Черемушки, 2018 г.);
- на XIII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (г. Казань, 2018 г.);

– на IV (XIX) Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Молодая мысль – развитию энергетики» (г. Братск, 2019 г.);

Публикации:

Основные положения и выводы изложены в 3 публикациях в научных изданиях, которые включены в РИНЦ. Имеется справка о положительном решении о публикации статьи в международной базе Scopus.

Личный вклад: выносимые на защиту результаты получены соискателем лично.

Структура диссертации: составляет 85 страниц, содержит 87 иллюстраций и 47 формул. Список используемой литературы состоит из 65 наименований-

Практическая ценность работы. Применение современной высоконадежной элементной базы, средства передачи данных и новых алгоритмов управления оборудованием позволяют МГЭС работать в автоматическом режиме без постоянного присутствия обслуживающего персонала как на параллельную работу, так и на изолированную нагрузку. Все это снижает эксплуатационные расходы, повышает надежность функционирования МГЭС и их инвестиционную привлекательность.

ABSTRACT

Final qualifying work on the topic «Artificial Intelligence for the management of small hydropower plants of the southern regions of Siberia». The Hydropower Development Program of Russia for the period until 2050 assumes an increase in electricity consumption, including through the development of available hydropower resources of Siberia and the Far East. In this regard, it is possible to build small hydropower plants in the Republic of Altai, Tyva, Khakassia and the south of Krasnoyarsk Krai. At present, the program of the RusHydro project “Small Hydropower Plants of Altai” has been adopted. The importance of the construction of small hydropower plants is noted in an article by the Institute of Energy Systems them. L.A. Melentyeva SB RAS, Irkutsk.

Relevance of the work.

The problem of providing cheap electricity, both industrial facilities and settlements, has been and remains highly relevant. More than 20 million people outside the Urals live in decentralized power supply zones. It is especially significant for remote areas of Siberia and the Far North, where there is no developed network of power lines, and the population receives electricity 3-4 hours a day from a diesel-electric station (DES). The construction of small hydropower plants (SHPP) can change the living conditions of these people, ensure the energy security of the regions and contribute to the development of the economy [1].

The only source of electricity generation in such conditions is diesel-electric stations. However, it is known that for the production of 1 kW·h of electricity, this consumes about 250 g of diesel fuel, which is constantly becoming more expensive. Today, for example, the cost of 1 kW·h produced in a diesel power plant at one of the enterprises of the Republic of Tyva already reaches 20-40 rubles. At such a price of electricity, operating costs increase significantly, and for this reason many fields become unprofitable for development.

When replacing DES, a promising direction is the construction of low-capacity hydropower plants, which do not require large capital expenditures during construction have short payback periods and can provide the consumer with inexpensive electricity. Therefore, the problem of providing cheap electricity remains very relevant. This problem is especially significant for remote areas. At small hydropower, plants for their effective management and protection should be provided functionality. In this regard, it is necessary to introduce automation and remote control for the operation of small hydropower plants, which in turn will ensure autonomous operation without the constant presence of attendants.

Objective.

Create an intelligent model to ensure the autonomous operation of the station. The intelligent device should be compact and integrated with the control of electrical and mechanical elements, including water supply, data transmission, monitoring and protection systems for small hydropower plants.

Purpose of work:

- Develop a hydroelectric model in Matlab / Simulink.

- Modeling and analysis of hydroelectric power in various operating conditions, such as an increase and decrease in load, and a short circuit on the generator terminals.
- Modeling and analysis of the hydroelectric power station operation in various conditions in real time in the OPAL RT-LAB environment.

To achieve this goal it is necessary to solve the following tasks:

1. Introduction of automatic control systems for hydropower units of small hydropower plants;
2. Implementation of remote control and monitoring of small hydropower plants.
3. Development of a simulation model for controlling the operation of the station;

The object and subject of study. The object of study is a diagram with functional blocks for controlling the projected small hydroelectric power plants.

The subject of the research is the control of artificial intelligence by the operation mode of small hydroelectric power stations.

Research methods. To solve this goal and tasks, the methods of mathematical modeling, a simulation model of a remote control device in Simulink were used.

The reliability of the results. The validity and reliability of the research results are determined by the implementation of the intellectual basis for the management of small hydropower plants, namely the model in Simulink. In the process of working on a thesis, a complex of algorithms and methods was studied, analyzed and illustrated.

Scientific novelty

- Developed a non-linear model of a hydraulic turbine for dynamic studies of hydroelectric power plants;
- Developed models for various components in Matlab / Simulink software;
- A simulation model of a small hydropower plant in Matlab / Simulink environment and analysis of its behavior in various operating modes

Approbation of work.

The main results of the research presented in the thesis were presented:

- at the V All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Specialists, Post-Graduates and Students «Hydroelectric Power Plants in the XXI Century» (Cheryomushki, 2018);

- at the XIII All-Russian Open Youth Scientific-Practical Conference "Dispatching and Control in the Electric Power Industry" (Kazan, 2018);

- in the IV (XIX) th All-Russian scientific and technical conferences and the second undergraduate and graduate students, "Young thought - energy development" (Bratsk , 2019);

Publications:

The main provisions and conclusions are set forth in 3 publications in scientific journals and publications, which are included in the list of scientific publications sold, defined by the RSCI. There is a certificate of a positive decision on the publication of an article in the international Scopus database.

Personal contribution: Brought to the defense results obtained by the applicant personally.

Thesis structure: It is 85 pages, contains 87 illustrations and 47 formulas. The list of used literature consists of 65 items.

The practical value of the work. The use of modern highly reliable element base, data transmission facilities and new equipment control algorithms allow small hydroelectric power plants to operate in an automatic mode without the constant presence of service personnel for both parallel operation and isolated load. All this reduces operating costs, increases the reliability of the operation of small hydropower plants and their investment attractiveness.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	10
1 Искусственный интеллект в гидроэнергетике. Состояние вопроса	12
2 Моделирование гидроэлектростанции.....	20
3 Математическое моделирование различных компонентов малой гидроэлектростанции	24
3.1 Моделирование гидравлической системы.....	24
3.1.1 Модель водохранилища	24
3.1.2 Модель расширительного бака.....	25
3.2 Модель гидравлической турбины	26
3.3 Модель регулятора.....	29
3.4 Модель синхронного генератора.....	30
3.5 Модель системы возбуждения.....	31
3.6 Модель линии передачи	33
4 Исследование динамических характеристик МГЭС в среде Matlab/Simulink. 36	
4.1 Модель гидротурбины.....	36
4.2 Модель ПИД-регулятора.....	36
4.2.1 Модель системы возбуждения.....	37
4.2.2 Полная модель гидроэлектростанции.....	37
4.3 Данные, используемые для моделирования.....	39
4.4 Результаты моделирования в среде Matlab / Simulink и обсуждения.....	40
4.4.1 Случай I: увеличение нагрузки	40
4.4.2 Случай II: снижение нагрузки	45
4.4.3 Случай III: короткое замыкание	51
4.5 Анализ режима гидроэлектростанции для различных значений усиления ПИД-регулятора	57
4.5.1 Анализ переходных процессов гидроэлектростанции при различной величине пропорционального усиления (K_p).....	57
4.5.2 Анализ режима гидроэлектростанции при различной величине интегрального усиления (K_i).....	59
4.5.3. Анализ режима гидроэлектростанции при различной величине производного коэффициента усиления (K_d).....	62
4.6 Модели RT-LAB для гидроэлектростанции.....	64
4.6.1 Отдельная модель RT-LAB	64
4.6.2 Консольная подсистема.....	65
4.6.3 Основная подсистема	66
4.7 Результаты моделирования в среде RT-LAB	68
4.7.1. Случай I: увеличение нагрузки	68
4.7.2. Случай II: снижение нагрузки	70
4.7.3 Случай III: короткое замыкание	73
Заключение	77
Список использованных источников	78
Приложение А Номенклатура.....	83

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире все чаще поднимается вопрос о глобальном энергетическом объединении. Одной из задач такого объединения является обеспечение доступности электроэнергии для каждого потребителя. Электроснабжение удаленных потребителей в регионах Сибири, Дальнего Востока, Северного Кавказа целесообразно осуществлять от местных источников электроэнергии. Гидроэнергетический потенциал Сибири оценивается в 469,7 млрд. кВтч/год [2]. На больших территориях проблемой является транспорт электроэнергии, для осуществления которого часто необходимо сооружение целой электросетевой инфраструктуры, что не всегда рентабельно и возможно на сложном ландшафте. Если также учесть снижение ущерба после аварии при работе станции в изолированной энергосистеме, то использование малых ГЭС несёт в себе экономическую выгоду.

В настоящее время в мире накоплен большой опыт строительства и эксплуатации МГЭС. По сравнению с пятидесятью годами прошлого века удельные затраты и издержки на 1кВт мощности значительно уменьшились. Снизились затраты на эксплуатационный персонал [3]. Снизились также капитальные вложения за счёт более совершенных строительных технологий. В то же время имеются недостатки МГЭС:

- зависимость выработки электроэнергии от гидрологических условий;
- недостаточная изученность гидрологии малых рек.

Основные капитальные вложения будут заложены в приобретение гидроагрегатов и строительство машзала в теле плотины.

Проблема обеспечения дешевой электроэнергией, как промышленных объектов, так и населенных пунктов, была и остается весьма актуальной. Более 20 млн. человек за Уралом живет в зонах децентрализованного электроснабжения. Особенно значима она для отдаленных районов Сибири и Крайнего Севера, где нет развитой сети линий электропередач, и население получает электроэнергию по 3-4 часа в сутки от ДЭС. Строительство малых ГЭС (МГЭС) может изменить условия жизни этих людей, обеспечить энергетическую безопасность регионов и способствовать развитию экономики [1].

Единственный источник получения электроэнергии в таких условиях – это дизель-электрические станции. Однако известно, что для получения 1 кВт·ч электроэнергии при этом расходуется около 250 г. дизельного топлива, которое постоянно дорожает. На сегодня, например, себестоимость 1 кВт·ч, произведенной на ДЭС, на одном из предприятий Республики Тыва уже достигает 24 руб. При такой цене электроэнергии значительно возрастают эксплуатационные затраты, и по этой причине многие месторождения становятся нерентабельными для освоения.

При замещении ДЭС перспективным направлением является сооружение ГЭС небольшой мощности, которые не требуют больших капитальных затрат при сооружении, имеют небольшие сроки окупаемости и могут обеспечить потребителя недорогой электроэнергией. Поэтому проблема обеспечения

дешевой электроэнергией остается весьма актуальной. Особенно значима данная проблема для отдаленных районов. На малых ГЭС для эффективного их управления и защиты должны быть предусмотрены функциональные возможности. В связи с этим необходимо внедрение автоматизации и дистанционного управления за работой малых ГЭС, что обеспечит в свою очередь автономную работу без постоянного присутствия обслуживающего персонала [4].

Моделирование и симуляция МГЭС необходимо для изучения динамического поведения и динамической реакции гидравлических, управляющих и электрических систем, связанных с установками. Это также помогает в изучении стабильности системы и координации параметров регулятора с параметрами гидравлических и электрических систем для оптимальной работы установки.

Гидроэлектростанция состоит из гидротурбины с ПИД-регулятором и синхронного генератора с системой возбуждения. Силовая модель гидроэлектростанции разработана в среде Matlab / Simulink. Модель Matlab / Simulink гидроэлектростанции преобразуется в среду RT-LAB для моделирования в реальном времени (OPAL-RT).

С помощью разработанной имитационной модели исследование динамического поведения гидроэлектростанции было проанализировано при воздействии таких параметров, как увеличение нагрузки, снижение нагрузки и трехфазное короткое замыкание на выводах синхронного генератора. Также проводится гидравлический переходный анализ гидроэлектростанции с различными параметрами усиления регулятора ПИД (пропорциональное усиление, интегральное усиление и производное усиление).

1 Искусственный интеллект в гидроэнергетике. Состояние вопроса

Искусственный интеллект охватывает экспертные системы, нечеткие экспертные системы, искусственные нейронные сети, эволюционные вычисления, гибридные интеллектуальные системы и инженерные знания. При их разработке используются оболочки экспертной системы (Leonardo, XpertRule, Level5 Object и Visual Rule Studio), Matlab Fuzzy Logic Toolbox и Matlab Neural Network Toolbox.

Алгоритмы поиска – это классическая и хорошо развитая часть искусственного интеллекта. Она является основой алгоритмов обучения и решения проблем. Поиск – универсальный метод решения проблем, который может применяться во всех случаях, когда не применяются другие методы решения проблем. Это делает алгоритмы поиска наиболее ценной и часто используемой частью алгоритмов искусственного интеллекта.

Решение проблем и планирование – это быстро развивающаяся отрасль искусственного интеллекта, которая уже дала значительный результат в вычислительной практике.

Naghizadeh и др. [5,6] описали основные компоненты гидроэлектростанции.

Некоторые модели были просто аналитическими, в то время как другие были построены из надежных системных моделей, показывающих динамические характеристики. Рабочая группа / комитет IEEE [7, 8] продемонстрировала различные модели гидроэлектростанций и методы, используемые для управления выработкой электроэнергии [9], описывающие приближение передаточной функции гидротурбины ко второму порядку для исследований устойчивости нескольких машин.

Точно так же QiJuan и др. [10] представили новую модель гидротурбинной генераторной установки, в которой используется алгоритм наименьших квадратов. Эта модель является динамичной.

В действительности производительность гидротурбины в основном определяется параметрами водных ресурсов, которые поступают в турбину. Согласно Singh и др. [11], некоторые из этих параметров включают в себя эффекты водной инерции, сжимаемости воды и упругости стенки трубы в затворе.

Влияние водной инерции состоит в том, что изменения в потоке турбины отстают от изменений в открытии затвора турбины для случая бесперебойной работы. С другой стороны, эффект упругости имеет некоторый элемент давления и потока в трубе, явление, известное как «гидравлический удар» [11]. Другие параметры текущей воды также влияют на поток воды и косвенно влияют на частоту вращения турбины, которая напрямую связана с генератором. Поэтому, чтобы была постоянная выработка энергии, необходимо принять меры для наблюдения и контроля, чтобы преодолеть изменчивость воды в проточной части турбины.

Кроме того, существуют модели линейных и нелинейных гидротурбинных установок с эффектами неупругого и упругого водяного столба. Неэластичный водный столб в основном обрабатывался предыдущими работами, в том числе Malik и др. [12], Ramey и др. [13], Bhaskar [14] и Luqing и др. [15].

Определение эффективности гидравлической турбины является очень сложной задачей, и в результате этого для её расчета используются надежные математические модели. Некоторые из этих моделей были рассмотрены Martez и др. [16] и Singh и др. [11].

С другой стороны, некоторые модели не были аналитическими, но состояли из симулированных систем в различных программных обеспечениях. Например, модель, представленная Nassar [17], была построена в Simulink и состояла из динамических подмоделей.

Аналогичное исследование было проведено Gagan Singh [18], который исследовал имитацию и моделирование гидроэлектростанции в зависимости от времени ожидания ответа при различных положениях затвора. Фактически, состояние затвора гидравлической турбины действительно влияет на асинхронное состояние ГЭС, которое зависит от изменения скорости в турбогенераторной установке. Gagan Singh [18] представляет гидроэлектростанцию, интегрируя линейную инвариантную во времени модель затвора, турбины и генератора, чтобы определить динамический отклик затвора. Результаты моделирования показывают, что установившаяся частота вращения турбины зависит от положения затвора и напора. Стабильность параметров воды будет определяться установившемся режимом. Однако переходный режим может контролироваться системами управления, которые устанавливаются на входе в турбину. Система управления будет действовать на скорость закрытия / открытия затвора, чтобы гарантировать, что скорость на валу не зависит от поступающей воды. В целом [18] модель описывает полную силовую установку, включая все необходимые аспекты, в отличие от предыдущих моделей, которые сосредоточены только на одном аспекте.

Более того, Munoz-Hernandez [19] использовал Simulink для разработки модели прогнозного управления за работой гидроэлектростанции. Кроме того, была разработана еще одна надежная модель гидроэлектростанции, в которой сравнивались два известных метода управления. Эти методы включают традиционный интегральный контроллер (ИК) и модель прогнозирующего контроля. Было обнаружено, что модель прогнозирующего контроля дает лучшие результаты с точки зрения надежности, поскольку она способна поддерживать свои характеристики, как в случаях системы с одним входом и одним выходом, так и в случаях системы с несколькими входами и несколькими выходами.

Li и соавторы [20] разработали модель гидротурбины и регулятора для представления в гидроэнергетике. А именно разрабатываются три различные модели гидротурбины и регуляторов для выполнения требований к моделированию для представления выработки гидроэлектроэнергии в энергосистеме северных стран. Проверка эффективности разработанных

моделей выполняется как автономно, так и в режиме реального времени. Помимо этой системы, моделирование в реальном времени также выполняется для крупномасштабной системы электропитания, для определения динамических характеристик моделей в более крупных и сложных сетях. Кроме того, был также выполнено моделирование в режиме реального времени в программной среде Matlab / Simulink.

Fang и соавторы [21] продемонстрировали моделирование гидроэлектростанции, которая имеет водовод с двумя резервуарами, расположенными в верхнем и нижнем течении. Была разработана имитационная модель гидроэлектростанции с турбиной Фрэнсиса в среде Matlab / Simulink. Для моделирования и расчета гидравлических переходных процессов были рассмотрены нелинейные характеристики гидравлической турбины и эффект неупругого гидравлического удара. Результаты моделирования гидроэлектростанции, выполненные в Matlab / Simulink, сравнивались с результатами моделирования реальной гидроэлектростанции, которые выполнялись при полном отклонении нагрузки.

Wangdi и Richards [22] исследовали влияние параметров регулятора на изменение скорости и нагрузки при небольших помехах в электросети. Разработанная модель была смоделирована для изменения скорости и нагрузки электростанций с использованием программного обеспечения Tutsim. Было проведено исследование потока нагрузки и определены коэффициенты синхронизирующей мощности с помощью разработанных компьютерных программ.

Hannett и соавторы [23] описали динамическую имитационную модель гидроаккумулирующей станции с насосом, которая должна быть подключена к электросети. Имитационная модель была разработана для представления установки в электрической сети для изучения электрических помех, а также для оценки поведения установки. Модели регулятора и насоса были разработаны для анализа характеристик работы установки.

Jaeger и соавторы [24] представили нелинейную модель гидравлической турбины для динамических исследований гидроэлектростанции. Проанализировали работу смоделированной гидроэлектростанции, которая состоит из нескольких турбин, у которых подача воды осуществляется из общего водовода, с учетом гидравлической связи. Предложенная модель была смоделирована для переходных процессов, как уменьшение нагрузки, из-за наличия общего водовода.

Kumar [25] представил моделирование малой ГЭС в Паче при различных условиях эксплуатации с использованием программного обеспечения ALICES. Для моделирования были рассмотрены отдельные компоненты ГЭС, такие как водослив, канал, водоотводная труба, турбина Фрэнсиса, регулятор, синхронный генератор и система возбуждения. Также было представлено математическое моделирование различных компонентов установки малых ГЭС. Гидравлические дифференциальные модели, электрические дифференциальные и механические

модели были разработаны и представлены для установки на малых ГЭС в программной среде ALICES.

Koli [26] разработал имитационную модель малой гидроэлектростанции в среде Matlab / Simulink и изучил ее поведение в различных условиях эксплуатации. Для моделирования были рассмотрены различные компоненты гидроэлектростанций, такие как затвор, водохранилище, турбина Фрэнсиса, синхронный генератор и система возбуждения для генератора. Было представлено моделирование отдельного компонента малой гидроэлектростанции и разработаны блоки, представляющие модель в программном обеспечении Matlab / Simulink.

Jadid и Salami [27] исследовали проблему срабатывания датчика нагрузки в энергосистеме после возникновения неисправностей для восстановления системы в нормальное состояние, которое было вызвано отклонением частотной характеристики от допустимых пределов. Само исследование проводилось на гидроэлектростанции. На основании проведенного исследования была предложена точная модель установки и проведено моделирование на предложенной модели. В предложенной модели для была использована линеаризованная модель гидравлической турбины.

Hannett и соавторы [28] предложена модель гидроэлектростанции, имеющая несколько агрегатов, имеющих общий трубопровод. В результате была получена имитационная модель, с помощью которой проведены исследования для определения поведения модели в зависимости от изменения физических параметров. Также были проанализированы параметры турбины и регулятора, и их гидравлическая связь. С помощью моделирования были продемонстрированы эффекты устойчивости установки параметров в изолированном состоянии.

Vournas [29] исследовал стабильность режимов электромеханических колебаний в энергосистеме с использованием трех различных моделей гидравлических турбин. Был разработан итерационный метод оценки для получения аппроксимации второго порядка для прогнозирования затухания колебаний, который значительно улучшил демпфирование колебаний.

Robert и Michaud [30] представили модель гидроэлектростанции, которая была подключена к электросети для проектирования регулятора мощности. Разработаны модели медленной и быстрой динамики гидравлических установок, учитывающие упругость затвора и влияние водохранилища. Были предложены модели с уменьшенным порядком для многоэнергетической энергосистемы. Достоверность результатов была подтверждена путем сравнения результатов моделирования, выполненных в Matlab / Simulink, и измерений, выполненных на гидроагрегате мощностью 252 МВА.

Souza и соавторы [31] представили анализ дискретной гидравлической системы для проведения исследования гидравлических параметров. В данной работе для разработки имитационной модели была использована аналоговая математическая модель гидротурбины. Результаты получены с использованием метода нелинейного аналого-цифрового моделирования. Теоретические

результаты получены с использованием метода характеристик, и было проведено сравнение с результатами аналогового математического метода.

Lindenmeyer и соавторы [32] представили модель вспомогательного оборудования гидро- и атомной электростанции в программе электромагнитных переходных процессов (ЭМПТ). Были получены модели генератора, турбины, системы возбуждения и асинхронного двигателя. Была проведена проверка индивидуальной модели путем полевых измерений. Также были проведены исследования смоделированной гидроэлектростанция и вспомогательного оборудования атомной электростанции, которые используют ЭМПТ. Для проверки модели энергосистемы результаты моделирования сравнивались с измерением, выполненным в ходе испытания инженерных защитных функций (ИЗФ) в системе аварийного энергоснабжения.

Vournas и Papaioannou [33] представили моделирование нелинейной модели гидроэлектростанции с двумя уравнительными резервуарами. Модель была линеаризована и упрощена для проведения анализа устойчивости регулятора. Было проведено исследование взаимодействия двух уравнительных резервуаров, и система была смоделирована для внезапного открытия / закрытия затвора. В данной работе с помощью анализа малых сигналов на основе линеаризации оценивалась стабильность контура частотного регулирования.

Choo и соавторы [34] представили модель гидравлической турбины с длинным напорным водоводом, с учетом воздействия гидравлического удара и трения. Для анализа переходных характеристик при нарушениях нагрузки была использована подробная гидравлическая турбина-водовод для исследования устойчивости регулятора. Анализ частотных и переходных характеристик проводился для изучения влияния моделирования турбины и водовода на исследование стабильности системы и динамических характеристик.

Gao и Wang [35] представили нелинейную, линеаризованную на основе прототипа, линеаризованную на основе внутренних характеристик модель гидротурбины. Были выполнены четыре различных типа влияния модели гидротурбины и ее применимости на анализ энергосистемы и сделан вывод, что влияние разработанных моделей гидротурбины было больше на электромеханический и гидравлический режим колебаний, чем на режим колебаний системы возбуждения.

Naik и соавторы [36] представили ПИД-регулятор с внутренней моделью управления (ВМУ) для гидроэлектростанции с учетом наличия эффекта гидравлического удара. В этой работе результат моделирования предложенной настройки ВМУ сравнивался с одночастотной настройкой по замкнутой петле Циглера-Николса. Установлено, что моделируемый результат методики настройки ВМУ является целесообразным и универсальным для использования в управлении гидроэлектростанцией, имеющей эффект гидравлического удара.

Vinatoru и Iancu [37] представили математическую модель каскадной гидроэлектростанции, которая учитывала динамическое и статическое поведение станции для реализации алгоритма цифрового управления. Для выполнения моделирования и анализа структуры и алгоритма управления

разработана упрощенная математическая модель гидроэлектростанция. Смоделированный результат сравнивался с результатом, полученным в результате эксперимента, проведенного в реальной системе.

Ramey и Skooglund [38] сравнили переходные характеристики детального и эквивалентного представления системы гидрорегулятора. Были предложены процедуры для определения эквивалентной передаточной функции по заводским данным для крупномасштабных исследований стабильности системы.

Nicolet и соавторы [39] разработали SIMSEN, числовой программный пакет, используемый для моделирования электроэнергетических систем и гидравлических компонентов. Разработанное программное обеспечение полезно для анализа устойчивости гидроэлектростанции и могло быть использовано для оптимизирования проекта. В данной работе гидравлические компоненты гидроэлектростанции были представлены эквивалентной электрической схемой.

Scherer и Camargo [40] обсудили моделирование и управление микро-гидроэлектростанциями с использованием нелинейной гидротурбинной модели, применяемой на индукционных генераторах (ИГ) для микросетевых систем. Постоянная скорость и напряжение для модели были получены регулятором скорости и управлением реактивной мощностью с использованием инверторного источника напряжения (ИИН).

Konar и соавторы [41] обсуждали моделирование и симуляцию гибридной генерации энергии для изолированной работы в холмистых районах. Была отдельно разработана модель для микро-гидро- и дизель-генератора в среде Matlab / Simulink, а затем соединена параллельно, чтобы сформировать автономную гибридную систему выработки электроэнергии. Проведение исследования стабильности системы было выполнено путем изменения нагрузок и введения трехфазного короткого замыкания на выводах нагрузки.

Hong-qing и Zu-yi [42] разработали модель регулирующей системы гидравлической турбины с учетом нелинейных характеристик и неупругого эффекта гидравлического удара в Matlab / Simulink. Имитационное испытание на отсутствие нагрузки и изолированную работу проводилось для изучения гидравлических переходных процессов в гидравлической турбине.

Cozorigi и соавторы [43] осуществили проектирование модели ветроэнергетической установки для использования в научно-исследовательской работе и демонстрации студентам, о том как производится выработка электроэнергии от ветряной и малой гидроэлектростанций. Также было выполнено моделирование разработанной модели ветроэнергетической установки.

Chen и соавторы [44] разработали систему нелинейного моделирования в режиме реального времени для тестирования системы регулирования частоты вращения гидроагрегата. В этой работе нелинейная характеристика гидротурбины была смоделирована с использованием нейронной сети, которая достигла более высокой точности моделирования.

Kawkabani и соавторы [45] представили модель гидроэлектростанции для выполнения имитационного моделирования и динамического анализа станции.

Набор параметров регулятора турбины определялся с помощью специальной процедуры идентификации для стабильной работы. Проведен анализ устойчивости гидроэлектростанции путем моделирования временных характеристик для различных параметров регулятора.

Kawkabani и соавторы [46] представили обзор исследовательских работ, выполненных в области разработки модели гидроэлектростанции и системы управления, используемой в модели для изучения производительности гидроэлектростанции. В этой работе были выявлены проблемы в исследованиях по моделированию гидроэлектростанции и её управлению в дальнейшей исследовательской работе, которая будет проводиться в области моделирования и симуляции гидроэлектростанции.

Rahi и Kumar [47] представили исследования различных типов систем возбуждения, используемых для возбуждения генератора на малой гидроэлектростанции (МГЭС), для проектирования системы возбуждения в различных режимах работы. В этой работе были смоделированы три типа системы возбуждения, и обнаружено, что статическая система возбуждения имеет более быстрое время отклика, чем система возбуждения постоянного и переменного тока.

Arun [48] представил имитационные исследования мини-гидроэлектростанций мощностью 500 кВт и 100 кВт соответственно. Для моделирования рассмотрены математические модели различных компонентов мини-ГЭС. Поведение мини-гидроэлектростанции при различных условиях эксплуатации изучалось путем моделирования разработанной модели в среде моделирования ALICES.

Выводы по главе 1:

В главе 1 представлен литературный поиск за период 15-20 лет в России и за рубежом по использованию искусственного интеллекта в управлении режимами гидроэлектростанций.

Разработаны и представлены модели гидроэлектростанции, и её компонентов, таких как: гидротурбина, регулятор, система возбуждения и синхронный генератор, которые смоделированы в разных программных обеспечениях, и проведенные с ними исследования переходных процессов при разных режимах регулирования.

Ниже приведены проблемы, выявленные при моделировании и симуляции:

1. Модель, разработанная для моделирования гидроэлектростанции, основана на линеаризированной модели первого порядка;
2. Влияние сжимаемости водяного столба не учитывается для большинства конструкций.
3. Большинство разработанных моделей использует системы возбуждения постоянного тока, но необходимо учитывать другие быстродействующие системы, такие как статическая или переменного тока.

4. Самым большим недостатком для выполнения моделирования является ошибка симуляции. Любое неправильное или неверное введение исследуемой системы может изменить результаты моделирования и дать недостоверные результаты.

5. Симуляторы ограничены аппаратной платформой, которые не могут удовлетворить вычислительные требования. Однако это становится все меньше из-за улучшения методов моделирования и наличия более мощных платформ в настоящее время.

6. Как правило, имитационные модели не подходят для оптимизации, поскольку они сравнивают фиксированное количество заданных альтернативных значений системы.

7. Задержки в моделировании обусловлены очень большим числом моделируемых объектов или сложных систем, которые происходят между объектами в моделируемой системе.

Требуется провести дополнительные исследования:

1. Нуждается в исследованиях модель на основе нелинейной гидротурбины, на устойчивость переходного процесса.

2. Необходимо провести сравнительный анализ результатов между моделированием в программной среде Matlab/Simulink и ORAL RT-LAB.

3. Исследовать смоделированную систему на стабильность при изменении режимов работы гидроэлектростанции.

4. Представление имитационные модель могут использоваться с учетом искусственного интеллекта на нейронных сетях.

2 Моделирование гидроэлектростанции

Современная концепция развития электроэнергетики основана на создании интеллектуальных сетей и счетчиков, управлении многоуровневой генерацией, а также на распределении и потреблении электроэнергии, использовании цифровых технологий и т.д.

Искусственный интеллект (ИИ) в основном основан на алгоритмах и моделях как метод, который разработан на основе научных результатов, таких как математика, статистика и биология. ИИ работает на основе нескольких моделей, таких как: муравьиный алгоритм, иммунный алгоритм, нечеткий алгоритм, дерево решений, генетический алгоритм, алгоритм роя частиц, нейронная сеть.

Наиболее известные модели разработаны с применением метода опорных векторов и искусственной нейронной сети.

– Метод опорных векторов (МОВ), где она используется для построения модели классификации путем нахождения оптимальной гиперплоскости на основе набора примеров обучения. Он также использовался для классификации образцов и прогнозирования тенденций, например, для приложений, например, диагностики неисправностей силового трансформатора, диагностики заболеваний и оптимизации лечения.

– Искусственная нейронная сеть (ИНС) представляет собой репрезентативную модель понимания мыслей и поведения с точки зрения физической связи между нейронами. ИНС использовался для решения множества проблем, позволяя машине строить математические модели, чтобы имитировать естественную деятельность с точки зрения мозга. Используя этот алгоритм, машина сможет идентифицировать решение любой проблемы точно так же, как мозг человека.

ИИ может быть спроектирован с использованием множества алгоритмов. Эти алгоритмы помогают системе определить ожидаемый ответ, который в основном подскажет компьютеру, что ожидать и работать соответствующим образом.

Рассмотрим динамическую модель двух основных компонентов гидроэлектростанций, синхронного генератора и гидротурбины. Уравнения динамической модели синхронной машины в области Лапласа могут быть созданы путем подключения соответствующих функциональных блоков. Чтобы смоделировать переходный процесс синхронной машины, необходимо добавить новые подмодели для моделирования работы различных функций управления. Эти подмодели используются при расчете различных значений, связанных с синхронной машиной, таких как стационарное состояние, контур возбудителя, модель турбины и токи.

В работе представлена математическая модель гидравлического турбинного затвора. Гидравлическая система включает в себя турбину и систему управления. Система управления скоростью настраивает генератор скорости на основе входных сигналов отклонений частоты тока и мощности по отношению к

эталонным настройкам. В работе используется имитационная модель Matlab / Simulink при динамическом моделировании компонентов гидроэлектростанции. Основным преимуществом Simulink над другим программным обеспечением является то, что вместо компиляции программного кода имитационная модель систематически создается с помощью базовых функциональных блоков. Чтобы иметь возможность моделировать динамику гидроэлектростанции, необходимо учитывать динамическое поведение или дифференциальные уравнения синхронной машины, а также гидротурбины [53].

Производительность энергосистемы обусловлена динамическими характеристиками гидравлических гидротурбин во время и после любых внешних воздействий, таких как внешнее короткое замыкание, отключение линии передачи или быстрое изменение нагрузки. Точное моделирование гидравлических управляющих турбин важно для характеристики и диагностики реакции системы во время чрезвычайной ситуации. Моделируются простые гидравлические системы, управляемые пропорционально-интегрально-производными и пропорционально-интегральными контроллерами. Эта модель рассматривает их переходные реакции на нарушения посредством моделирования в Matlab / Simulink.

Модель имеет два основных блока:

- механическая часть установки, которая включает в себя гидравлическую турбину, запорный блок, контроллер, гидравлический серводвигатель, регулирующий клапан и т. д.

- электрический блок состоящий из генератора и нагрузки. Комбинированная форма гидравлической турбины, контроллера и гидроэлектрической сервосистемы известна как регулятор гидротурбины.

На рисунке 2.1 показана полная блок-схема гидроэлектростанции, а именно блок-схема гидравлической системы управления турбиной, подключенной к сети энергосистемы. Сохраненная вода в водохранилище содержит потенциальную энергию. Система управления скоростью турбины сопряжена со скоростью генератора, основанной на сигналах обратной связи отклонений как частоты и мощности системы, так и их опорных параметров. Это обеспечивает генерацию энергии на синхронной частоте.



Рисунок 2.1 – Функциональная блок-схема гидроэлектростанции

Даже для малых гидроэлектростанций для эффективного управления и защиты должно быть предусмотрено относительно большое количество функциональных возможностей по сравнению с более крупными электростанциями. Как правило, требование контролировать все эти функции требует включения нескольких функциональных блоков в систему управления установкой.

Стандартизованное интеллектуальное электронное устройство (ИЭУ) может обеспечить автономную работу и определить приоритетность безопасного управления водой. ИЭУ должен быть компактным и интегрированным с контролем электрических и механических элементов, включая систему подачи воды, связи, мониторинга и защиты для малых гидроэлектростанций [53].

Целесообразно использовать коммуникационный блок, с дополнительными методами дистанционной связи на удаленном персональном компьютере (ПК) или в диспетчерской оператора.

