

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН  
ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. АКАДЕМИКА М.С.ОСИМИ**

УДК: 621.311; 621.316.9

*На правах рукописи*



**ИБРАГИМОВ БАХТИЁР ФАТХУЛЛОЕВИЧ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ  
АВАРИЙНОГО ДЕФИЦИТА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
(НА ПРИМЕРЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТАДЖИКИСТАНА)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени доктора философии  
(PhD)- доктора по специальности 6D071800 – Электроэнергетика  
(6D071804 – Энергетические системы и комплексы)

Душанбе – 2023

Работа выполнена на кафедре «Релейная защита и автоматизация энергосистем» ТТУ имени академика М.С. Осими.

**Научный руководитель:** **Мирзозода Борбад Мирзо**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Релейная защита и автоматизация энергосистем»  
ТТУ имени академика М.С. Осими

**Официальные оппоненты:** **Красильникова Татьяна Германовна**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Автоматизированных электроэнергетических  
систем» Новосибирского государственного  
технического университета

**Рахматулов Ашурали Зокирович**  
кандидат технических наук, начальник отдела  
«распределения и потерь электроэнергии»  
филиала ОАО «Распределительные  
электрические сети», г. Бохтар

**Ведущая организация:** Институт энергетики Таджикистана  
р. Кушониён

Защита диссертации состоится «01» марта 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 6D.КОА-049 по защите докторских и кандидатских диссертаций на базе Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими по адресу: 734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект академика Раджабовых, 10а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и на сайте организации <http://web.ttu.tj>

Автореферат разослан «26» января 2024 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Султонзода Ш.М.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время практически во всех научных исследованиях используется метод решения задач цифровым моделированием, который представляет собой способ изучения реальных процессов, устройств, систем, событий, основанный на рассмотрении их математических описаний - моделей с помощью вычислительных комплексов.

Очень важным в области современной электроэнергетики является моделирование и анализ динамических процессов, связанных с аварийным дефицитом активной мощности, требующих обработки больших объемов, данных с целью достижения высокой технической эффективности, а также с последующим отображением результатов пользователю. Вычислительные комплексы в основном разрабатываются по общим принципам и содержат общепринятые компоненты. Почти во всех вычислительных комплексах, в том числе ведущих, отсутствуют компоненты и функции некоторых устройств. Одним из них является устройство автоматической частотной разгрузки (АЧР), которое предназначено для устранения дефицита активной мощности в энергосистеме (ЭС) и ни в одном из ведущих вычислительных комплексов не предусмотрено как отдельный компонент.

Современные ведущие вычислительные комплексы содержат некоторые недостатки, и в них, используются одноузловые модели ЭС с устройствами АЧР. В практике АЧР включается множество отдельных устройств, которые размещаются в десятках и даже более узлах ЭС в соответствии с объемом и прогнозом дефицита активной мощности, и по расчету эти устройства требуют особенной настройки.

Зарубежные разработчики вычислительных комплексов исключительно полагаются на нормативно-технические требования, актуальные в западных странах. Их работа опирается на стандарты, разработанные Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE) и Международной электротехнической комиссией (IEC). В этих стандартах не присутствуют такие понятия, как АЧР-1, АЧР-2 и частотное автоматическое повторное включение (ЧАПВ). Соответственно, разработанные программы в этом смысле малопригодны для научных исследований и эксплуатационных расчетов. Анализ объема разгрузки, и корректировка требуемых настроек в модели должны соответствовать условиям реальной ЭС. Устройства АЧР без участия человека могут предотвратить и устранить аварийные ситуации, а также восстановить работоспособность ЭС.

Возникновение крупных аварий в энергосистемах развитых стран: США-1977 г., Франция-1978 г., Швеция и СССР-1983 г., Канада-1996 г. и Россия 2005 г., стимулировало развитие систем и технологии совершенствования в области противоаварийной автоматики. В ряду и крупные аварии, возникшие в ЭС РТ в последние годы (09.11.2009 и 28.10.2016 г.), в результате которой 70 % страны остались без электроэнергии в течение нескольких часов и привело к большому экономическому ущербу.

Данные обстоятельства требуют исследования и систематического изучения проблемы потенциальных отключений электроэнергии в энергосистеме Таджикистана.

Эти факторы определяют актуальность темы данной работы, в которой разрабатывается компонент для моделирования процессов аварийного снижения частоты в ЭС и поведение системы АЧР, который позволяет применять на вычислительных комплексах, компилятором которого служат языки программирования высокого уровня.

**Степень разработанности.** Большой вклад по вопросам моделирования объектов и процессов в области энергетики, особенно при исследовании аварийных дефицитах активной мощности внесли советские и российские ученые, такие как Веников В.А., Веретенников Л.П., Азарьев Д.И., Овчаренко Н.И., Рабинович Р.С., Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. и другие.

В современной бурно развивающейся информационной и вычислительной технике бесценный вклад внесли ученые из американской компании MathWorks – Matlab Simulink, из немецкой компании DIgSILENT GmbH, канадские разработчики от компании Manitoba Hydro International, а также другими ведущими университетами вычислительной техники и информационных технологий. Эти вычислительные комплексы имеют широкий спектр возможностей, при моделировании объектов генерации, передачи, распределения электроэнергии, которые пригодятся для научного исследования при разработке и проектировании систем управления.

**Связь исследования с программами (проектами) или научными темами.** Тема диссертации связана с программами «Обеспечение энергетической безопасности и эффективное использование электроэнергии», «Национальная стратегия развития РТ до 2030 года» и «Концепция цифровой экономики в РТ».

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Целью исследования** является разработка компонента, который будет реализовывать функции АЧР, с целью предотвращения и эффективной ликвидации возникающих аварийных ситуаций, связанных с дефицитом активной мощности и аварийным снижением частоты в ЭС.

### **Задачи исследования:**

1. Анализ возможностей современных вычислительных моделирующих комплексов в энергетике и разработка программного компонента автоматической частотной разгрузки.

2. Изучение особенностей энергосистемы Таджикистана и разработка её компьютерной модели.

3. Оценка работоспособности модели и разработанного компонента.

**Объектом исследования** представляется электроэнергетическая система (ЭЭС), оснащённая системой автоматического ограничения снижения частоты (АОСЧ).



**Предметом исследования** является режим аварийного снижения частоты в энергосистеме на примере энергосистемы Республики Таджикистана (ЭС РТ).

**Методологические основы диссертационного исследования.** В данной работе были применены методы системной оценки математического моделирования электромеханических переходных процессов, а также теоретические основы релейной защиты и автоматики. Для проведения расчетов и моделирования использовался вычислительный комплекс ЭС Power Systems Computer Aided Design (PSCAD).

**Научная новизна** исследования работы заключается в следующем:

1. Разработан программный компонент АЧР (АЧР-1, АЧР-2 и ЧАПВ) для предотвращения аварийного снижения частоты в ЭС.
2. Разработана методика проверки микропроцессорного терминала (МПТ) путем экспериментального моделирования применительно к устройствам АЧР.
3. Впервые на базе вычислительного комплекса PSCAD разработана расчетная модель ЭС РТ с учетом ввода новых объектов для расчета и анализа установившихся и переходных режимов.

**Практическая значимость.**

1. Разработанный программный компонент используется при проектировании системы АЧР в энергодефицитных ЭС и для исследования переходных процессов, связанных с аварийным снижением частоты в ЭС.
2. Разработанная методика проверки АЧР с использованием компьютерно-управляемой испытательной системы, позволяющая выполнять тестирование МПТ, реализующего функции АЧР может быть использована при проверке вводимых в эксплуатацию новых объектов и проведение плановых профилактических испытаний.
3. Разработаны научно-подтвержденные технические рекомендации и требования по применению компонента АЧР в среде программных комплексов для проведения исследования изменения частоты в ЭС.
4. Результаты разработок успешно внедрены в учебный процесс по курсу «Спецвопросы противоаварийной автоматики» и «Автоматика энергосистем» для выполнения научных работ магистрантов в ТТУ имени академика М.С. Осими и Департаменте выработки гидро и тепловых станций ОАО «Барки Точик».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Обоснованные рекомендации по выбору моделирующего вычислительного комплекса при решении электротехнических задач в энергетике.
2. Программный компонент для моделирования аварийного дефицита активной мощности, связанных с изменением частоты в ЭС.
3. Методика моделирования и исследования АЧР с применением программно-вычислительной техники.

### **Соответствие диссертации по паспорту научной специальности.**

Диссертация выполнена в соответствии со следующими разделами Паспорта номенклатуры специальностей научных работников: - по специальности **6D071800 – Электроэнергетика (6D071804 – Энергетические системы и комплексы)**: настоящая диссертация посвящена вопросам «Развития и совершенствования теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного производства электроэнергии, её транспортировки и снабжения потребителей электроэнергией в необходимом для потребителей количестве и требуемого качества». В диссертации, научные положения тесно связаны с областями исследования специальности 6D071800 – Электроэнергетика (6D071804 – Энергетические системы и комплексы). В частности:

*пункту-2* «Математическое моделирование, численные и натурные исследования физических и рабочих процессов, протекающих в ЭС» относится к созданной программной модели ЭС, программа, разработанная в рамках данного исследования, обладает высокой гибкостью и уникальными возможностями, позволяющими систематически анализировать процессы возникновения дефицита мощности и работы АЧР.

*пункту-6* – «Разработка и обоснование алгоритмов и принципов действия устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики для распознавания повреждений, определения мест и параметров повреждающих воздействий в ЭС» относится обоснование разработанного программного компонента для определения значения частоты и применение соответствующих мер по предотвращению ее дальнейшего снижения и возникновении системной аварии.

*пункту-7* – «Разработка цифровых и физических методов анализа и мониторинга режимных параметров основного оборудования электростанций, подстанций, электрических сетей, ЭС» относится обоснование разработанного метода апробации АЧР с помощью цифровых и физических испытательных систем, позволяющая тестировать МПТ, реализующего функции АЧР может быть использована при проверке вводимых в эксплуатацию новых объектов и проведение плановых профилактических испытаний

*пункту-9* – «Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости ЭС, комплексов, электрических станций и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы» относится обоснование разработанного модели ЭС, для анализа и расчета установившихся и переходных режимов ЭС.

**Достоверность результатов** данной работы определяется несколькими факторами. Прежде всего, это правильное использование математического аппарата, который является основой для проведения аналитических расчетов и моделирования. Для обеспечения более точных результатов, в работе использовались моделирующие комплексы, которые были предварительно апробированы и протестированы признанными научными центрами. Это

позволяет гарантировать надежность и достоверность полученных результатов. Кроме того, основные результаты работы обсуждались на международных конференциях с участием автора.

**Личный вклад соискателя.** Актуальность и инновационная идея темы диссертации основывается на работах автора как ведущего специалиста по релейной защите и противоаварийной автоматике в энергетической компании «Барки Точик», при преподавании предмета релейной защиты и автоматизации ЭС в филиале Национального исследовательского университета «МЭИ» в городе Душанбе, а также при постановлении цели и задач исследования, изучении путей их решения, разработке программного компонента и методике экспериментов и компьютерное моделирование, при проведении экспериментов с использованием программно-аппаратного комплекса, при оценке, обобщении, получении научных результатов и решений по работе.

**Апробация результатов работы.** В результате проведенных многочисленных экспериментов на физической и программной модели получили значительные результаты и значимые выводы. Эти результаты оказались ключевыми для понимания и улучшения изучаемой задачи.

Материалы диссертации были доложены и обсуждены на **Международные** научно-практические конференции: «Перспектива развития науки и образования» (Душанбе, 2019 г.); «Электроэнергетика Таджикистана: Актуальные проблемы и пути их решения» (Душанбе, 2019 г.), «Электроэнергетика региона: Состояние и перспективы развития» (Душанбе, 2019 г.), «Энергетика: Состояние и перспективы развития» (Душанбе, 2021 г., 2022 г.), на двадцать девятой **международной** научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиотехника, Электротехника и Энергетика» (Москва, 2023 г.).

**Публикации.** По итогам моей работы были опубликованы 11 машинописных работ. Из них 4 статьи были опубликованы в рецензируемых печатных изданиях Республики Таджикистан и Российской Федерации, входящих в перечень ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и заключения, изложенных на 157 страницах, включает 81 иллюстрации, 10 таблиц и список литературы на 129 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе *«Анализ возможностей современных моделирующих комплексов в энергетике и разработка программного компонента автоматической частотной разгрузки»* проведен исследовательский анализ новейших вычислительных комплексов, которые широко используются для анализа и решения различных задач ЭС. Рассмотрена динамика снижения частоты в ЭС при дефиците генерации, причины возникновения аварий и принципы реализации частотной разгрузки в ЭС. А также рассмотрена разработка компонента АЧР, который ни в одном из

ведущих вычислительных комплексов не предусмотрен как отдельный компонент. Компонент разрабатывается с учетом всех действующих нормативных требований по установке и настройке системы АЧР.

На основе оценки функциональных возможностей моделирующих вычислительных комплексов была составлена их сравнительная таблица 1.1.

**Таблица 1.1.** – Сопоставление функциональных аспектов современных вычислительных комплексов

Функции	DIgSILENT	PSS/E	PSCAD	EUROSTAG	Matlab	Rastr-Win	Mustang	DAKAR	ETAP	RSCAD (RTDS)
Расчет электрического режима	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Функция расчета токов КЗ	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+
Возможность организации связи с физическими устройствами.	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+
Наличие базы элементов электрической сети	-	-	+	-	+	-	-	+	+	+
Расчет электромеханических переходных процессов	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Расчет электромагнитных переходных процессов	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+
Возможность учета несимметрий в элементах ЭС	+	+	+	+	-	-	-	+	-	+
Функции эквивалентирования схемы энергосистемы	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-
Возможность создания пользовательских моделей (собственный компонент)	+	-	+	+	+	+	-	+	+	-

Основная цель состоит в представлении информации об основных возможностях известных программных средств, используемых для решения различных задач в ЭС. Предложены рекомендации, зависящие от рассматриваемой задачи, варианты выбора моделирующего комплекса, позволяющие принять правильное решение перед использованием соответствующего программного обеспечения.

На основании проведенного исследования и оценки функциональных возможностей данных вычислительных комплексов, пришли к следующим рекомендациям и выводам:

1. Для анализа режимов работы электрических сетей рекомендуется использовать вычислительные комплексы DIgSILENT (Power Factory), RastrWin, DAKAR и PSS/E. Эти комплексы имеют схожие возможности ввода исходных данных и вывода результатов.

2. В случае решения задач, связанных с электромагнитными переходными процессами и анализом токов короткого замыкания, наиболее эффективными являются комплексы ETAP, DIgSILENT и PSCAD.

3. Для расчета электромеханических переходных процессов с учетом моделирования синхронных и асинхронных машин, а также статических и динамических характеристик нагрузок, рекомендуется применять комплексы EUROSTAG, DAKAR и Mustang. Эти комплексы позволяют учесть действия любых видов противоаварийной автоматики и их настройки.

В целом, правильная реализация принципов построения частотной разгрузки играет важную роль в обеспечении безопасности и надежности работы ЭС. Она позволяет избежать опасных ситуаций, связанных с лавиной частоты (АЧР-1) и повреждением лопаток турбин (АЧР-2), и минимизировать риски для производства и оборудования. Соответственно при разработке компонента АЧР, который включает в себя функции АЧР-1, АЧР-2 и ЧАПВ учтены все особенности подсистем противоаварийной автоматики.

В первой части главы были собраны основные требования, которые предъявляются к устройствам и системам АОСЧ. Этот этап был важен для того, чтобы сделать анализ переменных и кодов программирования на языке Fortran. При разработке данного программного компонента был применен метод каскадного решения, известный как метод модели Ройса.

В ходе каскадного процесса разработки компонента АЧР, следующий этап включает в себя создание компонента в соответствии с требованиями АОСЧ, которые были рассмотрены на предыдущем этапе. Главной целью этого этапа является выбор и создание графического и диалогового интерфейса разрабатываемого компонента, а также определение его входов и выходов (рис 1.1).

Далее, каскадный процесс переходит к написанию кодов для каждой функции и соответствующих переменных. Каждая функция (АЧР-1, АЧР-2 и ЧАПВ) разрабатывается и тестируется отдельно, чтобы убедиться в их функциональности. После успешного тестирования, функции интегрируются в следующую фазу разработки.

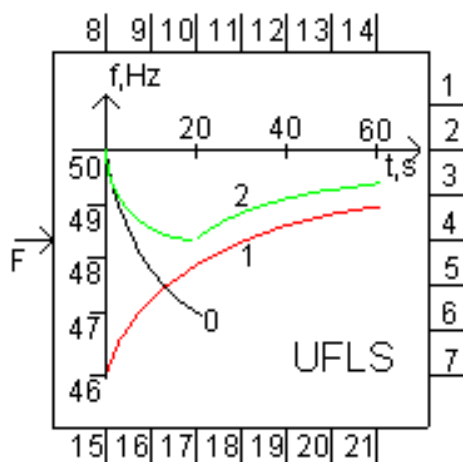


Рисунок 1.1. – Графический вид компонента АЧР

Для обеспечения большей гибкости в аварийном управлении частоты, в компоненте предусмотрена возможность использования от **1** до **21** выходных портов. Количество портов определяется изменяемым пользователем параметром - **Number of Outputs**. Известно, что чем больше количество очередей АЧР, тем лучше обеспечивает адаптивность и гибкость функционирования АЧР. Параметр **Number of Outputs** позволяет пользователю выбрать необходимое значение, после которого автоматически будет происходить изменение внешнего вида компонента и количества выходных сигналов (рис. 1.2).

General	
Number of Outputs	5
Frequency_Setting_1	48.8
Frequency_Setting_2	48.7
Frequency_Setting_3	48.6
Frequency_Setting_4	48.5
Frequency_Setting_5	48.4
Frequency_Setting_6	48.3
Frequency_Setting_7	48.2
Frequency_Setting_8	48.1
Frequency_Setting_9	48.0
Frequency_Setting_10	47.9

**Рисунок 1.2.** – Число выходов

Если значение параметра **Number of Outputs** равно 5, то включены должны быть порты **OUT1, OUT2, OUT3, OUT4** и **OUT5**, в то время как остальные выходные порты **OUT6,...**, и **OUT21** должны быть отключены, как показано на рис. 1.2.

Компонент осуществляет сравнение двух входов (в данном случае входное значение частоты и заданная уставка по частоте). При пересечении одного сигнала другим компонент генерирует импульс, либо выводит уровень, в зависимости от указанного типа выхода. Ниже приведен скрипт компаратора:

```
#IF Number_of_outputs>=1
    IF ($Frequency.LT. $frequency_1) THEN
        $OUTPUT1 = 1
    ENDF
```

Поставленная задача требует соблюдения уставки по времени для устройств АЧР-1 и специальной очереди АЧР. Уставка должна находиться в диапазоне от 0,15 до 0,3 секунды и исключать действие устройств АЧР-1 при коротких замыканиях в электрической сети. Для установки данной уставки для каждой очереди в компоненте была использована функция **Delay**, которая моделирует выражение Лапласа.

$$e^{-sT},$$

где  $T$  - длина задержки в секундах

$s$  - оператор Лапласа.

