

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Скрипачев Михаил Олегович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОФИДЕРНОГО КОНТРОЛЯ  
ИЗОЛЯЦИИ ЩИТОВ ПОСТОЯННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент Ведерников А.С.

Самара 2023

## Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Цепи постоянного оперативного тока.....	11
1.1 Общие сведения о цепях постоянного оперативного тока.....	11
1.2 Схемы цепей постоянного оперативного тока.....	12
1.3 Источники питания цепей постоянного оперативного тока.....	13
1.4 Особенности цепей постоянного тока, применяемых на электрических станциях и подстанциях в настоящее время.....	21
Выводы по главе 1.....	26
Глава 2. Обзор методов контроля изоляции щитов постоянного тока электротехнических комплексов.....	27
2.1 Статистические данные по аварийным ситуациям цепей постоянного оперативного тока.....	27
2.2 Ложные срабатывания в цепях постоянного оперативного тока.....	28
2.3 Причины отказов РЗ из-за повреждений в цепях постоянного оперативного тока.....	29
2.4 Анализ современных методов контроля изоляции щитов постоянного тока.....	31
2.4.1 Неселективный контроль изоляции в цепях постоянного оперативного тока.....	32
2.4.2 Селективный контроль изоляции в цепях постоянного оперативного тока.....	33
2.5 Представление предполагаемой схемы цепей постоянного оперативного тока в виде схемы с сосредоточенными параметрами.....	36
2.6 Влияние системных параметров щита постоянного тока на селективный контроль сопротивления изоляции на землю.....	42
2.7 Моделирование работы устройства контроля изоляции при наличии активного сопротивления утечки в контролируемой зоне.....	53
Выводы по 2 главе.....	54

Глава 3. Функциональные узлы системы селективного контроля сопротивления изоляции на землю щитов постоянного оперативного тока.....	56
3.1 Построение генератора опорной частоты 20 Гц.....	56
3.2. Терминал (конечная часть системы).....	61
3.2.1. Канал тока фидера.....	62
3.2.2 Конструкция и схема электромагнитного измерительного датчика тока. Подключение измерительных датчиков тока к первичным цепям присоединений ЩПТ.....	74
3.3 Канал контроля потенциала шин.....	97
3.4 Канал инжектируемого тока $I_1$ .....	100
3.5 Селективная фильтрация.....	101
3.5.1. Аналого-цифровое преобразование.....	102
3.5.2. Фильтрация сигналов.....	105
3.6. Функциональная схема цифрового модуля.....	111
3.7. Моделирование работы электромагнитного датчика тока.....	114
3.8. Моделирование работы аналогового тракта канала тока фидера.....	119
3.8.1. Анализ работы внешнего усилителя.....	120
3.8.2. Работа канала тока фидера терминала.....	123
Выводы по 3 главе.....	127
Глава 4. Применение системы селективного контроля сопротивления изоляции на землю щитов постоянного оперативного тока.....	128
4.1 Алгоритм функционирования основной управляющей программы микроконтроллера.....	128
4.2. Конструкция устройства контроля изоляции.....	130
4.3. Методика наладки аналогового тракта терминала и внешнего усилителя.....	135
4.3.1. Рекомендуемый порядок наладки канала тока фидера.....	137
4.3.2. Порядок настройки канала потенциала шин.....	139
4.3.3. Порядок настройки канала налагаемого тока.....	141

4.3.4. Порядок настройки внешнего усилителя .....	143
4.3.5. Проверка правильности настройки .....	144
4.4 Методика испытаний устройства контроля изоляции присоединений ЩПТ .....	145
4.4.1. Проверка работоспособности генератора опорной частоты 20 Гц .....	146
4.4.2. Проверка работоспособности терминала .....	147
4.5 Лабораторное испытание системы контроля изоляции .....	147
4.6 Испытание устройства контроля изоляции на объектах электроэнергетики .....	153
Выводы по 4 главе .....	159
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	159
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	161

## Введение

### Актуальность темы

Непрерывность процесса выработки и потребления на объектах, связанных с генерацией, распределением электрической энергии, требует бесперебойного питания собственных нужд, цепей релейной защиты и автоматики, цепей управления выключателей и тд. Бесперебойное питание собственных нужд электротехнического комплекса зависит от надежности питания оперативных цепей релейной защиты.

Цепи постоянного оперативного тока, как вспомогательная система электротехнического комплекса, имеются на каждой станции и крупных узловых подстанциях, а также объектах транспортной инфраструктуры. В цепях постоянного оперативного тока, также как и в линиях электропередачи, возникают различные неисправности: короткие замыкания, замыкания на землю.

Замыкание на землю одного полюса батареи или отходящего присоединения сборки постоянного оперативного тока являются источником аварии или ложного срабатывания защит.

Случаи неверной работы защит сопровождаются сбоями в работе технологических систем производств, приводящий к длительным простоям и значительному материальному ущербу.

Достаточное внимание цепям постоянного оперативного тока начали уделять лишь в последнее время. Появились специализированные устройства, сигнализирующие персоналу о неисправностях, возникших в цепях постоянного тока. (Walther Bender, СКИФ, Сапфир). Однако не менее важно информирование персонала о намечающихся снижениях сопротивления изоляции цепей постоянного оперативного тока на землю. Самым тяжелым для поиска является снижение изоляции на землю в сети постоянного тока для одного полюса. Организационные предписания требуют от персонала скорейшего поиска и устранения возникшей неисправности. В то же время, в силу сильной разветвленности цепей питания постоянного оперативного тока, найти быстро

место повреждения не представляется возможным. Обычно время поиска указанной неисправности значительно превосходит время её устранения. Таким образом, сократив время поиска места повреждения на землю, персонал сокращает вероятность появления и развития аварий, связанных с ложной работой цепей питания и управления.

Ранее подобные неисправности определялись секционированием и поочередным отключением присоединений цепей постоянного тока. При удачном стечении обстоятельств этот способ давал положительный результат. Однако существуют двойные замыкания на землю в цепях одного полюса системы постоянного тока, но на разных присоединениях, тогда способ с поочередным отключением не дает необходимого результата.

Создание устройства, способного вести непрерывный контроль изоляции присоединений цепей постоянного оперативного тока без отключений и прогнозировать намечающиеся повреждения в контролируемых оперативных цепях определило актуальность данной проблемы.

Вклад в исследование проблемы селективного контроля изоляции систем оперативного тока внесли Савельев В.А., Словесный С.А, Алимов Ю.Н, Галкин И.А., Вайнштейн Р.А, Шестакова В.В, Гуревич В.И., Гусев Ю.П.

### **Объект исследования**

Распределительное устройство цепей постоянного оперативного тока в электротехнических комплексах и системах.

### **Предмет исследования**

Система мониторинга (диагностики) изоляции цепей постоянного оперативного тока в электротехнических комплексах и системах.

### **Цель работы**

Разработка и реализация электротехнической системы пофидерного контроля изоляции, обеспечивающая непрерывную диагностику цепей постоянного оперативного тока.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие научные и практические задачи.

#### **Научные задачи:**

- Разработка схемы замещения щита постоянного оперативного тока для совершенствования электротехнической системы пофидерного контроля изоляции на землю, отличающаяся способом и параметрами наложения внешнего опорного напряжения;
- Разработка математической модели электротехнической системы пофидерного контроля изоляции на землю, отличающаяся независимостью работы от системных параметров щита постоянного тока;
- Разработка динамической модели компенсационного датчика тока, отличающаяся конструкцией магнитопровода.

#### **Практические задачи:**

- Создание прототипа устройства контроля изоляции на землю оперативных цепей постоянного тока электротехнических комплексов;
- Создание прототипа датчика тока, необходимого для функционирования устройства контроля цепей;
- Разработка алгоритма и программы для цифровой части устройства контроля изоляции системы постоянного оперативного тока;
- Апробация созданного устройства в реальных электротехнических комплексах и системах.

#### **Научная новизна**

- Предложена однолинейная схема замещения электротехнической системы щита постоянного оперативного тока, отличающаяся способом подачи опорного напряжения;

- Разработана математическая модель функционирования электротехнической системы, позволяющая работать вне зависимости от системных параметров схемы постоянного оперативного тока;

- Разработана динамическая непрерывная модель измерительной части разъемного электромагнитного датчика тока.

### **Практическая ценность работы**

- Создание прототипа разъемного датчика тока;
- Создание прототипа устройства контроля цепей постоянного оперативного тока, на основе предложенного алгоритма;
- Апробация созданного устройства на объектах энергетики и транспорта;

### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач использовались методы математического и физического моделирования, теория линейных электрических цепей, преобразование Лапласа,  $z$ - преобразование. Моделирование систем проводилось в среде MATLAB, wxMaxima.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью применяемых методов, сходимостью результатов моделирования и полученных в результате экспериментов.

### **Соответствие паспорту специальности**

В работе рассматриваются вопросы создания системы для повышения надежности эксплуатации щитов постоянного тока, которые можно отнести к научной специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы» технической отрасли науки:

- пункту 1 – «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем... физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов... » соответствует: произведено физическое, математическое, имитационное, компьютерное моделирование щита постоянного тока и устройства селективного контроля изоляции на землю;
- пункту 2 – «Разработка научных основ проектирования... систем и их компонентов» соответствует: произведено моделирование работы генератора



опорного сигнала совместно со щитом постоянного оперативного тока как составляющей системы контроля изоляции;

- пункту 4 – «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов» соответствует: разработано устройство контроля изоляции и его составные модули, позволяющее в различных режимах, при внешних по отношению к контролируемому участку производить диагностику системы цепей постоянного оперативного тока.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Принцип построения системы диагностики распределительных цепей постоянного тока;

- Математическая модель устройства контроля изоляции на землю цепей постоянного оперативного тока;

- Схема замещения системы питания постоянного тока для определения участка с пониженной изоляцией.

#### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- 4-ой открытой молодежной научно-практической конференции филиала ОАО «СО ЕЭС» РДУ Татарстана и Казанского государственного энергетического университета «Диспетчеризация в электроэнергетике: проблемы и перспективы» (Казань 2009).

- Шестнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов в МЭИ «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика (Москва 2010).

- Международной конференции «АСТИНТЕХ-2010»: Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности. Астрахань, 2010 г.

- VI Международной молодёжной научно-технической конференции "Электроэнергетика глазами молодежи", 2015 г.

- VII Международной молодёжной научно-технической конференции "Электроэнергетика глазами молодежи", 2016 г.
- X открытой молодёжной научно-практической конференции "Диспетчеризация и управление в электроэнергетике", 2017 г.
- Всероссийской научно-практической конференции с международным участием "Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири", 2020 г.

#### Публикации

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ из которых 4 в периодических изданиях, рекомендованных ВАК России для публикаций научных работ, 1 –патент на изобретение.

## ГЛАВА 1 ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА

### 1.1 Общие сведения о цепях постоянного оперативного тока

Оперативным называется ток, с помощью которого производится управление силовыми выключателями на электрических станциях и подстанциях, а также он питает цепи релейной защиты, автоматики и сигнализации [1-5]. Система оперативного тока состоит из источников питания и распределительной сети, от которой питаются ее потребители.

Условно потребителей можно разделить на 2 группы:

- постоянно включенные потребители, в том числе устройства сигнализации (сигнальные лампы, табло, указатели положения выключателей, разъединителей), постоянно обтекаемые током реле, отдельные светильники аварийного освещения, получающие питание от аккумуляторных батарей в нормальных условиях, и др.;

- потребители, включаемые в работу при исчезновении напряжения в сети переменного тока: светильники аварийного освещения; агрегаты бесперебойного питания устройств связи и телемеханики;

- потребители, включаемые кратковременно; приводы выключателей, разъединителей, обмотки автоматических выключателей и контакторов, блокировочные устройства и др. Токи, потребляемые различными аппаратами, существенно различаются по своему значению.

Надежность работы основного оборудования электрических станций и подстанций во многом зависит от источников и сети оперативного постоянного тока.

Сети оперативного постоянного тока (СОПТ), особенно на ТЭС и АЭС, характеризуются значительными разветвленностью и протяженностью кабельных линий, что обуславливает относительно частую их повреждаемость. Одним из наиболее часто возникающих видов дефектов во вторичных цепях является

снижение сопротивления изоляции полюсов относительно "земли" из-за увлажнения изоляции или механического повреждения.

Для обеспечения надежного питания оперативным током распределительная сеть делится на отдельные участки (секционируются), имеющие самостоятельное питание от сборных шин батареи. А также цепи защищаются от К.З. максимальными автоматами и плавкими предохранителями.

Наиболее ответственными потребителями являются цепи оперативного тока релейной защиты, автоматики и управления выключателями. Эти цепи питаются от отдельных шинок управления, которые делятся на несколько секций для повышения надежности рубильниками. От шинок управления питания на цепи релейной защиты, автоматики и управления подается через отдельные автоматы или предохранители для каждого выключателя.

## **1.2 Схемы цепей постоянного оперативного тока**

Цепи постоянного оперативного тока питаются от отдельных шинок управления, которые делятся на секции, для повышения надежности. Каждая секция ШУ питает цепи релейной защиты, автоматики и управления определенного участка. Между секциями установлены коммутационные аппараты, позволяющие производить питание от соседней секции при повреждении питающей линии. На рис. 1.1 представлена принципиальная схема построения цепей постоянного оперативного тока [5].

На каждой линии, отходящей от шин аккумуляторной батареи, установлены рубильники и плавкие предохранители П, исправность которых непрерывно контролируется сигнальными лампами или реле (на рисунке 1.1 не показаны). От шинок управления питание на цепи релейной защиты, автоматики и управления подается через отдельные коммутационные аппараты (SQ) для каждого выключателя.

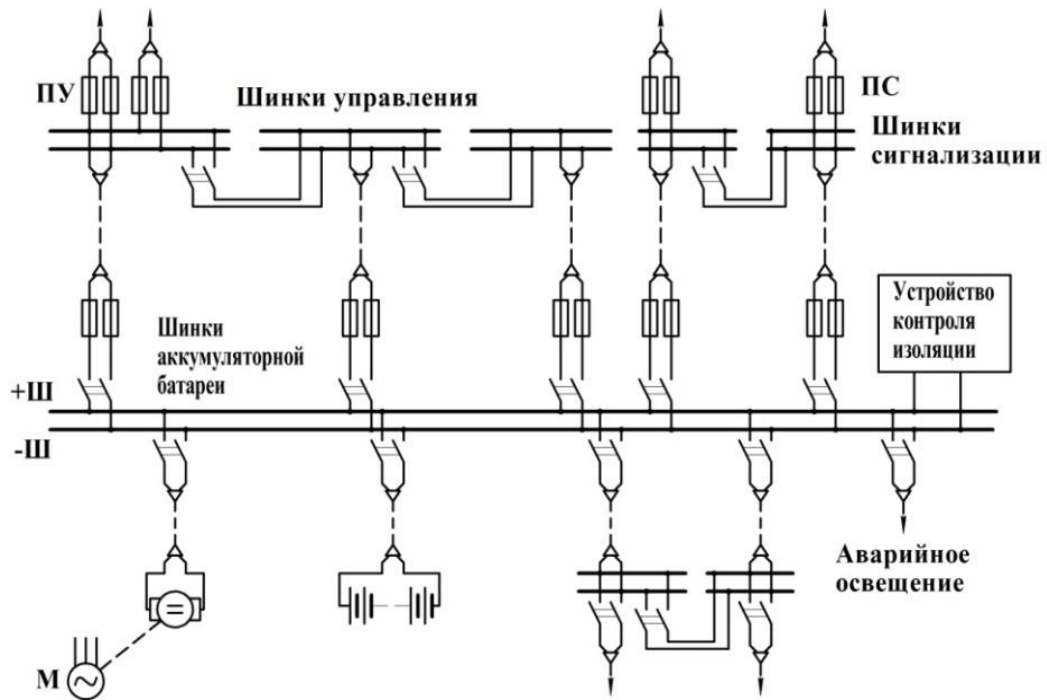


Рисунок 1.1 — Принципиальная схема цепи постоянного оперативного тока

Цепи сигнализации также питаются от отдельных шинок сигнализации. Однако ввиду меньшей ответственности они делятся на меньшее количество секции, например две. В тех случаях, когда отдельные шинки сигнализации не предусматриваются, питание цепей сигнализации производится от цепей управления через отдельные предохранители.

### 1.3 Источники питания цепей постоянного оперативного тока

Самым надежным источником питания оперативных цепей считаются аккумуляторные батареи. Большим преимуществом их является независимость от внешних условий, что позволяет обеспечивать работу вторичных устройств даже при полном исчезновении напряжения в основной сети станции (подстанции).

Другим немаловажным достоинством этого источника является способность выдерживать значительные кратковременные перегрузки, необходимость в которых возникает при наложении на нормальный режим аккумулятора толковых токов включения приводов выключателей.

Аккумуляторная батарея должна обеспечивать:

- питание всех подключенных к СОПТ электроприемников при работе в автономном режиме (при потере собственных нужд ПС) в течение расчетного времени, необходимого для восстановления нормальной работы СОПТ;
- максимальные расчетные толчковые токи в конце гарантированного 2-часового (не менее) разряда током нагрузки при работе в автономном режиме (при потере собственных нужд ПС).

Проектный срок службы аккумуляторной батареи должен быть не менее 20 лет.

Емкость АБ должна выбираться с учетом ограничения по глубине разряда аккумуляторов, а также с учетом возможных ограничений по импульсам тока разряда, указанным в технических условиях на аккумуляторы.

Аккумуляторная батарея должна иметь датчик температуры, для корректировки напряжения поддерживающего заряда, и средства контроля его исправности.

Аккумуляторы должны иметь фильтр - пробки, обеспечивающие снижение испарений электролита и позволяющие производить доливку дистиллированной воды не чаще, чем один раз в 3 года.

Для выявления отстающих элементов в АБ должен использоваться контроль симметрии напряжения групп аккумуляторов АБ (двух или четырех). Допустимая асимметрия напряжения групп аккумуляторов должна соответствовать допустимому разбросу напряжений на элементах батареи, указанному в инструкции по эксплуатации аккумулятора [3].

Размещение аккумуляторных батарей и щита постоянного тока должно обеспечивать применение соединяющего их кабеля минимальной длины, как правило, не более 20 м.

Присоединение аккумуляторной батареи к защитным аппаратам первого уровня должно осуществляться медными одножильными гибкими (многопроволочными) кабелями с кислотостойкой изоляцией.

Суммарная индуктивность цепей, соединяющих аккумуляторные батареи и щит постоянного тока, должна обеспечивать значение постоянной времени, не более 5 мс.

Корпуса аккумуляторов должны изготавливаться из ударопрочного материала, не поддерживающего горения.

Конструкция аккумуляторной батареи (стеллаж, аккумуляторы, межаккумуляторные перемычки и внешние присоединения) должна иметь сейсмическую стойкость, соответствующую географическому расположению подстанции.

Аккумуляторы, как правило, должны поставляться заправленные электролитом. Срок хранения аккумуляторов до постановки на заряд не должен превышать допустимого для аккумуляторов данного типа (как правило, не более 6 месяцев). При поставке сухозаряженных аккумуляторов следует включать в комплект поставки аккумуляторных батарей электролит, рекомендованный поставщиком аккумуляторов.

Аккумуляторы должны поставляться со стеллажом и с комплектом штатных изолированных перемычек, динамометрическим ключом для монтажа межэлементных соединений и двумя комплектами вспомогательных средств, минимально необходимых для обслуживания аккумуляторных батарей в процессе эксплуатации.

Аккумуляторные батареи должны размещаться в разных помещениях. Допускается установка двух аккумуляторных батарей в одном помещении, при условии их разделения негорючими перегородками класса К0 с пределом огнестойкости не менее EI45.

Аккумуляторное помещение должно быть оборудовано принудительной приточно-вытяжной вентиляцией.

Помещения аккумуляторных батарей, в которых производится заряд аккумуляторов при напряжении более 2.3 В на элемент, должны соответствовать требованиям к взрывоопасным помещениям класса В1. На электрических

станциях (подстанциях) находят применение как свинцово-кислотные, так и железоникелевые щелочные аккумуляторы, однако технические характеристики кислотных лучше, чем щелочных. Начальное напряжение разряда свинцово-кислотных аккумуляторов составляет 2.1—2.2 В вместо 1.2—1.3 В у щелочных; разрядная характеристика  $U_{\text{разр}}(t)$  у свинцовых более пологая; к. п. д. их выше, чем у щелочных аккумуляторов. Щелочные железоникелевые аккумуляторы имеют меньший допустимый диапазон изменения напряжения элементов в режиме разряда. Кратность допустимой толчковой нагрузки у них меньше, чем у кислотных аккумуляторов.

Поэтому, несмотря на значительно меньшую стоимость по сравнению с кислотными (примерно вдвое), а также на некоторые другие преимущества, к которым относятся большой срок службы, меньший саморазряд, большая стойкость при коротких замыканиях, отсутствие выделения вредных, опасных для окружающих паров, железоникелевые аккумуляторы находят на электрических станциях менее широкое применение, чем свинцовые.

Таблица 1.1 — Тип аккумулятора

Характеристика	СК-1		С-1 и СК-1			
	1	2	3	5	7,5	10
Продолжительность разряда, ч	1	2	3	5	7,5	10
Энергия, А·ч	18,5	22	27	30	33	36
Разрядный ток, А	18,5	11	9	6	4,4	3,6
Наименьшее допускаемое напряжение в конце разряда, В	1,75		1,8			

Энергия и разрядный ток для любого типового номера аккумулятора определяется умножением соответствующих значений для аккумуляторов СК-1 и С-1 на типовой номер аккумулятора, который получается при делении номинальной мощности (энергии) аккумулятора данного типа на номинальную энергию аккумулятора С-1 в ампер-часах, т. е. на 36. С — стационарный



аккумулятор для продолжительного режима разряда. СК — стационарный аккумулятор для кратковременного режима разряда. Основными параметрами свинцовых и железоникелевых аккумуляторов являются энергия, напряжение и разрядный ток.

Под энергией аккумулятора понимают энергию (в ампер-часах), которую аккумулятор способен отдать во внешнюю сеть в режиме разряда. Так как энергия аккумулятора зависит от разрядного тока и, следовательно, от длительности разряда, номинальную энергию относят к определенному режиму разряда, обычно к десятичасовому (табл. 1.1) [3].

Номинальным напряжением аккумулятора называют наименьшее допустимое напряжение на его зажимах в течение первого часа десятичасового разряда. Для всех типов свинцовых аккумуляторов его принимают равным 2 В, для железоникелевого 1,25 В (наименьшее допустимое напряжение в течение первого часа восьмичасового разряда).

Разрядный ток может быть различным в зависимости от режима разряда, однако он не может превышать пятикратного тока десятичасового разряда при длительных режимах (например, при одночасовом разряде) и двенадцатикратного того же тока при кратковременном (пятисекундном) разряде.

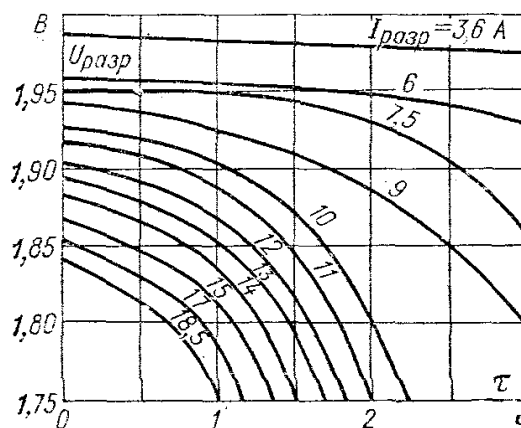


Рисунок 1.2 — Разрядные характеристики аккумуляторов типа СК

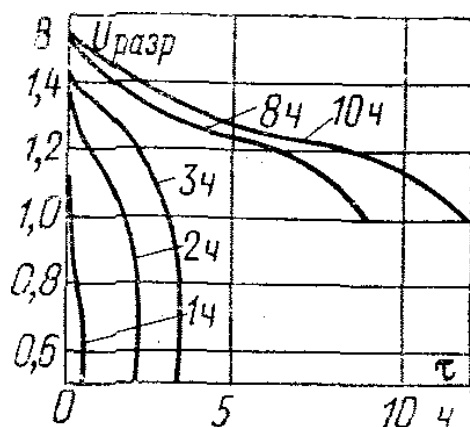


Рисунок 1.3 — Разрядные характеристики железоникелевых аккумуляторов при разряде различной продолжительности

Характер изменения напряжения на зажимах аккумулятора при различных режимах разряда приведен на рис. 1.2. Для сопоставления на рис. 1.3 приведены разрядные характеристики железоникелевых аккумуляторов.

На мощных электрических станциях и на крупных узловых подстанциях устанавливаются аккумуляторные батареи напряжением 110—220 В, а на небольших подстанциях напряжением 24 — 48 В. Например на станциях до 50 МВт устанавливается одна батарея 220 В, а на станциях большей мощности две такие батареи, причем одна батарея рассчитывается на полную нагрузку оперативных цепей и на 60 % мощности аварийного освещения, а другая на 100 % мощности аварийного освещения и на нагрузку одного масляного насоса турбины. При этом каждая из батарей должна обеспечить и толчковую нагрузку при включении приводов выключателей.

На блочных станциях большой мощности для каждого одного-двух блоков устанавливают отдельную батарею, как правило, на напряжение 220 В.

На крупных узловых подстанциях напряжением 220 кВ и выше должны устанавливаться две одинаковые батареи 220 В, а на подстанциях 35—110 кВ с трансформаторами 5,6 МВА и больше — одна батарея 220 или 110 В. На подстанциях 35 кВ и ниже с трансформаторами мощностью меньше 5,6 МВА

обычно устанавливают одну батарею 24 В или питают оперативные цепи от источников переменного тока.

Существует несколько схем включения аккумуляторных батарей. На старых электроустановках можно встретить схемы заряд-разряд (рис. 1.4), при которой всю основную нагрузку длительно несет батарея, а зарядное устройство подключается только на время заряда разряженной батареи. Мощность зарядного устройства, таким образом, должна быть достаточной для одновременного заряда батареи и питания всей основной нагрузки.

Однако в последнее время от этой схемы отказались, так как частые глубокие разряды батареи быстро изнашивают активную массу пластин аккумуляторов и усложняют эксплуатацию.

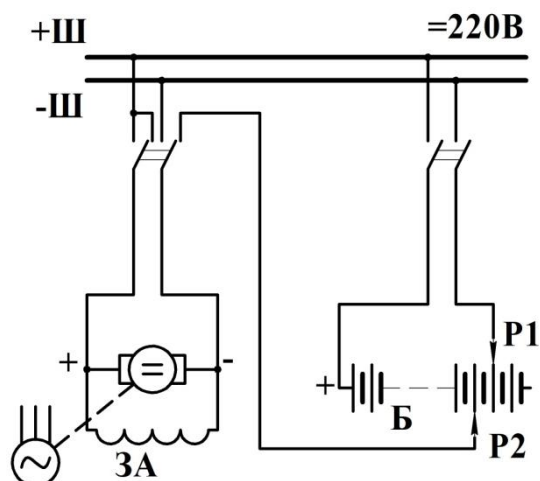


Рисунок 1.4 — Схема аккумуляторной установки, работающей по методу «заряд — разряд»:

Б — аккумуляторная батарея;

P1— P2 — элементный коммутатор;

ЗА — зарядный агрегат

Сейчас применяют схему постоянного подзаряда (рис. 1.4), которая отличается от схемы заряд — разряд режимами работы батареи и наличием специального подзарядного агрегата. Подзарядный агрегат работает в этой схеме

непрерывно, неся постоянную нагрузку, подключенную к шинам, и подзаряжая батарею небольшим током. Батарея принимает на себя только толчковую нагрузку, возникающую, например, при включении выключателей.

На рис. 1.4 можно видеть элементный коммутатор P1— P2, назначение которого — поддерживать постоянным напряжение на зажимах батареи. При отклонении напряжения от нормального элементный коммутатор подключает или отключает часть аккумуляторов, поддерживая напряжение на шинах постоянным. Так как скользящие контакты вносят известную ненадежность в работу схемы, а также имеют недостаточное быстродействие, в современных схемах применяются не элементные коммутаторы, а тиристорные зарядно-подзарядные устройства (выпрямительные агрегаты). При этом в нормальном режиме нагрузка питается от выпрямительного устройства, а при повышенной нагрузке тиристорное устройство практически мгновенно подключает к шинам дополнительные элементы.

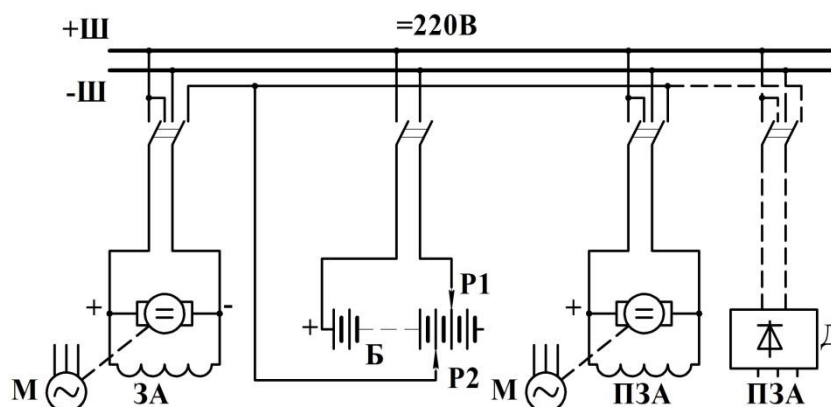


Рисунок 1.5 — Схема аккумуляторной установки, работающей по методу постоянного подзаряда:

ПЗА - подзарядный агрегат; Д - выпрямитель

Существует также схема аккумуляторной установки, в которой часть нагрузки, нуждающаяся в регулировании напряжения, подключается к батарее через группу электролитических элементов, состоящих из стальных пластин, погруженных в раствор щелочи. При прохождении тока через эти так называемые

противоэлементы в них возникает реакция электролиза щелочного раствора, сопровождающаяся поглощением энергии и падением напряжения, не зависящим от тока. Таким образом, изменяя число включенных противоэлементов, можно понижать напряжение на регулируемых шинах до нужного уровня (рисунок 1.6).

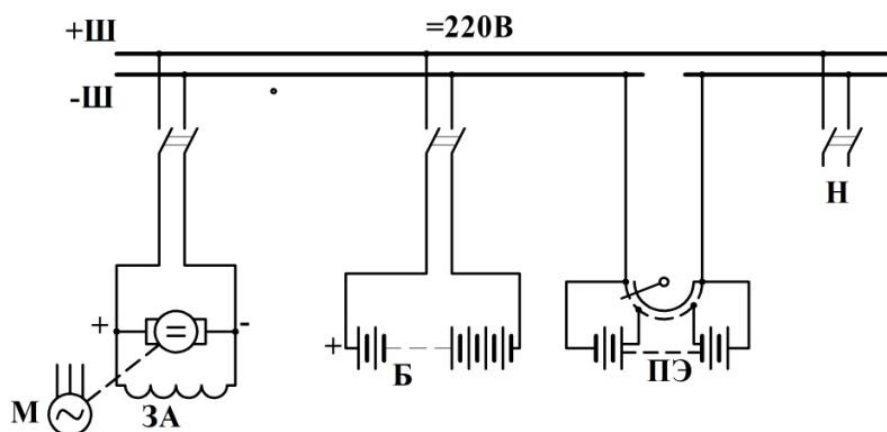


Рисунок 1.6 — Схема аккумуляторной установки с противоэлементами:  
ПЭ — противоэлементы; Н — нагрузка

Достоинствами схемы с противоэлементами являются отсутствие элементного коммутатора, уменьшение износа и увеличение срока службы основных аккумуляторов. Схема с противоэлементами известна давно, но широкого распространения не получила, по-видимому, из-за некоторой громоздкости и усложнения эксплуатации.

#### 1.4 Особенности цепей постоянного тока, применяемых на электрических станциях и подстанциях в настоящее время

СОПТ должна обеспечивать рабочее и резервное питание следующих основных электроприемников:

- устройств РЗА;
- устройств управления и приводов высоковольтных выключателей;
- устройств сигнализации;

- устройств противоаварийной автоматики;
- устройств коммерческого учета электроэнергии;
- устройств связи, обеспечивающих передачу сигналов РЗА;
- приводов автоматических вводных и секционных выключателей щитов собственных нужд (ЩСН) напряжением 0,4 кВ.

СОПТ должна обеспечивать резервное питание:

- инверторов резервного питания АСУ ТП;
- светильников аварийного освещения помещений аккумуляторной батареи, ОПУ, релейного щита, ЗРУ, насосных, камер задвижек пожаротушения.

Состав, схема соединения, компоновка оборудования и прокладка кабелей, входящих в СОПТ, должны быть выбраны исходя из условий обеспечения работоспособности хотя бы одного взаиморезервирующих друг друга комплекта устройств РЗА и управления выключателями всех высоковольтных присоединений как в нормальном режиме, так и при выполнении ремонтных работ, при техническом обслуживании и при отказе любого элемента СОПТ.

СОПТ может иметь централизованную или децентрализованную структуру. В централизованной СОПТ применяется один комплект компонентов, в децентрализованной - два и более.

Типовой состав каждого комплекта СОПТ содержит следующие компоненты:

- две аккумуляторные батареи (АБ) для ПС с высшим напряжением 220-750 кВ и ПС 110 кВ с более чем 3-мя выключателями в распределительном устройстве высшего напряжения, одна АБ - для ПС с высшим напряжением 35 кВ и остальных ПС 110 кВ;

- четыре стационарных зарядных устройства (ЗУ) - по два на каждую АБ для ПС с высшим напряжением 220-750 кВ и ПС 110 кВ с более чем 3-мя выключателями в распределительном устройстве высшего напряжения, два ЗУ на одну АБ - для ПС с высшим напряжением 35 кВ и остальных ПС 110 кВ;

- два ЩПТ для ПС с высшим напряжением 220-750 кВ и ПС 110 кВ с более чем 3-мя выключателями в распределительном устройстве высшего напряжения, один - для ПС с высшим напряжением 35 кВ и остальных ПС 110 кВ;
- шкафы распределения оперативного тока;
- кабельная распределительная сеть;
- отключающие аппараты защиты от сверхтоков (коротких замыканий и перегрузок);
- устройства защиты от перенапряжений;
- коммутационные аппараты;
- устройства мониторинга СОПТ;
- устройство контроля изоляции полюсов сети относительно земли;
- система автоматизированного поиска мест повреждения изоляции полюсов сети относительно земли (поиск «земли»);
- устройства регистрации аварийных процессов и событий СОПТ в составе АСУ ТП по требованию заказчика;
- средства выдачи сигнала обобщенной неисправности в АСУ ТП.

Номинальное напряжение СОПТ- 220 В.

Нормально допустимое отклонение напряжения на клеммах электроприемников СОПТ-  $\pm 5\%$ .

Предельно допустимое отклонение напряжения на клеммах электроприемников СОПТ, в том числе при аварийных разрядах АБ и при выполнении ускоренных и уравнивающих зарядов АБ -  $\pm 10\%$ .

Суммарное сопротивление каждого полюса СОПТ относительно земли должно быть не менее 150 кОм.

Основные и резервные комплекты устройств РЗА должны иметь отдельное электропитание (от разных АБ через разные секции ЩПТ, через разные ШРОТы).

Для устройств РЗА должны быть выделены отдельные секции шин или сборки на ЩПТ и отдельные ШРОТы.

Цепи взаиморезервирования между сборками щитов постоянного тока и шкафами распределения оперативного тока должны иметь два коммутационных и защитных аппарата, размещенных в разных шкафах.

Проводники СОПТ должны удовлетворять требованиям термической стойкости и невозгораемости.

Все компоненты и электроприемники системы оперативного постоянного тока должны быть защищены от токов короткого замыкания и перегрузки отключающими защитными аппаратами: плавкими предохранителями и автоматическими выключателями.

Защитные аппараты должны обеспечивать отключение коротких замыканий в любой точке СОПТ сопровождающихся снижением напряжения на сборках ЩПТ и ШРОТ глубиной более 50% со временем не превышающим 50 мс.

Время-токовые характеристики защитных аппаратов должны обеспечивать селективное отключение во всем диапазоне возможных значений сверхтоков.

Должно быть обеспечено дальнейшее резервирование автоматических выключателей действием плавких предохранителей 2-го уровня при трехуровневой системе защиты, действием плавких предохранителей 1-го уровня при двухуровневой системе защиты. Дальнейшее резервирование плавких предохранителей не требуется.

СОПТ должна иметь защиту от коммутационных перенапряжений и импульсных помех, проникающих через распределительную сеть из первичных силовых цепей ПС и контура заземления.

Мониторинг СОПТ должен обеспечивать:

- контроль состояния и режимов работы АБ и ЗУ;
- контроль состояния защитных аппаратов ЩПТ;
- контроль положения коммутационных аппаратов ЩПТ;
- контроль отклонений напряжения в СОПТ;
- контроль сопротивления изоляции.



Неисправности компонентов СОПТ должны выявляться автоматически средствами мониторинга и средствами самодиагностики устройств компонентов СОПТ.

Информация о событиях, неисправностях компонентов, отклонениях от нормального режима работы компонентов СОПТ должна:

- визуализироваться по месту возникновения (местная сигнализация);
- фиксироваться средствами мониторинга;
- передаваться от устройств мониторинга, в полном объеме, в АСУ ТП.4.22

Информация о событиях, неисправностях компонентов, отклонениях в режиме работы СОПТ средствами АСУ ТП подстанции должна быть структурирована и отражена на АРМ оперативного персонала в объеме, достаточном для принятия персоналом подстанции оперативных решений.

Поиск «земли» должен обеспечиваться без отключения электроприемников и без инъекции в сеть СОПТ токов, способных вызвать ложное срабатывание устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Монтаж кабелей отходящих присоединений в шкафах ЩПТ, в ШРОТ и в шкафах РЗА должен обеспечивать возможность охвата любого кабеля и/или отдельных жил кабеля переносными датчиками- токовыми клещами при поиске места замыкания на землю в СОПТ.

В СОПТ должно использоваться оборудование со сроком службы не менее 20 лет. В упрощенных вариантах СОПТ, на базе шкафов оперативного тока (ШОТ), может использоваться оборудование со сроком службы не менее 12 лет.

Оборудование СОПТ должно иметь климатическое исполнение, соответствующее категории размещения УХЛ4.2 по ГОСТ 15543.1-89.

Оборудование СОПТ должно соответствовать требованиям стойкости к механическим внешним воздействующим факторам по группе М13 ГОСТ 17516.1-90 и должно иметь сейсмическую стойкость, соответствующую географическому расположению подстанции.

Оборудование СОПТ должно иметь гигиенический сертификат и заключения об электробезопасности и пожаробезопасности.

Оборудование и отдельные устройства в составе компонентов СОПТ должны соответствовать требованиям электромагнитной совместимости и испытаны на помехоустойчивость в соответствии с [6].

Оборудование СОПТ должно быть рассчитано на эксплуатацию с периодичностью технического обслуживания не менее чем 3 года.

Возможность замены неисправного оборудования должна быть обеспечена без демонтажа исправного. Должен быть обеспечен свободный доступ к клеммам оборудования для ревизии контактных соединений.

В СОПТ запрещается:

- параллельная работа двух и более АБ;
- использование отключающих защитных и коммутационных аппаратов, не сертифицированных для применения в электроустановках постоянного тока;
- подключение к сети СОПТ устройств с сопротивлением цепи питания относительно «земли» менее 1 МОм.

Питание цепей оперативной блокировки разъединителей должно осуществляться от двух отдельных взаиморезервирующих друг друга выпрямительных устройств напряжением 220 В, гальванически не связанных с СОПТ и имеющих собственный контроль изоляции и напряжения.

### **Выводы по главе 1**

1. Рассмотрена организация системы постоянного оперативного тока как составной части электротехнического комплекса в качестве объекта исследования.

2. Рассмотрено требование к методам поиска участков с пониженным сопротивлением изоляции на землю без отключения нагрузки, а так же необходимость применения датчиков тока специальной конструкции при определении поврежденных цепей.

## ГЛАВА 2. ОБЗОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ЩИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

### 2.1 Статистические данные по аварийным ситуациям цепей постоянного оперативного тока

Непрерывность процесса выработки и потребления электрической энергии на электрической станции и подстанции требует бесперебойного питания собственных нужд, цепей релейной защиты и автоматики, цепей управления выключателей.

Бесперебойное питание собственных нужд зависит от надежности питания оперативных цепей релейной защиты. Были собраны и проанализированы статистические данные по четырем энергосистемам Поволжского региона за 2013 год.

Результаты анализа в энергосистемах 1, 2, 3, 4, аварийных ситуаций на подстанциях, связанных со снижением изоляции в цепях постоянного оперативного тока за второй квартал 2013 года представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Аварийные ситуации на ПС, связанные со снижением изоляции в цепях постоянного оперативного тока

Показатель	3	5	3	4
Коэффициент работы УРЗА с ухудшенной изоляцией оперативных цепей	3/24 0,125	5/26 0,192	3/21 0,142	2/15 0,133

Коэффициент работы УРЗА с ухудшенной изоляцией оперативных цепей определяется по формуле:

$$K = \frac{N_{зем}}{N_{ис}} \quad (2.1)$$

где  $N_{зем}$  — количество случаев снижения изоляции,  $N_{nc}$  — общее количество подстанций.