Функциональность, требуемая для управления малой гидроэлектростанцией, обеспечивается функциональными блоками (рис. 2.2.).

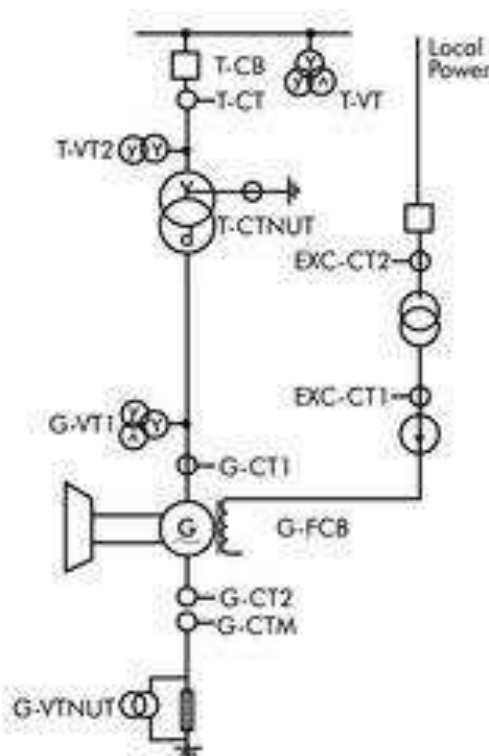


Рисунок 2.2 – Схема с функциональными блоками для управления МГЭС

Функциональные блоки имеют параметры, которые позволяют адаптироваться к электростанции.

В Simulink в Matlab используется для получения схематической модели гидроэлектростанции с помощью базовых функциональных блоков. Такой подход лучше, чем использование компиляции программного кода, как в других

программах. Библиотека программных продуктов Simulink включает функциональные блоки, которые можно связать и отредактировать [55].

Другие достижения в области искусственного интеллекта - создание искусственных нейронных систем (ИНС), который был описан как «инструмент искусственного интеллекта», который пытается имитировать физический процесс, на котором базируется интуиция – то есть, путем моделирования процесса адаптивного биологического обучения. ИНС, по сути, представляет собой сеть компьютеров, которые сгруппированы воедино способами, подобными конфигурации мозга в области биологической обработки.

Существует несколько применений искусственных нейронных сетей для электрических систем, поскольку они являются отличной альтернативой решению проблем управления, прогнозирования, обслуживания и оптимизации в нелинейных сложных электрических системах.

В электрических системах одним из основных применений ИНС является прогнозирование нагрузки и спроса, поскольку ключевая задача предприятия – предлагать своим клиентам качественную электроэнергию. Распре. Правильное прогнозирование нагрузки важно для оптимизации работы ГЭС. Спрос напрямую связан с потреблением электрической энергии, следовательно, с переменными, которые непосредственно влияют на количество производимой электроэнергии [56].

Выводы по главе 2:

В главе 2 говорится о введении в моделирование и имитационное моделирование, преимущества и недостатки моделирования.

Интеллектуальная основа для управления малой ГЭС должна иметь соответствующий комплекс алгоритмов и программ, реализованных в управляющих устройствах (контроллерах и датчиках). На рынке электроэнергии с участием МГЭС соответствующие устройства используются для контроля своего режима при ограниченном притоке воды, что позволяет достичь максимальной выработки электроэнергии и доходов.

Моделирование проводится с использованием Matlab / Simulink.

3 Математическое моделирование различных компонентов малой гидроэлектростанции

Математическая модель используется для нахождения аналитических решений, которые позволяют прогнозировать поведение системы из набора заданных параметров и начальных условий. Компьютерное моделирование используется в качестве замены для систем моделирования, для которых аналитические решения невозможны [57].

Моделирование в основном подразделяется на следующие группы:

- Статическое и динамическое моделирование
- Моделирование дискретных событий и непрерывное моделирование
- Детерминированное и стохастическое моделирование

3.1 Моделирование гидравлической системы

Ниже описывается моделирование гидравлических компонентов гидроэлектростанции.

3.1.1 Модель водохранилища

Водохранилище моделируется в зависимости от времени его заполнения. Математическое моделирование водохранилища определяется уравнениями (3.1) - (3.3). Модель водохранилища представлена на рисунке 3.1.

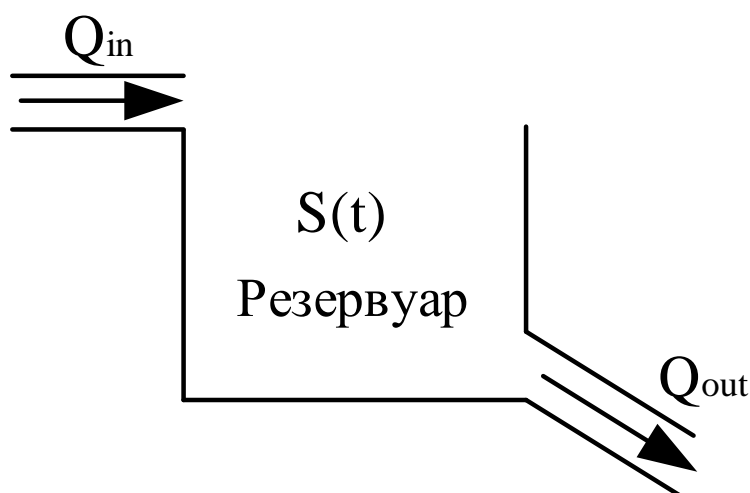


Рисунок 3.1 – Модель водохранилища

Объем воды в резервуаре в момент времени « $t + \Delta t$ » определяется

$$S \cdot (t + \Delta t) = S(t) + Q_{in} \cdot \Delta t - Q_{out} \cdot \Delta t, \quad (3.1)$$

$$\frac{S \cdot (t + \Delta t) - S(t)}{\Delta t} = Q_{in} - Q_{out}, \quad (3.2)$$

Так как Δt очень мало, то уравнение (3.2) можно записать в виде:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{dS}{dt} = Q_{in} - Q_{out}, \quad (3.3)$$

где Q_{in} – приток в резервуар, м³/с;

Q_{out} – отток из резервуара, м³/с;

$S(t)$ – объем воды в резервуаре, м³;

Δt – продолжительность времени заполнения резервуара, с.

3.1.2 Модель расширительного бака

Потери на входе, изменение уровня и инерция описываются моделью расширительного бака. Согласно гидравлическим законам [59], расширительный бак может быть представлен уравнениями (3.4) - (3.6).

$$(H_{pc} - H_c) = \frac{K_{pc} |Q_c|}{2gA_{co}^2} \cdot Q_c, \quad (3.4)$$

$$A_c(z) \frac{dH_c}{dt} = Q_c, \quad (3.5)$$

$$L_c = \frac{L_{pc}}{gA_{co}}. \quad (3.6)$$

Обозначим:

$$R_c = \frac{K_{pc} |Q_c|}{2gA_{co}^2},$$

$$C_c = A_c(z).$$

Три компоненты R_c , L_c , C_c соединены последовательно, так как уравнения (3.4), (3.5) и (3.6) связаны с входящим разрядом Q_c в расширительном баке [59], как показано на рисунке 3.2.

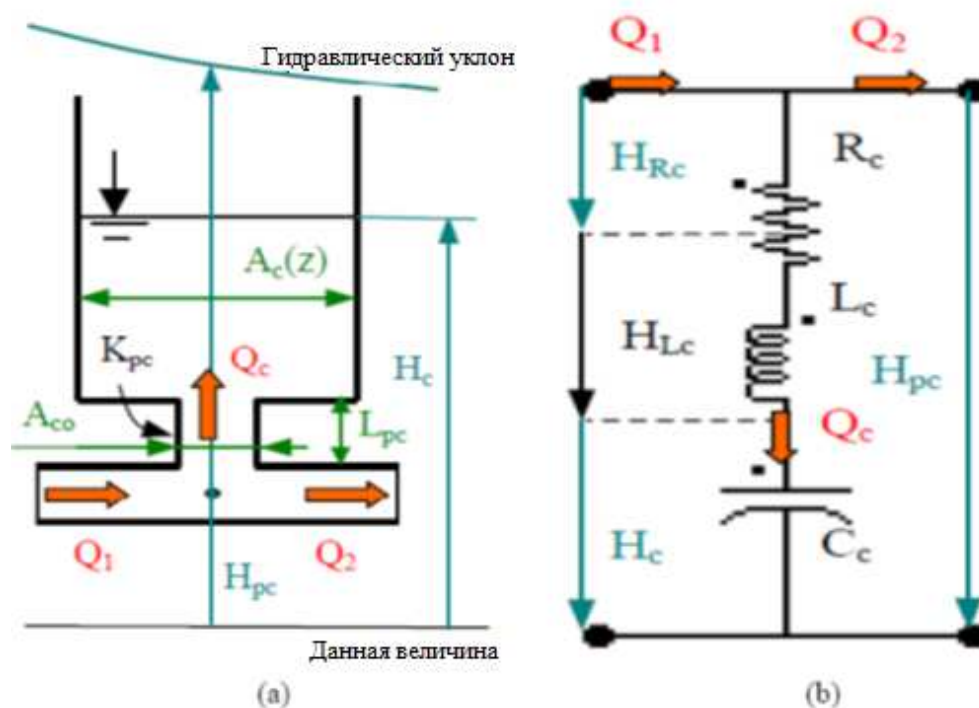


Рисунок 3.2 – (а) Модель расширительного бака (б) Модель электрической эквивалентной схемы [59]

3.2 Модель гидравлической турбины

Модель нелинейной гидравлической турбины и затвор задаются уравнениями (3.7) - (3.22) с учетом неупругого водяного столба и несжимаемой воды. Основные гидродинамические уравнения с учетом простых гидравлических систем с неограниченным напором и с очень большим расширительным баком или без него, предполагая, что жесткий трубопровод и несжимаемая жидкость [60] приведены в следующих уравнениях.

Скорость воды:

$$U = K_u \cdot G \sqrt{H} . \quad (3.7)$$

Потребляемая мощность для турбины:

$$P = K_p \cdot H \cdot U . \quad (3.8)$$

Ускорение водяного столба:

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{g}{L} \cdot (H - H_0). \quad (3.9)$$

Преобразуя уравнения (3.7), (3.8) и (3.9), с использованием номинальных значений скорости (U_r), идеальное открытие затвора (G_r), гидравлический напор при затворе (H_r) и мощности (P_r), следующих уравнений на единицу, получены обозначения:

$$\bar{H} = \left(\frac{\bar{U}}{\bar{G}} \right)^2, \quad (3.10)$$

$$\bar{P} = \bar{H}\bar{U}, \quad (3.11)$$

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = -\frac{g \cdot H_r}{L \cdot U_r} \cdot (\bar{H}_0 - \bar{H}), \quad (3.12)$$

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = \frac{1}{T_w} \cdot (\bar{H}_0 - \bar{H}). \quad (3.13)$$

В тех случаях, когда T_w – это время начала подачи воды при номинальной нагрузке и оно имеет фиксированное значение для данного турбинно-напорного блока и определяется:

$$T_w = \frac{L \cdot U_r}{g \cdot H_r}. \quad (3.14)$$

Взяв преобразование Лапласа (3.13)

$$S\bar{U} = \frac{1}{T_w} \cdot (\bar{H}_0 - \bar{H}),$$

$$\bar{U} = \frac{\bar{H}_0 - \bar{H}}{S \cdot T_w}. \quad (3.15)$$

Выходная мощность от турбины:

$$P_m = P - P_{NL},$$

$$P_m = K_p \cdot (U - U_{NL}) \cdot H . \quad (3.16)$$

С учетом преобразования, выходная мощность турбины:

$$\bar{P}_m = (\bar{U} - \bar{U}_{NL}) \cdot \bar{H} . \quad (3.17)$$

Крутящий момент:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} . \quad (3.18)$$

Номинальный крутящий момент:

$$T_r = \frac{VA_{base}}{\omega_{rated}} , \quad (3.19)$$

$$\frac{T_m}{T_r} = \frac{P_m}{VA_{base}} \times \frac{\omega_0}{\omega} ,$$

$$\frac{T_m}{T_r} = \frac{\bar{P}_m \bar{P}_r}{VA_{base}} \times \frac{1}{\omega} .$$

$$\bar{T}_m = \frac{\bar{P}_m \bar{P}_r}{\omega} = \frac{(\bar{U} - \bar{U}_{NL})}{\omega} \cdot \bar{H} \bar{P}_r . \quad (3.20)$$

На рис. 3.3 показана зависимость между величиной реального и идеального открытия затвора. Связь между реальным и идеальным открытием затвора определяется уравнением (3.21).

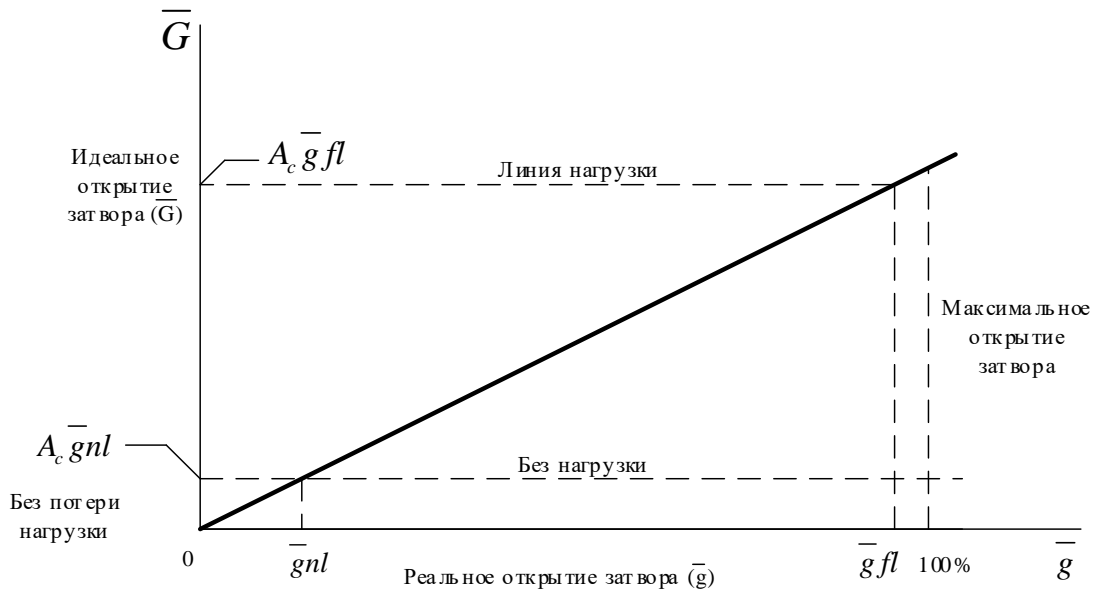


Рисунок 3.3 – Связь между идеальным и реальным открытием затвора [60]

$$\bar{G} = A_t \bar{g}, \quad (3.21)$$

$$A_t = \frac{1}{g_{FL} - g_{NL}}. \quad (3.22)$$

Объединив уравнения (3.7) - (3.22), получим модель нелинейной гидротурбины, как показано на рис. 3.4.

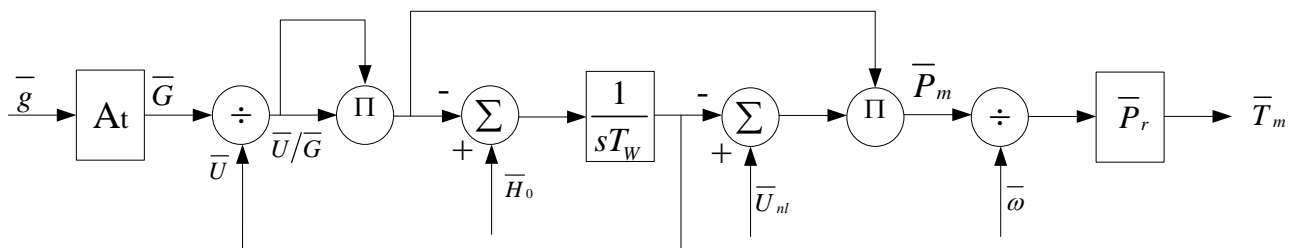


Рисунок 3.4 – Модель нелинейной гидротурбины [60]

3.3 Модель регулятора

Частота вращения генератора или изменение нагрузки контролируется регулятором. Он включает в себя изменение скорости в качестве сигнала обратной связи для управления положением затвора. Характеристика отклонения обеспечивается в регуляторе скорости, имеющем несколько блоков для обеспечения стабильной параллельной работы. Также предусматривается снижение скорости для обеспечения равномерного распределения нагрузки между гираторами.

Пропорционально-интегральное-дифференциальное действие предусмотрено для электрогидравлических регуляторов, которые обеспечивают возможность более быстрого реагирования при уменьшении и увеличении переходного коэффициента усиления. Для изолированной работы установок, имеющих большое время подачи воды, целесообразно использование производного действия [61]. Пропорциональная, интегральная и дифференциальная модель регулятора показана на рисунке 3.5

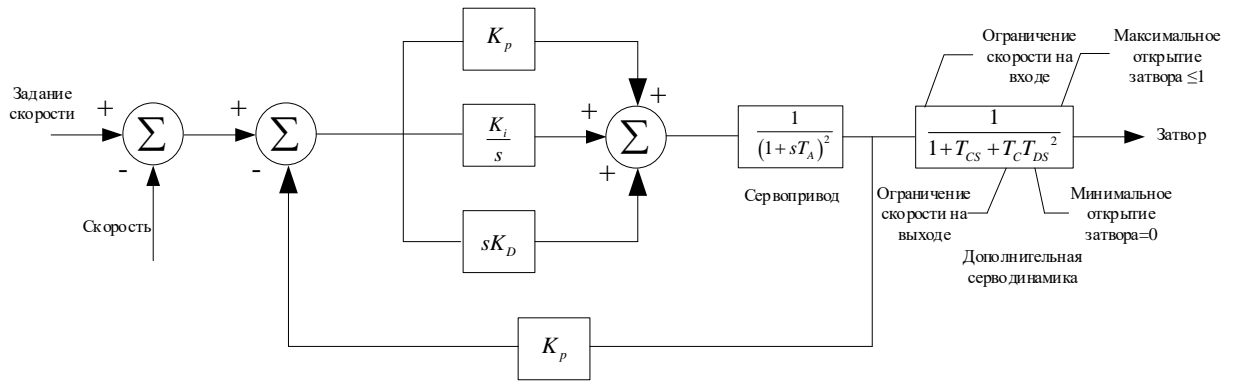


Рисунок 3.5 – Модель ПИД-регулятора [62]

3.4 Модель синхронного генератора

Модель синхронной машины используется для учета электрических и механических характеристик машины и учитывает динамику обмотки статора, поля и демпфера. Роторная система отсчета (dq frame) используется для представления эквивалентной схемы синхронной модели машины, как показано на рисунке 3.6. Электрические величины и параметры ротора рассматриваются со стороны статора, которые идентифицируются с помощью переменных. В синхронной модели машины предполагается, что токи, втекающие в обмотки статора, а в то время как токи, вытекающие из машины, являются измеренными токами статора, возвращаемые синхронной машиной (I_a, I_b, I_c, I_d, I_q) [63].

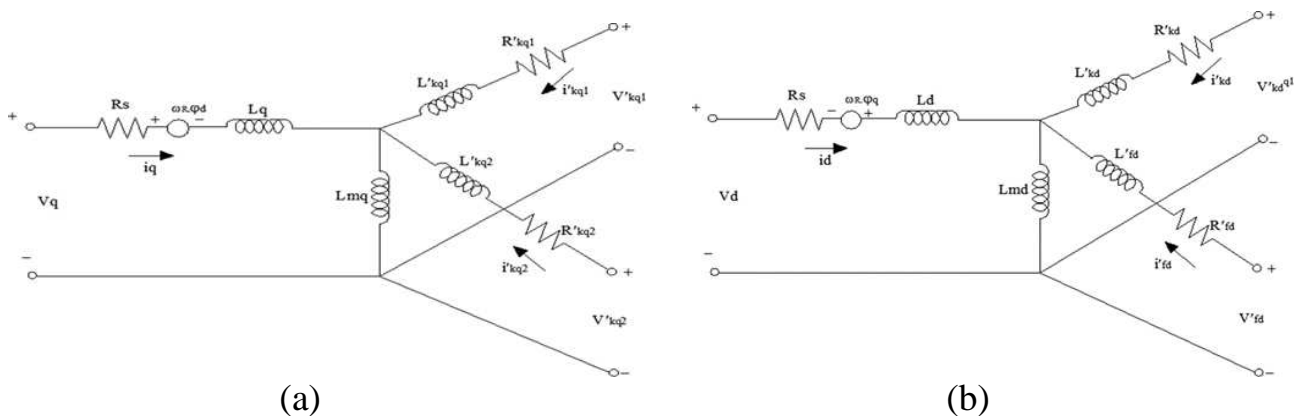


Рисунок 3.6 – Модель синхронной машины (a) эквивалентная модель q-оси (b) эквивалентная модель по d-оси [63]

Электрическая модель синхронной машины определяется следующими уравнениями:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega_R \varphi_q, \quad (3.23)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q - \omega_R \varphi_d, \quad (3.24)$$

$$V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{fd}, \quad (3.25)$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kd}, \quad (3.26)$$

$$V'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq1}, \quad (3.27)$$

$$V'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq2}, \quad (3.28)$$

где $\varphi_d = L_d i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}), \quad (3.29)$

$$\varphi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kq}, \quad (3.30)$$

$$\varphi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd}), \quad (3.31)$$

$$\varphi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd}), \quad (3.32)$$

$$\varphi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q, \quad (3.33)$$

$$\varphi'_{kq2} = L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_q. \quad (3.34)$$

3.5 Модель системы возбуждения

Система возбуждения используется для подачи постоянного тока на обмотку возбуждения синхронной машины. Он также выполняет функцию контроля и защиты, которая необходима для стабильной работы энергосистемы путем управления напряжением поля [64]. Система возбуждения IEEE типа DC1A используется при моделировании гидроэлектростанции.

Модель возбудителя DC1A представляет собой возбудитель с коллектором постоянного тока и регулятор напряжения непрерывного действия. Он может

быть самовозбужденным или отдельно возбужденным. Для самовозбуждающейся системы возбуждения K_a выбирается таким образом, чтобы значение напряжения регулятора V_R было первоначально нулевым. Структурная схема модели системы возбуждения постоянного тока, используемая в этом исследовании, показана на рисунке 3.7.

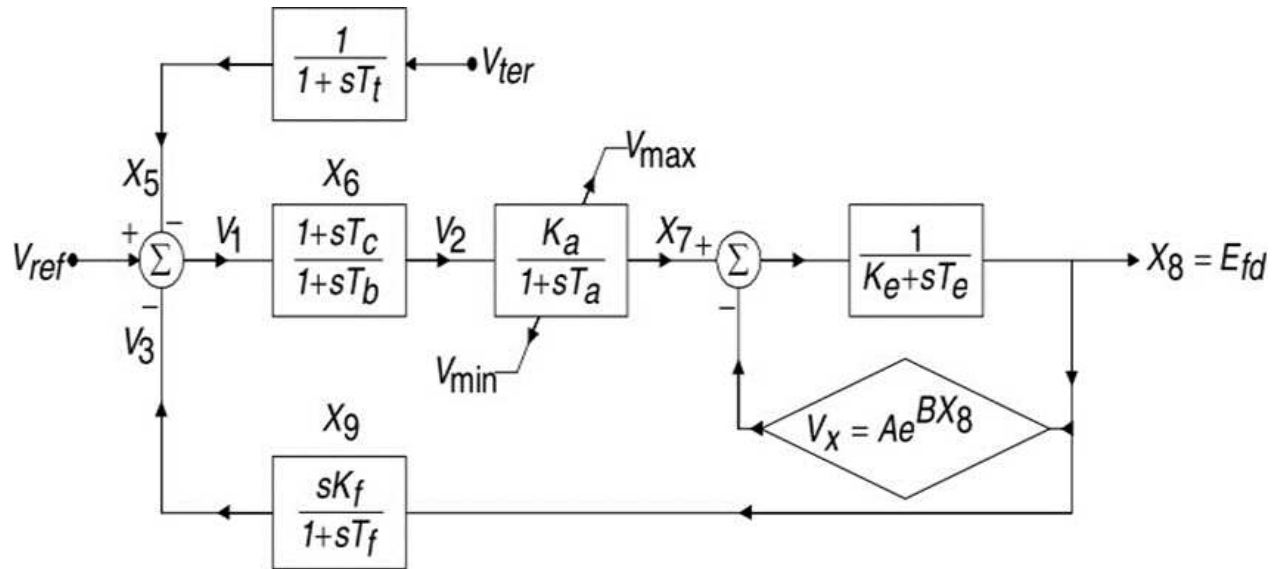


Рисунок 3.7 – Модель системы возбуждения постоянного тока

Математическое моделирование системы возбуждения постоянного тока, представляющее динамическое поведение системы, определяется уравнениями (3.35) - (3.45) [47]:

$$\frac{dX_5}{dt} = \frac{V_{ter} X_5}{T_t}, \quad (3.35)$$

$$\frac{dX_9}{dt} = \frac{X_8 X_9}{T_f}, \quad (3.36)$$

$$V_3 = K_f \frac{dX_9}{dt}, \quad (3.37)$$

$$V_1 = V_{ref} X_5 V_3, \quad (3.38)$$

$$\frac{dX_6}{dt} = \frac{V_1 X_6}{T_b} \quad (3.39)$$

$$V_2 = X_6 + T_C \frac{dX_6}{dt}, \quad (3.40)$$

$$\frac{dX_7}{dt} = \frac{K_a V_2 X_7}{T_a} \quad (3.41)$$

Если $X_7 < V_{\max}$ и $X_7 > V_{\min}$,

$$\frac{dX_7}{dt} = 0 \text{ и } X_7 = V_{\max}, \quad (3.42)$$

Если $\frac{dX_7}{dt} > 0$ и $X_7 \geq V_{\max}$,

$$\frac{dX_7}{dt} = 0 \text{ и } X_7 = V_{\min}, \quad (3.43)$$

Если $\frac{dX_7}{dt} < 0$ и $X_7 \leq V_{\min}$,

$$\quad (3.44)$$

$$\frac{dX_8}{dt} = \frac{X_7 A e^{B X_8} K_e X_8}{T_e}.$$

Выходное напряжение возбудителя, E_{fd} определяется по формуле:

$$E_{fd} = X_8. \quad (3.45)$$

3.6 Модель линии передачи

Считаем, что продольные параметры линии передачи сосредоточенными в середине, а поперечные, такие как емкостная проводимость либо расположена в середине линии, либо разделена на две половины от общей емкости и считается сосредоточенной по концам линии. Схема замещения трехфазной линии электропередачи может быть Т- и П-образными (рис. 3.8 и 3.9 соответственно) [25].

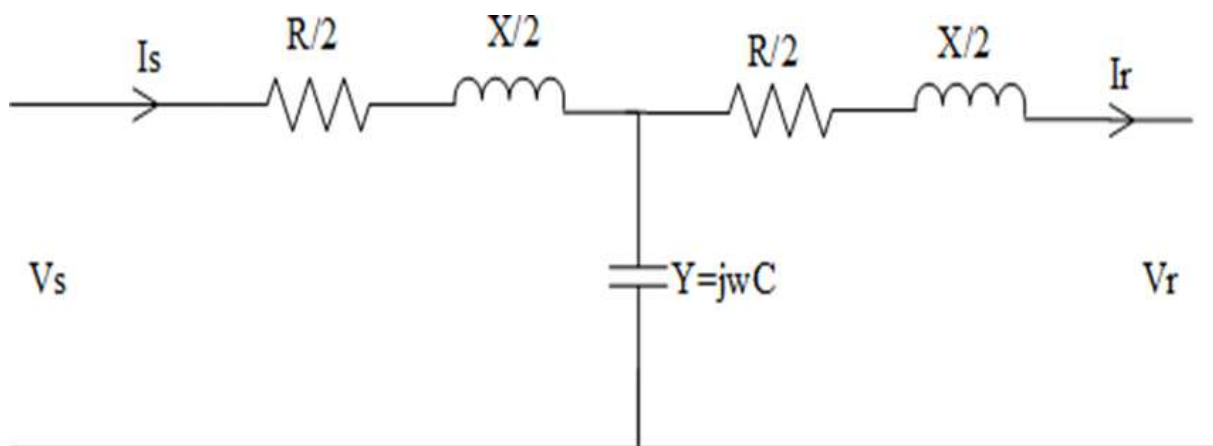


Рисунок 3.8 –Т - модель линии передачи

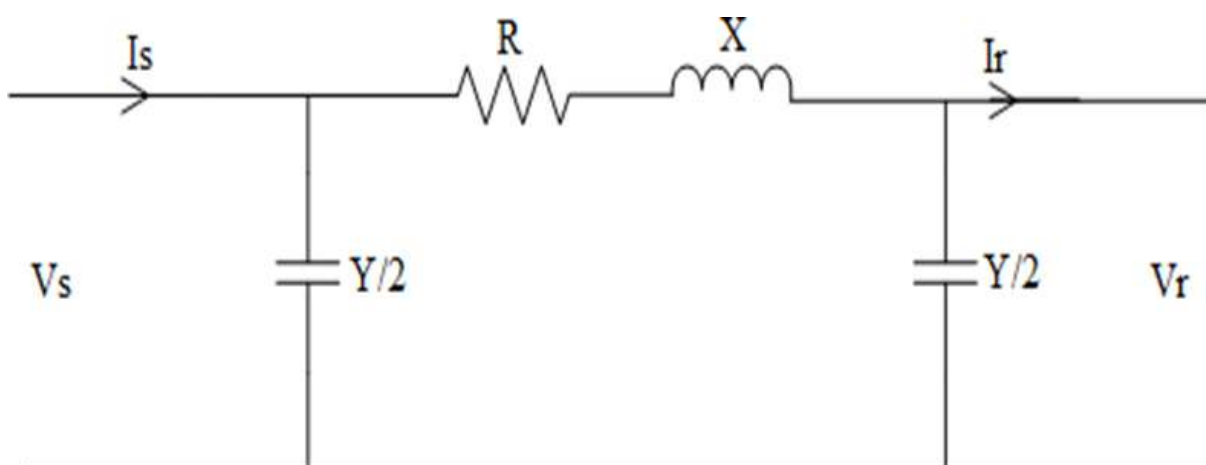


Рисунок 3.9 – П - модель линии передачи

Линия электропередачи – это четырёхполюсник. Напряжение и ток в конце линии электропередачи запишутся:

$$V_s = AV_r + BI_r \quad (3.46)$$

$$I_s = CV_r + DI_r \quad (3.47)$$

Параметры А, В, С, D четырёхполюсника запишутся:
для Т схемы:

$$A = 1 + \frac{YZ}{2},$$

$$B = Z \left(1 + \frac{YZ}{4} \right),$$

$$C = Y ,$$

$$D = 1 + \frac{YZ}{2} .$$

для П схемы:

$$A = \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) ,$$

$$B = Z ,$$

$$C = Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) ,$$

$$D = \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) .$$

Выводы по главе 3:

В главе 3 рассмотрено математическое моделирование различных компонентов гидроэлектростанции: гидравлическая система, гидравлическая турбина, регулятор, синхронный генератор, система возбуждения, линия электропередачи.

4 Исследование динамических характеристик МГЭС в среде Matlab/Simulink

Различные компоненты гидроэлектростанции смоделированы в среде Matlab / Simulink.

4.1 Модель гидротурбины

Гидротурбины моделируются нелинейной системой, как показано на рисунке 4.1.

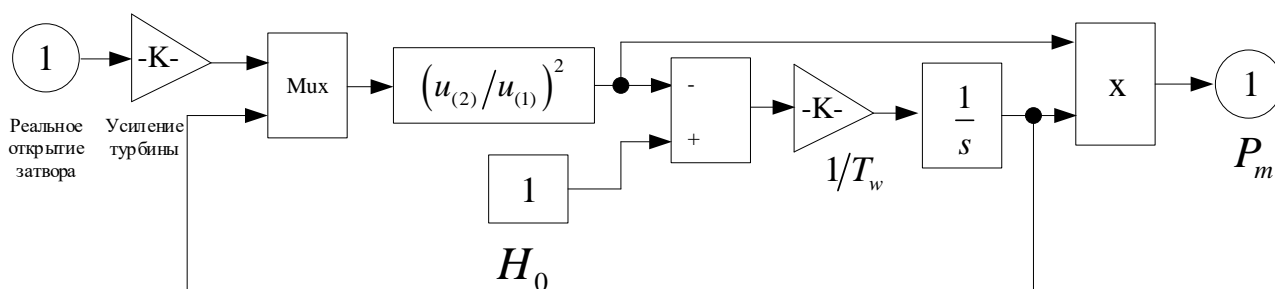


Рисунок 4.1 – Модель Matlab / Simulink для подсистемы нелинейной гидротурбины

4.2 Модель ПИД-регулятора

ПИД-регулятор представлен на рисунке 4.2. Он включает в себя сигнал отклонении частоты вращения, если будет не подключен, то в качестве обратной связи используется сигнал для управления положением затвора.

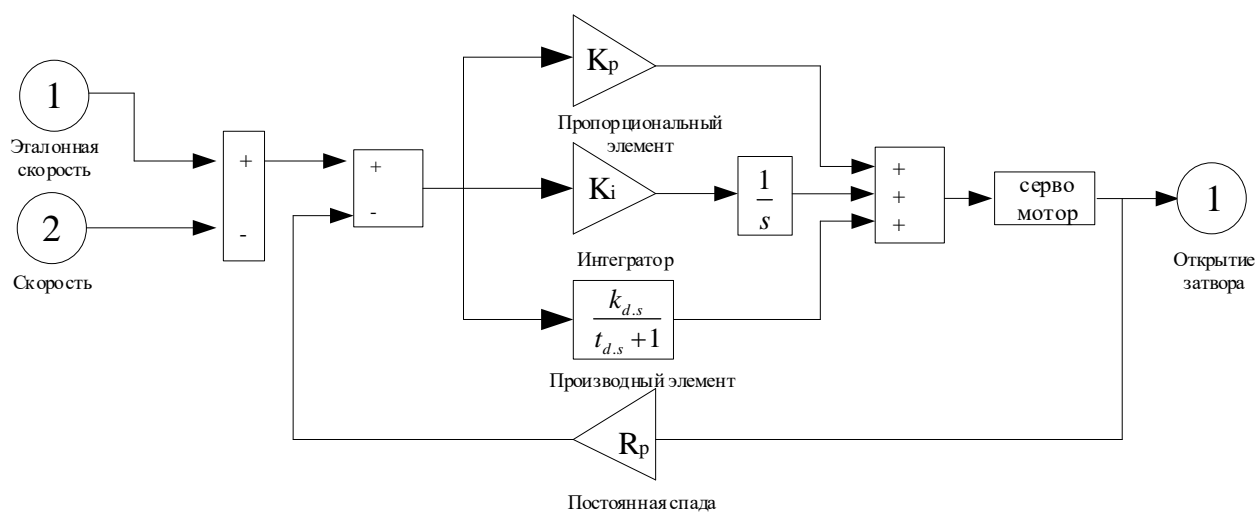


Рисунок 4.2 – Модель Matlab / Simulink для подсистемы ПИД-регулятора

4.2.1 Модель системы возбуждения

Используется система возбуждения (рисунок 4.3). Стандартная встроенная модель возбуждающей системы IEEE типа DC1A в библиотеке Matlab / Simulink используется для моделирования гидроэлектростанции.