Данная функция выполняет последовательную передачу данных внутри массива с использованием временной задержки. Входные данные подаются в первый элемент таблицы, а затем с течением времени функция продвигается к концу массива. По истечении заданного временного интервала функция осуществляет доступ к исходному вводу на выходе. Ниже приведен скрипт функции задержки **Delay**:

```
#SUBROUTINE EMTDC_XONDLAY 'Delay Function'
#STORAGE INTEGER:1 REAL:1
#LOCAL REAL RVD2_1 2
#LOCAL REAL RVD2_2 2
      RVD2_1(1) = FLOAT($OUTPUT)
      RVD2_1(2) = 0.0
      CALL
EMTDC_XONDLAY(0,$TIME,RVD2_1,RVD2_2)
      $OUTPUT = NINT(RVD2_2(1))
#ENDIF
```

В среде программного комплекса PSCAD для измерения частоты и среднеквадратичного значения трехфазного напряжения используется компонент **Frequency/Phase/RMS Meter**. Данный компонент предназначен для вычисления частоты ( $f$ ) и значения ( $V_{rms}$ ). Частота вычисляется компонентом при каждом пересечении с нулевым значением трехфазного входного напряжения. Данный процесс позволяет отслеживать и фиксировать изменения частоты во времени. Полученная частота используется для расчета 6 временных интервалов ( $\delta$ ):

$$f(t) = \frac{1}{6} \cdot \frac{6}{\delta t_1 + \delta t_2 + \delta t_3 + \delta t_4 + \delta t_5 + \delta t_6}$$

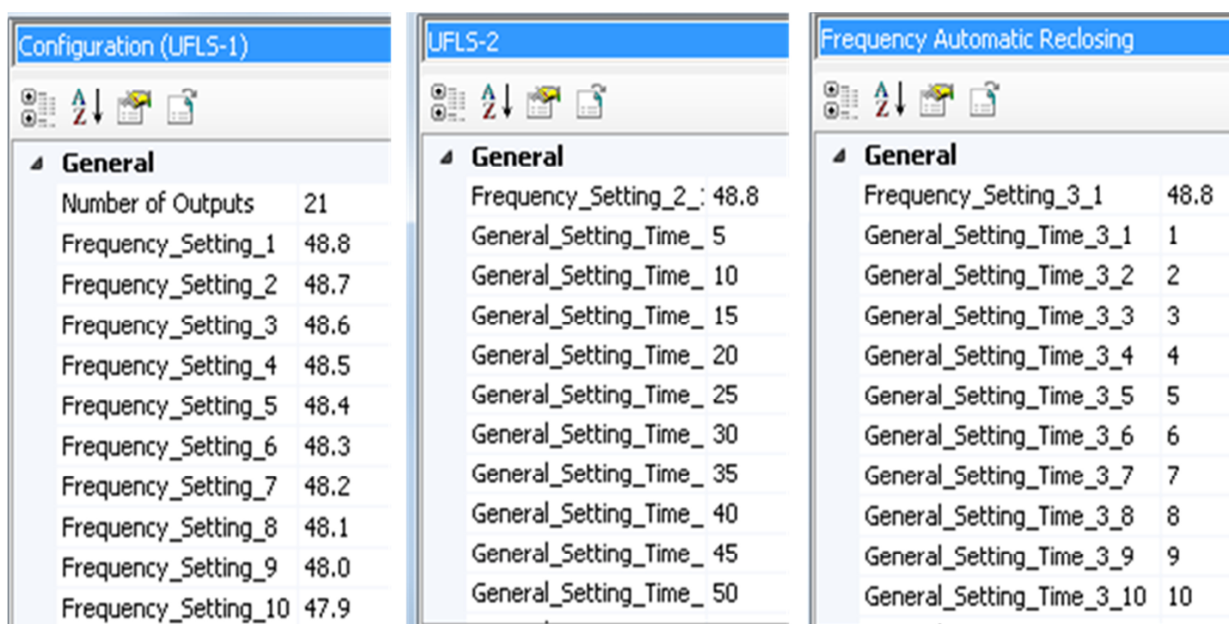
Компонент АЧР обрабатывает измеренное значение частоты, полученное от модели ЭС, и на основе заданных уставок по частоте и времени генерирует соответствующий сигнал для управления нагрузкой (выключателя).

Ниже приведены входные параметры компонента АЧР.

<b>АЧР-1 (UFLS-1)</b>			
<b>Number of Outputs</b>	Choice		Select 1 to 21
<b>Time Delay</b>	REAL	Constant	Enter the required time delay [s].
<b>Frequency Setting_1</b>	REAL	Constant	Enter the frequency setpoint [Hz]
<b>АЧР-2 (UFLS-2)</b>			
<b>Frequency Setting_2_1</b>	REAL	Constant	Enter the frequency setpoint [Hz]
<b>Time Delay</b>	REAL	Constant	Enter the required time delay [s].

ЧАПБ ( <u>Frequency Automatic Reclosing</u> )			
<b>Frequency Setting_3_1</b>	REAL	Constant	Enter the frequency setpoint [Hz]
<b>Time Delay</b>	REAL	Constant	Enter the required time delay [s].

Конечный вид интерфейса, разработанного компонента ограничения снижения частоты, представлен на рис. 1.1 и 1.3. Эта разработка обладает высокой актуальностью, так как соответствует мировой тенденции к интеграции моделирования в ЭЭС. Применение функциональных вычислительных комплексов позволяет осуществить наглядное, информативное и точное исследование сценариев функционирования АОСЧ.



**Рисунок 1.3.** – Диалоговое окно настройки компонента АЧР

Предлагаемый новый компонент является важным дополнением для вычислительного комплекса, которое не только улучшает его работу, но и расширяет функциональность, а также значительно облегчает использование для конечного пользователя. Однако, стоит отметить, что его особенность заключается в том, что он разработан по принципу выполнения системы АЧР, которая активно действует в Таджикистане и других постсоветских ЭС.

Этот новый компонент может быть успешно интегрирован и использован в других вычислительно-моделирующих комплексах, таких как MATLAB/Simulink. Описание и скрипт компонента можно с легкостью внедрить и адаптировать для работы с этими комплексами, что делает его весьма универсальным и удобным инструментом для разработки и моделирования.

**Во второй главе «Изучение особенностей энергосистемы Таджикистана и разработка её компьютерной модели»** рассмотрены описание, особенности, структура и иерархия, основные индикаторы развития ЭС РТ. Так как ЭС РТ в основном состоит из гидроэлектростанций (ГЭС), соответственно были рассмотрены особенности ЭС с



гидравлическими источниками генерации. А также были рассмотрены причины возникновения аварий и приведена статистика возникновения аварий в ЭС РТ.

Использовались модели элементов ЭС и устройств противоаварийной автоматики (ПА) для анализа переходных процессов, а также была разработана компьютерная модель ЭС РТ с учетом ввода новых объектов, позволяющая выполнить расчет и анализ установившихся и переходных режимов и была проверена работоспособность данной модели.

Особенность ЭС РТ заключается в том, что электроэнергия в стране вырабатывается в основном ГЭС. Соответственно при исследовании процессов было использовано постоянное время ЭС  $T_j$ , в пределах 6-10 с., которое характерно для ЭС с наибольшей долей ГЭС. Дано описание и модели автоматических регуляторов синхронных машин, особенности применения стандартных моделей регуляторов и нагрузки.

Для анализа переходных процессов сформулированы рекомендации по применению отдельных элементов, которые позволяют реализовать нормативные аварийные возмущения для дальнейшей оценки работы устройств ПА.

Рассматриваемые процессы в ЭС сложной структуры представляются нелинейными дифференциальными уравнениями высокого порядка, для которых не существует единый метод аналитического решения. Для решения таких уравнений в последние годы широко используются программные вычислительные комплексы.

На основе анализа ЭС РТ была разработана эквивалентная модель ЭС РТ в программе PSCAD с использованием экспериментально измеренных данных и параметров ЭС РТ. Имитационная модель синхронных генераторов содержит модели автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и частоты вращения гидравлических турбин. Рассматривались характер нагрузки ЭС, регулирующий эффект нагрузки и постоянная времени механизмов нагрузки.

В работе были использованы реальные характеристики АРВ электростанций ЭС РТ.

Действие регуляторов возбуждения имитируется введением сигналов, соответствующих отклонениям параметров режима и их производным.

Нагрузки представлены статическими и динамическими характеристиками. Нагрузка аппроксимировалась таким образом, чтобы она физически правильно и максимально приближенно к реальности отражала поведение мощности потребителя при изменении частоты.

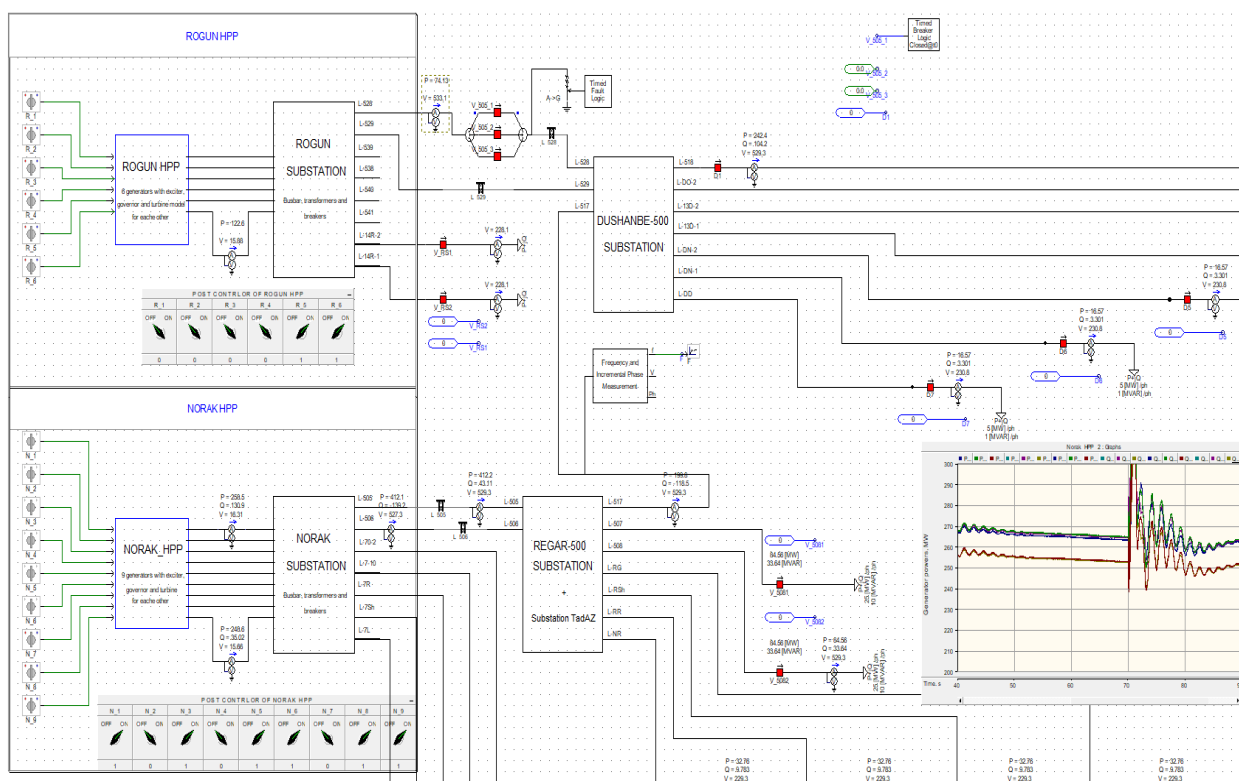
Модели синхронных гидрогенераторов представлены отдельными эквивалентными моделями, где учитывались реальные данные для каждой станции. В модели учтены Рогунская, Нурекская, Байпазинская, Сангтудинская-1 и Сангтудинская-2, Головная, Кайрокумская ГЭС, Душанбинская ТЭЦ-1 и Душанбинская ТЭЦ-2, системообразующие подстанции (ПС) 500-220-110 кВ (рис. 2.1). Благодаря широкому функционалу программы PSCAD разработанная модель позволяет в процессе моделирования проверять, оценивать и сравнивать ее работоспособность с

реальными параметрами моделируемого объекта. Соответственно, его адекватность оценивалась по его безошибочной работе во время запуска и моделирования.

Разработанная модель позволяет тщательно проанализировать исходное состояние модели и сравнивать текущие значения с реальными данными до создания возмущения.

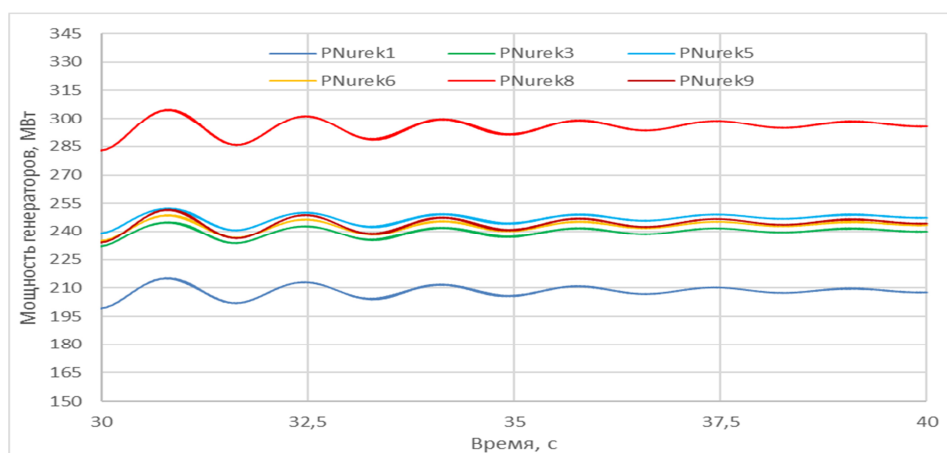
Данная особенность обеспечивает возможность проверки запуска агрегатов и оценки внешних характеристик этих агрегатов. Способность контролировать все параметры ЭС, такие как запуск генераторов, значения напряжений в узлах системы и перетоки мощности по ЛЭП, позволяет убедиться в их соответствии требованиям, определенным для этих параметров.

В данной части работы был выбран зимний максимальный режим как объект исследования, поскольку он является самым сложным с точки зрения переходных процессов. Для достоверности и надежности результатов были использованы реальные исходные технические данные, а нагрузочный режим модели был настроен на основе данных и измерений, полученных в ходе экспериментальных контрольных замеров на электрических станциях ЭС РТ в зимний максимальный режим. Это позволило достичь более точных и реалистичных результатов исследования.

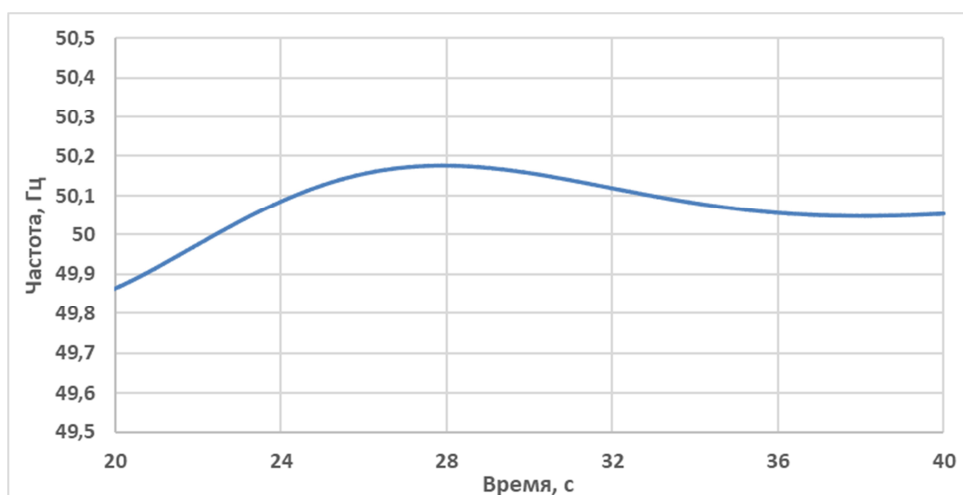


**Рисунок 2.1.** – Фрагмент модели ЭС РТ узла Рогунской, Нурекской ГЭС, ПС Регар -500, ПС Душанбе-500 и соответствующие ЛЭП

Результаты моделирования установившихся режимов ЭС, выработка активной мощности агрегатов Нурекской ГЭС, и значение частоты в ЭС в установившихся режимов приведена на рисунках 2.2 и 2.3.



**Рисунок 2.2.** – Выработка активной мощности агрегатов Нурекской ГЭС



**Рисунок 2.3.** – Значение частоты в ЭС

Для сравнения результатов моделирования в установившихся режимов ЭС с результатами экспериментальных измерений выработка активной, реактивной мощности и уровни напряжений агрегатов Нурекской и Рогунской ГЭС сведены в таблицу 2.1.

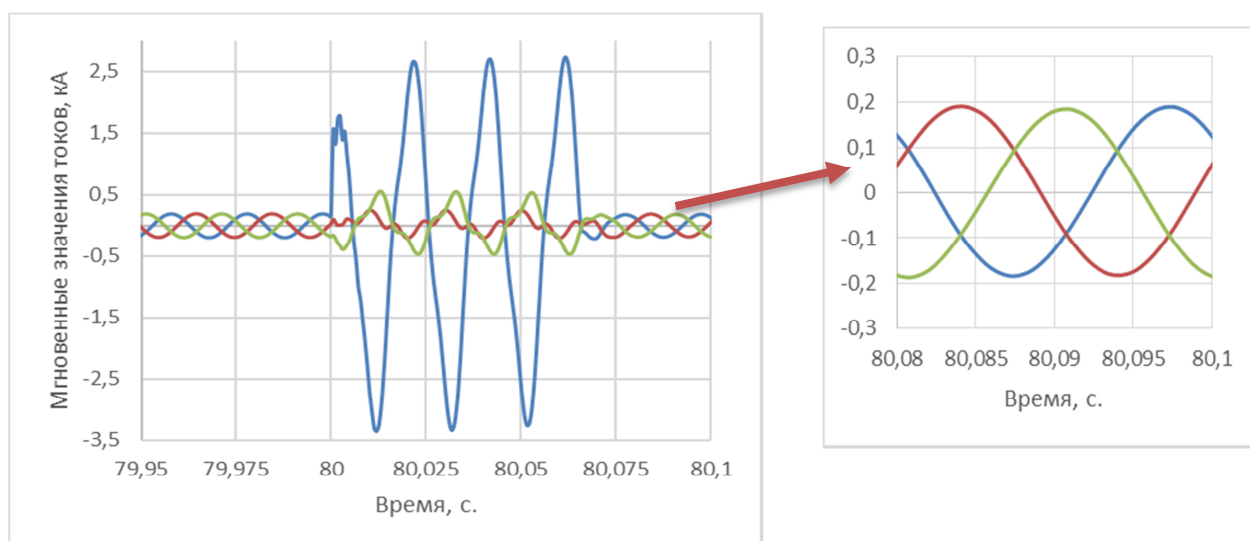
Как видно из табл. 2.1 результаты моделирования приблизительно совпадают с данным и результатам экспериментальных контрольных замеров на электрических станциях ЭС РТ в зимнем максимальном режиме, погрешность моделирования составляет от 1,06 до 4,76 % что говорит о правильности вводимых данных и адекватности расчетной модели.

**Таблица 2.1.** – Сравнение экспериментальных контрольных замеров на электрических станциях ЭС РТ в зимнем максимальном режиме (18.12.2020 года максимум) с результатами полученной в модели ЭС РТ

Нурекская ГЭС									
№	U, кВ			P, МВт			Q, МВАр		
	Факт. Знач.	Резул. модел.	Разни-ца Δ в %	Факт. знач.	Резул. модел.	Разни-ца Δ в %	Факт. знач.	Резуль. модел.	Разни-ца Δ в %
Г-1	15,2	15,6	2,56	210	207,8	1,06	50	51,2	2,34
Г-3	15,1	15,5	2,58	240	243,7	1,51	70	68,5	2,18
Г-5	15,2	15,52	2,06	250	247,2	1,13	50	52,3	4,39

Г-6	15,6	16,01	2,56	250	245,3	1,88	60	58	3,4
Г-8	15,3	15,67	2,36	300	295,6	1,49	60	58,1	3,27
Г-9	15,4	15,6	1,28	250	246,7	1,32	50	52,5	4,76
<b>Рогунская ГЭС</b>									
Г-5	14,9	15,5	3,87	120	116,7	2,8	25	24,3	2,88
Г-6	14,9	15,5	3,87	120	116,8	2,8	25	24,3	2,88

В разработанной модели ЭС РТ также было имитировано однофазное КЗ на землю вблизи шин Рогунской ГЭС на ЛЭП 500 кВ Рогун-Душанбе-500 (Л-525), отключаемой основной защитой ЛЭП 500 кВ дифференциальной защитой линии и с успешным действием устройства ОАПВ во время переходных режимов. В данной модели были использованы реальные исходные данные, включающие в себя временные уставки устройств РЗА, которые были установлены на рассматриваемом объекте. Время начала возмущения происходит в 80 секунде (рис. 2.4), срабатывает основная защита ВЛ 500 кВ со стороны Рогунской ГЭС, отключаются выключатели В-528 и В1-ГТ5. Короткое замыкание ликвидируется, действует устройство ОАПВ и включаются высоковольтные выключатели.