На станциях, изоляция на землю в сети цепей постоянного оперативного тока, в среднем, случается весной и осенью случается 1 раз в неделю почти на каждой станции, в остальное время - 1 раз в квартал на каждой станции и подстанции.

## 2.2 Ложные срабатывания в цепях постоянного оперативного тока

Цепи постоянного оперативного тока имеются на каждой станции и крупных подстанциях. В цепях постоянного оперативного тока станций и подстанций возникают различные неисправности: короткие замыкания, замыкания на землю.

Замыкание на землю одного полюса батареи или отходящего присоединения сборки постоянного тока являются источником аварии или ложного срабатывания защит [7].

Случаи ложной работы защит сопровождаются недоотпуском электроэнергии со станции или подстанции, что сопровождается материальным ущербом.

Достаточное внимание цепям постоянного тока начали уделять лишь в последнее время. Появились специализированные устройства, сигнализирующие персоналу о неисправностях, возникших в цепях постоянного оперативного тока. Для примера, («Экра-СКИ», «СКИФ-С») [7]. Однако не менее важно информирование персонала о намечающихся снижениях сопротивления изоляции. Самым тяжелым для поиска является снижение изоляции на землю в сети постоянного тока для одного полюса, но в разных присоединениях щита постоянного оперативного тока. Организационные предписания требуют от персонала скорейшего поиска и устранения возникшей неисправности. В то же время, в силу сильной разветвленности цепей питания постоянного тока, быстро

найти место повреждения не представляется возможным. Обычно время поиска неисправности значительно превосходит время её устранения. Таким образом, сократив время поиска места повреждения на землю, персонал сокращает вероятность появления и развития аварий, связанных с ложной работой цепей питания и управления.

Подобные неисправности определялись секционированием и поочередным отключением присоединений цепей постоянного тока, как описано в [7-10]. При удачном стечении обстоятельств этот способ давал положительный результат. Однако существуют двойные замыкания на землю в цепях одного полюса системы постоянного тока, но на разных присоединениях, тогда способ с поочередным отключением не дает необходимого результата.

Применение микропроцессорных терминалов в цепях релейной защиты часто не допускает перерыва питания. Более того, такой перерыв может стать причиной ложной работы релейной защиты, даже при исправных цепях постоянного оперативного тока. Персонал поставлен в жесткие условия - необходимо с одной стороны определить направление повреждения цепей постоянного тока, возможно в нескольких одновременно, а с другой стороны, нельзя производить поочередное отключение присоединений, так как можно вызвать ложную работу устройств релейной защиты и автоматики.

### **2.3 Причины отказов РЗ из-за повреждений в цепях постоянного оперативного тока**

Как отмечает автор [7], вопросы надежности питания сетей постоянного оперативного тока тесно связаны с вопросами контроля изоляции. Традиционные схемы в виде Т-образного моста с двумя резисторами в плечах и одним реле, подключаемым к земле, способны лишь указать факт снижения изоляции во всей системе без указания присоединения [8-12].

При наличии повреждения изоляции на землю, создаются условия для ложной работы устройств релейной защиты (рис. 2.1).

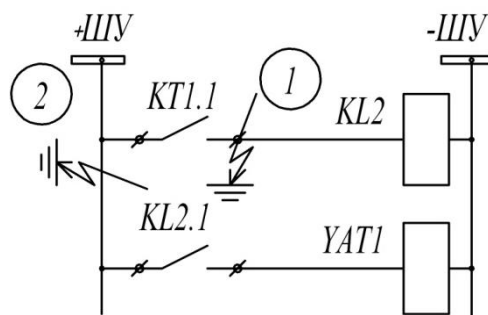


Рисунок 2.1 — Фрагмент схемы цепей постоянного оперативного тока при наличии повреждения на землю

Известно, что повреждение изоляции на землю в одной точке, не приведет к изменению конфигурации электрической схемы, а следовательно, к изменению токораспределения в схеме. Как видно из рис. 2.1, повреждение в точке 1 не вызовет срабатывания реле KL2. Но, как правило, монтаж присоединений цепей постоянного оперативного тока осуществляется на клеммных соединениях, расположенных в ряд и находящихся в панели. При попадании влаги в клемму имеется вероятность создания цепи утечки на землю [7,9]. Если вместе с утечкой в точке 1 появится снижение изоляции в точке 2, то через землю складывается цепь для срабатывания реле KL2, которое своими контактами KL2.1 соберет цепь электромагнита отключения YAT1 высоковольтного выключателя. Произойдет отключение, которое не было следствием работы измерительных органов релейной защиты, а было спровоцировано нарушениями в логической части понижением сопротивления изоляции на землю.

Причинами подобных повреждений могут быть как попадание влаги, сочетающееся со старением изоляции и запыленностью клеммных соединений, так и механические повреждения, например во время проведения ремонтных работ без снятия оперативного тока.

Аналогично ведут себя дискретные входы цифровых устройств. Согласно требованиям [2], дискретный вход должен иметь внутреннее сопротивление в закрытом состоянии не менее 60 кОм, при напряжении срабатывания 158 – 170В. Небольшой расчет показывает, что дискретные входы срабатывают при входном токе 2.8 мА. Тогда минимальное суммарное сопротивление утечки на землю, вызванное повреждениями в точках 1 и 2 (рис. 2.1) составляет 17.85 кОм.

Требования [10] определяют предельные минимальные значения сопротивлений на землю для различных значений величин напряжения систем постоянного оперативного тока, при которых персонал должен начать поиск поврежденного присоединения щита. Согласно тем же требованиям, предупредительная сигнализация должна срабатывать при удвоенном предельном сопротивлении.

Каждая причина может привести к отказу в отключении или неселективному отключению оборудования во время короткого замыкания и иметь тяжелые последствия вплоть до развития местных аварий в системные.

Для оперативного персонала ликвидация аварий является трудной задачей, решение которой связано с мобилизацией в короткий период времени всех его знаний, навыков и опыта. Трудность принятия решения усугубляется сознанием личной ответственности за правильность принимаемых решений в неожиданно возникшей и подчас сложной аварийной ситуации, когда персонал должен действовать безошибочно, четко и быстро. В этих условиях выдержка персонала, самообладание, сосредоточенность и концентрация внимания на главном являются залогом успешной ликвидации аварии.

## **2.4 Анализ современных методов контроля изоляции щитов постоянного тока**

Применяется два вида контроля изоляции на землю - неселективный и селективный. Неселективный контроль способен указать факт наличия

понижения сопротивления на землю. Имеются несколько методов его осуществления. Селективный контроль является более сложным технически, но он позволяет выделить поврежденный участок, или несколько независимых участков, имеющих повреждение изоляции на землю.

#### 2.4.1 Неселективный контроль изоляции в цепях постоянного оперативного тока

Классический способ неселективного контроля описан в [4, 7, 9, 11, 12]. Устройство представляет Т-образный мост (рис. 2.2), состоящий из двух резисторов одного номинала  $R$  и вольтметра (реле напряжения). Один вывод реле подключается к земляному проводнику, другой к общей точке резисторов.

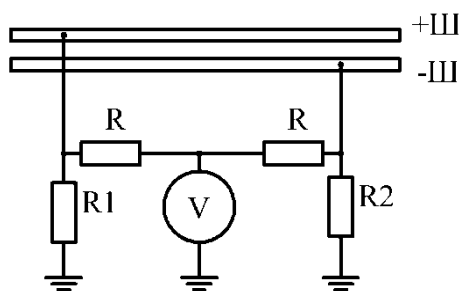


Рисунок 2.2 — Схема неселективного контроля изоляции на землю щитов постоянного тока

Сопротивления  $R1$  и  $R2$  характеризуют сопротивления полюсов системы постоянного тока на землю. Учитывая малое внутреннее сопротивление источника питания щита, можно утверждать, что при относительно небольшом (единицы килоом) сопротивлении резисторов моста  $R$ , и при большом сопротивлении изоляции на землю полюсов  $R1$  и  $R2$ , данная схема представляет сбалансированный мост и показания вольтметра равны нулю.



При понижении сопротивления изоляции одного из полюсов до уровня десятков-единиц килоом, мост выходит из баланса, а показания вольтметра приближаются к половине потенциала неповрежденного полюса на землю.

Указывается существенный недостаток данной схемы – при симметричном снижении сопротивления изоляции двух полюсов, данная схема неработоспособна[7,11]. Использование системных параметров ЩПТ (см. ниже) для выявления наличия понижения сопротивления изоляции на землю, не представляется возможным. Вместе с тем, симметричное повреждение изоляции является самым опасным в смысле вероятности ложной работы защит.

Для определения наличия повреждения при симметричном снижении изоляции на землю применение внешнего опорного сигнала является безальтернативным.

#### **2.4.2. Селективный контроль изоляции в цепях постоянного оперативного тока**

На основе анализа существующих работ сделан вывод, что для выделения участка с понижением сопротивления изоляции на землю, условно, необходимо на интервале времени наблюдения, разделение схемы всего щита постоянного тока на 2 зоны:

- часть, включающая источник питания (выпрямительно-подзарядное устройство, аккумуляторную батарею)
- контролируемый на данном интервале времени ограниченный участок сети, присоединение.

Границей раздела сети от контролируемого участка является место установки датчика тока. Направление от сети в контролируемый участок является условно-положительным направлением работы системы контроля изоляции.

Подобное условное разделение сети показано на рис. 2.3.

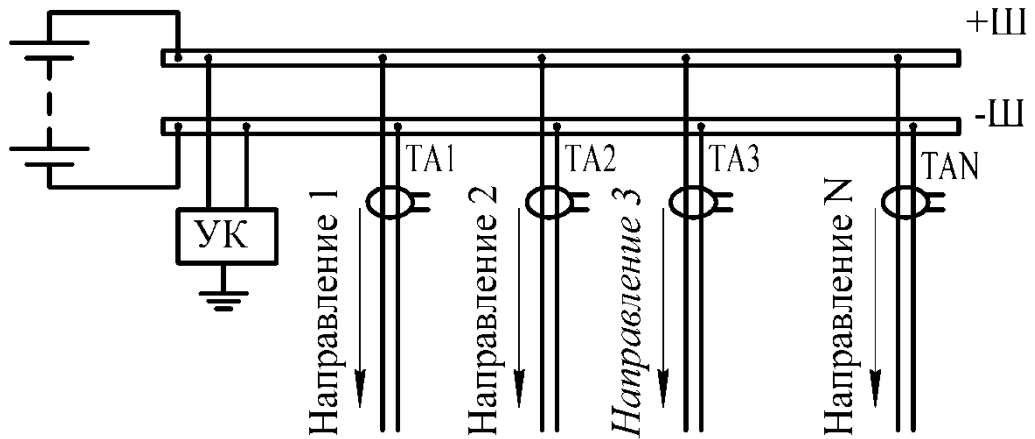


Рисунок 2.3 — Условное разделение сети для поиска поврежденного участка

Непосредственно к общим шинам щита и к земляному проводнику подключается некоторое контролирующее устройство УК (рис. 2.3), задающее некое воздействие на всю сеть постоянного тока. Для осуществления селективного контроля необходимо, чтобы контролируемые участки имели в начале датчики тока ТА1 - ТАН.

Датчики тока отделяют контролируемое данным устройством направление (указано стрелкой на рисунке 2.3), или зону, при наличии повреждения изоляции на землю в котором система контроля дает положительный ответ. Контролируемое направление обозначено стрелкой (рис. 2.3) и имеет зону, начинающуюся от датчика тока ТА, устанавливаемого вначале присоединения. Под текущим контролем находится все присоединение, сходящееся к датчику тока.

Если, повреждение присутствует в системе, но отсутствует в зоне контролируемого участка, система после тестирования должна дать отрицательный ответ независимо от текущих системных параметров.

Для осуществления селективного контроля изоляции на землю применимы два основных метода:

- с использованием системных параметров щита постоянного тока;
- с наложением внешнего тестового сигнала тока или напряжения.

Использование системных параметров подразумевает работу устройства за счет процессов, протекающих в сети постоянного тока, когда эти процессы протекают за счет энергии собственных источников системы.

Рассмотренный выше способ неселективного контроля, основанный на работе Т-образного резистивного моста, осуществлен за счет работы собственной аккумуляторной батареи, следовательно, основан на системных параметрах.

Представляет интерес разработка «ЭКРА-СКИ», фирмы «Экра», основанная на использовании системных параметров, предназначенная для осуществления селективного контроля изоляции [13-17].

Система «ЭКРА-СКИ» работает за счет смещения петли гистерезиса дифференциального датчика при наличии активного сопротивления утечки на землю ниже заданной величины. Устройство «ЭКРА-СКИ» используют в работе системные параметры щита постоянного тока.

По заявлениям разработчиков устройства «ЭКРА-СКИ», главным достоинством является отсутствие инжектируемого в систему токового сигнала, способного вызвать ложную работу защит.

Недостатками данного подхода являются: зависимость постоянной составляющей тока утечки от системных параметров щита, чувствительность к пульсациям напряжения источника питания, снижение чувствительности при двойном замыкании на землю одного полюса в разных присоединениях.

Для устранения влияния системных параметров на устройство селективного контроля изоляции, в данной работе предлагается усовершенствование метода с наложением внешнего опорного сигнала напряжения.

Требования [1, 2] к устройствам селективного поиска повреждения предписывают независимость работы устройств от системных параметров ЩПТ, что возможно обеспечить только применяя метод с наложением внешнего сигнала.

## 2.5 Представление предполагаемой схемы цепей постоянного оперативного тока в виде схемы с сосредоточенными параметрами

В работах [17-22] предлагается несколько способов наложения внешнего опорного сигнала. Предлагается использовать подачу опорного сигнала на один из полюсов, что может вызвать ложную работу защит. Так же предлагается использовать линейно-изменяющееся напряжение [20], но там же упомянуто что этот способ имеет большую погрешность.

В некоторых работах, например в [17], предлагается наложение через резистивную развилку, подобную изображенной на рис. 2.4.

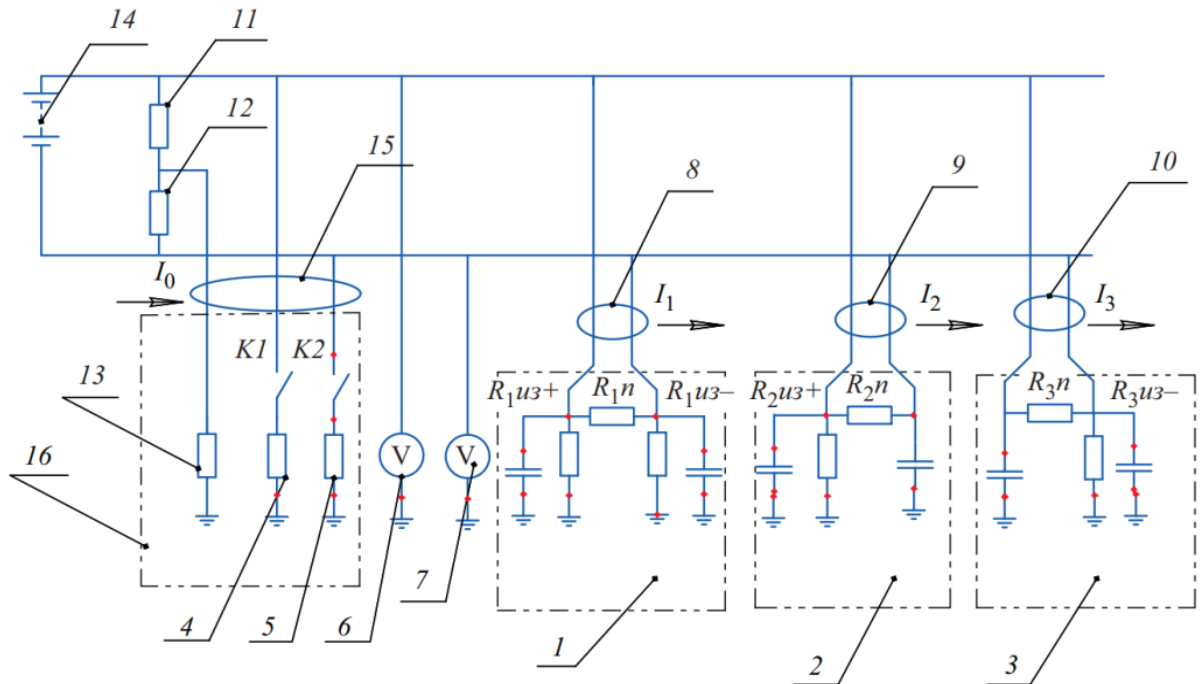


Рисунок 2.4 — Схема присоединения устройства «ЭКРА-СКИ» к щиту постоянного тока

Применение резистивной развилки не дает развязки по постоянной составляющей с земляным проводником, значительно ослабляет налагаемый сигнал, обладает излишним тепловыделением. По этим причинам в данной работе предлагается осуществлять наложение внешнего опорного сигнала через емкостную развилку. Современной промышленностью выпускаются

конденсаторы с полимерной изоляцией, рассчитанные на работу в цепях переменного и постоянного тока с низким отклонением от номинальной емкости и с гарантийной наработкой до 30000 часов [23].

С подобной развилки осуществляется контроль потенциала переменной составляющей от налагаемого источника.

Схема наложения внешнего опорного сигнала приведена на рис. 2.5 [24-31].

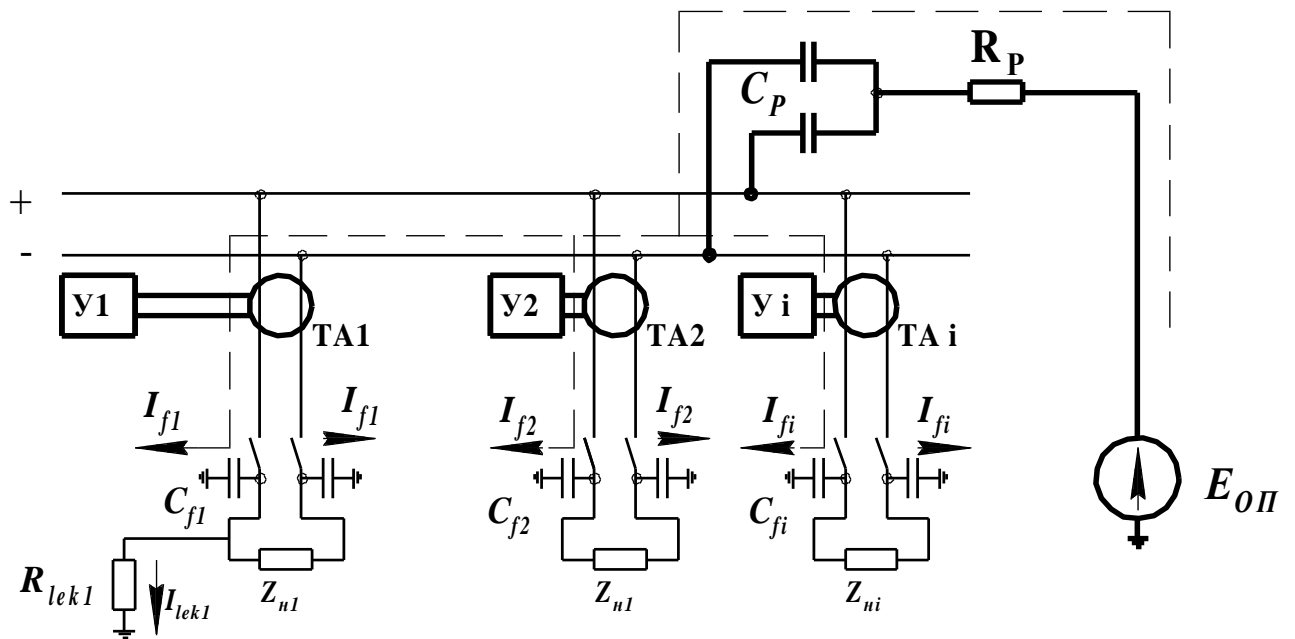


Рисунок 2.5 — Схема подачи внешнего опорного напряжения для определения поврежденного фидера щита постоянного тока:  $E_{OP}$  — источник внешнего синусоидального опорного напряжения;  $R_l$  — балластное сопротивление;  $I_l$  — составляющая полного тока от источника опорного напряжения;  $C_l$  емкости развилки;  $T_{Ai}$  — датчики тока фидеров;  $I_{fi}$  — составляющая тока фидера от источника опорного напряжения;  $C_{fi}$  — паразитная емкость фидера на землю;  $V_i$  — усилитель сигнала с датчика тока;  $I_{lek1}$  — активная составляющая тока утечки фидера;  $R_{lek1}$  — активная составляющая сопротивления утечки на землю фидера;  $Z_{Hi}$  — сопротивление нагрузки (потребителя) фидера

Рассмотрим часть схемы цепей постоянного оперативного тока относительно шин щита. Каждое присоединение должно быть электрически изолировано от земли и обладает некой паразитной емкостью на землю. Шины щита питаются от мощной аккумуляторной батареи, параллельно которой подключается ВАЗП, которая, обладает малыми статическим и динамическим сопротивлением. Поэтому относительно внешнего опорного напряжения она

находится под одним потенциалом относительно земли. На рис. 2.5 представлена схема подачи внешнего опорного напряжения на щит постоянного оперативного тока.

Внешнее опорное напряжение подается на обе шины одновременно через емкостную развилку  $C_1$  (рис. 2.5), которая отделяет цепи постоянного тока щита от источника опорного напряжения  $E_{оп}$ . В отличие от метода с резистивной развилкой [17], емкостная развилка не пропускает постоянную составляющую тока, следовательно, в ней не будет потерь с выделением тепла. Так же при увеличении емкостей развилки  $C_1$ , показанной на рис. 2.5, уменьшается ее сопротивление для внешнего сигнала опорной частоты, что позволяет увеличить чувствительность устройства в целом. Далее в работе считаем, что оба полюса системы постоянного тока замкнуты накоротко по переменному току от опорного источника. Емкости  $C_{fi}$  определяются распределенностью цепей, питаемых от конкретного фидера, определяют суммарную емкость проводников и устройств присоединения, и являются паразитными.

Из рассмотренного следует схема замещения щита постоянного тока. Объединив оба полюса щита (рис. 2.5) получим схему, представленную на рис. 2.6.

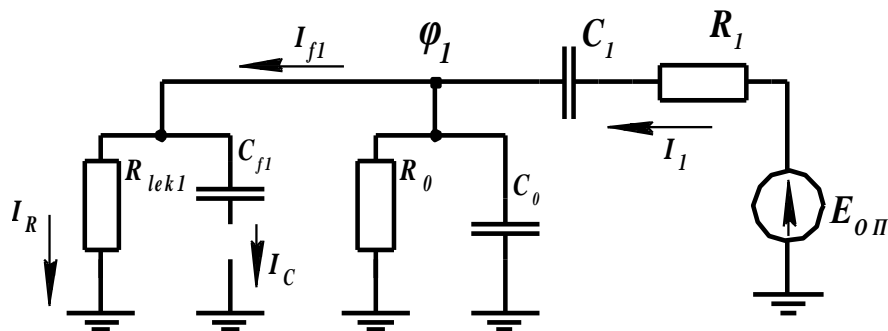


Рисунок 2.6 — Схема замещения щита постоянного тока для определения сопротивления изоляции фидера на землю:  
 $R_0$  – активное сопротивление утечки щита постоянного тока;  
 $C_0$  – емкость щита постоянного тока;  $\varphi_1$  – переменная составляющая потенциала шин щита от источника опорного напряжения

На схеме рис. 2.6 шины щита представлены закороченными и имеющими один потенциал  $\varphi_I$ . Источники постоянного тока из схемы исключаются.

Предлагаемая система состоит из двух основных блоков – генератор, реализующий синтез опорного сигнала, терминал – устройство сбора и анализа измерительной информации. Дополнительными элементами являются выносные усилители, монтируемые в начале контролируемых фидеров.

На представленной схеме сопротивление  $R_{lek1}$  и емкость  $C_{f1}$  в виде сосредоточенных параметров представляют активное сопротивление утечки и емкость на землю для контролируемого фидера. В виде сосредоточенных параметров сопротивления  $R_0$  и емкости  $C_0$  представлен щит постоянного тока без контролируемого фидера.

Задача состоит в определении величины сопротивления утечки на землю  $R_{lek1}$  для контролируемого фидера при одновременных измерениях величин тока утечки в рассматриваемом фидере  $i_{f1}(t)$  полного тока  $i_I(t)$  и переменной составляющей потенциала шин  $\varphi_I(t)$ . Последние две величины легко поддаются измерению, в то время как измерение тока утечки в рассматриваемом фидере  $i_{f1}(t)$  имеет свои особенности.

Для определения сопротивления утечки на землю  $R_{lek1}$  необходимо определить активную составляющую тока  $i_{f1}(t)$  относительно переменной составляющей потенциала шин  $\varphi_I(t)$ , обусловленной действием источника опорного напряжения  $E_{оп}$ . Известно [32-35], что активная составляющая мощности  $P_S$  на участке электрической цепи, содержащей контролируемый фидер, определяется по выражению:

$$P_S = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \varphi_I(t) \cdot i_{f1}(t) dt \quad (2.2)$$

где  $\varphi_I(t)$  и  $i_{f1}(t)$  – мгновенные значения переменных составляющих потенциала шин и тока фидера от источника опорного напряжения,  $T$  – время

наблюдения, на котором производятся замеры величин. Интервал времени  $T$  обязательно кратен периоду внешнего опорного источника  $E_{ОП}$ .

Ток фидера (рис. 2.6)  $i_{f1}(t)$ , очевидно, будет состоять из двух величин [32, 34]:

$$i_{f1}(t) = \frac{\varphi_1(t)}{R_{lek1}} + C_{f1} \cdot \frac{d\varphi_1(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Подставляя выражение (2.3) в подинтегральное выражение (2.2),  $P_s$  будет представлен как сумма двух интегралов:

$$P_s = \frac{1}{T \cdot R_{lek1}} \int_0^T \varphi_1^2(t) dt + \frac{C_{f1}}{T} \int_0^T \left[ \varphi_1(t) \cdot \frac{d\varphi_1(t)}{dt} \right] dt \quad (2.4)$$

В данной работе принято, что внешнее опорное напряжение  $E_{ОП}$  синусоидально без гармонических составляющих. При принятом допущении второе слагаемое в уравнении (2.4) равно нулю и интеграл (2.4) преобразуется в выражение (2.5):

$$P_s = \frac{1}{T \cdot R_{lek1}} \int_0^T \varphi_1^2(t) dt \quad (2.5)$$

Из выражения (2.5) можно определить искомое сопротивление утечки на землю контролируемого фидера:

$$R_{lek1} = \frac{\int_0^T \varphi_1^2(t) dt}{T \cdot P_s} \quad (2.6)$$

Для практической реализации устройства использовалась цифровая элементная база. Поэтому было использовано дискретное представление величин: тока утечки в рассматриваемом фидере  $i_{f1}(t)$ , полного тока  $i_l(t)$  и переменной



составляющей потенциала шин  $\varphi_I(t)$ . Выражение (2.6) можно представить в виде отношения сумм дискретных рядов [35]:

$$R_{lek1} = \frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{n=0}^N \varphi_n^2}{\sum_{n=0}^N [\varphi_n \cdot i_{fn}]} \quad (2.7)$$

Уравнение (2.7) определяет алгоритм основной программы цифрового модуля.

При металлическом замыкании на землю одного полюса выражение (2.6) становится неопределенным, т.к. его числитель и знаменатель обращаются в ноль. Тогда, как видно из рис. 2.6, токи  $i_I(t)$  и  $i_{fI}(t)$  практически сравниваются. Определить поврежденный участок можно по выражению:

$$I_2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_I(t) \cdot i_{fI}(t) dt \quad (2.8)$$

Выражение (2.8) можно представить в виде дискретной суммы [35]:

$$I_2 = \frac{\sum_{i=1}^N [i_{Ii} \cdot i_{fIi}]}{N} \quad (2.9)$$

Для случая с металлическим замыканием на землю одного полюса присоединения, токи  $i_I(t)$  и  $i_{fI}(t)$  будут совпадать, следовательно, значение, вычисленное по выражению (2.9) будет иметь максимальное значение, по сравнению со значениями, вычисленными для других присоединений.

## 2.6 Влияние системных параметров щита постоянного тока на селективный контроль сопротивления изоляции на землю

Уточненная схема щита постоянного тока позволит оценить уровень помех, вносимых в работу системы селективного контроля изоляции [36]. Дело состоит в конкретных особенностях аппаратуры, подключенной к присоединениям щита. В общем случае, суммарные емкости оборудования, подключенные к полюсам щита постоянного тока, могут различаться. Так же могут различаться емкости, подключенные к полюсам контролируемого фидера. Этот факт будет особенно важным, в случае питания контролируемого щита (или выделенной секции щиты) от выпрямительно-подзарядного агрегата без аккумуляторной батареи. Силовая часть выпрямительно-подзарядного агрегата строится по полупроводниковой схеме Ларионова (рис. 2.7) [37,38].

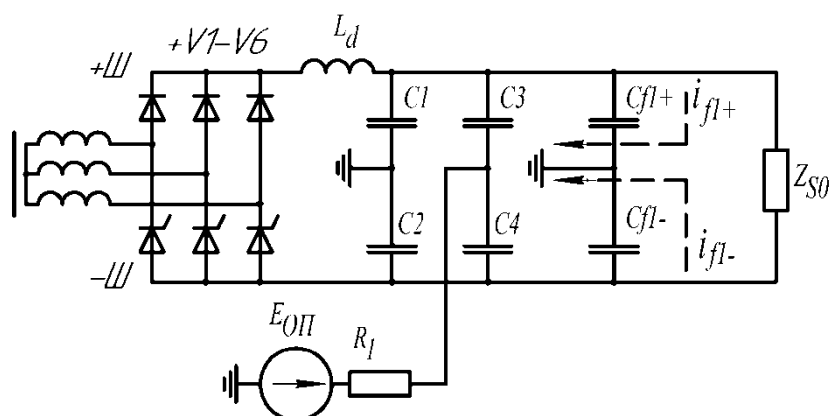


Рисунок 2.7 — Схема питания щита постоянного тока от выпрямительно-подзарядного агрегата и контролируемого присоединения

На рис. 2.7 обозначены:  $V1-V6$  – ВАЗП;  $C_1$  и  $C_2$  емкости полюсов щита постоянного тока, без емкостей контролируемого присоединения, относительно земли;  $C_3$  и  $C_4$  – емкости, входящие в состав генератора, инжекционной развилки. Они равны 60 мкФ [23];  $C_{fI+}$  и  $C_{fI-}$  емкости полюсов контролируемого присоединения относительно земли по 1 мкФ. Для расчета выбран

неблагоприятный режим, соответствующий разности емкостей пар  $C_1$  и  $C_2$ , а также  $C_{f1+}$  и  $C_{f1-}$  в 10%. Балластное сопротивление  $R_I=1$  Ом, служит для ограничения тока от генератора опорного напряжения. Сопротивление нагрузки контролируемого присоединения  $Z_{S0}$ , которым можно пренебречь, т.к оно не образует соединения на землю в случае рассмотрения схемы с сосредоточенными параметрами. Емкости полюсов щита  $C_1$  и  $C_2$ , согласно требованиям к устройству, примерно по 25 мкФ. Емкости полюсов щита, как и емкости полюсов контролируемого присоединения  $C_{f1+}$  и  $C_{f1-}$ , в общем случае, между собой не равны.

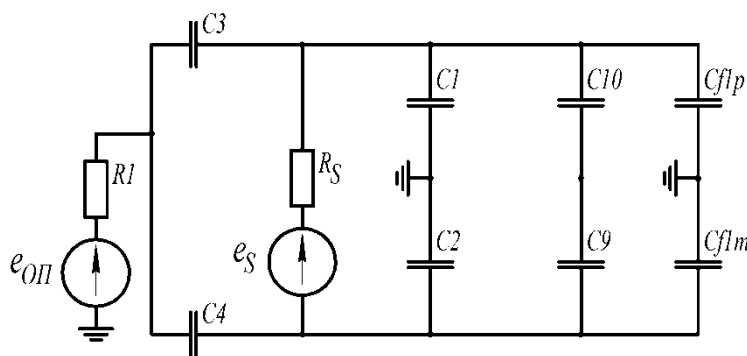


Рисунок 2.8 — Схема замещения щита постоянного тока и контролируемого фидера

На рис. 2.8 источник  $e_{оп}$  представляет генератор синусоидального сигнала опорной частоты 20 Гц. Источник  $e_s$  представляет собой выпрямительно-подзарядный агрегат, одиночно работающий на контролируемую выделенную секцию щита постоянного тока. Источник  $e_s$ , помимо постоянной составляющей, содержит частоты 300 Гц и 600 Гц. Внутреннее сопротивление источника примем  $R_6=0.1$  Ом.

Сопротивления ветвей схемы (рис. 2.9):

$$G_1 = j\omega C_1; G_2 = j\omega C_2; G_3 = j\omega C_3; G_4 = j\omega C_4; G_5 = \frac{1}{R_1}; G_6 = \frac{1}{R_6};$$

$$G_7 = j\omega C_{f1+}; G_8 = j\omega C_{f1-}; G_9 = j\omega C_9; G_{10} = j\omega C_{10};$$
(2.10)

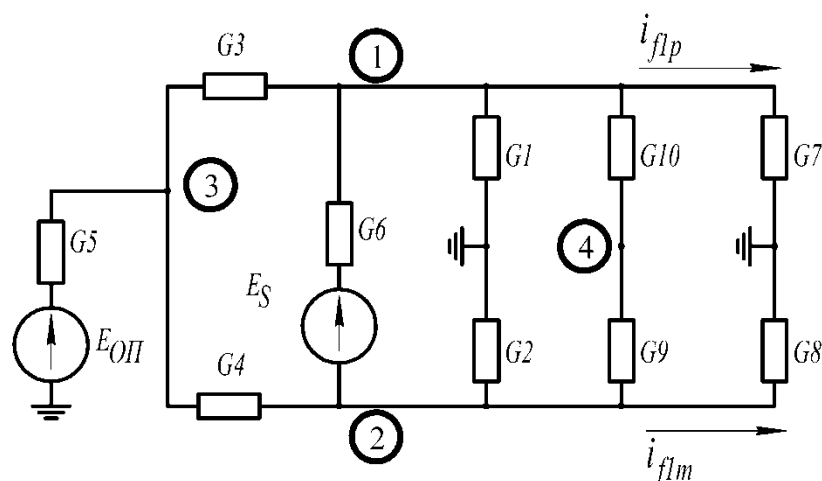


Рисунок 2.9 — Расчетная схема питания щита постоянного тока и схемы наложения опорного сигнала для оценки помех от выпрямительно-подзарядного агрегата

Расчет установившегося режима схемы (рис. 2.9) будем проводить методом наложения для разных режимов, соответствующих равенству нулю ЭДС всех источников, кроме одного [32]. Для этого будем проводить поочередное включение источников ЭДС  $E_{оп}$  или  $E_S$  так, что не равным нулю может быть ЭДС только одного источника. Первым расчетным режимом будет включенный источник  $E_{оп}$ , а ЭДС  $E_S$  равна нулю. Вторым расчетным режимом будет равенство нулю  $E_{оп}$ , а  $E_S$  имеет гармоническую составляющую 300 Гц заданной амплитуды. Затем поочередно зададим различные частотные составляющие 600 Гц и 900 Гц источника  $E_S$ . После расчета режимов нахождение токов контролируемого фидера  $i_{flp}$  и  $i_{flm}$ , будет представлено как сумма мгновенных значений всех рассчитанных режимов. Каждый режим просчитывается по методу узловых потенциалов.

Система уравнений по методу узловых потенциалов в матричном виде будет записываться так [32, 39, 42]:

$$Y_s \times \Phi_y = J_s \quad (2.11)$$

Где  $Y_s$  – матрица узловых проводимостей;  $\Phi_y$  – искомая матрица узловых потенциалов;  $J_s$  – матрица узловых токов.

Решением системы (2.11) будет матрица узловых потенциалов

$$\Phi_y = Y_s^{-1} \times J_s \quad (2.12)$$

где  $Y_s^{-1}$  – обращенная матрица узловых потенциалов [39, 41, 42].

Матрица узловых потенциалов  $\Phi_y$  является матрицей-столбцом:

$$\Phi_y = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Индексы в элементах матрицы узловых потенциалов  $\Phi_y$  будут соответствовать потенциалы узлов схемы (рис. 2.9) относительно земли. По известной матрице  $\Phi_y$  для данного режима можно определить токи контролируемого фидера.

Составим матрицу узловых проводимостей [32,39] для схемы замещения щита постоянного тока (рис. 2.9):

$$Y_s = \begin{bmatrix} G_3 + G_6 + G_1 + G_7 + G_{10} & -G_6 & -G_3 & -G_{10} \\ -G_6 & G_4 + G_6 + G_2 + G_9 + G_8 & -G_4 & -G_9 \\ -G_3 & -G_4 & G_3 + G_5 + G_4 & 0 \\ -G_{10} & -G_9 & 0 & G_9 + G_{10} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Матрица узловых токов в общем виде:

$$J_s = \begin{bmatrix} E_s G_6 \\ -E_s G_6 \\ E_{оп} G_5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Узлам 1 и 2 физически будут соответствовать полюса щита постоянного тока. Для контроля переменной составляющей потенциала шин от опорного сигнала применена емкостная развилка  $C9$  и  $C10$  (рис. 2.8). В схеме замещения (рис. 2.9) этим емкостям соответствуют проводимости  $G_9$  и  $G_{10}$ . Потенциал образованного ими узла 4 (рис. 2.9), будет соответствовать потенциалу шин (относительно земли) от источника опорного сигнала.

Источник  $e_s$ , представляющий собой трехфазный выпрямитель [37, 40]. Выпрямитель имеет ЭДС на выходе, показанную на рис. 2.10.

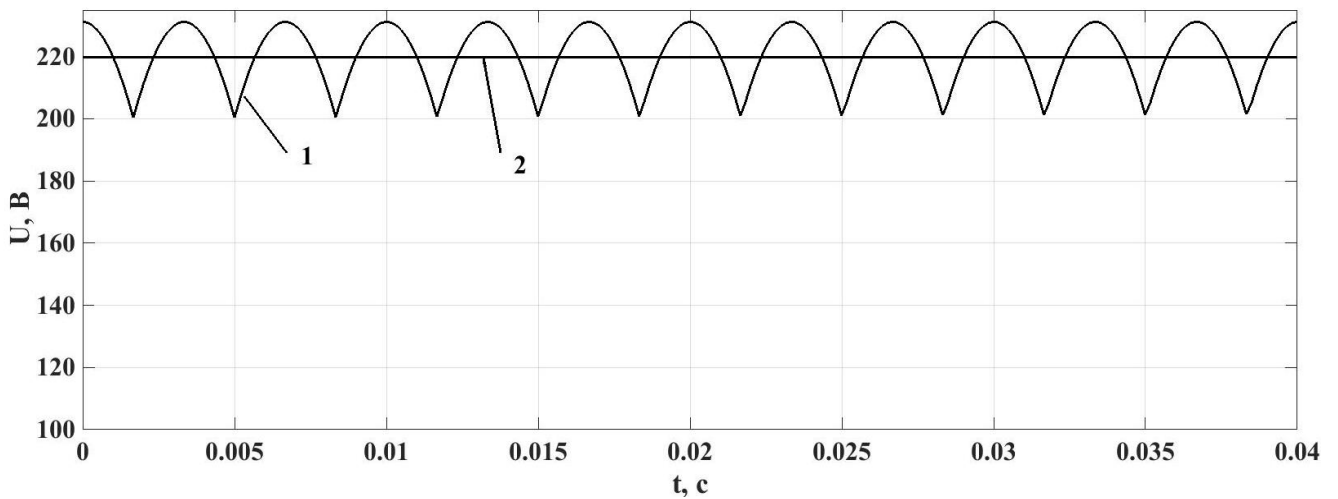


Рисунок 2.10 — Временные диаграммы выходного напряжения выпрямительно-подзарядного агрегата: 1 – мгновенное значение; 2 – средневывпрямленное значение

Диаграмме 2.10 соответствует действующее значение фазного напряжения 94 В на выпрямительной обмотке трансформатора ВАЗП.

Разложение в ряд Фурье [32, 40-43] выходной ЭДС выпрямителя, дает следующие коэффициенты ряда (таблица 3.1):

Таблица 3.1 – Коэффициенты ряда Фурье для напряжения на выходе ВАЗП

f, Гц	E, В
0	220
300	12.57
900	3.08
1200	1.36
1500	0.76

Вектор  $E_S$  имеет нулевую частоту, 300 Гц, 600 Гц, 900 Гц. Остальные частотные составляющие пренебрежимо малы по амплитуде. АЧХ напряжений на выходе источника  $E_S$  приведена на рис. 2.11.