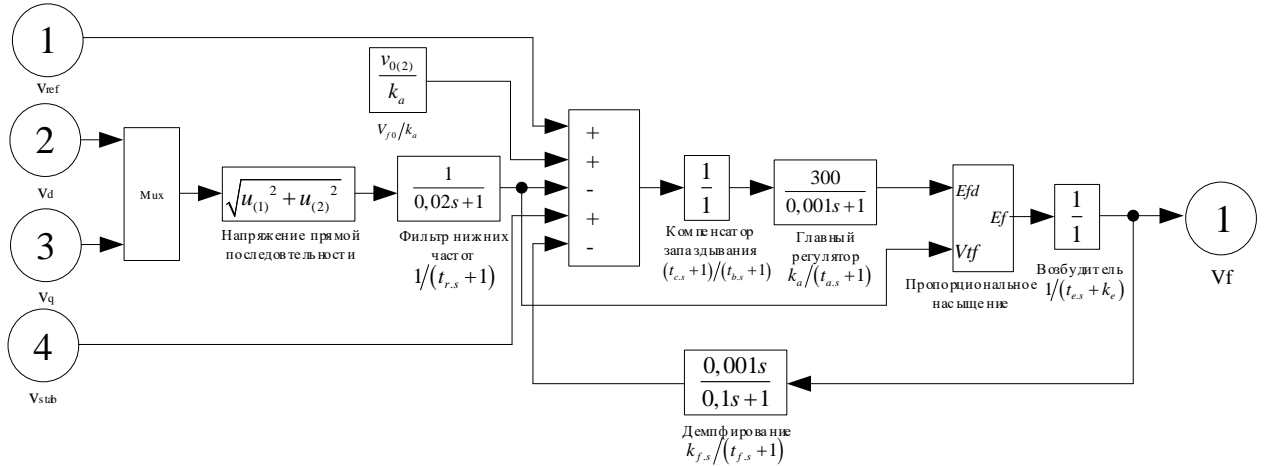


Рисунок 4.3 – Модель Matlab / Simulink для подсистемы системы возбуждения IEEE типа DC1A

4.2.2 Полная модель гидроэлектростанции

Отдельные компоненты гидроэлектростанции объединены вместе для формирования полной модели гидроэлектростанции в среде Matlab / Simulink, которая используется для моделирования и анализа при различных режимах работы. На рисунке 4.4 показана полная модель гидроэлектростанции, разработанная в среде Matlab / Simulink.

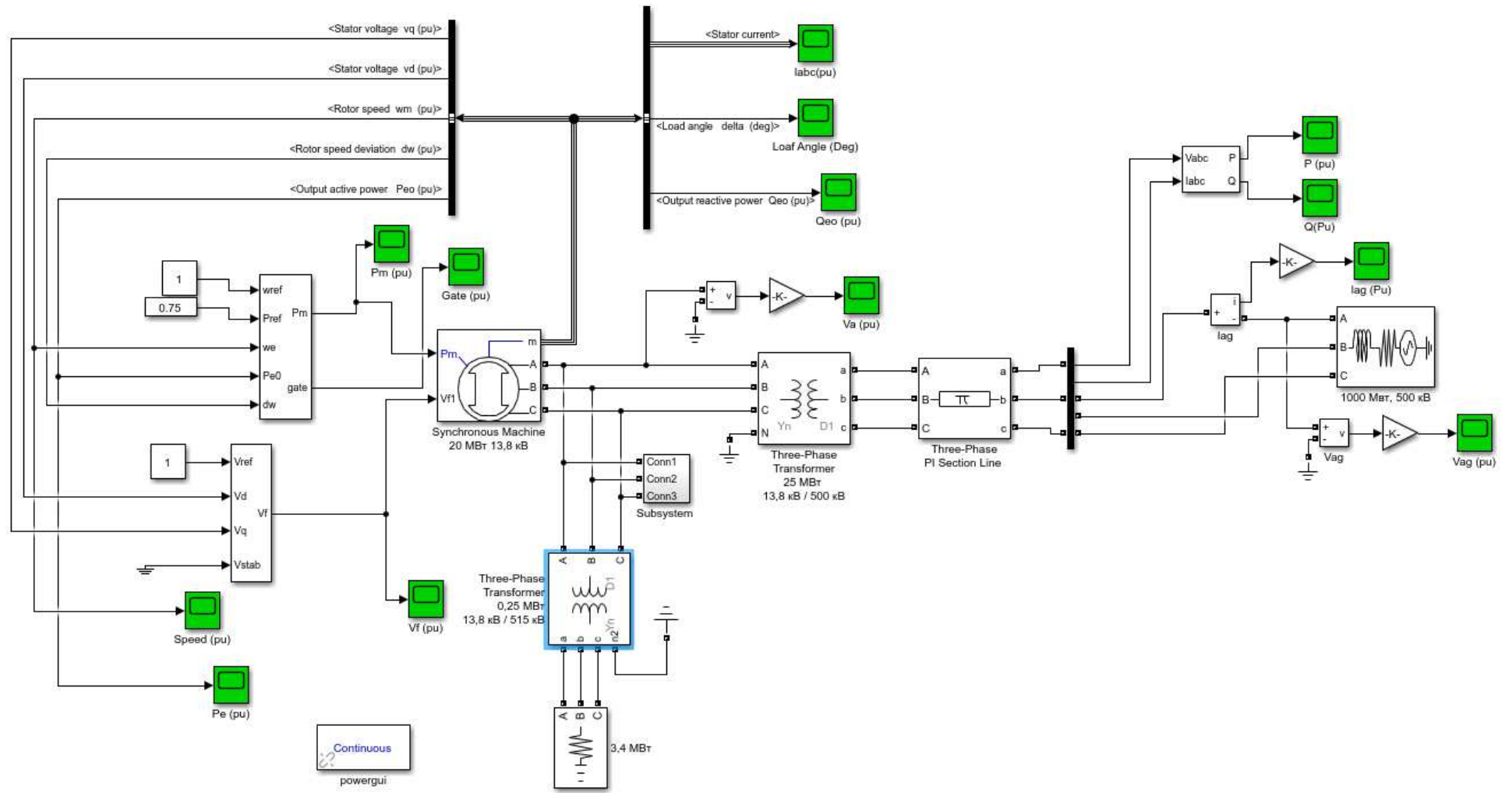


Рисунок 4.4 – Модель гидроэлектростанции Matlab / Simulink

4.3 Данные, используемые для моделирования

Следующие данные используются для моделирования гидроэлектростанции в различных условиях эксплуатации.

1. Общие

Высота	20
Проектный расход	142,5 м ³ /с

2. Турбина

Тип	ПЛ 20
Мощность	20 МВт

3. Генератор

Тип	Вертикальный вал, синхронный
Мощность	20 МВт
Напряжение	13,8 кВ

4. Трансформатор

Тип	однофазный
Число	2
Мощность	25 МВт
Номинальное напряжение	13,8 кВ/500 кВ

5. Линия передач

Номинальное напряжение	500 кВ
Максимальная длина	140 км

6. Параметр ПИД-регулятора

Постоянная спада $R_p = 0,05$	Пропорциональное усиление $K_p = 1,0$
Интегральное усиление $K_i = 0,2$	Производный коэффициент $K_d = 0,1$
Сервомоторное усиление $K_a = 3,33$	Время сервомотора $T_a = 0,07$ с
Максимальное открытие затвора = 0,975 о.е.	Минимальное открытие затвора = 0,01 о.е.

7. Параметр возбуждающей системы

$K_A = 300$	$T_A = 0,001$ с	$K_E = 1,0$	$V_{f0} = 1,29071$
$T_E = 0$	$T_B = 0,0$	$T_C = 0,0$	$T_R = 20e^{-3}$
$K_F = 0,001$	$T_F = 0.1$ с	$E_{FMIN} = -11,5$	
$E_{FMAX} = 11,5$	$K_P = 0.0$	$V_{t0} = 1,0$	

4.4 Результаты моделирования в среде Matlab / Simulink и обсуждения

Моделирование динамического поведения гидроэлектростанции, показанной на рисунке 4.4, выполняется для следующих трех случаев.

4.4.1 Случай I: увеличение нагрузки

Для этого случая модель Matlab / Simulink показана на рисунке 4.5, а однолинейная диаграмма показана на рисунке 4.6.

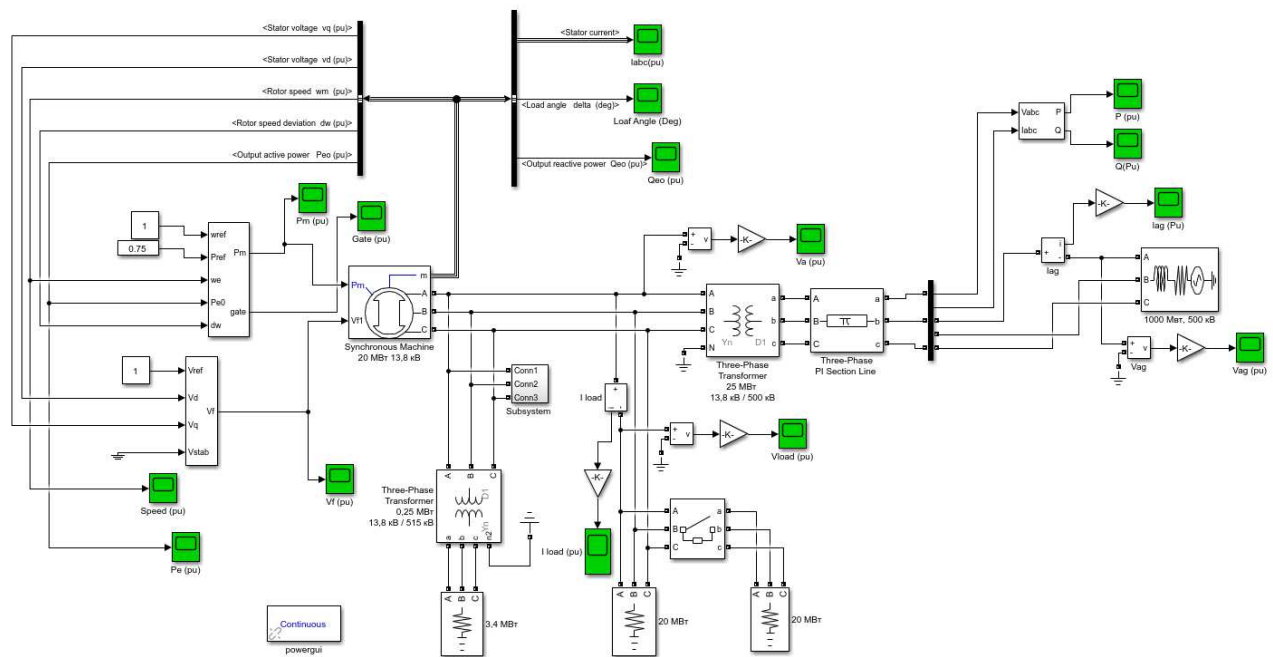


Рисунок 4.5 – Модель Matlab / Simulink гидроэлектростанции с случая увеличения нагрузки

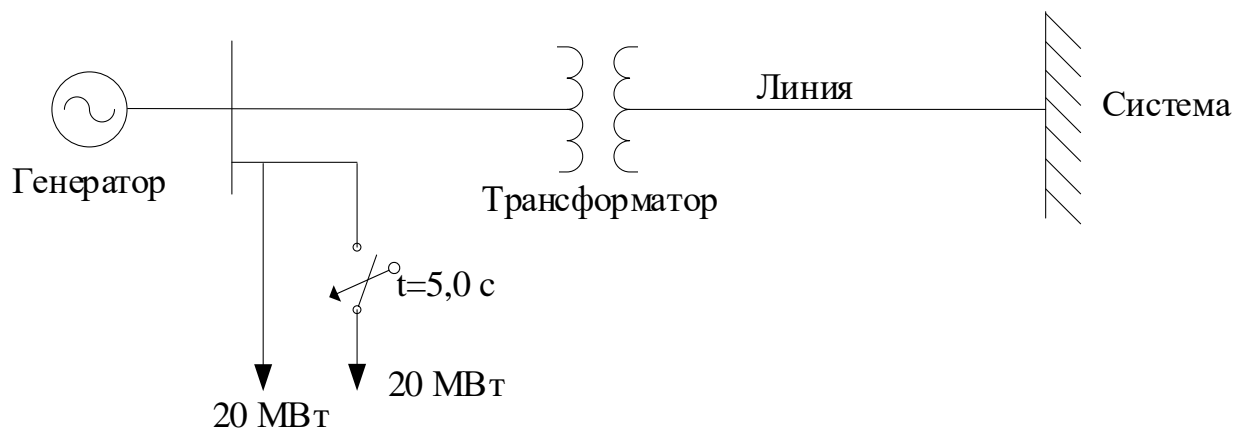


Рисунок 4.6 – Однострочная диаграмма для случая увеличения нагрузки

Первоначальная нагрузка составляет 20 МВт нагрузки. Возмущение создается за счет увеличения нагрузки в 20 МВт. Имитация проводится в течение 10,0 секунд. Все величины указаны в относительных единицах.

На рисунках 4.7 – 4.17 представлены временные характеристики. На рисунке 4.20 показано изменение напряжения генератора, на рисунке 4.8 показано изменение тока генератора, на рисунке 4.9 показано изменение тока нагрузки, на рисунке 4.10 показано изменение электрической мощности генератора. На рисунке 4.11 показано изменение скорости вращения ротора, на рисунке 4.12 показано изменение напряжения возбуждения, на рис. 4.13 показано изменение угла нагрузки генератора, на рисунке 4.14 показано изменение механической мощности, рис. 4.15 показывает изменение напряжения сети, на рис. 4.16 показано изменение тока сети, а на рис. 4.17 показано изменение величины открытия затвора.

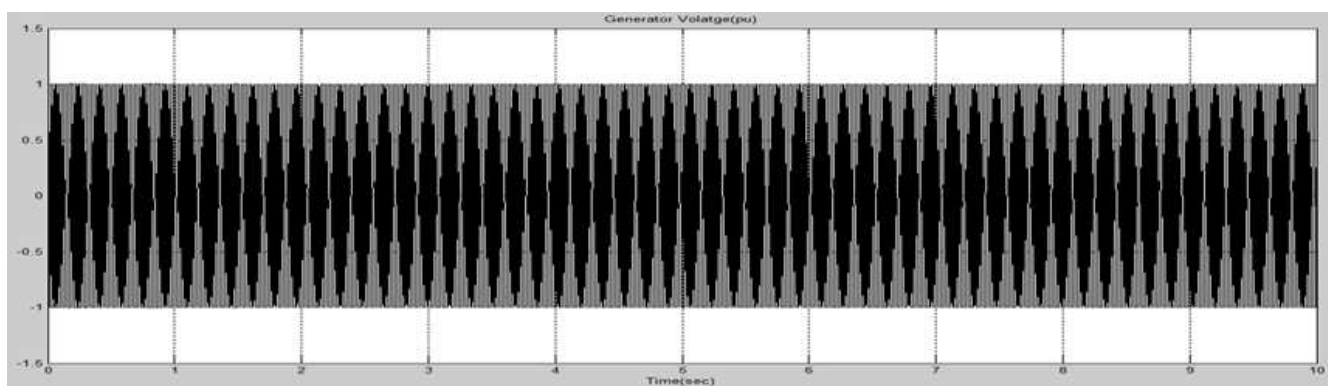


Рисунок 4.7 – Напряжение генератора

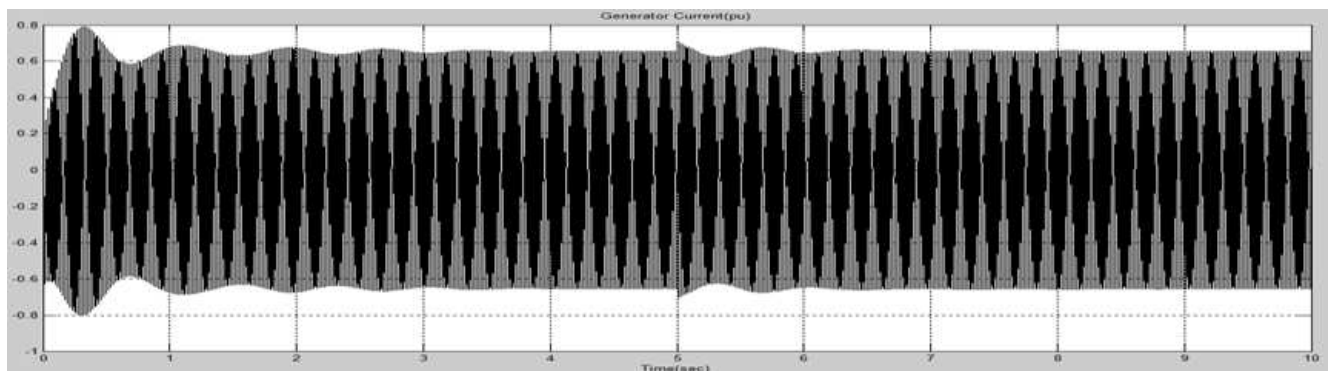


Рисунок 4.8 – Ток генератора

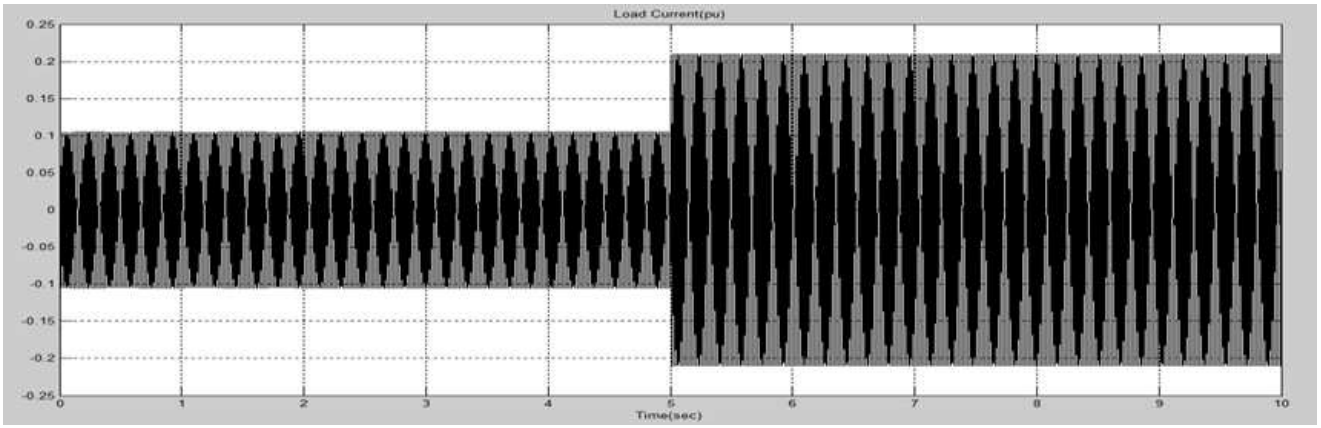


Рисунок 4.9 – Ток нагрузки

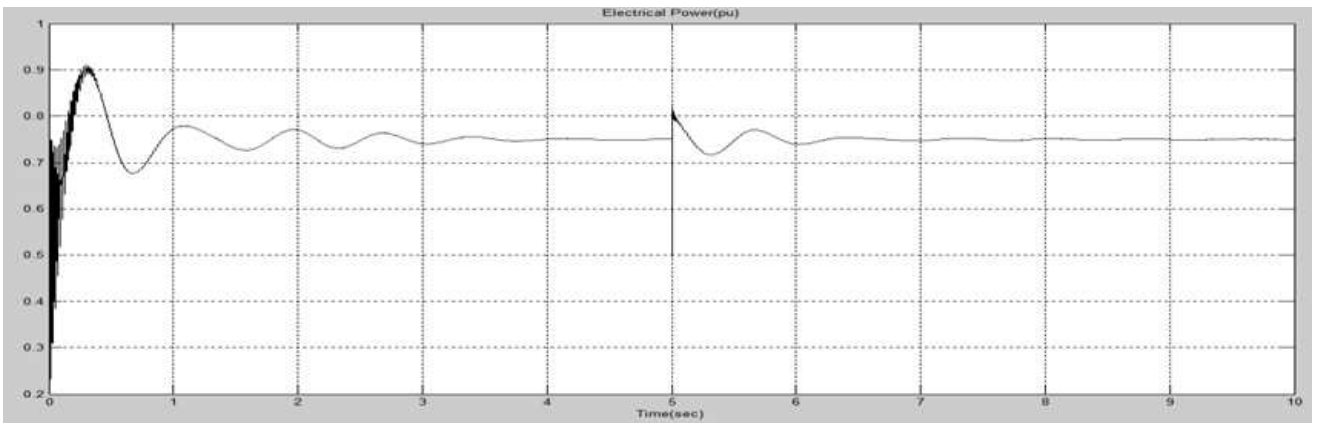


Рисунок 4.10 – Электрическая мощность

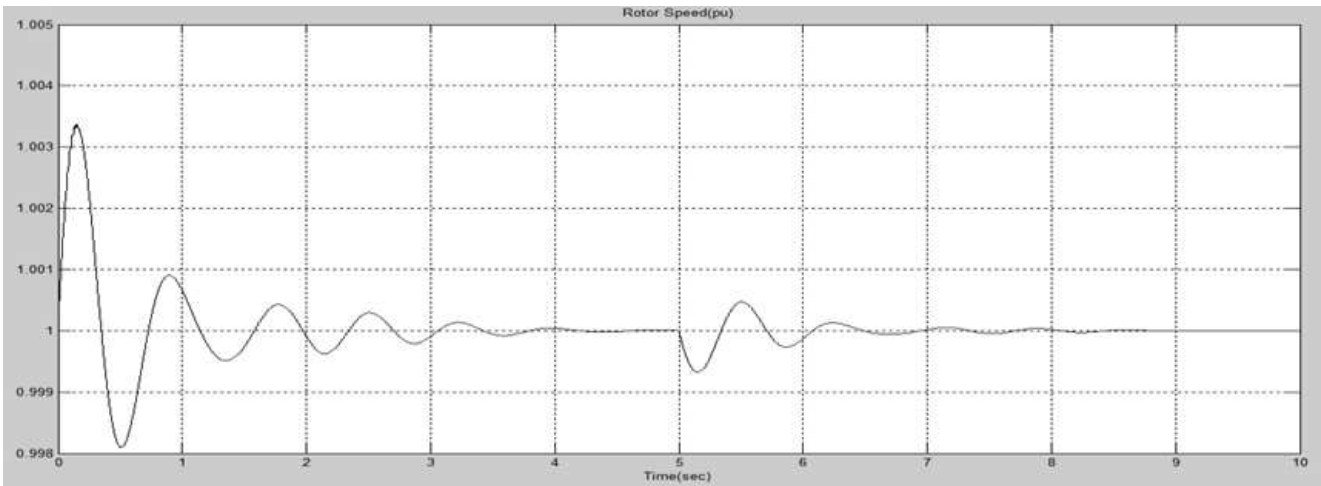


Рисунок 4.11 – Частота вращения ротора

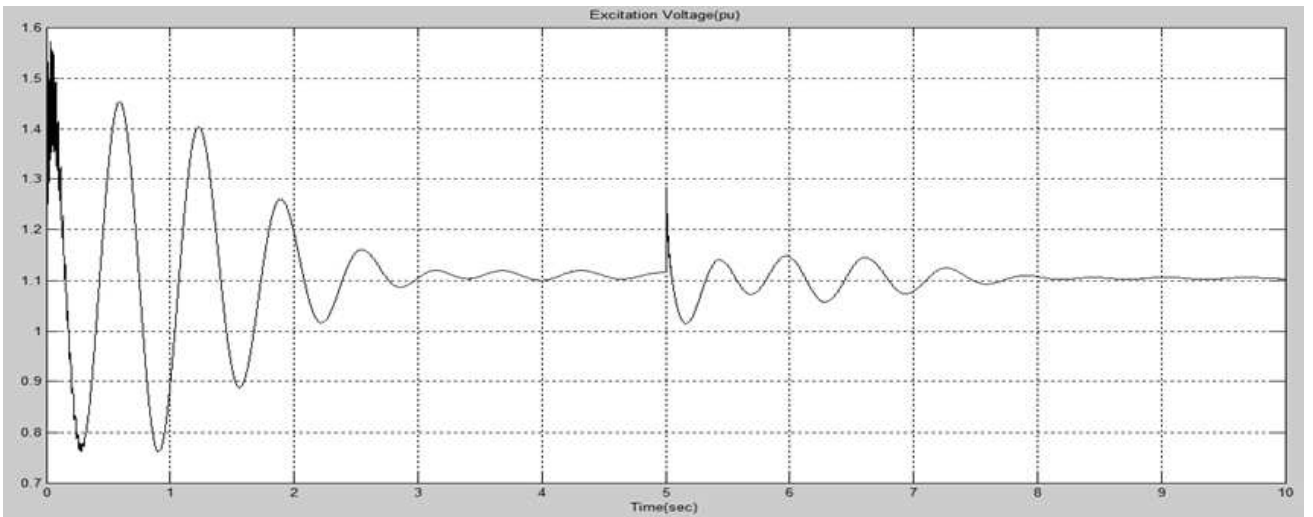


Рисунок 4.12 – Напряжение возбуждения

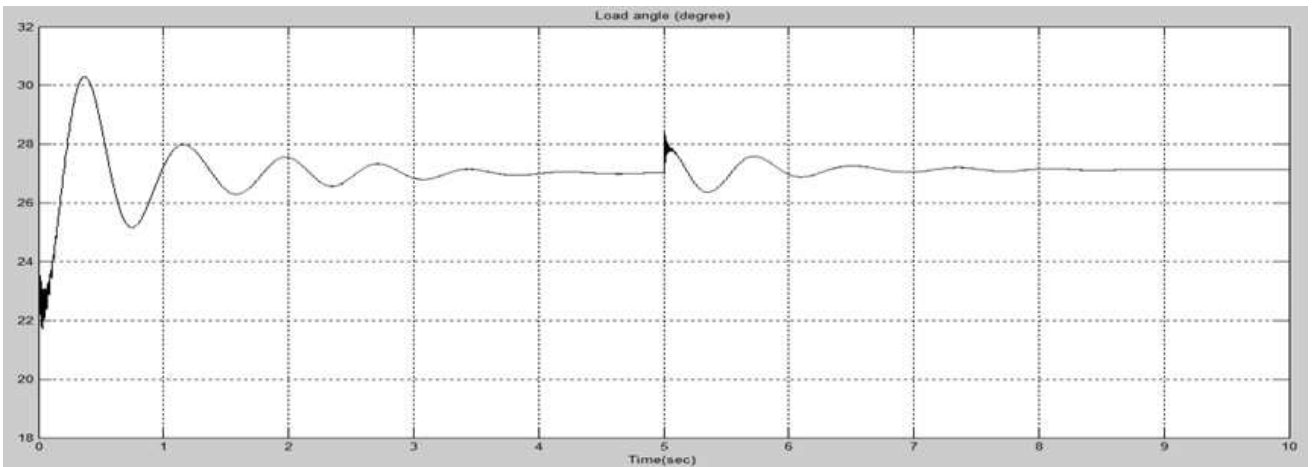


Рисунок 4.13 – Угол нагрузки генератора (градусы)

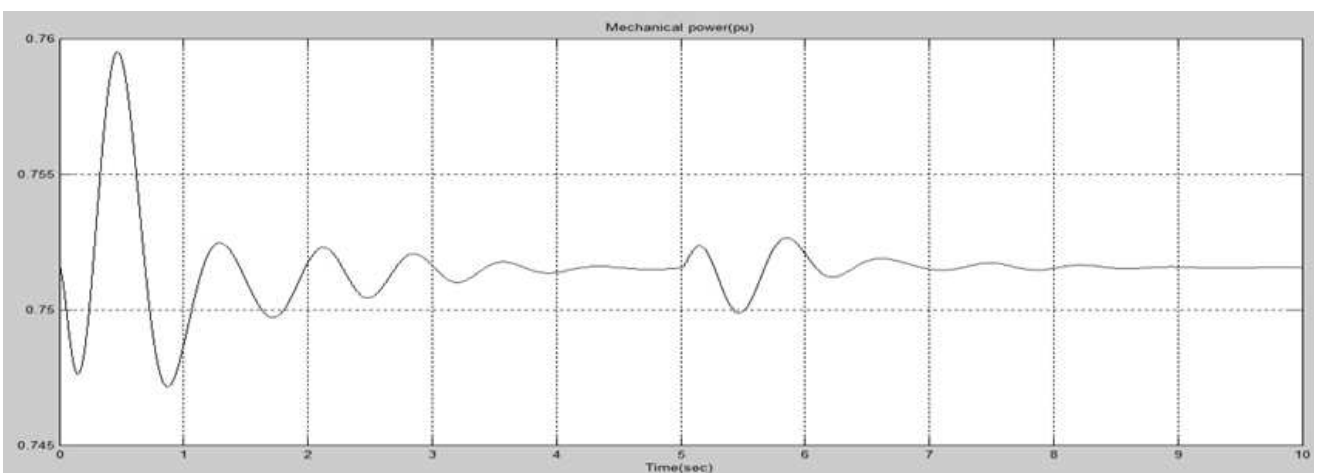


Рисунок 4.14 – Механическая мощность

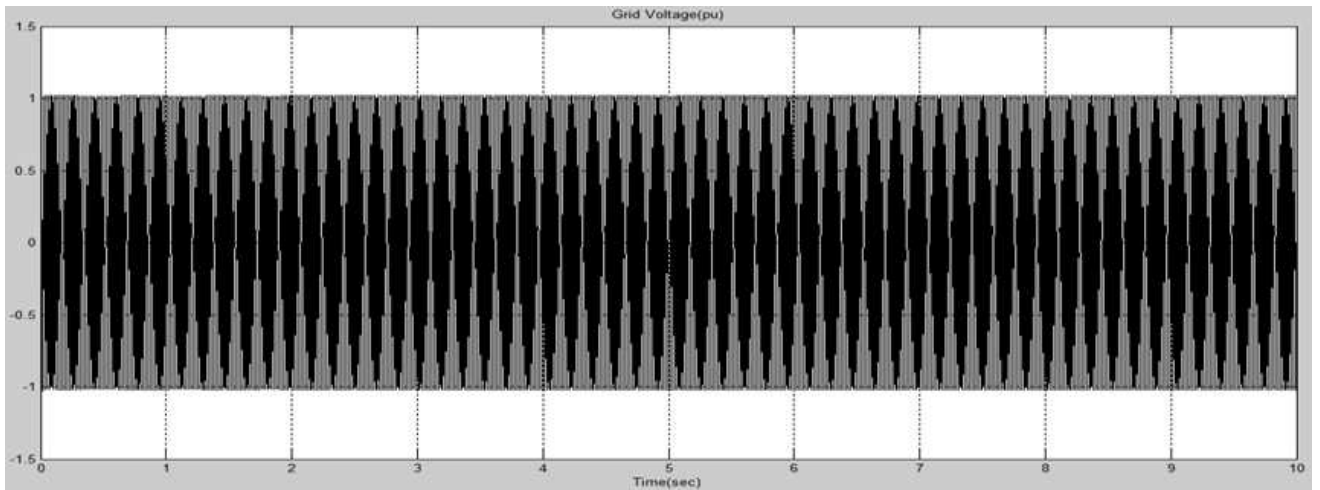


Рисунок 4.15 – Напряжение сети

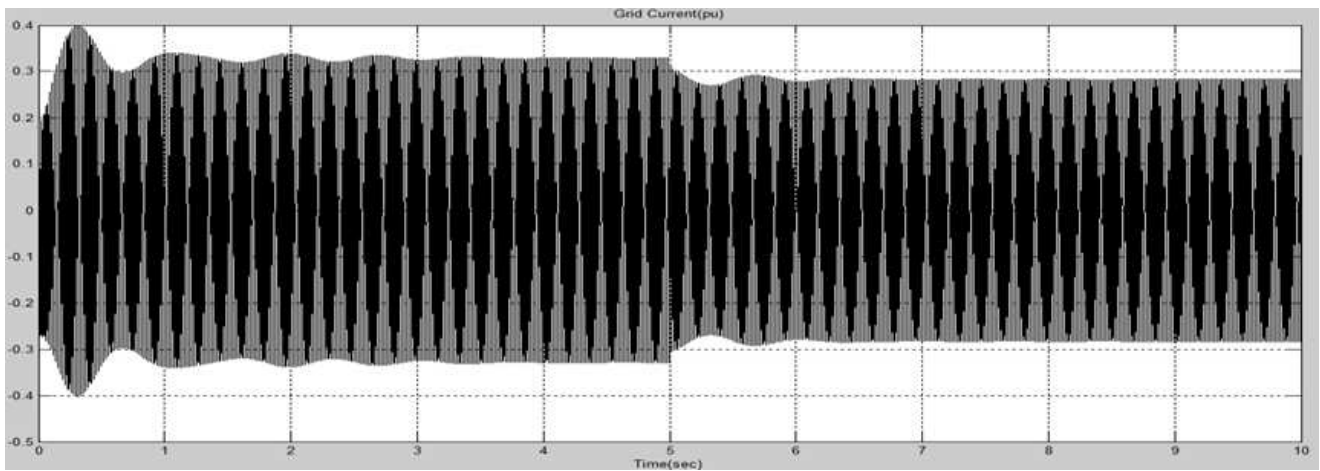


Рисунок 4.16 – Ток сети

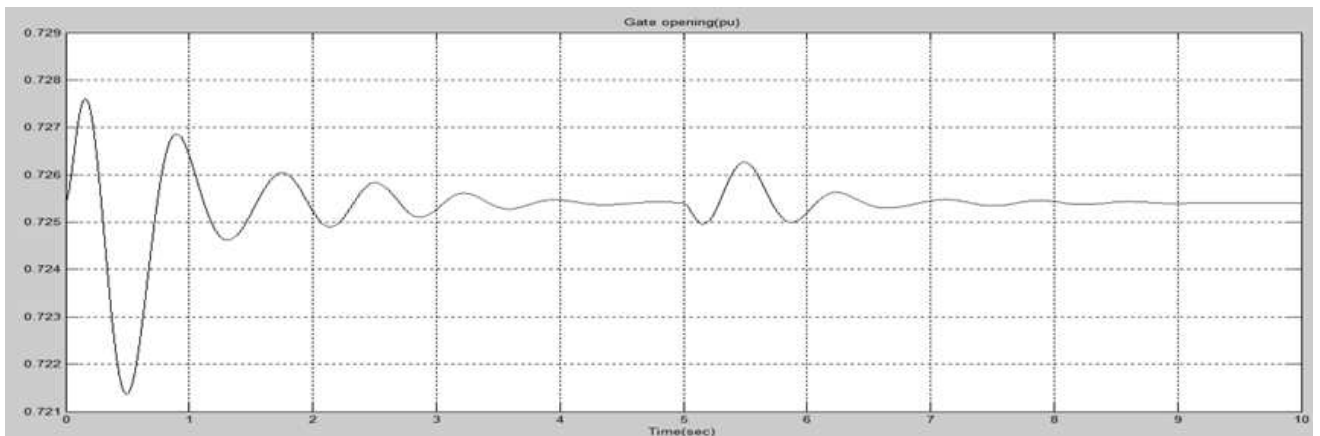


Рисунок 4.17 – Величина открытия затвора

Первоначально напряжение генератора, частота вращения ротора и напряжение сети составляют 1,0 о.е., тогда как ток генератора и ток сети составляют 0,65 о.е. и 0,35 о.е. соответственно. Ток нагрузки 0,1 о.е.,

электрическая мощность 0,75 о.е., напряжение возбуждения составляет 1,10 о.е., угол нагрузки генератора 27 градусов, механическая мощность 0,755 о.е. и величина открытия затвора 0,726 о.е.