**Рисунок 2.4.** – Осциллограммы изменения тока при однофазном КЗ на ЛЭП Рогун-Душанбе-500 с последующим отключением и успешным действием ОАПВ

Проведенное исследование подтвердило, что динамическая устойчивость основного узла ЭС не нарушается при возникновении указанного возмущения. Разработанная модель является эффективным инструментом для проведения исследований и способна смоделировать и другие нормативные возмущения, характерные для ЭС РТ.

Таким образом, разработанная модель представляет собой результат комплексной исследовательской работы, основанной на реальных технических данных и оптимально настроенной в соответствии с ЭС РТ. Разработанную модель ЭС РТ можно использовать при исследовании как установившихся, так и переходных режимов в ЭС.

В третьей главе «Оценка работоспособности модели и разработанного компонента» была произведена проверка работоспособности программного компонента АЧР путем математического моделирования, рассмотрены верификации разработанного программного компонента устройства АЧР с использованием физико-математического моделирования.

С целью получения результатов в исследуемой математической модели разработанной во второй главе и для проверки работоспособности разработанного компонента АЧР были выполнены следующие действия:

1) Были проведены тщательные проверки наличия баланса мощности в модели энергосистемы, номинальное значение частоты и потребляемой мощности нагрузки до возникновения возмущения, которые успешно пройдены до 20-ой секунды моделирования.

2) В новом разработанном компоненте АЧР заданы уставки как по частоте, так и по времени.

Кроме предотвращения лавинной частоты, требования подъем её в диспетчерскую зону также возлагается на АЧР.

Разработанный программный компонент АЧР полностью соответствует требованиям стандарта организации ЕЭС России и ЭС РТ, соответственно, была проведена верификация действующей математической модели, которую применили для осуществления многочисленных сравнительных экспериментов, варьируя широкий спектр влияющих параметров при работе АЧР.

Модельные осциллограммы изменения частоты при дефиците мощности 10, 20 %, 30 %, при работе компонента АЧР показаны на рис. 3.1.

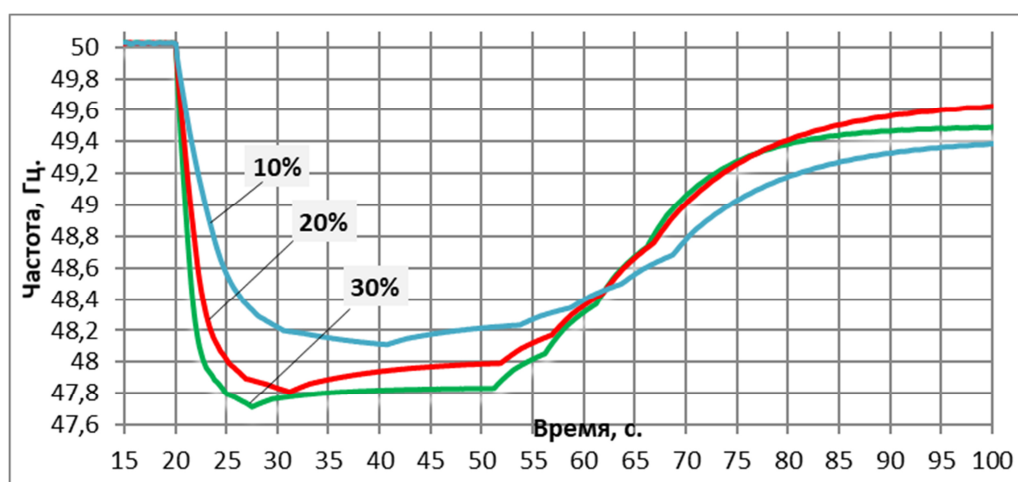


Рисунок 3.1. – Зависимость  $f(t)$ ,  $T_j = 10$  с,  $K_H = 1,5$ ,  $\Delta t_{\text{АЧР}} = 0,3$  с.

С использованием разработанной модели в вычислительном комплексе были смоделированы режимы работы физического устройства – МПТ, необходимые для изучения его функционирования. Анализ функционирования исследуемого терминала был проведен на персональном компьютере с помощью специализированного программного обеспечения. Для получения сигналов напряжения и частоты, которые в дальнейшем



использовались для проведения экспериментов, был использован программно аппаратный комплекс РЕТОМ-61.

Создание модели сети на основе симулятора предоставляет возможность изучения и проверки устройств РЗА. Поясняющая схема представлена на рис. 3.2.

Для проведения испытаний устройств РЗ был использован испытательный программно-аппаратный комплекс (ИПАК), который установлен на кафедре "Релейная защита и автоматизация энергосистем" в ТТУ имени академика М.С. Осими. Эта установка позволяет получить необходимые входные информационные сигналы для релейной защиты энергетического оборудования с помощью метода экспериментального моделирования.

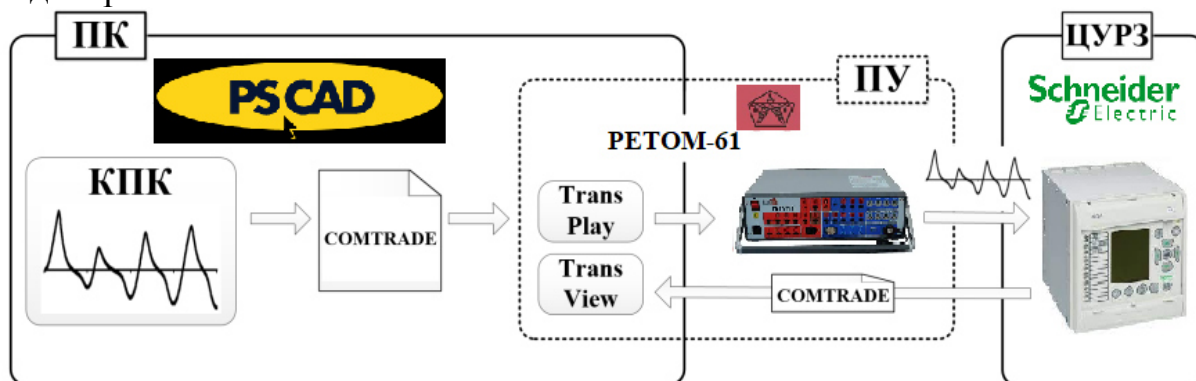


Рисунок 3.2. – ИПАК с разомкнутым циклом проведения испытаний

Испытательный стенд, представляет собой комплексное оборудование, собранное в лаборатории (рис. 3.3). Основной элемент стенда – ноутбук, помеченный цифрой 1, на котором установлена программа РЕТОМ-61 и специализированное программное обеспечение, которое позволяет настраивать и параметризовать терминалы релейной защиты серии MiCOM.

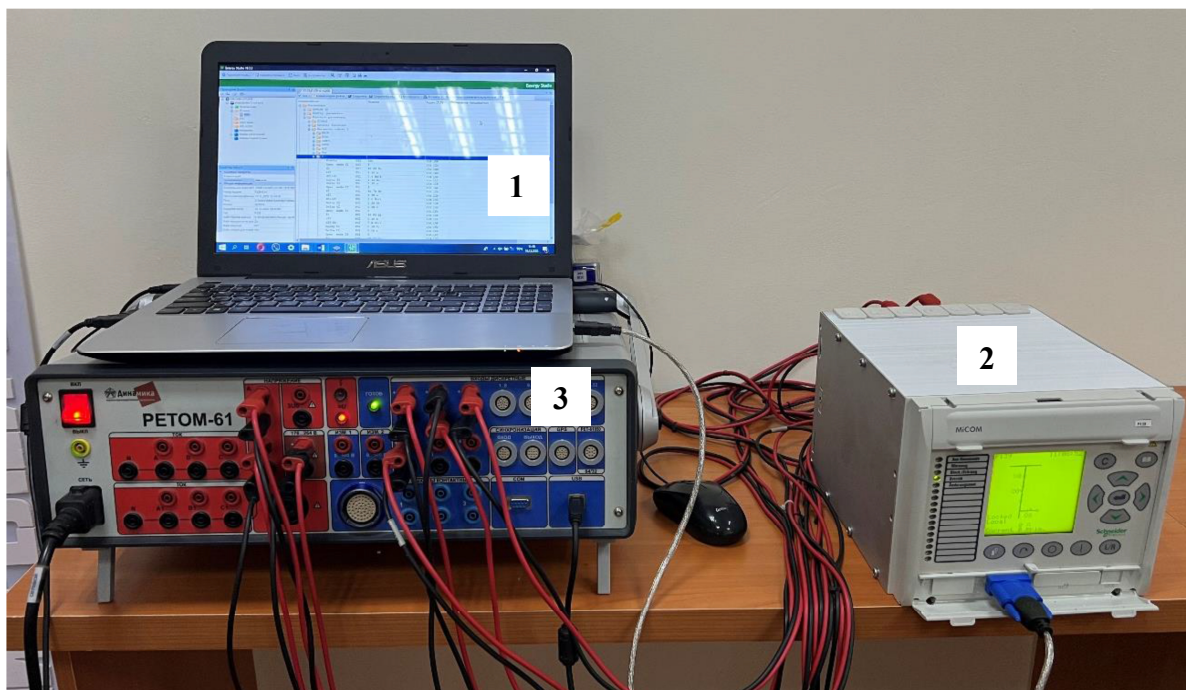
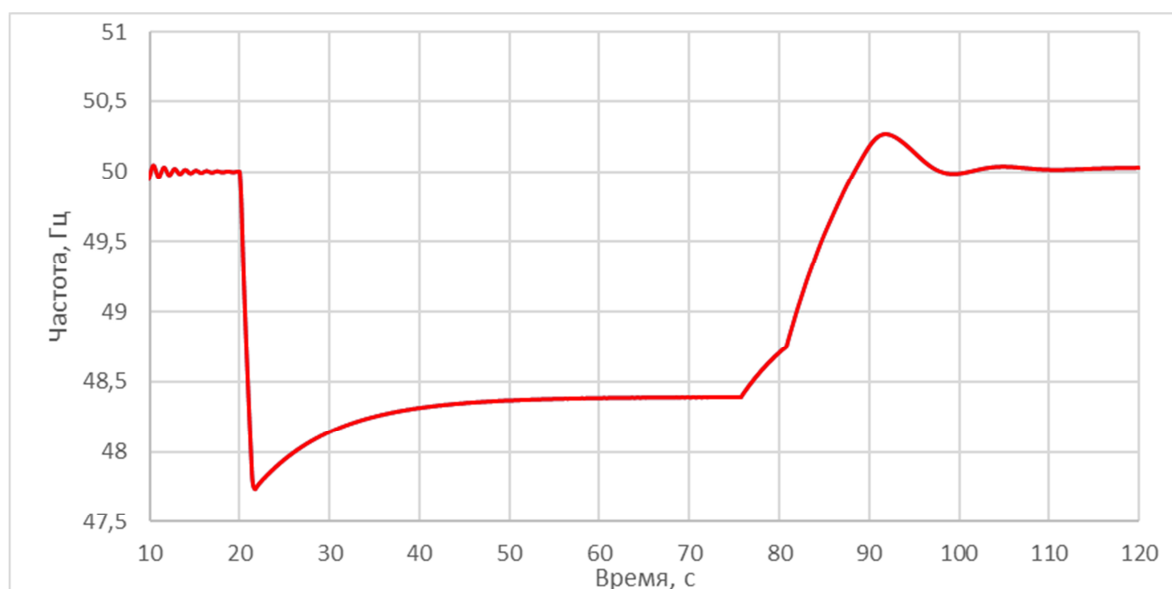


Рисунок 3.3. – Лабораторный испытательный стенд

Цифрой 2 (на рис. 3.3) обозначен микропроцессорный терминал релейной защиты MiCOM P139 немецкого производства. Это устройство было загружено установками и логикой АЧР. Цифрой 3 обозначен испытательный комплекс РЕТОМ-61, который использовался для проверки разработанного компонента АЧР. Проверка проводилась путем анализа записанных в вычислительном комплексе Comtrade-файлов, которые предоставляли данные о работоспособности системы.

С использованием модели, описанной во второй главе, был реализован дефицит активной мощности равного  $\Delta P=30\%$ . Это было достигнуто при постоянном времени ЭС равном  $T_j=6$  с, имеющем коэффициент регулирующего эффекта  $K_n=1,5$  и с опозданием в канале отключения нагрузки  $\Delta t=0,3$ . Осциллограмма, представленная на рисунке 3.4, демонстрирует изменение частоты во времени  $f(t)$  при возникновении дефицита активной мощности в рассматриваемом энергорайоне.



**Рисунок 3.4.** – Зависимость  $f(t)$

При возникновении дефицита активной мощности и активации АОСЧ, происходит отключение нагрузки и повышение частоты до 50 Гц. С целью изучения данного явления было проведено моделирование, результатом которого стали осциллограммы, отражающие изменения в параметрах ЭС в процессе реализации указанных возмущений.

В данной части работы были осуществлены измерения осциллограммы напряжения и частоты при указанных режимах работы сети – особенно при работе системы АОСЧ.

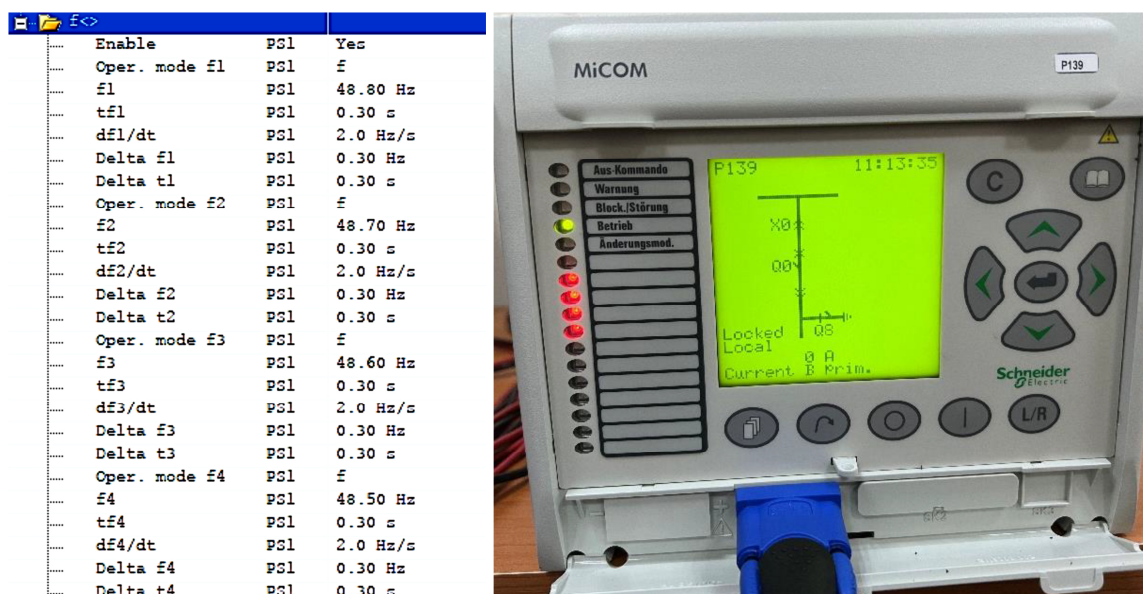
Записи этих измерений в формате Comtrade были впоследствии использованы для преобразования в физический сигнал с целью проведения испытания МПТ. Порог срабатывания для данного испытания был установлен ниже номинальной частоты сети, то есть устройство MiCOM P139 осуществляло контроль, не выходит ли частота за нижний порог

срабатывания. Если это имело место, задействовался соответствующий временной интервал.

После загрузки выбранного файла были назначены выходные физические каналы ИПАК в соответствие каналы РЕТОМ-61 и запущены на исполнение.

На рисунке 3.5 показан внешний вид терминала РЗА. В данном случае, были загружены уставки и схема работы АЧР, красные лампочки на рисунке указывают на то, что все 4 ступени АЧР сработали. Это свидетельствует о корректной работе алгоритмов и проведенной ранее проверке.

В ходе исследования были предоставлены детальные результаты, касающиеся комплексной верификации программного компонента АЧР. Главной методологией, которой придерживались, являлся метод экспериментального моделирования, также был применен метод вычислительного эксперимента при проведении тестирования.



**Рисунок 3.5.** – Уставки АЧР в терминале и срабатывание ступеней АЧР

В данном исследовании были подробно рассмотрены и проанализированы методы тестирования устройств релейной защиты с целью повышения их эффективности, применительно к устройствам АЧР.

Использование испытательного программно-аппаратного комплекса при испытаниях других устройств РЗА проверочными информационными сигналами, передаваемыми на тестируемый объект с помощью испытательной установки РЕТОМ-61, представляет собой эффективный метод исследования электромагнитных процессов электроэнергетических установок, а также проверки и испытаний устройств релейной защиты и их моделей. В результате разработана методика проверки АЧР с использованием компьютерно-управляемой испытательной системы, что позволяет проводить тестирование МПТ, реализующих функции АЧР.



## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

В ходе выполнения диссертации были получены следующие научные выводы и результаты:

1. Проведен анализ современных вычислительных комплексов, которые применяются для моделирования ЭС и предложены рекомендации вариантов выбора моделирующего комплекса [1-А].

2. Разработан программный компонент АЧР с учетом всех действующих нормативных требований по установке и настройке автоматики ограничения снижения частоты [2-А], [5-А], [10-А], [13-А].

3. Изучены особенности ЭС РТ и была разработана её компьютерная модель с учетом новых вводимых объектов [6-А], [12-А].

4. Проверена работоспособность разработанного компонента АЧР посредством математического моделирования и верифицирован методом экспериментального моделирования [3-А], [4-А].

5. Разработана методика проверки АЧР с использованием компьютерно-управляемой испытательной системы, позволяющая выполнять тестирование других МПТ, реализующих функции АЧР [3-А].

## **РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ**

1. Разработанный программный компонент может быть использован при проектировании системы АЧР в энергодефицитных ЭС и для исследования переходных процессов, связанных с аварийным снижением частоты в ЭС.

2. Разработанная методика проверки АЧР с использованием компьютерно-управляемой испытательной системы, позволяющая выполнять тестирование МПТ, реализующих функции АЧР, может быть использована при проверке вводимых в эксплуатацию новых объектов и проведении плановых профилактических испытаний.

3. Разработаны научно-обоснованные технические рекомендации по применению компонента АЧР в среде программных комплексов для проведения исследования изменения частоты в ЭС.

Результаты проведенного исследования успешно внедрены в учебный процесс для выполнения научных работ магистрантов в ТТУ имени академика М.С. Осими (акт о внедрении результатов в учебный процесс по курсу «Автоматика энергосистем» и «Спецвопросы противоаварийной автоматики» ТТУ имени академика М.С. Осими от 02 октября 2023 г.) и Департаменте выработки гидро и тепловых станций ОАО «Барки Точик» (акт о внедрении результатов работы №6/1203-870 от 06 июня 2023 года ОАО «Барки Точик»).