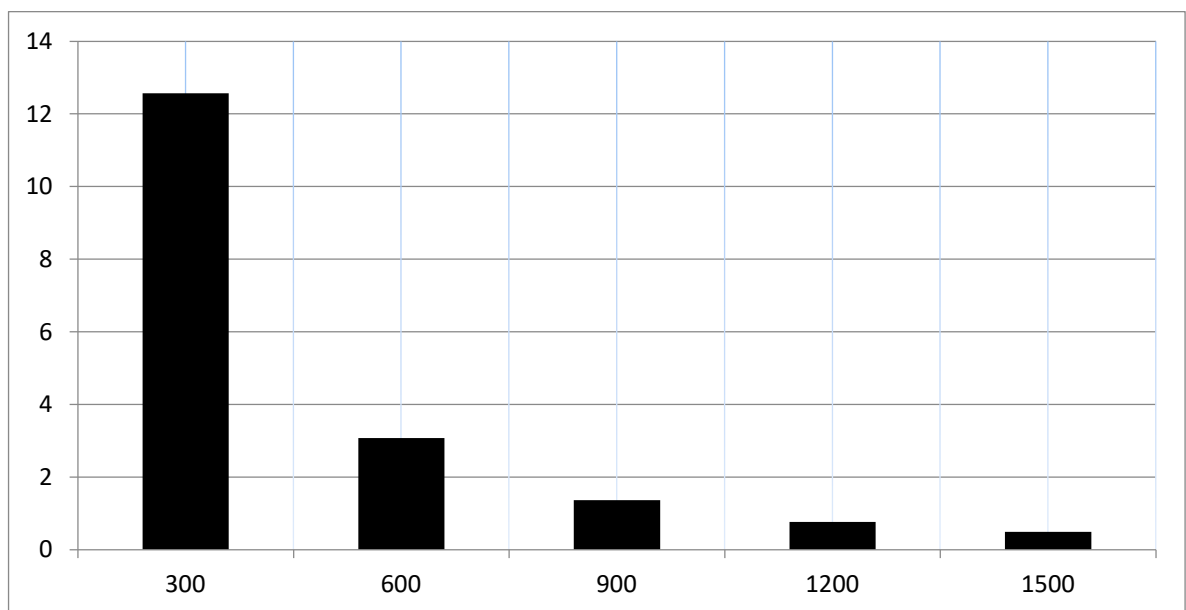


Рисунок 2.11 — Частотный состав ЭДС на выходе выпрямителя

Тогда для мгновенного значения ЭДС  $e_S$ , как функции времени можно записать:

$$e_S(t) = 220 + 12.44 \sin(1884t + 0.245) + 2.97 \sin(3768t - 2.65) + 0.375 \sin(5652t - 2.365) \quad (2.16)$$

Первый элемент вектора ЭДС  $e_s$  нулевой частоты. В цепи контролируемого фидера (рис. 2.9) эта составляющая не вызывает токов, поэтому в дальнейших расчетах ее можно принять равной нулю.

Для первого режима, соответствующий отличной от нуля ЭДС  $E_{OP}$ :  $\omega=125.6 \text{ c}^{-1}$ , комплекс которой  $\dot{E}_{OP}=30+j0$  можем записать матрицу узловых токов:

$$J_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 30 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Проводимости ветвей для частоты  $\omega=125.6 \text{ c}^{-1}$  будут:  $G_1 = j0.003391 \text{ См}$ ,  $G_2=j0.00314 \text{ См}$ ,  $G_3=j0.00628 \text{ См}$ ,  $G_4=j0.00628 \text{ См}$ ,  $G_5=1 \text{ См}$ ,  $G_6=10 \text{ См}$ ,  $G_7=j1.256 \cdot 10^{-4} \text{ См}$ ,  $G_8=j1.386 \cdot 10^{-4} \text{ См}$ ,  $G_9=j6.28 \cdot 10^{-4} \text{ См}$ ,  $G_{10}=j6.28 \cdot 10^{-4} \text{ См}$ .

Матрица узловых проводимостей для данного режима:

$$Y_v = \begin{bmatrix} 10 + j0.01042 & -10 & -j0.00628 & -j0.000628 \\ -10 & 10 + j0.0102 & -j0.00628 & -j0.000628 \\ -j0.00628 & -j0.00628 & 1 + j0.01256 & 0 \\ -j0.000628 & -j0.000628 & 0 & j0.001256 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

При вычислении по выражению (2.12) получим матрицу узловых потенциалов для данного режима:

$$\Phi_v = \begin{bmatrix} 19.46 - j0.086 \\ 19.46 - j0.086 \\ 29.999 - j0.132 \\ 19.467 - j0.0858 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Равенство между собой первых двух элементов матрицы узловых потенциалов подтверждает правильность предложенной схемы замещения



(рис. 2.6). Этим же потенциалам соответствует потенциал узла 4 измерительной емкостной развилки (рис. 2.8).

Для частоты 20 Гц емкостные проводимости полюсов контролируемого фидера будут:  $G_7 = j0.0001256$  См,  $G_8 = j0.0001381$  См. Тогда токи емкостной проводимости контролируемого фидера будут:

$$\begin{aligned} I_{f+} &= G_7 \cdot \Phi_v[1] = j0.0001256 \cdot (19.46 - j0.086) = j0.0024 A \\ I_{f-} &= G_8 \cdot \Phi_v[2] = j0.0001381 \cdot (19.46 - j0.086) = j0.0027 A \end{aligned} \quad (2.20)$$

Суммарный ток фидера  $I_{fI}$  будет  $j0.0051 A$ . Этот ток обусловлен пространственной распределенностью цепей контролируемого фидера.

При проведении расчетов методом наложения для каждого режима будут меняться значения частот и амплитуд задаваемых ЭДС, как было упомянуто выше.

Для второго режима  $\dot{E}_{OII} = 0$ ,  $\dot{E}_S = 12.07 + 3.03j$ ,  $\omega = 1884 \text{ с}^{-1}$ , тогда матрица узловых токов будет:

$$J_s = \begin{bmatrix} 120.73 + j30.304 \\ -120.73 - j30.304 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

При пересчете по выражениям (2.10) для частоты 300 Гц ( $\omega = 1884 \text{ с}^{-1}$ ), матрицу узловых проводимостей, аналогично (2.19) и в соответствии с (2.14), можно записать:

$$Y_v = \begin{bmatrix} 10 + j0.1564 & -10 & -j0.0942 & -j0.0094 \\ -10 & 10 + j0.1528 & -j0.0942 & -j0.0094 \\ -j0.0942 & -j0.0942 & 1 + j0.1884 & 0 \\ -j0.0094 & -j0.0094 & 0 & j0.0188 \end{bmatrix}$$

Подставляя обращенную матрицу  $Y_V^{-1}$  в выражение (2.12) для нового значения частоты, получим матрицу узловых потенциалов для частотной составляющей 300 Гц:

$$\Phi_V = \begin{bmatrix} 5.975 + j1.4411 \\ -6.121 - j1.4958 \\ 0.0025 - j0.0142 \\ -0.0730 - j0.0273 \end{bmatrix}$$

Частотная составляющая 300 Гц в токе фидера, согласно выражениям (2.21) будет  $I_{f1} = 0.0004 - j0.0014$  А.

Для частоты 600 Гц имеем:

$$J_s = \begin{bmatrix} -26.2198 - j14.0386 \\ 26.2198 + j14.0386 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; Y_V = \begin{bmatrix} 10 + j0.3127 & -10 & -j0.1884 & -j0.0188 \\ -10 & 10 + j0.3056 & -j0.0188 & -j0.0188 \\ -j0.1884 & -j0.1884 & 1 + j0.376 & 0 \\ -j0.0188 & -j0.0188 & 0 & j0.0377 \end{bmatrix}$$

Решая систему уравнений (2.12), получим матрицу узловых потенциалов для частотной составляющей 600 Гц:

$$\Phi_V = \begin{bmatrix} -1.3067 - j0.6689 \\ 1.3363 + j0.6941 \\ -0.0023 + j0.0064 \\ 0.0148 + j0.0126 \end{bmatrix}$$

Комплекс тока фидера, определенный как сумма составляющих по полюсам контролируемого фидера (2.20), будет равен  $I_{f1} = -0.000356 - j0.000615$  А.

Аналогично, для частоты 900 Гц ( $\omega = 3768 \text{ с}^{-1}$ ) матрицы узловых токов и узловых проводимостей будут иметь вид:

$$J_s = \begin{bmatrix} -2.6741 - j2.6261 \\ 2.6741 + j2.6261 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Y_v = \begin{bmatrix} 10 + j0.4691 & -10 & -j0.2826 & -j0.0283 \\ -10 & 10 + j0.4584 & -j0.2826 & -j0.0283 \\ -j0.2826 & -j0.2826 & 1 + j0.5652 & 0 \\ -j0.0283 & -j0.0283 & 0 & j0.0565 \end{bmatrix}$$

Решая систему уравнений (2.12), получим матрицу узловых потенциалов для частотной составляющей 900 Гц:

$$\Phi_v = \begin{bmatrix} -0.1354 - j0.1259 \\ 0.1379 + j0.1304 \\ -0.0007 + j0.0011 \\ 0.0012 + j0.0023 \end{bmatrix}$$

Комплекс тока фидера, определенный как сумма составляющих (2.20), будет равен  $I_{fl} = -9.95 \cdot 10^{-5} - j9.203 \cdot 10^{-5}$  А. Ток фидера  $I_{fl}$  частотой выше 600 Гц исчезающе мал по амплитуде и его влиянием можно пренебречь.

Из проведенных расчетов режима щита постоянного тока по схеме замещения (рис. 2.9), следует, что на потенциал переменной составляющей шин  $\varphi_I(t)$  от наложенного источника, высшие гармонические составляющие, имеющиеся в выходном напряжении выпрямителя, влияние практически не оказывают. Эта величина всецело определяется параметрами генератора опорного напряжения с частотой 20 Гц.

Для тока фидера, просуммировав частотные составляющие, полученные при расчете методом наложения, можно записать:

$$i_{f1}(t) = 5.134 \cdot 10^{-3} \sin(125.6t + 1.566) + 1.479 \cdot 10^{-3} (1884t - 1.307) + 7.107 \cdot 10^{-4} \sin(3768t + 2.095) + 1.355 \cdot 10^{-4} \sin(5652t + 2.395) \quad (2.21)$$

Графики тока фидера, описываемого выражением (2.21), совместно с переменной составляющей напряжения шин от опорного генератора, приведены на рис. 2.12.

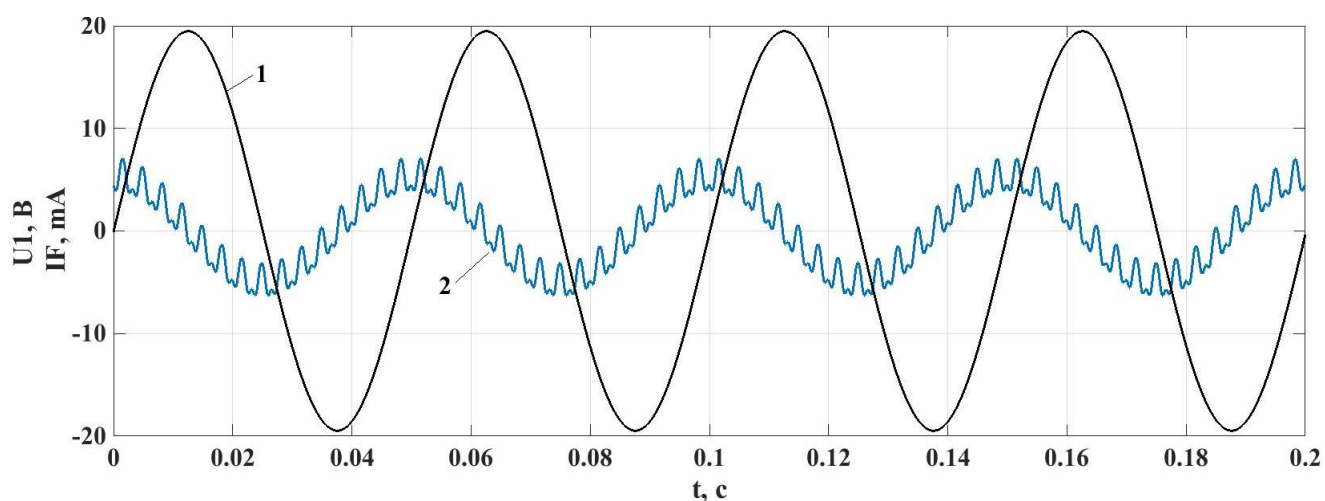


Рисунок 2.12 — Диаграммы тока фидера и напряжения шин при работе щита от трехфазного выпрямителя и внешнего опорного генератора:  
1 – напряжение шин; 2 – ток контролируемого фидера

Из выражения (2.21) следует, что при питании ЩПТ от трехфазного выпрямителя совместно с генератором опорного сигнала, в спектре тока контролируемого фидера, помимо частоты опорного сигнала будут составляющие с частотами помех, кратными 300 Гц. Амплитуды помех будут зависеть от многих факторов, важнейшим из которых будет неравенство емкостей полюсов контролируемого фидера  $C_{f1+}$  и  $C_{f1-}$  (рис. 2.8).

## 2.7 Моделирование работы устройства контроля изоляции при наличии активного сопротивления утечки в контролируемой зоне

Для частотной составляющей 20 Гц, активная составляющая сигнальной мощности, определяемая по выражению (2.2), будет [32,34]:

$$P_s = \operatorname{Re}(i_1 \cdot \tilde{I}_{f1}) \quad (2.22)$$

где  $\tilde{I}_{f1}$  - комплекс, сопряженный с комплексом тока фидера.  $i_1$  - комплекс напряжения на выходе емкостной измерительной развилки. Подставив в выражение (2.22) значение суммарного тока, определенного по (2.20) получим:

$$P_s = \operatorname{Re}((-19.467 + j0.0585) \cdot (-j0.0051)) = 0.0003 \text{ Вт} \quad (2.23)$$

Расчет активного сопротивления утечки по выражению (2.6), даст

$$R_{LEK} = \frac{|i_1|^2}{P_s} \quad (2.24)$$

где  $|i_1|$  - модуль вектора сигнала, снимаемого с измерительной развилки. Расчет даст величину  $R_{LEK} = \frac{|-19.467 + j0.0585|^2}{0.0003} = 1263200 \text{ Ом}$ . Рассчитанное по (2.24) сопротивление утечки имеет значение, значительно превышающее требование селективно определяемого сопротивления.

Чтобы смоделировать утечку в контролируемой зоне предусмотрим в расчете режима для составляющей 20 Гц в проводимости  $G_8$  наличие отличной от нуля действительной части, соответствующей активному сопротивлению утечки 20 кОм. Тогда  $G_8 = 5 \cdot 10^{-5} + j1.381 \cdot 10^{-4} \text{ См}$ . Матрица узловых проводимостей (2.14) примет вид:

$$Y_v = \begin{bmatrix} 10 + j0.01042 & -10 & -j0.00628 & -j0.000628 \\ -10 & 10.00005 + j0.0102 & -j0.00628 & -j0.000628 \\ -j0.00628 & -j0.00628 & 1 + j0.01256 & 0 \\ -j0.000628 & -j0.000628 & 0 & j0.001256 \end{bmatrix}$$

В матрице узловых мраводимостей изменяется действительная часть элемента  $Y_v(2,2)$ . Матрица узловых токов останется неизменной как для описанного первого режима, когда действует только генератор опорной ЭДС,  $\omega=125.6 \text{ с}^{-1}$ :

$$J_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 30 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Решением уравнения (2.12) будет матрица узловых потенциалов:

$$\Phi_v = \begin{bmatrix} 19.467 - j0.0356 \\ 19.467 - j0.0354 \\ 29.999 - j0.1322 \\ 19.4671 - j0.0355 \end{bmatrix}$$

Ток фидера, определенный по выражениям (2.20) будет  $I_f = 9.827 \cdot 10^{-4} + j5.13 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ . Вычисленное значение произведения будет:  $P_s = \text{Re}((-19.467 - j0.0355) \cdot (9.827 \cdot 10^{-4} - j0.00513)) = 0.0189 \text{ Вт}$ . Тогда вычисленное значение активного сопротивления утечки (2.24) в зоне контролируемого фидера будет:

$$R_{LEK} = \frac{|19.467 + j0.0355|^2}{0.0189} = 20051 \text{ Ом.}$$

Моделирование показало, что представление щита постоянного тока в виде схемы замещения (рис. 2.8) и (рис. 2.9), обеспечивает возможность проведения селективного контроля изоляции на землю, осуществляемого выделением

присоединений с помощью датчиков тока. Используемые диагностические параметры [44,45] обладают необходимыми признаками, позволяющие однозначно определять поврежденное направление щита постоянного тока.

### **Выводы по 2 главе**

1. Обоснована необходимость улучшения системы контроля изоляции цепей СОПТ основе статистических данных об аварийных ситуациях.
2. Обоснован метод селективного контроля изоляции на основе наложения внешнего опорного сигнала.
3. Разработана схема замещения для селективного контроля изоляции щита постоянного оперативного тока, основанного на наложении внешнего опорного напряжения, не вносящего помех в работу других устройств и вне зависимости от режима работы щита не способного вызвать ложную работу защит. Установлены следующие параметры внешнего опорного напряжения: синус амплитудой 20 В частотой 20 Гц.

### ГЛАВА 3. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ СИСТЕМЫ СЕЛЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ НА ЗЕМЛЮ ЩИТОВ ПОСТОЯННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА

#### 3.1 Построение генератора опорной частоты 20 Гц

В данной работе предлагается внешнее опорное напряжение подавать на обе шины одновременно через емкостную (инжектирующую) развилку  $C_I$ , которая отделяет цепи постоянного тока щита от источника опорного напряжения  $E_{OP}$  (рис. 2.5). В отличие от метода наложения опорного сигнала с резистивной развилкой, предлагаемого в [17], емкостная развилка не пропускает постоянную составляющую тока. Следовательно, в ней не будет потерь с выделением тепла. Так же, при увеличении емкостей развилки  $C_I$ , показанной на рисунке 2.5, уменьшается ее сопротивление для внешнего опорной частоты, что позволяет увеличить чувствительность устройства в целом. Далее в работе считаем, что оба полюса системы постоянного тока замкнуты накоротко по переменному току от опорного источника. Емкости  $C_{fi}$  определяются распределенностью цепей, питаемых от конкретного фидера, и являются паразитными.

Частота синусоидального сигнала принята 20 Гц, чтобы с одной стороны, достаточно далеко отстоять от частоты наводок 50 Гц, а с другой, иметь достаточную по уровню производную при небольшой амплитуде, необходимую для работы датчиков тока. В работах [46-48] указано, что на выходной сигнал датчика тока влияет величина, равная произведению амплитуды сигнала на угловую частоту. Выбор частоты опорного сигнала является компромиссом между величиной сигнала датчика тока и емкостного тока ЩПТ.

Две емкостные развилки представляют собой конденсаторы одинаковой емкости, образующие относительно земли сбалансированный емкостной мост и рассчитанные на удвоенное напряжение СОПТ.



Через одну развилку, инжектирующую, имеющую большее значение емкости, подается опорный сигнал. С другой развилки, измерительной, осуществляется снятие переменной составляющей потенциала шин. Для ограничения инжектируемого тока устанавливается балластный резистор.

Было принято, что амплитуда переменной составляющей наложенного потенциала шин  $\varphi_I$  не должна превышать 30 В [2]. При этом величина инжектируемого тока 1.8 мА, предлагаемой в [1, 2] не является обоснованной. Инжектируемый ток, в основном, носит емкостной характер, и при величине амплитуды  $\varphi_I$ , равной 30 В не вызовет ложной работы микропроцессорных терминалов. Величины емкостей, образующих инжектирующую развилку, выбраны по 60 мкФ с рабочим напряжением 450 В [23]. Инжектирующая развилка конструктивно входит в состав опорного генератора частотой 20 Гц. Структурная схема генератора приведена на рис. 3.1

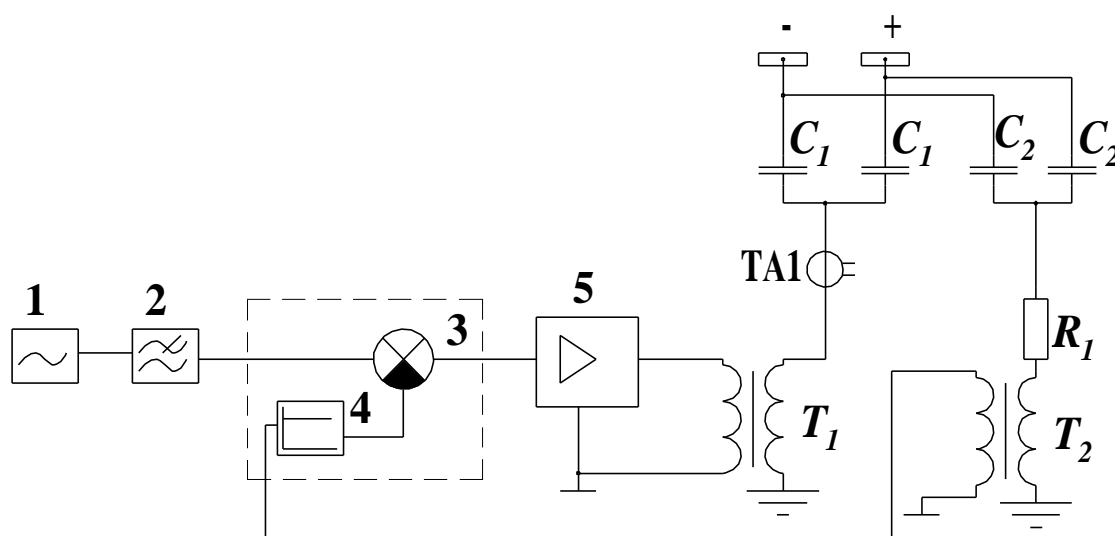


Рисунок 3.1 — Структурная схема генератора опорного напряжения:

1 – ШИМ-контроллер; 2 – ФНЧ; 3 – сумматор; 4 – фазовый фильтр; 5 – мощный УНЧ

Источник опорного напряжения состоит из нескольких функциональных узлов. Основным является генератор 1 (рис. 3.1) на микроконтроллере, формирующий сигнал с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Частота микроконтроллера стабилизирована кварцевым резонатором и имеет высокую

стабильность [49-53]. Заполнение ШИМ меняется в зависимости от требуемого значения мгновенного напряжения на выходе генератора [53, 54]. Коэффициенты заполнения, рассчитанные согласно закону синуса, хранятся в памяти EEPROM микроконтроллера [50]. Период синусоиды представлен 32 коэффициентами в памяти контроллера. Для уменьшения помех при переходном процессе, вызванным включением генератора в работу, модуль ШИМ 1 синтезирует синусоидальный сигнал так, что работа начинается и заканчивается четко целым числом периодов синуса 20 Гц.

Далее сигнал поступает на пассивный  $RC$  фильтр нижних частот [53, 54] (ФНЧ) 2, который формирует из ШИМ сигнала синусоиду. Далее сигнал поступает на пропорциональный регулятор напряжения, образованный фазовым фильтром 4 и сумматором 3. С выхода пропорционального регулятора напряжения сигнал опорной частоты поступает на вход мощного усилителя низкой частоты (УНЧ) [55], выход которого нагружен на выходной тороидальный трансформатор  $T_1$ . Выход трансформатора через балластный резистор  $R_1$  подключается к емкостной развилке  $C_1$ , образуя на шинах ЩПТ сигнал опорной частоты 20 Гц. Сигнал с шин ЩПТ через измерительный трансформатор  $T_2$  подается на пропорциональный регулятор напряжения 3-4, образуя контур ООС [56-58].

Передаточная функция повышающего трансформатора, звена 3 (рисунок 3.2), определена экспериментально. В процессе эксплуатации возможны изменения в составе оборудования ЩПТ. Какие либо присоединения щита могут выводиться на обслуживание. В схеме замещения (рисунок 2.6) это найдет отражение в изменении системных параметров  $R_0C_0$ . При постоянной емкости инжектирующей развилки  $C_1$  (рисунок 2.5), изменение емкости  $C_0$  в большей степени, чем  $R_0$  скажется на амплитуде переменной составляющей  $\varphi_1$ . Для уменьшения влияния изменения емкости щита  $C_0$ , необходим регулятор напряжения.

Линейная модель [56-58] генератора опорного сигнала представлена на рисунок 3.2.

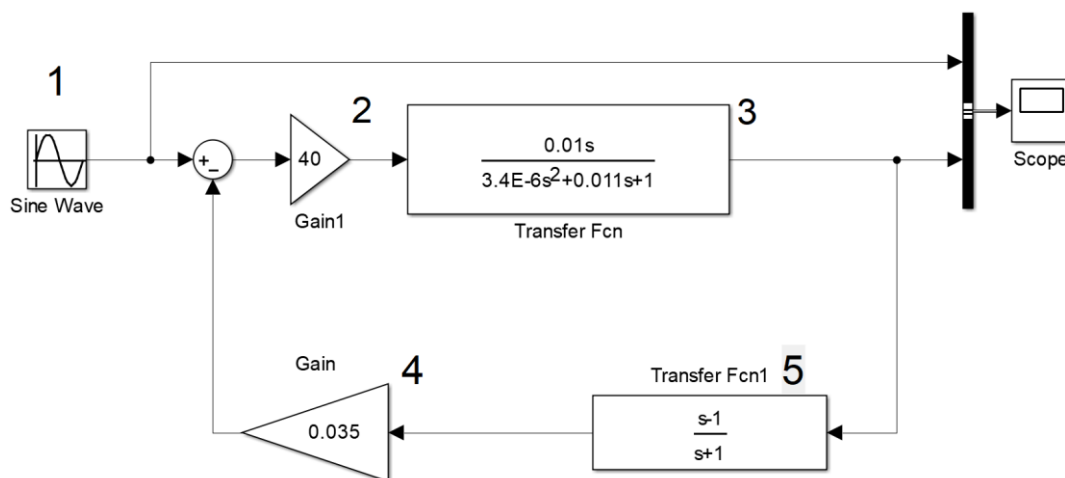


Рисунок 3.2 — Линейная модель опорного генератора для анализа работы:

- 1 – источник эталонного сигнала ШИМ контроллер; 2 – звено усилителя мощности; 3 – повышающего разделительного трансформатора; 4 – безынерционное звено регулятора напряжения; 5 – фазовый фильтр регулятора напряжения.

В звено 2 (рис. 3.2) входит усилитель мощности 5 и повышающий разделительный трансформатор Т1 (рис. 3.1). Выходом звена 2 является трансформатор. Это звено можно упрощенно представить как каскадное соединение звена типа ФНЧ с частотой среза 500 Гц и звена типа ФВЧ с частотой среза 15 Гц. Частоты среза определены экспериментально по уменьшению модуля коэффициента передачи на 3 дБ (рис. 3.3).

Для анализа работы генератора, исходя из схемы (рис. 3.2), звено «усилитель-трансформатор» 2 представим как прямое звено, охваченное звеном обратной связи из звеньев 3 и 4 (рис. 3.2). Из выражения для звена, охваченного отрицательной обратной связью [56-58]

$$T(s) = \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s)W_{oc}(s)} \quad (3.1)$$

где  $s = j \cdot \omega$  – комплексная переменная в преобразовании Лапласа;  $W_I(s)$  – передаточная функция прямого звена,  $W_{OC}(s)$  – передаточная функция звена обратной связи.

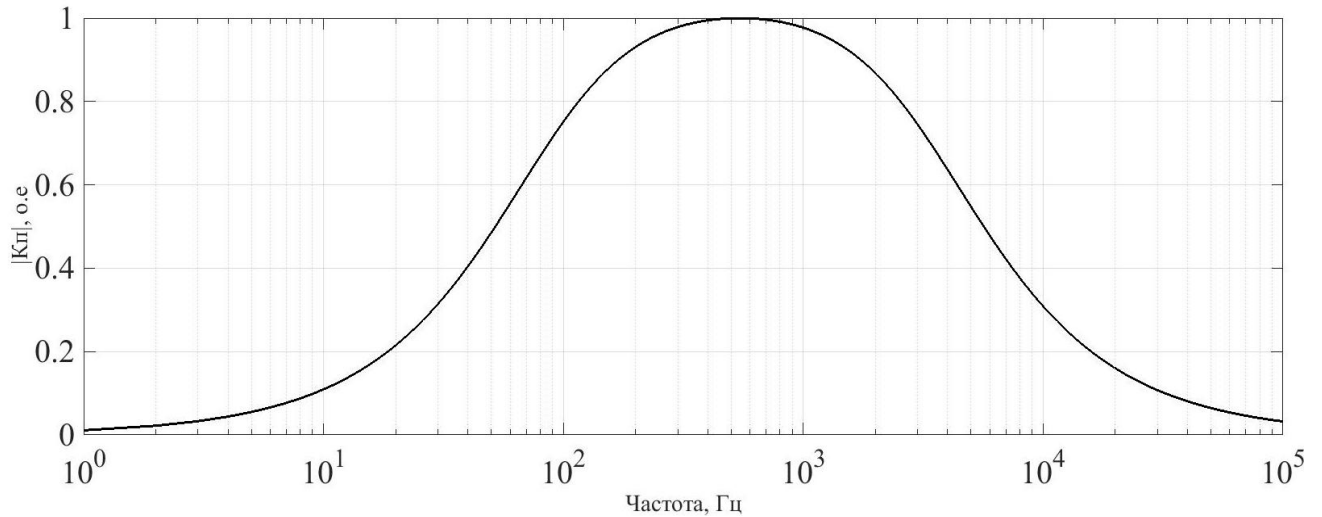


Рисунок 3.3 — Амплитудно-частотная характеристики звена «усилитель мощности - трансформатор» генератора опорного сигнала

Подставляя в (3.1) получим общую передаточную функцию генератора опорного сигнала, с учетом работы регулятора напряжения:

$$T(s) = \frac{0.0106s^2 + 0.0106s}{3.38 \cdot 10^{-6}s^3 + 0.0113s^2 + 1.01s + 1} \quad (3.2)$$

Корнями полинома знаменателя выражения (3.2) будут:  $s_1 = -3125$ ,  $s_2 = -90$ ,  $s_3 = -1$ . Полюсы функции (3.2) находятся в левой полуплоскости и лежат на действительной оси. Это означает, что исполнительное звено «усилитель-трансформатор», охваченное ООС в виде регулятора напряжения с фазовым фильтром, является устойчивым и не имеющим собственных резонансных частот [34, 58]. Нуль, лежащий в начале координат комплексной плоскости, свидетельствуют об отсутствии постоянной составляющей на выходе генератора [32].

Работает регулятор следующим образом. Допустим, что был отключен какой-либо из фидеров ЩПТ. При этом емкость  $C_0$  уменьшилась. Следовательно, возросло емкостное сопротивление щита относительно земли. Это приведет к увеличению амплитуды  $\varphi_1$ . Этот сигнал ООС с трансформатора  $T_2$  корректируется фазовым фильтром 4 таким образом, что фазы сигнала с выхода фазового фильтра 4 и выхода фильтра 2 совпадали по фазе. Тогда, при увеличении амплитуды на выходе фильтра 4, произойдет уменьшение амплитуды сигнала на выходе сумматора 3. Это приведет к стабилизации амплитуды  $\varphi_1$  на шинах ЩПТ. Фазовый фильтр 4 учитывает сдвиг фаз на опорной частоте в контуре: усилитель 5 – трансформатор  $T_1$  – инжектирующая развилка  $C_1$  – измерительная развилка  $C_2$  – балластный резистор  $R_1$  – измерительный трансформатор  $T_2$ . При подборе коэффициентов усиления фильтра 4 и усилителя 5 (глубины ООС), удастся сохранить устойчивость работы генератора, удержать диапазон изменения амплитуды  $\varphi_1$  на уровне 10% при изменении емкости ЩПТ от 0 до максимальной (50 мкФ) и повысить точность работы канала измерения напряжения.

Генератор опорной частоты выполнен в виде электронного блока, находящегося в отдельном корпусе. Подключение к шинам ЩПТ осуществляется с помощью автоматов.

### **3.2. Терминал (конечная часть системы)**

Структурная схема терминала представлена на рис. 3.4. Он состоит из трех входных каналов, названных соответственно:

- канал тока фидера (канал IF)
- канал потенциала (канал PH)
- канал налагаемого тока (канал IT)

Входы всех трех каналов аналоговые. Все три канала получают сигналы от устройств, не имеющих связи по постоянному току с контролируемым ЩПТ, что соответствует требованиям безопасности.

Все три канала монтируются на одном электронном модуле. Платы селектора каналов расположены на отдельных модулях.

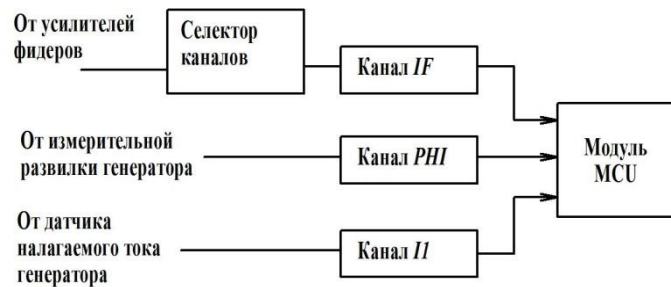


Рисунок 3.4 — Структурная схема терминала системы

В данной работе для выделения сигналов опорной частоты применяется цифровая фильтрация, а для подавления помех применена аналоговая. Аналоговая фильтрация осуществляется в каналах обработки сигналов IF, PHI, II (рис. 3.4).

### 3.2.1. Канал тока фидера

Данный канал служит для коммутации и аналоговой обработки сигналов, получаемых от внешних усилителей.

При передаче составляющей аналогового сигнала от опорного генератора к контролируемому фидеру, возникает ряд сложностей. На первом месте стоит нелинейность преобразования в широком диапазоне токов контролируемых фидеров, имеющих низкую частоту и амплитуду в пропорциональное напряжение. Эту проблему частично разрешают внешние усилители.

На втором стоит пространственная распределенность цепей постоянного тока. На практике, несколько ячеек ЩПТ, имеющие стандартные размеры, будучи расположенными в ряд, занимают несколько метров. В этих ячейках также располагается много дополнительного оборудования, создающего электромагнитные помехи. Помехи обуславливают необходимость принятия специальных мер. Таковыми является выбор способа передачи сигнала от внешнего усилителя, расположенного в голове контролируемого фидера до конечного терминала. В данной работе предлагается передача аналогового сигнала от внешнего усилителя до терминала токовым сигналом по витой паре. Промышленностью выпускается несколько вариантов кабелей «витая пара», в работе предлагается использование пары типа «2х2». По одной паре жил передается аналоговый сигнал от внешнего усилителя до конечного терминала, а по другой паре передается двухполярное питание внешних усилителей от терминала. Опрессовка и разделка кабелей «витая пара» осуществляется под стандартный разъем RJ45, имеющий 8 контактов.

Число описанных внешних усилителей соответствует числу фидеров щита постоянного тока. Для удобства построения, терминал может иметь число опрашиваемых входов кратное 8.

Применение токового выхода внешних усилителей позволяет компенсировать разницу длин проводов различных каналов. Также токовый выход, имеющий большое выходное сопротивление, позволяет исключить влияние наводок на цепи передачи слабого сигнала, вызванных неблагоприятной электромагнитной обстановкой. В терминале, функцию преобразования «ток-напряжение» выполняет активное сопротивление на выходе селектора каналов. Структурная схема канала приведена на рис. 3.5.

Канал содержит четыре каскадно-соединенные звена. Входной усилитель 1 (рис. 3.5) обеспечивает преобразование входного тока выбранного канала в пропорциональное напряжение, усиление этого напряжения. Также на этот

усилитель подается смещение, необходимое для формирования двухполярного сигнала результата АЦП.

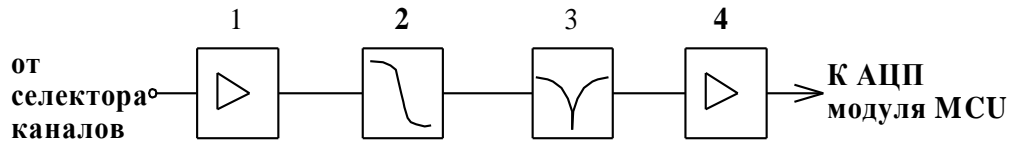


Рисунок 3.5 — Структурная схема канала тока фидера IF

После усиления каскадом 1, аналоговый сигнал поступает на вход активного ФНЧ 2 (рис. 3.5). Данный фильтр предназначен для выделения основной частоты опорного сигнала 20 Гц и подавления возможных высокочастотных составляющих входного сигнала канала.

Для дополнительного подавления сигналов промышленной частоты каскадно за ФНЧ 2 установлен режекторный фильтр 3, настроенный на частоту 50 Гц. После фильтрации режекторным фильтром, сигнал подается на вход буферного усилителя 4, выход которого подключается к АЦП.

Для анализа работы канала IF, на основании структурной схемы (рис. 3.5), разработана функциональная схема (рис. 3.6), представляющая каскадное соединение функциональных звеньев. Входной величиной является ток  $I_{IF0}$ , сформированный внешним усилителем.

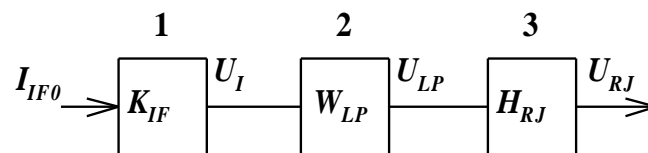


Рисунок 3.6 — Функциональная схема канала тока IF:

1 – входной преобразователь «ток-напряжение»;

2 – ФНЧ; 3 – режекторный фильтр



На рис. 3.6 входной токовый преобразователь и усилитель представлен звеном 1, имеющим действительный коэффициент передачи  $K_{IF}$ . Каскад представляет усилитель на ОУ, входной сигнал для которого снимается с низкоомного сопротивления  $R_{IF}$  (рис. 3.7). Звеном 2 (рис 3.6) представлен ФНЧ, звеном 3 режекторный фильтр.

Схема подключения внешнего усилителя к терминалу приведена на рис. 3.7. Схема приведена без указания цепей питания внешнего усилителя. Селектор каналов обеспечивает подключение на вход канала тока фидера IF токового выхода только одного внешнего усилителя. Преобразование выходного тока внешнего усилителя во входное напряжение  $U_{IF0}$  канала IF осуществляется низкоомным резистором  $R_{IF}$  величиной 51 Ом (рис. 3.7).

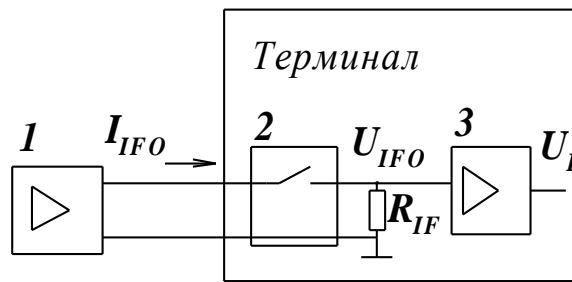


Рисунок 3.7 - Входные цепи канала тока фидера

- 1- внешний усилитель; 2-селектор каналов;  
3-входной усилитель канала тока фидера IF

Из рис. 3.7 видно, что входной ток  $I_{IF0}$ , от выбранного внешнего усилителя, создаст на резисторе  $R_{IF}$  падение напряжения  $U_{IF0}$ , которое, равно

$$U_{IF0} = I_{IF0} R_{IF}$$

Далее  $U_{IF0}$  усиливается звеном 3 (рис. 3.7), формируя напряжение  $U_I$  (рис. 3.7). Этот функциональный блок на рис 3.7 представляет звено 1 (рис. 3.6). Сформированное им напряжение  $U_I$  равно:

$$U_I = I_{IF0} R_{IF} K_{U1}$$

где  $K_{U1}$  – коэффициент усиления усилителя 3 (рис. 3.7).

Тогда коэффициент передачи звена 1 (рис. 3.6), представленный как отношение выходного напряжения  $U_I$  к входному току  $I_{IF0}$  определится:

$$K_{IF} = \frac{U_I}{I_{IF0}} = R_{IF} K_{U1} \quad (3.3)$$

Далее сигнал напряжения  $U_I$  поступает на вход ФНЧ 2 (рис. 3.6), представляющего собой фильтр Баттерворта структуры Саллена-Кея 2-го порядка [59, 60]. Фильтр Саллена-Кея выбран, т.к. обладает АЧХ без осцилляций как в полосе пропускания, так и в полосе подавления. В данной работе ФНЧ 2 выполнен на частоту среза 25 Гц. Для ФНЧ, частотой среза называют частоту, на которой модуль коэффициента передачи уменьшается на 3 дБ по отношению к модулю коэффициента передачи на нулевой частоте. В данной работе, фильтр выполнен без подстраиваемых элементов и не требует наладки, ввиду низкой чувствительности к разбросу параметров элементов схемы.

Известно, что АФЧХ фильтров, как и других динамических систем, принято представлять в виде отношения полиномов [58, 59]:

$$T(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{d_n s^n + d_{n-1} s^{n-1} + \dots + d_1 s + d_0} \quad (3.4)$$

где  $N(s)$  – полином числителя;  $D(s)$  – полином знаменателя;  $b_m..b_0$  и  $d_n..d_0$  – вещественные коэффициенты;  $T(s)$  – передаточная функция всей системы.