Из рисунков 4.7 и 4.15 видно, что при увеличении нагрузки отсутствует влияние на напряжение генератора и напряжение сети, при этом происходит незначительное увеличение тока генератора при $t = 5,0$ секунд и до 6 секунд, как показано на рисунке 4.8. Из-за увеличения нагрузки, ток нагрузки увеличивается примерно до 0,2 о.е. от начального значения 0,1 о.е., как показано на рисунке 4.9. Наблюдается, что электрическая мощность увеличивается до 0,8 о.е. от начального значения 0,75 о.е. и достигает установившегося состояния через 7,0 секунд, как показано на рисунке 4.10, в то время как частота вращения ротора в это время уменьшилась, но достигла устойчивого значения через 7,0 секунд, как показано на рисунке 4.11. При увеличении нагрузки увеличивается напряжение возбуждения примерно до 1,3 о.е. и оно колеблется в течении 3,0 секунд и достигает устойчивого значения через 8,0 секунд, как показано на рисунке 4.12. Увеличивается также угол нагрузки генератора до 28 градусов и оно колеблется в течении 2,0 секунд, а начальное установившееся значение достигается через 7,0 секунд, как показано на рисунке 4.13. Механическая мощность также увеличивается при увеличении нагрузки при $t = 5,0$ секунд, и она колеблется 3,0 секунды и достигает устойчивого значения через 8,0 секунд, как показано на рисунке 4.14. Из-за увеличения нагрузки ток сети уменьшается до 0,29 о.е. от 0,3 о.е., как показано на рисунке 4.16. Из рисунка 4.17 видно, что при увеличении нагрузки в систему уменьшается величина открытия затвора и колеблется в течении 2,0 секунды и до 7,0 секунд возвращается в начальное установившееся значение.

4.4.2 Случай II: снижение нагрузки

Для этого случая модель Matlab / Simulink показана на рисунке 4.18, а однолинейная диаграмма показана на рисунке 4.19.

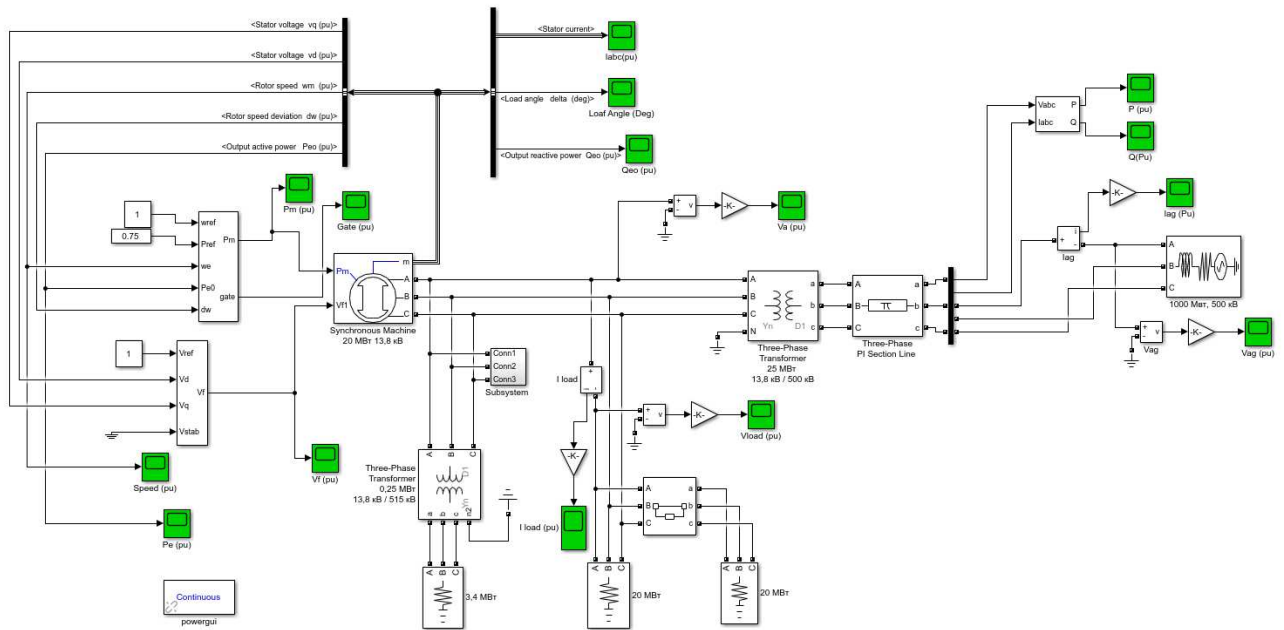


Рисунок 4.18 – Модель Matlab / Simulink гидроэлектростанции со снижением нагрузки

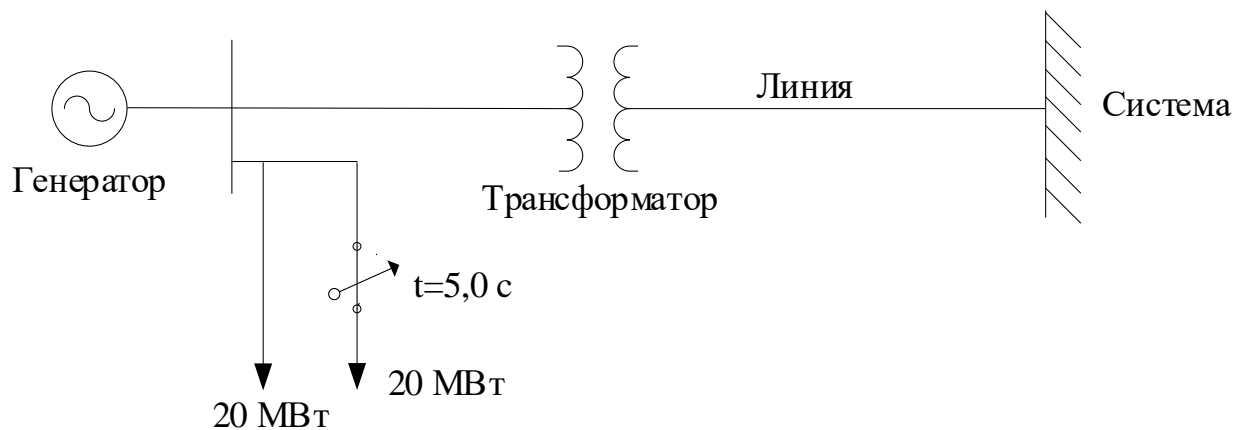


Рисунок 4.19 – Однолинейная диаграмма для уменьшения нагрузки

Первоначально 40 МВт – это общая нагрузка в сети, введено нарушение путем уменьшения нагрузки 20 МВт от общей нагрузки в момент времени $t = 5,0$ секунд, а симуляция проводится в течение 10,0 секунд. Все величины указаны в относительных единицах.

На рисунках 4.20 – 4.30 представлены временные характеристики. На рисунке 4.20 показано изменение напряжения генератора, на рисунке 4.21 показано изменение тока генератора, на рисунке 4.22 показано изменение тока нагрузки, на рисунке 4.23 показано изменение электрической мощности генератора. На рисунке 4.24 показано изменение скорости ротора, на рисунке 4.25 показано изменение напряжения возбуждения, на рисунке 4.26 показано изменение угла нагрузки генератора, на рисунке 4.27 показано изменение механической мощности, рис. 4.28 показано изменение напряжения сети, на

рисунке 4.29 показано изменение тока сети, а на рисунке 4.30 показано изменение величины открытия затвора.

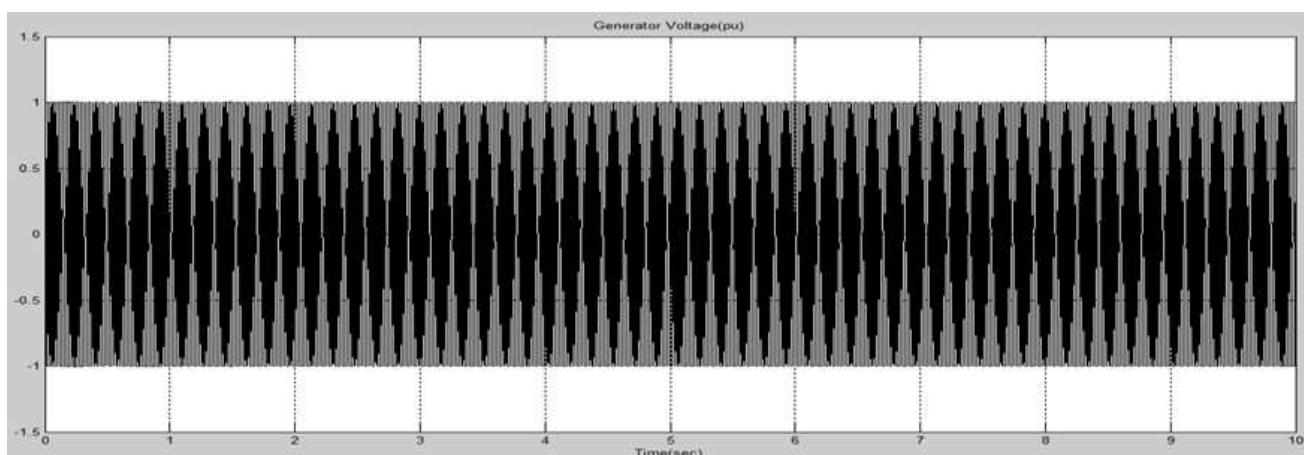


Рисунок 4.20 – Напряжение генератора

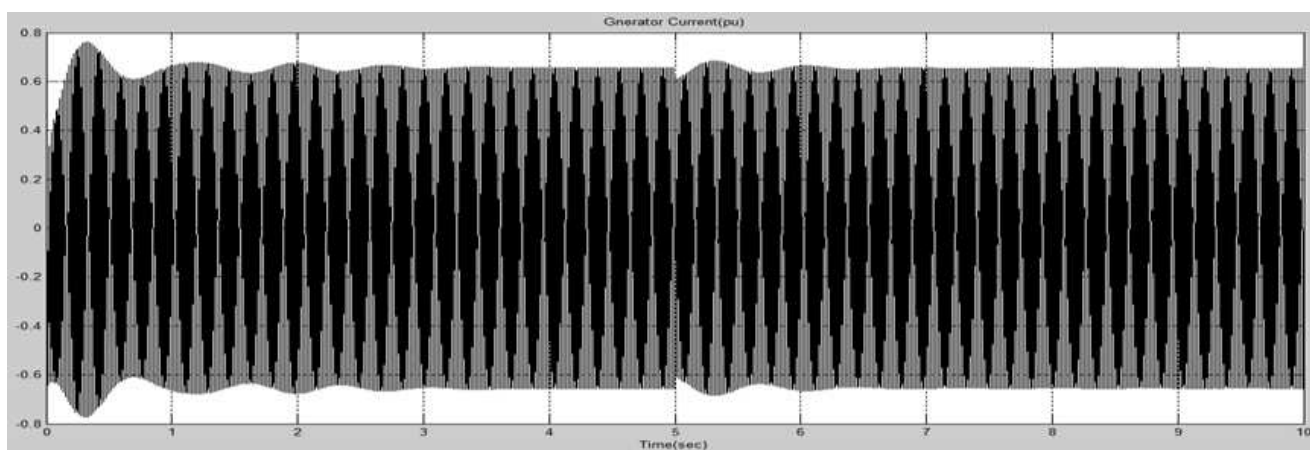


Рисунок 4.21 – Ток генератора

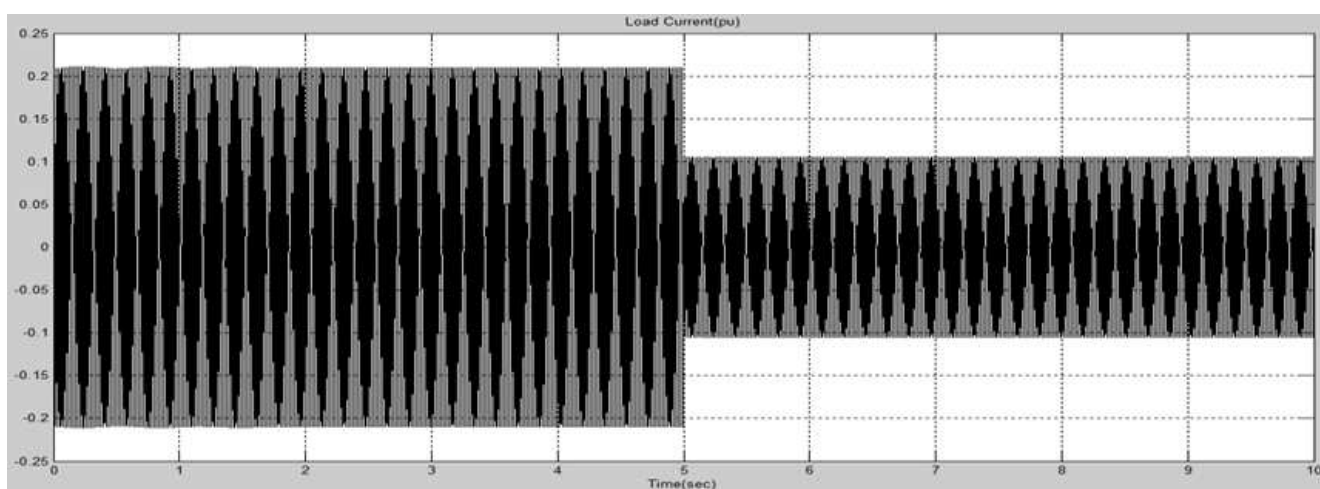


Рисунок 4.22 – Ток нагрузки

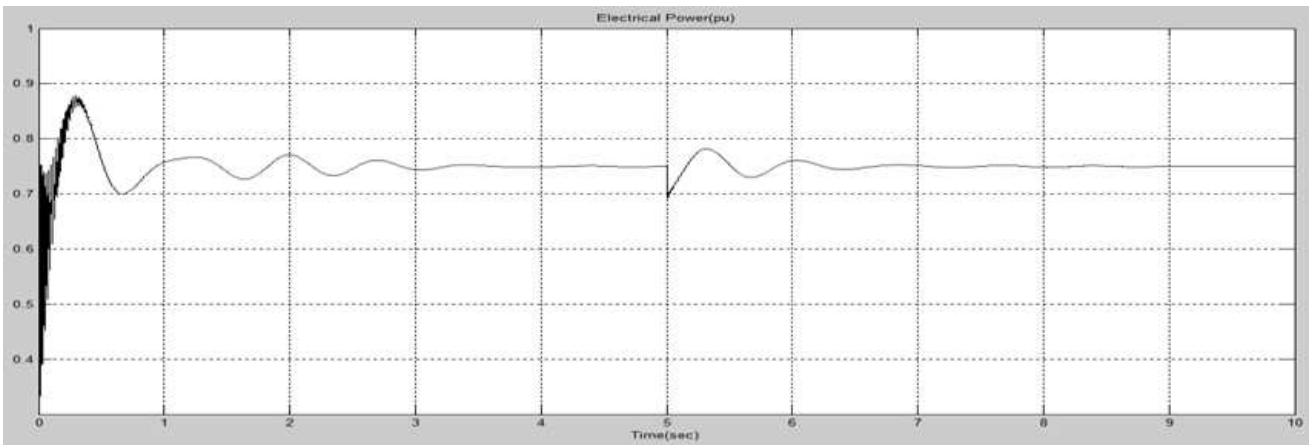


Рисунок 4.23 – Электрическая мощность

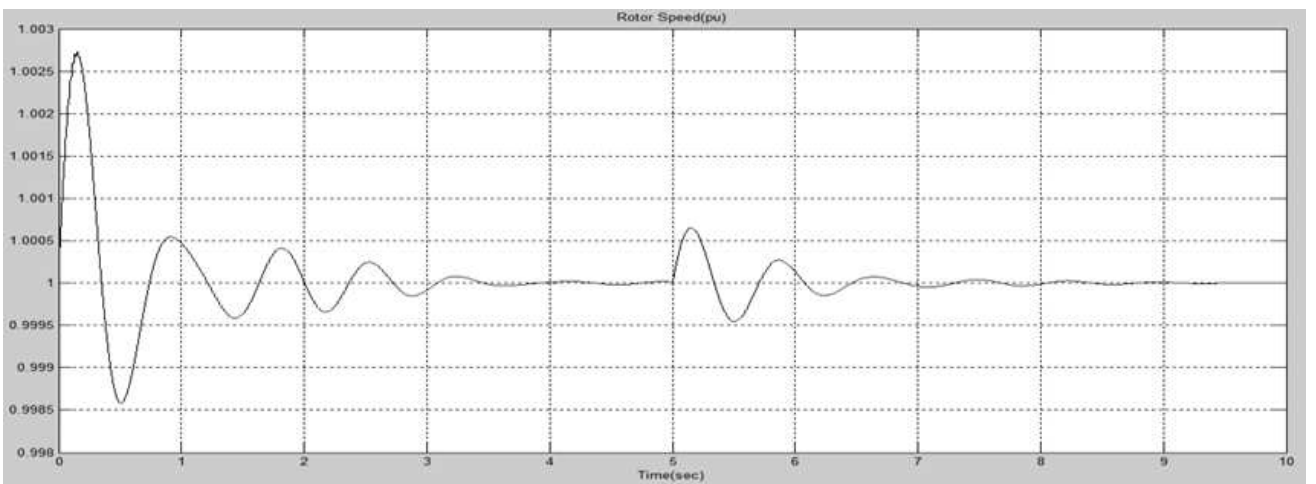


Рисунок 4.24 – Частота вращения ротора

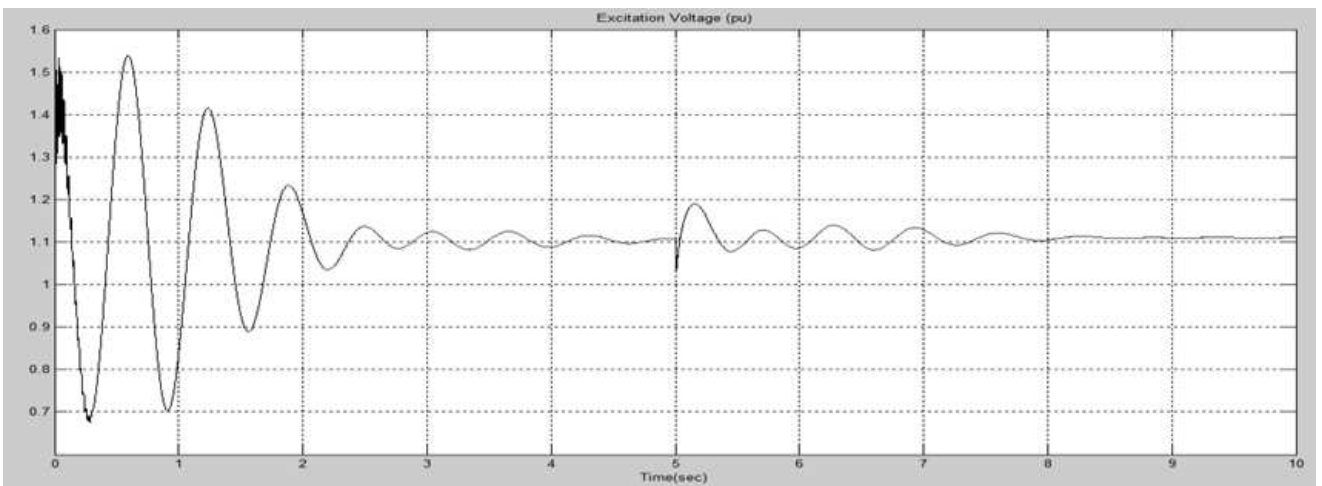


Рисунок 4.25 – Напряжение возбуждения

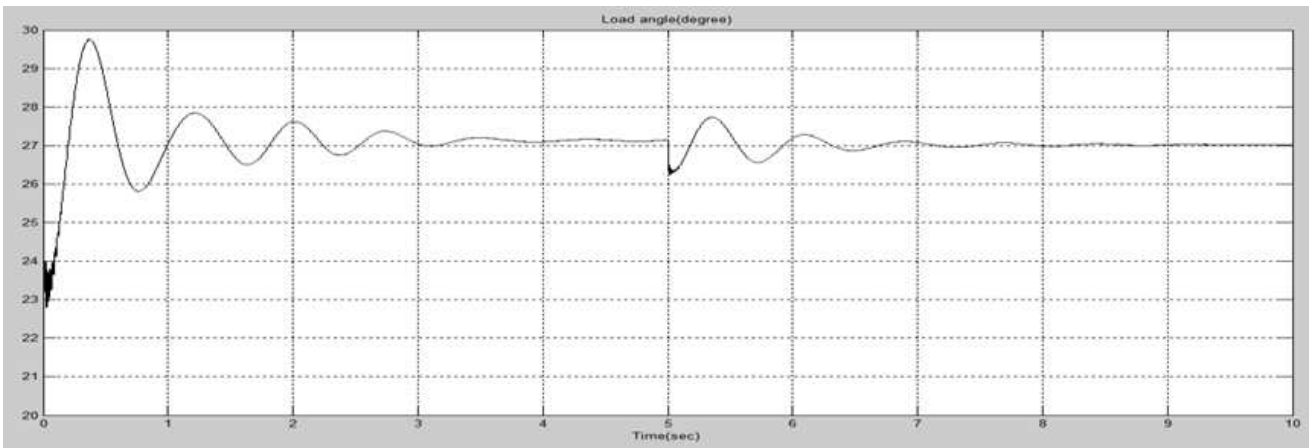


Рисунок 4.26 – Угол нагрузки генератора (градус)

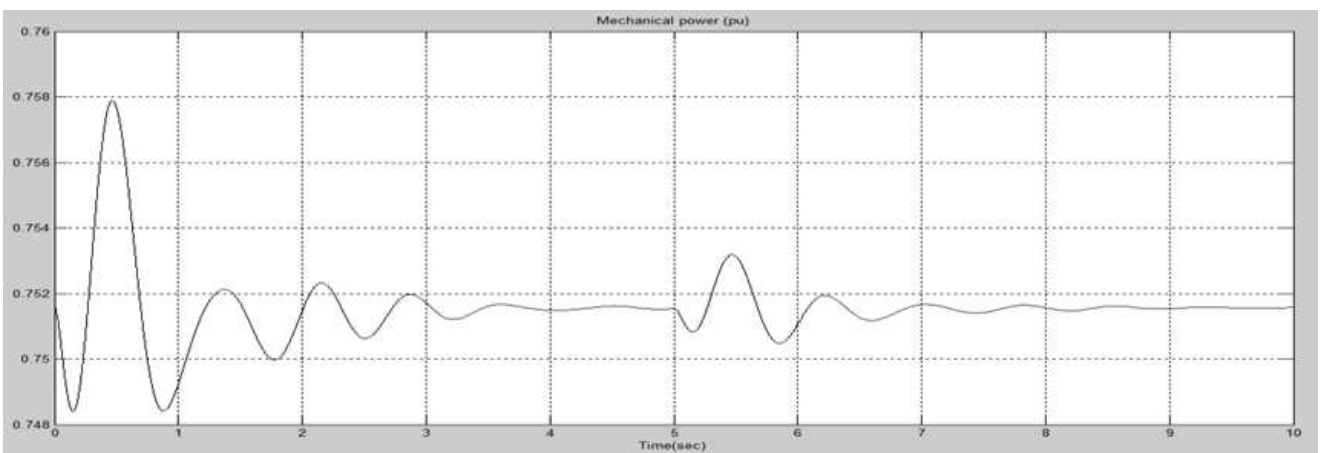


Рисунок 4.27 – Механическая мощность

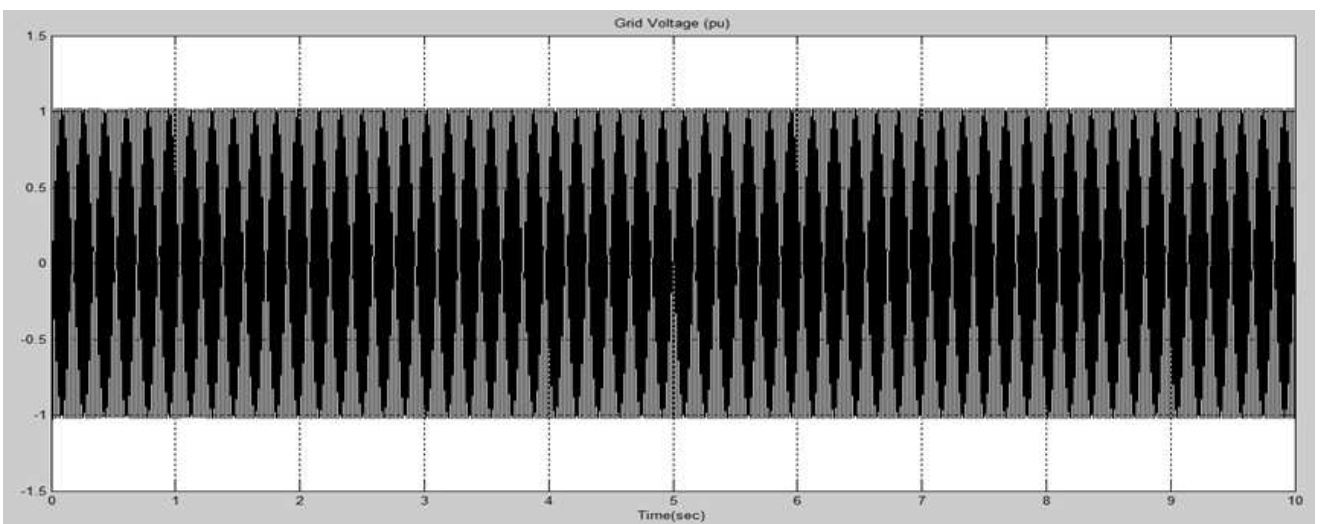


Рисунок 4.28 – Напряжение сети

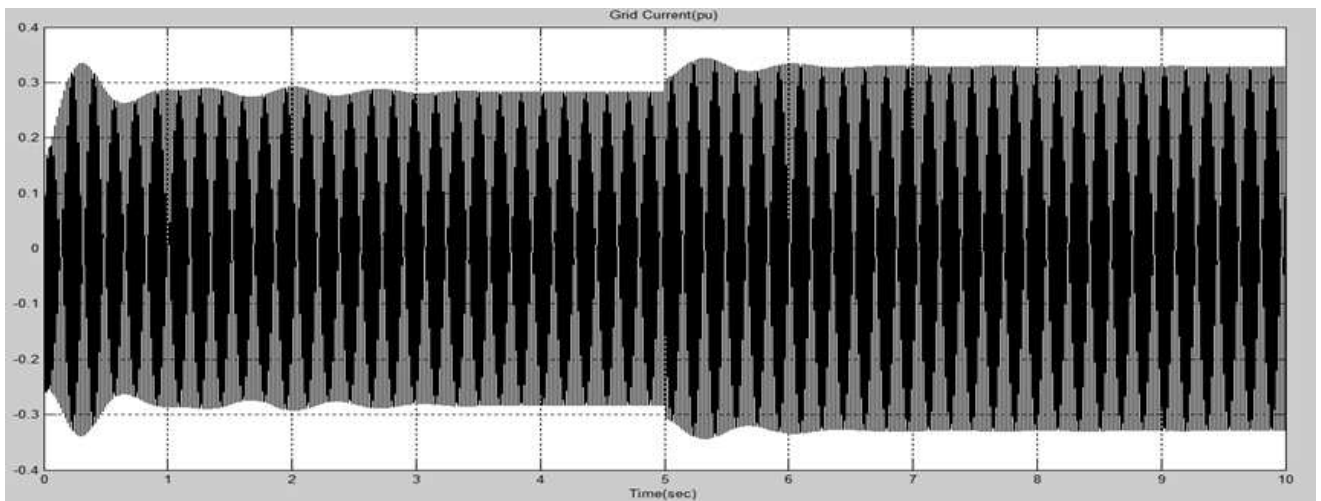


Рисунок 4.29 – Ток сети

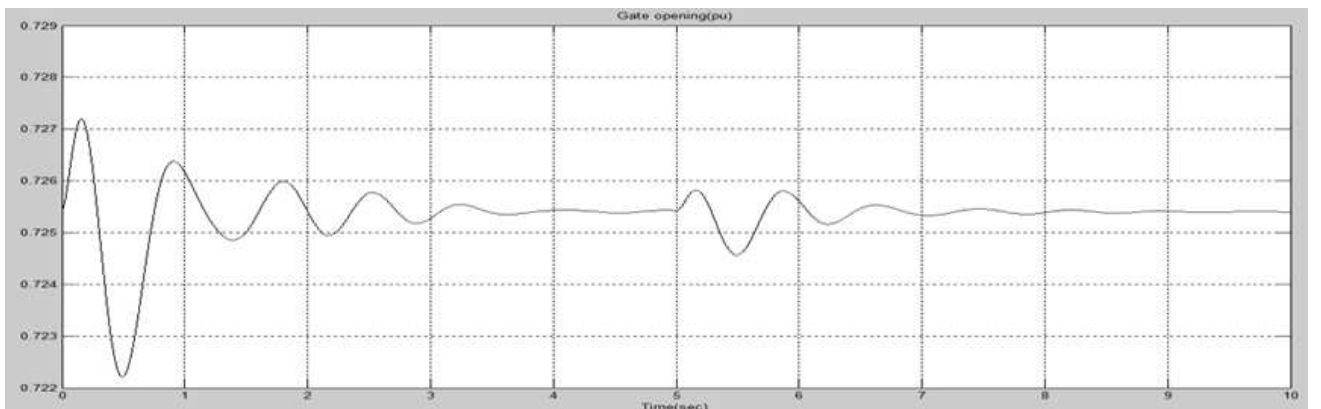


Рисунок 4.30 – Величина открытия затвора

Первоначально напряжение генератора, частота вращения ротора и напряжение сети составляют 1,0 о.е., тогда как ток генератора и ток сети составляют 0,65 о.е. и 0,29 о.е. соответственно. Ток нагрузки 0,2 о.е., электрическая мощность 0,75 о.е., напряжение возбуждения – 1,10 о.е., угол нагрузки генератора – 27 градусов, механическая мощность - 0,751 о.е. и величина открытия затвора 0,726 о.е.

Из рисунков 4.20 и 4.28 видно, что при уменьшении нагрузки отсутствует влияние на напряжение генератора и напряжение сети, при этом происходит незначительное уменьшение тока генератора при $t = 5,0$ секунд, ток генератора достигает установившегося значения через 6,0 секунд, как показано на рисунке 4.21. Из-за увеличения нагрузки, ток нагрузки уменьшается примерно до 0,1 о.е. от начального значения 0,2 о.е., как показано на рисунке 4.22. Наблюдается, что электрическая мощность уменьшается до 0,7 о.е. от начального значения 0,75 о.е. и достигает установившегося значения через 7,0 секунд, как показано на рисунке 4.23, в то время как частота вращения ротора увеличивается, но достигла устойчивого значения через 7,0 секунд, как показано на рисунке 4.24. При уменьшении нагрузки наблюдается уменьшение напряжения возбуждения

примерно до 1,0 о.е., и оно колеблется в течение 3,0 секунд и достигает устойчивого значения через 8,0 секунд, как показано на рисунке 4.25. Также снижается угол нагрузки генератора до 26 градусов, и он колеблется в течении 2,0 секунд и достигает начального установившегося значения через 7,0 секунд, как показано на рисунке 4.26. Механическая мощность уменьшается при $t = 5,0$ секунд и колеблется в течение 3,0 секунд и достигает установившегося значения после 8,0 секунд, как показано на рисунке 4.27. Из-за уменьшения нагрузки ток сети увеличивается до 0,35 о.е. от 0,29 о.е., как показано на рисунке 4.29. Из рисунка 4.30 видно, что при выходе нагрузки из системы увеличивается величина открытия затвора и колеблется в течении 2,0 секунд и до 7,0 секунд возвращается в начальное установившееся значение.

4.4.3 Случай III: короткое замыкание

В этом случае модель Matlab / Simulink показана на рисунке 4.31, а однолинейная диаграмма показана на рисунке 4.32.