Таким образом, перспективы дальнейшей разработки темы диссертации весьма обширны. Проведенный анализ позволяет утверждать, что данный компонент стоит использовать в исследованиях аварийных процессов в ЭС, а также в управлении нагрузкой. Особый интерес вызывает

возможность применения цифровых технологий в активно адаптивных сетях. Решения, основанные на использовании цифровых технологий, имеют большой потенциал в повышении надежности системы и эффективности управления аварийными процессами. Кроме того, разрабатываемый компонент АЧР может быть активно использован при интеграции и расширении функций программно-вычислительных моделирующих комплексов.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

#### ***Публикации в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК при президенте Республики Таджикистан:***

[1-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Анализ возможностей современных вычислительных моделирующих комплексов для решения электротехнических задач/Б.М. Гиёев, Б.Ф. Ибрагимов, А.М. Расулов// Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. № 4 (56) 2021.–С. 6–13.

[2-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Разработка программного компонента АЧР среды вычислительного комплекса PSCAD / Б.М. Гиёев, Б.Ф. Ибрагимов// Научно-практическое издание «Релейная защита и автоматизация» – Москва – 2022. – №04(49). – С.49-53.

[3-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Верификация программного компонента АЧР с использованием метода экспериментального моделирования/ Б.М. Мирзозода, Б.Ф. Ибрагимов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. № 4 (60) 2022. – С. 44–51.

[4-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Проверка работоспособности разработанного компонента АЧР путем математического моделирования/Б.Ф. Ибрагимов// Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. № 1 (61) 2023. – С. 52–60.

#### ***Публикации в научных изданиях, материалы региональных и международных конференций:***

[5-А]. **Bakhtiyor F. Ibragimov.** Modeling of the UFLS using the new component of the UFLS in the PSCAD/EMTDC software/ Borbad M. Giyoev, Bakhtiyor F. Ibragimov, Abduvakil M. Rasulov, Manizha M. Mahmamin, Bahodur A. Gayurov. // 5th REEPE 2023 «International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering»- Moscow – 2023.

[6-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Совершенствование технических средств и принципов выполнения противоаварийной автоматики энергосистемы Таджикистана / Б.М. Гиёев, Б.Ф. Ибрагимов, А.М. Расулов // Материалы международной научно-практической конференции “Перспектива развития науки и образования” – Душанбе – 2019. – С. 98-100.

[7-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Разработка модели токовой защиты нулевой последовательности в программном комплексе PSCAD / Б.Ф. Ибрагимов, Дж.Ф. Ибрагимов, Х.Х. Зайнуддинов // Материалы международной научно-

практической конференции “Энергетика: Состояние и перспективы развития” – Душанбе – 2021. – С. 259-263.

[8-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Разработка алгоритма дистанционной защиты на линиях питающей сети 500 кВ в программном комплексе PSCAD / Б.М. Мирзозода, Б.Ф. Ибрагимов, Дж.Ф. Ибрагимов, Х.Х. Зайнуddинов // Материалы международной научно-практической конференции “Энергетика: Состояние и перспективы развития” – Душанбе – 2021. – С. 264-268.

[9-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Анализ вариантов релейной защиты автотрансформатора 500/220/10 кВ на базе микропроцессорных терминалов / Б.М. Мирзозода, Б.Ф. Ибрагимов, Дж.Ф. Ибрагимов, Х.Х. Зайнуddинов // Материалы международной научно-практической конференции “Энергетика: Состояние и перспективы развития” – Душанбе – 2021. – С. 269-272.

[10-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Моделирование работы АЧР с использованием нового компонента АЧР в среде PSCAD/EMTDC / Б.Ф. Ибрагимов // Тезисы докладов. Двадцать девятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, Электротехника и Энергетика»– Москва – 2023. – С. 1207.

### *Монографии и учебные пособия*

[11-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем. Лабораторный практикум для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» / Б.А. Гаюров, **Б.Ф. Ибрагимов** / Национальный исследовательский университет «МЭИ», издательство МЭИ, ISBN 978-7046-2519-3– Москва – 2022. – С. 82.

### *Авторские свидетельства и патенты*

[12-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Авторское свидетельство ТЈ №158. «Компьютерная модель для расчета и анализа установившихся и переходных режимов энергосистемы Таджикистана» / Б.М. Мирзозода, Б.Ф. Ибрагимов, А.М. Расулов, М.М. Махмадсаидзода // Зарегистрировано в Министерстве культуры Республики Таджикистан 16 марта 2023г.

[13-А]. **Ибрагимов Б.Ф.** Авторское свидетельство ТЈ №159. «Программный компонент для моделирования частотной защиты энергосистемы» / Б.М. Мирзозода, Б.Ф. Ибрагимов, А.М. Расулов //Зарегистрировано в Министерстве культуры РТ 16 марта 2023г.

**ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН  
ДОНИШГОҶИ ТЕХНИКИИ ТОҶИКИСТОН  
БА НОМИ АКАДЕМИК М.С. ОСИМӢ**

УДК: 621.311; 621.316.9

*Ба ҳуқуқи дастнавис*



**ИБРАГИМОВ БАХТИЁР ФАТХУЛЛОЕВИЧ**

**МОДЕЛСОЗӢ ВА БАҲОДИҶИИ ҲОЛАТИ СИСТЕМАИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКӢ ДАР ШАРОИТИ САДАМАВИИ  
АЛОҚАМАНД БА НОРАСОГИИ ТАВОНОИИ ФАӢОЛ  
(ДАР МИСОЛИ СИСТЕМАИ ЭНЕРГЕТИКИИ  
ТОҶИКИСТОН)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмии доктори фалсафа  
(PhD)- доктор аз рӯи ихтисоси 6D071800-Энергетикаи барқӣ  
(6D071804– Системаҳо ва мучтамаъҳои энергетикӣ)

Душанбе – 2023

Рисола дар кафедраи ҳимояи релей ва автоматикунонии системаҳои энергетикӣи Донишгоҳи техникӣи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ иҷро карда шудааст.

**Роҳбари илмӣ:**

**Мирзозода Борбад Мирзо**

номзади илмҳои техникӣ, дотсент, мудири кафедраи ҳимояи релей ва автоматикунонии системаҳои энергетикӣи Донишгоҳи техникӣи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ

**Муқарризи расмӣ:**

**Красильникова Татьяна Германовна**

доктори илмҳои техникӣ, профессори кафедраи «Системаи электроэнергетикӣи худкор» Донишгоҳи давлатии техникӣи Новосибирск

**Раҳматулов Ашурали Зокирович**

номзади илмҳои техникӣ, сардори шӯбаи «таксимот ва талафоти нерӯи барқ»-и филиали ЦСК «Шабакаҳои таксимоти барқ» дар шаҳри Бохтар.

**Муассисаи пешбар:**

Донишкадаи энергетикӣи Тоҷикистон,  
н. Кӯшонӣён.

**Ҳимояи диссертатсия санаи «01» марти соли 2024**, соати 14:00 дар ҷаласаи шӯрои диссертатсионӣи 6D.KOA-049 оид ба ҳимояи рисолаҳои номзадӣ ва докторӣ дар заминаи Донишгоҳи техникӣи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ бо суроғаи: 734042, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, хиёбони академикҳо Рачабовҳо, 10а баргузор мегардад.

Бо рисола метавон дар китобхонаи Донишгоҳи техникӣи Тоҷикистон ба номи академик М.С.Осимӣ ва дар сомонаи расмӣ он: <http://web.ttu.tj> шинос шуд.

Автореферат санаи «26» январӣ соли 2024 ирсол шудааст.

Котиби илмӣ

Шӯрои диссертатсионӣ,

Номзади илмҳои техникӣ, дотсент



Султонзода Ш.М.

## МУҚАДДИМА

**Мубрамияти мавзӯи тадқиқот.** Айни замон қариб дар ҳама тадқиқотҳои илмӣ усули ҳалли масъалаҳо бо роҳи моделсозии рақамӣ иҷро карда мешавад, ки ин усул худ омӯзиши равандҳои реалӣ, таҷҳизот, системаҳо, ходисаҳоро дар бар гирифта, ҳалли онҳоро дар асоси тавсифи математикии онҳо, яъне моделҳо дар мучтамаъҳои ҳисоббарор иҷро менамояд.

Яке аз масъалаҳои муҳим дар самти энергетикаи муосир ин моделсозӣ ва таҳлили равандҳои динамикӣ, ки бо норасоии садамавии тавоноии фаъол алоқаманд мебошанд ва коркарди ҳаҷми зиёди маълумотро бо мақсади ба даст овардани самаранокии баланди техникӣ талаб мекунанд, ба ҳисоб меравад, инчунин бо намоиши минбаъда аз натиҷаҳо ба корбар хеле муҳим аст. Мучтамаъҳои ҳисоббарор, ки дар онҳо моделсозиро анҷом дода мешаванд асосан аз рӯи принципҳои умумӣ таҳия карда мешаванд ва ҷузъҳои умумӣ қабулшударо доро мебошанд. Қариб ҳамаи мучтамаъҳои ҳисоббарор, аз ҷумла мучтамаъҳои пешқадам, ҷузъҳо ва функцияҳои баъзе таҷҳизотро надоранд. Яке аз онҳо таҷҳизоти автоматикаи боркамнунии басомадӣ (АББ) мебошад, ки барои бартараф кардани норасоии тавоноии фаъол дар системаҳои энергетикӣ (СЭ) пешбинӣ шудааст ва дар ҳаҷ аз мучтамаъҳои ҳисоббарор он ҳамчун ҷузъи алоҳида пешбинӣ нашудааст.

Мучтамаъҳои ҳисоббарори муосири нисбатан маъмул дорои баъзе камбудҳои мебошанд ва дар онҳо моделҳои як гиреҳи СЭ-ро бо таҷҳизотҳои АББ истифода карда мешавад. Аммо дар амал системаи АББ аз маҷмӯи зиёди қисмҳои алоҳида иборат мебошад, ки дар дахҳо ва зиёда гиреҳҳои СЭ ҷойгиранд ва мувофиқи ҳаҷм ва норасоии ҳисобии тавоноии фаъол амал менамоянд. Дар навбати худ ин таҷҳизот аз рӯи ҳисоб танзимои махсусро талаб менамоянд.

Таҳиягарони барномаҳои хориҷии мучтамаъҳои ҳисоббарор талаботи меъёрӣ ва техникӣ дар кишварҳои ғарбӣ амалкунандаро истифода мебаранд ва дар асоси стандартҳои Институти муҳандисони электротехника ва электроника (IEEE) ва Комиссияи байналмилалии электротехникӣ (IEC), ки дар он фаҳмиши АББ-1, АББ-2 ва пайвасти такрорӣ автоматии басомадӣ (ПТАБ) вохурда намешаванд, амал менамоянд. Аз ин рӯ, барномаҳои таҳияшуда барои тадқиқи масъалаи дар боло зикргашта ва ҳисобҳои оперативӣ на он қадар самаранок мебошанд. Таҳлили ҳаҷми боркамкунӣ ва танзими танзимои зарурӣ дар модел бояд ба шароити СЭ-и воқеӣ мувофиқат кунад. Бо истифода аз таҷҳизотҳои АББ, ки бидуни даҳолати инсон вазъи садамавиро пешгирӣ ва ё бартараф менамоянд, баркарор намудани речаи муътадили СЭ таъмин карда мешавад.

Садамаҳои бузурги моҳияти системавидошта ки дар системаҳои энергетикӣ кишварҳои пешрафта ба монанди: ИМА-1977 с., Фаронса-1978 с., Шветсия ва Иттиҳоди Шуравӣ-1983 с., Канада-1996 ва Руссия-2005 с. сабаби рушди система ва технологияи мукамалгардонӣ дар самти автоматикаи зиддсадамавӣ шуд. Дар катори садамаҳои дар боло

зикргардида муттаасифона дар СЭ ҚТ низ садамаҳои системавӣ рӯй додаанд (09.11.2009 ва 28.10.2016 сол), ки дар натиҷа 70 % ҷумҳурӣ дар давоми якчанд соат аз энергияи электрикӣ (ЭЭ) маҳрум гашт ва сабаби хисоротҳои калони иқтисодӣ ҳам шудаанд. Ҳолатҳои ба амаломеда омӯзиш ва таҳқиқи системавии сабабҳои қатъшавии барқтаъминкуниро дар системаи энергетикаи Тоҷикистон талаб менамоянд.

Маҳз омилҳои дар боло зикршуда мубрамияти мавзӯи кори илмӣ мазкурро муайян намуда, дар он ҷузъи моделсозии равандҳои ба таври садамавӣ пастшавии басомад дар СЭ ва амали системаи АББ коркард карда мешавад, ки онро метавон дар барномаҳои компютери бо забонҳои барномасозии сатҳи баланд коркунанда истифода кард.

**Дарачаи таҳияи мавзӯи илмӣ.** Дар масъалаи моделсозии объектҳо ва равандҳо дар самти энергетика, махсусан дар омӯзиши норасоии садамавии тавоноии фаъл олимони шӯравӣ ва рус, ба монанди Веников В.А., Веретенников Л.П., Азарев Д.И., Овчаренко Н.И., Рабинович Р.С., Павлов Г.М., Меркуриев Г.В ва дигарон саҳми бузург гузоштаанд.

Дар шароити имрӯза, ки технологияи муосири иттилоотӣ ва компютерӣ босуръат рушд меёбад, саҳми бебаҳои худро олимони аз ширкати америкоии MathWorks – Matlab Simulink, аз ширкати олмонии DIgSILENT GmbH, таҳиягарон аз ширкати конодогии Manitoba Hydro International ва дигар донишгоҳҳои пешрафтаи компютери ва иттилоотӣ гузоштаанд. Мучтамаҳои коркардшуда дорои як қатор қобилиятҳои моделсозии объектҳои истеҳсол, интиқол ва тақсими нерӯи барқ буда, дар тадқиқотҳои илмӣ ва дар самти лоиҳакашии системаҳои идоракунӣ васеъ истифода бурда мешаванд.

**Алоқамандии таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо) ва мавзӯҳои илмӣ.** Мавзӯи рисолаи илмӣ бо барномаҳои давлатии «Стратегияи миллии рушди Ҷумҳурии Тоҷикистон то соли 2030», «Таъмини амнияти энергетикӣ ва истифодаи самараноки нерӯи барқ» ва «Консепсияи иқтисоди рақамӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон» алоқаманд мебошад.

## ТАВСИФИ УМУМИИ РИСОЛА

**Мақсади таҳқиқот** аз коркарди ҷузъи барномавӣ, ки функцияи АББ-ро барои омӯзиши равандҳои садамавии марбут ба норасоии тавоноии фаъл ва пастшавии басомад дар СЭ оварда мерасонад, иборат мебошад.

### **Ҳадафҳои таҳқиқот:**

1. Таҳлили имкониятҳои системаҳои муосири ҳисоббарорӣ дар энергетика ва таҳияи ҷузъи барномавии автоматикаи боркамнунии басомадӣ.
2. Омӯзиши хусусиятҳои системаи энергетикаи Тоҷикистон ва таҳияи модели компютери он.
4. Баҳогузори самаранокии модели компютери коркардшуда ва ҷузъи таҳияшуда.

**Объекти таҳқиқот** ин системаи электроэнергетикӣ (СЭ) мебошад, ки бо системаи автоматии маҳдудкунандаи пастшавии басомад (АМПБ) мучахҳаз карда шудааст.

**Мавзӯи (предмети) таҳқиқоти** рисола ин речаи ба таври садамавӣ пастшавии басомади системаи энергетикӣ дар мисоли системаи энергетикӣи Ҷумҳурии Тоҷикистон (СЭ ҚТ) мебошад.

**Асосҳои методологии таҳқиқоти диссертатсионӣ.** Дар рисолаи мазкур барои таҳқиқот усулҳои баҳодиҳии системавии моделсозии математикии равандҳои электромеханикӣ, асосҳои назариявии ҳимояи релей ва автоматика истифода шудаанд. Дар рафти иҷрои вазифаҳои гузошташуда аз мучтамаи барномавии ҳисоббарори махсус пешбинишуда барои ҳисоб кардан ва моделсозии СЭ – Power Systems Computer Aided Design (PSCAD) истифода карда шудааст.

**Навоварии илмӣ таҳқиқот** иборат аст аз:

1. Коркард намудани ҷузъи барномавии АББ (АББ-1, АББ-2 ва ПТАБ) барои пешгирии пастшавии садамавии басомад дар СЭ.

2. Усули озмоиши дастгоҳи электронии ҳушманд (ДЭҲ) тавассути моделсозии таҷрибавӣ дар робита бо дастгоҳҳои АББ таҳия карда шудааст.

3. Бори аввал дар заминаи мучтамаи ҳисоббарории PSCAD модели ҳисоббарории СЭ ҚТ бо назардошти ҷорӣ намудани объектҳои нав барои ҳисоб ва таҳлили речаҳои устувор ва гузаранда коркард карда шуд.

**Аҳамияти амалии кори илмӣ**

1. Ҷузъи барномавии коркардшуда дар лоиҳакашии системаи АББ барои СЭ, ки дар онҳо эҳтимоли сар задани норасоии тавонӣ мавҷуд аст ва омӯзиши равандҳои гузаранда, ки ба пастшавии садамавии басомад дар СЭ алоқаманданд, истифода мешавад.

2. Усули таҳияшудаи озмоиши АББ бо истифода аз системаи санҷиши идорашавандаи компютерӣ дорои имкониятҳои санҷиши ДЭҲ – и вазифаҳои АББ-ро амаликунанда буда, онро ҳангоми тафтиши иншоотҳои нав ва гузаронидани санҷишҳои профилактикии пешбинишуда истифода бурдан мумкин аст.

3. Тавсияҳои техникий илман асоснок кардашуда ва талабот оид ба истифодаи ҷузъи АББ дар муҳити системаҳои барномавӣ барои гузаронидани таҳқиқи тағйирёбии басомад дар СЭ таҳия карда шудаанд.

4. Натиҷаҳои илмӣ ба дастамада дар раванди таълими курсҳои «Масъалаҳои махсуси автоматикаи зиддсадамавӣ» ва «Автоматикаи системаҳои энергетикӣ» барои иҷрои корҳои илмӣ магистрҳои ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ ва Департаменти истеҳсоли барку гармии ҚСК «Барқи Тоҷик» истифода бурда мешаванд.

**Нуктаҳои асосии таҳқиқоти диссертатсионӣ, ки барои ҳимоя пешниҳод карда мешаванд:**

1. Тавсияҳои асоснок оид ба интихоби комплекси моделсозии ҳисоббарор барои ҳалли проблемаҳои электротехникӣ дар соҳаи энергетика.

2. Ҷузъи барномавӣ барои моделсозии норасоии садамавии тавоноии ғайриҷор, ки бо тағйирёбии басомад дар СЭ алоқаманд аст.

3. Усули моделсозӣ ва таҳқиқоти АББ бо истифода аз барномаҳои ҳисоббарори техникий.



## **Мутобиқати диссертатсия аз рӯи шаҳодатномаи ихтисоси илмӣ.**

Диссертатсия аз рӯи бандҳои зерини Шаҳодатномаи номгӯи ихтисосҳои коргарони илмӣ анҷом дода шудааст: — **аз рӯи ихтисоси 6D071800-Энергетикаи барқӣ**: диссертатсияи мазкур ба масъалаҳои «Инкишоф ва тақвину додани базаи назариявӣю техникаи энергетикаи барқӣ бо мақсади таъмини сарфақоронаю бозғайимодии истеҳсоли ЭЭ, интиқоли он ва бо ЭЭ таъмин намудани истеъмолкунандагон, ҳаҷм ва сифати зарурии барои истеъмолкунандагон лозима бахшида шудааст. Муқаррароти илмии дар диссертатсия инъикосёфта ба самтҳои омӯзиши ихтисоси 6D071800 – Энергетикаи барқ мувофиқат мекунад. Аз ҷумла:

**банди 2**– «Моделсозии математикӣ, омӯзиши ададӣ ва табиӣи равандҳои физикӣ-химиявӣ ва қорие, ки дар системаҳои энергетикӣ ба амал меоянд» ба модели барномавии сохташудаи СЭ, инчунин барнома ва методикаи омӯзиши равандҳои пайдоиши норасоии тавоноӣ ва қори АББ бо истифода аз ҷузъи таҳияшуда дар муҳити PSCAD дахл дорад.