ФНЧ второго порядка имеет следующее классическое описание[59]:

$$T(s) = \frac{K_{НЧ} \omega_0^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q_F}\right)s + \omega_0^2} \quad (3.5)$$

где  $K_{НЧ}$  – коэффициент передачи на постоянном токе;  $\omega_0$  – частота среза;  $Q_F$  – добротность фильтра;

Для расчета фильтра примем  $K_{НЧ}=2$ ,  $\omega_0=157 \text{ с}^{-1}$ ,  $Q_F=1$ , тогда выражение 3.5 можно записать в виде:

$$T(s) = \frac{49298}{s^2 + 157s + 24649} \quad (3.6)$$

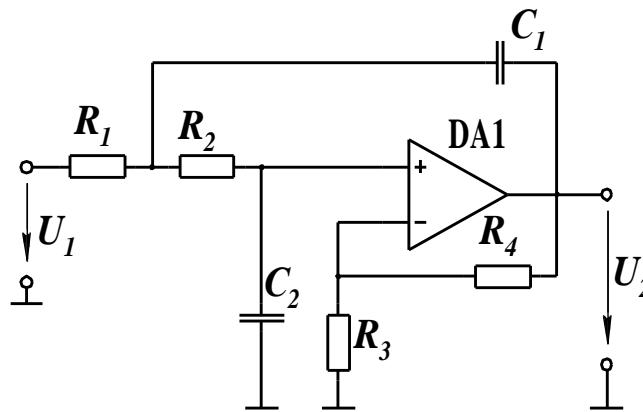


Рисунок 3.8 — Схема ФНЧ Саллена-Кея

Для ФНЧ Салелена-Кея передаточная функция записывается выражением [59, 61]:

$$T(s) = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)}{s^2 + \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} - \frac{R_4}{R_2 R_3 C_2}\right)s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.7)$$

При проектировании фильтра принимают  $R_1=R_2=R_{LP}$ ,  $C_1=C_2=C_{LP}$ . Тогда частоту среза [59-61], можно определить по выражению:

$$\omega_{0LP} = \frac{1}{R_{LP}C_{LP}} \quad (3.8)$$

Добротность фильтра нижних частот зависит [59] от соотношения сопротивлений  $R_3$  и  $R_4$ :

$$Q_F = \frac{1}{\left(2 - \frac{R_4}{R_3}\right)} \quad (3.9)$$

Примем значение емкости  $C_{LP}=0.1$  мкФ. Тогда из выражения (3.8):

$$R_{LP} = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{157 \cdot 10^{-7}} = 63694 \text{ Ом.}$$

Примем из ряда стандартных сопротивлений  $R=62$  кОм. При этом частота среза по выражению (3.8) составит 25.7 Гц, что является несущественным отклонением от заданной частоты.

Для обеспечения указанной добротности, согласно выражению (3.9) необходимо равенство сопротивлений резисторов  $R_3$  и  $R_4$ . Примем  $R_3$  и  $R_4$  равными 100 кОм.

Характеристика фильтра определится подстановкой величин  $R$ ,  $C$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  в формулу (3.7) получим для ФНЧ окончательное выражение:

$$W_{LP}(s) = \frac{52029}{s^2 + 161s + 26014}$$

Сократив это выражение на величину  $\omega_0^2$ , получим передаточную функцию:

$$W_{LP}(s) = \frac{2}{3.844 \cdot 10^{-5} s^2 + 6.189 \cdot 10^{-3} s + 1} \quad (3.10)$$

АЧХ и ФЧХ фильтра нижних частот приведена на рис. 3.9.

Коэффициент 2 является минимально возможным для данной схемы. Он не имеет принципиального влияния на форму АФЧХ. Как будет показано далее, данный каскад имеется в составе всех трех каналов терминала. Напряжение  $U_I$ , поданный на вход ФНЧ 2 (рис. 3.6) формирует сигнал  $U_{LP}$ . Из выражения (3.9) следует значение передаточной функции на частоте опорного сигнала  $j125.6 \text{ c}^{-1}$ :

$$W_{LP}(j125.6) = 1.0369 - j2.048$$

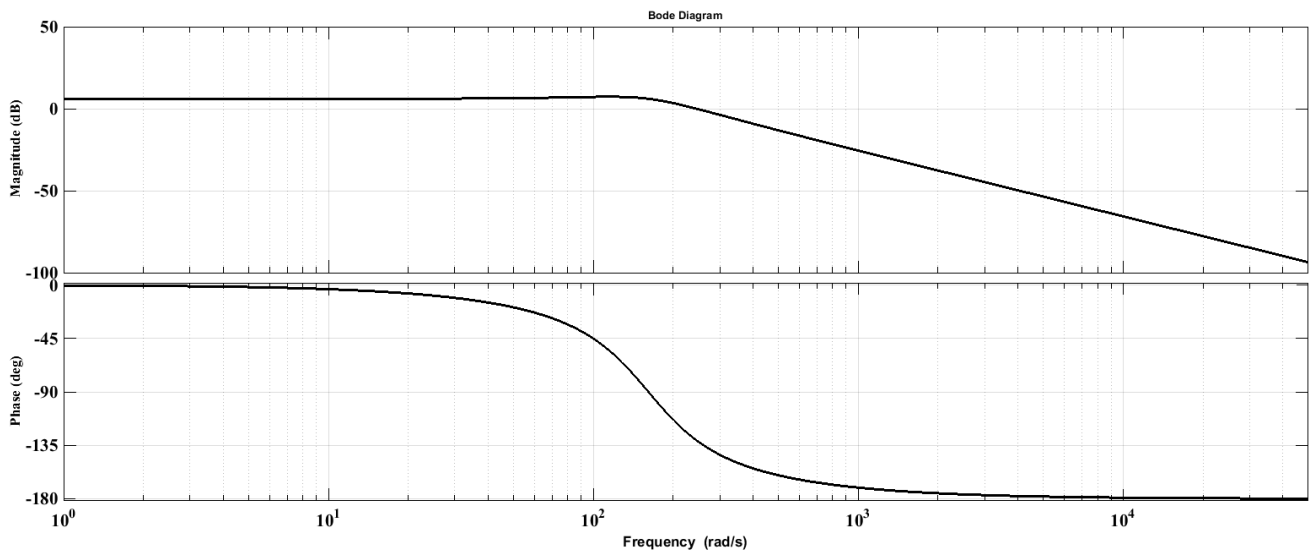


Рисунок 3.9 — АЧХ и ФЧХ ФНЧ канала тока фидера

Для дополнительной фильтрации этот сигнал проходит через полосно-подавляющий (режекторный) фильтр 3 (рис.3.6).

Полосно-подавляющий фильтр 3 (рис.3.6) имеет следующее описание [58]:

$$T(s) = \frac{K_{\text{ПФ}}(s^2 + \omega_0^2)}{s^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q_F}\right)s + \omega_0^2} \quad (3.11)$$

где  $K_{ПР}$  – коэффициент передачи на постоянном токе и на высокой частоте;  $Q_F$  – добротность фильтра;  $\omega_0$  – частота центра полосы подавления.

Фильтр 3 выполнен по схеме с мостом Вина, и позволяет в аналоговом канале дополнительно подавить наиболее мощную возможную помеху промышленной частоты 50 Гц.

Схема режекторного фильтра с мостом Вина приведена на рис. 3.10.

Данная схема фильтра выбрана благодаря своей простоте и возможности перестройки по частоте подавления в широких пределах [62, 63]. Это дает возможность настройки при разбросе параметров электрорадио элементов. Так же схема удовлетворительно функционирует при естественном изменении параметров элементов в процессе старения.

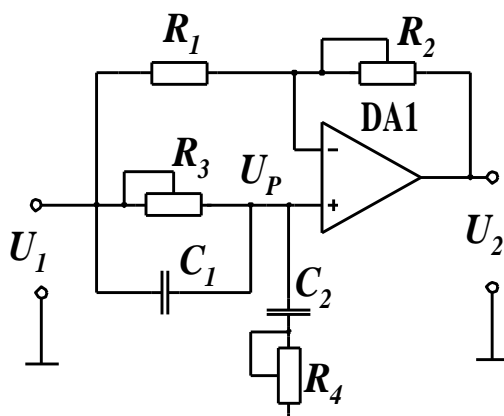


Рисунок 3.10 — Принципиальная схема режекторного фильтра с мостом Вина

Схема режекторного фильтра содержит два основных звена – инвертирующий усилитель, охваченный ООС на резисторах  $R_1$   $R_2$  и частотно-зависимое звено - перевернутый мост Вина с ветвями  $R_3C_1$  и  $R_4C_2$ . Обычно, для моста Вина, принимают одинаковыми значения емкостей и сопротивлений в ветвях. Примем,  $R_3=R_4=R$  и  $C_1=C_2=C$  [62, 63]. Резонансная частота  $\omega_0$  моста определяется равенством модулей емкостного и активного сопротивлений ветвей:

$$w_0 = \frac{1}{RC} \quad (3.12)$$

Тогда уравнение для перевернутого моста Вина запишется так:

$$W(s) = \frac{U_R(s)}{U_1(s)} = \frac{C^2 R^2 s^2 + 2RCs + 1}{C^2 R^2 s^2 + 3RCs + 1} \quad (3.13)$$

Передаточная функция фильтра может быть получена из общих правил [59-64] анализа схем с ОУ, охваченными ООС:

- равенство нулю дифференциального напряжения;
- отсутствия входных токов ОУ;
- равенства нулю выходного сопротивления ОУ;
- равенства бесконечности полоса пропускания и коэффициента усиления дифференциального напряжения ОУ.

Из перечисленных правил следует, что токи резисторов  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 3.9) равны по величине и направлены к инвертирующему входу ОУ. Тогда при равенстве нулю дифференциального напряжения для активного фильтра можно записать:

$$T(s) = W(s) - \frac{R_2}{R_1}(1 - W(s)) \quad (3.14)$$

При подстановке уравнения 3.13 в 3.14 последнее принимает вид, соответствующий классическому описанию 3.15:

$$H_{RJ}(s) = \frac{C^2 R^2 s^2 + 1}{C^2 R^2 s^2 + 3RCs + 1} \quad (3.15)$$

Наибольшее подавление получается при соотношении  $R_2/R_1=2/1$ ;

При проектировании фильтра примем значение емкости  $C=0.047$  мкФ, рассчитанное по выражению (3.12) значение  $R=67.759$  кОм. Проектируемый фильтр чувствителен к значениям параметров цепей  $R$  и  $C$  [62, 63], то в схеме фильтра используем подстроечные резисторы  $R_2-R_4$ .

Подставляя значения элементов получаем для режекторного фильтра окончательное выражение передаточной функции по напряжению:

$$H_{RJ}(s) = \frac{1.021 \cdot 10^{-5} s^2 + 1}{1.021 \cdot 10^{-5} s^2 + 9.588 \cdot 10^{-3} s + 1} \quad (3.16)$$

Рассчитанные АЧХ и ФЧХ по уравнению 3.16 приведены на рис. 3.11. Частота  $\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}$  соответствует нулю уравнения 3.16.

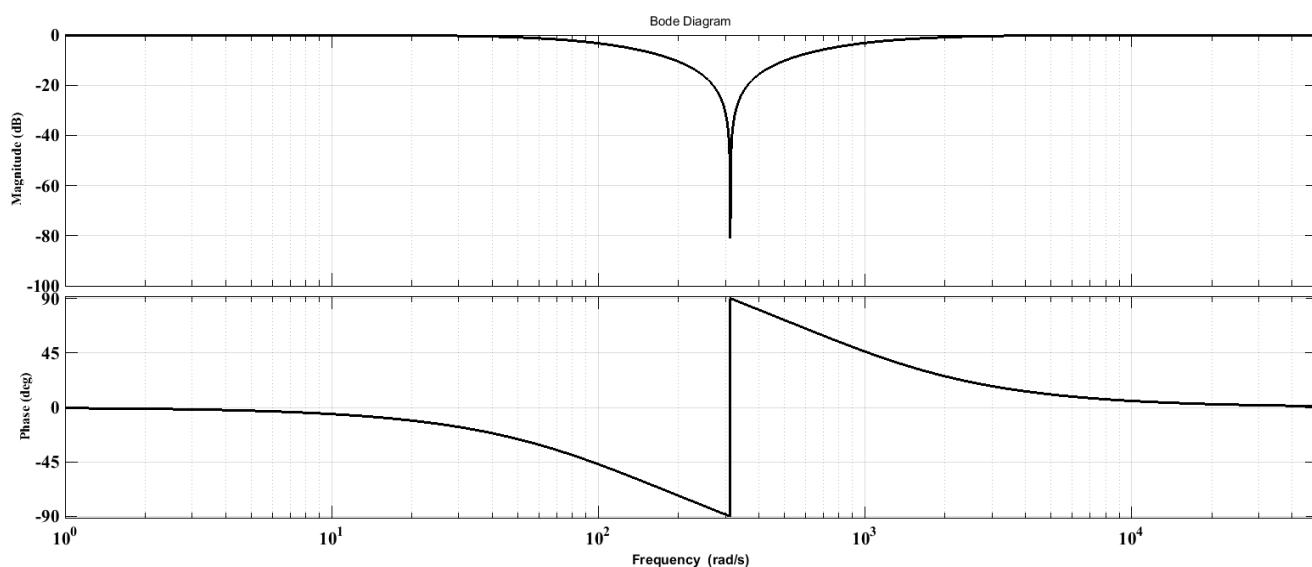


Рисунок 3.11 — АЧХ и ФЧХ режекторного фильтра канала тока фидера IF

Для сигнала опорной частоты значение передаточной функции:

$$H_{RJ}(j125.6) = 0.328 - j0.469$$



Абсолютное значение коэффициента передачи  $H_{RJ}(j125.6)$  равно 0.572, что необходимо учесть при дальнейшем рассмотрении работы устройства.

После режекторного фильтра 3, сигнал поступает на повторитель с единичным усилением 4, выходом которого является вход АЦП.

Результирующая характеристика канала определится как произведение уравнений 3.3, 3.10 и 3.16.

$$W_{IFT}(s) = \frac{U_{RJ}(s)}{I_{IF0}(s)} = K_{IF} W_{LP}(s) H_{RJ}(s) \quad (3.17)$$

Как будет показано далее, максимальная амплитуда сигнала  $U_{RJ}$  должна иметь значение 1 В при амплитуде входного тока  $I_{IF0}$  10 мА (рис. 3.7) для частоты входного сигнала 20 Гц. Тогда из 3.17 следует модуль передаточной функции:

$$|W_{IFT}(j125.6)| = \frac{1B}{0.01A} = 100B / A$$

Подставляя в выражение (3.17) значение частоты опорного сигнала, получим требуемое значение  $K_{IF}$ :

$$K_{IF} = \frac{|W_{IF}(j125.6)|}{|W_{LP}(j125.6)H_{RJ}(j125.6)|} = 76.2B / A$$

Из выражения (3.3) получаем усиление входного усилителя (звено 3 рис. 3.7) канала IF по напряжению  $K_{UI}=1.494$ , что достигается при настройке.

Общая АЧХ и ФЧХ канала тока фидера IF, определенная как отношение оператора выходного напряжения канала к оператору входного тока, определяется подстановкой в формулу(3.17) выражений передаточных функций фильтров  $W_{LP}(s)$ ,  $H_{RJ}(s)$  и усилителя  $K_{IF}$ :

$$W_{IFT}(s) = \frac{3.112 \cdot 10^{-3} s^2 + 304.8}{3.924 \cdot 10^{-10} s^4 + 4.317 \cdot 10^{-7} s^3 + 1.080 \cdot 10^{-4} s^2 + 1.577 \cdot 10^{-2} s + 1} \quad (3.18)$$

Рассчитанные АЧХ и ФЧХ канала тока фидера IF приведены на рис. 3.12.

Канал тока фидера IF является самым ответственным за точность работы устройства. Именно канал тока фидера IF подвержен внешним наводкам, а так же содержит нелинейное звено - электромагнитный датчик внешнего усилителя.

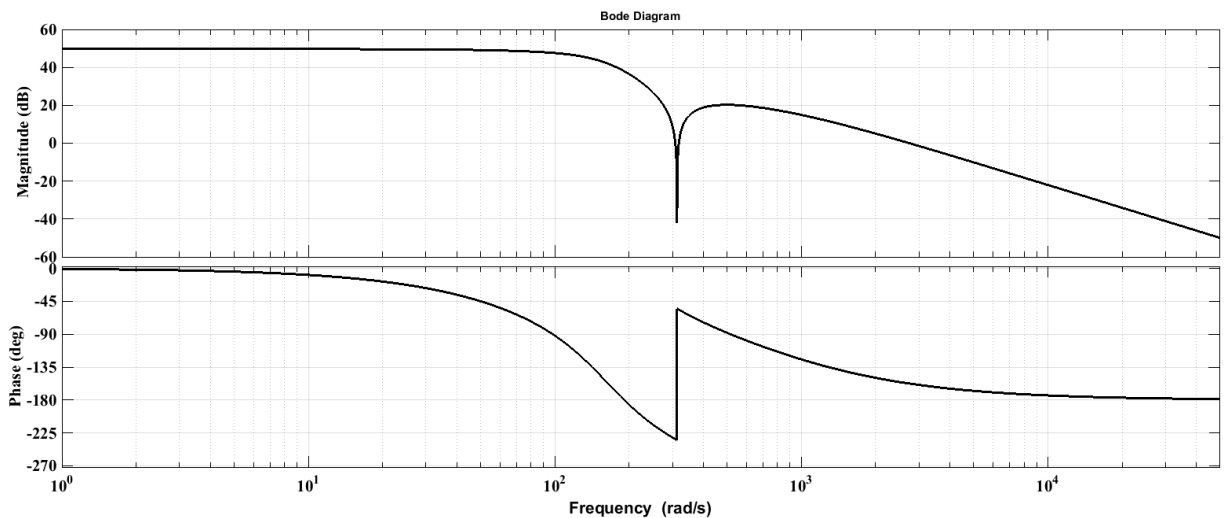


Рисунок 3.12 — АЧХ и ФЧХ канала налагаемого тока

Входной величиной канала тока IF является ток, а выходной – напряжение. Канал тока фидера IF построен таким образом, чтобы 1 В амплитуды выходного сигнала соответствует 10 мА входного сигнала на выходе селектора каналов для частоты входного тока 20 Гц.

### 3.2.2 Конструкция и схема электромагнитного измерительного датчика тока.

#### Подключение измерительных датчиков тока к первичным цепям присоединений ЩПТ

На каждое отходящее присоединение ЩПТ должен устанавливаться внешний усилитель с измерительным датчиком тока, обеспечивающий гальваническую развязку терминала с цепями постоянного оперативного тока и

обеспечивающий необходимую точность и чувствительность для корректной работы системы контроля изоляции на землю. Датчик переменной составляющей тока фидера от наложенного источника, состоит из разъемной электромагнитной и электронной частей.

Структурная схема внешнего усилителя с датчиком тока приведена на рис. 3.13. Электронная часть состоит из следующих звеньев, перечисленных ниже и представленных на рис. 3.13:

- усилителя, охваченного магнитной ООС;
- преобразователя ИНУТ;
- режекторного фильтра на частоту подавления 50 Гц;
- фазового фильтра;
- выходного ИТУН.

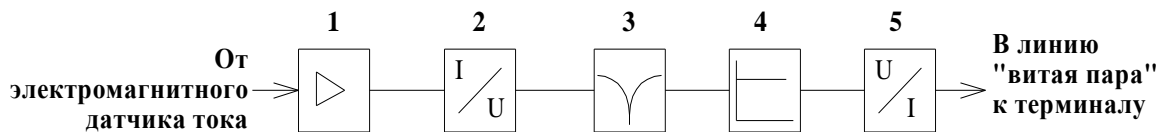


Рисунок 3.13 — Структурная схема внешнего усилителя канала тока фидера:

- 1 - Входной усилитель с ООС; 2 - преобразователь «ток-напряжение»;
- 3 - режекторный фильтр; 4 - фазовый фильтр;
- 5 – выходной преобразователь «напряжение-ток»

В соответствии со структурой (рис. 3.13), разработана функциональная схема внешнего усилителя с датчиком тока, изображенная на рис. 3.14.

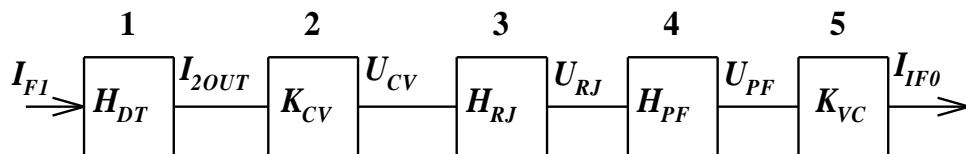


Рисунок 3.14 — Функциональная схема внешнего усилителя

На рис. 3.14 изображено каскадное соединение следующих звеньев:

1 – электромагнитный датчик тока и входной усилитель, имеющий ООС через магнитную систему. Передаточная функция этого звена  $H_{DT}(s)$ ; 2 – преобразователь «ток-напряжение» с коэффициентом преобразования  $K_{CV}$ ; 3 – режекторный фильтр с передаточной функцией  $H_{RF}(s)$ ; 4 – выходной преобразователь «напряжение-ток» с коэффициентом преобразования  $K_{VC}$ .

Выводы вторичных обмоток и компенсационной обмотки  $W_{OC}$  электромагнитной части подключены к входному каскаду внешнего усилителя, образующего входные цепи электронного модуля, представленного звеном 1 (рис. 3.13).

Конструкция устройства должна учесть некоторые особенности щитов. Электромагнитная часть датчика тока фидера должна быть разъемной [65], чтобы допускать подключение к присоединениям щита без отключения нагрузки.

Конструкция электромагнитной части датчика показана на рис. 3.15.

В представленной схеме электромагнитный датчик тока конструктивно состоит из двух полуколец, выполненных из магнитомягкого материала [66], например из феррита марки М2000НМ. Начальная магнитная проницаемость, заявленная производителем, равна 2000. На каждом полукольце расположены рабочие полуобмотки. Эти полуобмотки соединяются последовательно и должны быть сфазированы. Первичная обмотка  $W_1$  образована двумя силовыми проводниками, являющимися головной частью отходящего контролируемого фидера, как показано на рис. 3.15 поз. 3.

Особенностью электромагнитной части изготовленного для системы контроля изоляции на землю щитов постоянного оперативного тока датчика является необходимость намотки большого числа витков вторичных рабочих обмоток  $W_{21РАБ}$  и  $W_{22РАБ}$ . Эта необходимость обусловлена малой амплитудой тока и низкой частотой опорного сигнала в контролируемом фидере. Так, при величине активной утечки 20 кОм и амплитуде переменной составляющей потенциала шин щита 20 В, амплитуда тока от опорного источника составит 1 мА.

Следовательно, для обеспечения точности замера тока требуется значительное число витков вторичной обмотки.

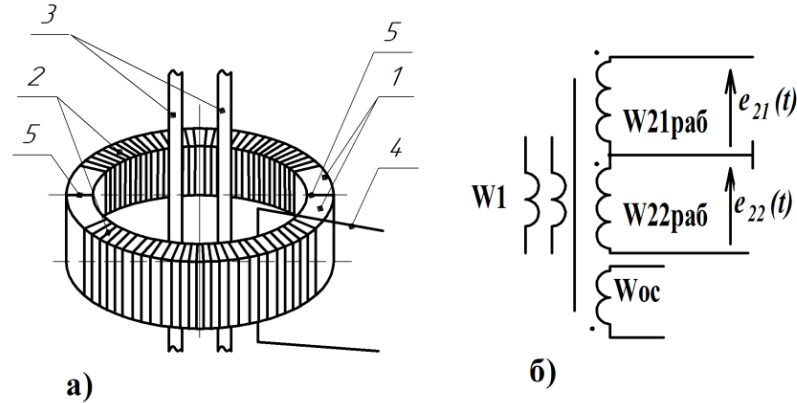


Рисунок 3.15 — Конструкция электромагнитной части датчика тока а)

и его принципиальная схема б): 1-ферритовое полукольцо;

2 – рабочие полуобмотки  $W_{21раб}$  и  $W_{22раб}$ ; 3- проводники первичной обмотки  $W_1$ ;

4 – компенсационная обмотка  $W_{oc}$ ; 5 – соединение полуколец

Полуобмотки  $W_{21РАБ}$  и  $W_{22РАБ}$  имеют специальную намотку и сфазированы так, что их мгновенные ЭДС  $e_{21}(t)$  и  $e_{22}(t)$  складываются (рис. 3.15). Эти полуобмотки являются выходом электромагнитной части, а сформированные ЭДС поступают на вход электронной части. Схема соединения вторичных обмоток, с образованием средней точки, показанная на рис. 3.15, позволяет уменьшить влияние внешних магнитных полей.

Обмотки  $W_1$  и  $W_{oc}$  имеют по одному витку. Для упрощения примем, что передаточные функции по выходному сигналу напряжения  $U_2$ , образованному суммой сигналов  $e_{21}(t)$  и  $e_{22}(t)$ , относительно обмоток  $W_1$  и  $W_{oc}$  равны между собой.

Сигнал с разъемной электромагнитной части датчика поступает на электронную часть.

Схема входного каскада с подключенной электромагнитной частью приведена на рис. 3.16. Входной каскад выполнен по компенсационной схеме,

описанной в [67]. Применение компенсационной схемы датчика тока позволяет линеаризовать проходную характеристику каскада с магнитной цепью. Это положительно скажется на точности и стабильности работы устройства в целом [46-48, 67].

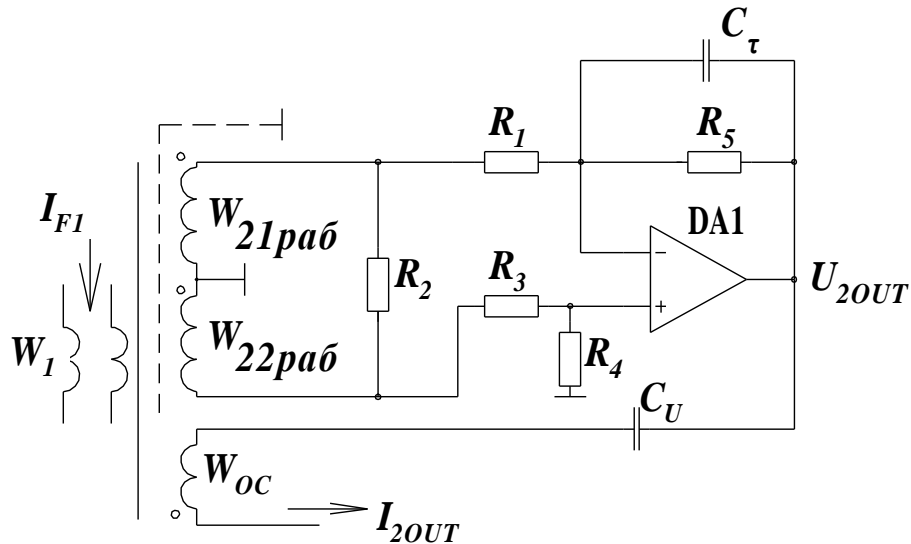


Рисунок 3.16 — Схема входного каскада внешнего усилителя и электромагнитного датчика тока

Работает схема следующим образом. Первичный ток опорной частоты создает магнитное поле в кольцевом магнитопроводе. На проводниках рабочей обмотки  $W_{2РАБ}$ , состоящей из двух сфазированных полуобмоток  $W_{21РАБ}$  и  $W_{22РАБ}$ , наводится ЭДС  $e_2(t)$ , пропорциональная производной магнитного потока в магнитопроводе [46,47,68]. Эта ЭДС будет усилена каскадом на операционном усилителе DA1 (рис.3.16), имеющим усиление  $1+R_5/R_1$ , сформировав сигнал  $u_{2OUT}(t)$ . Часть выходного тока ОУ DA1 пойдет через емкость  $C_U$ , образуя выходной ток данного каскада [67]:

$$i_{2out}(t) = C_U \frac{du_{2OUT}(t)}{dt} \quad (3.19)$$

Этот ток, проходя через обмотку обратной связи  $W_{OC}$ , формирует в кольцевом магнитопроводе дополнительный магнитный поток, который

вычитается из основного, созданного первичными цепями контролируемого фидера  $W_I$ . В идеале, оба магнитных потока должны скомпенсироваться, а ток через емкость  $C_U$ , направленный в петлю обратной связи  $W_{OC}$ , является величиной, необходимой для поддержания нулевого потока в магнитопроводе [67].

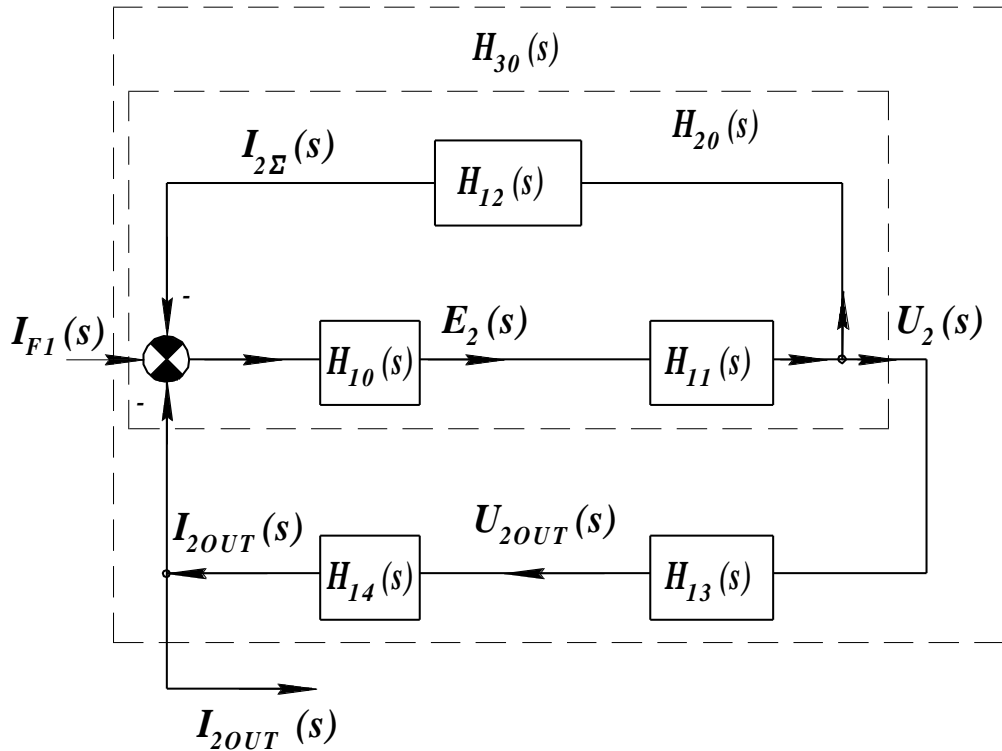


Рисунок 3.17 — Линейная модель входного каскада внешнего усилителя электромагнитного датчика тока:  $H_{10}$  — взаимная индукция между первичной обмоткой  $W_I$  и вторичной рабочей  $W_{2РАБ}$ ;  $H_{11}$  — собственные параметры вторичной рабочей обмотки;  $H_{12}$  — местная ООС, характеризующая нагрузку вторичной рабочей обмотки;  $H_{13}$  — каскад на ОУ;  $H_{14}$  — цепь компенсирующей обмотки;

Линейная модель входного каскада и магнитной системы датчика тока представлена на рис. 3.17. Электромагнитная часть датчика тока представлена звеном  $H_{20}$ , имеющим передаточную функцию:

$$H_{20}(s) = \frac{U_2(s)}{I_{F1}(s)},$$

где  $U_2(s)$  и  $I_{F1}(s)$  – отображения по Лапласу выходного напряжения на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе, и тока первичной обмотки.

Под током первичной обмотки  $I_{F1}$  будем иметь ввиду составляющую, обусловленную работой генератора опорного сигнала и помехами, образующими контур с землей.

В состав электромагнитной части входят звенья с передаточными функциями  $H_{10}(s)$ ,  $H_{11}(s)$ ,  $H_{12}(s)$ .

Звено  $H_{10}$  представляет собой взаимную индукцию первичной силовой и вторичной рабочей обмоток. Входной величиной звена  $H_{10}$  является первичный ток  $I_{F1}$ . Это звено включает в себя индуктивность первичной обмотки, создающий первичный магнитный поток, пронизывающий  $W_2$ . Производная данного потока, по времени порождает вторичную ЭДС  $e_2(t)$ , которая является выходным сигналом звена  $H_{10}$ . Этот сигнал является входным для звена  $H_{11}$ .

Следующим каскадом является звено  $H_{11}$ , характеризующееся собственными параметрами вторичной обмотки. Как указано выше, вторичная обмотка должна содержать значительное число витков. Так, в сконструированном датчике, суммарное число витков  $W_2$  равно 4000. Этот факт заставляет учитывать значительную паразитную распределенную емкость витков вторичной рабочей обмотки датчика тока. Разработанная с учетом межвитковой емкости схема замещения вторичной рабочей обмотки датчика тока представлена на рис. 3.18.

Если вторичную рабочую обмотку оставить на холостом ходу, а по первичной обмотке пропустить синусоидальный ток, то на вторичной обмотке наведется синусоидальная ЭДС  $e_2(t)$ . В данной работе сделано допущение, что под действием этой ЭДС в витках рабочей обмотки будут протекать емкостные токи [69]. В работе сделано допущение, что эти токи не будут создавать размагничивающего потока, но обеспечат образование поперечной части последовательного колебательного контура  $L_B C_P$  (рис.3.18).



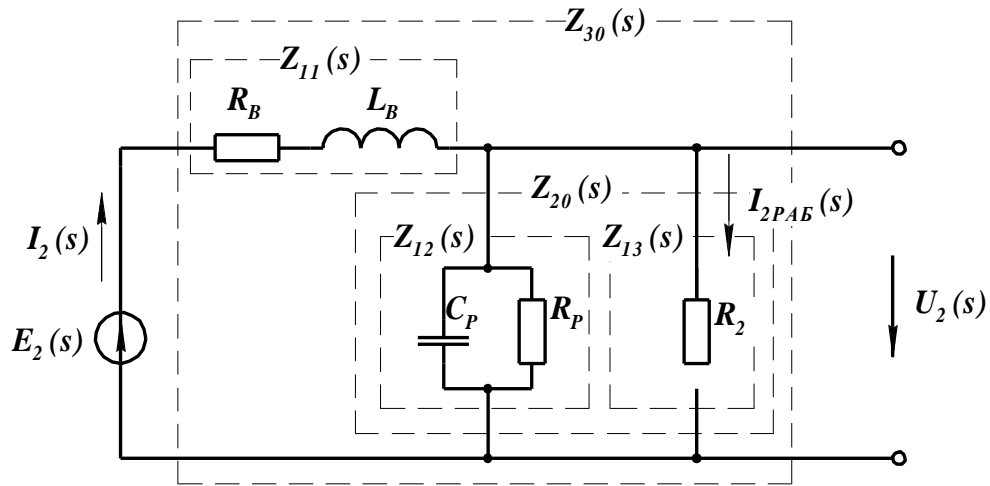


Рисунок 3.18 — Схема замещения электромагнитной части датчика тока

При низкой частоте тока первичной обмотки  $I_{F1}$ , влиянием паразитной емкости и индуктивным сопротивлением  $L_B$  можно пренебречь, тогда передаточную функцию звена  $H_{10}$  можно представить как взаимоиндукцию первичной  $W_1$  и вторичной рабочей обмотки  $W_{2РАБ}$ :

$$H_{10}(s) = sM \quad (3.20)$$

где  $M$  – взаимоиндукция между первичной и вторичной рабочей обмотками. На низкой частоте первичного тока, величина  $M$  определяется экспериментально с помощью замера  $u_2(t)$  с контролем тока  $i_{F1}(t)$ :

$$u_2(t) = M \frac{di_{F1}(t)}{dt} \quad (3.21)$$

Если подключить нагрузку  $R_2$  (рис 3.18) к зажимам вторичной обмотки, то ток, протекающий по ней, будет создавать размагничивающий поток, т.к цепь является сосредоточенной. Ввиду этого, на схеме замещения (рис. 3.18) разделены поперечные цепи  $Z_{12}$ , являющиеся цепями распределенными, и цепь  $Z_{13}$ , являющейся цепью сосредоточенной.

Для определения передаточной функция звена  $H_{11}$  введем обозначения:

$$Z_{11}(s) = \frac{1}{R_B + sL_B} \quad (3.22)$$

Представляет продольную часть (рис 3.18), обозначенной пунктиром.

$$Z_{12}(s) = \frac{1}{\left( \left( \frac{1}{R_p} \right) + sC_p \right)} \quad (3.23)$$

$$Z_{13}(s) = R_2 \quad (3.24)$$

Представляет собой поперечные распределенную (3.23) и сосредоточенную (3.24) часть схемы замещения вторичной рабочей обмотки. Для упрощения анализа введем обозначения соответствующих проводимостей:

$$\begin{aligned} Y_{11}(s) &= \frac{1}{Z_{11}(s)} \\ Y_{12}(s) &= \frac{1}{Z_{12}(s)} \\ Y_{13}(s) &= \frac{1}{Z_{13}(s)} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Тогда суммарное сопротивление поперечной части цепи вторичной обмотки составит:

$$Z_{20}(s) = \frac{1}{(Y_{12}(s) + Y_{13}(s))} \quad (3.26)$$

Полное сопротивление нагрузки вторичной рабочей обмотки:

$$Z_{30}(s) = Z_{11}(s) + Z_{20}(s) \quad (3.27)$$

Приняв на входе звена  $H_{11}$  ЭДС  $E_2(s) = 1/s$  в виде единичного ступенчатого воздействия, определим суммарный вторичный ток  $I_2(s)$ :

$$I_2(s) = \frac{E_2(s)}{Z_{30}(s)} \quad (3.28)$$

Напряжение  $U_2(s)$  при действии на входе звена единичного ступенчатого воздействия:

$$U_2(s) = I_2(s)Z_{20}(s) \quad (3.29)$$

Найдем передаточную функцию звена  $H_{11}$  в виде отношения выходного отклика  $U_2(s)$  к  $E_1(s)$ :

$$H_{11}(s) = \frac{U_2(s)}{E_1(s)} \quad (3.30)$$

Подставляя в выражение (3.30) формулы (3.27 - 3.29) получим передаточную функцию по напряжению звена  $H_{11}$ , характеризующего вторичную рабочую обмотку датчика тока:

$$H_{11}(s) = \frac{R_2 R_p}{C_p L_B R_2 R_p s^2 + ((C_p R_2 R_B + L_B) R_p + L_B R_2) s + (R_B + R_2) R_p + R_2 R_B} \quad (3.31)$$

Выражение (3.31) характеризует электромагнитную часть датчика тока на холостом ходе вторичной рабочей обмотке  $W_2$  при  $R_2 \rightarrow \infty$ .

Экспериментально определены параметры вторичной рабочей обмотки:  $L_b$  – 18 Гн,  $C_b$  – 505 пФ,  $R_b$  – 160 Ом,  $R_p$  – 4.5 МОм. Значение взаимной индукции, определенное по выражению (3.21) составило  $M = 0.0066$  Гн.

Подставляя экспериментально полученные параметры в выражение (3.31), при условии  $Y_{I3}=0$  (3.25), получим АФЧХ электромагнитной части датчика тока при холостом ходе вторичной рабочей обмотки:

$$H_{11}(s) = \frac{6.6 \cdot 10^{-3} s}{9.089 \cdot 10^{-9} s^2 + 4.090 \cdot 10^{-6} s + 1} \quad (3.32)$$

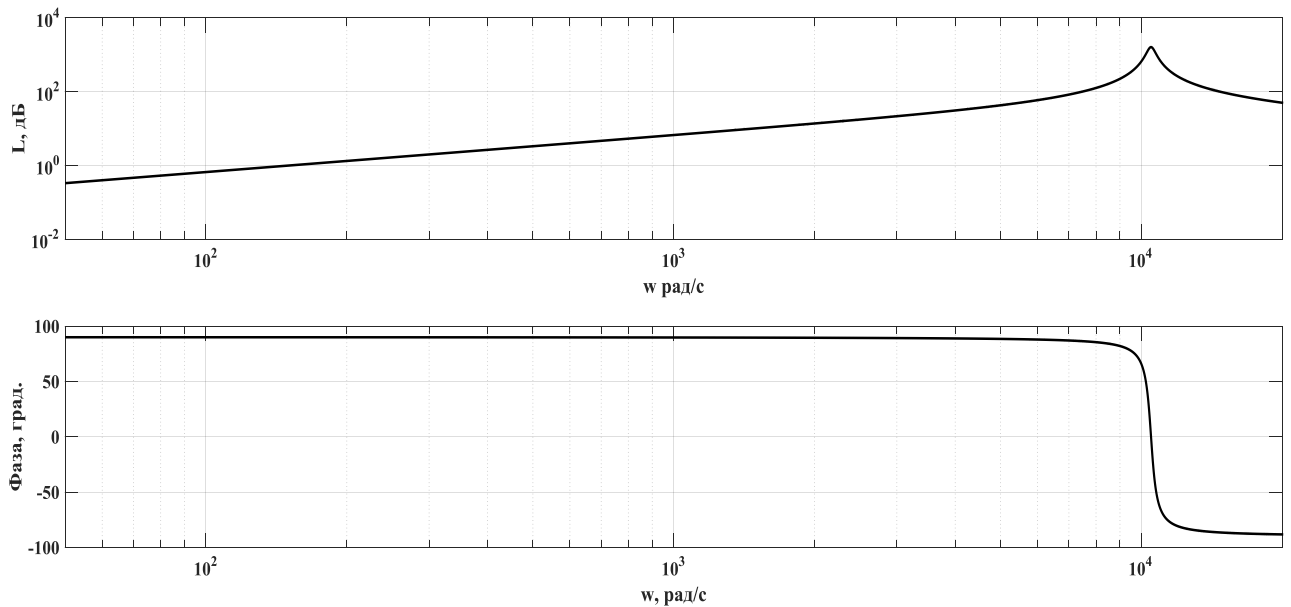


Рисунок 3.19 — АЧХ и ФЧХ электромагнитной части датчика тока на холостом ходе вторичной рабочей обмотки  $W_{2РАБ}$ .