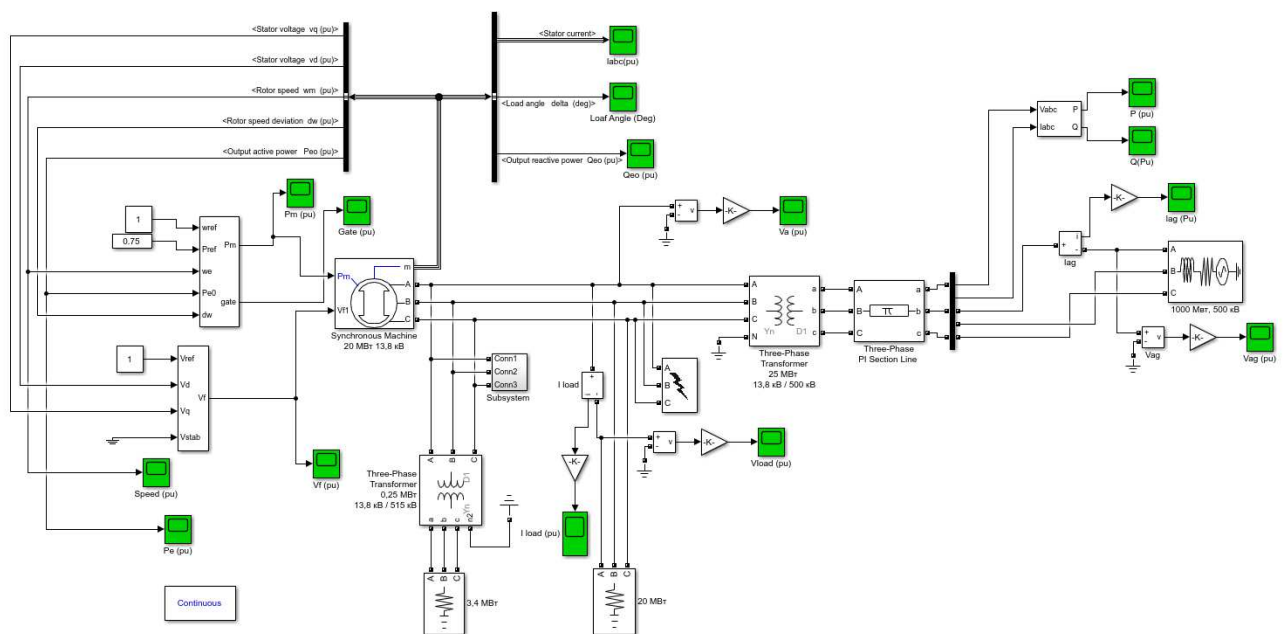


Рисунок 4.31 – Модель Matlab / Simulink гидроэлектростанции для моделирования короткого замыкания

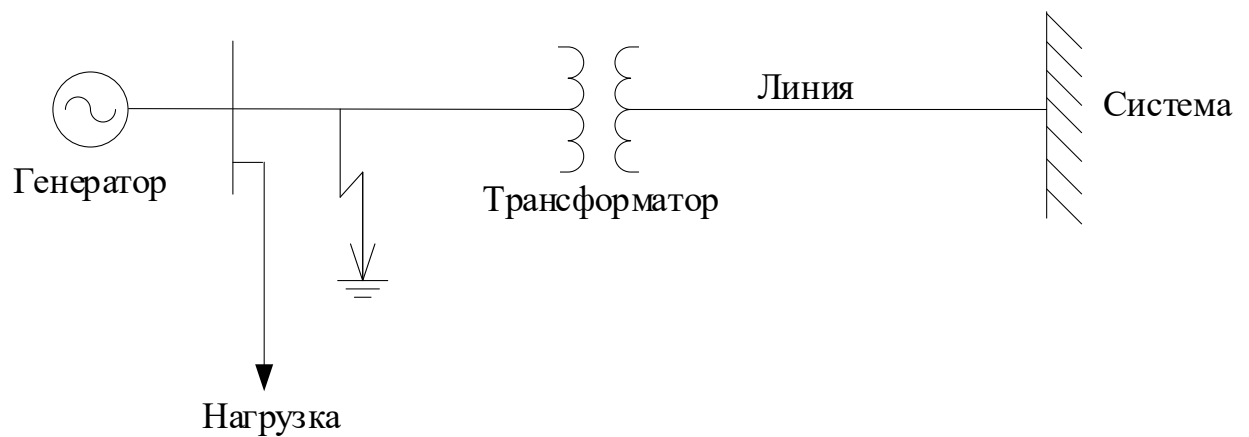


Рисунок 4.32 – Однолинейная диаграмма для трехфазного короткого замыкания

Рассмотрено трехфазного замыкания на выводах генератора. Моделирование проводится в течение 10,0 секунд. Все величины указаны в относительных единицах.

На рисунках 4.33 – 4.43 представлены временные характеристики. На рисунке 4.33 показано изменение напряжения генератора, на рисунке 4.34 показано изменение тока генератора, на рисунке 4.35 показано изменение тока нагрузки, на рисунке 4.36 показано изменение электрической мощности генератора. На рисунке 4.37 показано изменение скорости вращения ротора, на рисунке 4.38 показано изменение напряжения возбуждения, на рисунке 4.39 показано изменение угла нагрузки генератора, на рисунке 4.40 показано изменение механической мощности, рис. 4.41 показывает изменение напряжения сети, на рисунке 4.42 показано изменение тока сети, а на рисунке 4.43 показано изменение величины открытия затвора.

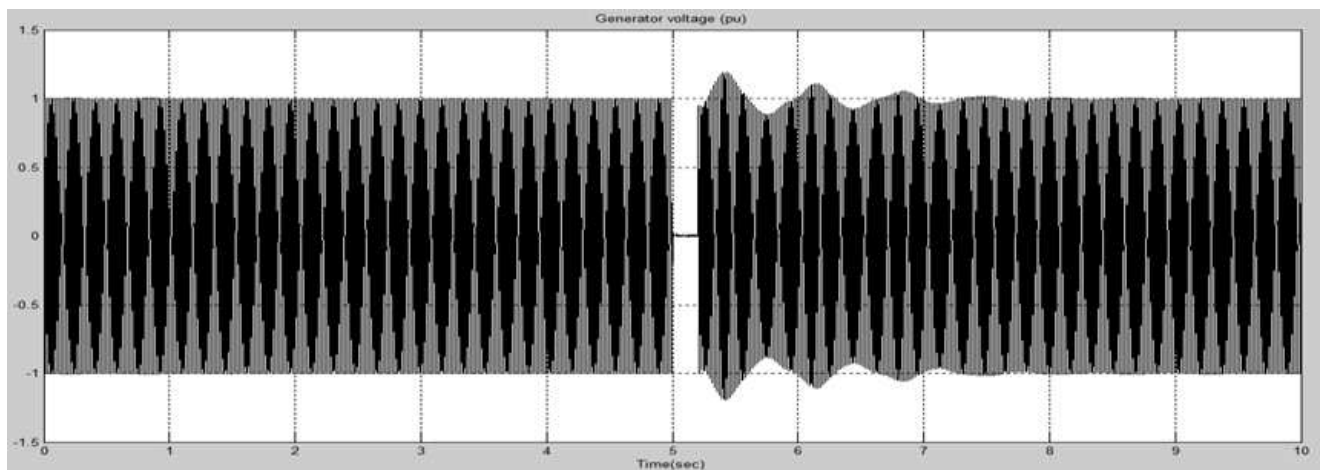


Рисунок 4.33 – Напряжение генератора

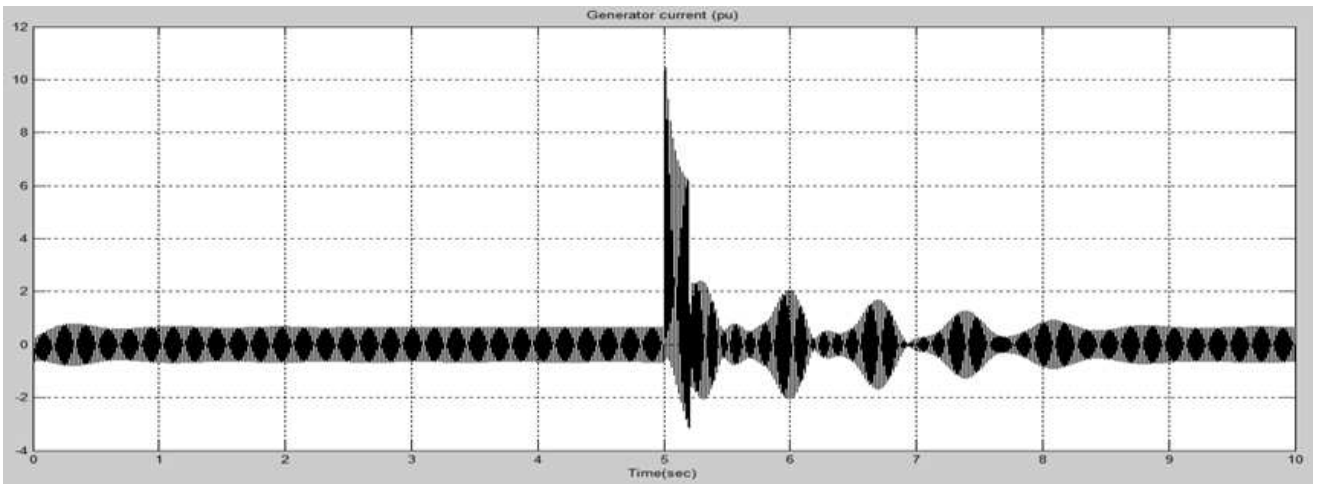


Рисунок 4.34 – Ток генератора

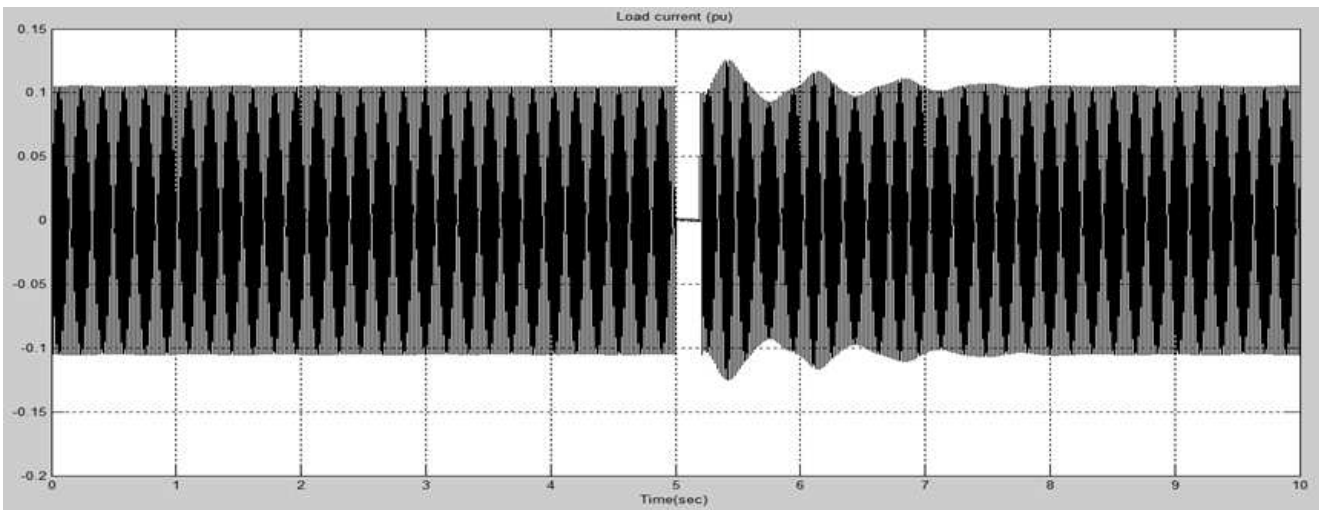


Рисунок 4.35 – Ток нагрузки

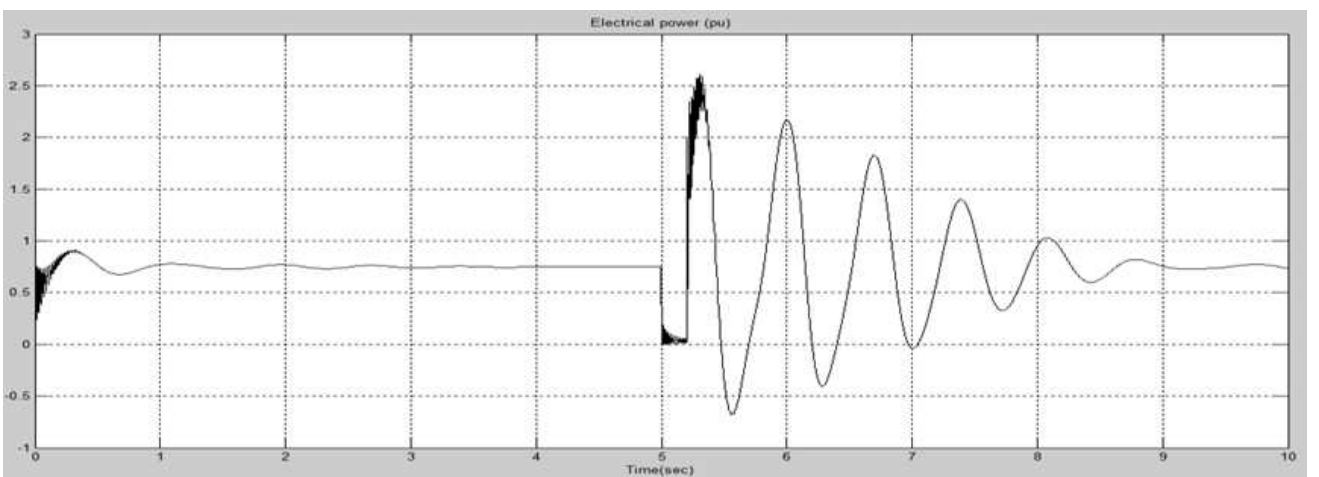


Рисунок 4.36 – Электрическая мощность

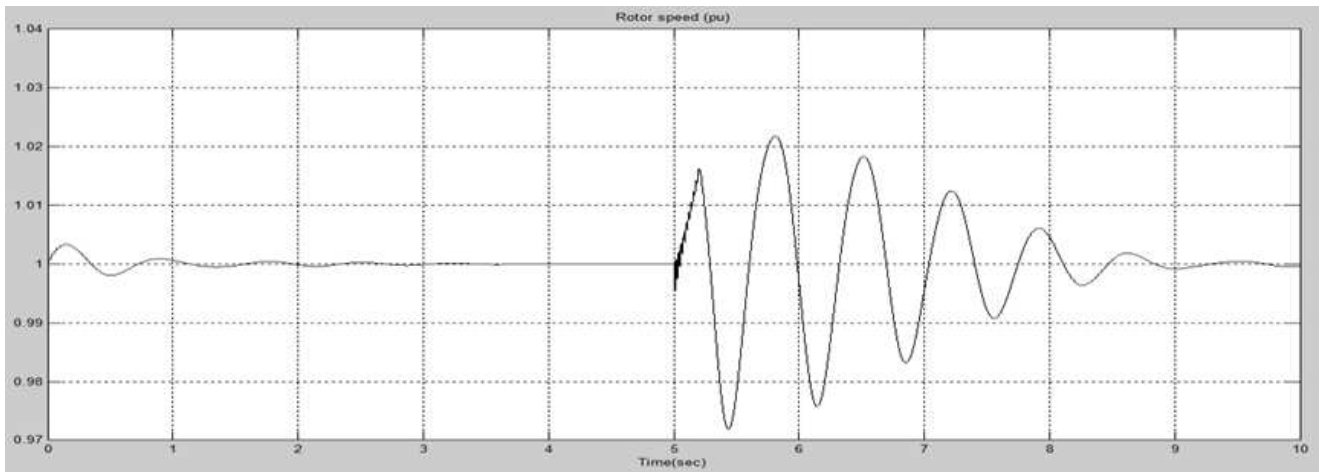


Рисунок 4.37 – Частота вращения ротора

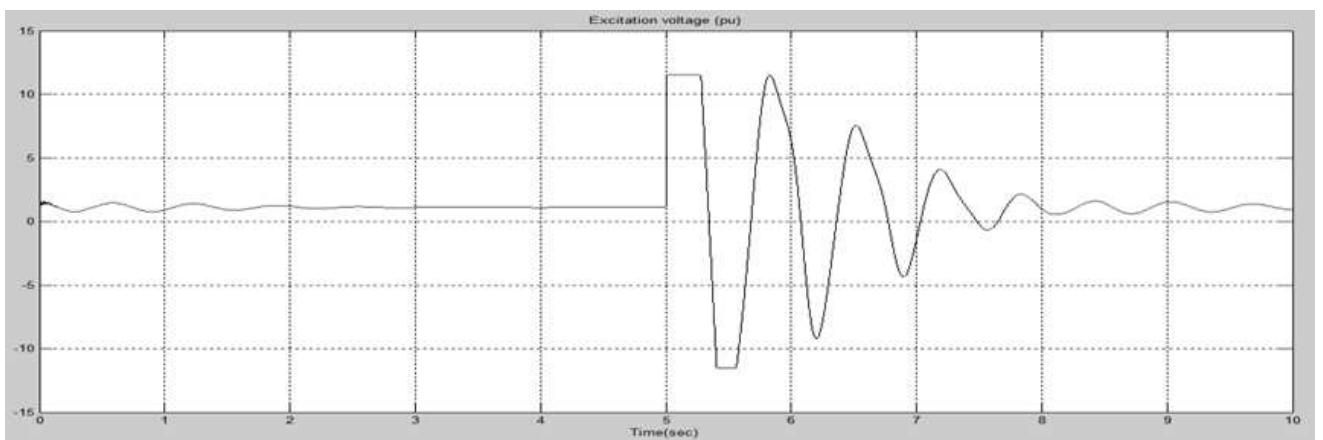


Рисунок 4.38 – Напряжение возбуждения

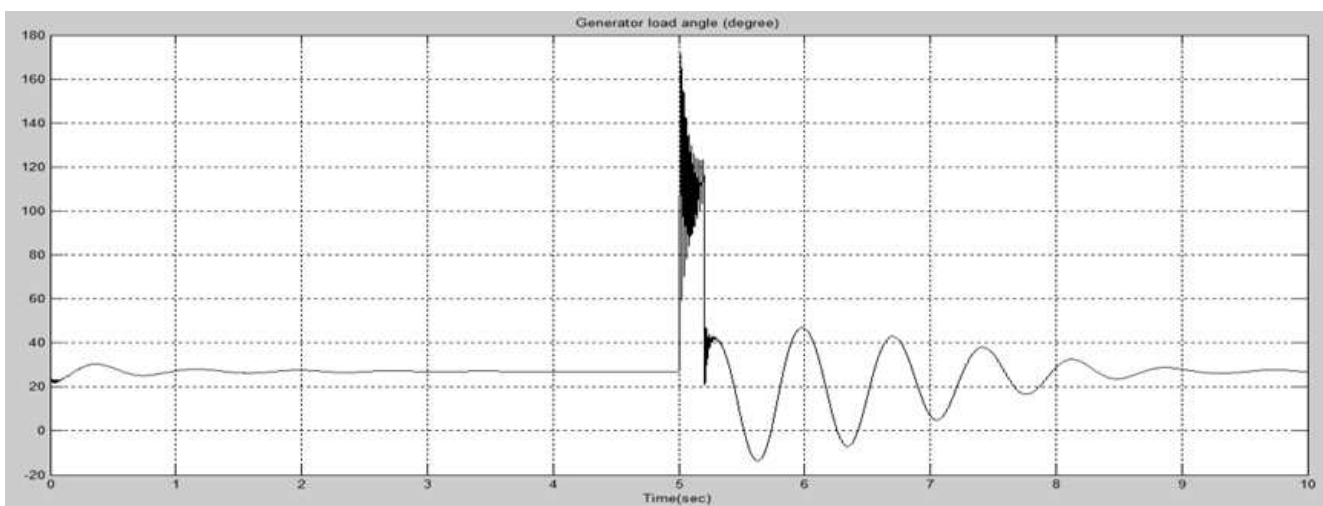


Рисунок 4.39 – Угол нагрузки генератора (градус)

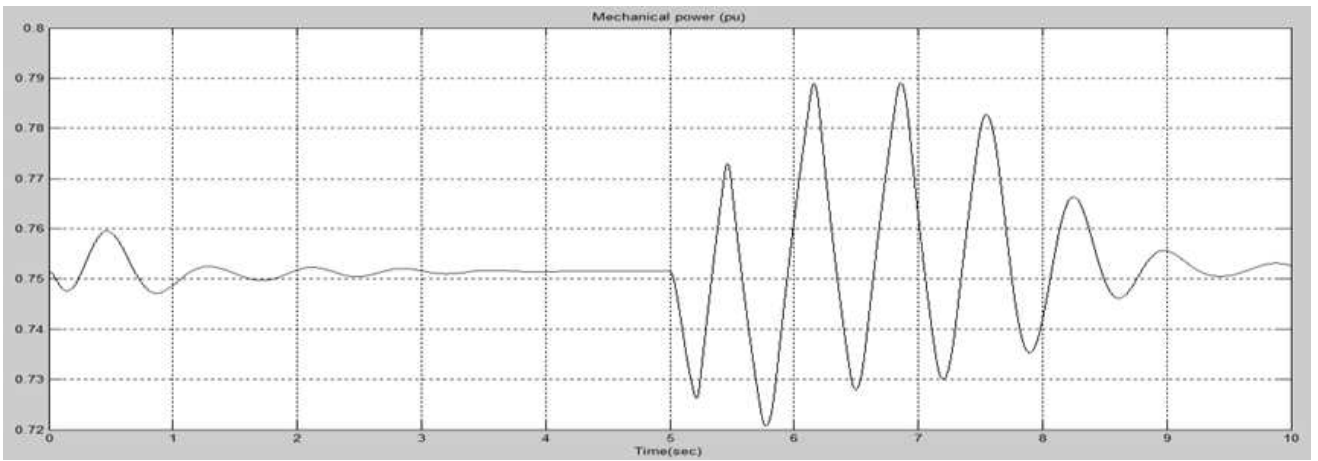


Рисунок 4.40 – Механическая мощность

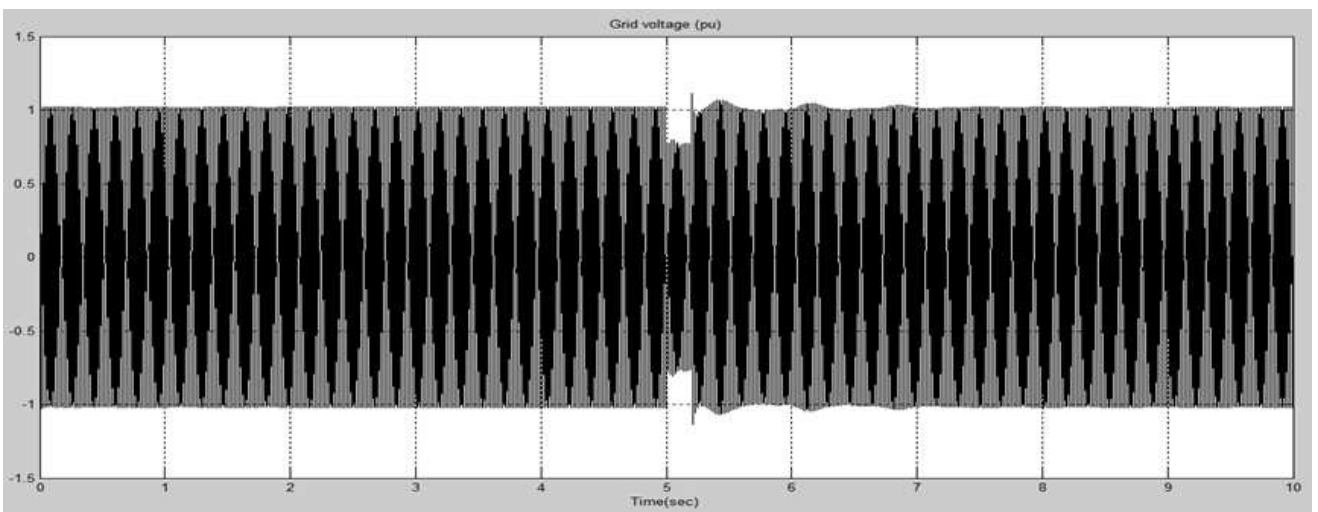


Рисунок 4.41 – Напряжение сети

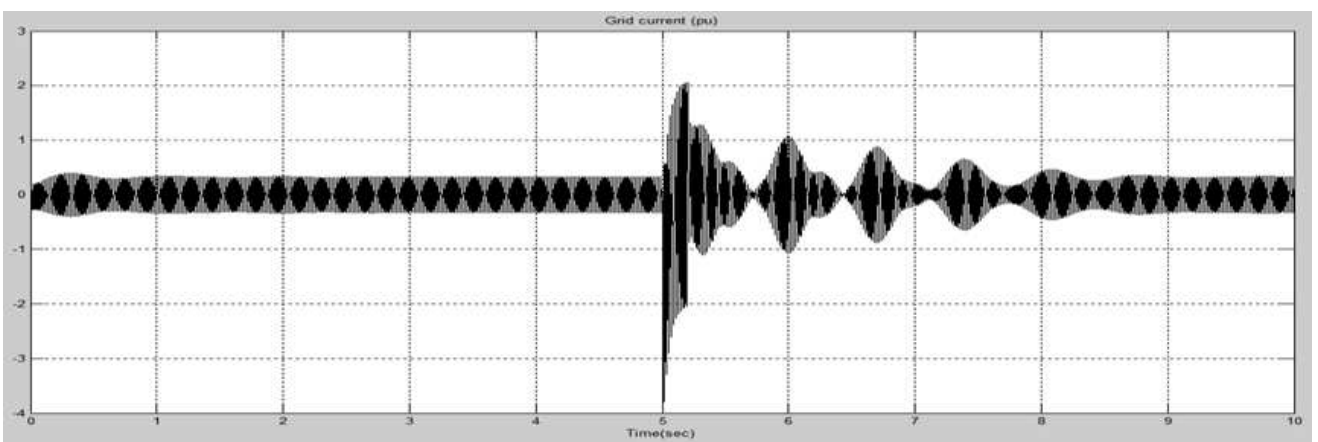


Рисунок 4.42 – Ток сети

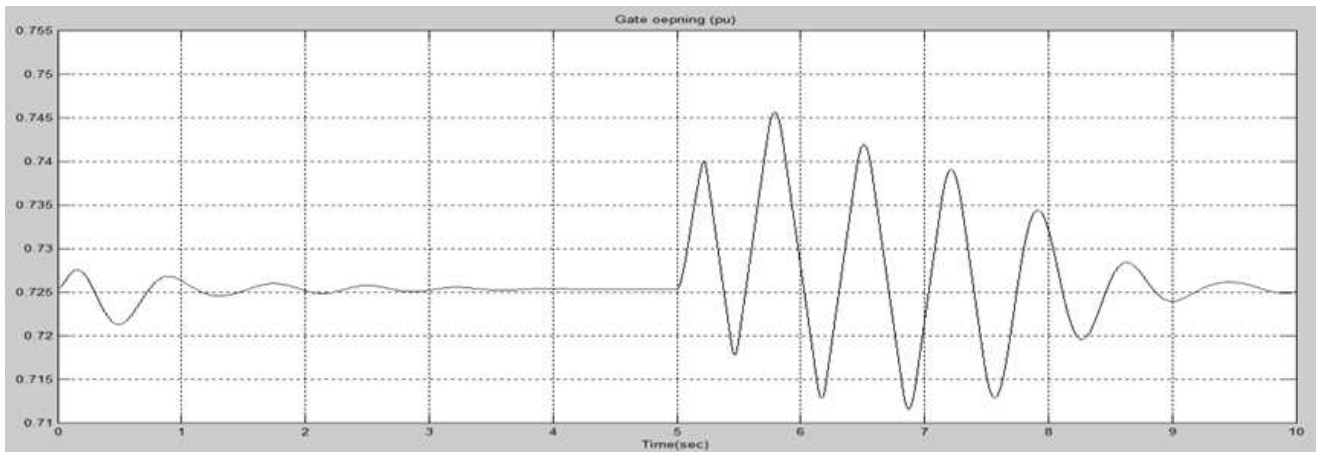


Рисунок 4.43 – Время открытия затвора

Первоначально напряжение генератора, частота вращения ротора и напряжение сети составляют 1,0 о.е., тогда как ток генератора и ток сети составляют 0,65 о.е. и 0,29 о.е. соответственно. Ток нагрузки около 0,1 о.е., электрическая мощность 0,75 о.е., напряжение возбуждения – 1,10 о.е., угол нагрузки генератора – 27 градусов, механическая мощность – 0,751 о.е. и величина открытия затвора 0,725 о.е.

Из-за возникновения трехфазного замыкания на землю на выводах генератора при $t = 5,0$ секунд напряжение и ток генератора снижаются до нуля от начального значения 1,0 о.е. и 0,1 о.е. соответственно, как показано на рисунках 4.33 и 4.35 и остаются в переходном состоянии в течение 2,0 секунд после того, как короткое замыкание устраняется при $t = 5,2$ секунды и достигает установившегося значения через 7,0 секунд. Во время повреждения ток генератора и ток сети увеличиваются примерно до 11,0 о.е. и 2,0 о.е. соответственно, остаются в переходном состоянии в течение 3,0 секунд и достигают установившегося значения через 8,0 секунд, как показано на рисунках 4.34 и 4.42. Также наблюдается, что во время неисправности электрическая мощность падает до нуля, как показано на рисунке 4.36 и колеблется в течение 4,0 секунд после устранения короткого замыкания и достигает установившегося значения через 9,0 секунд. Частота вращения ротора увеличена до 1,01 о.е. по сравнению с начальным значением 1,0 о.е., как показано на рисунке 4.37, и колеблется в течение 4,0 секунд и достигает установившегося значения после 9,0 секунд. Напряжение возбуждения сильно увеличивается до среднего значения 11,5 о.е. от начального значения 1,10 о.е., как показано на рисунке 4.38, и колеблется в течение 4,0 секунд и достигает установившегося значения через 9,0 секунд. Угол нагрузки генератора значительно увеличивается до 170 градусов от начального значения 27 градусов, как показано на рисунке 4.39, и колеблется в течение 4,0 секунд и достигает установившегося значения через 9,0 секунд. Механическая мощность уменьшается и колеблется в течение 4,0 секунд, как показано на рисунке 4.40, и достигает установившегося значения 0.751 о.е. Напряжение сети также уменьшается примерно до 0,7 о.е. от начального значения 1,0 о.е., и остается в переходном состоянии в течение 2,0 секунд и

достигает установившегося значения 1,0 о.е. через 7,0 секунд, как показано на рисунке 4.41. Величина открытия затвора увеличивается до 0,74 о.е. от начального значения 0,725 о.е. и колеблется в течение 4,0 секунд, как показано на рисунке 4.43, и стремится к достижению установившегося значения через 9,0 секунд.

4.5 Анализ режима гидроэлектростанции для различных значений усиления ПИД-регулятора

Анализ переходного процесса гидроэлектростанции осуществляется путем моделирования модели гидроэлектростанции для различных значений усиления ПИД-регулятора (K_p , K_i и K_d).

4.5.1 Анализ переходных процессов гидроэлектростанции при различной величине пропорционального усиления (K_p)

Моделирование гидроэлектростанции проводится для разных значений пропорционального коэффициента усиления (K_p), сохраняя интегральный коэффициент усиления ($K_i = 0,1$) и коэффициент усиления производной ($K_d = 0,0$). Все величины указаны в относительных единицах. Анализ переходных процессов электрической и механической мощности, частоты вращения ротора и величины открытия затвора выполняется для различных значений пропорционального коэффициента усиления (K_p) 1,0, 2,0 и 3,0. На рис. 4.44 – 4.47 показаны временные характеристики электрической и механической мощности, частоты вращения ротора и величины открытия затвора соответственно.