**банди 6** - «Таҳия ва асосноккунии алгоритмҳо ва принципҳои қори дастгоҳҳои ҳимояи релей ва автоматикаи зиддисадамавӣ барои ошқор қардани осеб, муайян қардани мавқеи осебдида ва параметрҳои таъсири зараровар дар системаҳои энергетикӣ» ба асосноккунии ҷузъи барномавии қорқардшуда барои муайян қардани қиммати басомад ва татбиқи қораҳои дахлдор барои пешгирии пастшавии минбаъдаи он, инчунин руй додани садамаҳои системавӣ вобаста мебошад.

**банди 7** - «Қорқарди усулҳои анализи рақамӣ, физикӣ ва дарҷ намудани параметрҳои речаҳои таҷҳизоти асосии нерӯгоҳҳо, зеристгоҳҳо, шабақаҳои электрикӣ, системаҳои энергетикӣ» ба асосноккунии усули қорқардшудаи санҷиши АББ бо истифода аз системаи таҷрибавӣи физикӣ-рақамӣ, ки имконияти санҷиши дастгоҳи электронии хушмандро дорост ва функцияи АББ амалӣ менамояд дахл дорад ва сули мазкурро метавон ҳангоми ба истифода қарор додани объектҳои нав ва санҷишҳои нақшавӣ истифода қард.

**банди 9** - «Қорқарди усулҳои ҳисоб ва моделсозии речаҳои қорӣ, гузаранда ва эътимодиятнокии системаи энергетикӣ, мучтамаъҳо, нерӯгоҳҳои электрикӣ ва шабақаҳо бо назардошти асосноккунии техникӣ-иқтисодӣ, қорқарди усулҳои идораи речаҳо ва қори онҳо» ба асосноккунии модели қорқардшудаи системаи энергетикӣ ва таҳқиқу ҳисоби речаҳои қорӣ ва гузарандаи системаи энергетикӣ рабт дорад.

**Дарачаи дақиқияти натиҷаҳои қорӣ** гуногунанд ва асосан дар истифодаи дурусти дастгоҳи математикӣ, мувофиқати маълумоти ҳисобҳои аналитикӣ ва натиҷаҳои дар асоси моделсозӣ ба дастовардашуда, истифодаи комплексҳои моделсозӣ, ки аз қониби ширкатҳои машҳури таҳқиқотӣ санҷида шудаанд, муҳокимаи натиҷаҳои асосие, ки дар доираи конференсияҳои байналмиллалӣ бо иштироки муаллиф ба даст оварда шудаанд, инчунин дар муҳокимаи мақолаҳои илмии ҷопшуда инъикос ёфтааст, ки саҳми асосиро дар онҳо ҳуди муаллиф гузоштааст.

**Саҳми шахсии муаллиф барои гирифтани унвони илмӣ** дар гузоштани ҳадафу вазифаҳои таҳқиқот, омӯзиши роҳҳои ҳалли онҳо, таҳияи

чузъи барномавӣ ва усулҳои таҷрибавӣ ва моделсозии компютерӣ, дар гузаронидани таҷрибаҳо бо истифода аз комплексҳои барномавӣ, дар баҳо додан, ҷамъбасти кардан, ба даст овардани натиҷаҳои илмӣ ва инчунин, фаъолияти муаллиф ҳамчун мутахассиси пешбари Ҷимояи релей ва автоматикаи зиддисадамавӣ дар ширкати энергетикаи «Барқи Тоҷик», дар таълими фанҳои Ҷимояи релей ва автоматика дар филиали Донишгоҳи миллии тадқиқотии Донишкадаи энергетикаи Москва «ДЭМ» дар шаҳри Душанбе асос меёбад.

**Санҷиш ва тадқиқи натиҷаҳои илмӣ таҳқиқот.** Натиҷаҳои асосии кор дар асоси озмоишҳои гуногуни физикӣ ва моделҳои барномавӣ ба даст оварда шуданд.

Дар натиҷаи гузаронидани таҷрибаҳои сершуморе, ки аз рӯи модели физикӣ ва барномавӣ гузаронда шуданд, натиҷа ва хулосаҳои муҳим ба даст оварда шуданд. Ин натиҷаҳо барои фаҳмидан ва тақмил додани омӯзиши ҳадаф калидӣ мебошанд.

Маводҳои диссертатсия дар чорабиниҳои илмӣ ва конференсияҳои зерин муҳокима шудаанд: конференсияи **байналмилалӣ** илмӣ-амалии «Дурнамои рушди илм ва маориф» (Душанбе, 2019); конференсияи **байналмилалӣ** илмӣ-амалии «Электроэнергетикаи Тоҷикистон: Проблемаҳои актуалӣ ва роҳҳои ҳалли онҳо» (Душанбе, 2019), конференсияи **байналмилалӣ** илмӣ-амалии «Электроэнергетикаи минтақа: ҳолат ва дурнамои рушд» (Душанбе, 2019), конференсияи **байналмилалӣ** илмӣ-амалии «Энергетика: Ҳолат ва дурнамои рушд» (Душанбе, 2021), конференсияи **байналмилалӣ** илмӣ-амалии «Энергетика: Ҳолат ва дурнамои рушд» (Душанбе, 2022), бисту нухум конференсияи **байналмилалӣ** илмӣ-техникии донишҷӯён ва аспирантҳо «Радиотехника, электротехника ва энергетика» (Москва, 2023).

**Наشري натиҷаҳои диссертатсия.** Аз рӯи натиҷаҳои асосии диссертатсия 11 маводҳои ҷопӣ, аз ҷумла 4 мақола дар нашрияҳои тақризии Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Федератсияи Руссия тибқи рӯйхати Комиссияи олии аттестатсионӣ ба таърифи расидаанд.

**Сохтори кори диссертатсионӣ.** Диссертатсия аз муқаддима, 3 боб ва хулоса иборат буда, дар 157 саҳифа матни ҷопшуда пешниҳод шуда, 81 расм, 10 ҷадвал ва рӯйхати адабиётҳо 129 номгӯйро дар бар мегирад.

## **МУҲТАВОИ АСОСИИ КОРИ ДИССЕРТАЦИОНӢ**

**Дар боби якум «Таҳлили имкониятҳои системаҳои муосири ҳисоббарорӣ дар самти энергетика ва коркарди ҷузъи барномавии автоматикаи боркамкунии басомадӣ»** таҳлили системаҳои нисбатан маъмули муосири ҳисоббарор, ки барои таҳлил ва моделсозии СЭ ва умуман барои ҳалли масъалаҳои электротехникӣ истифода мешаванд, гузаронида шудааст. Рафти пастшавии басомад дар системаи энергетикӣ ҳангоми норасоии тавоноии истеҳсолшаванда, сабабҳои сар задани садамаҳо ва принсипҳои амалисозии боркамкунии басомадӣ дар системаҳои энергетикӣ ва инчунин, коркарди ҷузъи АББ, ки дар ягон мучтамаъи ҳисоббарор

хамчунин элементи алоҳида пешбинӣ нашудааст, таҳлил карда мешавад. Ҷузъи барномавии коркардшуда бо назардошти ҳама талаботе, ки дар хуччатҳои меъёрӣ ва техникӣ вобаста ба танзими системаи АББ пешбинӣ шудаанд, сохта шудааст.

Дар асоси баҳодиҳии имкониятҳои функционалии мучтамаъҳои ҳисоббарорӣ чадвали муқоисавӣ (чадвали 1.1) тартиб дода шудааст.

**Чадвали 1.1.** –Чадвали муқоисавии қобилияти функционалии мучтамаъҳои ҳисоббарор

Фунсияҳо	DIGSILENT	PSS/E	PSCAD	EUROSTAG	Matlab	RastrWin	Mustang	DAKAR	ETAP	RSCAD (RTDS)
Ҳисоб кардани речаи электрикӣ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Функсияи ҳисоби ҷараёнҳои расиши кӯтоҳ	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+
Қобилияти ташкили алоқа бо дастгоҳҳои физикӣ	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+
Мавҷудияти базаи элементҳои шабакаҳои барқӣ	-	-	+	-	+	-	-	+	+	+
Ҳисоби равандҳои гузарандаи электромеханикӣ	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Ҳисоби равандҳои гузарандаи электромагнитӣ	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+
Имконияти ба назар гирифтани несимметрия дар ҷузъҳои СЭ	+	+	+	+	-	-	-	+	-	+
Функсияи баробаркунии нақшаи системаҳои энергетикӣ	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-
Имконияти сохтани моделҳо аз тарафи истифодабаранда (компоненти худӣ)	+	-	+	+	+	+	-	+	+	-

Мақсади асосӣ аз пешниҳоди маълумот дар бораи хусусиятҳои асосии воситаҳои барномавии нисбатан маъмул, ки дар ҳалли масъалаҳои гуногуни соҳаи энергетика истифода карда мешаванд, иборат мебошад. Вобаста ба вариантҳои интихоби мучтамаъҳои моделсозӣ барои тадқиқи масъалаҳои гузошташуда тавсияҳо пешниҳод карда шудаанд, ки дар интихоби мучтамаъҳои моделсозӣ ба истифодабаранда имкони қарори мушаххас қабул карданро фароҳам меорад.

Дар асоси баҳодиҳии имкониятҳои функционалии мучтамаъҳои ҳисоббарор, ки дар боло оварда шудаанд, хулоса ва пешниҳодҳои зерин пешниҳод карда шудаанд:

1. Системаҳои ҳисоббарорӣ ба монанди *DIGSILENT (Power Factory)*, *RastrWin*, *DAKAR*, *PSS/E* имконоти васеъро барои таҳлили речаҳои кори шабакаҳои барқӣ фароҳам меоранд ва ин маҷмӯаҳо аз ҷиҳати маълумоти воридотӣ ва қобилияти дарчи натиҷаҳо имкониятҳои ба ҳам монандро доро мебошанд.

2. Ҳангоми ҳалли масъалаҳои вобаста ба равандҳои гузарандаи электромеханикӣ ва таҳлили ҷараёни расиши кӯтоҳ истифода бурдани комплексҳои *ETAP*, *DIgSILENT* ва *PSCAD* ба мақсад мувофиқ аст.

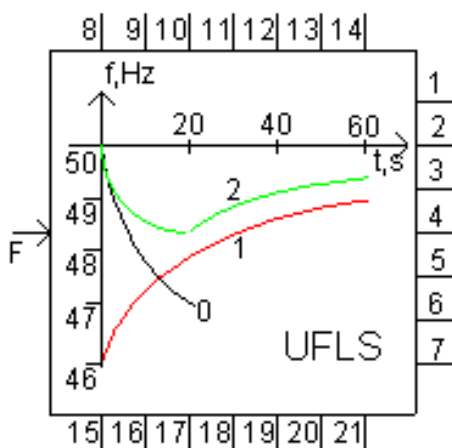
3. Муҷтамаъҳои *EUROSTAG*, *DAKAR* ва *Mustang* барои ҳисоб кардани равандҳои гузарандаи электромеханикӣ бо назардошти моделсозии мошинҳои синхронӣ, асинхронӣ ва хусусияти статикӣ динамикии борҳо тавсия дода мешавад. Ин муҷтамаъҳо имкон медиҳанд, ки амали ҳар гуна дастгоҳҳои автоматикаи зиддисадамавӣ ва танзими онҳо ба назар гирифта шавад.

Амалӣсозии дурусти принципҳои соҳатани боркамкунии басомадӣ баҳри таъмин намудани беҳатарӣ ва эътимодиятнокии қори системаи энергетикӣ нақши муҳимро бозида, ҷиҳати пешгирии ҳолатҳои хатарноке, ки ба пастшавии басомад рабт доранд (АББ-1) ва пешгирии вайроншавии китфчаҳои турбин (АББ-2) имконият фароҳам хоҳад овард. Мувофиқан, ҳангоми коркарди ҷузъи барномавии АББ, ки дар худ функсияҳои АББ-1, АББ-2 ва (ПТАБ) доро мебошад, моҳияти зерсистемаи автоматикаи зиддисадамавӣ ба назар гирифта шудааст.

Дар қисмати аввали боби аввал талаботҳои асосие, ки ба системаи АМПБ пешбинӣ шудаанд баррасӣ шудаанд. Иҷрои ин зина барои таҳлили дурусти тағйирёбандаҳо ва рамзҳои барномарезӣ дар забони Fortran ниҳоят муҳим мебошад. Ҳангоми коркарди ҷузъи барномавии коркардшуда усули силсилавии маълум бо номи модели Ройс истифода карда шудааст.

Дар рафти раванди силсилавии коркарди ҷузъи барномавии АББ зинаи дигар ин соҳтани ҷузъи барномавӣ мувофиқи талаботи АМПБ, ки дар зинаи пештара баррасӣ шуд, мебошад. Мақсади асосии ин зина аз интиҳоб ва соҳтани шакли графיקии намуди берунии равзанаи ҷузъи барномавии коркардшаванда ва интиҳоби даромад ва баромадҳои он (расми 1.1) иборат мебошад.

Зинаи дигар дар раванди коркарди ҷузъи барномавӣ ин навистани рамзҳо барои ҳар як функсия мувофиқи тағйирёбандаҳо мебошад. Ҳар як функсия (АББ-1, АББ-2 ва ПТАБ) коркард карда мешавад ва барои коршоёмӣ дар алоҳидагӣ санҷиш карда мешаванд. Баъди муваффақона санҷиш намудан функсияҳои зинаи дигар раванди коркард равона карда мешаванд.



Расми 1.1. – Намуди графיקии ҷузъи барномавии АББ

Бо мақсади таъмин намудани пазироии лозима ҳангоми идораи садамавии басомад дар ҷузъи барномавии коркардшуда имконияти истифодаи баромадҳо аз **1** то **21** баромад пешбинӣ шудааст. Адади баромадҳо бо параметри **Number of Outputs** аз тарафи истифодабаранда муайян карда мешавад. Маълум аст, ки чӣ қадаре, ки адади баромадҳо зиёд бошад, ҳамон қадар пазироиш дар кори АББ дида мешавад. Параметри **Number of Outputs** ба истифодабаранда имконияти интихоби қиматро баъд аз он, ки ба таври автоматӣ намуди берунии ҷузъи барномавӣ ва шумораи баромадҳои он тағйир меёбад, фароҳам меорад (расми 1.2).

General	
Number of Outputs	5
Frequency_Setting_1	48.8
Frequency_Setting_2	48.7
Frequency_Setting_3	48.6
Frequency_Setting_4	48.5
Frequency_Setting_5	48.4
Frequency_Setting_6	48.3
Frequency_Setting_7	48.2
Frequency_Setting_8	48.1
Frequency_Setting_9	48.0
Frequency_Setting_10	47.9

Расми 1.2. – Адади баромадҳо

Агар қимати **Number of Outputs** баробари 5 бошад, дар ин маврид баромадҳои **OUT1, OUT2, OUT3, OUT4** ва **OUT5** фаъл мешаванд ва ҳамзамон боқимонда баромадҳо **OUT6, ...,** ва **OUT21** бояд хомӯш шаванд, тавре, ки дар расми 1.2 нишон дода шудааст.

Ҷузъи барномавӣ қимати ду баромадро бо ҳам муқоиса менамояд (дар ин маврид қимати воридшавандаи басомадро нисбати қимати қиёсаки гузошташудаи он). Ҳангоми фарқи қиматҳо дар ин баромадҳо ҷузъи барномавӣ сигнали махсусро вобаста ба навъи баромад тавлид менамояд. Дар поён навиштаҷоти муқоисагар (компаратор) оварда шудааст:

```
#IF Number_of_outputs>=1
  IF ($Frequency.LT. $frequency_1) THEN
    $OUTPUT1 = 1
  ENDIF
```

Вазифаи гузошташуда риояи қиёсакро вобаста ба вақт барои АББ-1 ва навбати махсуси АББ талаб менамояд. Қиёсак бояд дар ҳудуди аз 0,15 то 0,3 сония бошад ва кори АББ-1-ро ҳангоми расиши кӯтоҳ дар шабакаи электрикӣ пешгирӣ намояд. Барои муқаррар намудани қиёсаки мазкур барои ҳар як навбат дар ҷузъи барномавӣ функсияи **Delay**, ки баробарии Лапласро моделсозӣ менамояд, истифода карда шудааст.

$$e^{-sT},$$

дар ин ҷо  $T$  – давомнокии таъхири вақт бо сония,  $s$  - оператори Лаплас.

Функсияи мазкур интиқоли пайдарпайии маълумотро дар дохили массив бо истифодаи таъхири вақт иҷро менамояд. Маълумоти воридшаванда ба элементи якуми ҷадвал ворид шуда, баъдан бо гузашти вақт функсия ба охири массив раван карда мешавад. Бо гузашти вақти гузошташуда функсия дастрасиро дар баромад фароҳам меорад. Дар поён навиштаҷоти барномавии функсияи таъхири вақт **Delay** оварда шудааст.

```
#SUBROUTINE EMTDC_XONDLAY 'Delay Function'
#STORAGE INTEGER:1 REAL:1
#LOCAL REAL RVD2_1 2
#LOCAL REAL RVD2_2 2
      RVD2_1(1) = FLOAT($OUTPUT)
      RVD2_1(2) = 0.0
      CALL
EMTDC_XONDLAY(0,$TIME,RVD2_1,RVD2_2)
      $OUTPUT = NINT(RVD2_2(1))
#ENDIF
```

Дар муҳити барномаи PSCAD барои ҷенкунии басомад ва қимати миёнаи шиддати сефаза аз ҷузъи **Frequency/Phase/RMS Meter** истифода мешавад. Ҷузъи мазкур барои ҳисоб намудани басомад ( $f$ ) ва қимати ( $V_{rms}$ ) пешбинӣ шудааст. Басомад бо ёрии ҷузъи барномавӣ ҳангоми аз нуқтаи сифрӣ гузаштани шиддати сефазаи воридшаванда ҳисоб карда мешавад. Раванди мазкур имкон медиҳад, тағйирёбии басомад вобаста ба вақт ба қайд гирифта шавад. Ин қимати ҳисобшудаи басомад барои ҳисоби 6 ҳудуди вақтӣ (б) истифода карда мешавад:

$$f(t) = \frac{1}{6} \cdot \frac{6}{\delta t_1 + \delta t_2 + \delta t_3 + \delta t_4 + \delta t_5 + \delta t_6};$$

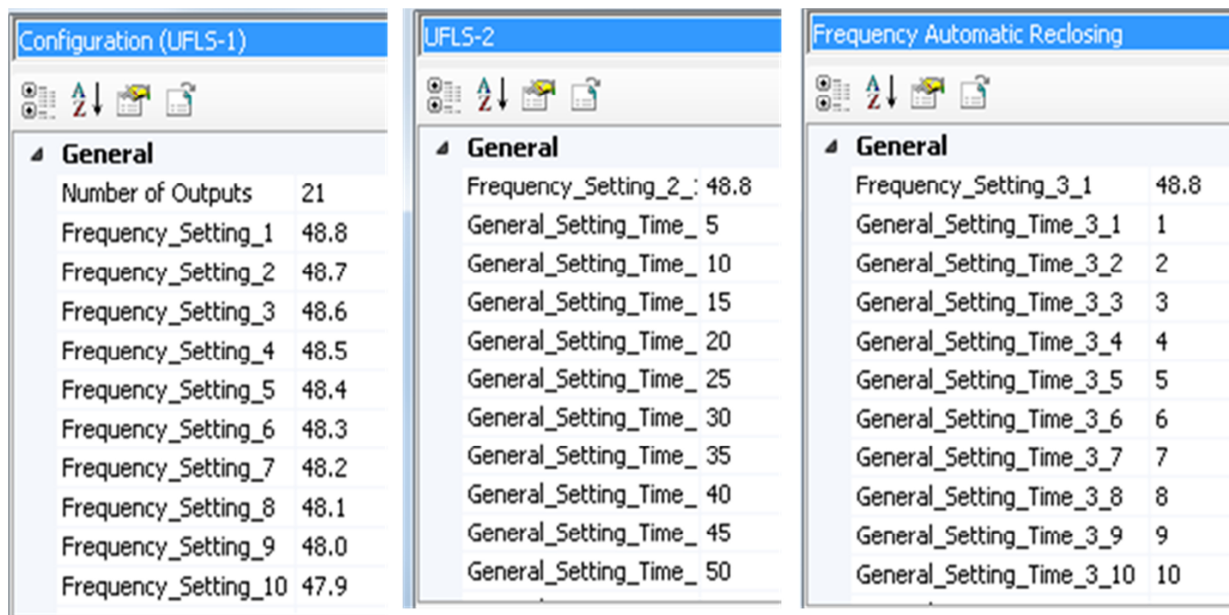
Ҷузъи барномавии АББ қимати ҷеншудаи басомадро, ки аз модели СЭ гирифта мешавад, коркард карда, дар асоси қиёсаҳои гузошташудаи басомад ва вақт сигнали мувофиқро барои идораи бор (васлак) тавлид менамояд.