АЧХ и ФЧХ звена  $H_{11}$ , описываемые выражением (3.32), приведены на рис. 3.19. Из графика ФЧХ видно, что фаза напряжения на зажимах  $W_{2РАБ}$  в диапазоне нижних частот до  $10^4$  рад/сек сдвинута относительно фазы тока  $I_1$  на  $\pi/2$ . Это соответствует описанию (3.21), где отсутствует влияние паразитной межвитковой емкости.

Приведенная на рис. 3.19 АЧХ датчика тока имеет явно выраженный максимум на частоте 1670 Гц. Рассчитанная выражению (3.32) полоса пропускания по уровню 3 дБ составляют 1635 и 1707 Гц. Практические замеры

показали значения 1644 и 1728 Гц, что подтверждает справедливость выражения 3.32.

Использование датчика с резонансными свойствами нежелательно для производства измерения тока. В контролируемом фидере ЩПТ спектральный состав тока зависит от нагрузки присоединения, режима щита в целом. При значительных токах возможно насыщение магнитной системы датчика тока и неверная работа устройства контроля изоляции. Также, при естественном временном изменении параметров электронных компонентов, возможно нарушение устойчивости и превращении усилителя и датчика тока в генератор гармонических колебаний.

Корнями полинома знаменателя формулы 3.32 являются значения:

$$s_1 = -225 + j10486 \text{ и } s_2 = -225 - j10486.$$

Система, описываемая выражением 3.32, находится близко к границе устойчивости [56-58]:

$$\gamma = \frac{\operatorname{Re}(s_1)}{\operatorname{Im}(s_1)} = \frac{225}{10486} = 0.021$$

Также данную систему будут характеризовать значительные осцилляции ИПХ на частоте резонанса, что отрицательно скажется на устойчивости и точности измерения тока  $I_I$  под возможным влиянием помех, находящихся вблизи с частотой резонанса.

По этим причинам, для повышения запаса устойчивости измерительного органа тока, в дополнении к способу построения компенсационного датчика тока [67], в данной работе предлагается охват электромагнитной части датчика еще одной местной петлей ООС, путем шунтирования выводов вторичной рабочей обмотки  $W_{2РАБ}$  высокоомным активным сопротивлением. Так же предлагается

преобразование пропорционального звена  $H_{13}$  (усилитель на ОУ DA1 рис. 3.16) в инерционное звено первого порядка с малой постоянной времени.

При наличии нагрузки  $R_2$  (рис. 3.18) с сосредоточенными параметрами на зажимах вторичной рабочей обмотки  $W_{2РАБ}$ , создаваемый этой нагрузкой под действием ЭДС  $E_2$  ток  $I_{2РАБ}$ , создает, по закону Ленца, размагничивающий поток. Величина размагничивающей МДС будет равна произведению  $I_{2РАБ}$  и  $W_2$ :

$$I_{2\Sigma}(s) = I_{2РАБ}(s)W_2 \quad (3.33)$$

В линейной модели (рис. 3.17) размагничивание учитывается петлей ООС [68], содержащей ток вторичной рабочей обмотки  $W_{2РАБ}$  (рис. 3.17):

$$I_{2РАБ}(s) = \frac{U_2(s)}{Z_{13}(s)} = U_2(s)Y_{13}(s) \quad (3.34)$$

Тогда выражение для размагничивающей МДС (3.33) с учетом выражения (3.34) можно записать:

$$I_{2\Sigma}(s) = U_2(s)Y_{13}(s)W_2 \quad (3.35)$$

Принимая в выражении (3.35) размагничивающую МДС  $I_{2\Sigma}(s)$  как отклик, а  $U_2(s)$  как входное воздействие, определим передаточную функцию цепи местной ООС:

$$H_{12}(s) = \frac{I_{2\Sigma}(s)}{U_2(s)} = Y_{13}(s)W_2 \quad (3.36)$$

где  $Y_{13}(s)$  – комплекс проводимости с сосредоточенными параметрами, подключенный к зажимам рабочей вторичной обмотки  $W_{2РАБ}$ ,  $W_2$  – суммарное число витков вторичной рабочей обмотки.

Зная передаточные функции звеньев  $H_{10}$ ,  $H_{11}$  и  $H_{12}$ , определим передаточную функцию датчика тока  $H_{20}$  (рис. 3.17), с учетом местной ООС [56-58]:

$$H_{20}(s) = \frac{U_2(s)}{I_{F1}(s)} = \frac{H_{10}(s)H_{11}(s)}{1 + H_{10}(s)H_{11}(s)H_{12}(s)} \quad (3.37)$$

Подставляя в формулу (3.37), выражения для передаточных функций звеньев  $H_{10}$ ,  $H_{11}$  и  $H_{12}$ , представленные в (3.20), (3.31) и (3.36) соответственно, в соответствии с рис. 3.17, запишем для электромагнитной части датчика тока с учетом сосредоточенной вторичной нагрузки в общем виде:

$$H_{20}(s) = \frac{MR_2R_p s}{C_p L_B R_2 R_p s^2 + (MR_p W_2 + (C_p R_2 R_B + L_B) R_p + L_B R_2) s + (R_B + R_2) R_p + R_2 R_B} \quad (3.38)$$

Подставляя в (3.38) экспериментально определенные параметры, значение которых приведены, задаваясь значением  $R_2$  20кОм, получим передаточную функцию электромагнитного датчика тока с нагрузкой на вторичной рабочей обмотке:

$$H_{20}(s) = \frac{6.5 \cdot 10^{-3} s}{9.017 \cdot 10^{-9} s^2 + 2.206 \cdot 10^{-3} s + 1} \quad (3.39)$$

АЧХ и ФЧХ системы (3.39) приведены на рис. 3.20.

Из рис. 3.20 видно, что выражение (3.39) описывает более устойчивую, чем (3.32) систему с более широкой полосой пропускания по уровню 3 дБ (от 70 Гц до 41 кГц). Так же более пологой является ФЧХ.

Как было указано выше, сигнал  $U_2$  с выводов вторичной рабочей обмотки, нагруженной на активное сопротивление  $R_2$ , подается на вход апериодического усилителя, обладающего малой постоянной времени.

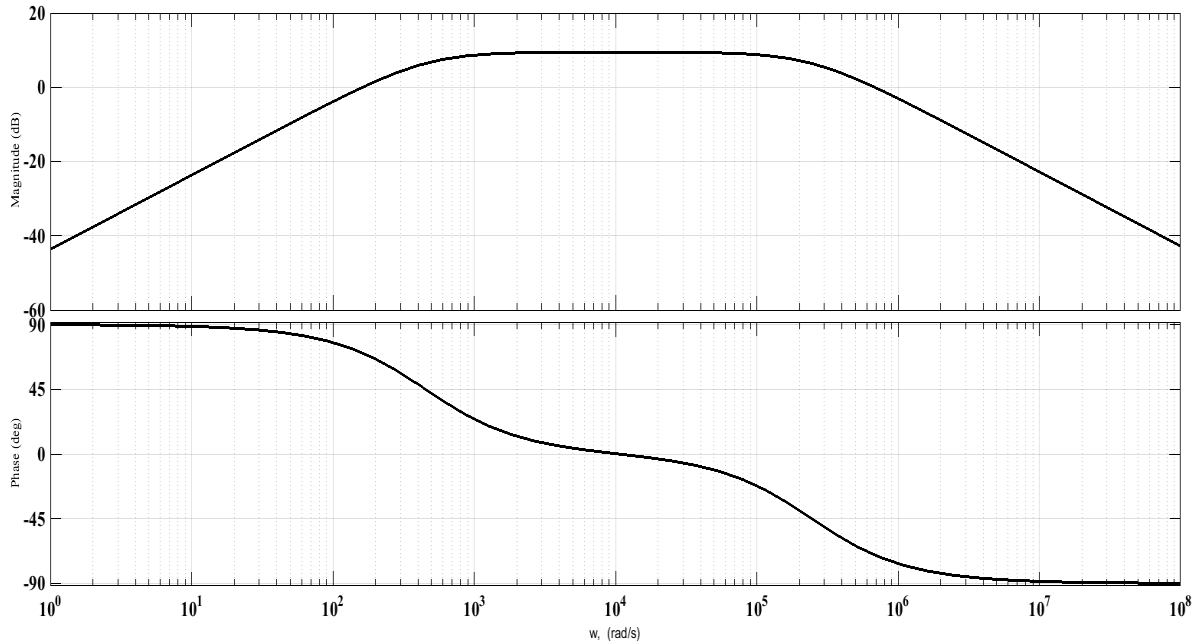


Рисунок 3.20 — АФЧХ и ФЧХ электромагнитной части датчика тока, охваченного локальной ООС

Инерционное звено первого порядка [56-58], описывается уравнением:

$$H_{13}(s) = \frac{K_U}{(T_U s + 1)} \quad (3.40)$$

где  $K_U$  — коэффициент усиления звена по постоянному току;  $T_U = R_2 C_\tau$  — постоянная времени апериодического звена на ОУ DA1 (рис. 3.16).

Звено реализуется на ОУ путем подключения емкости  $C_\tau$  (рис.3.16) параллельно резистору  $R_5$  [56]. Выходным сигналом звена на ОУ DA1 является напряжение  $U_{2OUT}$  (рис. 3.17).

Звено  $H_{14}$  преобразует выходное напряжение каскада на ОУ DA1 в ток, протекающий по компенсационной обмотке  $W_{OC}$  и являющийся выходным током измерительной части датчика  $I_{2OUT}$ . Компенсационная обмотка подключается к выходу каскада на ОУ  $H_{13}$  (рис. 3.16), имеющего отличное от 0 внутреннее активное сопротивление  $R_U$ . Поэтому, выходные цепи усилителя можно



представить в виде последовательно соединенных активного сопротивления  $R_U$  и конденсатора  $C_U$  (рис 3.21).

Выходной ток каскада DA1, являющийся выходным током каскада, равен:

$$I_{2OUT}(s) = \frac{U_{2OUT}(s)}{Z_{OC}(s)} \quad (3.41)$$

Цепь  $Z_{OC}(s)$  содержит конденсатор  $C_U$  (рис. 3.21) и  $R_U$ . Схема замещения для определения передаточной функции звена  $H_{14}$  выходных цепей представлена на рис. 3.21.

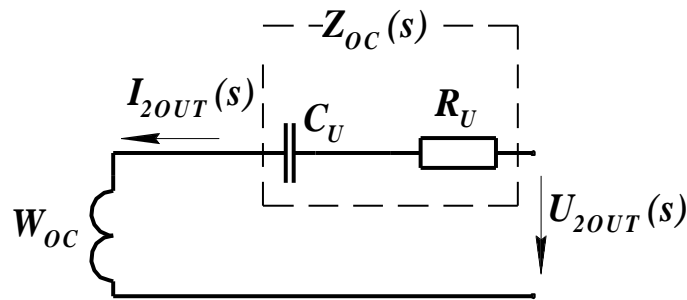


Рисунок 3.21 — Схема замещения цепей  
компенсационной обмотки

Комплекс выходного сопротивления относительно зажимов компенсационной обмотки равен:

$$Z_{OC}(s) = R_U + \frac{1}{sC_U}.$$

Тогда передаточная функция звена, имеющего на входе напряжение  $U_{2OUT}(s)$ , на выходе ток  $I_{2OUT}(s)$ , осуществляющего компенсацию магнитного потока датчика, будет описываться выражением:

$$H_{14}(s) = \frac{I_{2OUT}(s)}{U_{2OUT}(s)} = \frac{1}{\left(R_U + \frac{1}{sC_U}\right)} \quad (3.42)$$

Чтобы уменьшить влияние внутреннего выходного сопротивления ОУ, достигающего сотен Ом [62], необходимо поставить дополнительный каскад на комплементарной паре биполярных транзисторов [61, 70], позволяющей снизить сопротивление, подведенное к компенсационной обмотки до единиц Ом.

Определим передаточную функцию датчика тока, как отношение оператора напряжения на зажимах вторичной обмотки  $U_2(s)$  и оператора первичного тока  $I_{F1}(s)$ , с учетом локальной ООС – активной нагрузки  $R_2$  и общей – с учетом апериодического усилителя и компенсационной обмотки  $W_{OC}$ :

$$H_{30}(s) = \frac{U_2(s)}{I_{F1}(s)} = \frac{H_{20}(s)}{1 + H_{20}(s)H_{13}(s)H_{14}(s)} \quad (3.43)$$

Подстановка значений в (3.43) даст в общем виде передаточную функцию  $H_{30}(s)$  в виде отношения полиномов:

$$H_{30}(s) = \frac{N_3 s^3 + N_2 s^2 + N_1 s}{D_4 s^4 + D_3 s^3 + D_2 s^2 + D_1 s + D_0} \quad (3.44)$$

Где коэффициенты числителя полинома (3.44):

$$N_3 = C_U R_2 R_p R_U T_U M;$$

$$N_2 = M (R_2 R_p T_U + C_U R_2 R_p R_U);$$

$$N_0 = M R_2 R_p;$$

Коэффициенты знаменателя полинома (3.44):

$$D_4 = C_p C_U L_B R_2 R_p R_U T_U;$$

$$\begin{aligned}
D_3 &= (C_U M R_P R_U T_U W_2 + (((C_P C_U R_2 R_B + C_U L_B) R_P + C_U L_B R_2) R_U + C_P L_B R_2 R_P) T_U + C_P C_U L_B R_2 R_P R_U); \\
D_2 &= ((M R_P T_U + C_U M R_P R_U) W_2 + (((C_U R_B + C_U R_2) R_P + C_U R_2 R_B) R_U + (C_P R_2 R_B + L_B) R_P + L_B R_2) T_U + \\
&+ ((C_P C_U R_2 R_B + C_U L_B) R_P + C_U L_B R_2) R_U + (C_U K_U M + C_P L_B) R_2 R_P); \\
D_1 &= (M R_P W_2 + ((R_B + R_2) R_P + R_2 R_B) T_U + ((C_U R_B + C_U R_2) R_P + C_U R_2 R_B) R_U + (C_P R_2 R_B + L_B) R_P + L_B R_2); \\
D_0 &= (R_B + R_2) R_P + R_2 R_B;
\end{aligned}$$

Полная передаточная функция измерительной части датчика тока в виде отношения выходного  $I_{2OUT}(s)$  и входного  $I_1(s)$  токов, определится как произведение каскадно соединенных звеньев  $H_{30}$ ,  $H_{13}$  и  $H_{14}$ :

$$H_{DT}(s) = \frac{I_{2OUT}(s)}{I_{F1}(s)} = H_{30}(s)H_{13}(s)H_{14}(s) \quad (3.45)$$

В виде отношения полиномов выражение (3.45) можно переписать:

$$H_{DT}(s) = \frac{N_2 s^2}{D_4 s^4 + D_3 s^3 + D_2 s^2 + D_1 s + D_0}$$

Где коэффициенты полинома

$$\begin{aligned}
N_2 &= C_U K_U R_2 R_P M ; \\
D_4 &= C_P C_U L_B R_2 R_P R_U T_U ; \\
D_3 &= C_U R_P R_U T_U W_2 M + (((C_P C_U R_2 R_B + C_U L_B) R_P + C_U L_B R_2) R_U + C_P L_B R_2 R_P) T_U + \\
&+ C_P C_U L_B R_2 R_P R_U ; \\
D_2 &= ((R_P T_U + C_U R_P R_U) W_2 M + (((C_U R_B + C_U R_2) R_P + C_U R_2 R_B) R_U + (C_P R_2 R_B + L_B) R_P + L_B R_2) T_U + \\
&+ ((C_P C_U R_2 R_B + C_U L_B) R_P + C_U L_B R_2) R_U + (C_U K_U M + C_P L_B) R_2 R_P); \\
D_1 &= M R_P W_2 + ((R_B + R_2) R_P + R_2 R_B) T_U + ((C_U R_B + C_U R_2) R_P + C_U R_2 R_B) R_U + (C_P R_2 R_B + L_B) R_P + L_B R_2; \\
D_0 &= (R_B + R_2) R_P + R_2 R_B;
\end{aligned}$$

Подставляя в выражение (3.45) определенные ранее значения, приняв  $K_U = 620$ ,  $T_U = 0.029$  с, сокращая выражение 3.52 на  $D_0$ , получим коэффициенты полиномов. Передаточную функцию измерительной части датчика тока можно записать в виде:

$$H_{DT}(s) = \frac{1.907 \cdot 10^{-3} s^2}{2.223 \cdot 10^{-13} s^4 + 5.466 \cdot 10^{-8} s^3 + 1.998 \cdot 10^{-3} s^2 + 3.219 \cdot 10^{-2} s + 1} \quad (3.46)$$

АЧХ и ФЧХ измерительной части датчика тока приведены на рисунке 3.20.

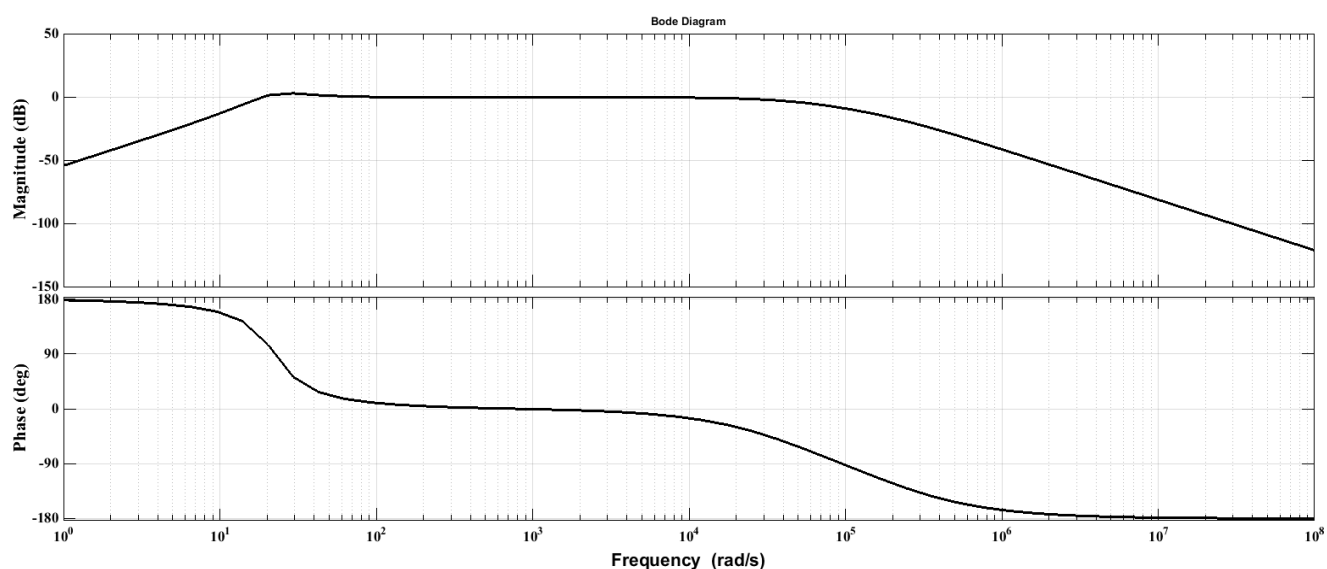


Рисунок 3.22 — АФЧ и ФЧХ электромагнитного датчика тока

Выходной ток каскада  $I_{2OUT}$  (рис. 3.16) подается на вход преобразователя ИНУТ. Схема преобразователя приведена на рис. 3.23 [59, 62-64].

Выходной конденсатор  $C_U$  измерительного преобразователя является входным для преобразователя «ток-напряжение». Данный преобразователь выполняет преобразование входного тока каскада  $I_{2OUT}$  (рис. 3.23) в пропорциональное по величине напряжение  $U_{CV}$  (рис. 3.14).

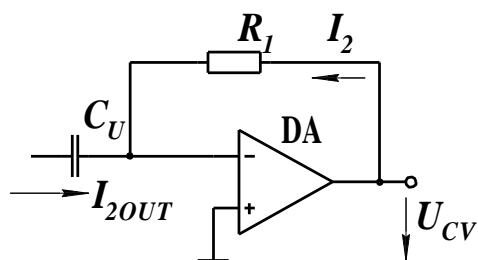


Рисунок 3.23 — Схема преобразователя  
«ток-напряжение», примененная  
в выносном усилителе тока фидера

Известно, что ОУ, охваченный ООС, работает так, что разность потенциалов между входами равна 0 [58-62]. Следовательно ток  $I_{2OUT}$  и  $I_2$  (рис. 3.23) равны по модулю. Тогда передаточная функция звена:

$$K_{CV} = -\frac{U_{CV}}{I_{2OUT}} = -R_1 \quad (3.47)$$

Далее сигнал напряжения, пропорциональный току фидера, подается на вход режекторного фильтра [59, 63, 64].

Для подавления токов, вызванных наводками от распределенных линий фидеров, применяется режекторный фильтр с частотой подавления 50 Гц. Фильтр выполнен на ОУ с применением моста Вина, аналогичный установленному в канале тока фидера, описывающийся выражением (3.16).

Для компенсации фазового сдвига в режекторном фильтре, применяем фазовый фильтр [59, 63]. Схема фазового фильтра первого порядка приведена на рис. 3.24. Фазовый фильтр устанавливается каскадно за режекторным фильтром. В устройстве применен фазовый фильтр первого порядка. Его передаточная функция в операторном виде:

$$H_{PF}(s) = \frac{1 - sR_1C_1}{1 + sR_1C_1} \quad (3.48)$$

Модуль коэффициента передачи фильтра равен 1 во всем диапазоне частот, при выполнении условия  $R_2=R_3$ . При дальнейшем рассмотрении работы устройства в целом, влияние фазовых фильтров рассматривать нецелесообразно, т.к. его каскадное включение не влияет на порядок уравнений, описывающих аналоговые тракты, а так же он не участвует в контурах системы, охваченных обратными связями.

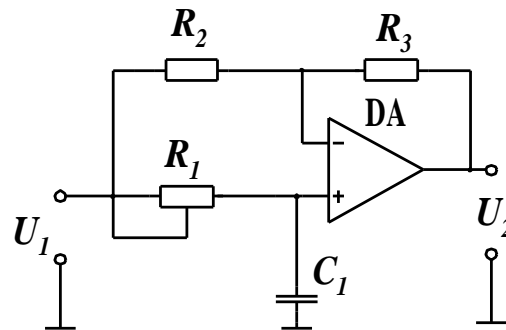


Рисунок 3.24 — Схема фазового фильтра первого порядка

После коррекции по фазе сигнала напряжения, пропорционального току фидера, сигнал подается на вход преобразователя «напряжение-ток». Он является выходным каскадом внешнего усилителя. Схема каскада приведена на рис. 3.25. Применение этого каскада обусловлено необходимостью передачи аналогового сигнала малой мощности на значительное расстояние в условиях возможных электромагнитных помех. Этот каскад дает возможность соединения нагрузки с общим проводником, что упрощает построение селектора каналов терминала.

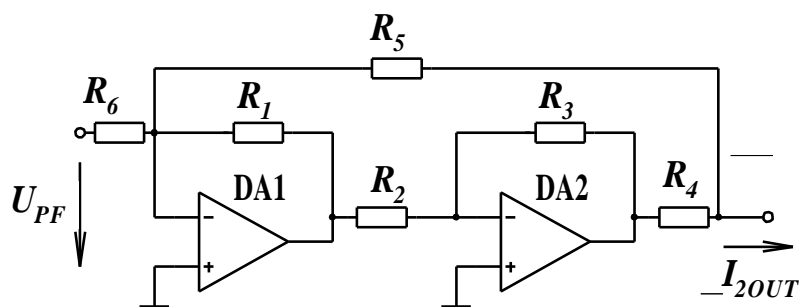


Рисунок 3.25 — Выходной преобразователь «напряжение-ток»

При выполнении условия  $R_1=R_2=R_3=R_6=R$ ,  $R_5=R-R_4$  выходной ток преобразователя (рис. 3.25) будет [63,64]:

$$I_{2OUT} = \frac{U_{PF}}{R} \quad (3.49)$$

Выходной ток при этом не будет зависеть от выходного напряжения и выходное сопротивление преобразователя стремится к бесконечности. Коэффициент преобразования данного звена  $K_{VC}$  будет численно равен  $R_6$ .

Для удобства, на данном этапе, принимаем передаточные функции звена преобразователя  $K_{CV}$  «ток-напряжение» 2 и звена 4  $K_{VC}$  преобразователя «напряжение-ток» (рис. 3.14) численно равными. Тогда передаточная функция внешнего усилителя с датчиком тока определится как произведение передаточной функции электромагнитной части датчика тока  $H_{DT}(s)$  и режекторного фильтра  $H_{RJ}(s)$ :

$$H_{FC}(s) = \frac{I_{F1}(s)}{I_{FOUT}(s)} = H_{DT}(s)H_{RJ}(s) \quad (3.50)$$

где  $H_{FC}(s)$  – передаточная функция внешнего усилителя, определенная как отношение оператора выходного тока к оператору входного. Подставив в выражение (3.48) значения для  $H_{DT}(s)$  (3.46) и  $H_{RJ}(s)$  (3.15) получим:

$$H_{FC1}(s) = \frac{1.947 \cdot 10^{-8} s^4 + 1.907 \cdot 10^{-3} s^2}{2.295 \cdot 10^{-18} s^6 + 5.64 \cdot 10^{-13} s^5 + 2.108 \cdot 10^{-8} s^4 + 1.954 \cdot 10^{-5} s^3 + 2.317 \cdot 10^{-3} s^2 + 4.178 \cdot 10^{-2} s + 1} \quad (3.51)$$

Из данного выражения следует модуль передаточной функции  $H_{FC1}(j125.6) = 0.559$ . Поэтому необходимо дополнительно усилить выходной токовый сигнал на 5.01 дБ, или в 1.78 раз. Это достижимо, например, путем увеличения передаточного коэффициента  $K_{CV}$  (3.47) через увеличение сопротивления обратной связи  $R_I$  (рис. 3.23) в 1.78 раз. Окончательно получим выражение передаточной функции внешнего усилителя, при условии отсутствия ослабления на частоте  $\omega = 125.6 \text{ c}^{-1}$ :

$$H_{FC}(s) = \frac{3.465 \cdot 10^{-8} s^4 + 3.394 \cdot 10^{-3} s^2}{2.295 \cdot 10^{-18} s^6 + 5.64 \cdot 10^{-13} s^5 + 2.108 \cdot 10^{-8} s^4 + 1.954 \cdot 10^{-5} s^3 + 2.317 \cdot 10^{-3} s^2 + 4.178 \cdot 10^{-2} s + 1} \quad (3.52)$$

В виду пренебрежимо малых значений коэффициентом при 6-й степени  $s$  в знаменателе для упрощения анализа можно пренебречь. Частотные характеристики внешнего усилителя (3.52) приведены на рис. 3.26.

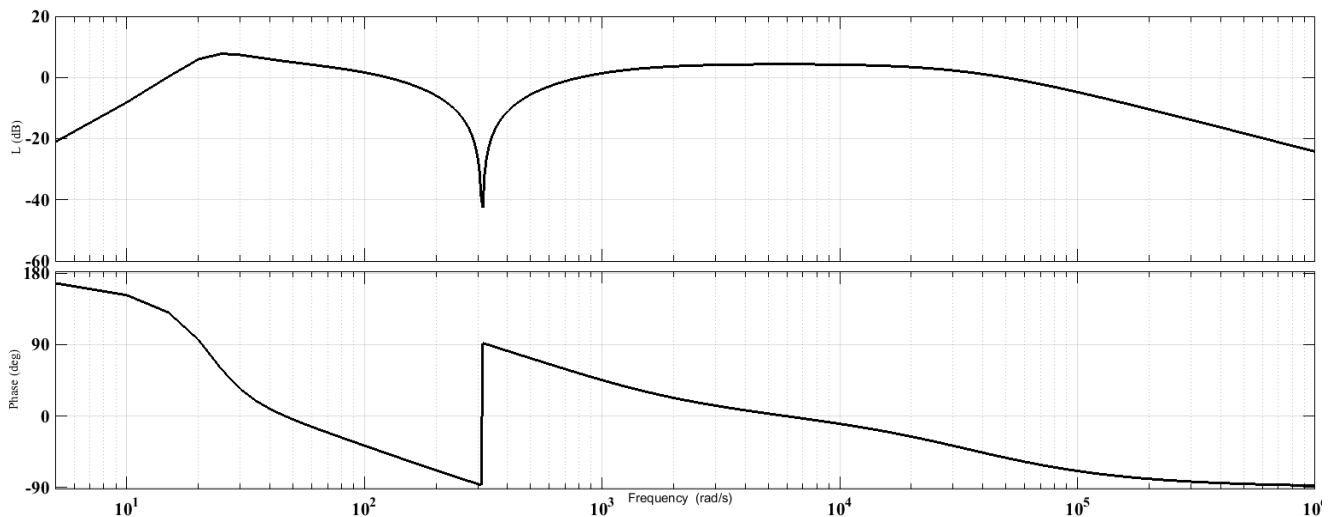


Рисунок 3.26 — АЧХ и ФЧХ внешнего усилителя, построенная как отношение первичного входного и выходного токов



Нагрузкой каскада (рис. 3.25) является токовый вход селектора каналов, подключаемый посредством проводников «витая пара 2x2».

Сквозной коэффициент передачи внешнего усилителя настраивается так, что для частоты 20 Гц, входному току первичной обмотки датчика тока  $W1$  (рис. 3.26) амплитудой 1 мА будет соответствовать амплитуда 1 мА токового выхода внешнего усилителя. Эта величина будет подаваться на вход усилителя 1 канала тока фидера IF, показанному на рис. 3.7.

### 3.3 Канал контроля потенциала шин

Как было представлено в главе 2 для наложения внешнего опорного сигнала, а также для измерения переменной составляющей, предлагается использовать емкостные развилки. Для измерительной развилки приняты емкости 5 мкФ, с тем же рабочим напряжением 450 В, что и у инжектирующей развилки [23].

Датчик переменной составляющей потенциала шин представляет собой емкостную развилку, образованную емкостями  $C_3$  и  $C_4$ , с общей точки которой производится отбор потенциала для измерения.

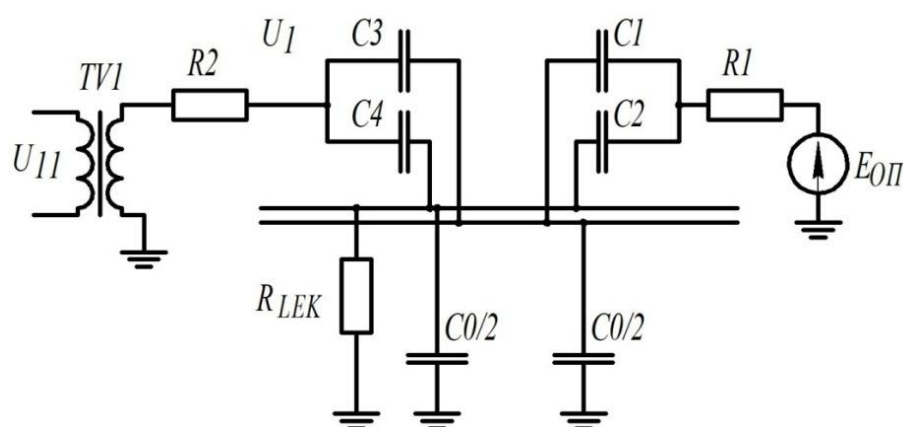


Рисунок 3.27 — Схема подключения измерительного датчика потенциала шин

Отбор производится через резистор  $R_2$  с помощью трансформатора напряжения TV1 (рис. 3.27).

По аналогии с инъекционной развилкой, применение емкостей позволяет избежать тепловыделения на элементах, а так же отфильтровать постоянную составляющую потенциала шин, не несущую полезной измерительной информации. Нагрузкой измерительной развилки служит обмотка трансформатора (рис. 3.27), представляющее входное сопротивление аналогового входа терминала. Схема формирует значение  $U_1(t)$ , которое будет использоваться системой в дальнейшем для выделения активной составляющей тока  $I_{F1}(t)$  (рис. 2.5). Применение трансформатора позволяет получить гальваническую развязку с цепями ЩПТ, что повышает безопасность.

Емкости  $C_0$  представляют суммарную паразитную емкость щита постоянного тока относительно земли, а так же возможные емкости подзарядного агрегата. Здесь и далее будем предполагать, что емкость щита намного больше паразитной емкости отдельного фидера относительно земли. Из рис. 3.27 видно, что при  $R_2 \gg |X_{C3}|$ , потенциал общей точки измерительной развилки совпадает с переменной составляющей потенциала шин  $U_1(t)$ . При постоянстве амплитуды и частоты  $E_{оп}(t)$  напряжение  $U_1(t)$  будет зависеть от величин емкости щита  $C_0$  и активного сопротивления утечки на землю  $R_{LEK}$ .

Для схемы включения измерительного датчика, показанной на рис. 3.15, имеются несколько режимов и их комбинаций:

- $R_{LEK} \approx 20$  кОм
- $R_{LEK} = 0$
- ЩПТ питается от аккумуляторной батареи
- ЩПТ питается от ВАЗП

Самым сложным для обнаружения поврежденного на землю участка случаем является работа устройства с  $R_{LEK} \approx 20$  кОм с питанием ЩПТ от ВАЗП. Это связано с повышением сопротивления между шинами ЩПТ по постоянному току.

Выход датчика потенциала шин ЩПТ подключается к аналоговому входу канала напряжения. Выходной величиной датчика потенциала шин является сигнал напряжения  $U_{II}(t)$  (рис. 3.27). Структурная схема канала напряжения представлена на рис. 3.28.

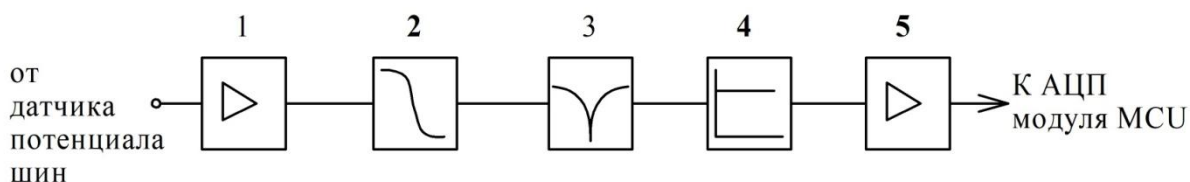


Рис. 3.28 Структурная схема канала напряжения:

- 1 – входной усилитель; 2 – ФНЧ; 3 – режекторный фильтр;  
4 – фазовый фильтр; 5 – буферный каскад

Канал обеспечивает обработку аналогового сигнала, пропорционального переменной составляющей потенциала шин от источника внешней опорной частоты.

Входной усилитель обеспечивает согласование уровней напряжения выхода датчика потенциала шин с уровнями, необходимыми для работы АЦП. В работе принято, что амплитуде входного напряжения 20 В с частотой 20 Гц будет соответствовать амплитуда 1 В переменной составляющей с частотой 20 Гц со смещением плюс 2.5 В. Схемотехнически входной каскад представляет собой суммирующий усилитель (приложение 1).

Параметры фильтра ФНЧ 2, режекторного фильтра 3, приняты идентичными с каналом тока фидера (рис. 3.5).

Для компенсации фазового сдвига, сформированного в датчике тока TV1, при наличии последовательно с первичной обмоткой сопротивления  $R_2$ , применяется фазовый фильтр 4.

Для устранения влияния выходной нагрузки на работу канала потенциала шин, применен буферный повторительный каскад на ОУ 5.

### 3.4 Канал инжектируемого тока II

Структурно канал инжектируемого тока идентичен ранее рассмотренному каналу потенциала шин.

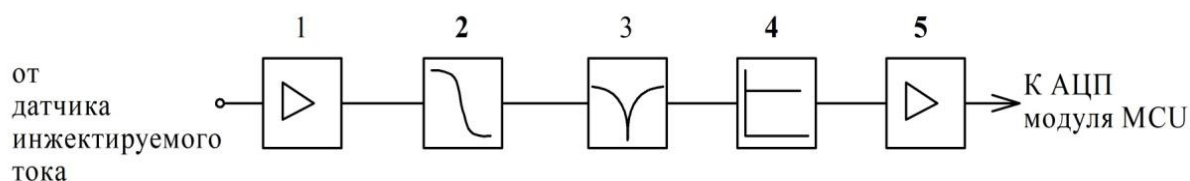


Рис. 3.29. Структурная схема канала налагаемого тока:

1 - входной усилитель; 2 – ФНЧ; 3 – режекторный фильтр;  
4- фазовый фильтр; 5 – буферный каскад

Идентичными являются назначения функциональных звеньев схемы (рис. 3.29).

Отличием канала потенциала шин от канала налагаемого тока являются конструкция датчика и коэффициент усиления входного каскада 1 рис. 3.29. Датчиком тока является промышленно выпускаемый AS-100 фирмы TALEMA [71]. Непрерывное описание данного элемента приведено в [56, 71-73].

Усиление каскада получаем из необходимого динамического диапазона входных токов канала. Максимальным током будет значение тока от источника опорного сигнала при  $R_{LEK}=0$  (рис. 3.27) при подключенной аккумуляторной батарее. Тогда схему 3.15 можно представить так (рис. 3.30).

Из схемы 3.30 следует, что основным ограничителем тока являются конденсаторы инжектирующей емкостной развилки. Так, для частоты 20 Гц, значение модуля емкостного сопротивления всей развилки составляет 66 Ом. Тогда максимальное значение инжектируемого тока, на выходе генератора опорного сигнала, составит величину 0.3 А.

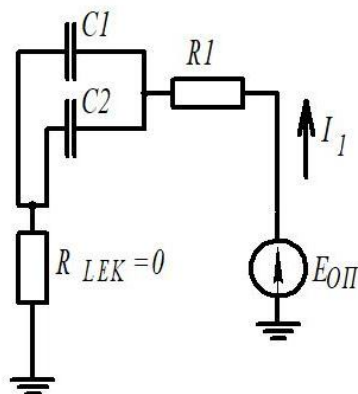


Рисунок 3.30 — Схема замещения  
для расчета максимального значения  
инжектируемого тока

Этот ток будет представлять максимальное входное значение канала тока. Этому значению входного сигнала частотой 20 Гц будет соответствовать амплитуда 1 В выходного напряжения канала налагаемого тока.

### 3.5 Селективная фильтрация

Описанный выше аналоговый модуль (п. 3.2 – 3.4) обеспечил функции получения измерительной информации от ЩПТ, гальваническую развязку, согласование уровней, неселективную фильтрацию. Более никакого накопления информации в аналоговом модуле нет, выходные сигналы формируются в реальном времени с учетом входных сигналов и динамических свойств звеньев аналогового тракта.

Информация от аналогового модуля поступает на обработку к цифровому модулю. Цифровой модуль имеет 3 аналоговых входа. По этим трем входам производится аналого-цифровое преобразование. В дальнейшем система обрабатывает оцифрованные сигналы.

Назначение цифрового модуля:

- выбор опрашиваемого канала;

- производство замеров напряжений выходов аналогового модуля в реальном времени;
- фильтрация сигналов опорной частоты 20 Гц;
- оценка скалярного произведения сигналов  $IF$ ,  $PHI$ , квадрата нормы  $PHI$ , скалярного произведения  $IF$ ,  $I1$ ,  $R_{LEK}$ ;
- вывод информации на дисплей и интерфейс RS232;
- самодиагностика цифрового модуля и части аналогового.

Выполнен цифровой модуль на микроконтроллере PIC18F452[74] и работает на тактовой частоте 20 МГц.

### 3.5.1. Аналого-цифровое преобразование

Перед производством вычислений, над аналоговыми сигналами, поступившими на вход модуля MCU (рис. 3.4) производится процедура «оцифровки». Под данной процедурой понимают преобразование непрерывной аналоговой величины в дискретный ряд, квантованный по времени и уровню [75-77]. Для оцифровки служит специальный электронный блок – аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Условное обозначение АЦП приведено на рис. 3.31. Основными входами этих устройств являются вход аналогового сигнала и вход опорного напряжения. Предназначением других цифровых входов являются выполнение сервисных функций устройства.

На выходе устройство формирует цифровой код в двоичном виде, пропорциональный отношению опорного напряжения к значению сигнала на аналоговом входе.