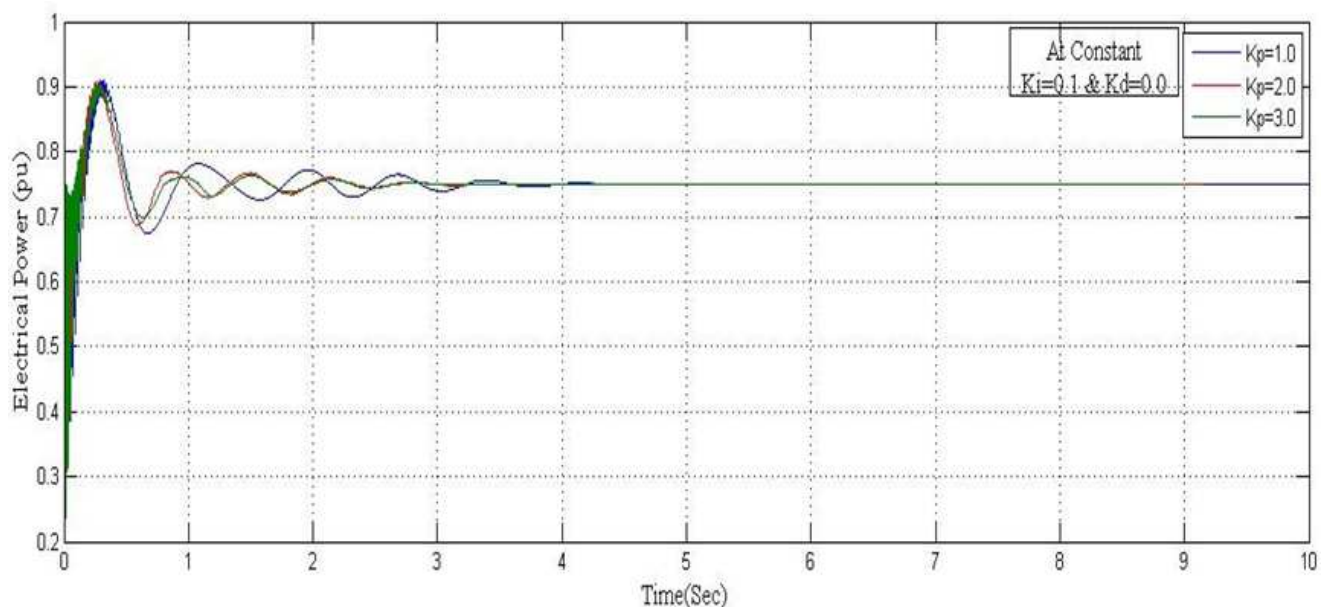


Рисунок 4.44 – Электрическая мощность в зависимости от времени при постоянных K_i и K_d

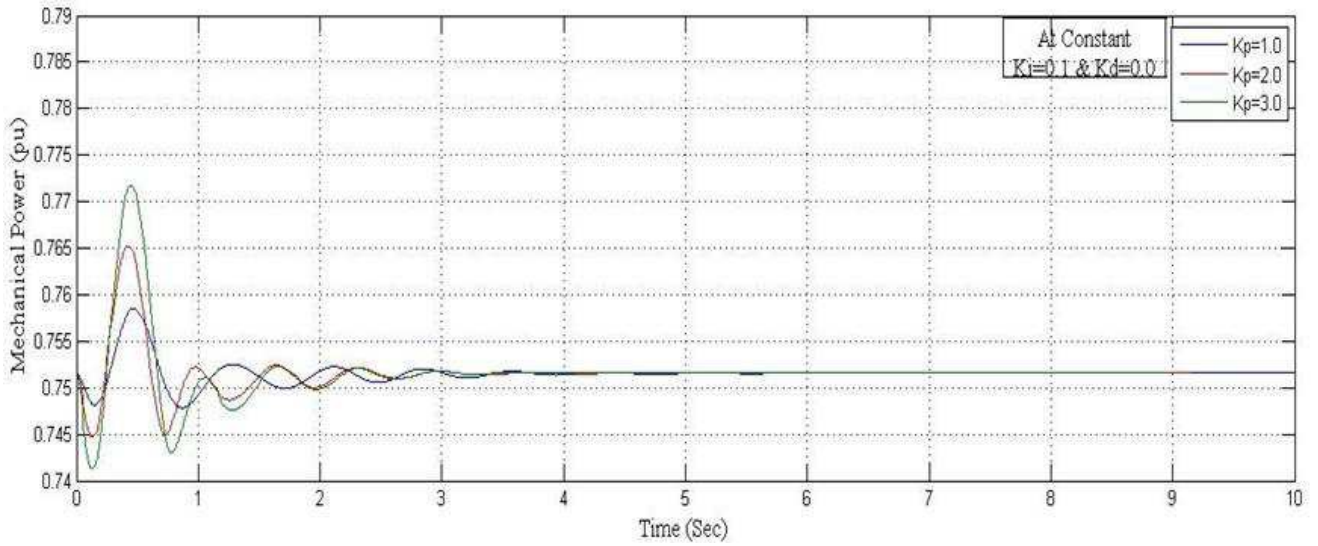


Рисунок 4.45 – Механическая мощность в зависимости от времени при постоянных K_i и K_d

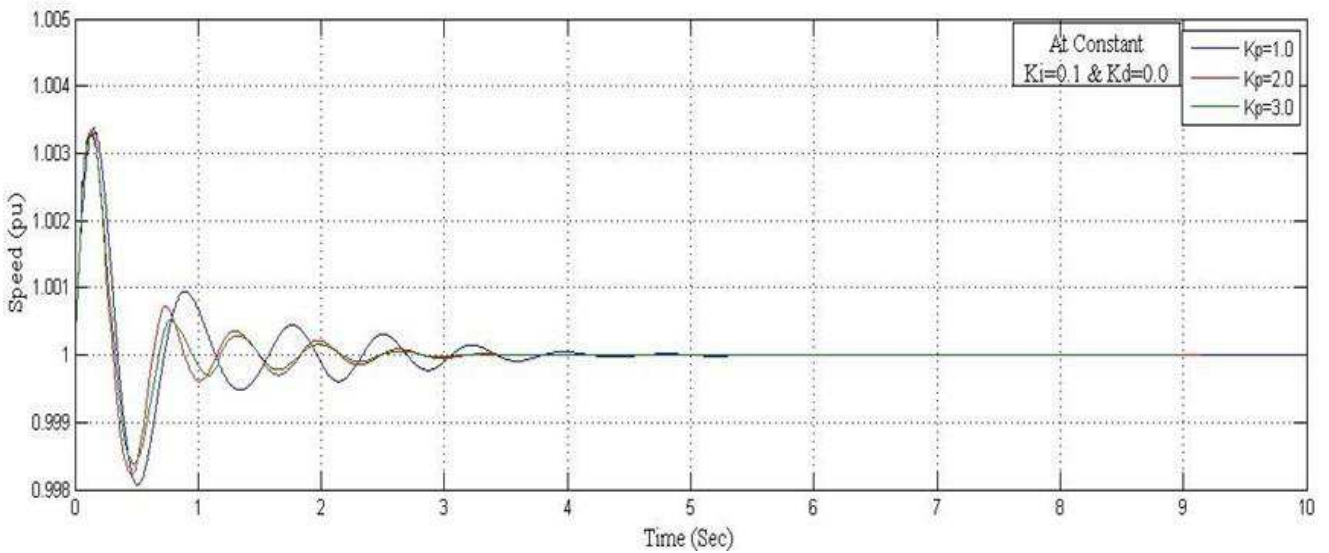


Рисунок 4.46 – Частота вращения ротора в зависимости от времени при постоянных K_i и K_d

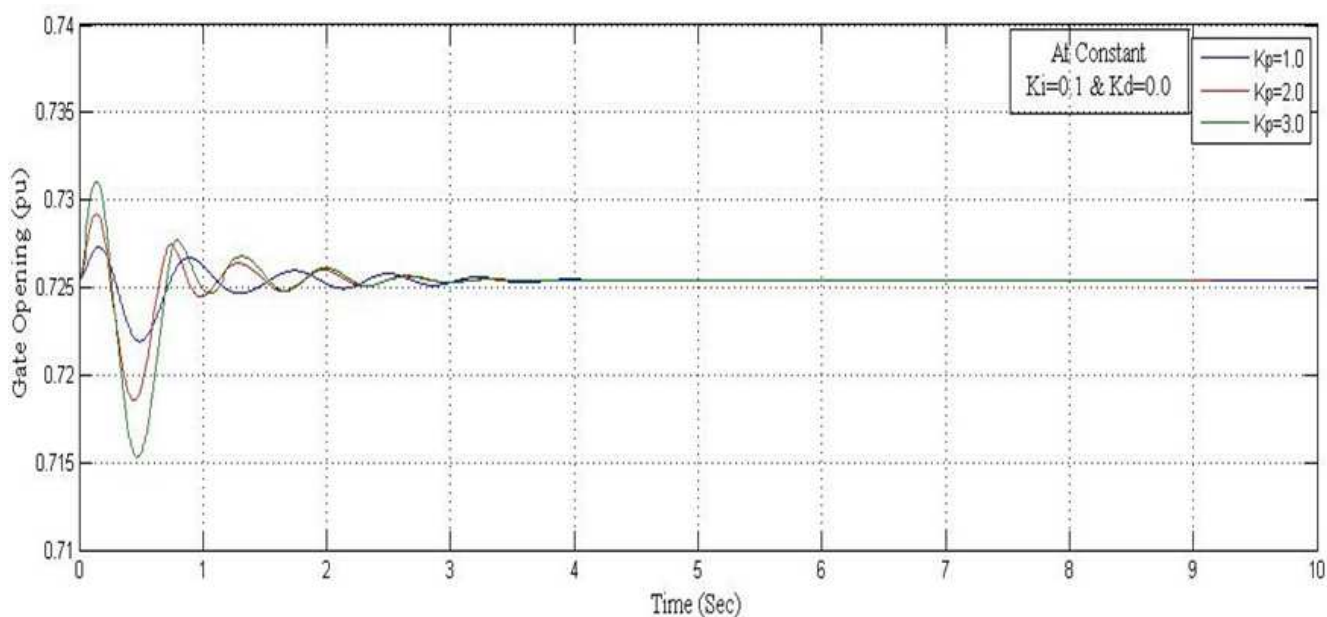


Рисунок 4.47 – Величина открытия затвора в зависимости от времени при постоянных K_i и K_d

Когда пропорциональное усиление (K_p) увеличивается, колебание электрической и механической мощности, частоты вращения ротора и величина открытия затвора уменьшается для постоянного интегрального коэффициента усиления ($K_i = 0,1$) и коэффициента усиления производной ($K_d = 0,0$). Таким образом, время установления электрической и механической мощности, частоты вращения ротора и величины открытия затвора также уменьшаются при увеличении K_p , поэтому система становится стабильной при увеличении K_p .

4.5.2 Анализ режима гидроэлектростанции при различной величине интегрального усиления (K_i)

Моделирование гидроэлектростанции проводится для различного значения интегрального усиления (K_i), сохраняя пропорциональное усиление ($K_p = 1.0$) и коэффициент усиления производной ($K_d = 0.0$). Все величины указаны в относительных единицах. Анализ переходных процессов электрической и механической мощности, частоты вращения ротора и величины открытия затвора выполняются для разных значений интегрального коэффициента усиления (K_i) 0,1, 0,2 и 0,3. На рис. 4.48 – 4.51 показаны временные характеристики электрической и механической мощности, частоты вращения ротора и величины открытия затвора соответственно.

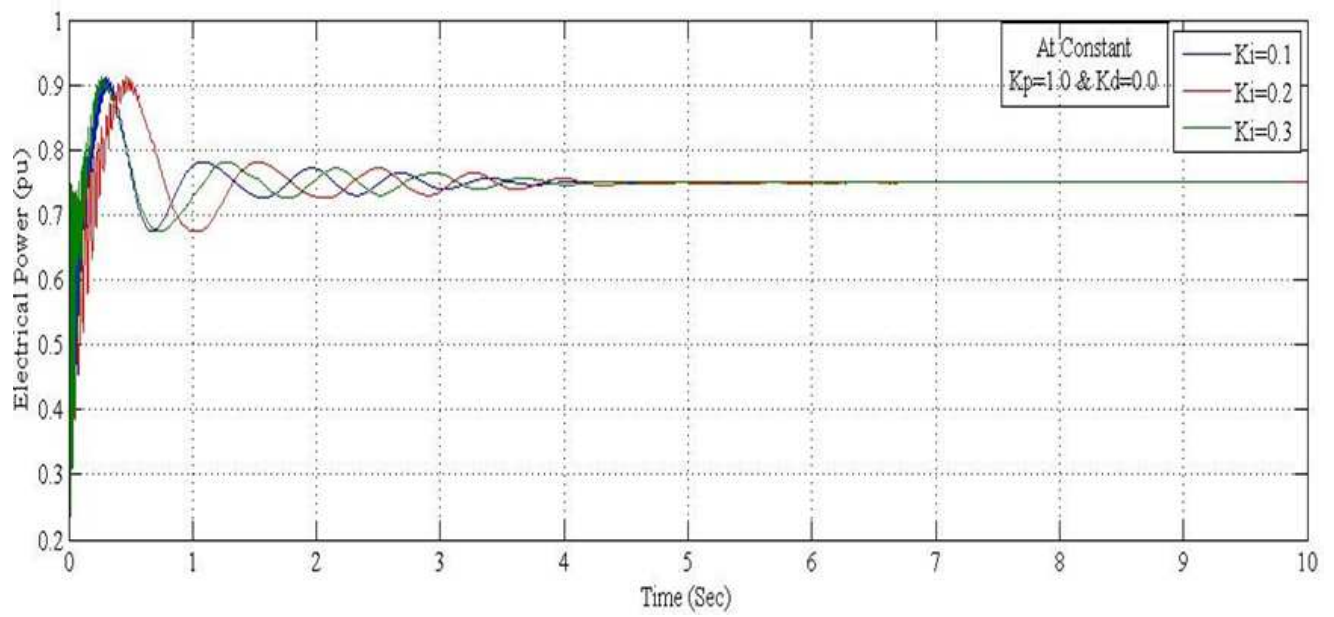


Рисунок 4.48 – Электрическая мощность в зависимости от времени при постоянных K_p и K_d

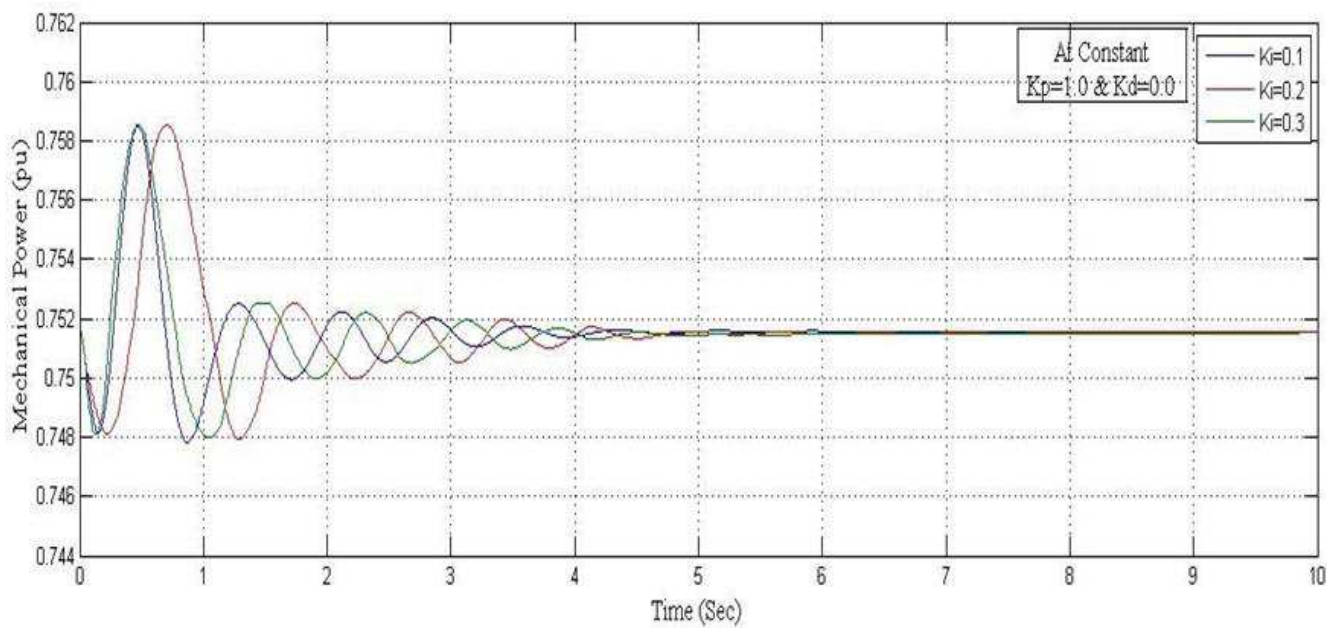


Рисунок 4.49 – Механическая мощность в зависимости от времени при постоянном K_p и K_d

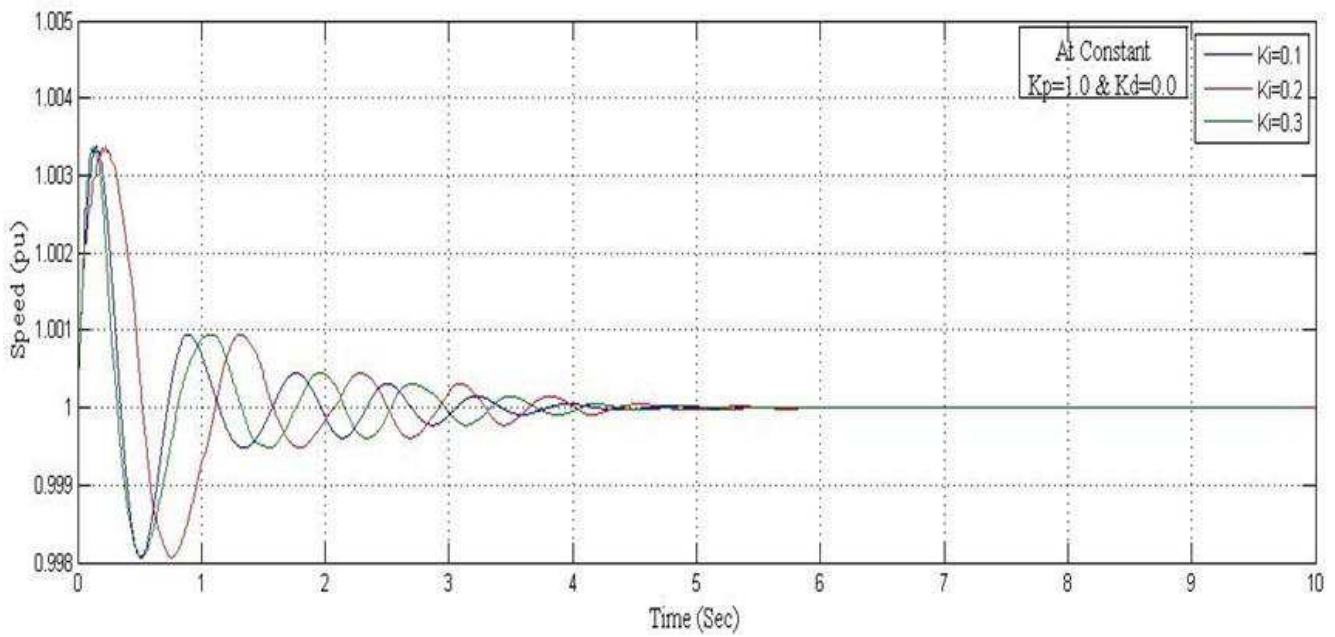


Рисунок 4.50 – Частота вращения ротора в зависимости от времени при постоянной K_p и K_d

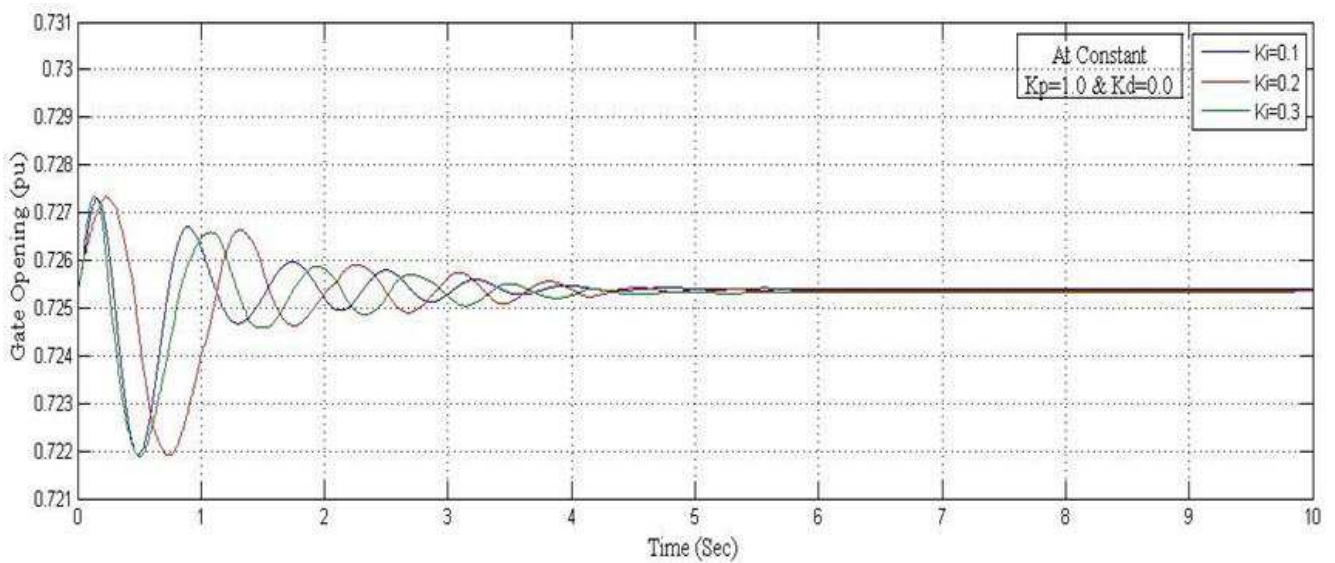


Рисунок 4.51 – Величина открытия затвора в зависимости от времени при постоянных K_p и K_d

Когда интегральный коэффициент усиления (K_i) увеличивается, колебание электрической и механической мощности, частоты вращения ротора и величины открытия затвора увеличивается для постоянного пропорционального усиления ($K_p = 1,0$) и коэффициента усиления производной ($K_d = 0,0$). Таким образом, увеличивается время установления электрической и механической мощности, частоты вращения ротора и величины открытия затвора. Поэтому система становится неустойчивой при увеличении интегрального коэффициента усиления.

4.5.3. Анализ режима гидроэлектростанции при различной величине производного коэффициента усиления (K_d)

Моделирование гидроэлектростанции проводится для различной величины коэффициента усиления производной (K_d), сохраняя пропорциональный коэффициент усиления ($K_p = 1,0$) и интегральный коэффициент усиления ($K_i = 0,1$). Все величины указаны в относительных единицах. Анализ переходных процессов электрической и механической мощности, частоты вращения ротора и величины открытия затвора выполняются для разных значений коэффициента усиления производных (K_d) 0,0, 1,0 и 2,0. На рис. 4.52 – 4.55 показаны временные характеристики электрической и механической мощности, частоты вращения ротора и величины открытия затвора соответственно.

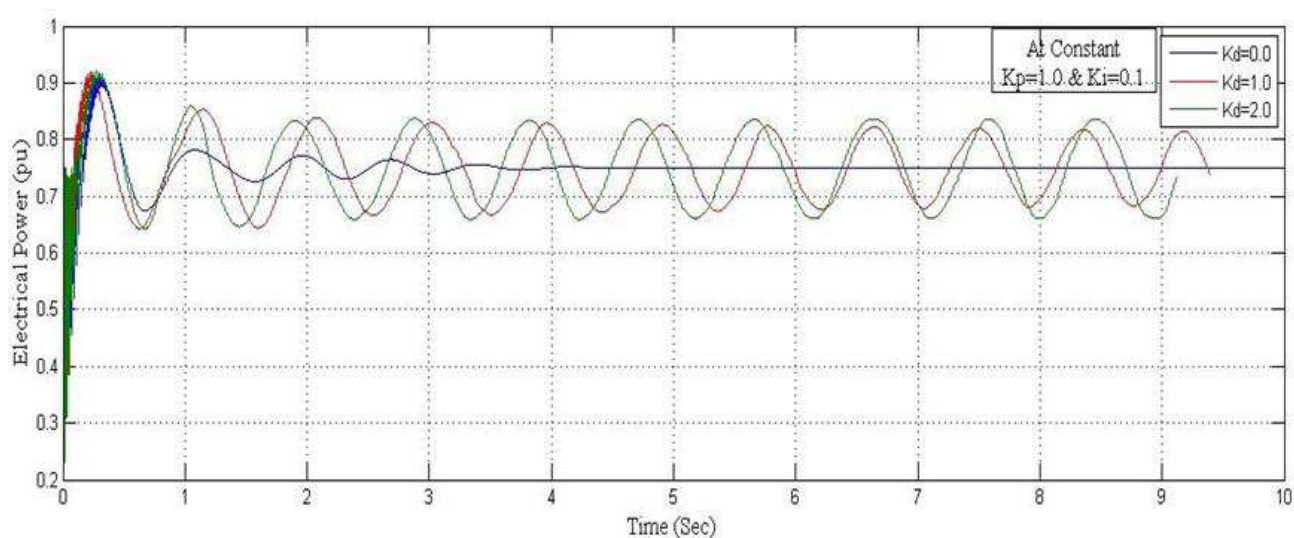


Рисунок 4.52 – Электрическая мощность в зависимости от времени при постоянном K_p и K_i

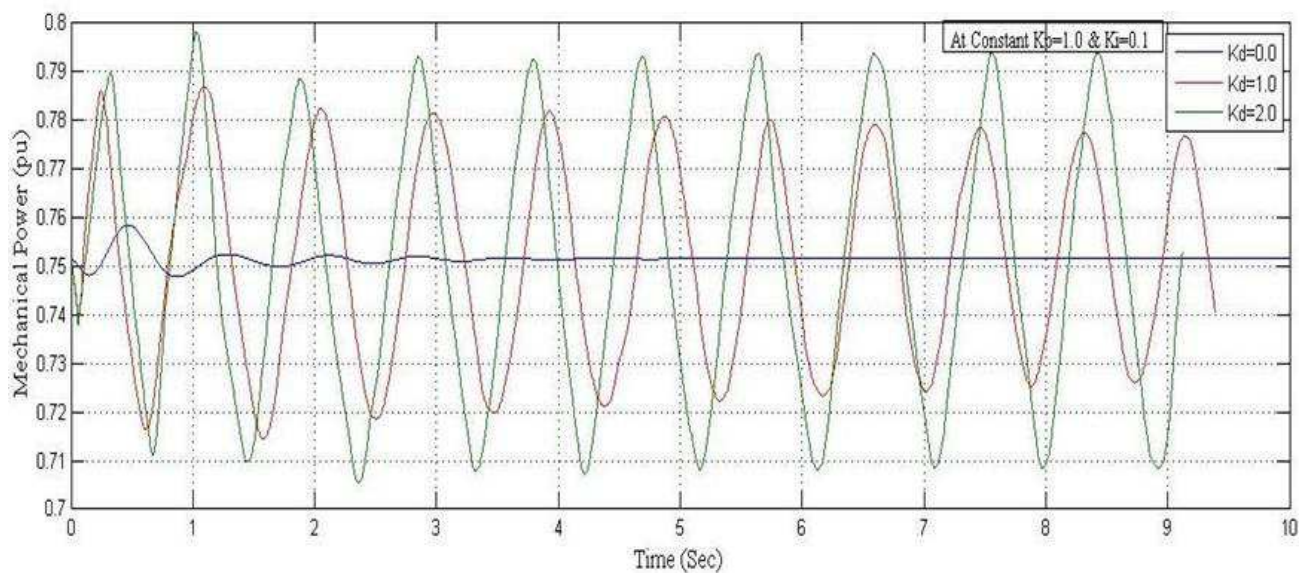


Рисунок 4.53 – Механическая мощность в зависимости от времени при постоянном K_p и K_i

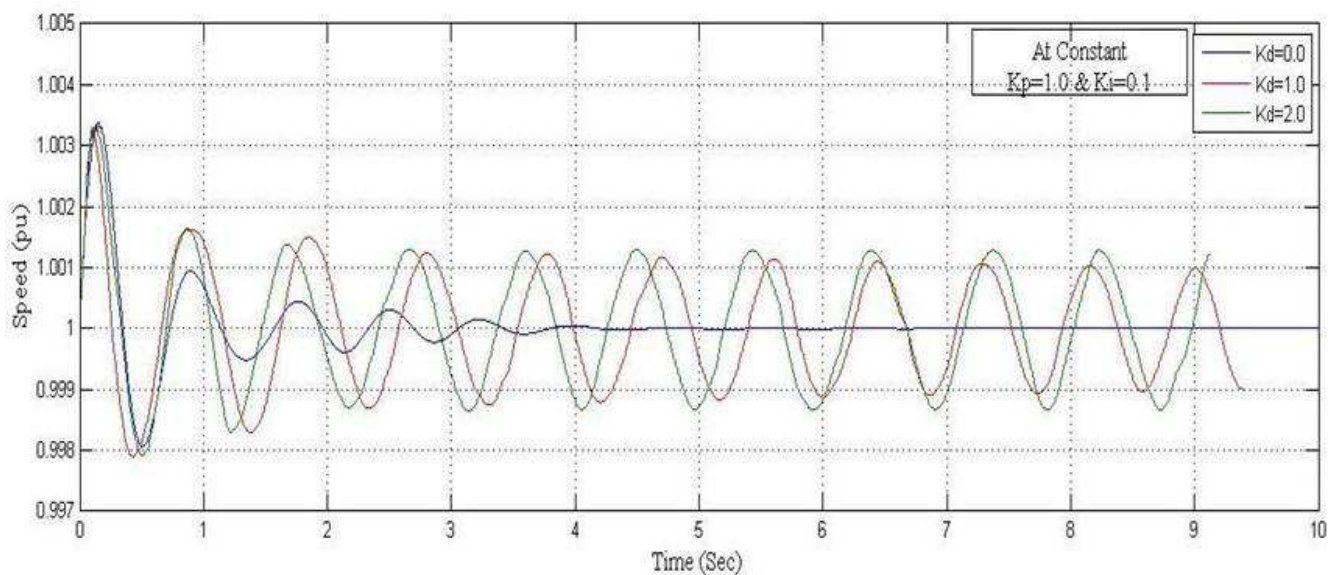


Рисунок 4.54 – Скорость вращения ротора в зависимости от времени при постоянном K_p и K_i

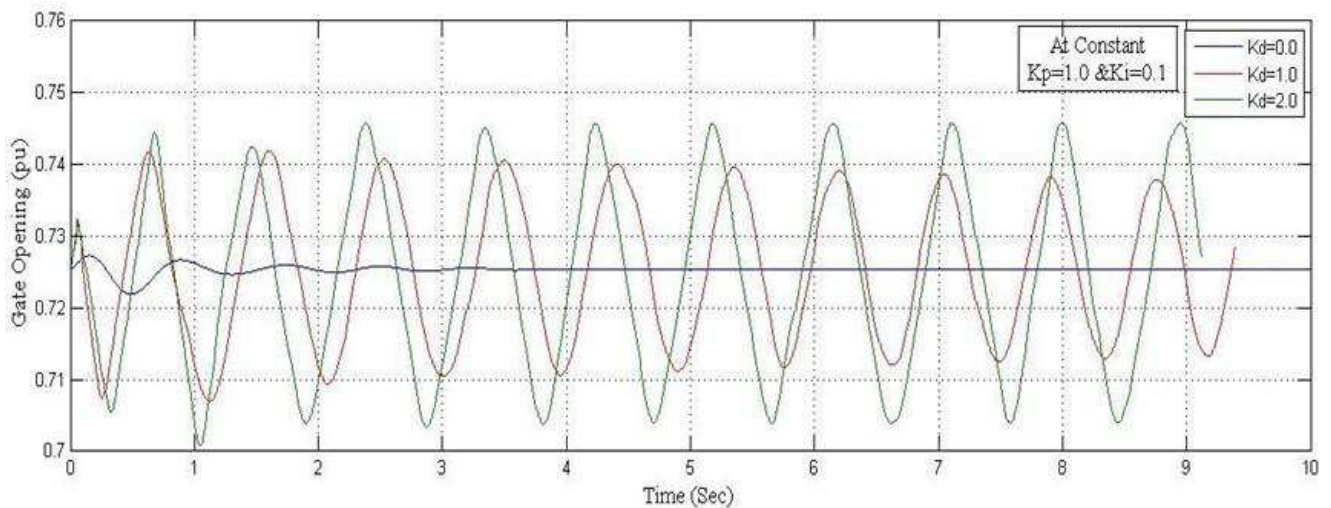


Рисунок 4.55 – Величина открытия затвора в зависимости от времени при постоянных K_p и K_i

При увеличении коэффициента усиления (K_d) происходит колебание электрической и механической мощности, частоты вращения ротора и величины открытия затвора для постоянного пропорционального усиления ($K_p = 1,0$) и интегрального коэффициента усиления ($K_i = 0,1$). Это может привести к неустойчивости генератора. Рекомендуется использовать низкое значение коэффициента усиления производной.

4.6 Модели RT-LAB для гидроэлектростанции

Модель гидроэлектростанции Matlab / Simulink реализована в среде RT-LAB для получения результатов моделирования в режиме реального времени. Для реализации моделирования в реальном времени в среде RT-LAB необходимы некоторые модификации модели Matlab / Simulink, как описано ниже.

4.6.1 Отдельная модель RT-LAB

Модель Matlab / Simulink требуется разделить на две подсистемы и преобразовать её для подходящей работы в режиме реального времени в среде RT-LAB, как показано на рисунке 4.56. RT-LAB может разделить сложную модель Matlab / Simulink на простые подсистемы и выполнить параллельную работу в многопроцессорном режиме.

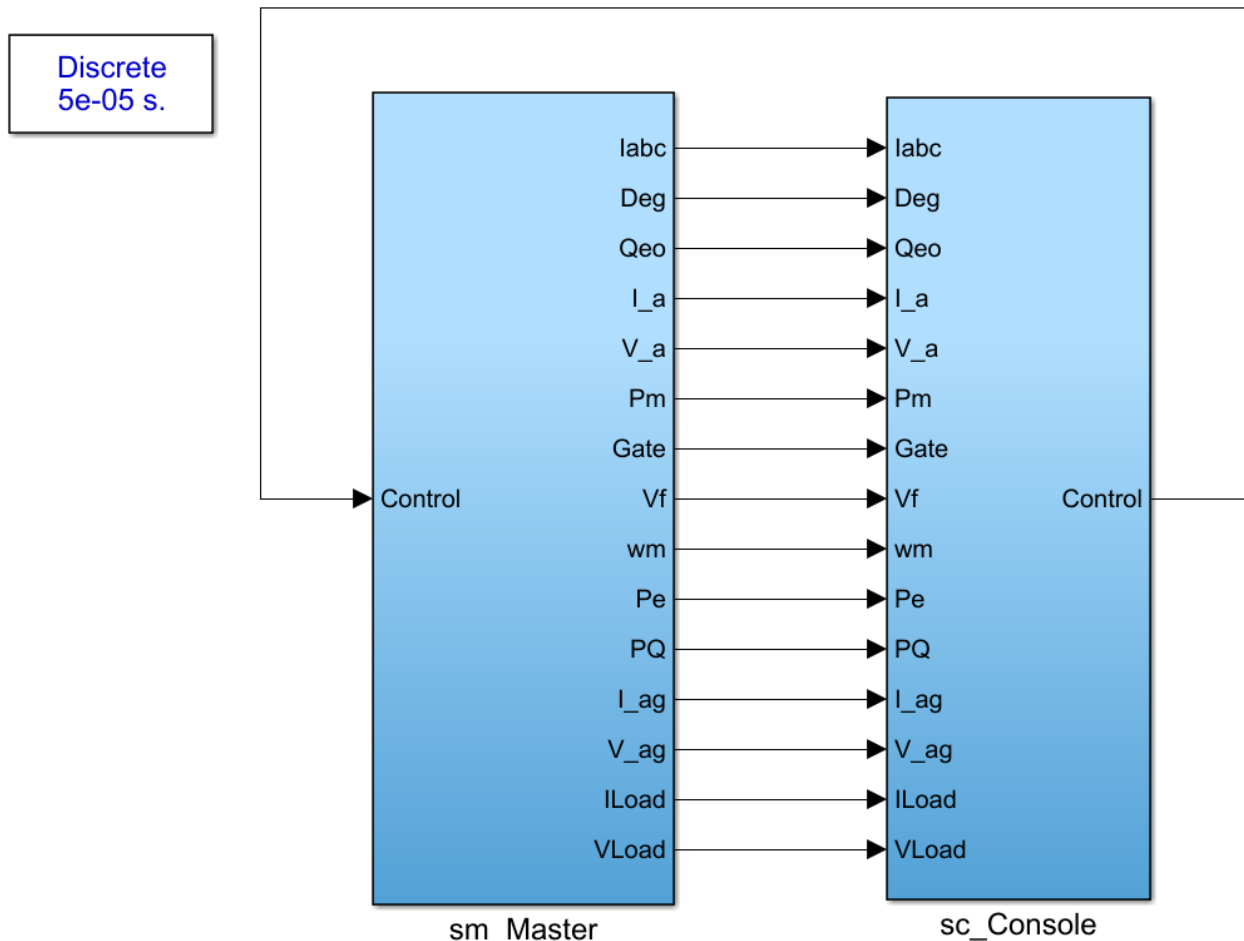


Рисунок 4.56 – Отдельная модель RT-LAB

4.6.2 Консольная подсистема

Консольная подсистема называется `sc_Console`, как показано на рисунке 4.57. Подсистема содержит блоки отображения и доступа. Консольная подсистема запускается на главном компьютере, который будет получать результаты моделирования, а затем показывать результаты оператору через осциллограф.