Дар зер параметрҳои воридотии ҷузъи барномавии АББ оварда шудаанд.

<b>АББ-1 (UFLS-1)</b>			
<b>Number of Outputs</b>	Choice	Select 1 to 21	
<b>Time Delay</b>	REAL	Constant	Enter the required time delay [s].
<b>Frequency Setting_1</b>	REAL	Constant	Enter the frequency setpoint [Hz]
<b>АББ-2 (UFLS-2)</b>			
<b>Frequency Setting_2_1</b>	REAL	Constant	Enter the frequency setpoint [Hz]
<b>Time Delay</b>	REAL	Constant	Enter the required time delay [s].

ПТАБ (Frequency Automatic Reclosing)			
<b>Frequency Setting_3_1</b>	REAL	Constant	Enter the frequency setpoint [Hz]
<b>Time Delay</b>	REAL	Constant	Enter the required time delay [s].

Намуди берунии чузьи барномавии коркардшуда дар расми 1.1 ва 1.3 оварда шудааст. Чузьи барномавии сохташуда дорои мубрамияти хоса мебошад, чунки ба раванди моделсозии компютери системаҳои энергетикӣ мувофиқат мекунад. Истифодаи мучтамаъҳои ҳисоббарори компютерӣ имконият медиҳад, ки тадқиқоти нисбатан дақиқ вобаста ба амали системаи АМПБ анҷом дода шавад.



**Расми 1.3.** – Равзанаи танзими чузьи барномавии АББ

Чузьи барномавии коркардшуда мукамалсозии муҳим барои мучтамаъи ҳисоббарор мебошад, ки на танҳо кори онро беҳтар менамояд, худуди функционалии онро васеъ менамояд. Дар баробари ин ҳоҷат ба зикр аст, ки хусусияти дигари ин чузьи барномавӣ дар он аст, ки он дар асоси принсипи иҷрои системаи АББ, ки дар СЭ Тоҷикистон ва дигар кишварҳои пасошуравӣ роҳандозӣ шудаанд, мувофиқ карда шудааст.

Чузьи барномавии мазкурро метавон ба дигар мучтамаъҳои ҳисоббарор ба монанди MATLAB/Simulink мувофиқ ва истифода кард. Навиштаҷоти барномавии чузьи коркардшударо ба осонӣ метавон дар бо дигар мучтамаъҳои ҳисоббарор истифода кард ва ин аз универсалӣ будани он дарак медиҳад.

**Дар боби дуюм «Омӯзиши хусусиятҳои системаи энергетикӣи Тоҷикистон ва таҳияи модели компютери он»** тавсиф, хусусиятҳо, сохтор ва иерархия, нишондиҳандаҳои асосии тараққиёти СЭ ҚТ баррасӣ мешаванд. Азбаски СЭ-и ҚТ асосан аз нерӯгоҳҳои барқии обӣ (НБО) иборат мебошад, мутаносибан хусусиятҳои СЭ бо манбаъҳои гидравликии истехсол ба назар гирифта шуданд.

Моделҳои элементҳои СЭ ва дастгоҳҳои автоматикаи зиддисадамавӣ (АЗ) барои таҳлили равандҳои гузаранда истифода шуда, модели компютери СЭ ҚТ бо назардошти қорӣ намудани объектҳои нав коркард карда шудааст, ки он имконияти ҳисоб ва таҳлили намудани речаҳои муқаррарӣ ва гузарандаро фароҳам меорад. Дар қорҷубаи боби дуюм санҷиши қоршоямии модели қоркардшуда анҷом дода шудааст.

Хусусияти СЭ-и ҚТ дар он аст, ки дар қумхурӣ ЭЭ асосан аз ҳисоби НБО ҳосил карда мешавад. Мутобиқан ҳангоми омӯзиши равандҳо вақти доимии СЭ  $T_j$ , дар доираи 6-10 с истифода шудааст, ки барои СЭ бо ҳиссаи бештари НБО мувофиқ аст. Дар боби мазкур тавсиф ва моделҳои танзимгари автоматии мошинҳои синхронӣ, хусусиятҳои истифодаи моделҳои стандартии танзимкунанда ва борҳои электрикӣ оварда шудаанд.

Барои таҳлили равандҳои гузаранда тавсияҳо оид ба истифодаи қузъҳои алоҳида, ки имкони роҳандозии ҳолатҳои садамави стандартиро барои баҳодихии навбатии қори дастгоҳҳои автоматикаи зиддисадамавӣ фароҳам меорад, таҳия шудаанд.

Равандҳои баррасишаванда дар СЭ-и дорои тарҳи мураккаб бо муодилаҳои дифференсиалии ғайрихаттии тартиби баланд ифода карда мешаванд, ки барои онҳо усули ягонаи ҳалли аналитикӣ вучуд надорад. Солҳои охир барои ҳалли чунин муодилаҳо муҷтамаъҳои барномавии компютерӣ васеъ истифода карда мешаванд.

Дар асоси таҳлили СЭ-и ҚТ модели эквивалентии СЭ-и ҚТ дар барномаи PSCAD бо истифода аз маълумот ва параметрҳои таҷрибавии ченкардашудаи СЭ-и ҚТ таҳия карда шуд. Модели имтатсионии генераторҳои синхронӣ дорои моделҳои идораи автоматии ангешиш (ИАА) ва идораи суръати гардиши турбинаҳои гидравликӣ мебошанд. Хусусияти бории СЭ, таъсири танзимкунандаи борӣ ва вақти доимии механизмҳои борӣ баррасӣ карда шуданд.

Дар қор параметрҳои реалии ИАА-и неругоҳҳои барқии СЭ-и ҚТ истифода шудаанд.

Амали идораи автоматии ангешиш бо ворид кардани сигналҳои мувофиқ ба инҳирофҳои параметрҳои речавӣ ва ҳосилаҳои онҳо тақлид карда мешавад.

Борҳои электрикӣ бо хусусиятҳои статикӣ ва динамикӣ ифода карда шудаанд. Сарборӣ тавре тахмин карда шуд, ки он аз қиҳати физикӣ дуруст ва ба қадри имкон ба воқеият наздиктарини рафтори тавоноии истеъмолкунандаро ҳангоми тағйир додани басомад инъикос кунад.

Моделҳои гидрогенераторҳои синхронӣ бо моделҳои алоҳидаи эквивалентӣ нишон дода шудаанд, ки дар онҳо маълумотҳои реалии ҳар як неругоҳ ба назар гирифта шудааст. Дар модели НБО Роғун, Норак, Бойғозӣ, Сангтуда-1, Сангтуда-2, Сарбанд, Қайроққум, МБГ-1 ва МБГ-2-и ш. Душанбе, зеристгоҳҳои системавӣ 500-220-110 кВ (расми 2.1) ба назар гирифта шудаанд. Бо истифода аз функцияҳои васеи барномаи PSCAD, модели қоркардшуда имкон медиҳад, ки дар қараёни симулятсия, иҷрои онро бо параметрҳои воқеии объекти симулятсияшаванда тафтиш, арзёбӣ ва



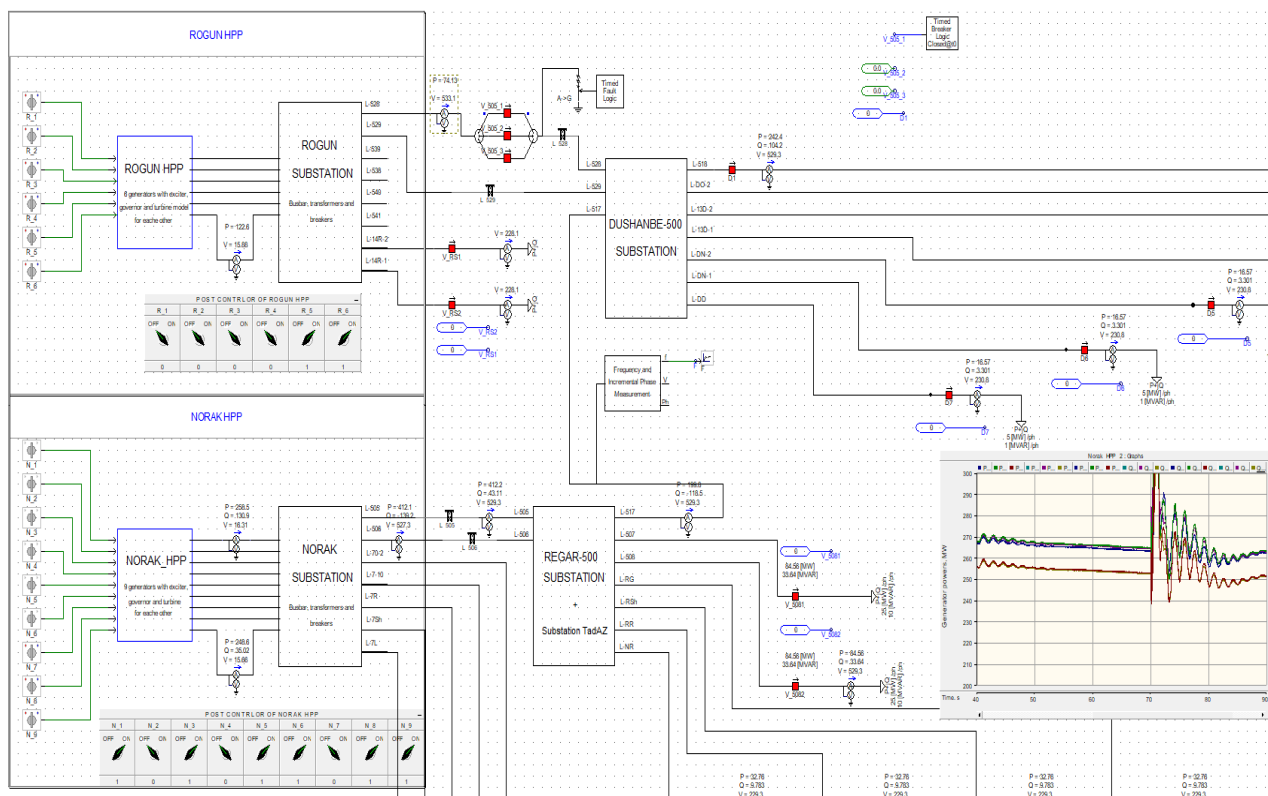
мукоиса карда шавад. Мувофиқан, саҳеҳияти он бо кори беҳатои он ҳангоми ба кордарорӣ ва моделсозӣ баҳо дода шудааст.

Бояд қайд кард, ки модели коркардшуда имкон медиҳад, ки ҳолати ибтидоии модел бодикқат таҳлил карда шавад ва қиматҳои ҷорӣ бо маълумоти воқеӣ муқоиса карда шаванд.

Ин хусусият дурустии оғози кори агрегатҳо, баҳодихии тавсифоти берунии агрегатҳоро таъмин менамояд.

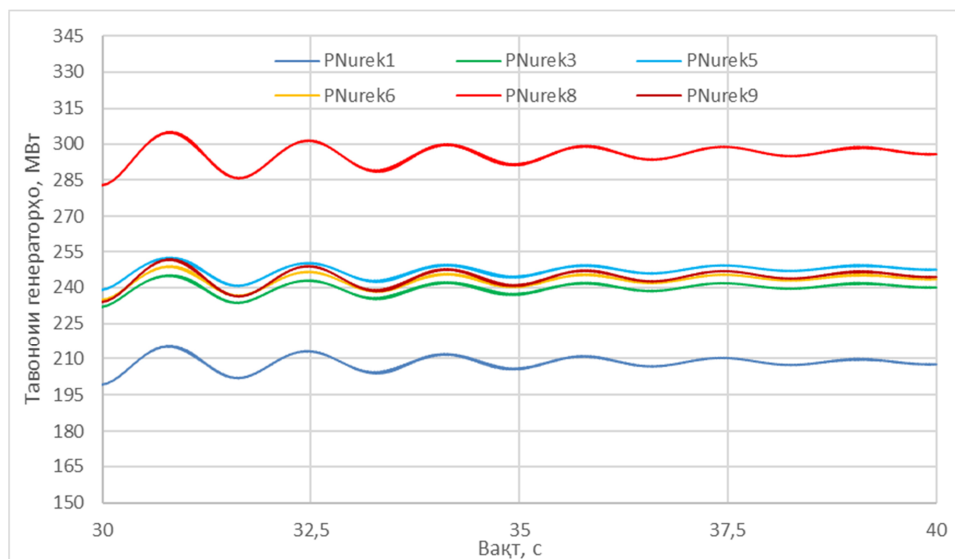
Имконияти назорати параметрҳои СЭ ба монанди оғози кори генераторҳо, қиматҳои шиддат дар гиреҳҳои система, ҷараён ва тавоноӣ тавассути хатҳои интиқоли барқ аз мувофиқати кори модели сохташударо бо талаботи пешбинишуда шаҳодат медиҳад.

Дар қисмати зерини қор ҳамчун речаи баррасишаванда, речаи максималии зимистона интиҳоб карда шуд, ки аз нуқтаи назари равандҳои гузаранда вазнинтарин ба ҳисоб меравад. Маълумоти воқеии аввалияи техникӣ истифода бурда шуда, речаи бори электрикӣ дар модел аз рӯи маълумот ва натиҷаҳои ҷенкардашуда дар нуқтаҳои барқии СЭ ҚТ дар речаи максималии зимистона танзим карда шуданд.

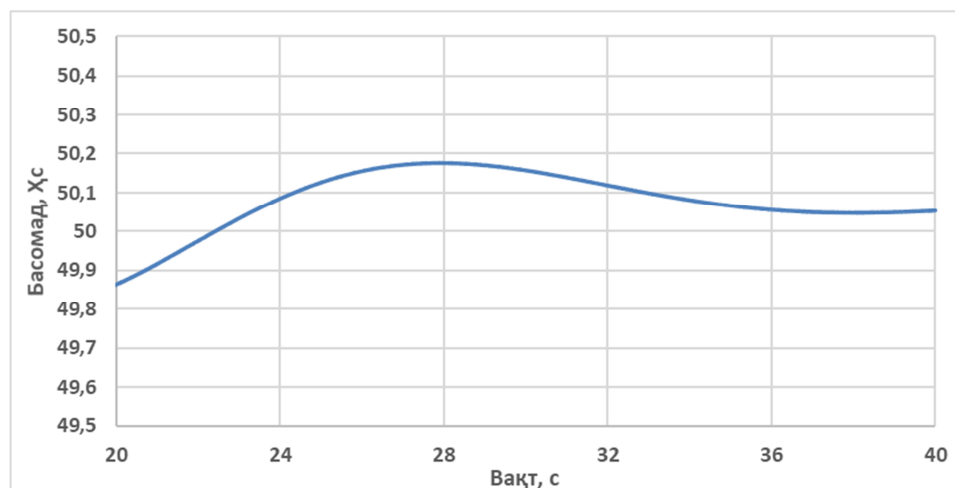


**Расми 2.1.** – Қисми модели СЭ ҚТ, гериҳи НБО Роғун, НБО Норак, ЗБ Регар -500, ЗБ Душанбе-500 ва ХИБ мувофиқ

Натиҷаҳои моделсозии речаи устувор дар СЭ, истехсоли тавоноии фаъоли агрегатҳои НБО-и Норак ва қимати басомад дар СЭ дар речаи муқаррарии СЭ дар расмҳои 2.2 ва 2.3 нишон дода шудаанд.



**Расми 2.2**–Истеҳсоли тавоноии фаъол дар агрегатҳои НБО-и Норақ



**Расми 2.3** – Қимати басомад дар СЭ

Барои муқоисаи натиҷаҳои моделсозӣ дар речаи муқаррарии СЭ бо натиҷаҳои ченшавандаи таҷрибавӣ истеҳсоли тавоноии фаъол, ғайрифавол ва сатҳи шиддати агрегатҳои НБО Норақ ва Роғун дар ҷадвали 2.1 мухтасар оварда шудаанд.

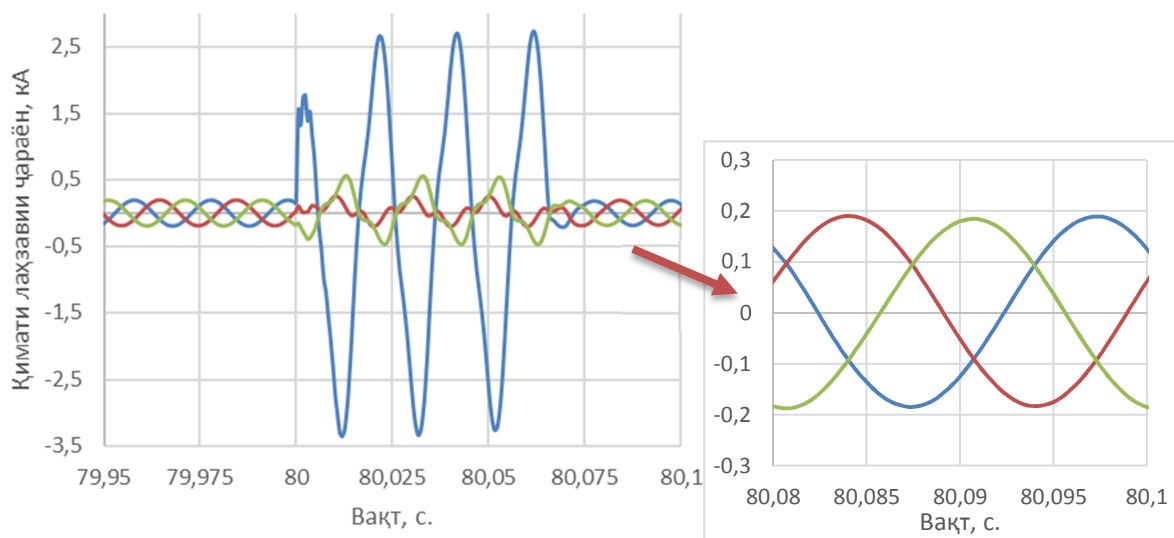
Тавре, ки дар ҷадвали 2.1 дида мешавад, натиҷаҳои моделронӣ тақрибан бо маълумот ва натиҷаҳои ченшудаи таҷрибавӣ дар нерӯгоҳҳои барқии СЭ ҚТ дар ҳолати максималии мавсими зимистона мувофиқат мекунанд, ҳатогии моделиронӣ аз 1,06 то 4,76 % аст, ки дурустии маълумоти воридотӣ ва кифоя будани моделрониро тасдиқ менамояд.