Цифровой код, сформированный устройством АЦП, определяется по выражению [75]:

$$D_{ADC} = (2^N - 1) \frac{U_{BX}}{U_{OP}} \quad (3.53)$$

где  $D_{ADC}$  – результат преобразования в двоичном виде,  $N$  – разрядность АЦП,  $U_{BX}$  – преобразуемый входной сигнал,  $U_{ОП}$  – величина опорного напряжения.

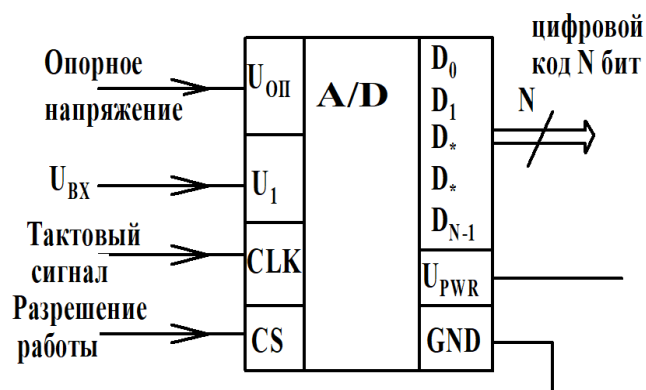


Рисунок 3.31 — Упрощенное обозначение АЦП

Максимальное значение цифрового кода, как следует из (3.53), будет равно  $2^N - 1$ , при равенстве входного сигнала опорному.

Величина  $D_{ADC}$  (3.53) может принимать только ближайшее меньшее целое значение.

Из всех различных принципов работы АЦП, в данной работе используется АЦП, работающий по методу последовательного приближения, или поразрядного уравнивания. Достоинством данного типа АЦП является высокая скорость преобразования и независимость времени преобразования от величины входного напряжения.

В составе микроконтроллера PIC18F452 имеется один АЦП [74, 78, 79] с поразрядным уравниванием, вход которого подключен к мультиплексу на пять аналоговых входов. Разрядность имеющегося АЦП  $N=10$ . Т.е. весь диапазон входных напряжений от 0 до  $U_{ОП}$  разделен на 1024 уровня.

При производстве измерения, управляющая программа выбирает один из входов микроконтроллера как вход АЦП.

Как указывалось выше (п. 3.2.1), для корректной работы АЦП, на его вход можно подавать только положительное напряжение в диапазоне от 0 до  $U_{\text{оп}}$ . Аналоговый сигнал, снимаемый с элементов ЦПТ, содержит полярность обоих знаков. Возникает опасность потери информации от аналогового тракта. Одним из вариантов устранения потери информации является смещение аналоговых выходов каналов на величину  $\frac{U_{\text{оп}}}{2}$  и принятие этого уровня напряжения за ноль (рис. 3.32).

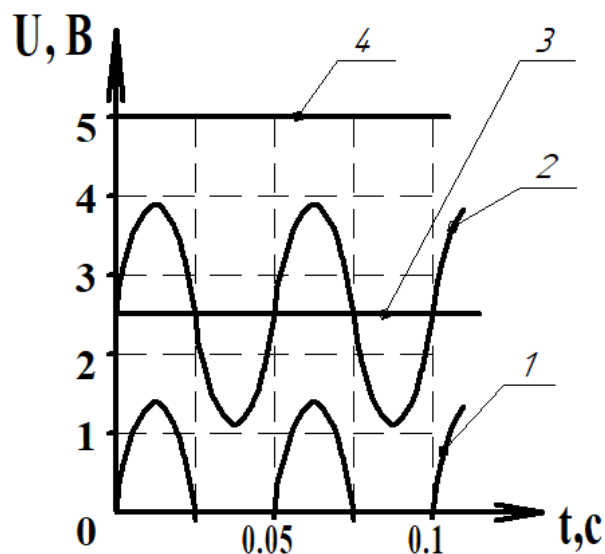


Рисунок 3.32 — Модель прохождения непрерывного синусоидального сигнала через аналоговый тракт: 1 - без смещения на выходе; 2 - сигнал при наличии смещения на выходе; 3 - величина смещения 2.5 В; 4 - величина опорного напряжения 5 В

Величина напряжения смещения 2.5 В выбрана как половина принятого опорного напряжения АЦП. Весь допустимый динамический диапазон преобразованных величин от аналогового тракта должен лежать в диапазоне от нуля до +5 В.



### 3.5.2. Фильтрация сигналов

Известно, что системы, состоящие из функциональных звеньев, охваченных обратными связями, подразделяются на статические и динамические [75]. Под статическими системами понимают такие, у которых выходное состояние определяется текущим входным состоянием. Под динамическими системами понимают такие, у которых выходное состояние определяется не только текущим входным состоянием и его производными, но и совокупными предыдущими состояниями [56-58, 75].

Еще системы по виду функционирования подразделяют на дискретные и непрерывные.

Для задач фильтрации аналоговых сигналов по полосе частот применимы только динамические системы.

Как было описано выше, в данной работе использованы 2 типа фильтрации – неселективная и селективная.

Неселективная фильтрация полностью осуществлялась в аналоговом тракте в соответствии с алгоритмами непрерывных систем, описанных с помощью передаточных функций оператором Лапласа [32, 34, 41]. Задача неселективной фильтрации заключалась в подавлении внеполосных помех и обеспечении прохождения опорной частоты без ослабления, но полностью решить проблему подавления внеполосных помех аналоговая фильтрация не может. Вследствие этого факта, в данной работе применяется дополнительная цифровая фильтрация. Задачей цифровой фильтрации является обработка сигналов опорной частоты.

Принцип работы любого цифрового фильтра, как дискретной динамической системы, основан на теореме Найквиста-Шенона, называемой теоремой отсчетов [75, 76]. Теорема гласит: «любую функцию  $F(t)$ , состоящую из частот от 0 до  $f_1$ , можно непрерывно передавать с любой точностью при помощи чисел, следующих друг за другом менее чем через  $\frac{1}{2 \cdot f_1}$  секунд». Это фундаментальная теорема,

связывающая аналоговые и дискретные сигналы и справедлива для периодически повторяющихся сигналов [75, 76].

В данной работе для решения задач неселективной фильтрации использованы непрерывные динамические системы, уравнения которых приведены в п. 3.2-3.4.

Для решения задач селективной фильтрации используем динамические дискретные системы.

Преобразование аналогового сигнала в цифровой осуществляется по значениям выходов аналогового тракта. Важнейшим требованием является стабильность периода дискретизации  $T_s$  (рис. 3.33).

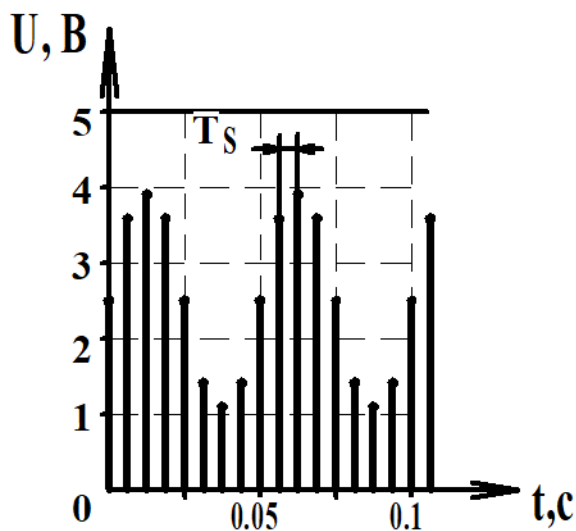


Рисунок 3.33 — Пример дискретизации синусоидального сигнала с периодом дискретизации  $T_s$ .

На рис. 3.33 представлен пример получения дискретного сигнала из синусоидального с периодом дискретизации  $T_s$ , равным  $1/8$  периода синусоидального сигнала. При этом получается дискретный сигнал, квантованный по времени и по уровню.

Полученную дискретную систему можно представить как звено, имеющее на входе временную последовательность  $x[n]$  и выходную  $y[n]$  (рис 3.34а)

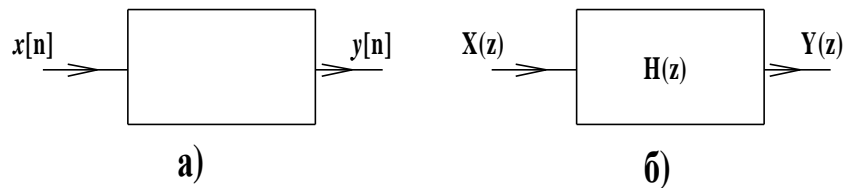


Рисунок 3.34 — Представление дискретной системы:

- а) простейшая во временной области;  
 б) как передаточной функции от оператора  $z$

Промежуточным звеном между аналоговым сигналом (рис. 3.32) и дискретным (рис. 3.34) является АЦП, работающее со стабильным периодом дискретизации  $T_S$ .

Дальнейшие арифметические операции производятся с помощью арифметико-логических устройств (АЛУ).

В простейшем случае, цифровая последовательность поступает со входа устройства (рис. 3.34а) на выход с задержкой на величину  $T_S$  без обработки. Можно сказать, что  $y[n]=x[n-1]$ . В операторном виде это выражение эквивалентно  $y(z)=x(z)z^{-1}$ .

Цифровой фильтр получен из описания аналогового фильтра-прототипа. Для полосно-пропускающего фильтра непрерывное описание будет определяться выражением (3.54) [58,59]:

$$T(s) = \frac{\left( \frac{K_{PE3}}{Q_F} w_0 \right) s}{s^2 + \left( \frac{w_0}{Q_F} \right) s + w_0^2} \quad (3.54)$$

где  $K_{PE3}$  – коэффициент усиления на резонансной частоте;  $Q_F$  – добротность;  $w_0$  – резонансная частота  $c^{-1}$ .

В работе примем, что достаточными будут нижняя граница полосы пропускания 18 Гц, верхняя граница 22 Гц, центральная резонансная частота 20 Гц (опорная частота). Тогда добротность  $Q_F=5$ . Коэффициент усиления на

резонансной частоте равен 1. Резонансная частота равна  $2 \cdot \pi \cdot 20 \text{ с}^{-1}$ . Тогда аналоговый фильтр-прототип в соответствии с выражением (3.54), в численном виде будет описываться выражением:

$$T_C(s) = \frac{25.12s}{s^2 + 25.12s + 15775} = \frac{1.592 \cdot 10^{-3} s}{6.34 \cdot 10^{-5} s^2 + 1.592 \cdot 10^{-3} s + 1} \quad (3.55)$$

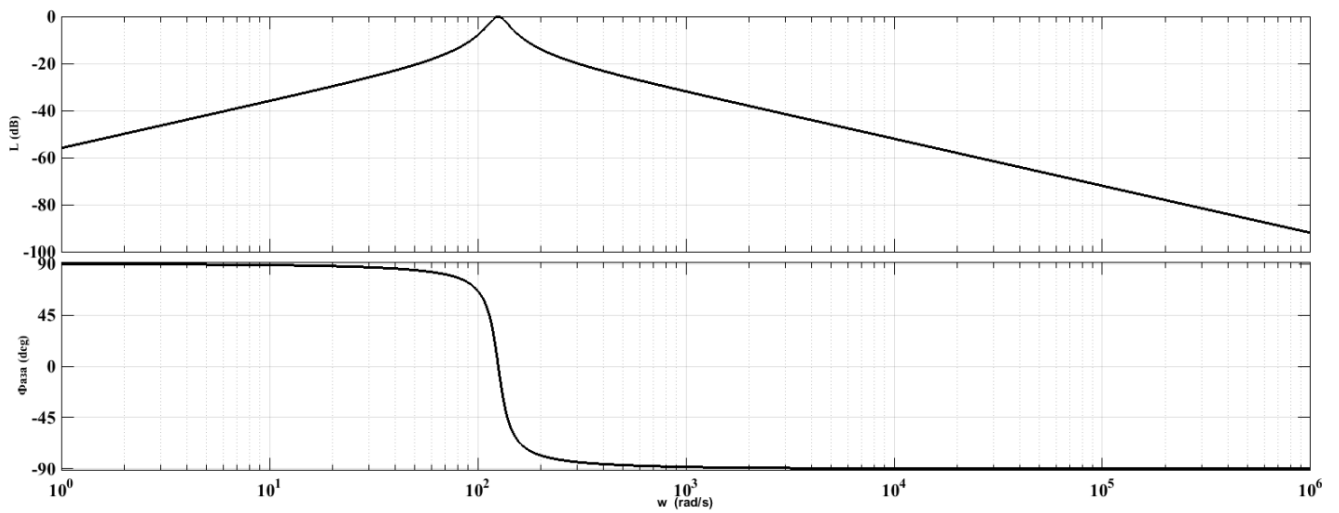


Рисунок 3.35 — АЧХ и ФЧХ аналогового фильтра-прототипа для построения цифрового полосно-пропускающего фильтра

Графики АЧХ и ФЧХ непрерывного фильтра-прототипа приведены на рис. 3.35.

Применим к описанию фильтра (3.54), метод билинейного преобразования Тастина [42, 75, 76], путем замены переменной  $s$ :

$$s(z) = \frac{2}{T_s} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

где  $T_s$  – период дискретизации. В данной работе частота дискретизации фильтра  $F_s$  принята 200 Гц. Произведя замену, получим для дискретного аналога фильтра прототипа выражение:

$$H(z) = \frac{2K_{PE3}T_S w_0 z^2 - 2K_{PE3}T_S w_0}{(Q_F T_S^2 w_0^2 + 2T_S w_0 + 4Q_F)z^2 + (2Q_F T_S^2 w_0^2 - 8Q_F)z + Q_F T_S^2 w_0^2 - 2T_S w_0 + 4Q_F} \quad (3.56)$$

Подставив численные значения в выражение (3.56) получим:

$$H(z) = \frac{15700z^2 - 15700}{290349z^2 - 450702z + 258949} \quad (3.57)$$

Приведем выражение (3.57) к каноническому виду путем деления числителя и знаменателя на величину  $290349z^2$ . Тогда передаточная функция (3.57) цифрового фильтра предстанет в виде:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0.054 - 0.054z^{-2}}{1 - 1.552z^{-1} + 0.891z^{-2}} \quad (3.58)$$

АЧХ и ФЧХ цифрового фильтра селективной фильтрации, описываемого формулой (3.58), представлены на рис. 3.36. На рис. 3.36 по оси  $OX$  отложена нормализованная частота, при которой за единицу принимается значение  $F_s/2$ .

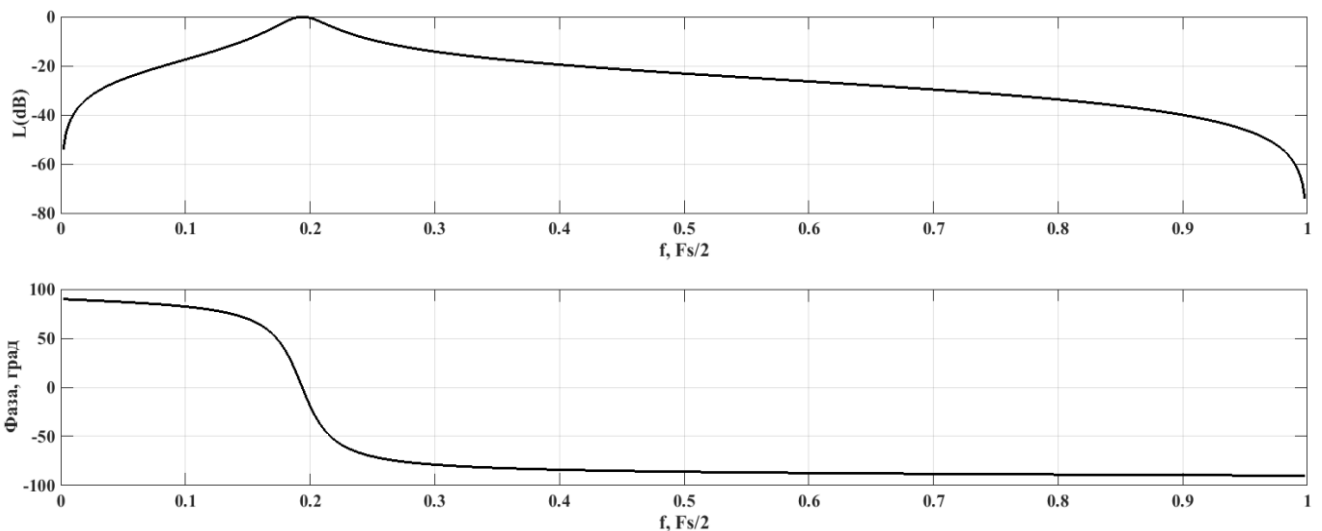


Рисунок 3.36 — АЧХ и ФЧХ цифрового фильтра селективной фильтрации, построенная по фильтру-прототипу (3.55)

Для реализации цифрового фильтра, имеющего АЧХ и ФЧХ (рис. 3.36), по дискретной передаточной функции для  $H(z)$  (3.58) запишем разностное уравнение [75]:

$$Y(z)(1 - 1.552z^{-1} + 0.891z^{-2}) = X(z)(0.054 - 0.054z^{-2})$$

Раскрыв скобки, выразим выходной сигнал фильтра в операторном виде:

$$Y(z) = 0.054X(z) - 0.054X(z)z^{-2} + 1.552Y(z)z^{-1} - 0.891Y(z)z^{-2} \quad (3.59)$$

Перейдя от  $z$  описания к описанию последовательностей входного и выходного сигналов, можем записать:

$$y[n] = 0.054x[n] - 0.054x[n-2] + 1.552y[n-1] - 0.891y[n-2] \quad (3.60)$$

Где  $y[n]$  – выходные отсчеты спроектированного цифрового фильтра,  $x[n]$  – дискретная входная последовательность.

Формула (3.60) представляет разностное уравнение цифрового фильтра, построенного по непрерывному фильтру-прототипу (3.55).

Структура, имеющая передаточную функцию  $H(z)$ , отображена в виде БИХ фильтра прямой формы I [75] (рис. 3.37).

В левой части структурной схемы фильтра (рис. 3.37), коэффициенты представляющие числитель функции  $H(z)$ , описывают цифровой КИХ фильтр, являющийся статическим звеном. Правая часть, имеющая обратные связи, представлена знаменателем  $H(z)$ . Наличие обратной связи в структуре фильтра способно обеспечить большую крутизну АЧХ, по сравнению с КИХ фильтром, при меньшем количестве задействованных ячеек памяти [75]. Небольшое число ячеек памяти и низкая частота дискретизации позволила фильтру работать в режиме реального времени.

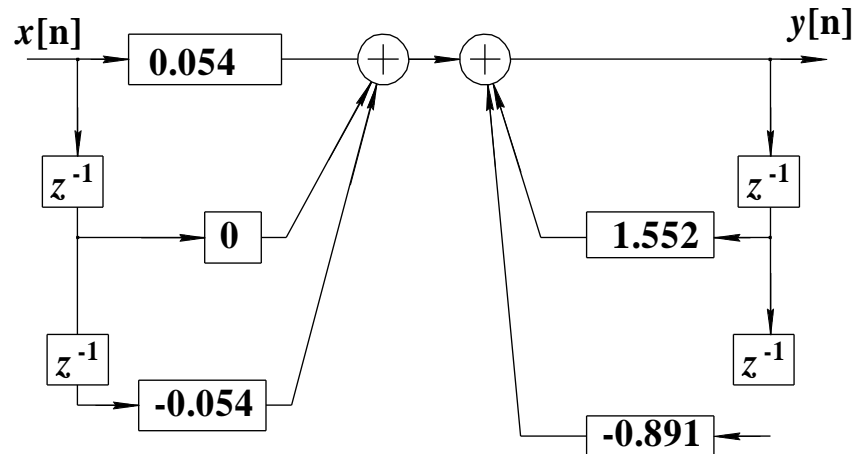


Рисунок 3.37 — Структурная схема цифрового БИХ фильтра основной фильтрации в виде прямой формы I

На основании выражения (3.60) построена работа цифрового фильтра, реализованного в виде программы для микроконтроллера. Совместная работа аналоговой и цифровой фильтрации даст достаточное подавление внеполосных помех и позволит практически полностью устранить в сигнале каналов частоты 50 Гц.

### 3.6. Функциональная схема цифрового модуля

Функциональная схема цифрового модуля приведена на рис. 3.38. Функциональная схема определяет алгоритм работы основной управляющей программы микроконтроллера [78, 79].

С выходов аналогового модуля 1 на входы цифрового модуля поступают 3 сигнала IF, PH1, I1.

После переключения коммутатором выбранного для опроса канала, производится оцифровка сигналов с последующей фильтрацией в режиме реального времени. Все три фильтра каналов имеют идентичную передаточную функцию. Фильтрами 2, 3, 4 формируются цифровые последовательности  $if(n)$ ,

$u(n)$ ,  $i_l(n)$ , соответствующие току опрашиваемого фидера  $IF$ , потенциалу шин  $PFI$ , налагаемому току  $II$ .

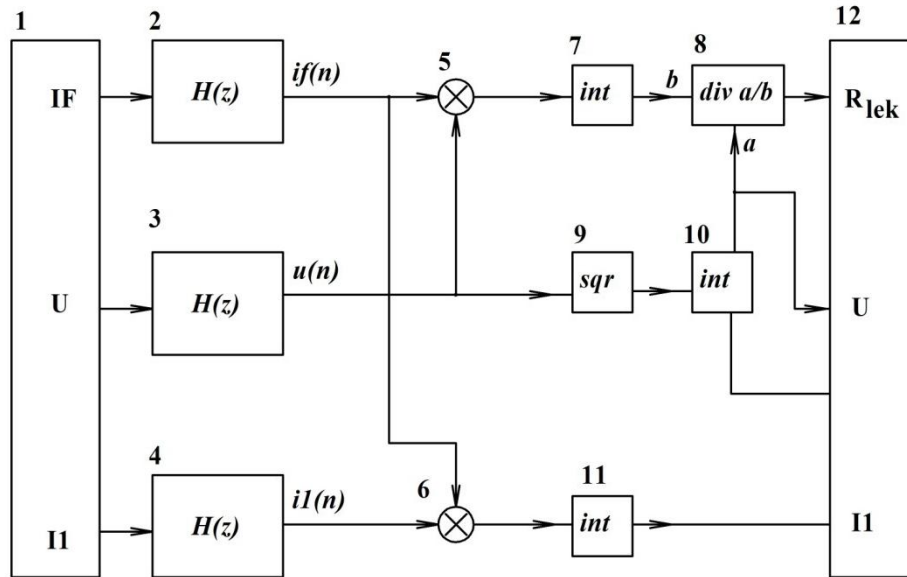


Рисунок 3.38 — Функциональная схема обработки измерительной информации

Когда происходит выход цифрового фильтра в стационарный режим, фильтрованные значения сохраняются в оперативной памяти микроконтроллера. За один замерный цикл производится оцифровка и фильтрация по 60 точкам, соответствующим 3 периодам опорной частоты, которые будут сохранены в ОЗУ.

После производства 60 замеров в стационарном режиме, производятся вычисления с сохраненными значениями.

В порядке увеличения индекса производятся поэлементные перемножения последовательностей  $if(n)$  и  $u(n)$  множителем 5. Этот сигнал пропорционален мгновенному значению сигнальной мощности от внешнего опорного источника частотой 20 Гц, протекающей через датчик тока опрашиваемого фидера. Мгновенные значения сигнальной мощности суммируются интегратором 7, образуя величину, пропорциональную активной составляющей тока фидера  $IF$  относительно потенциала  $PFI$ . На выходе интегратора 7 эта величина будет



представлять скалярное произведение последовательностей  $if(n)$  и  $u(n)$  [34]. При вычислении интеграла на выходе интегратора 7, применяется метод экспоненциального усреднения [75] для уменьшения влияния осцилляций при больших значениях емкости контролируемого фидера.

В модуле 9 вычисляются мгновенные значения величины, пропорциональной квадрату потенциала шин от внешнего опорного источника 20 Гц. После суммирования интегратором 10 квадратов мгновенных значений последовательности  $u(n)$ , на его выходе появляется величина, соответствующая квадрату нормы потенциала шин, частотой 20 Гц. В модуле 8 производится деление нормы сигнала, соответствующего потенциалу шин, на величину, пропорциональную активной составляющей тока фидера IF. Эта величина будет пропорциональна активному сопротивлению утечки в зоне контролируемого фидера. Рассчитанное сопротивление отображается на дисплее 12.

Для упрощения контроля персоналом потенциала шин от налагаемого источника, величина, пропорциональная квадрату нормы также выводится на дисплей 12.

В случае, если произойдет металлическое замыкание полюса контролируемого фидера на землю, величина сигнала  $U$  будет близка к 0. Корректное вычисление сопротивления активной утечки в зоне контролируемого фидера будет невозможно.

С помощью умножителя 6 и интегратора 11, вычисляется скалярное произведение последовательностей  $il(n)$  и  $if(n)$ , являющимися функциями от общего налагаемого тока I1 и тока контролируемого фидера IF. Если металлическое замыкание на землю полюса контролируемого фидера произошло в зоне, то скалярное произведение  $if(n)$  и  $il(n)$  будет иметь максимальное значение.

### 3.7. Моделирование работы электромагнитного датчика тока

Целью данного расчета является подтверждение эффективности применения ООС в электромагнитной части датчика тока, а также доказательство устойчивости системы, описанной выражением (3.46) для  $H_{DT}(s)$ . Рассмотрим прохождение сигнала тока фидера через входной каскад внешнего усилителя, представляющего разъемный датчик тока. Сигнал тока фидера  $I_{FI}$  (рис. 2.12) описан в виде функции времени выражением (2.21). В операторном виде токовый сигнал будет иметь описание:

$$I_{FI}(s) = \frac{0.76302}{s^2 + 31945104} + \frac{2.6753}{s^2 + 14198724} + \frac{2.826}{s^2 + 3549456} + \frac{0.64480}{s^2 + 15775} \quad (3.61)$$

В этом сигнале полезную информацию о состоянии фидера несет только составляющая с частотой  $\omega = 125.6 \text{ c}^{-1}$ . Остальные составляющие генерируются на частотах кратных  $314 \text{ c}^{-1}$  выпрямительным агрегатом. Сигнал (2.21) представляет полный ток контролируемого фидера и содержит как помехи, инжектируемые выпрямительно-подзарядным агрегатом, так и частотную составляющую опорного сигнала.

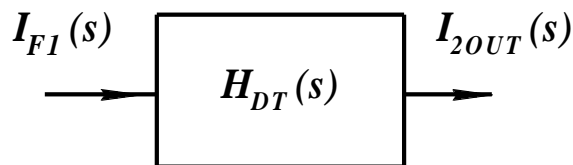


Рисунок 3.39 — Расчетная модель работы электромагнитного датчика тока

Расчетная модель работы датчика тока приведена на рисунке 3.39. В данной модели, входной величиной является оператор тока  $I_{FI}(s)$ , описанный выражением (3.61). Передаточная функция датчика представлена выражением (3.46). Выходной величиной звена  $H_{DT}$  является ток  $i_{2OUT}(t)$ , который компенсирует

магнитный поток разъемной части датчика (рис. 3.17). Операторное отображение тока  $i_{2OUT}(t)$ , получится как произведение передаточной функции  $H_{DT}(s)$  и оператора входного тока будет:

$$I_{2OUT}(s) = I_{F1}(s)H_{DT}(s) \quad (3.62)$$

Операторное отображение тока  $I_{2OUT}(s)$  представим в виде отношения двух степенных полиномов  $N_{2OUT}(s)$  и  $D_{2OUT}(s)$ :

$$I_{2OUT}(s) = \frac{N_{2OUT}(s)}{D_{2OUT}(s)} \quad (3.63)$$

Перемножение выражений (3.61) для оператора входного тока  $I_{F1}(s)$  и (3.46) для передаточной функции электромагнитной части датчика тока дадут следующие значения для числителя  $N_{2OUT}(s)$  и знаменателя  $D_{2OUT}(s)$  оператора выходного тока датчика:

$$N_{2OUT}(s) = 5.188 \cdot 10^{-28} s^8 + 2.035 \cdot 10^{-20} s^6 + 1.521 \cdot 10^{-13} s^4 + 7.987 \cdot 10^{-08} s^2 ;$$

$$D_{2OUT}(s) = 8.793 \cdot 10^{-39} s^{12} + 2.152 \cdot 10^{-33} s^{11} + 7.912 \cdot 10^{-29} s^{10} + 1.083 \cdot 10^{-25} s^9 + 3.916 \cdot 10^{-21} s^8 + \\ + 1.393 \cdot 10^{-18} s^7 + 4.865 \cdot 10^{-14} s^6 + 4.269 \cdot 10^{-12} s^5 + 1.274 \cdot 10^{-7} s^4 + 2.108 \cdot 10^{-6} s^3 + \\ + 0.002062s^2 + 0.03219s + 1$$

Для нахождения оригинала  $i_{2OUT}(t)$  применим вторую теорему разложения[32, 34, 40]:

$$i_{2OUT}(t) = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{N_{2OUT}(s_k)}{D_{2OUT}'(s_k)} \cdot e^{s_k \cdot t} \quad (3.64)$$

где  $s_k$  – корни полинома знаменателя  $D_{2OUT}(s)$ .  $n$  – степень полинома  $D_{2OUT}(s)$ .

Корни  $s_k$  могут быть как комплексными, так и действительными числами. Известно, что если  $s_k$  представляет действительное число, то  $k$ -я составляющая суммы (3.64) представляет апериодическую функцию. Если комплексное число – то колебательную функцию времени. Тогда в выражении (3.64) дробный коэффициент будет представлять амплитуду и фазу  $k$ -й составляющей суммы функции времени оригинала при комплекснозначном корне  $s_k$ . Также, из теории функции комплексного переменного [41] известно, что выражение вида:

$$\operatorname{res}_{s=s_k} \frac{N_{2OUT}(s)}{D_{2OUT}(s)} = \frac{N_{2OUT}(s_k)}{D'_{2OUT}(s_k)}$$

именуется вычетом функции в окрестности точки  $s_k$ .

Результаты расчета корней полинома  $D_{2OUT}(s)$  и вычетов функции  $I_{2OUT}(s_k)$  приведем в таблице 3.2.

Таблица 3.2 — Значения корней и вычетов функции  $I_{2OUT}(s)$

$s_k$	$\operatorname{res} I_{2OUT}(s_k)$
- 200062	$-9.487 \cdot 10^{-6}$
- 44705	$1.89 \cdot 10^{-4}$
$j5652$	$6.388 \cdot 10^{-5} e^{-j1.721}$
$-j5652$	$6.388 \cdot 10^{-5} e^{j1.721}$
$j3768$	$3.378 \cdot 10^{-4} e^{-j1.67}$
$-j3768$	$3.378 \cdot 10^{-4} e^{j1.67}$
$j1884$	$7.155 \cdot 10^{-4} e^{-j1.613}$
$-j1884$	$7.155 \cdot 10^{-4} e^{j1.613}$
$j125,6$	$2.509 \cdot 10^{-3} e^{-j1.442}$
$-j125,6$	$2.509 \cdot 10^{-3} e^{j1.442}$
- 8,052 + $j20,877$	$4.908 \cdot 10^{-4} e^{j2.327}$
- 8,052 - $j20,877$	$4.908 \cdot 10^{-4} e^{-j2.327}$

Определим по выражению (3.64) периодические составляющие в токе  $i_{2OUT}(t)$  для частот, заданных комплексно-сопряженными корнями  $s_k$  полинома  $D_{2OUT}(s)$ , приведенными в таблице 3.2. Согласно теореме Эйлера, для комплексно-сопряженных частот, функция времени может быть представлена выражением [34]:

$$\cos(\omega t) = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2}$$

Для частоты  $5652 \text{ c}^{-1}$ :

$$\begin{aligned} i_{11}(t) &= 6.388 \cdot 10^{-5} \left( e^{-j1.721} e^{j5652t} + e^{j1.721} e^{-j5652t} \right) = 6.388 \cdot 10^{-5} \left( e^{j(5652t-1.721)} + e^{-j(5652t-1.721)} \right) = \\ &= 1.278 \cdot 10^{-4} \cos(5652t - 1.721) \end{aligned}$$

Для частоты  $3768 \text{ c}^{-1}$ :

$$\begin{aligned} i_{12}(t) &= 3.378 \cdot 10^{-4} \left( e^{-j1.67} e^{j3768t} + e^{j1.67} e^{-j3768t} \right) = 2 \cdot 3.378 \cdot 10^{-4} \left( e^{j(3768t-1.67)} + e^{-j(3768t-1.67)} \right) = \\ &= 6.756 \cdot 10^{-4} \cos(3768t - 1.67) \end{aligned}$$

Для частоты  $1884 \text{ c}^{-1}$ :

$$\begin{aligned} i_{13}(t) &= 7.155 \cdot 10^{-4} \left( e^{-j1.613} e^{j1884t} + e^{j1.613} e^{-j1884t} \right) = 7.155 \cdot 10^{-4} \left( e^{j(1884t-1.613)} + e^{-j(1884t-1.613)} \right) = \\ &= 1.431 \cdot 10^{-3} \cos(1884t - 1.613) \end{aligned}$$

Для частоты  $125.6 \text{ c}^{-1}$ :

$$\begin{aligned} i_{14}(t) &= 2.509 \cdot 10^{-3} \left( e^{-j1.442} e^{j125.6t} + e^{j1.442} e^{-j125.6t} \right) = \\ &2.509 \cdot 10^{-3} \left( e^{j(125.6t-1.442)} + e^{-j(125.6t-1.442)} \right) = 5.018 \cdot 10^{-3} \cos(125.6t - 1.442) \end{aligned} \quad (3.65)$$

Как видно из таблицы 3.2, в знаменателе формулы (3.63) имеются два корня с частотами, отсутствующими во входном токе. Эти частоты описывают

собственные свойства звеньев, образующих внешний усилитель. Сигналы собственной частоты  $20.887 \text{ c}^{-1}$  системы будет затухающим во времени, т.к корни содержат отрицательную действительную часть.

Для периодической затухающей составляющей с частотой  $20.877 \text{ c}^{-1}$  запишем:

$$i_{15}(t) = 4.908 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-8.052t} (e^{j2.327} e^{j20.877t} + e^{-j2.327} e^{-j20.877t}) = 4.908 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-8.052t} \cdot (e^{j(20.877t+2.327)} + e^{-j(20.877t+2.327)}) = 9.816 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-8.052t} \cos(20.877t + 2.237)$$

Для аperiodических затухающих составляющих тока  $I_{2OUT}(t)$  можно записать:

$$i_{16}(t) = -9.487 \cdot 10^{-6} e^{-200062t} + 1.89 \cdot 10^{-4} e^{-44705t}$$

Тогда результирующий выходной ток в виде функции времени, согласно выражению (3.64), запишется как сумма составляющих  $i_{11}(t) - i_{16}(t)$ :

$$i_{2OUT}(t) = 1.278 \cdot 10^{-4} \cos(5652t - 1.721) + 6.756 \cdot 10^{-4} \cos(3768t - 1.67) + 1.431 \cdot 10^{-3} \cos(1884t - 1.613) + 5.018 \cdot 10^{-3} \cos(125.6t - 1.442) + 9.816 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-8.052t} \cos(20.877t + 2.237) - 9.487 \cdot 10^{-6} e^{-200062t} + 1.89 \cdot 10^{-4} e^{-44705t}$$

Диаграммы первичного тока фидера тока  $i_{F1}(t)$ ,  $i_{2OUT}(t)$ ,  $i_{15}(t)$ , и разности токов  $i_{F1}(t) - i_{2OUT}(t)$  приведены на рис. 3.40

Как видно из рис. 3.40, первичный ток фидера  $i_{F1}(t)$  и выходной ток электромагнитного датчика  $i_{2OUT}(t)$  почти совпали. Разница составляет менее 20%, что говорит о действии ООС через компенсационную обмотку.

Из таблицы 3.2 видно, что все корни полинома знаменателя  $I_{2OUT}(s)$  имеют отрицательные действительные части, что соответствует критерию абсолютной устойчивости [34].

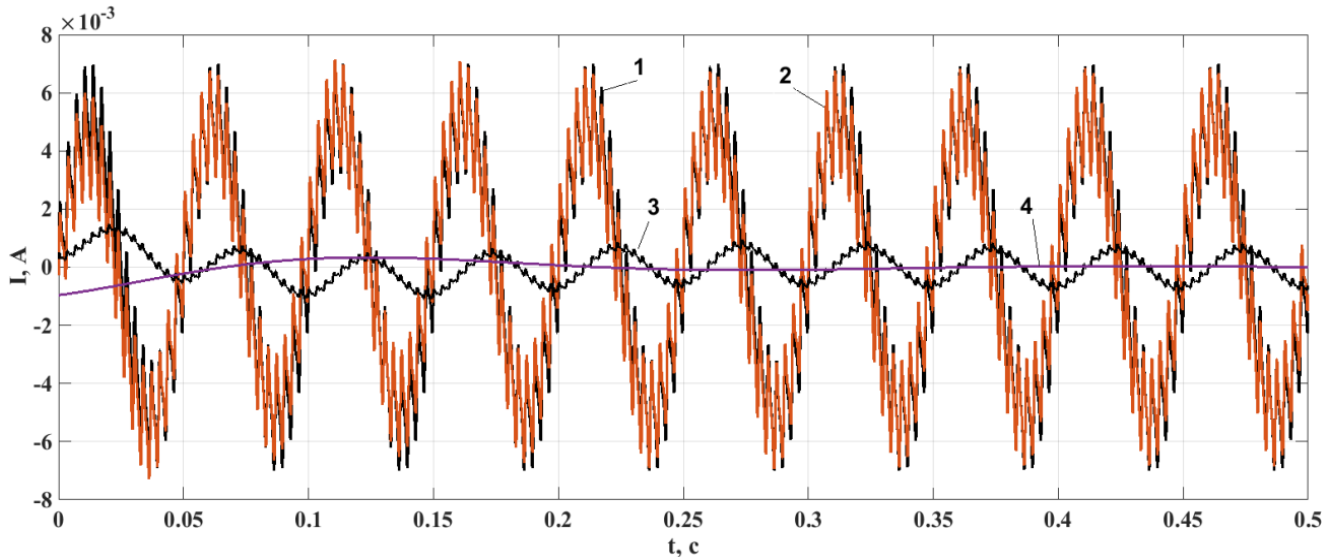


Рисунок 3.40 — Диаграммы токов электромагнитного датчика тока:  
 1 – первичный ток фидера  $i_{F1}(t)$ ; 2 – выходной ток датчика  $i_{2OUT}(t)$ ;  
 3 – разность токов  $i_{F1}(t) - I_{2OUT}(t)$ ; 4 – периодическая затухающая составляющая  $i_{15}(t)$

Так же из таблицы 3.2 видно, что датчик тока имеет собственную частоту  $20.877 \text{ c}^{-1}$ , колебания на которой затухают в течении незначительного времени и в стационарном режиме не повлияют на результат измерения тока  $i_{F1}(t)$ .

### 3.8. Моделирование работы аналогового тракта канала тока фидера

Как указывалось ранее, в состав аналогового тракта канала тока фидера системы контроля изоляции входят два модуля – внешний усилитель и аналоговая часть терминала. В п.3.7 проанализирована отдельно работа электромагнитной части, входящей в состав внешнего усилителя. Целью анализа было доказательство устойчивости звена и его работоспособность в полосе частот, охватывающей частоты возможных помехи и сигнала опорной частоты.

Из рис. 3.4 видно, что все внешние усилители подключены через селектор каналов. Поэтому, в дальнейшем анализе принимаем, что на момент подключения выхода внешнего усилителя для контроля сопротивления фидера, это устройство находится в стационарном режиме.

### 3.8.1 Анализ работы внешнего усилителя

Проанализируем работу внешнего усилителя системы контроля изоляции, в составе которого имеется описанный выше в п. 3.7 электромагнитный датчик тока. Линейное описание внешнего усилителя представлено выражением (3.52). Входной величиной является ток  $i_{FI}(t)$ , операторное отображение которого описано выражением (3.59). Выходной величиной внешнего усилителя является ток  $i_{IFO}(t)$ , (рис. 3.14). Расчетная модель работы внешнего усилителя представлена на рис. 3.41. В данный момент представляет интерес только установившийся режим, поэтому анализировать будем только комплексно-сопряженные составляющие в операторе тока  $I_{FO}(s)$ .

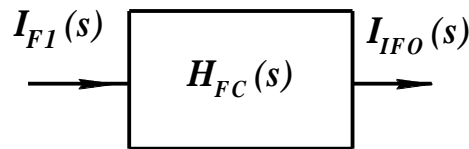


Рисунок 3.41 — Расчетная модель работы внешнего усилителя.