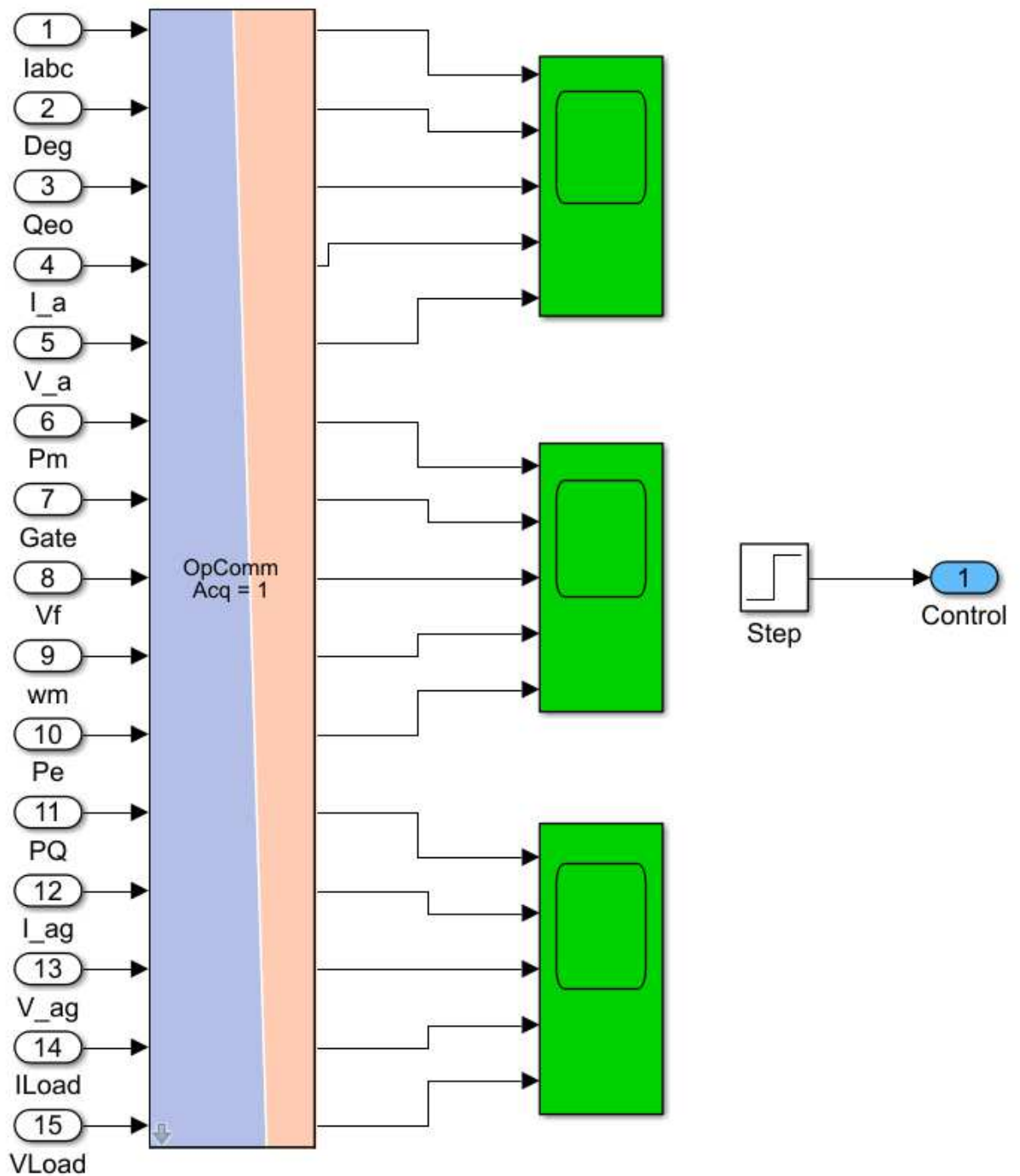


Рисунок 4.57 – Консольная подсистема

4.6.3 Основная подсистема

Основная подсистема, называемая *sm_Master*, представляет собой подсистему, которая показана на рисунке 4.58.

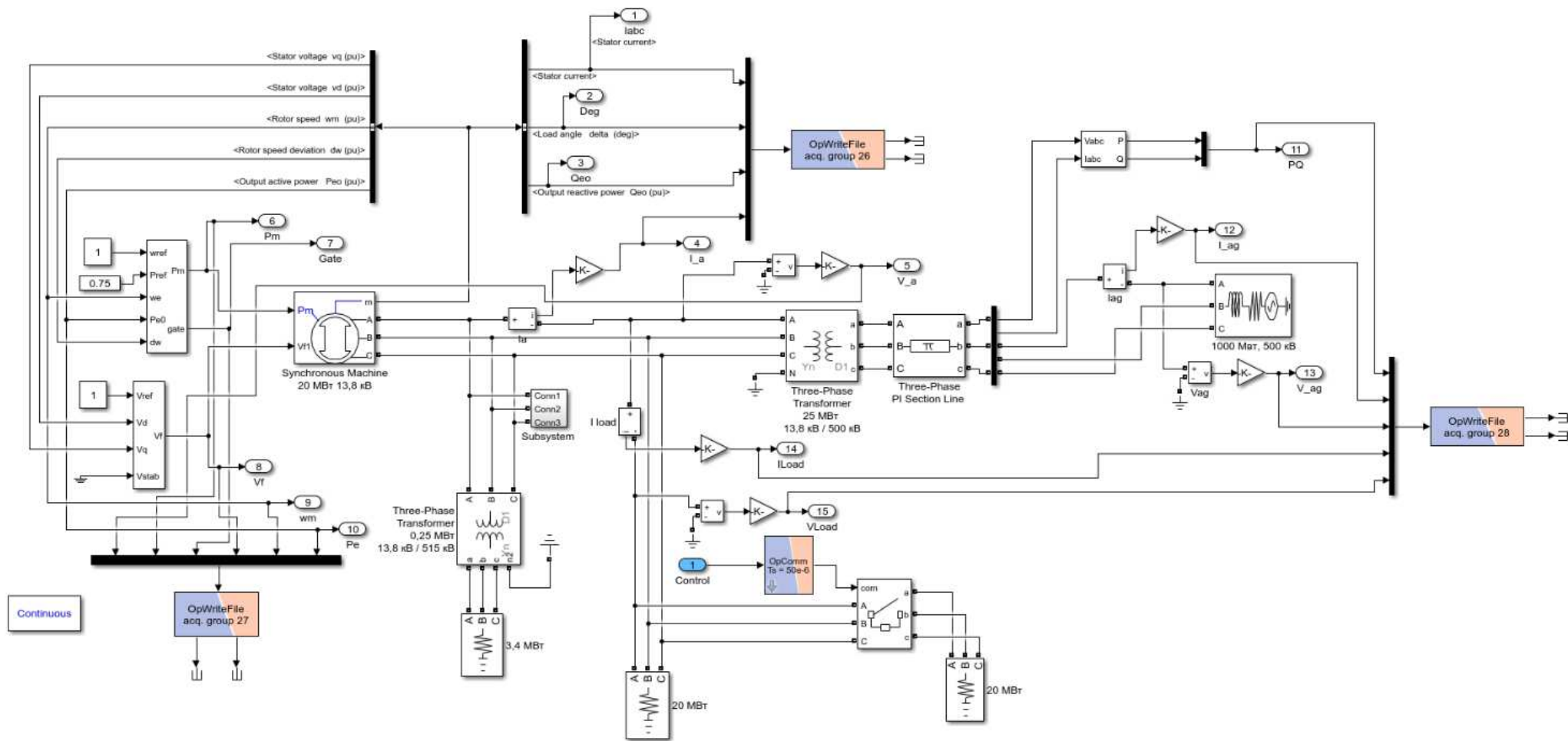


Рисунок 4.58 – Основная подсистема

4.7 Результаты моделирования в среде RT-LAB

Ниже обсуждаются и представляются результаты моделирования в реальном времени в среде RT-LAB для разных случаев.

4.7.1. Случай I: увеличение нагрузки

При сохранении тех же условий, что и в моделировании модели Matlab / Simulink, результаты моделирования в реальном времени получают для электрической мощности, частоты вращения ротора, напряжения возбуждения, угла нагрузки генератора, механической мощности и величины открытия затвора для случая увеличения нагрузки на гидроэлектростанции, как показано на рис. 4.59 – 4.64 соответственно.

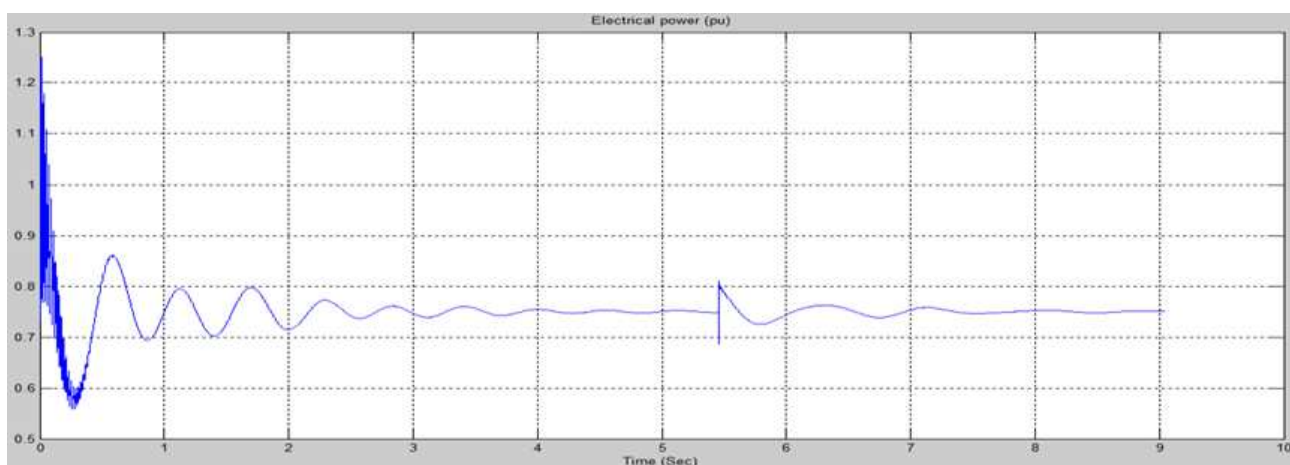


Рисунок 4.59 – Электрическая мощность

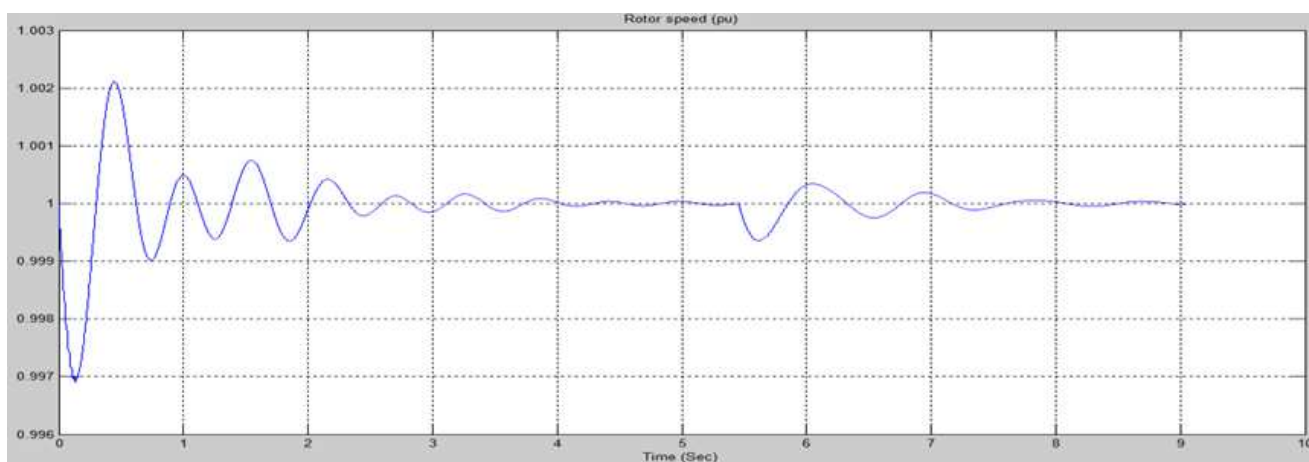


Рисунок 4.60 – Частота вращения ротора

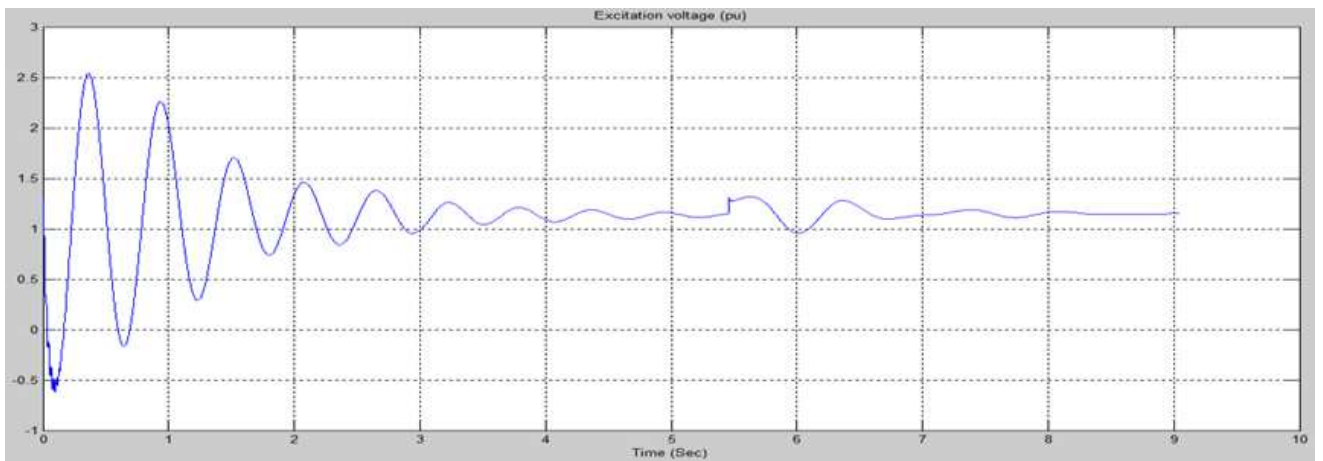


Рисунок 4.61 – Напряжение возбуждения

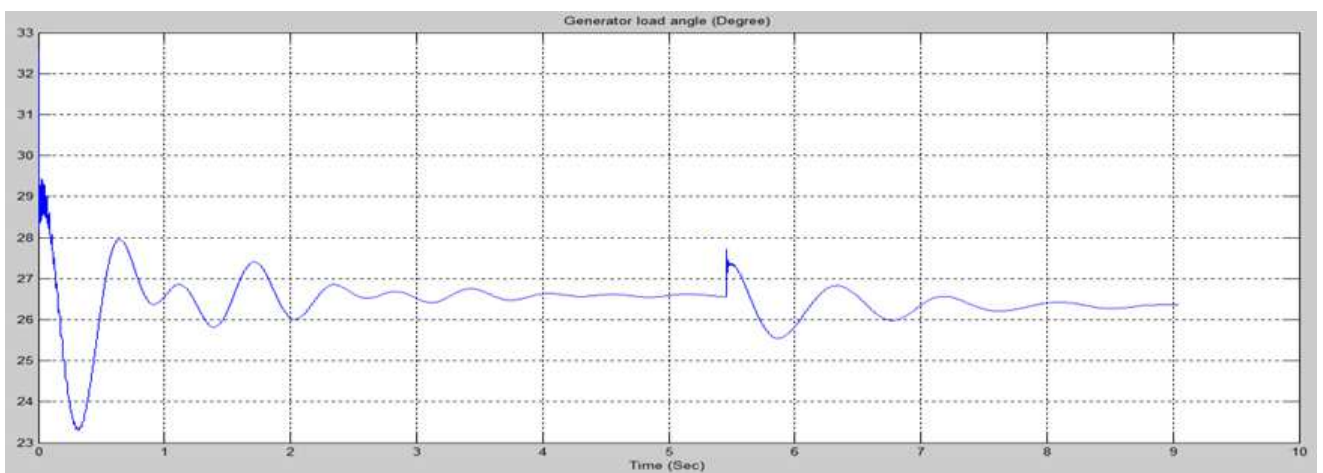


Рисунок 4.62 – Угол нагрузки генератора (градусы)

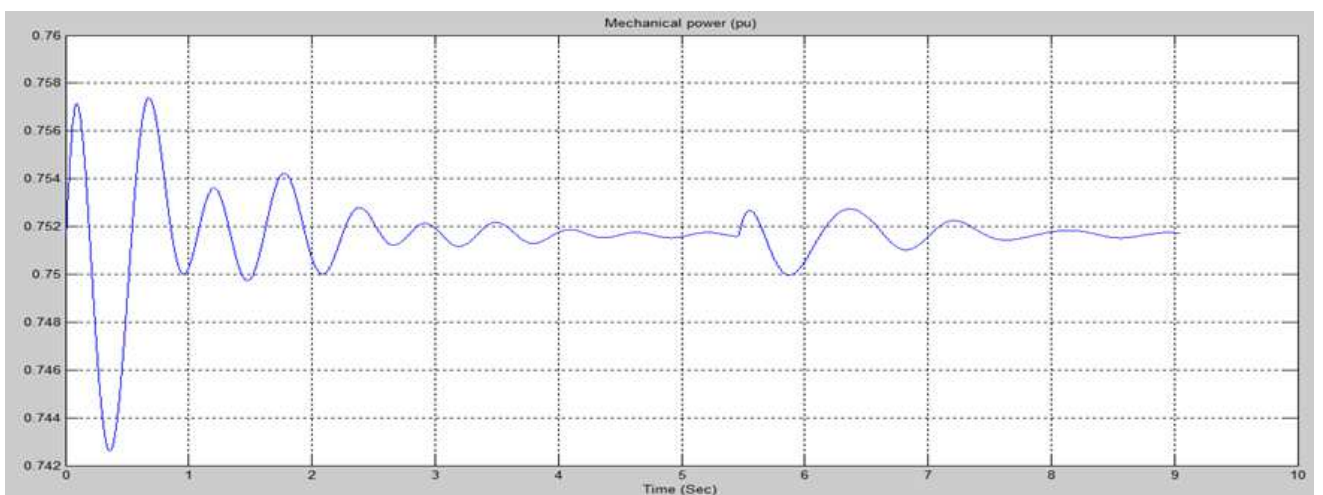


Рисунок 4.63 – Механическая мощность

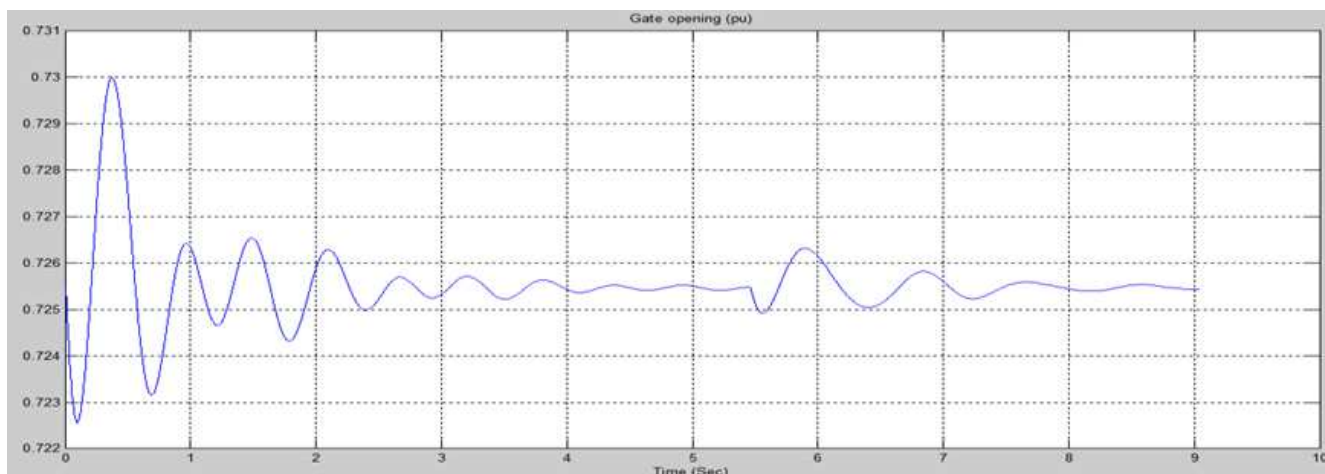


Рисунок 4.64 – Величина открытия затвора

Результаты моделирования в режиме реального времени, полученных при увеличении нагрузки для электрической мощности, частоты вращения ротора, напряжения возбуждения, механической мощности, угла нагрузки генератора и величины открытия затвора аналогичны результатам моделирования, полученным в среде Matlab / Simulink при увеличении нагрузки. Однако из результатов моделирования в реальном времени наблюдается, что увеличение нагрузки не происходит в момент установленного времени, но эффект увеличения нагрузки ощущается через несколько секунд с установленного времени.

4.7.2. Случай II: снижение нагрузки

При сохранении тех же условий, что и в моделировании модели Matlab / Simulink, результаты моделирования в реальном времени электрической мощности, частоты вращения ротора, напряжения возбуждения, угла нагрузки генератора, механической мощности и величины открытия затвора для снижения нагрузки на гидроэлектростанции, как показано на рисунках 4.65 – 4.70 соответственно.

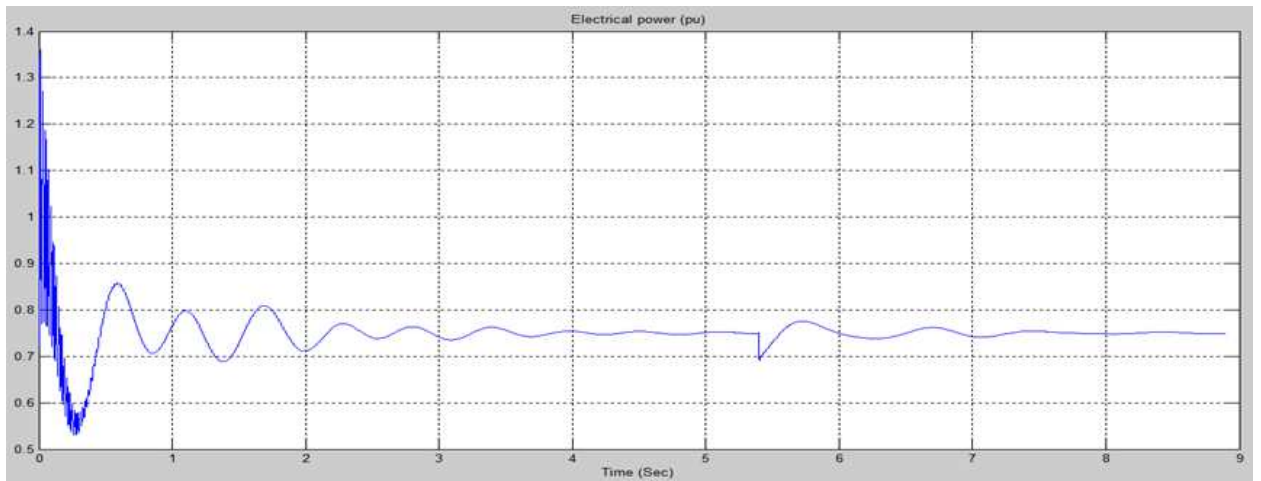


Рисунок 4.65 – Электрическая мощность

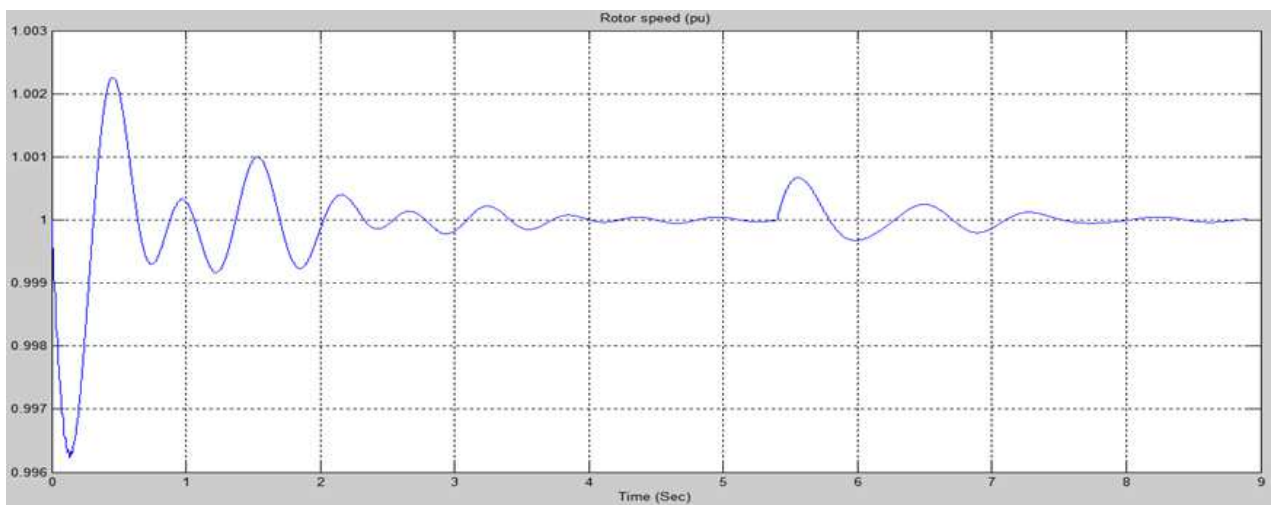


Рисунок 4.66 – Частота вращения ротора

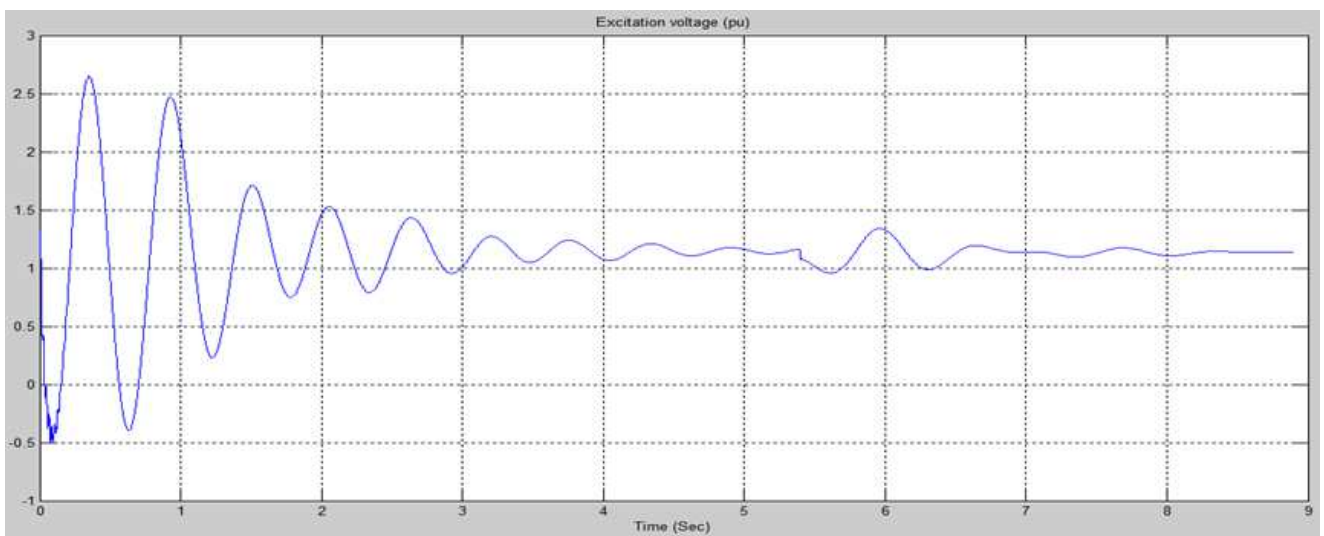


Рисунок 4.67 – Напряжение возбуждения

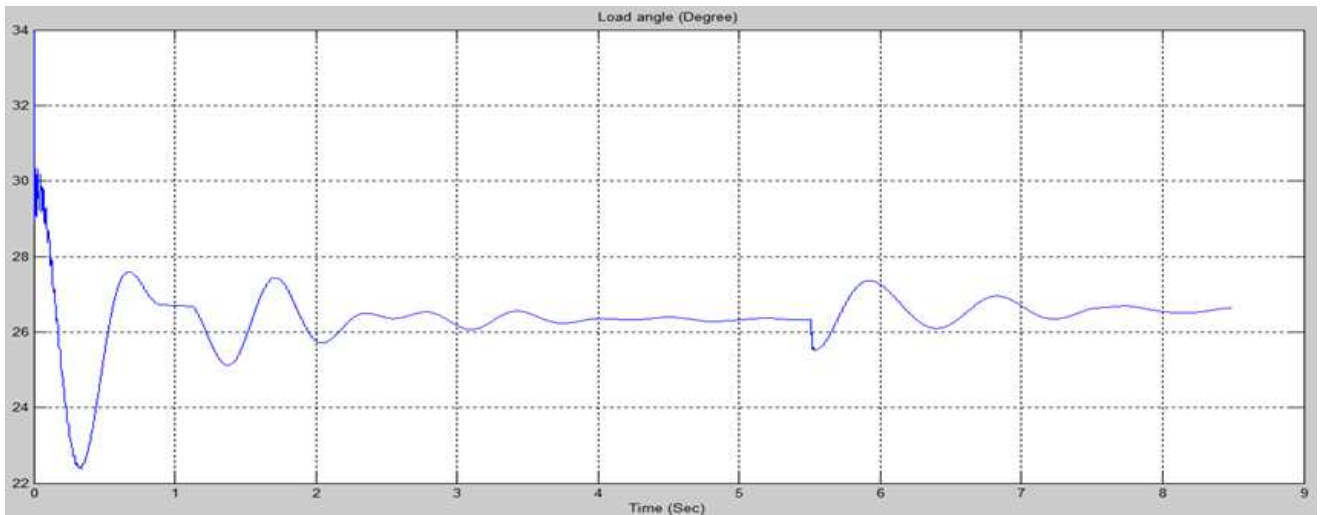


Рисунок 4.68 – Угол нагрузки генератора (градусы)

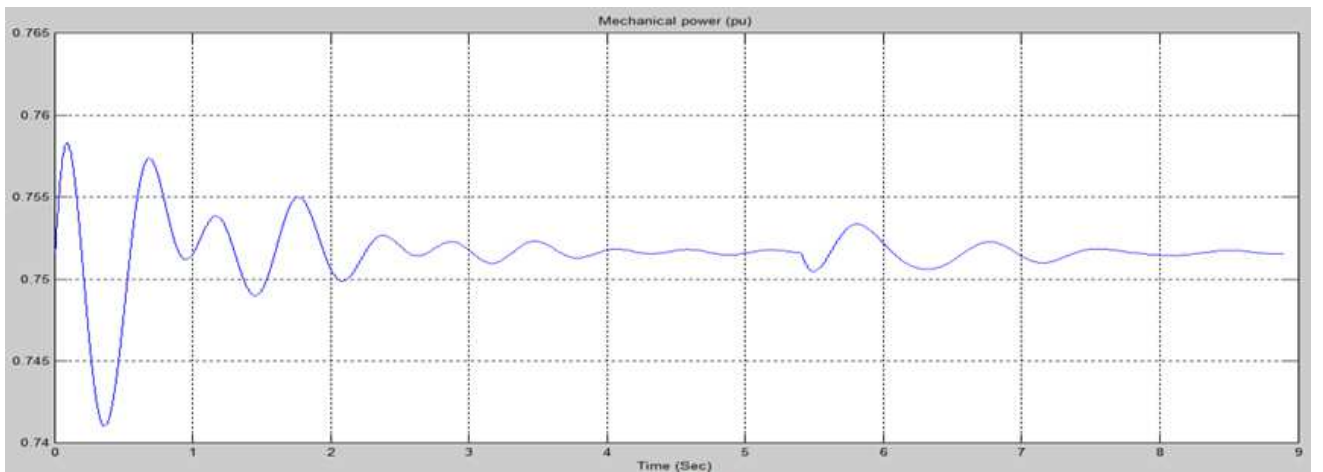


Рисунок 4.69 – Механическая мощность

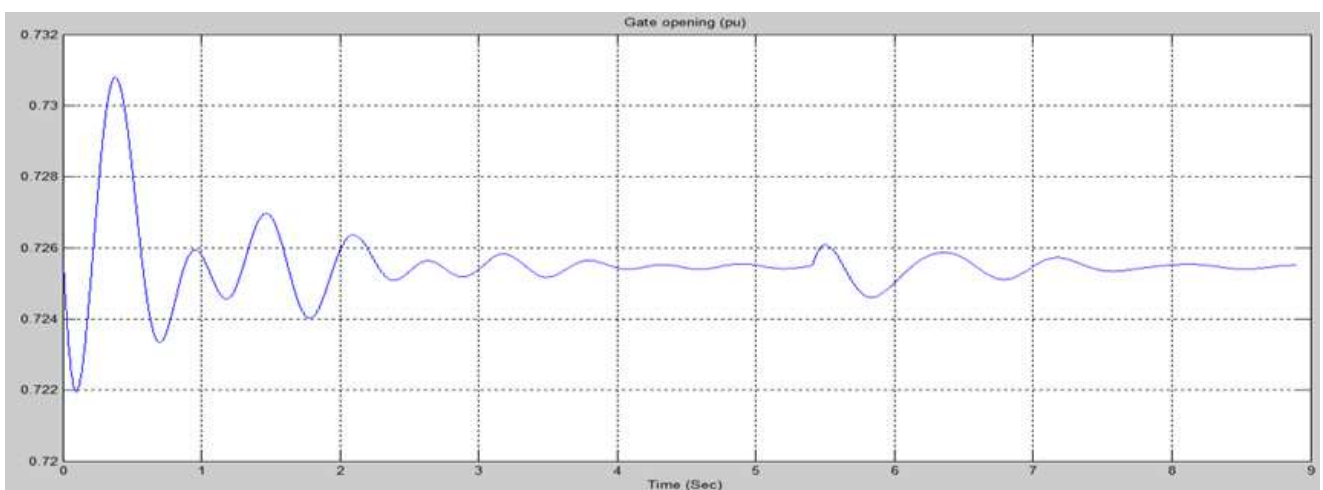


Рисунок 4.70 – Величина открытия затвора

Результаты моделирования в режиме реального времени, полученных при снижении нагрузки для электрической мощности, частоты вращения ротора,

напряжения возбуждения, механической мощности, угла нагрузки генератора и величины открытия затвора аналогичны результатам моделирования, полученным в среде Matlab / Simulink для снижения нагрузки. Однако из результатов моделирования в реальном времени наблюдается, что уменьшение нагрузки не происходит в момент установленного времени, но эффект уменьшения нагрузки ощущается через несколько секунд после установленного времени.

4.7.3 Случай III: короткое замыкание

При сохранении тех же условий, что и в моделировании модели Matlab / Simulink, результаты моделирования в реальном времени электрической мощности, частоты вращения ротора, напряжения возбуждения, угла нагрузки генератора, механической мощности и открытия затвора для трехфазных замыканий на землю на гидроэлектростанции, как показано на рисунках 4.71 – 4.76 соответственно.