**Ҷадвали 2.1.** – Муқоисаи қиматҳои ченшудаи таҷрибавӣ дар нерӯгоҳҳои барқии СЭ ҚТ дар речаи максималии мавсими зимистона (18.12.2020) бо натиҷаҳои, ки дар модели коркардшудаи СЭ ҚТ ба даст оварда шудаанд

НБО-и Норақ									
№	U, кВ			P, МВт			Q, МВАр		
	Қим. воқеӣ	Натиҷа аз модел	Фарқият Δ бо %	Қим. воқеӣ	Натиҷа аз модел	Фарқият Δ бо %	Қим. воқеӣ	Натиҷаи модел	Фарқият Δ бо %
Г-1	15,2	15,6	2,56	210	207,8	1,06	50	51,2	2,34

Г-3	15,1	15,5	2,58	240	243,7	1,51	70	68,5	2,18
Г-5	15,2	15,52	2,06	250	247,2	1,13	50	52,3	4,39
Г-6	15,6	16,01	2,56	250	245,3	1,88	60	58	3,4
Г-8	15,3	15,67	2,36	300	295,6	1,49	60	58,1	3,27
Г-9	15,4	15,6	1,28	250	246,7	1,32	50	52,5	4,76
<b>НБО-и Роғун</b>									
Г-5	14,9	15,5	3,87	120	116,7	2,8	25	24,3	2,88
Г-6	14,9	15,5	3,87	120	116,8	2,8	25	24,3	2,88

Дар модели коркардшудаи СЭ ҚТ, инчунин тақлиди расиши кӯтоҳи якфаза дар наздикии тахтасими НБО Роғун дар хати интиқоли барқии 500 кВ – Роғун-Душанбе-500 (Л-525) иҷро карда шудааст, ки он аз ҳимояи асосии ХИБ 500 кВ бо ҳимояи дифференсиалии хаттӣ хомӯш гардида, бо кори дастгоҳи пайвастанандаи такрорӣ автоматики якфаза (ПТАЯ) бомуваққият дар шароити равандҳои гузаранда пайвастан карда мешавад. Модели коркардшуда маълумотҳои воқеии ибтидоиро ба монанди қиёсаҳои вақтии дастгоҳҳои ҳимояи релей, ки дар объекти баррасишаванда насб карда шудаанд, мавриди ҳисоб қарор медиҳад. Вақти оғози вайроншавӣ дар 80-ум сония (расми 2.4) ба амал меояд, ҳимояи асосии хати ҳавоии 500 кВ аз тарафи НБО-и Роғун ба кор даромада, васлаҳои В-528 ва В1-ГТ5-ро хомӯш менамояд. Расиши кӯтоҳ бартараф карда шуда, дастгоҳи ПТАЯ ба кор даромада, васлаҳои баландшиддатро ба кор меандозад.



**Расми 2.4.** – Осциллограммаҳои тағйирёбии ҷараён хангоми расиши кӯтоҳи якфаза дар ХИБ Роғун-Душанбе-500 бо қатъи минбаъда ва кори бо муваффақияти ПТАЯ

Натиҷаҳои таҳқиқот нишон доданд, ки дар сурати ба амал омадани ин гуна вайроншавӣ устувории динамикии гиреҳи асосии СЭ вайрон намешавад.

Модели таҳияшуда ҳамчун воситаи таҳқиқот метавонад хизмат кунад ва қобилияти татбиқи дигар намуди вайроншавиҳои нормативиро дорад, ки дар қисмҳои СЭ ҚТ имкони ба амал омаданро доранд.

Беҳамтоии модели коркардшуда дар он аст, ки он аз рӯи маълумоти воқеии техникаи сохта шуда ва мувофиқи СЭ ҚТ ҷурсозӣ карда шудааст.

Модели мазкур метавонад дар омӯзиши ҳам речаҳои муқаррарӣ ва ҳам равандҳои гузаранда дар СЭ истифода шавад.

Ҳамин тариқ модели коркардшуда натиҷаи таҳқиқоти илмии гуногунҷабҳа мебошад, ки дар асоси маълумоти техникийи воқеии объектҳо ва таҷҳизоти системаи энергетикӣи ҚТ коркард карда шудааст. Модели мазкурро метавон ҳангоми таҳқиқотҳои речаҳои муқаррарӣ ва гузаранда дар системаҳои энергетикӣ истифода кард.

**Дар боби сеюм «Баҳогузориҳои самаранокии модел ва ҷузъи таҳияшуда»** корпазирии ҷузъи барномавии АББ бо моделсозии математикӣ санҷида шуда, санҷиши ҷузъи барномавии таҳияшудаи дастгоҳи АББ бо истифода аз моделсозии физикӣ ва математикӣ баррасӣ шудааст.

Барои ба даст овардани натиҷаҳо дар модели математикӣ, ки дар боби дуюм таҳия шудааст ва барои санҷиши кори ҷузъи таҳияшудаи АББ амалҳои зерин иҷро карда шуданд:

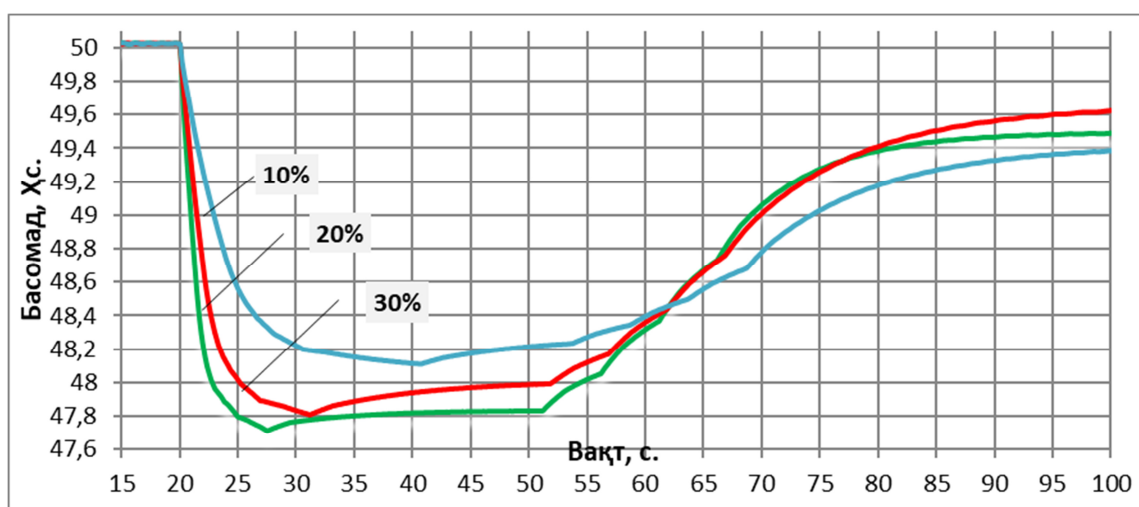
1) Санҷиши амиқи тавозуни тавоноии иқтидор дар системаи энергетикӣ, ҷимати номиналии басомад ва тавоноии истеъмолии бори электрикӣ то амалишавии вайроншавӣ, ки дар 20-ум сонияи моделронӣ роҳандозӣ карда мешавад.

2) Дар ҷузъи барномавии коркардшудаи дастгоҳи АББ муқаррар намудани қиёсаҳои басомад ва вақт.

Илова ба талабот оид ба пешгирии пастшавии босуръати басомад ва баланд бардоштани он то минтақаи диспетчерӣ низ ба зимаи АББ вогузор карда шудааст. Ин талабот ҳангоми истифодаи ҷузъи нави барномавии АББ бомувафакият иҷро мешавад.

Ҷузъи барномавии таҳияшудаи АББ ба талаботи стандарти ягонаи идораи садамавии СЭ ҚТ ва СЭ Русия комилан мувофиқат мекунад ва кори он бо модели математикии ҷорӣ дар таҷрибаҳои муқоисавии сершумор тасдиқ карда шуда, бо вариантҳои васеи параметрҳои таъсиркунанда ҳангоми кори АББ санҷида шудааст.

Оссиллограммаҳои моделии тағйирёбии басомад ҳангоми норасоии тавоноӣ 10, 20 %, 30 % дар расми 3.1 нишон дода шудаанд.

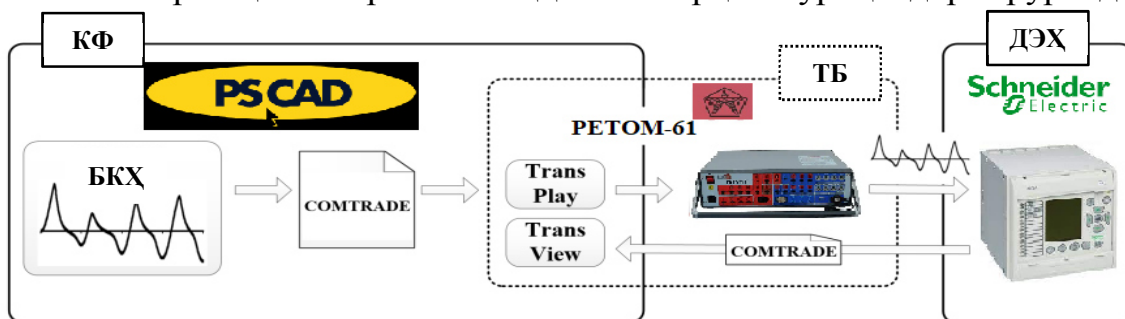


**Расми 3.1.** – Вобастагии  $f(t)$ ,  $T_j = 10$  с,  $K_H = 1,5$ ,  $\Delta t_{\text{АББ}} = 0,3$  с.

Бо истифода аз модели, ки дар мучтамаъи ҳисоббарорӣ сохта шудааст, речаҳое, ки барои омӯзиши кори дастгоҳи физикии ДЭХ заруранд, тақлид карда мешаванд. Таҳлили кори ДЭХ дар кори баррасишуда дар компютери фардӣ бо истифода аз барномаи махсус анҷом дода шуд. Барои ба даст овардани сигналҳои шиддат ва басомад, симулятори барномавии РЕТОМ-61 истифода шуд, ки баъдтар ин сигналҳо барои таҷрибаҳо истифода шуданд.

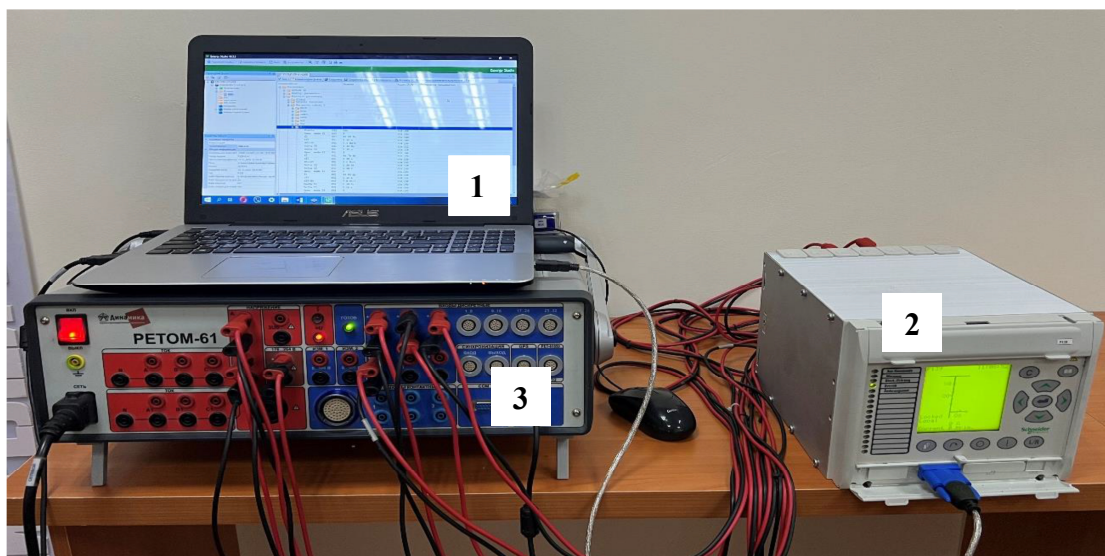
Коркарди модели шабака дар асоси симулятори барномавӣ имкон медиҳад, ки дастгоҳҳои ҷимояи релей омӯхта ва санчида шаванд. Нақшаи умумии корӣ дар расми 3.2 нишон дода шудааст.

Озмоиши дастгоҳҳои ҷимояи релей бо истифода аз мучтамаъи озмоиши таҷҳизот ва барнома дар кафедраи ҷимояи релей ва автоматикунонии системаҳои энергетикӣ Донишгоҳи техникӣ Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ гузаронида шуд. Ин таҷҳизот бо усули моделсозии таҷрибавӣ имкон медиҳад, ки сигналҳои информатсионии дохилшавӣ барои ҷимояи релеии таҷҳизоти барқии пуриктидор заруранд.



**Расми 3.2.** – Мучтамаъи барномавӣ-таҷҳизоти санчишӣ бо давраи кушода барои гузаронидани санчишҳо

Стенди озмоишӣ, ки дар расми 3.3 нишон дода шудааст аз компютер 1, ки дорои барномаи махсуси РЕТОМ-61 ва маҷмуи барномаҳо барои назорат ва идораи таҷҳизоти ҷимояи релеии рақамии силсилаи МiCOM мебошад, барои назорат ва идораи мучтамаъи комплексӣ буда, имконияти ҷурсозӣ ва танзими дастгоҳи электронии хушмандро фароҳам меорад.

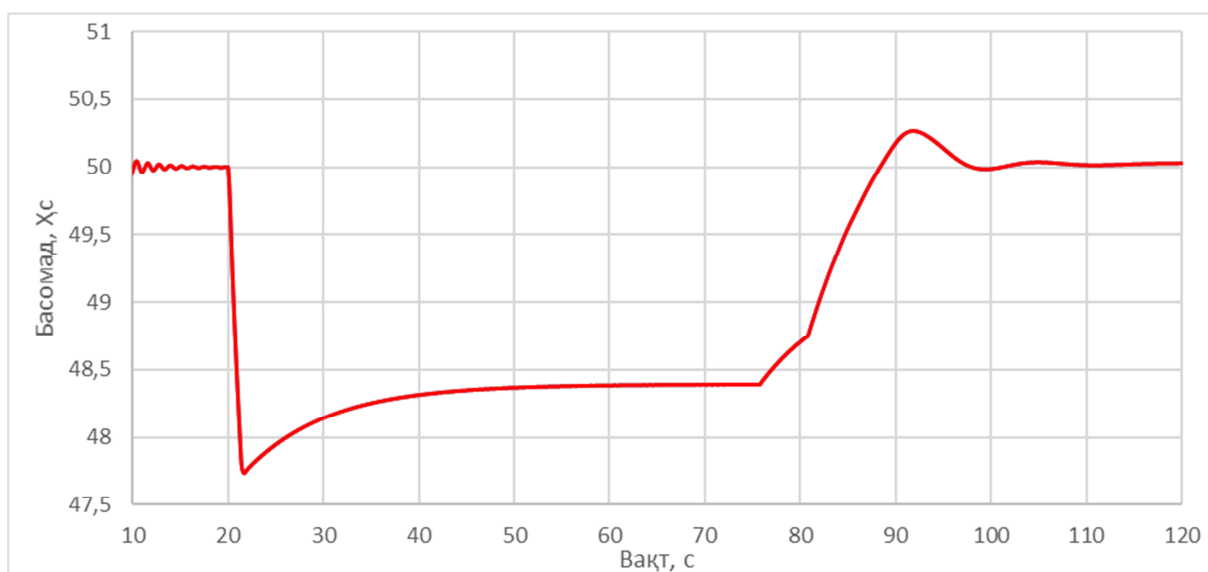


**Расми 3.3.** – Мучтамаъи дастгоҳҳои барномавии санчишӣ



Бо рақами 2 (дар расми 3.3) таҷҳизоти рақамии ҳимояи релеии истеҳсоли ширкати MiCOM P139-ро нишон дода шудааст, ки ба он қиёсақҳо ва мантиқи АББ ворид карда шудааст. Бо рақами 3 бошад мучтамаъи санҷишии РЕТОМ-61, ки бо ёрии он чузъи барномавии таҳияшудаи АББ бо роҳи сабт дар мучтамаъи барномавӣ - Comtrade-файлҳо санҷида шудааст.

Бо истифода аз модели дар боби дуум тавсифшуда вайроншавӣ бо норасоии тавоноии фаъоли баробар ба  $\Delta P=30\%$  бо вақти доимии СЭ -  $T_j=6$  с, коэффитсиенти таъсири танзимкунанда дар бори электрикӣ -  $K_n=1,5$  ва бо таъхири вақт дар канали хомӯшавии бор -  $\Delta t=0,3$  с. амалӣ карда шуд. Дар расми 3.4 оссиллограммаи тағйирёбии басомад вобаста ба вақт хангоми норасоии тавоноии фаъол дар ноҳияи электрикии баррасишаванда нишон дода шудааст.



**Расми 3.4.** – Вобастагии  $f(t)$

Ҳангоми ба таври ногаҳонӣ сар задани норасоии тавоноии фаъол ва амали АМПБ қисме аз бори электрикӣ хомуш шуда, басомад метавонад баръакс то 50 Ҳс баланд шавад. Бо мақсади омӯзиши раванди мазкур моделронӣ анҷом дода шуд, ки натиҷааш оссиллограммаҳое, ки тағйироти басомадро дар системаи энергетикӣ нишон медиҳанд, дарҷ гардидааст.

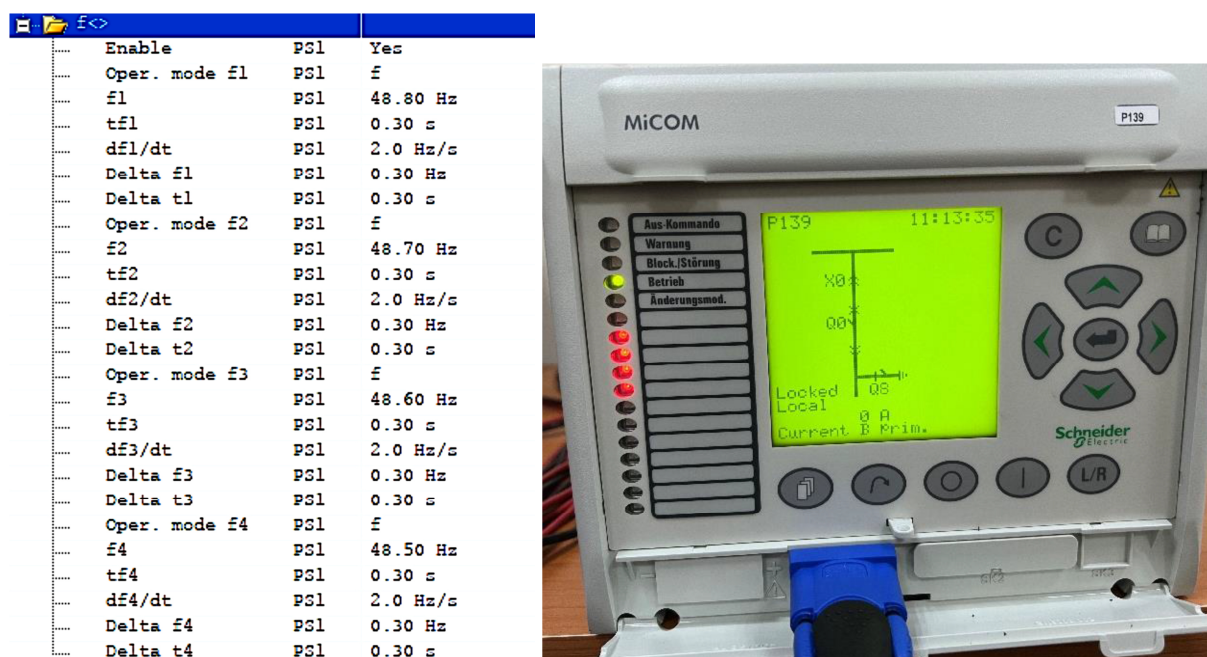
Дар ин қисмати кор оссиллограммаҳои шиддат ва басомад барои речаҳои додашудаи кори шабакаҳо — махсусан ҳангоми кори системаи АМПБ ба даст оварда шуданд.