Операторное отображение, полученное как произведение передаточной функции  $H_{FC}(s)$  и оператора входного тока  $I_{FI}(s)$  будет:

$$I_{IFO}(s) = H_{FC}(s)I_{FI}(s) \quad (3.66)$$

Операторное отображение выходного токового сигнала внешнего усилителя будет представлять собой отношение двух полиномов:

$$I_{IFO}(s) = \frac{N_{IFO}(s)}{D_{IFO}(s)}$$



где  $N_{IFO}(s)$  -полином числителя оператора выходного тока внешнего усилителя;  $D_{IFO}(s)$  – полином знаменателя оператора выходного тока.

$$N_{IFO}(s) = 9.428 \cdot 10^{-33} s^{10} + 3.707 \cdot 10^{-25} s^8 + 2.8 \cdot 10^{-18} s^6 + 1.722 \cdot 10^{-12} s^4 + 1.421 \cdot 10^{-7} s^2$$

$$D_{IFO}(s) = 9.037 \cdot 10^{-44} s^{14} + 2.223 \cdot 10^{-38} s^{13} + 8.435 \cdot 10^{-34} s^{12} + 1.874 \cdot 10^{-30} s^{11} +$$

$$+ 4.141 \cdot 10^{-26} s^{10} + 5.2 \cdot 10^{-23} s^9 + 5.177 \cdot 10^{-19} s^8 + 5.117 \cdot 10^{-16} s^7 + 1.401 \cdot 10^{-12} s^6 +$$

$$+ 1.248 \cdot 10^{-9} s^5 + 1.689 \cdot 10^{-07} s^4 + 2.22 \cdot 10^{-5} s^3 + 0.002381 s^2 + 0.04178 s + 1$$

Рассчитанные значения корней полинома  $D_{IFO}(s)$  и вычетов функции  $I_{IFO}(s)$  приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 — Значения корней и вычетов функции  $I_{IFO}(s)$

$s_k$	$A_k$
$-2.0038 \cdot 10^5$	$-1.675 \cdot 10^{-5}$
$-4.4676 \cdot 10^4$	$3.411 \cdot 10^{-4}$
$j5652$	$1.113 \cdot 10^{-4} e^{-j1.558}$
$-j5652$	$1.113 \cdot 10^{-4} e^{j1.558}$
$j3768$	$5.79 \cdot 10^{-4} e^{-j1.4253}$
$-j3768$	$5.79 \cdot 10^{-4} e^{j1.4253}$
$j1884$	$1.12 \cdot 10^{-3} e^{-j1.1434}$
$-j1884$	$1.12 \cdot 10^{-3} e^{j1.1434}$
$-812.1$	$3.52 \cdot 10^{-3}$
$j125.6$	$2.254 \cdot 10^{-3} e^{-j2.4055}$
$-j125.6$	$2.254 \cdot 10^{-3} e^{j2.4055}$
$-119.7$	$6.83 \cdot 10^{-3}$
$-8.05 + j20.87$	$9.261 \cdot 10^{-4} e^{j2.1135}$
$-8.05 - j20.87$	$9.261 \cdot 10^{-4} e^{-j2.1135}$

Комбинируя комплексно-сопряженные частоты, согласно второй теореме разложения для отображений (3.64), будем получать косинусоидальные функции

интересующих нас периодических составляющих. Так, для частоты  $\omega=5652 \text{ c}^{-1}$  запишем:

$$i_{21}(t) = 1.11 \cdot 10^{-4} (e^{-j1.558} e^{j5652t} + e^{j1.558} e^{-j5652t}) = 2 \cdot 1.11 \cdot 10^{-4} \cos(5652t - 1.558) \quad (3.67)$$

Для частоты  $\omega=3768 \text{ c}^{-1}$  составляющая тока будет:

$$i_{22}(t) = 3.378 \cdot 10^{-4} (e^{-j1.4253} e^{j3768t} + e^{j1.4253} e^{-j3768t}) = 2 \cdot 3.378 \cdot 10^{-4} \cos(3768t - 1.4253) \quad (3.68)$$

Соответственно запишем для частоты  $\omega=1884 \text{ c}^{-1}$  составляющую выходного тока:

$$i_{23}(t) = 7.15 \cdot 10^{-4} (e^{-j1.1434} e^{j1884t} + e^{j1.1434} e^{-j1884t}) = 2 \cdot 7.15 \cdot 10^{-4} \cos(1884t - 1.1434) \quad (3.69)$$

Для частоты  $\omega=125.6 \text{ c}^{-1}$  составляющая тока будет:

$$i_{24}(t) = 2.51 \cdot 10^{-3} (e^{-j2.4055} e^{j125.6t} + e^{j2.4055} e^{-j125.6t}) = 2 \cdot 2.51 \cdot 10^{-3} \cos(125.6t - 2.4055) \quad (3.70)$$

Уравнения (3.67-3.70) описывают только установившийся процесс в датчике тока и во внешнем усилителе в целом. Периодические сигналы с частотами, содержащимися в этих выражениях, имелись во входном токе внешнего усилителя.

Выходной ток внешнего усилителя в установившемся режиме, определится суммой рассчитанных функций времени  $i_{21}(t) - i_{24}(t)$ . В стационарном режиме для выходного тока внешнего усилителя тока  $i_{IF0}(t)$  можно записать:

$$i_{IF0}(t) = 2.22 \cdot 10^{-4} \cos(5652t - 1.558) + 6.756 \cdot 10^{-4} \cos(3768t - 1.4253) + 1.43 \cdot 10^{-3} \cos(1884t - 1.1434) + 5.02 \cdot 10^{-3} \cos(125.6t - 2.4055) \quad (3.71)$$

Графики входного и выходного тока представлены на рисунке 3.42. Ввиду того, что замер сопротивления утечки начинается в стационарном режиме работы

внешнего усилителя, периодическая затухающая и аperiodические составляющие на диаграмме 3.42 не отражены.

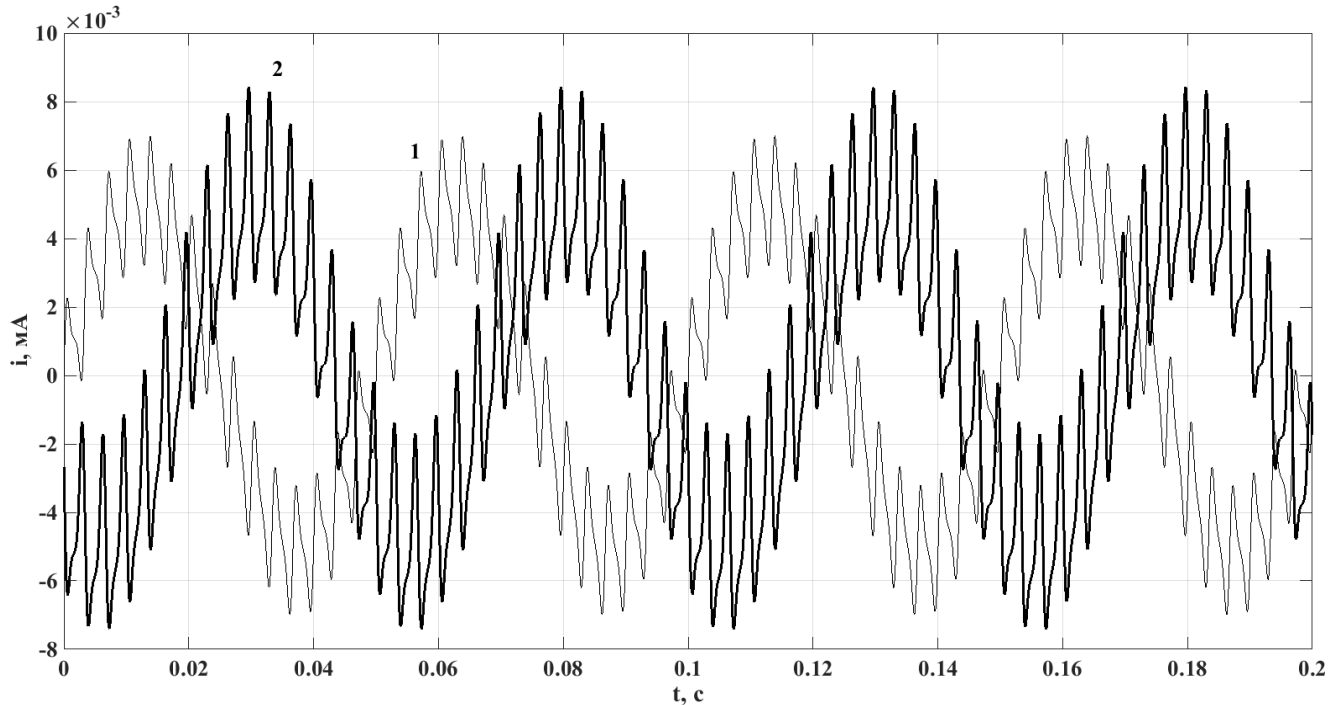


Рисунок 3.42 — Диаграммы входного и выходного токов внешнего усилителя в установившемся режиме: 1 – входной ток  $i_{FI}(t)$ ; 2 - выходной ток  $i_{IF0}(t)$ ;

Как видно из выражения (3.70) для составляющей  $\omega=125.6 \text{ c}^{-1}$ , а так же из графика рис 3.42, режекторный фильтр осуществляет сдвиг опорной частоты на  $0.96 \text{ рад}$ . Эта величина будет компенсирована фазовыми фильтрами в каналах аналогового тракта терминала и не скажется на работе устройства.

### 3.8.2. Работа канала тока фидера терминала

Рассмотрим прохождение сигнала (3.71) через аналоговый тракт канала тока фидера. Как указывалось ранее, в составе аналогового канала тока фидера IF имеется ФНЧ и режекторный фильтры, установленные каскадно. Передаточная функция  $W_{IFT}(s)$  канала IF терминала описана выражением (3.18)

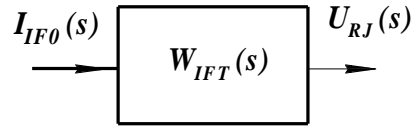


Рисунок 3.43 — Расчетная модель работы аналогового тракта канала тока фидера терминала.

Система представляет каскадное соединение внешнего усилителя с датчиком тока  $H_{FC}(s)$ , описанного выражением (3.52) и цепей канала тока терминала  $W_{IFT}(s)$ , имеющих описание (3.18).

Оператор тока  $I_{IF0}(s)$  установившегося режима, представленный в виде отношения степенных полиномов представляет преобразование Лапласа для функции (3.71)

Оператор выходного напряжения канала ИФ  $U_{RJ}(s)$  полученный как произведение  $I_{IF0}(s)$  и  $W_{IFT}(s)$  (рис 3.43) :

$$U_{RJ}(s) = I_{IF0}(s)W_{IFT}(s) = \frac{N_{RJ}(s)}{D_{RJ}(s)} \quad (3.72)$$

где:

$$N_{RJ}(s) = 6.816 \cdot 10^{-31} s^9 + 1.268 \cdot 10^{-28} s^8 + 3.134 \cdot 10^{-23} s^7 + 5.124 \cdot 10^{-21} s^6 + 3.412 \cdot 10^{-16} s^5 + 3.257 \cdot 10^{-14} s^4 + 6.993 \cdot 10^{-10} s^3 - 8.798 \cdot 10^{-08} s^2 + 6.525 \cdot 10^{-05} s - 0.008924 \quad (3.73)$$

- полином числителя оператора выходного напряжения канала ИФ;

$$D_{RJ}(s) = 1.545 \cdot 10^{-35} s^{12} + 1.7 \cdot 10^{-32} s^{11} + 7.723 \cdot 10^{-28} s^{10} + 8.456 \cdot 10^{-25} s^9 + 9.762 \cdot 10^{-21} s^8 + 1.054 \cdot 10^{-17} s^7 + 2.766 \cdot 10^{-14} s^6 + 2.791 \cdot 10^{-11} s^5 + 7.304 \cdot 10^{-9} s^4 + 1.437 \cdot 10^{-6} s^3 + 1.718 \cdot 10^{-4} s^2 + 0.01577s + 1 \quad (3.74)$$

-полином знаменателя выходного напряжения канала ИФ.

Значения корней и вычетов функции  $U_{RJ}(s)$  приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 — Значения корней и вычетов функции  $U_{RJ}$ 

$s_k$	$A_k$
$j5652$	$2.7154 \cdot 10^{-5} e^{-j2.96}$
$-j5652$	$2.7154 \cdot 10^{-5} e^{j2.96}$
$j3768$	$1.8323 \cdot 10^{-4} e^{-j2.998}$
$-j3768$	$1.8323 \cdot 10^{-4} e^{j2.998}$
$j1884$	$1.427 \cdot 10^{-3} e^{-j3.0}$
$-j1884$	$1.427 \cdot 10^{-3} e^{j3.0}$
-819	0.0725
$j125.6$	$0.5021 e^{-j1.230}$
$-j125.6$	$0.5021 e^{j1.230}$
-119.7	1.7316
$-8.04 + j139.6$	$0.8784 e^{j0.715}$
$-8.04 - j139.6$	$0.8784 e^{-j0.715}$

На основании таблицы 3.4, комбинируя комплексно-сопряженные составляющие, запишем для периодических составляющих выходного напряжения канала:

$$u_{31}(t) = 2.715 \cdot 10^{-5} (e^{-j2.96} e^{j5652t} + e^{j2.96} e^{-j5652t}) = 2.715 \cdot 10^{-5} (e^{j(5652t-2.96)} + e^{-j(5652t-2.96)}) =$$

$$= 5.43 \cdot 10^{-5} \cos(5652t - 2.96)$$

$$u_{32}(t) = 1.8323 \cdot 10^{-4} (e^{-j2.998} e^{j3768t} + e^{j2.998} e^{-j3768t}) = 1.8323 \cdot 10^{-4} (e^{j(3768t-2.998)} + e^{-j(3768t-2.998)}) =$$

$$= 3.6646 \cdot 10^{-4} \cos(3768t - 2.998)$$

$$u_{33}(t) = 1.427 \cdot 10^{-3} (e^{-j3.0} e^{j1884t} + e^{j3.0} e^{-j1884t}) = 2.715 \cdot 10^{-5} (e^{j(1884t-3.0)} + e^{-j(1884t-3.0)}) =$$

$$= 2.854 \cdot 10^{-3} \cos(1884t - 3.0)$$

$$u_{34}(t) = 0.5021 (e^{-j1.23} e^{j125.6t} + e^{j1.23} e^{-j125.6t}) = 0.5021 (e^{j(125.6t-1.23)} + e^{-j(125.6t-1.23)}) =$$

$$= 1.042 \cos(125.6t - 1.23) \quad (3.75)$$

Для затухающей составляющей:

$$u_{35}(t) = 0.8784 \cdot e^{-8.04t} (e^{j0.715} e^{j139.6t} + e^{-j0.715} e^{-j139.6t}) = 0.8784 \cdot e^{-8.04t} (e^{j(139.6t+0.715)} + e^{-j(139.6t+0.715)}) = 1.7568 \cdot e^{-8.04t} \cos(139.6t + 0.715)$$

Для апериодических составляющих:

$$u_{36}(t) = -1.7316e^{-119.7t} + 0.0725e^{-819t}$$

Результирующее напряжение на выходе аналогового канала ИФ составит сумму составляющих ( $u_{31}(t) - u_{36}(t)$ ):

$$U_{R1}(t) = 5.43 \cdot 10^{-5} \cos(5652t - 2.96) + 3.6646 \cdot 10^{-4} \cos(3768t - 2.998) + 2.854 \cdot 10^{-3} \cos(1884t - 3.0) + 1.042 \cos(125.6t - 1.23) + 1.7568 \cdot e^{-8.04t} \cos(139.6t + 0.715) - 1.7316e^{-119.7t} + 0.0725e^{-819t} \quad (3.76)$$

+

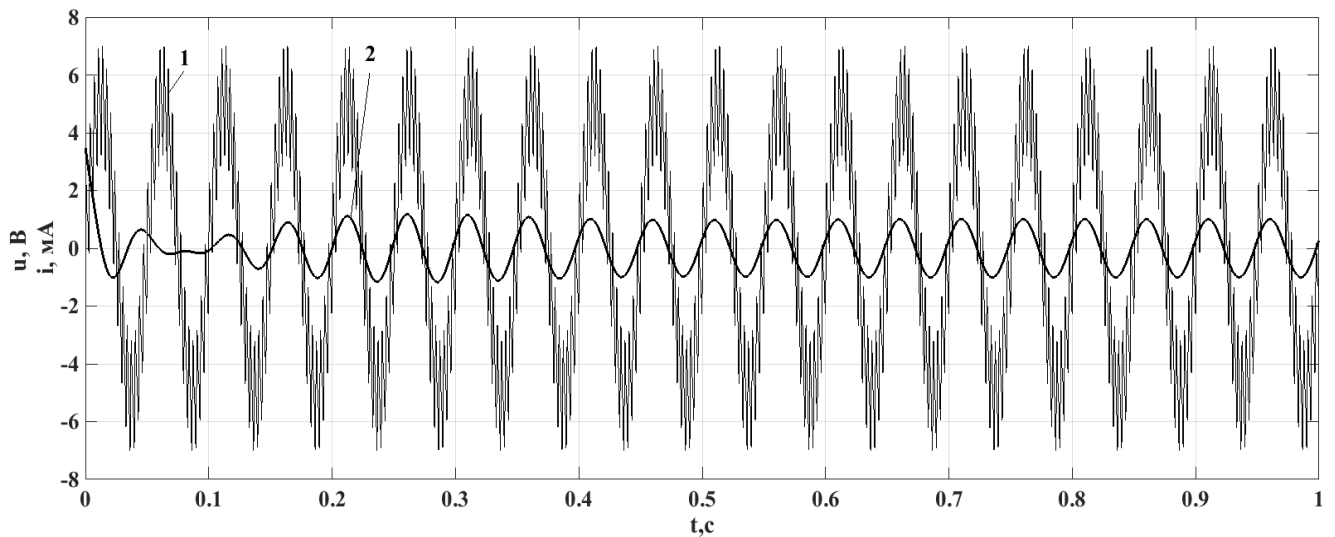


Рисунок 3.43 — Диаграммы токов и напряжений канала тока фидера ИФ:

1 - входной ток  $I_{F1}(t)$ ; 2 - напряжение  $U_{R1}(t)$  на выходе аналогового тракта канала тока фидера ИФ

Диаграммы токов и напряжений канала тока фидера представлены на рис. 3.43. Из (3.76) следует, что начало измерения тока фидера необходимо начинать

спустя время, не меньшее, чем 1 с после переключения канала, когда на выходе аналогового тракта действуют только периодические составляющие.

В данной главе были рассмотрены принципы работы функциональных звеньев, необходимых для построения системы селективного контроля изоляции фидеров ЩПТ без отключения питания. Для выполнения поставленной задачи были разработаны специальные датчики тока, устанавливаемые на каждом отходящем присоединении ЩПТ. Была разработана структурная схема устройства, приведено описание функциональных звеньев. Для создания опорного сигнала был разработан специальный генератор синусоидального сигнала частотой 20 Гц.

### **Выводы по 3 главе**

1. Разработана математическая модель функционирования устройства пофидерного контроля изоляции в цепях постоянного оперативного тока, основанная на приведенных описаниях функциональных звеньев, как непрерывных линейных моделей.

2. Разработана динамическая модель датчика тока для устройства контроля изоляции цепей постоянного оперативного тока, включающая в себя рабочую и компенсационную обмотку, представляющее линейное непрерывное звено 4-го порядка. Чувствительность разработанного датчика тока на частоте основной селекции 20 Гц составляет 50 мкА.

## **ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ СЕЛЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ НА ЗЕМЛЮ ЩИТОВ ПОСТОЯННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА**

### **4.1 Алгоритм функционирования основной управляющей программы микроконтроллера**

Цифровой вычислительный модуль отвечает за реализацию необходимых вычислений описанных в гл.3. Он выполнен на отдельной плате, расположенной в корпусе терминала. Вычислительный модуль осуществляет функции аналого-цифрового преобразования сигналов с выходов аналоговой платы и реализует необходимые вычисления по обработке. Так же реализует функции взаимодействия с периферийными устройствами – матричной клавиатурой, знакосинтезирующим дисплеем, com-портом.

Центром вычислительного модуля является микроконтроллер PIC18F452. Он имеет в своем составе все необходимые периферийные модули для реализации алгоритмов вычислений и измерений. Принципиальная электрическая схема вычислительного модуля приведена в приложении 1. Упрощенный алгоритм работы основной управляющей программы микроконтроллера приведен на рис. 4.1, основная управляющая программа микроконтроллера написана на языке высокого уровня C [49,79].

В секции 1 (рис. 4.1) выполняется инициализация микроконтроллера, его периферии, интерфейсных устройств терминала контроля изоляции, объявляются параметры терминала по умолчанию. Выставляется по умолчанию номер канала 0.

Секция 2 является началом измерения сопротивления утечки текущего канала. В процессе измерения производится 6 замеров активного сопротивления установленного канала. Эти замеренные значения хранятся в массиве RLEK01. Перед началом серии измерений все элементы массива обнуляются.



В секции 3 выполняются для установленного номера канала замеры, выходных напряжений аналоговых каналов с заданной частотой дискретизации. Замеры осуществляются функцией Measure(). Она же выполняет алгоритм цифровой фильтрации сигналов, описанный в гл.3. После установления стационарного режима выходных напряжений цифровых фильтров, по 62 последних отфильтрованных значений дискретных сигналов сохраняются во встроенной ОЗУ микроконтроллера.

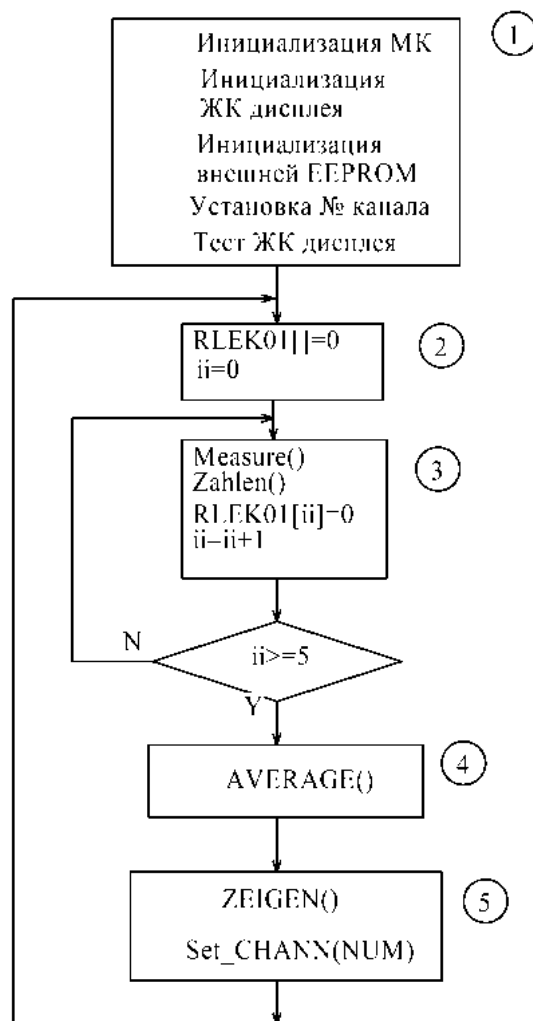


Рисунок 4.1 — Упрощенный алгоритм функционирования основной управляющей программы микроконтроллера устройства контроля изоляции

Эти данные передаются в функцию Zahlen(). В этой функции производится вычисления сигнальной активной мощности PS, квадрата нормы потенциала шин PИ2, активное сопротивление с учетом сопротивления отстройки (описано ниже), значениями которых заполняются элементы массива RLEK01.

После производства серии 6 замеров программа в секции 4 производит усреднение элементов массива. Вычисляется среднее значение активного сопротивления утечки Rlek.

В секции 5 по вычисленному значению Rlek производится нужная сигнализация, и, в зависимости от режима переключения, принимается решение о коммутации каналов IF.

#### **4.2. Конструкция устройства контроля изоляции**

На основании приведенного в главе 3 описания были разработаны принципиальные схемы электронных блоков устройства контроля изоляции, разработан алгоритм главной управляющей программы микроконтроллера, написана для него программа.

Прототип терминала системы контроля изоляции смонтирован в корпусе из стоек в виде этажерки, платы располагаются друг над другом. Межплатные соединения выполнены плоскими IDC кабелями.

Устройство имеет матричную клавиатуру 4x4, ЖК-дисплей 2x20 символов [80], СОМ-порт [49-52], светодиодный индикатор. Внешний вид устройства приведен на рис. 4.2.

В настройке нуждается только плата аналогового модуля, располагаемая над другими платами для удобства настройки. Наладка аналоговой платы описана в п.4.3.

После подачи питания, загорается ЖК дисплей. Терминал производит тестирование индикации и выходит в рабочий режим.

По умолчанию устанавливается автоматическое переключение входных каналов тока фидера. Число переключаемых каналов 32. Начальный канал имеет номер 0.



а)



б)

Рисунок 4.2 — Внешний вид терминала системы контроля изоляции:

а) внешний вид со стороны лицевой панели; б) вид сверху

На дисплее в рабочем режиме отображаются:

- Квадрат нормы потенциала шин, о.е;
- Номер входного канала;
- Вычисленное сопротивление утечки в контролируемой зоне, кОм:
- Скалярное произведение тока контролируемого фидера и налагаемого на ЩПТ тока;

Если после проведения текущего замера сопротивление утечки оказывается меньше 20 кОм, подается звуковой и световой сигнал, а в правом верхнем углу дисплея загорается символ «/» и зафиксированный номер поврежденного канала.

Если измеренное сопротивление лежит в диапазоне 20-30 кОм подается только световой сигнал.

В независимости от результата, после проведенного замера и индикации, в режиме по умолчанию происходит увеличение номера следующего канала на единицу.

Для входа в меню устройства следует нажать и удерживать клавишу «#» на цифровой клавиатуре до подачи короткого звукового сигнала. На дисплее появится приглашение в меню.

Структура меню терминала приведена на рис. 4.3

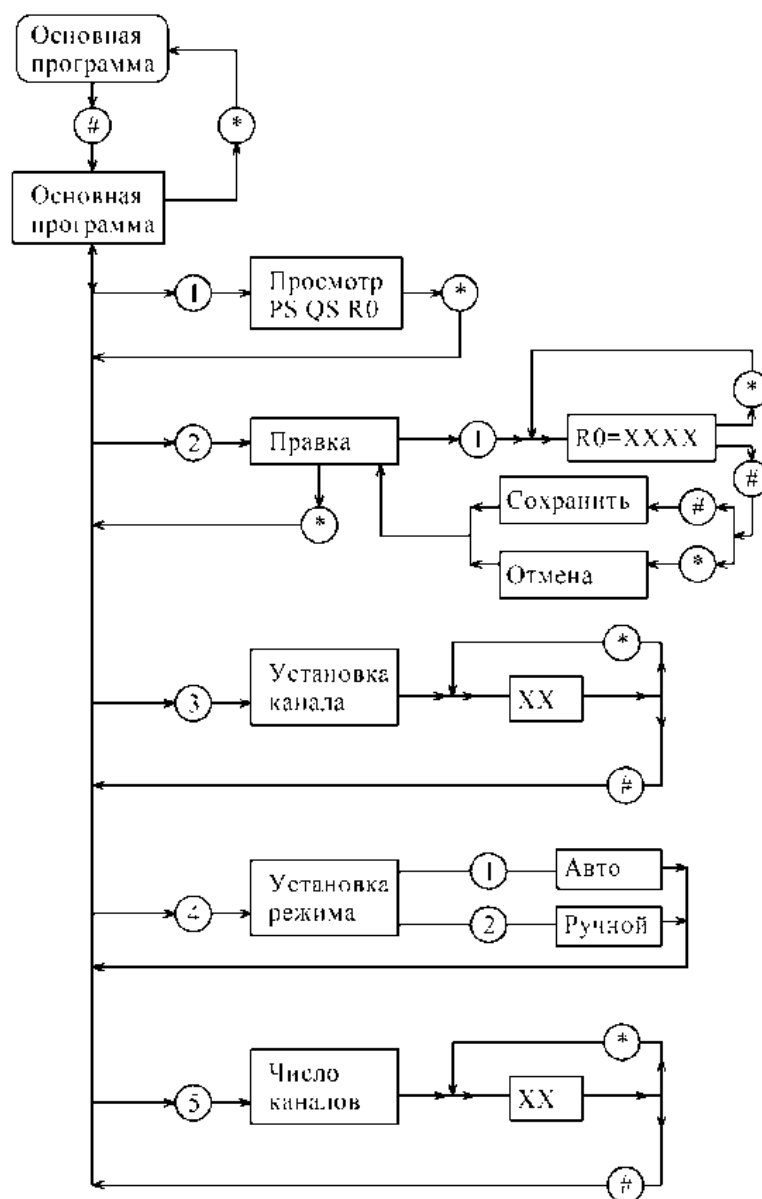


Рисунок 4.3 — Структурная схема меню терминала

Меню устройства:

- 1- Просмотр;
- 2- Редактирование R0;
- 3- Выбор номера текущего канала;
- 4- Выбор числа каналов;
- 5- Режим переключения входных каналов;

Режим просмотра требуется для контроля правильности подключения измерительного датчика тока к контролируемым цепям.

Пункт меню «Правка» служит для задания уставки по начальной составляющей активной мощности тока фидера  $I_F$ , которая возникает как из-за невозможности точной регулировки фазового фильтра всех внешних усилителей системы контроля изоляции, так и из-за наличия разъемной части электромагнитного датчика тока фидера. Она содержит некую активную составляющую тока фидера, обусловленную систематическим фазовым сдвигом, отличным от  $\pi/2$  при отсутствии активной составляющей утечки в контролируемой зоне (рис. 4.4). По действительной оси отложена составляющая 20 Гц вектора потенциала шин. При наличии паразитной емкости сильно распределенного фидера, составляющая 20 Гц полного тока контролируемого фидера  $I_{F1}$  будет на  $\pi/2$  опережать потенциал шин  $\varphi_S$ . Внешний усилитель сформирует выходной сигнал  $I_{F10}$ , пропорциональный реальному первичному току фидера. Сигнал  $I_{F1}$  не будет точно совпадать с первичным током по фазе в следствие неизбежных погрешностей.

На рис. 4.4а выделенный пунктиром контур 1 показывает вероятное положение вектора сигнала  $I_{F10}$  тока фидера. Углы вектора тока будут находиться в контуре 1. Этому току фидера будет соответствовать некая  $I_{FA0}$  активная составляющая относительно потенциала шин  $\varphi_S$ . Эта активная составляющая, обусловленная погрешностями, не является следствием наличия реальной активной утечки в первичной цепи контролируемого фидера.

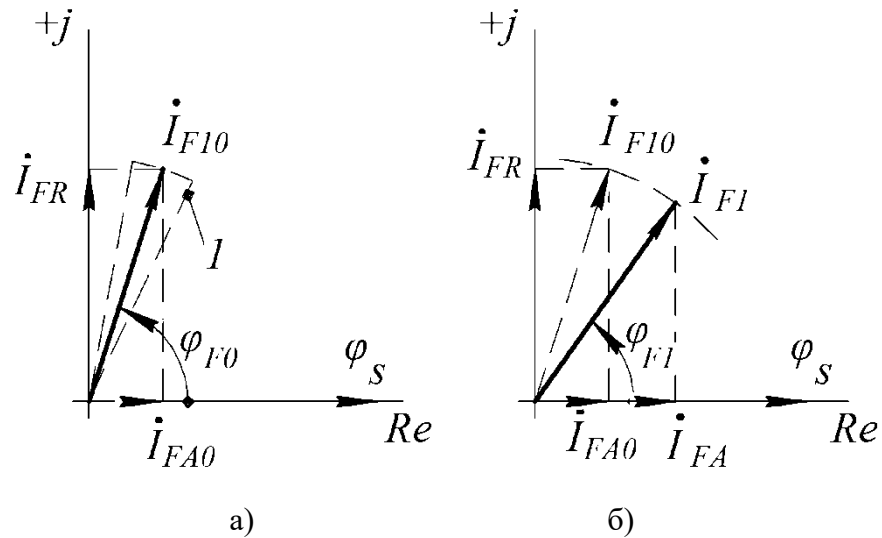


Рисунок 4.4 — Отстройка от начального значения сдвига фаз между потенциалом шин и током фидера:

- а) при отсутствии повреждения в контролируемой зоне;  
 б) при наличии повреждения в контролируемой зоне

Примем, что данной активной составляющей тока фидера соответствует некое несуществующее  $R_0$ , от которого будет произведена отстройка. По мнимой оси (рис. 4.4) отложена ортогональная составляющая сигналу потенциала шин  $\varphi_S$ , которая является его производной по времени [34]. Ток  $I_{FR}$  есть реактивная составляющая тока фидера, обусловленная паразитной емкостью на землю контролируемого присоединения.

При появлении активной утечки на землю в контролируемом фидере вектор реального первичного тока поворачивается в сторону потенциала шин и становится менее  $\pi/2$ , а вектор сигнала тока  $I_{F1}$  поворачивается в сторону сигнала  $\varphi_S$ . При большом сопротивлении утечки длина вектора  $I_{F1}$  не изменится. Произойдет приращение активной составляющей тока  $I_{F1}$ , которое будет обусловлено именно наличием внешней утечки.

Так осуществляется компенсация систематического разброса замеров скалярного произведения измерительных сигналов  $\varphi_S$  и  $I_{F1}$ , и выделение той составляющей которая обусловлена появлением активной утечки в контролируемой зоне.

Величина  $R_0$  хранится в микросхеме внешней памяти EEPROM, расположенной на плате вычислительного модуля. При пуско-наладочных работах величина  $R_0$  задается и корректируется в п.2 «Правка» основного меню. Величина  $R_0$  примерно вычисляется и показывается при вызове п.1 «Просмотр» основного меню.

#### 4.3. Методика наладки аналогового тракта терминала и внешнего усилителя

Как было указано выше (п. 3.2), аналоговый модуль состоит из трех каналов. По рассчитанным в главе 3 характеристикам функциональных звеньев, были разработаны принципиальные электрические схемы электронных модулей. Аналоговый тракт терминала выполнен в виде двухсторонней печатной платы, на которой находятся узлы всех трех каналов. Схемы аналогового тракта, внешнего усилителя, цифрового модуля приведены в приложении 1. Структурная схема, предназначенная для пояснения процесса наладки аналоговой платы терминала, приведена на рис. 4.5.

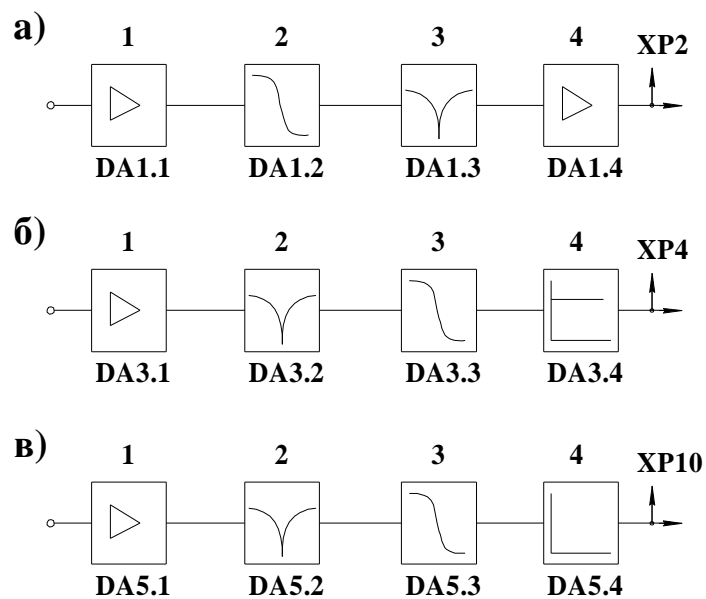


Рисунок 4.5 — Структурная схема аналогового блока:

а) канала тока  $I_F$ ; б) канала тока  $I_1$ ; в) канала  $P_{HI}$

За работу канала тока фидера IF отвечают каскады на ОУ DA1.1 – DA1.4; за канал налагаемого тока II - каскады на DA3.1 – DA3.4; за канал опорного напряжения PNI отвечают каскады на DA5.1 – DA5.4.

Для канала IF (рис. 4.5 а) обозначены следующие звенья: 1 – масштабный усилитель; 2 – ФНЧ с частотой среза 25Гц; 3 – режекторный фильтр с частотой подавления 50 Гц; 4 – выходной буферный каскад.

Для канала II (рис. 4.5 б) обозначены следующие звенья: 1 – масштабный усилитель; 2-режекторный фильтр с частотой подавления 50 Гц; 3 – ФНЧ с частотой среза 25Гц; 4 – фазовый фильтр.

Для канала PNI (рис. 4.5 в) обозначены следующие звенья: 1 – масштабный усилитель; 2 режекторный фильтр с частотой подавления 50 Гц; 3 – ФНЧ с частотой среза 25 Гц; 4 – фазовый фильтр.

На рисунке 4.5 обозначены контрольные точки выходов аналоговых каналов: XP2 – выход канала тока фидера; XP4 – выход канала контроля налагаемого тока; XP10 - выход канала контроля потенциала шин;

Для упрощения наладки составлена таблица 4.1, в которой по функциональным звенья указаны влияющие подстроечные резисторы, в соответствии с разработанной принципиальной схемой.

Таблица 4.1 — Обозначения элементов регулировки аналоговой платы

	Усиление масштабного усилителя	Частота подавления режекторного фильтра	Сдвиг фазы опорной частоты	Смещение постоянной составляющей
Канал IF	R2	R1, R12, R19	-	R21
Канал II	R26	R25, R33, R40	R39	R44
Канал PNI	R46	R49, R58, R59	R54	R66



В таблице 4.1 обозначены элементы принципиальной электрической схемы, ответственные за регулировку соответствующего электрического параметра звена.

Наладка производится в составе полностью собранного терминала.

#### **4.3.1. Рекомендуемый порядок наладки канала тока фидера**

1. Включить терминал. Выставить какой-либо номер канала (например 3).
2. Подключить через разъем RG45 (pin 8 – gnd; pin 4 - signal) в выбранный канал генератор ГЗ-112. Амплитуду установить 0.5 В, частоту 50 Гц. Подключить канал 1 осциллографа на выход генератора.
3. Поставить подстроечные резисторы R2, R19, R21 в среднее положение, R1 установить в нулевое сопротивление.
4. Поставить канал 2 осциллографа на переменную составляющую. Подключить канал 2 на XP2. Убедиться в наличии сигнала на XP2. Сигнал должен быть без ограничений и обрезаов по амплитуде. Если не так, то вращать R21 до устранения ограничения.
5. Подстраивая R12 и R19, добиться максимального подавления сигнала 50 Гц. Затем подстроив R1 добиться еще большего подавления. Выполнять данную операцию до максимального подавления сигнала 50 Гц.
6. Установить частоту генератора ГЗ-112 равную 20 Гц. Амплитуду 0.5 В.
7. Собрать схему (рис. 4.6).
8. Выставить на резисторе R1 с помощью сигнального генератора амплитуду 500 мВ.
9. Вращая R2 платы аналогового модуля добиться на XP2 амплитуду 1 В. Осциллограммы напряжений приведены на рис. 4.7.

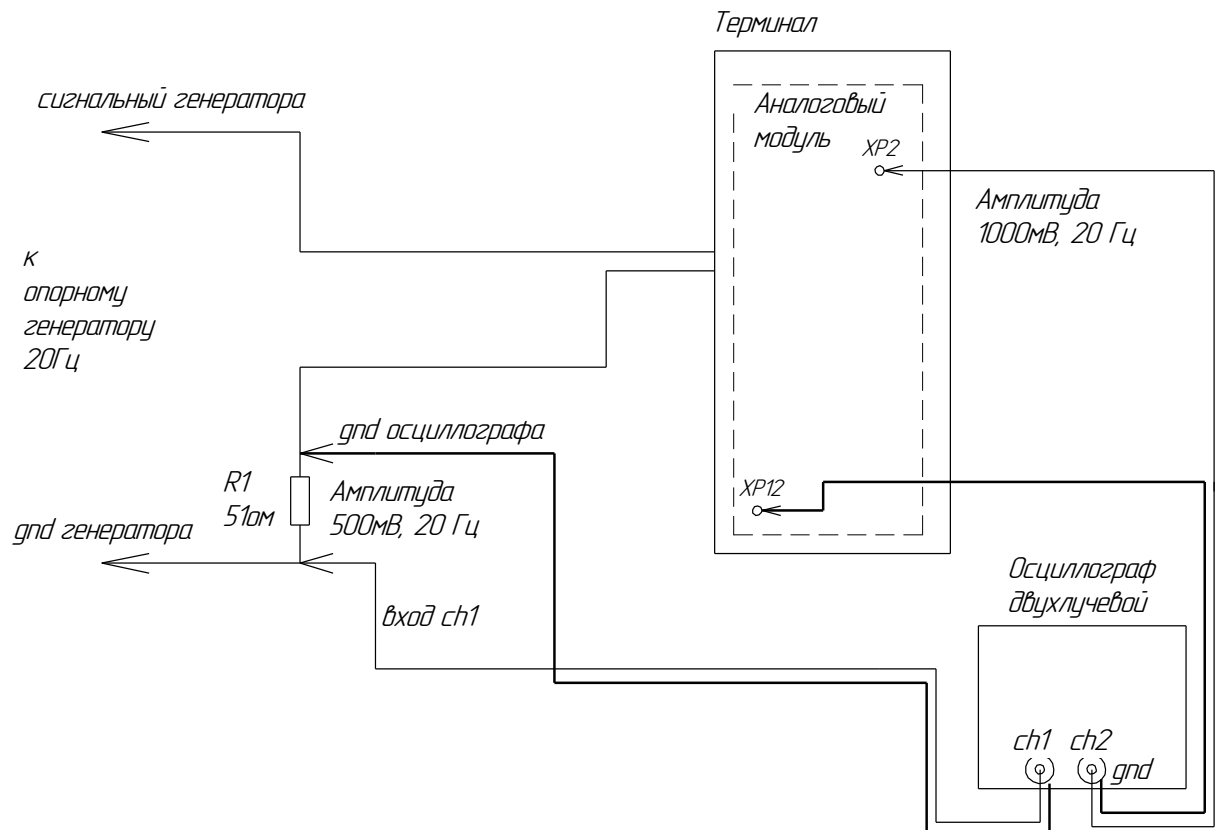


Рисунок 4.6 — Схема подключения приборов для наладки канала тока фидера терминала

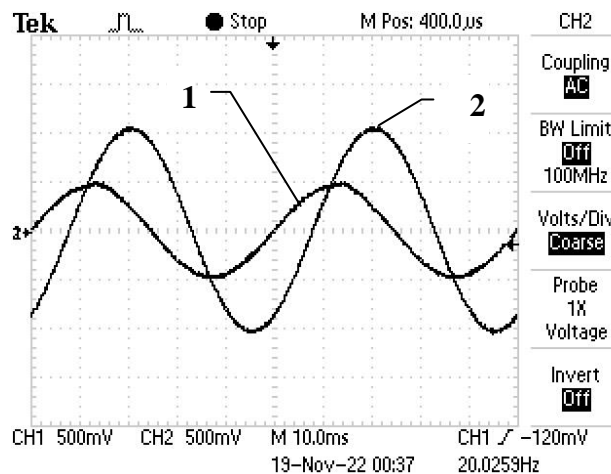


Рисунок 4.7 — Осциллограммы входного и выходного сигналов канала тока терминала при правильной наладке. 1 – напряжение на резисторе R1, соответствующее амплитуде входного тока 10 мА; 2 – выходное напряжение канала

10. Снять сигнал генератора ГЗ-112 со входа канала IF. Подстройкой R21 установить на XP2 постоянную составляющую 2.5 В. Настройка канала IF завершена.