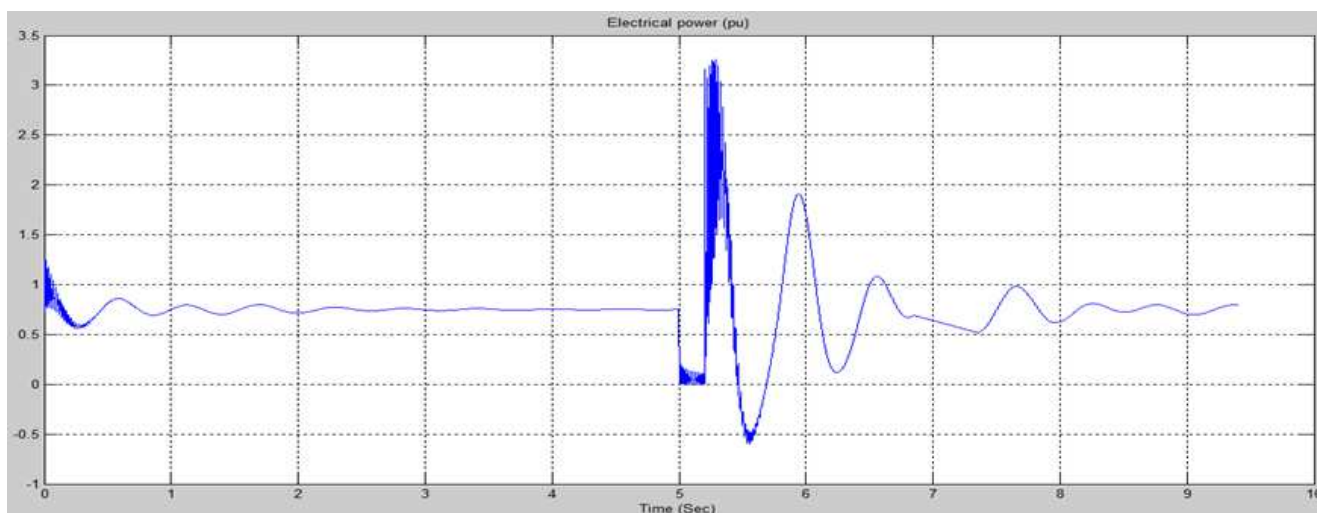


Рисунок 4.71 – Электрическая мощность

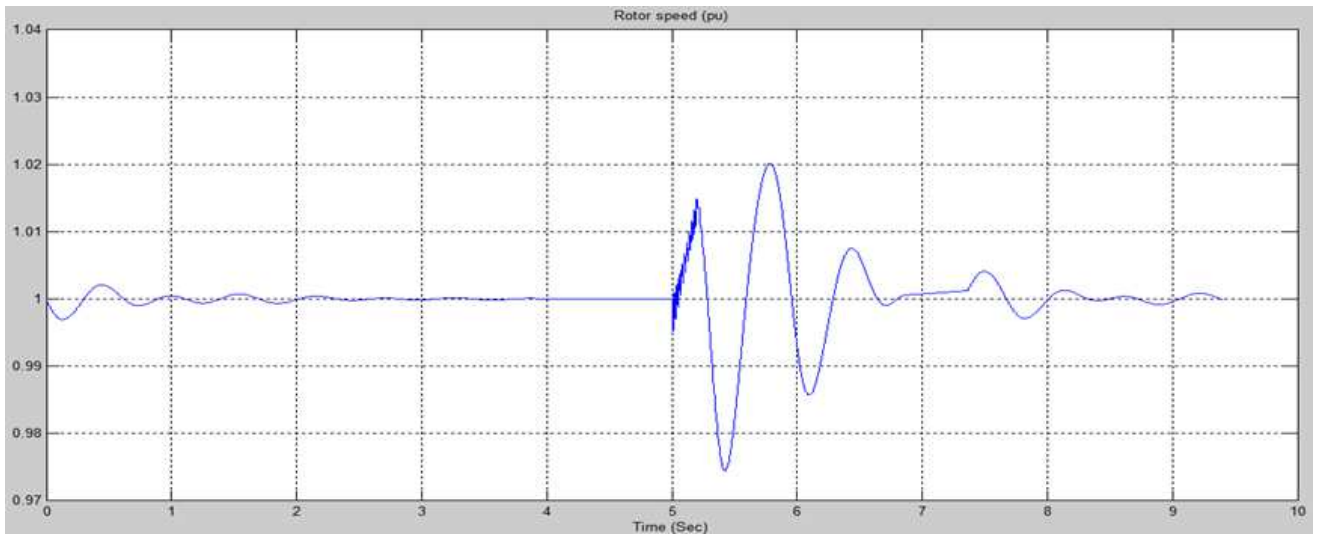


Рисунок 4.72 – Частота вращения ротора

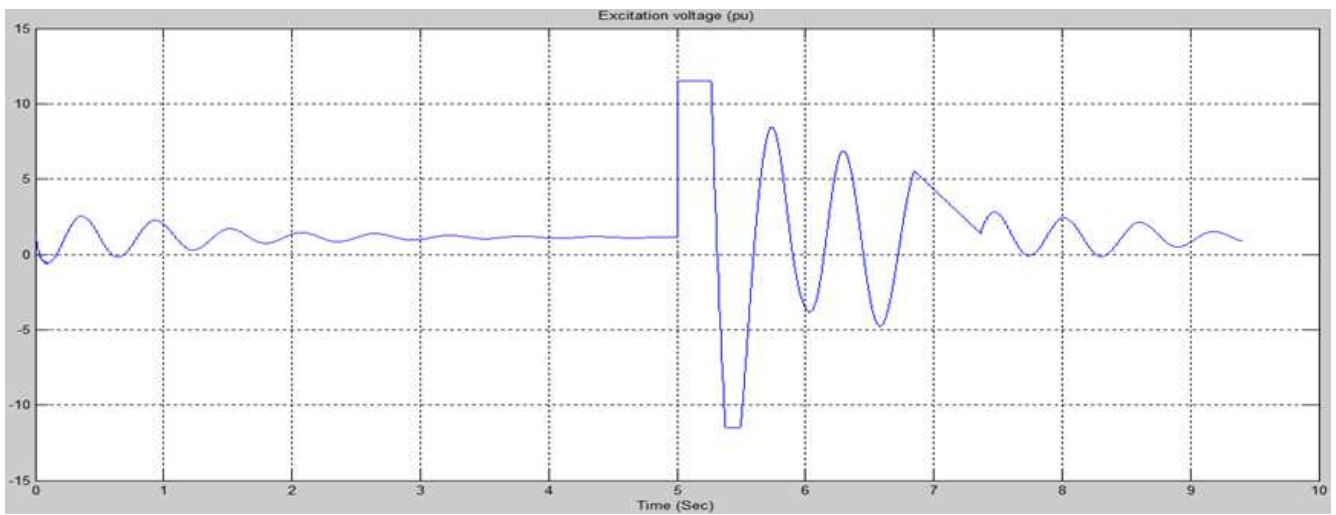


Рисунок 4.73 – Напряжение возбуждения

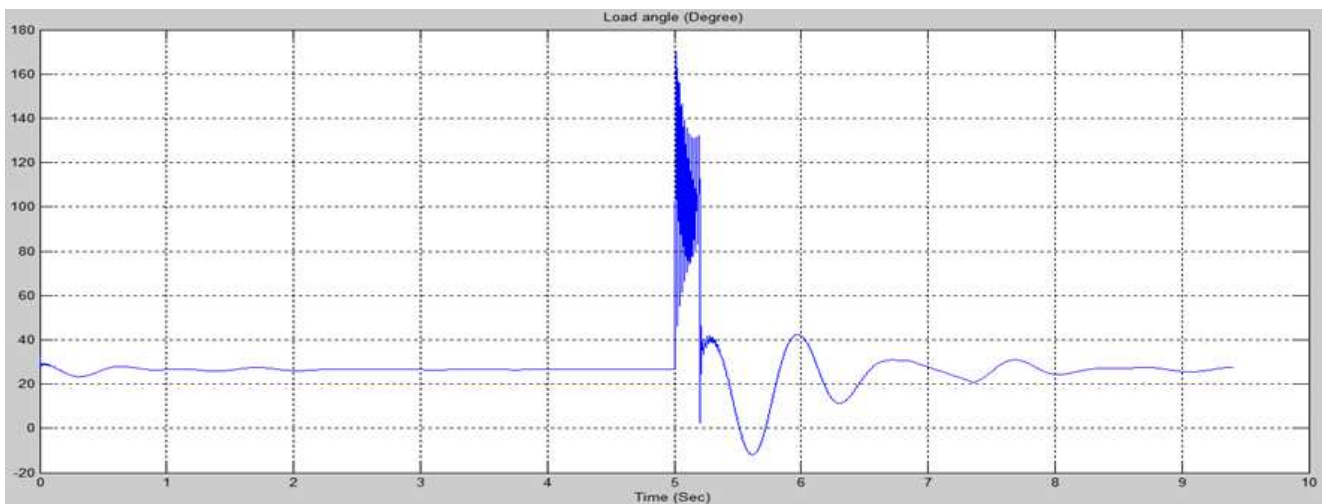


Рисунок 4.74 – Угол нагрузки генератора (градусы)

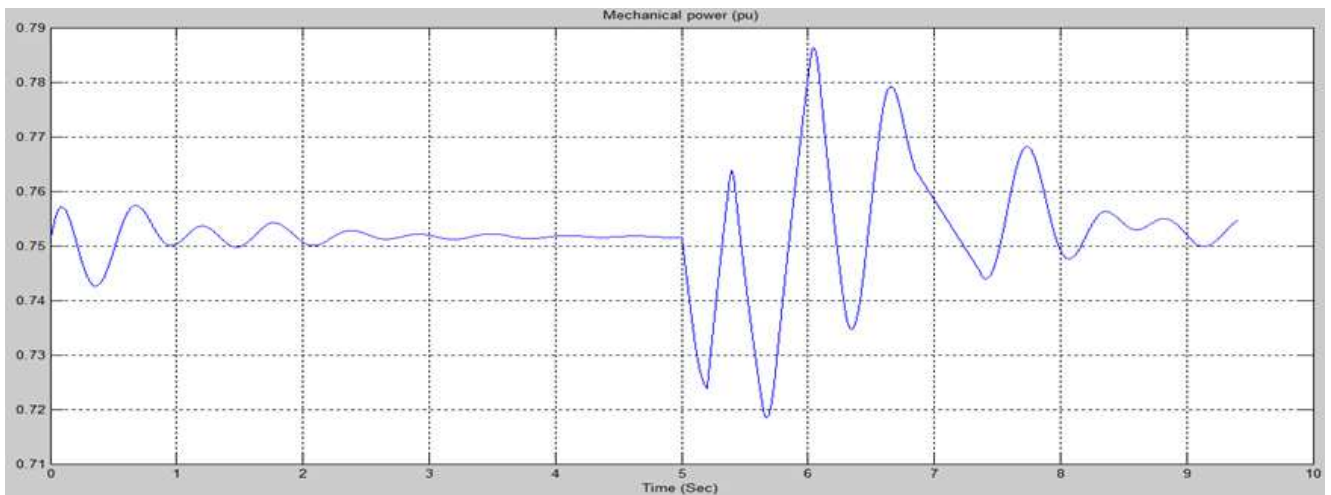


Рисунок 4.75 – Механическая мощность

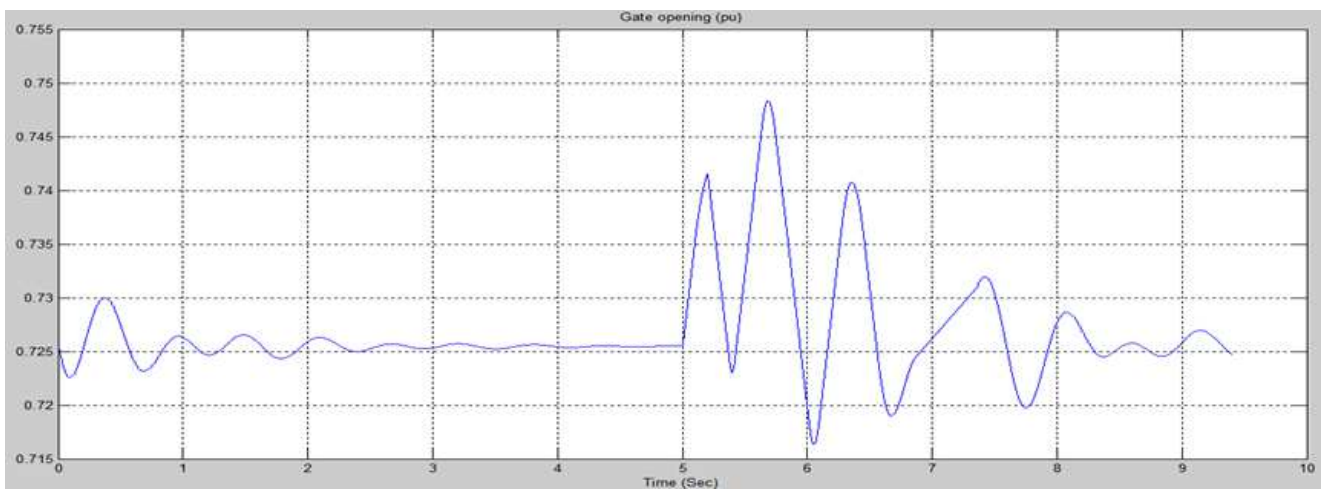


Рисунок 4.76 – Время открытия затвора

Результаты моделирования в режиме реального времени, полученных для трехфазных замыканий на землю на выводах генератора для электрической мощности, частоты вращения ротора, напряжения возбуждения, механической мощности, угла нагрузки генератора и величины открытия затвора совпадают с результатами моделирования в среде Matlab / Simulink.

Выводы к 4 главе:

В главе 4 представлены результаты моделирования режимов гидроэлектростанции в среде Matlab / Simulink и в среде OPAL RT-LAB при различных условиях эксплуатации.

Разница моделирования между двух сред Matlab / Simulink и OPAL RT-LAB заключается в том, что RT-LAB – это программное обеспечение для моделирования в реальном времени OPAL-RT, сочетающее в себе производительность и улучшенный пользовательский опыт. И RT-LAB

реализует модели Simulink с аппаратным обеспечением в режиме реального времени на персональном компьютере.

RT-LAB обрабатывает все, включая генерацию кода, с помощью простого в использовании интерфейса. Всего несколькими щелчками мыши модель Simulink становится интерактивным приложением для моделирования в реальном времени.

Система сбора данных RT-LAB действует как виртуальный осциллограф, позволяя пользователю визуализировать сигналы в режиме реального времени без сбоев и потери данных.

RT-LAB способен параллельно выполнять очень большие модели Simulink с любой возможностью ввода / вывода. Его главная уникальность заключается в том, что он легко распределяет нагрузку между несколькими процессорами, даже между несколькими симуляторами с линиями связи в реальном времени.

С возможностью записи тысяч точек измерения RT-LAB предоставляет пользователям полную историю данных.

RT-LAB обеспечивает качественный анализ и подтвержденные результаты. Он работает непрерывно, оптимизируя производительность команды инженеров. Тестовая среда RT-LAB позволяет пользователям создавать сложные последовательности выполнения, имитируя различные маневры и переходные условия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе проведено математическое моделирование различных элементов гидроэлектростанции. Элементы гидроэлектростанции объединены и смоделированы при различных условиях эксплуатации: изменение нагрузки, трехфазное замыкание на выводах генератора. Модель гидроэлектростанции Matlab / Simulink моделируется в реальном времени (RT-LAB) для тех же условий, которые выполняются в среде Matlab / Simulink после некоторой модификации модели Matlab / Simulink. С помощью разработанной модели Matlab / Simulink и модели RT-LAB работы гидроэлектростанции тестируются для следующих условий эксплуатации:

1. Увеличение нагрузки;
2. Уменьшение нагрузки;
3. Короткое замыкание.

Кроме того, был проведен гидравлический переходный анализ гидроэлектростанции при различных значениях ПИД-регулятора. Из полученных результатов при различном значении усиления регулятора ПИД-регулятора видно, что влияние на гидравлический переходный процесс является более значительным, когда коэффициент усиления производного регулятора ПИД-регулятора увеличивается по сравнению с увеличением пропорционального и интегрального коэффициента усиления. Следовательно, система становится крайне нестабильной, когда увеличивается производное усиление. Таким образом, для стабильной работы гидроэлектростанции рекомендуется меньшее значение коэффициента прироста производной.

Вклад в проведенное исследование заключается:

- Разработке нелинейной модели гидравлической турбины для динамических исследований гидроэлектростанций;
- Разработке модели для различных компонентов в программном обеспечении Matlab / Simulink;
- Разработке имитационной модели малой гидроэлектростанции в среде Matlab / Simulink и анализа её поведения в различных режимах работы

Предложения по дальнейшему развитию данной магистерской диссертации:

1. Имитационная модель может быть разработана с учетом влияния параметров водохранилища.
2. ПИД-регулятор рассматривается для разработанной имитационной модели. Имитационная модель может быть разработана с учетом искусственного интеллекта для систем управления.
3. Моделирование в реальном времени гидроэлектростанции в среде RT-LAB выполняется для синхронизации программного обеспечения. Симуляция может быть расширена до аппаратной синхронизации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Берг Л. Гидроэнергетика как фактор устойчивого развития. Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: шеста научно-техническая конференция, доклады и выступления. Санкт-Петербург. Изд-во «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева». 2012. С.130-167.
2. Никишин К.А., Толстихина Е.А., Сёма Е.Г., Толстихина Л.В. Использование гидроэнергетических ресурсов южных районов Сибири для строительства малых ГЭС//Электроэнергетика глазами молодёжи-2016: материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции, 19-23 сентября 2016 г., Казань. – Т.3.— Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 379 с.
3. Михайлов Л.П., Фельдман, Б.Н., Марканова, Т.К., и др. Малая гидроэнергетика. М.: Энергatomиздат. 1989.- 184 с.
4. Mahnitko A., Gerhards J., Linkevics O., Varfolomeyeva R., Umbrasko I. Small hydropower in Latvia and intellectualization of its operating system // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2013. 50, №6, с. 3-15. Англ.
5. Karady G. G., Holbert K. E. Electric Generating Stations, in Electrical Energy Conversion and Transport: An Interactive Computer-Based Approach, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. – 2013, 854 pages.
6. Naghizadeh R.A., Jazebi S., Vahidi B. Modelling Hydro Power Plants and Tuning Hydro Governors as an Educational Guideline // International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S), Vol. 5, No. 4, August 2012.
7. IEEE Committee Report. Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies // Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No. 6, pp. 1904-1915, Nov. Dec. 1973.
8. IEEE Working Group. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies // Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 167-179, February 1992.
9. Kishor N., Saini R. P., Singh S. P. A review on hydropower plant models and control // Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 11, no. 5, pp. 776–796, 2007.
10. Qijuan C, Zhihuai Xiao. Dynamic modeling of hydroturbine generating set // In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 8-11 Oct. 2000, p. 3427-3430.
11. Singh M., Chandra A. Modeling and Control of Isolated Micro-Hydro Power Plant with Battery Storage System // National Power Electronic Conference. – 2010, Roorkee, India. 9-12 June 2010.
12. Malik O.P., Hope G. S., Hancock G., Zhaohui L., Luqing Y. E., Shouping W. E. I. Frequency measurement for use with a microprocessor-based water turbine governor // IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 6, No. 3, pp. 361–366, September 1991.

13. Ramey, D. G., Skooglund, J. W. Detailed hydro governor representation for system stability studies // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, pp. 106–112, January 1970.
14. Bhaskar M. A. Non Linear Control of STATCOM // IEEE International Conference on Recent Trends in Information Telecommunication and Computing, pp. 190-195, 12-13 March 2010.
15. Luqing Y. E., Shouping W. E. I., Malik O. P., Hope G. S. Variable and time varying parameter control for hydroelectric generating unit // IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 4, No. 3, pp. 293–299, September 1989.
16. Marquez J. L., Molina M. G., Pacas J. M. Dynamic modelling, simulation and control design of an advanced micro-hydro power plant or distributed generation applications // Elsevier Trans. On Hydrogen Energy Policy, I-6, 2010.
17. Nassar I. A., Weber H. Dynamic Model of Unit 1 of Ataturk Hydro Power Plant in Turkey // 13th Middle East Power Systems Conference, MEPCON Assiut University, Egypt, December 20-23, 2009.
18. Singh G., Chauhan D. S. Simulation and Modeling of Hydro Power Plant to Study Time Response during Different Gate States // (IJAEST) INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGIES Vol. No. 10, Issue No. 1, 042 – 047, 2011.
19. Munoz-Hernandez G. A., Jones D. I. Modelling, Simulation and Control of a Hydroelectric Pumped Storage Power Station // Control 2004, University of Bath, UK, September 2004.
20. Li W., Vanfretti L., Farrokhabadi M. Modeling of Custom Hydro Turbine and Governor Models for Real-Time Simulation // Complex. Eng., pp. 1–6, Jan 2012.
21. Hongqing F., Dlakavu N., Chen L., Shen Z. Basic Modeling and Simulation Tool for Analysis of Hydraulic Transients in Hydroelectric Power Plants // IEEE Trans. Energy Convers., vol. 23, no. 3, pp. 834–841, September, 2008.
22. Wangdi Y., Richards D. Modelling and simulation of the Chukha hydro power plant, Bhutan and the nearby Indian power system // Power Symp. 1990., Proc. Twenty-Second Annu. North Am., pp. 398–404, October, 1990.
23. Hannett L. N., Lam B. P., Prabhakara F. S., Guofu Q., Mincheng D., Beilei B. Modeling of a pumped storage hydro plant for power system stability studies // POWERCON '98. 1998 Int. Conf. Power Syst. Technol. Proc. (Cat. No.98EX151), vol. 2, pp. 1300–1304, August, 1998.
24. Jaeger E. De, Janssens N., Malfliet B., Van De Meulebroeke F. Hydro turbine model for system dynamic studies // IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 4, pp. 1709–1715, November, 1994.
25. Kumar D. L. Simulation of Small Hydro Power Plants // M.Tech. Dissertaion, AHEC, Indian Institute of Technology, Roorkee, June, 2010.
26. Koli C. S. Development of Simulator for a SHP Plant // M.Tech. Dissertation, AHEC, Indian Institute Technology, Roorkee, June, 2009.
27. Jadid S., Salami A. Accurate model of hydroelectric power plant for load pickup during power system restoration // 2004 IEEE Reg. 10 Conf. TENCON 2004., vol. C, pp. 307–310, November, 2004.

28. Hannett L. N., Feltes J. W., Fardanesh B., Crean W. Modeling and control tuning of a Hydro Station with Units Sharing a Common Penstock Section // *Power Syst. IEEE Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1407–1414, November, 1999.
29. Vournas C. D. Second order hydraulic turbine models for multimachine stability studies // *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 5, no. 2, pp. 239–244, June, 1990.
30. Robert G., Michaud F. Hydro power plant modeling for generation control applications // *Am. Control Conf.*, pp. 2289–2294, June, 2012.
31. Souza Jr. O. H., Barbieri N., Santos A. H. M. Study of Hydraulic Transients in Hydropower Plants through Simulation of nonlinear model of Penstock and Hydraulic turbine Model // *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 4, pp. 1269–1272, November, 1999.
32. Lindenmeyer D., Moshref A., Schaeffer C., Bengé A. Simulation of the start-up of a hydro power plant for the emergency power supply of a nuclear power station // *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 163–169, February, 2001.
33. Vournas C. D., Papaioannou G. Modelling and Stability of a Hydro Plant with two Surge Tanks // *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 10, no. 2, pp. 368–375, June, 1995.
34. Choo Y. C., Muttaqi K. M., Negnevitsky M. Modelling of Hydraulic Turbine for Dynamic Studies and Performance Analysis // *Power Eng. Conf. 2007. AUPEC 2007. Australas. Univ.*, pp. 1–6, December, 2007.
35. Gao H., Wang C. Effect of detailed hydro turbine models on power system analysis // *2006 IEEE PES Power Syst. Conf. Expo. PSCE 2006 - Proc.*, no. 50277034, pp. 1577–1581, October/November, 2006.
36. Naik K. A., Srikanth P., Negi P. Imc Tuned Pid Governor Controller for Hydro Power Plant with Water Hammer Effect // *Procedia Technol.*, vol. 4, pp. 845–853, 2012.
37. Vinatoru M., Iancu E. The design of control systems for hydraulic turbines // *2006 IEEE Int. Conf. Autom. Qual. Testing, Robot. AQTR*, no. 13, pp. 32–36, May, 2006.
38. Ramey D. G., Skooglund J. W. Detailed Hydrogovernor Representation for System Stability Studies // *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 106–112, January, 1970.
39. Nicolet C., Allenbach P., Simond J., Avellan F. Modeling and Numerical Simulation of a Complete Hydroelectric Production Site // *PowerTech, 2007 IEEE Lausanne*, pp. 1044–1048, July, 2007.
40. Scherer L. G., de Camargo R. F. Control of micro hydro power stations using nonlinear model of hydraulic turbine applied on microgrid systems // *Power Electron. Conf. (COBEP), 2011 Brazilian*, pp. 812–818, September, 2011.
41. Konar G., Singh A. K., Chakraborty N. Modeling and Simulation of Standalone Micro Hydro - Diesel Hybrid Power Plant for Indian Hilly Region // *Sustain. Energy Intell. Syst. (SEISCON 2013), IET Chennai Fourth Int. Conf.*, pp. 159–166, December, 2013.

42. Hong-qing F., Zu-yi S. Modeling and Simulation of Hydraulic Transients for Hydropower Plants // 2005 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Exhib. Asia Pacific Dalian, China, pp. 1–4, 2005.
43. Cozorici F., Vadan I., Munteanu R., Cozorici I., P. Karaissas. Design and simulation of a small wind-hydro power plant // Clean Electr. Power (ICCEP), 2011 Int. Conf., pp. 308–311, 2011.
44. Chen G., Liu Y., Meng Z. Development of a Nonlinear Real-Time Simulation System for Hydroelectric Generating Unit // IEEE Power Energy Eng. Conf. (APPEEC), Asia-Pacific, pp. 1–4, March, 2010.
45. Kawkabani B., Nicolet C. and Schwery A. Modeling and control of large salient-pole synchronous hydro generators and stability issues in isolated production mode // Proc. - 2013 IEEE Work. Electr. Mach. Des. Control Diagnosis, WEMDCD 2013, pp. 148–157, March, 2013.
46. Kishor N., Saini R. P., Singh S. P. A review on hydropower plant models and control // Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 11, no. 5, pp. 776–796, 2007.
47. Rahi O. P., Kumar G. Simulation Studies for Refurbishment and Upgrading of Hydro Power Plants // PES Gen. Meet. / Conf. Expo. 2014 IEEE, pp. 1–5, July, 2014.
48. Arun. Simulation of Mini-Hydro Power Plant // M.Tech. Dissertation, АНЕС, Indian Institute of Technology, Roorkee, June, 2011.
49. Приоритетный комплексный проект «Развитие промышленного потенциала Республики Хакасии до 2030 года» [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://www.mid.ru/vnesneekonomiceskie-svazi-sub-ektov-rossijskoj-federacii/-/asset_publisher/ykggrK2nCl8c/content/id/2778029.
50. Волков Д. Р., Анакин С.Ю., Коньков С.А., Кулагин А.Г. Опыт разработки и внедрения систем автоматического управления и дистанционного контроля малых ГЭС // Гидротехника. 2016. №1. С. 10-11.
51. Фроленко Н.С., Сёма Е.Г., Тенешев А.В., Толстихина Е.А. Исследование возможности работы малой генерации в энергосистеме Республики Хакасия // Электроэнергетика глазами молодёжи-2017: материалы VIII Международной молодёжно научно-технической конференции, 2-6 октября 2017 г., Самара. – В 3 т. Т 3. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 342 с.
52. Искусственный интеллект для управления малыми ГЭС. Artificial intelligence/ Callavik M., Balgard I., Bothman B., Moden P. E., Strnneg., Wiktorsson L., Lidberg V. (ABBAB, Corporate Research, Vasteras 721 78 Sweden)/ Int. Water Power and Dam Constr/ 2004. 56, № 8. с. 20-22. Англ.
53. Фроленко Н.С. Искусственный интеллект в управлении малыми ГЭС // Гидроэлектростанции в XXI веке: Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов, 26-27 апреля 2018 г., г. Саяногорск, рп. Черемушки: ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (СФУ) Саяно-Шушенский филиал СФУ, 2018. – 484 с.
54. Фроленко Н.С. Управление режимом малой генерации с применением искусственного интеллекта // Диспетчеризация и управление в

электроэнергетике: матер. XIII Всерос. открытой молод. науч.-практ. конф., 2–4 октября 2018 г., Казань. – Казань: Казан гос. энерг. ун-т, 2018. – 238 с.

55. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.

56. Дале В. А., Кришан З. П., Паэгле О. Г. Динамические методы анализа развития сетей энергосистем. — Рига: Зинатне, 1979.

57. Modelling and Simulation [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.ddegjust.ac.in/studymaterial/mca-5/mca-504.pdf>.

58. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis // MC. Graw Hill, 2008.

59. Nicolet C., Avellan P. F., Allenbach P., Sapin A., Simond J.-J. New Tool for the Simulation of Transient Phenomena in Francis Turbine Power Plants // Proc. Hydraul. Mach. Syst. 21st IAHR Symp., vol. 1, no. September 2015, pp. 1–8, 2002.

60. Kunder P. Power System Stability and Control // New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, New York, 1994.

61. Anil Naik K., Srikanth P., Chandel A. K. A novel governor control for stability enhancement of hydro power plant with water hammer effect // Int. Conf. Emerg. Trends Electr. Comput. Technol., pp. 40–45, March, 2011.

62. IEEE Working Group Report. Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies // IEEE Trans Power Syst, Vol. 7, No. 1, pp. 167–179, February 1992.

63. Model the dynamics of three-phase round-rotor or salient-pole synchronous machine - Simulink - MathWorks India. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://in.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/synchronousmachine.html;jsessionid=68c293295733897701bf1d106348>.

64. Kim C., Rhew H., Kim Y. H. Stability Performance Of New Static Excitation System With Boost-Buck Converter // Ind. Electron. Soc. 1998. IECON '98. Proc. 24th Annu. Conf. IEEE, vol. 1, pp. 402–409, September, 1998.

65. Mehta V. K. Principles of Power System // S. Chand & Company Ltd, 2003.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Номенклатура

Общие:		
P	Генерируемая мощность	кВт
Q	Расход	м ³ /с
H	Высота	м
g	Ускорение свободного падения	м ² /с
η	Коэффициент полезного действия	-
RT-LAB	Симуляция в режиме реального времени	-
Для гидравлической системы и гидравлической турбины:		
Q _{in}	Приток в резервуар	м ³ /с
Q _{out}	Отток из резервуара	м ³ /с
S(t)	Объем воды в резервуаре	м ³
Δt	Продолжительность времени заполнения резервуара	с
G	Величина идеального открытия затвора	м
H	Гидравлическая высота	м
H ₀	Начальное установившееся значение высоты	м
L	Длина водяного столба	м
T _w	Постоянная времени модели гидравлической части турбины	с
P _{NL}	Мощность без нагрузки	кВт
U _{NL}	Скорость воды без нагрузки	м/с
U	Скорость воды	м/с
VA _{base}	Вольт-амперная номинальность генератора	ВА
ω ₀	Номинальная угловая скорость	рад/с
ω	Угловая скорость	рад/с
\bar{P}_r	Нормированная номинальная мощность турбины	-
K _U	Коэффициент пропорциональности	-
K _P	Коэффициент пропорциональности	-
P _m	Мощность турбины на выходе	кВт
T _m	Механический момент	Н·м
\bar{G}	Величина идеального открытия затвора	м
\bar{g}	Величина реального открытия затвора	м

Продолжение приложения А

A_t	Турбинное усиление	-
\bar{g}_{FL}	Величина открытия затвора с нагрузкой	м
\bar{g}_{NL}	Величина открытия затвора без нагрузки	м

Для модели регулятора:

R_p	Постоянная спада	на единицу
K_d	Дифференциальный коэффициент усиления	-
K_p	Пропорциональное коэффициент усиления	-
K_i	Интегральный коэффициент усиления	-
s	Оператор Лапласа	-

Для синхронного генератора:

V	Напряжение	В
i	Ток	А
φ	Потокоцепление	Вб
ω_R	Номинальная угловая частота	рад/с
R	Сопротивление	Ом
L	Индуктивность	Гн
$\frac{d}{dt}$	Производная	-

Нижние индексы:

d, q	Проекция переменных на оси d и q
R, s	Параметры ротора и статора
l, m	Индуктивности рассеяния и цепи намагничивания
f, k	Переменные цепи возбуждения и демпферной обмотки

Для системы возбуждения:

V_{ref}	Напряжение на клеммах статора	В
V_{ter}	Напряжение на клеммах статора	В
T_t	Постоянная времени напряжения	с
T_c и T_b	Постоянные времени стабилизатора	с
K_a	Коэффициент усиления регулятора	-
T_a	Постоянная времени регулятора	с
K_e	Коэффициент усиления модели возбудителя	-

Окончание приложения А

T_e	Постоянная времени модели возбудителя	с
А и В	Константы насыщения	-
K_f	Коэффициент усиления реального дифференцирующего звена	-
T_f	Постоянная времени реального дифференцирующего звена	с
V_{max}	Максимальная выходная мощность усилителя	В
V_{min}	Минимальная выходная мощность усилителя	В
E_{fd}	Выходное напряжение возбудителя	В
Для линии электропередачи:		
V_s	Подача конечного напряжения на фазу	В
I_s	Подача конечного тока	А
V_r	Получение конечного напряжения на фазу	В
I_r	Получение конечного тока	А
Z	Сопротивление линии	Ом
Y	Проводимость линии	См

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

Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических
систем и электрических сетей»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



подпись, дата инициалы, фамилия

« 13 » июня 2019 г.


МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МАЛЫМИ ГЭС
ЮЖНЫХ РЕГИОНОВ СИБИРИ**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный
руководитель


10.06.19
подпись, дата

доцент,
канд. тех. наук.
должность

Л.В. Толстихина
инициалы, фамилия

Выпускник


10.06.19
подпись, дата

Н.С. Фроленко
инициалы, фамилия


Рецензент


11.06.19
подпись, дата

начальник
оперативно-
диспетчерской
службы Филиала
ПАО «РусГидро» —
«Саяно-Шушенская
ГЭС имени П.С.
Непорожного»
должность

И.Ю. Погоняйченко
инициалы, фамилия

Нормоконтролёр


11.06.19
подпись, дата

А.А. Чабанова
инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2019