Comtrade-файлҳои сабтшуда барои табдили минбаъда ба сигнали физикӣ барои санҷиши ДЭҲ истифода мешаванд. Қиёсаки корандозӣ бо басомад хурдтар аз басомади номиналӣ гузошта шудааст, яъне ДЭҲ-и навъи Р139 назорат мекунад, то басомад аз ҳадди муқаррагардида поён нагузарад. Ҳангоми гузариш аз қиёсаки муқаррагардида ҳисоби таъхири вақти гузошташуда оғоз меёбад.

Пас аз ворид кардани файли интихобшуда, каналҳои физикии баромади мучтамаъи дастгоҳи барномавии санҷишӣ барои мувофиқат ба каналҳои РЕТОМ-61 таъин карда шуданд ва барои кор пешниҳод омода шуданд.

Дар расми 3.5 намуди берунии ДЭХ-и ҳимояи релей ва автоматика нишон дода шудааст, ки дар он қиёсақҳо ва схемаи кори АББ ворид карда шуда буд, чароғҳои сурх нишон медиҳанд, ки ҳамаи 4 навбати АББ кор кардаанд ва алгоритми пешбинӣ шуда дуруст амал намудааст.

Дар рафти тадқиқот натиҷаҳои мушаххаси марбут ба санҷишу аниққунии чузби барномавии коркардшудаи АББ ба даст омадаанд. Усули асосии таҳқиқот усули моделсозии таҷрибавӣ буда, дар баробари ин санҷиш бо усули таҷрибаи ҳисоббарорӣ ва таҷрибавӣ анҷом дода шудааст.



Расми 3.5. – Қиёсақҳои АББ дар ДЭХ ва кори навбатҳои АББ

Дар тадқиқоти мазкур таҳлили усули санҷиши таҷҳизоти ҳимояи релей бо мақсади баланд бардоштани самаранокии таҷҳизоти АББ ба таври мушаххас пешниҳод шудаанд.

Истифодаи мучтамаъи дастгоҳҳои барномавии санҷишӣ ҳангоми санҷиши дигар дастгоҳҳои ҳимояи релей бо истифода аз сигналҳои ҳисобшудаи иттилоотии санҷишӣ ва дастгоҳи озмоишии РЕТОМ-61 воситаи самаранок барои омӯзиши равандҳои электромагнитӣ дар дастгоҳҳои энергетикӣ ба ҳисоб меравад. Ҳамин тариқ, дар боби сеюм усули санҷиши АББ бо истифода аз мучтамаъи дастгоҳҳои барномавии санҷишӣ таҳия карда шудааст, ки он имкон медиҳад ДЭХ, ки вазифаҳои АББ-ро амалӣ мекунад, озмоиш карда шаванд.

## ХУЛОСА ВА НАТИҶАҲОИ АСОСИ

Дар рафти иҷроиши кори диссертатсионӣ хулоса натиҷаҳои зерини илмӣ ба даст оварда шуданд:

1. Мучтамаъҳои пешрафтаи ҳисоббарори муосир, ки барои моделсозии СЭ истифода мешаванд, таҳлил карда шуда ва тавсияҳои асоснок оид ба вариантҳои интихоби мучтамаъҳои моделсозӣ пешниҳод карда шуданд [1-М].

2. Ҷузъи барномавии АББ бо назардошти ҳама талаботҳои техникий он, ки дар ҳуҷҷатҳои меъёриву техникӣ вобаста ба танзими автоматикаи маҳдудкунандаи пастшавии басомад пешбинӣ гардидаанд, коркард карда шудааст [2-М], [5-М], [10-М], [13-М].

3. Хусусиятҳои СЭ ҚТ омӯхта шуда, модели компютери он бо назардошти объектҳои нави ба истифода додашуда таҳия карда шуд [6-М], [12-М].

4. Қобилияти кори ҷузъи коркардшудаи АББ тавассути моделсозии математикӣ санчида шуда, бо усули моделсозии таҷрибавӣ тасдиқ карда шуд [3-М], [4-М].

5. Усули санчиши АББ бо истифода аз мучтамаъи дастгоҳҳои барномавии санчишӣ таҳия карда шудааст, ки имкон медиҳад, ДЭХ, ки вазифаҳои АББ-ро иҷро мекунад, санчида шаванд [3-М].

### **ТАВСИЯҲО БАРОИ ИСТИФОДАИ АМАЛИИ НАТИҶАҲО**

1. Ҷузъи барномавии коркардшуда дар лоиҳакашии системаи АББ барои СЭ, ки дар онҳо эҳтимоли сар задани норасогии тавонӣ мавҷуд аст ва омӯзиши равандҳои гузаранда, ки ба пастшавии садамавии басомад дар СЭ алоқаманданд, истифода мешавад.

2. Усули таҳияшудаи озмоиши АББ бо истифода аз системаи санчиши идорашавандаи компютерӣ дорой имкониятҳои санчиши ДЭХ-и вазифаҳои АББ-ро амаликунанда буда, онро хангоми тафтиши иншоотҳои нав ва гузаронидани санчишҳои профилактикии пешбинишуда истифода бурдан мумкин аст.

3. Тавсияҳои техникий илман асоснок кардашуда оид ба истифодаи ҷузъи АББ дар муҳити системаҳои барномавӣ барои гузаронидани таҳқиқи тағйирёбии басомад дар СЭ таҳия карда шудаанд.

Натиҷаҳои илмӣ ба дастамада дар раванди таълимӣ барои иҷрои корҳои илмӣ магистрҳои ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ (санад оид ба татбиқи натиҷаҳо дар раванди таълим дар курсҳои «Масъалаҳои махсуси автоматикаи зиддисадамавӣ» ва «Автоматикаи системаҳои энергетикӣ»-и ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ аз 02 октябри соли 2023) ва Департаменти истехсоли барқу гармии ҚСК «Барқи Тоҷик» истифода бурда мешаванд (санад оид ба татбиқи натиҷаҳои корӣ №6/1203-870 аз 06 юни соли 2023 ҚСК «Барқи Тоҷик»).

Ҳамин тариқ, дурнамои коркарди минбаъда дар самти кори илмӣ анҷомдодашуда васеъ мебошад. Таҳлили анҷом додашуда имкон медиҳад, ки ҷузъи барномавии коркардшударо дар тадқиқотҳои илмӣ дар самти идораи зиддисадамавии бори электрикӣ истифода карда шавад. Хулосаҳои бо истифода аз технологияҳои рақамӣ асоснок кардашуда имкони баланд бардоштани эътимодияти системаҳо ва самаранокии идораи равандҳои садамавиро пеш меоранд. Ғайр аз ин, ҷузъи барномавии коркардшударо метавон хангоми мукамалсозии функцияҳои мучтамаъҳои барномавии ҳисоббарор истифода кард.



## ФЕҲРИСТИ ИНТИШОРОТИ ИЛМӢ АЗ РӮИ МАВЗӮИ ДИССЕРТАТСИЯ:

*Мақолаҳои нашришуда дар маҷаллаҳои илмӣ аз ҷониби Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон тавсияшуда:*

[1-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Анализ возможностей современных вычислительных моделирующих комплексов для решения электротехнических задач/ Б.М. Гиёев, Б.Ф. Ибрагимов, А.М. Расулов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. № 4 (56) 2021.–С. 6–13.

[2-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Разработка программного компонента АЧР среды вычислительного комплекса PSCAD / Б.М. Гиёев, Б.Ф. Ибрагимов// Научно-практическое издание «Релейная защита и автоматизация» – Москва – 2022. – №04(49). – С.49-53.

[3-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Верификация программного компонента АЧР с использованием метода экспериментального моделирования/ Б.М. Мирзозода, Б.Ф. Ибрагимов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. № 4 (60) 2022. – С. 44–51.

[4-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Проверка работоспособности разработанного компонента АЧР путем математического моделирования / Б.Ф. Ибрагимов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. № 1 (61) 2023. – С. 52–60.

*Мақолаҳо дар маҷаллаҳои илмӣ, маводи конференсияҳои минтақавӣ ва байналмилалӣ:*

[5-М]. **Bakhtiyor F. Ibragimov.** Modeling of the UFLS using the new component of the UFLS in the PSCAD/EMTDC software/ Borbad M. Giyoev, Bakhtiyor F. Ibragimov, Abduvakil M. Rasulov, Manizha M. Mahmamin, Bahodur A. Gayurov. // 5th REEPE 2023 «International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering»- Moscow – 2023.

[6-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Совершенствование технических средств и принципов выполнения противоаварийной автоматики энергосистемы Таджикистана / Б.М. Гиёев, Б.Ф. Ибрагимов, А.М. Расулов // Материалы международной научно-практической конференции “Перспектива развития науки и образования” – Душанбе – 2019. – С. 98-100.

[7-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Разработка модели токовой защиты нулевой последовательности в программном комплексе PSCAD / Б.Ф. Ибрагимов, Дж.Ф. Ибрагимов, Х.Х. Зайнуддинов // Материалы международной научно-практической конференции “Энергетика: Состояние и перспективы развития” – Душанбе – 2021. – С. 259-263.

[8-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Разработка алгоритма дистанционной защиты на линиях питающей сети 500 кВ в программном комплексе PSCAD / Б.М. Мирзозода, Б.Ф. Ибрагимов, Дж.Ф. Ибрагимов, Х.Х. Зайнуддинов // Материалы международной научно-практической конференции “Энергетика:

Состояние и перспективы развития” – Душанбе – 2021. – С. 264-268.

[9-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Анализ вариантов релейной защиты автотрансформатора 500/220/10 кВ на базе микропроцессорных терминалов / Б.М. Мирзозода, Б.Ф. Ибрагимов, Дж.Ф. Ибрагимов, Х.Х. Зайнуддинов // Материалы международной научно-практической конференции “Энергетика: Состояние и перспективы развития” – Душанбе – 2021. – С. 269-272.

[10-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Моделирование работы АЧР с использованием нового компонента АЧР в среде PSCAD/EMTDC / Б.Ф. Ибрагимов // Тезисы докладов. Двадцать девятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиотехника, Электротехника и Энергетика»– Москва – 2023. – С. 1207.

#### *Монография ва дастурҳои таълимӣ*

[11-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем. Лабораторный практикум для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» / Б.А. Гаюров, **Б.Ф. Ибрагимов** / Национальный исследовательский университет «МЭИ», издательство МЭИ, ISBN 978-7046-2519-3– Москва – 2022. – С. 82.

#### *Барномаҳои барои МЭХ ба қайд гирифташуда*

[12-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Авторское свидетельство ТЖ №158. «Компьютерная модель для расчета и анализа установившихся и переходных режимов энергосистемы Таджикистана» / Б.М. Мирзозода, Б.Ф. Ибрагимов, А.М. Расулов, М.М. Махмадсаидзода // Зарегистрировано в Министерстве культуры Республики Таджикистан 16 марта 2023г.

[13-М]. **Ибрагимов Б.Ф.** Авторское свидетельство ТЖ №159. «Программный компонент для моделирования частотной защиты энергосистемы» / Б.М. Мирзозода, Б.Ф. Ибрагимов, А.М. Расулов //Зарегистрировано в Министерстве культуры РТ 16 марта 2023г.

## ШАРҲИ МУХТАСАРИ

диссертатсияи Ибрагимов Бахтиёр Фатхуллоевич дар мавзӯи «Моделсозӣ ва баҳодихии ҳолати системаи электроэнергетикӣ дар шароити садамавии алоқаманд ба норасогии тавоноии фаъол (дар мисоли системаи энергетикии Тоҷикистон)», ки барои дарёфти дараҷаи илмии доктори фалсафа (PhD)- доктор аз рӯи ихтисоси 6D071800 – Энергетикаи барқӣ (6D071804 – Системаҳо ва мучтамаъҳои энергетикӣ) пешниҳод шудааст.

**Калидвожаҳо:** системаи электроэнергетикӣ, тавоноии фаъол, норасоӣ, моделсозӣ, автоматикаи боркамкунии басомадӣ, таҳқиқ, баҳо, мучтамаъҳои ҳисоббарорӣ, неругоҳи барқии обӣ, равандҳои гузаранда, автоматикаи зиддисадамавӣ, ҷузъи барномавӣ.

**Мубрамияти мавзӯи диссертатсия.** Кор ба ҳалли мушкилоти ҷӣ назариявӣ ва ҷӣ амалии мушкилоти ҳолати системаи энергетикӣ дар шароити садамавии ба норасогии тавоноии фаъол вобастабуда, ки дар он ҷузъи барномавӣ барои моделсозии равандҳои ба таври садамавӣ пастшавии басомад дар системаи энергетикӣ ва рафтори системаи АББ коркард карда шудааст, баҳшида шудааст.

**Мақсади таҳқиқот** аз коркарди ҷузъи барномавие, ки функцияи АББ-ро барои омӯзиши равандҳои садамавии марбут ба норасоии тавоноии фаъол ва пастшавии басомад дар СЭ оварда мерасонад, иборат мебошад.

**Навгонии илмии таҳқиқот чунин аст:** коркард намудани ҷузъи барномавии АББ (АББ-1, АББ-2 ва ПТАБ) барои пешгирии пастшавии садамавии басомад дар СЭ. Таҳияи усули озмоиши дастгоҳи электронии хушманд (ДЭХ) тавассути моделсозии таҷрибавӣ дар робита бо дастгоҳҳои АББ. Аввалин бор дар заминаи мучтамаъи ҳисоббарории PSCAD коркард намудани модели ҳисоббарории СЭ ҚТ бо назардошти ҷорӣ намудани объектҳои нав барои ҳисоб ва таҳлили речаҳои устувор ва гузаранда.

**Аҳамияти амалӣ.** Ҷузъи барномавии коркардшуда дар лоихакашии системаи АББ барои СЭ, ки дар онҳо эҳтимоли сар задани норасогии тавонӣ мавҷуд аст ва омӯзиши равандҳои гузаранда, ки ба пастшавии садамавии басомад дар СЭ алоқаманданд, истифода мешавад.

2. Усули таҳияшудаи озмоиши АББ бо истифода аз системаи санчишии идорашавандаи компютерӣ дорои имкониятҳои санчишии ДЭХ – и вазифаҳои АББ-ро амаликунанда буда, онро ҳангоми тафтиши иншоотҳои нав ва гузаронидани санчишҳои профилактикии пешбинишуда истифода бурдан мумкин аст.

Натиҷаҳои илмии ба дастамада дар раванди таълими курсҳои «Автоматикаи системаҳои энергетикӣ», «Масъалаҳои махсуси автоматикаи зиддисадамавӣ» барои иҷрои корҳои илмии магистрантҳои ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ ва Департаменти истеҳсоли барқу гармии ҚСК «Барқи Тоҷик» истифода бурда мешаванд.

**Ҳаҷм ва сохтори диссертатсия.** Диссертатсия аз муқаддима, 3 боб ва хулоса иборат буда, дар 157 саҳифа матни чопшуда пешниҳод шуда, 81 расм, 10 ҷадвал ва рӯйхати адабиётҳо 129 номгуйро дар бар мегирад.

## АННОТАЦИЯ

на диссертацию Ибрагимова Бахтиёра Фатхуллоевича на тему **«Моделирование и оценка состояния электроэнергетической системы в условиях аварийного дефицита активной мощности (на примере энергосистемы Таджикистана)»**, представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) – доктора по специальности 6D071800 – Электроэнергетика (6D071804 – Энергетические системы и комплексы)

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, активная мощность, дефицит, моделирование, автоматическая частотная разгрузка, анализ, оценка, вычислительные комплексы, гидроэлектростанция, переходные процессы, противоаварийная автоматика, программный компонент.

**Актуальность темы исследования.** Работа посвящена решению как теоретических, так и практических проблем состояния ЭС в условиях аварийного дефицита активной мощности, в которой разрабатывается компонент для моделирования процессов аварийного снижения частоты в ЭС и поведение системы АЧР.

**Целью исследования** является разработка компонента, который будет реализовывать функции АЧР, с целью предотвращения и эффективной ликвидации возникающих аварийных ситуаций, связанных с дефицитом активной мощности и аварийным снижением частоты в ЭС.

**Научная новизна исследования работы заключается в следующем:** **Разработан** программный компонент АЧР (АЧР-1, АЧР-2 и ЧАПВ) для предотвращения аварийного снижения частоты в ЭС. **Разработана** методика проверки МПТ путем экспериментального моделирования применительно к устройствам АЧР. Впервые на базе вычислительного комплекса PSCAD **разработана** расчетная модель ЭС РТ с учетом ввода новых объектов для расчета и анализа установившихся и переходных режимов.

**Практическая значимость.** Разработанный программный компонент используется при проектировании системы АЧР в энергодефицитных ЭС и для исследования переходных процессов, связанных с аварийным снижением частоты в ЭС.

Разработанная методика проверки АЧР с использованием компьютерно-управляемой испытательной системы, позволяющая выполнять тестирование МПТ, реализующего функции АЧР может быть использована при проверке вводимых в эксплуатацию новых объектов и проведение плановых профилактических испытаний.

Результаты разработок успешно внедрены в учебный процесс по курсу «Спецвопросы противоаварийной автоматики» и «Автоматика энергосистем» для выполнения научных работ магистрантов в ТТУ имени академика М.С. Осими и Департаменте выработки гидро и тепловых станций ОАО «Барки Точик».

**Структура и объем работы.** Работа содержит введение, три главы, выводы и заключение, изложенных на 157 страницах, а также содержит 81 иллюстрации, 10 таблиц и библиографический список на 129 наименований.

## ANNOTATION

for the dissertation of Ibragimov Bakhtiyor Fatkhulloevich on the topic «**Modeling and assessment of the state of the electric power system in the conditions of an emergency shortage of active power (on the example of the power system of Tajikistan)**» submitted for a Ph.D degree in speciality 6D071800 – Electric power (6D071804 – Electric power systems and complexes)

**Keywords:** electric power system, active power, deficit, modeling, underfrequency load shedding, analysis, evaluation, computer systems, hydroelectric power plant, transients, emergency automatics, component.

**Relevance of the topic of the dissertation.** The work is devoted to solving both theoretical and practical problems of the state of the electric power system in conditions of an emergency shortage of active power, in which a component is being developed for modeling the processes of emergency frequency reduction in the power system and the behavior of the UFLS system.

**The purpose of the dissertation** is the modeling of power systems and the development of a component that implements the functions of the UFLS for the study of emergency processes associated with a shortage of active power and an emergency frequency reduction in the ES.

**The scientific novelty of the work is as follows:** A software component of the UFLS (UFLS-1, UFLS-2 and Frequency automatic reclosing) has been developed to prevent an emergency frequency reduction in the power plant. A technique for checking the MPT by experimental modeling has been developed in relation to UFLS devices. For the first time, on the basis of the PSCAD computer complex, a calculation model of the ES RT was developed, taking into account the introduction of new objects for the calculation and analysis of steady and transient modes.

**Practical significance.** The developed software component is used in the design of the UFLS system in energy-deficient ES and for the study of transient processes associated with an emergency frequency reduction in the ES. The developed method for checking the UFLS using a computer-controlled test system, which allows testing the MPTs that implement the functions of the UFLS, can be used to test new facilities being commissioned and to provide scheduled preventive tests.

The results of the developments are implemented in the educational process at the course "Automation of power systems", "Special issues of emergency automation" to perform scientific work of master graduates at TTU named after academician M.S. Osimi and the Department of generation of hydro and thermal power plants of OJSC «Barqi Tojik».

**Structure and scope of work.** The dissertation consists of an introduction, 3 chapters and a conclusion, set out on 157 pages of typewritten text containing 81 illustrations, 10 tables and a bibliographic list of 129 titles.

Подписано к печати 21.01.2024 Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Тираж 100 экз.  
Отпечатано в типографии ТГУ имени акад. М. С. Осими.  
г. Душанбе, 734042, пр. акад. Раджабовых, 10а.

Ба чоп 21.01.2024 имзо шуд. Андоза 60x84 1/16.  
Қоғазӣ офсетӣ. Адади нашр 100 нусха.  
Нашриёти ДТТ ба номи академик М. С. Осимӣ.  
ш. Душанбе, 734042, хиёбони академикҳо Раҷабовҳо, 10а.