### 4.3.2. Порядок настройки канала потенциала шин

1. Поставить подстроечные резисторы R46, R58, R59, R54 в среднее положение, R49 установить в нулевое сопротивление.
2. Подать на XT6 сигнал от ГЗ-112 частотой 50Гц, амплитудой 10В.
3. Подключить канал 1 осциллографа на выход генератора ГЗ-112, на канале 2 установить пропускание только переменной составляющей. Подключить канал 2 на XP10. Убедиться в наличии сигнала на XP10. Сигнал должен быть без ограничений и обрезаов по амплитуде. Если не так, то вращать R66 до устранения ограничения.
4. Подстраивая R58 и R59, добиться максимального подавления сигнала 50 Гц. Затем подстроив R49 добиться еще большего подавления. Выполнять данную операцию до максимального подавления сигнала 50 Гц.
5. Подключить к входу XT6 напряжение от опорного генератора 20Гц амплитудой 20 В.
6. Подстраивая R46 добиться амплитуды на XP10 (канал 2) равной 1 В (рис. 4.8).

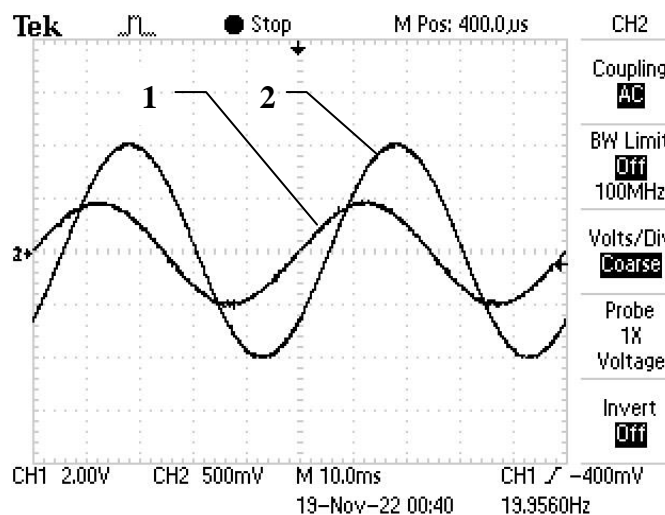


Рисунок 4.8 — Осциллограммы напряжений канала потенциала шин.  
1 – входной сигнал, соответствующий напряжению амплитудой 20 В,  
с ослаблением 1:10; 2 – выходное напряжение канала IF

7. Выполнить фазировку каналов потенциала шин РНІ и канала тока фидера ІF. Для этого подать напряжение от опорного генератора через резистор 2 кОм на вход выбранного канала ІF (рис. 4.9)

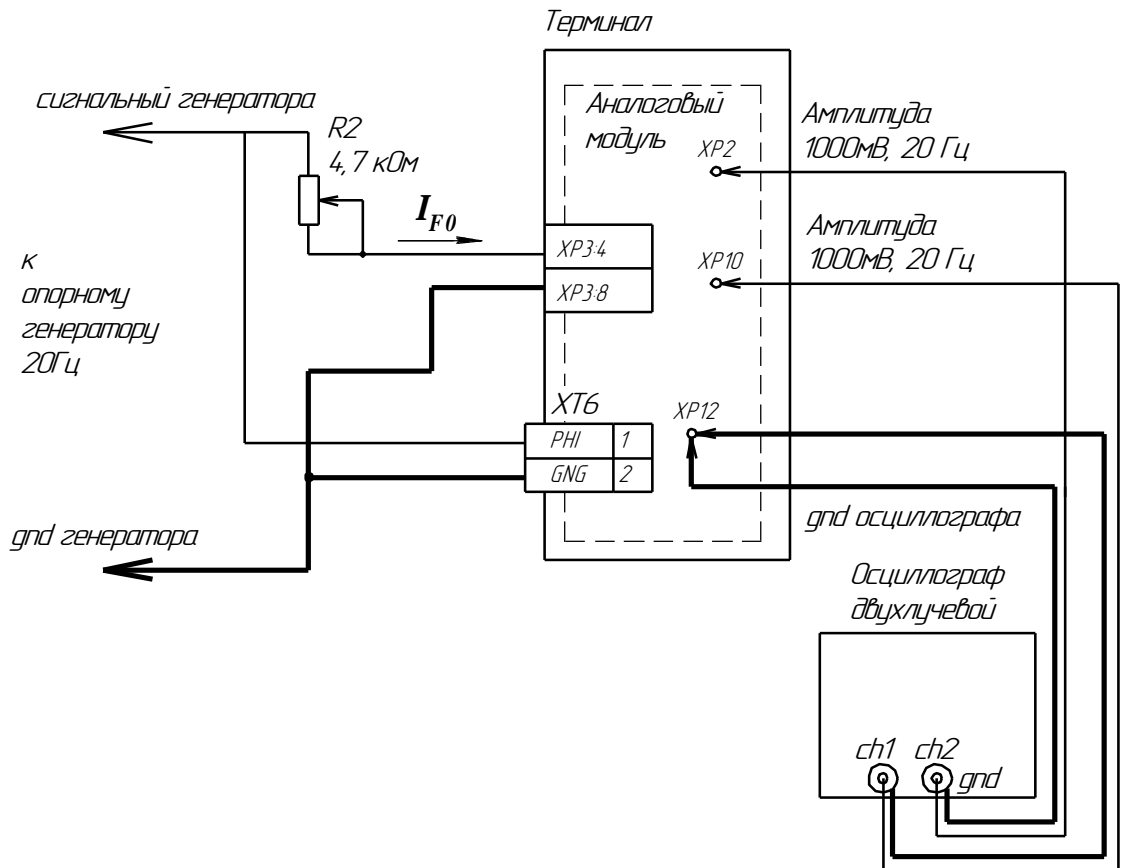


Рисунок 4.9 — Схема фазировки каналов потенциала шин и канала тока фидера

8. Вращая R54 аналоговой платы совместить сигналы XF2 и XF10 по фазе (рис. 4.10).
9. Снять сигнал генератора ГЗ-112 со входа канала РНІ. Подстройкой R66 установить на XF10 постоянную составляющую 2.5 В. Настройка канала РНІ завершена.

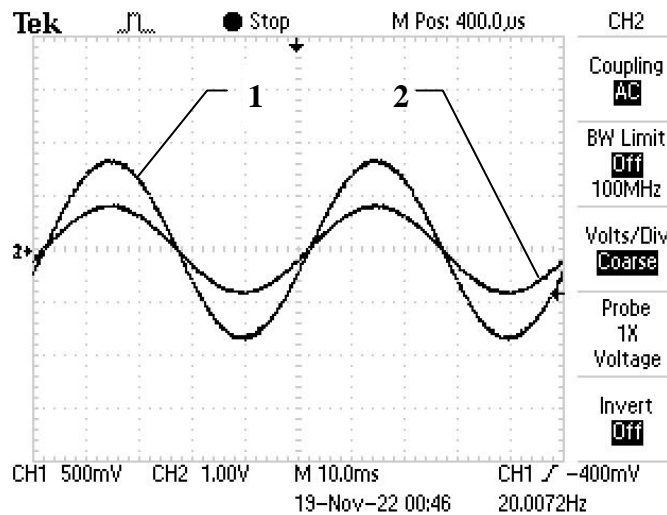


Рисунок 4.10 — Осциллограммы каналов тока фидера и канала потенциала шин при фазировки выходных напряжений. 1 – напряжение на выходе канала потенциала шин РН1; 2 – напряжение на выходе канала тока фидера IF

### 4.3.3. Порядок настройки канала налажаемого тока.

Собрать схему (рис. 4.11).

1. Поставить подстроечные резисторы R26, R33, R40, R39 в среднее положение, R25 установить в нулевое сопротивление.
2. Подать на ХТ6 сигнал от ГЗ-112 частотой 50Гц, амплитудой 10В.
3. Подключить канал 1 осциллографа на резистор R1. На канале 2 установить пропускание только переменной составляющей. Подключить канал 2 на ХР4. Убедиться в наличии сигнала на ХР4. Сигнал должен быть без ограничений и обрывов по амплитуде. Если не так, то вращать R44 до устранения ограничения.
4. Подстраивая R33 и R40, добиться максимального подавления сигнала 50 Гц. Затем подстроив R25 добиться еще большего подавления. Выполнять данную операцию до максимального подавления сигнала 50 Гц.
5. Установить частоту генератора ГЗ-112 равную 20 Гц. Амплитуду 8 В. Это будет соответствовать току 100 мА на входе канала П1 аналогового модуля.

6. Подстраивая R26 добиться амплитуды на XP4 (канал 2) равной 0.4 В (рис.4.12).

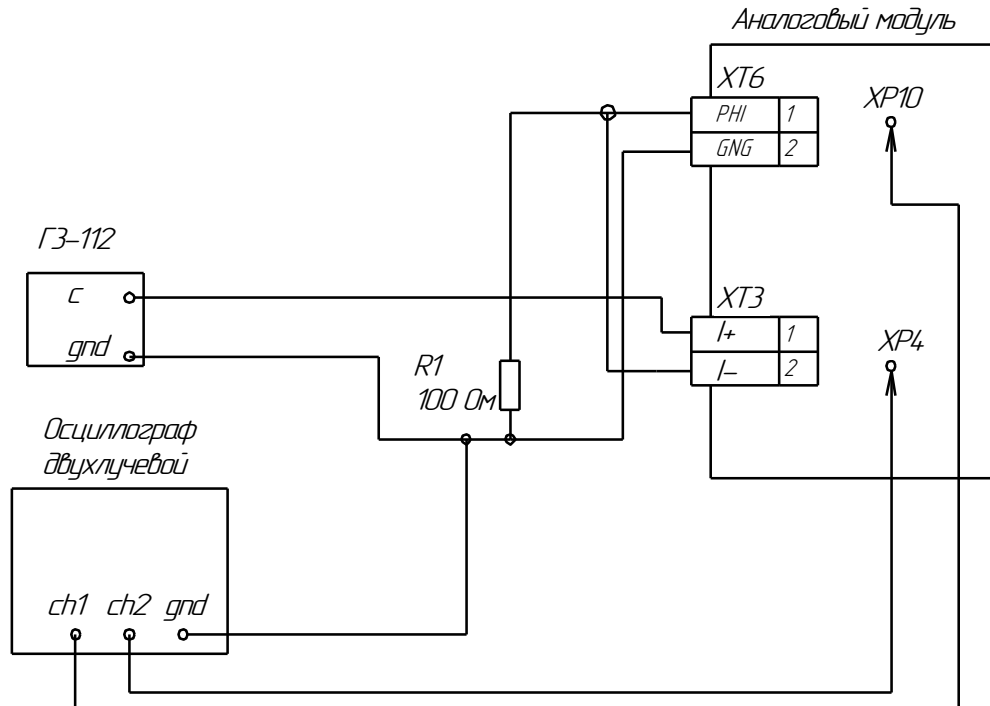


Рисунок 4.11 — Схема для настройки канала налагаемого тока

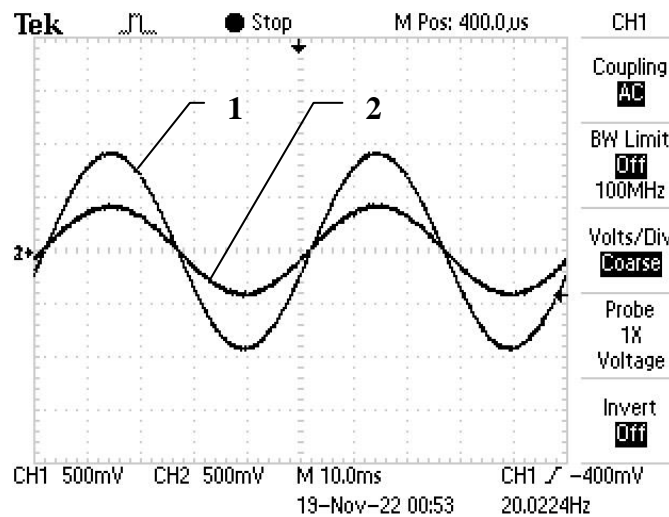


Рисунок 4.12 — Осциллограммы сигналов напряжений на выходах каналов терминала при правильной регулировке:

1 – напряжение на выходе канала потенциала шин;

2 – напряжение на выходе канала налагаемого тока

7. Снять сигнал генератора ГЗ-112 со входа канала II. Подстройкой R44 установить на ХР4 постоянную составляющую 2.5 В.

Настройка канала налагаемого тока II завершена.

#### 4.3.4. Порядок настройки внешнего усилителя

Внешние усилители настраиваются независимо от терминала и опорного генератора. В качестве сигнального генератора используется ГЗ-112. Для настройки необходимо собрать схему (рис. 4.13).

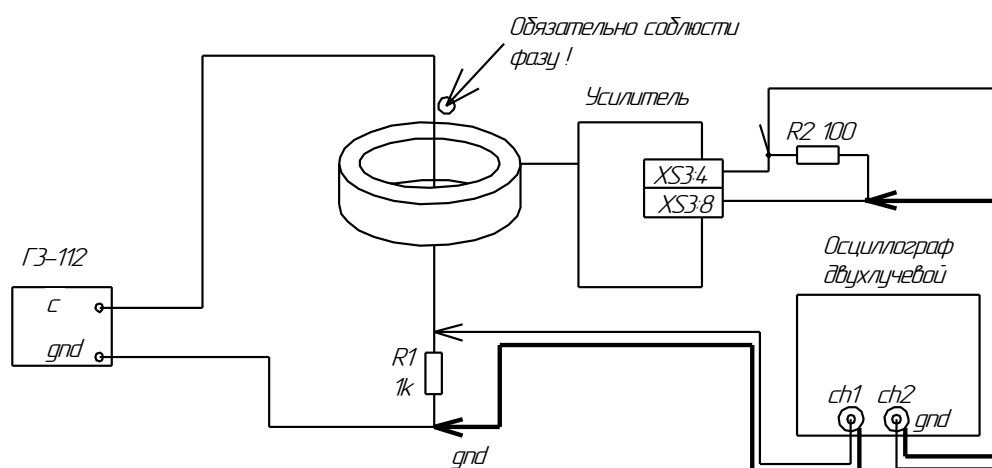


Рисунок 4.13 — Схема для настройки внешнего усилителя

1. Поставить подстроечные резисторы R24, R19, R29, R30, R33 в среднее положение, R12 установить в нулевое сопротивление.
2. Подать на R1 сигнал от ГЗ-112 частотой 50Гц, амплитудой 10В.
3. Нагрузить выход усилителя на сопротивление 100 Ом (pin4-pin8 XS3 рис. 4.13). Подключить канал 2 на выход усилителя. Убедиться в наличии сигнала на нагрузочном резисторе R2 (рис. 4.13). Сигнал должен быть без ограничений и обрывов по амплитуде. Если не так, то вращать R33 до устранения ограничения.

4. Подстраивая R19, R30, добиться максимального подавления сигнала 50 Гц. Затем подстроив R12 добиться еще большего подавления. Выполнять данную операцию до максимального подавления сигнала 50 Гц.
5. Установить частоту генератора ГЗ-112 равную 20 Гц. Амплитуду 1 В. Это будет соответствовать току 1 мА на входе усилителя.
6. Подстраивая R29, добиться амплитуды 0.1 В (на сопротивлении R2 100 Ом).
7. Подстраивая R24, добиться совпадения фаз сигналов на резисторе R1 и R2 (рис. 4.14). Осциллограммы напряжений, пропорциональных входному и выходному токам внешнего усилителя приведены на рис 4.14.

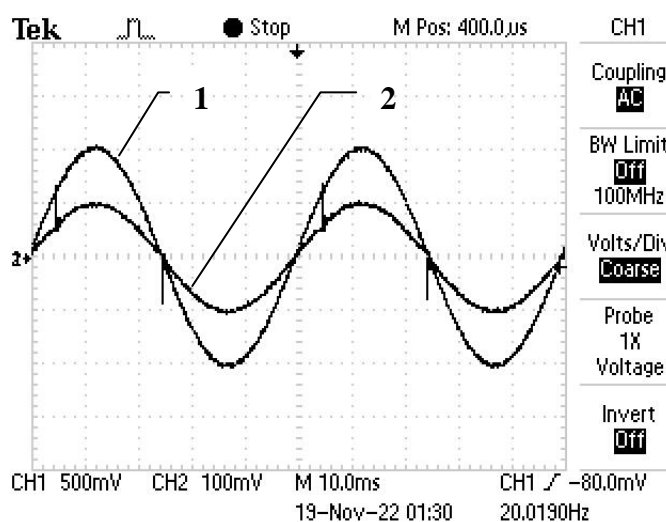


Рисунок 4.14 Осциллограммы сигналов внешнего усилителя.

- 1 – сигнал пропорциональный входному току;
- 2 – сигнал пропорциональный выходному току.

После наладки пометить направление датчика тока в сторону источника. Снять первичный ток с датчика тока, разомкнув цепь резистора R1. Регулировкой R33 выставить нулевое напряжение на нагрузочном резисторе R2. На этом настройка внешнего усилителя завершена.



### 4.3.5. Проверка правильности настройки

Далее подключаем канал 1 осциллографа на ХР10 аналогового модуля, канал 2 на ХР2 аналогового модуля. Земляной осциллографа на ХР12. Подключаем (к каналу 3 терминала) усилитель. Подключаем собственный генератор 20 Гц.

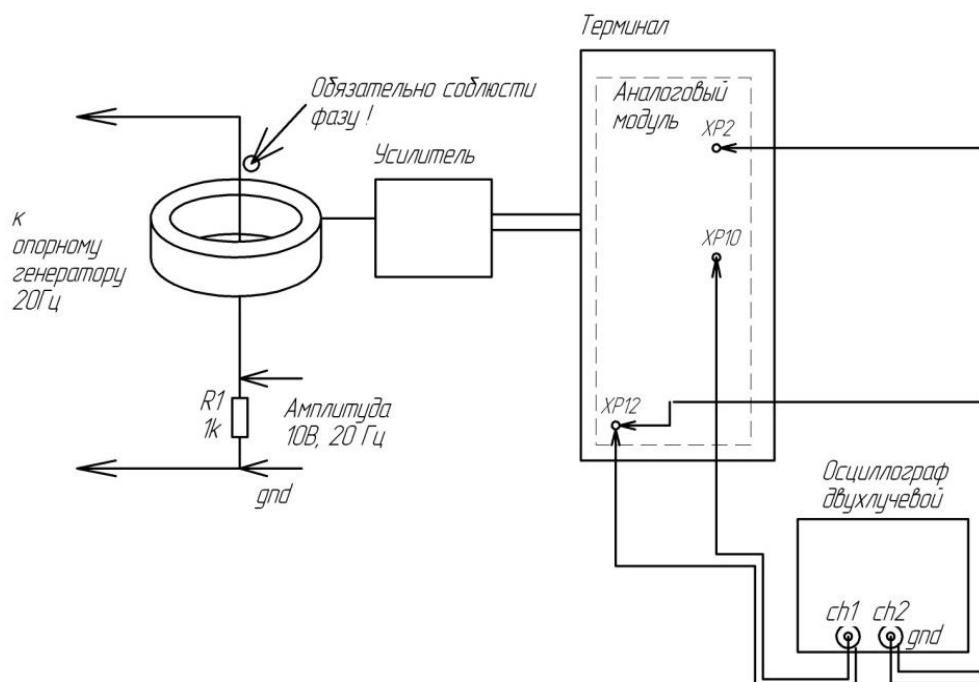


Рисунок 4.15 — Схема проверки правильности регулировки каналов терминала и внешнего усилителя

При одинаковой чувствительности каналов сигналы ХР10 и ХР2 должны совпасть.

## 4.4 Методика испытаний устройства контроля изоляции присоединений ЩПТ

Терминал устройства и генератор опорной частоты 20 Гц работает от сети переменного тока 220 В. Потребление терминала не более 20 Вт. Потребляемая

мощность генератора зависит от емкости ЩПТ и не превышает 50 Вт. Внутренняя компоновка макета генератора представлена на рис. 4.16.

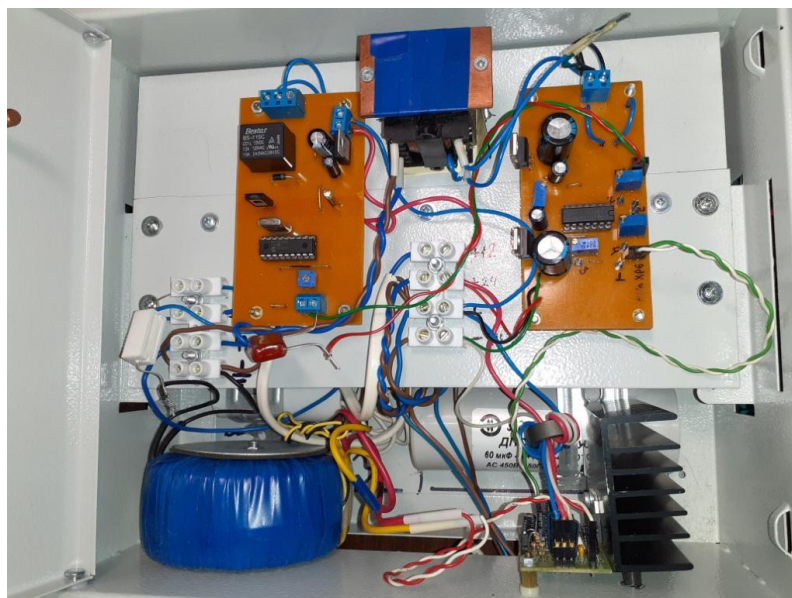


Рисунок 4.16 — Компоновка генератора опорного сигнала 20 Гц системы контроля изоляции

На рис. 4.16 показана возможная компоновка генератора опорной частоты в стандартном металлическом щитке фирмы ИЕК. На плате слева смонтирован ШИМ-контроллер, на плате справа регулятор напряжения.

#### 4.4.1 Проверка работоспособности генератора опорной частоты 20 Гц

Генератор опорной частоты может быть проверен отдельно от терминала. На емкостной нагрузке 50 мкФ генератор должен обеспечить синусоидальное напряжение 20 Гц амплитудой 20 В. В наладке нуждается только регулятор напряжения генератора. Генератор опорной частоты является отдельным устройством, которое смонтировано в стандартном металлическом корпусе. Генератор имеет свой стационарный кабель питания 220В. Так же для связи с терминалом имеется 4-х контактный разъем. Выходами генератора являются 3 проводника : «+Ш», «-Ш» и «GND». Проводники «+Ш» и «-Ш» соединяются с

шинами ЩПТ. Проводник маркированный «GND» подключается к контуру заземления щита.

#### 4.4.2. Проверка работоспособности терминала

После монтажа устройства следует убедиться в его работоспособности. Необходимо соединить терминал, генератор и один внешний усилитель как показано на рис. 4.17.

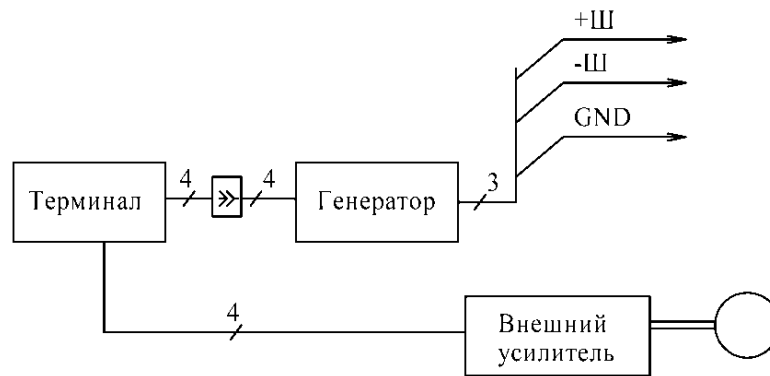


Рисунок 4.17 — Схема соединения блоков устройства контроля изоляции

На данной стадии, достаточно убедиться в работоспособности пропустив шинки «+Ш» и «-Ш» соединив их вместе и пропустив через датчик тока и включив активное или емкостное сопротивление на шинку GND.

#### 4.5. Лабораторное испытание системы контроля изоляции

Собрать схему стенда, соответствующую модели ЩПТ с сосредоточенными параметрами (рис. 4.18).

Соединить разъем генератора опорного сигнала с соответствующим разъемом терминала. Соединить выходы +Ш и – Ш генератора опорного сигнала с клеммами X8 и X9 соответственно.

Присоединить кабелем «витая пара» выход внешнего усилителя к входу какого-либо входа на кассете входного коммутатора.

Соединить двойным проводом разъемы стенда X1-X3 и X2-X4 соответственно. На этом шлейфе требуется закрепить разъемный датчик тока, началом в сторону разъемов X1-X2 (рис. 4.18).

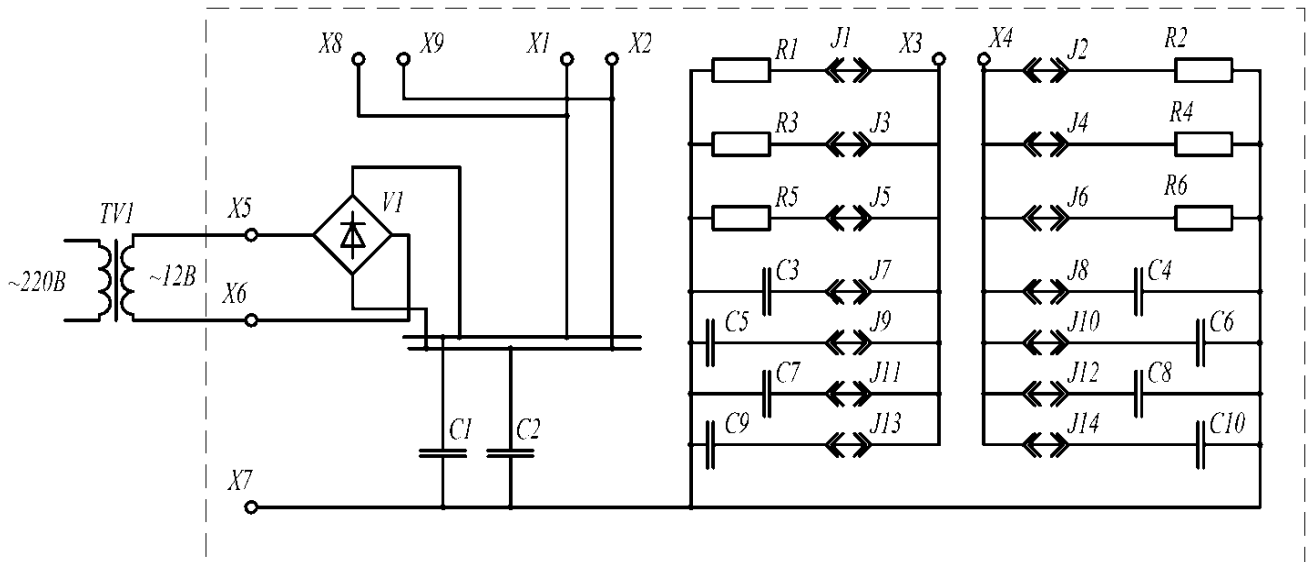


Рисунок 4.18 — Схема для лабораторного испытания устройства контроля изоляции ЦПТ

Схема соединений для подключения испытательного стенда приведена на рис. 4.19. Испытательный стенд изображен пунктиром.

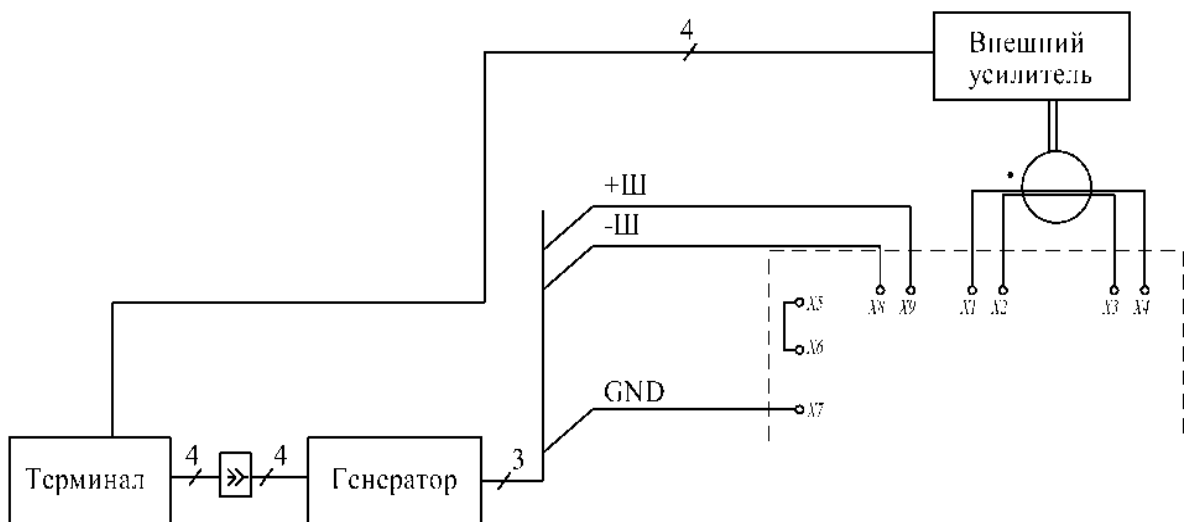


Рисунок 4.19 — Схема подключения системы контроля изоляции к испытательному стенду

Включить питание терминала, затем питание генератора опорного сигнала. Включить питание стенда с помощью трансформатора TV1.

С помощью осциллографа выставить регулятором напряжения генератора опорной частоты 20 Гц напряжение 15 В амплитудного значения.

Моделирование различных режимов проводится изменением состояния переключателей J1-J14.

Работа устройства предполагает неизменный состав потребителей фидера, следовательно, величина паразитной емкости так же будет неизменной. При проведении лабораторных испытаний следует переключателями J7-J14 установить нужное значение емкости, чтобы они были одинаковые у обоих полюсов.

После включения устройства следует дождаться окончания тестирования индикации. Затем следует перейти в основное меню, удерживая клавишу «#» и дождавшись звукового сигнала клавишу отпустить (рис 4.20).



Рисунок 4.20 - Вход в основное меню

Следует перейти в меню просмотр, нажав «1» и дождавшись звукового сигнала отпустить клавишу.

В режиме просмотра (рис 4.21) вычисляются и выдаются на дисплей параметры, рассчитанные по единственному замеру. В этом режиме индицируются уровни квадрата нормы потенциала шин, рассчитанное рекомендуемое значение  $R_0$ , от которого будет производиться отстройка по

величине сигнальной активной мощности. Следует провести несколько замеров и выбрать среднее значение.

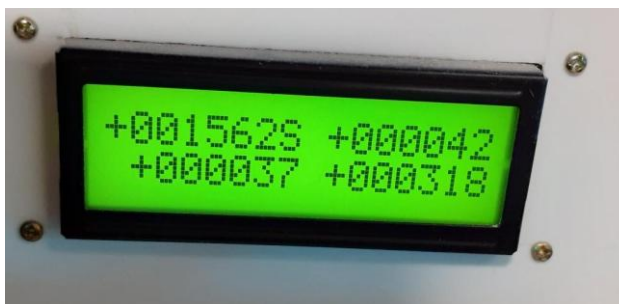


Рисунок 4.21 — Работа в режиме просмотра

Затем следует нажать и удерживать клавишу «\*» до звукового сигнала выйти из режима просмотра в основное меню. Нажать клавишу «2» до звукового сигнала следует зайти в режим «правка». На индикаторе появится сохраненное ранее значение  $R_0$  в килоомах. Далее следует нажать клавишу «1» для редактирования уставки  $R_0$ . Появится знак «=» и мигающий курсор. Следует ввести ранее выбранное значение сопротивление  $R_0$  с учетом знака. Знаку «+» соответствует символ «A», знаку «-» соответствует символ «D». После ввода нажать клавишу «#», либо откорректировать ошибочно введенное значение, нажав клавишу «\*».

При окончании ввода следует выбрать действие «#» - введенное значение сохраняется в EEPROM, либо «\*» - отмена изменения и вход в меню редактирования.

Затем следует нажатием клавиши «\*» выйти в основное меню. Повторное нажатие приводит к выходу из основного меню и входу в рабочий режим (рис. 4.22).



Рисунок 4.22 — Дисплей в рабочем режиме  
при отсутствии повреждения

Самым сложным для обнаружения является режим, соответствующий наличию активной утечки 20 кОм в зоне у сильно распределенного фидера. Моделирование повреждения в зоне контролируемого фидера производится включением перемычек J1 или J2. При этом к полюсам системы подключаются резисторы, величиной в 20 кОм.

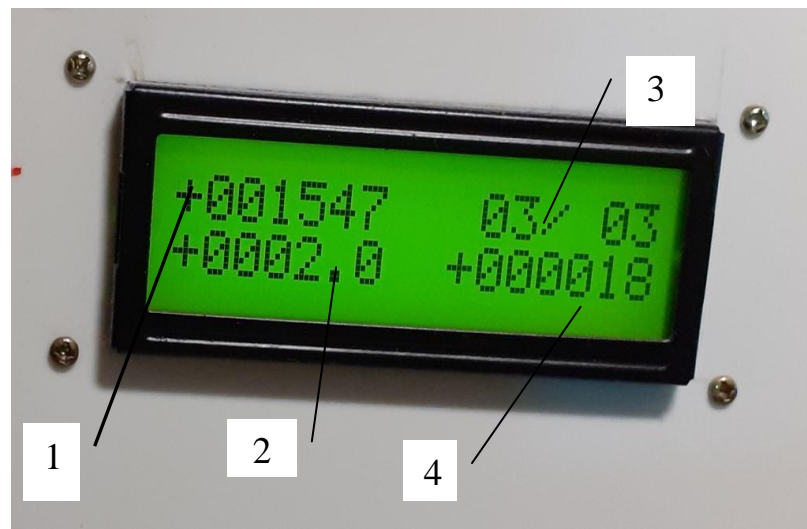


Рисунок 4.23 — Дисплей в рабочем режиме и при наличии повреждения  
1 – Квадрат нормы потенциала шин; 2 – вычисленное сопротивление в кОм;  
3 – номер текущего и поврежденного фидера; 4 – Скалярное произведение  
налагаемого тока и тока фидера

На дисплее (рис. 4.23) отображены 1- квадрат нормы потенциала шин в о.е.,  
2- сопротивление утечки, кОм, 3-номера каналов текущего и зафиксированного

поврежденного фидера, 4 – скалярное произведение тока II налагаемого на ЩПТ и тока контролируемого фидера IF.

Указанным (рис. 4.22 и 4.23) режимам соответствуют осциллограммы выходных напряжений каналов РНІ (кривая 1) и IF (кривая 2) приведены на рис. 4.24-4.25.

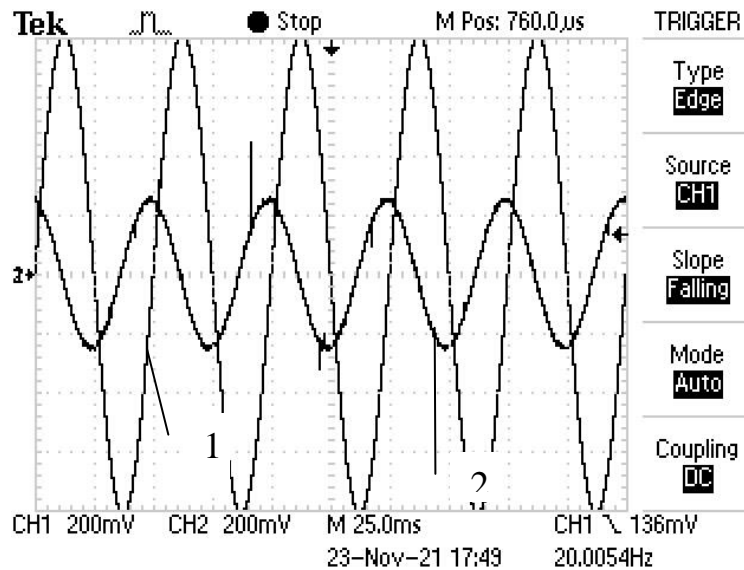


Рисунок 4.24 — Осциллограммы сигналов выходов каналов РНІ и IF при CF – 2.2 мкФ  
1 – сигнал выхода канала РНІ, 2 – сигнал выхода канала налагаемого тока II.

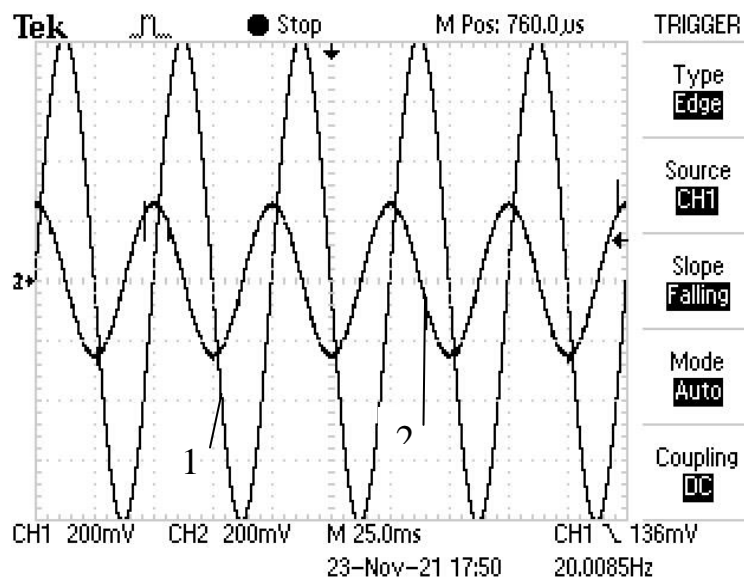


Рисунок 4.25 — Осциллограммы сигналов выходов каналов РНІ и IF при CF – 2.2 мкФ и наличии активной утечки 20 кОм в зоне контролируемого фидера.

1 – сигнал выхода канала РНІ, 2 – сигнал выхода канала налагаемого тока II.



Приведенные на рис 4.24-4.25 осциллограммы показывают, что при отсутствии повреждения и при наличии осциллограммы визуально неразличимы. Однако рассмотренные в гл.3 алгоритмы обработки позволяют однозначно указать поврежденный фидер.

#### 4.6. Испытание устройства контроля изоляции на объектах электроэнергетики

Монтажные работы, необходимые для подключения к находящемуся в работе щиту оперативного постоянного тока, не требуют отключения отходящих присоединений и действующего силового оборудования. Это достигнуто применением в устройстве контроля изоляции разъемного датчика тока, что является достоинством по сравнению с системами аналогичного предназначения. Конструкция внешнего усилителя и разъемного датчика тока приведены на рис. 4.26.



Рисунок 4.26 — Вид внешнего усилителя и разъемного датчика тока

Изображенный на рис. 4.26 датчик тока имеет стяжку стандартными монтажными хомутами и должен обхватывать оба полюса отходящего присоединения. Темная маркировка указывает сторону, направленную к шинам контролируемого ЩПТ. Пример установки датчика тока и усилителя показан на рис. 4.27.

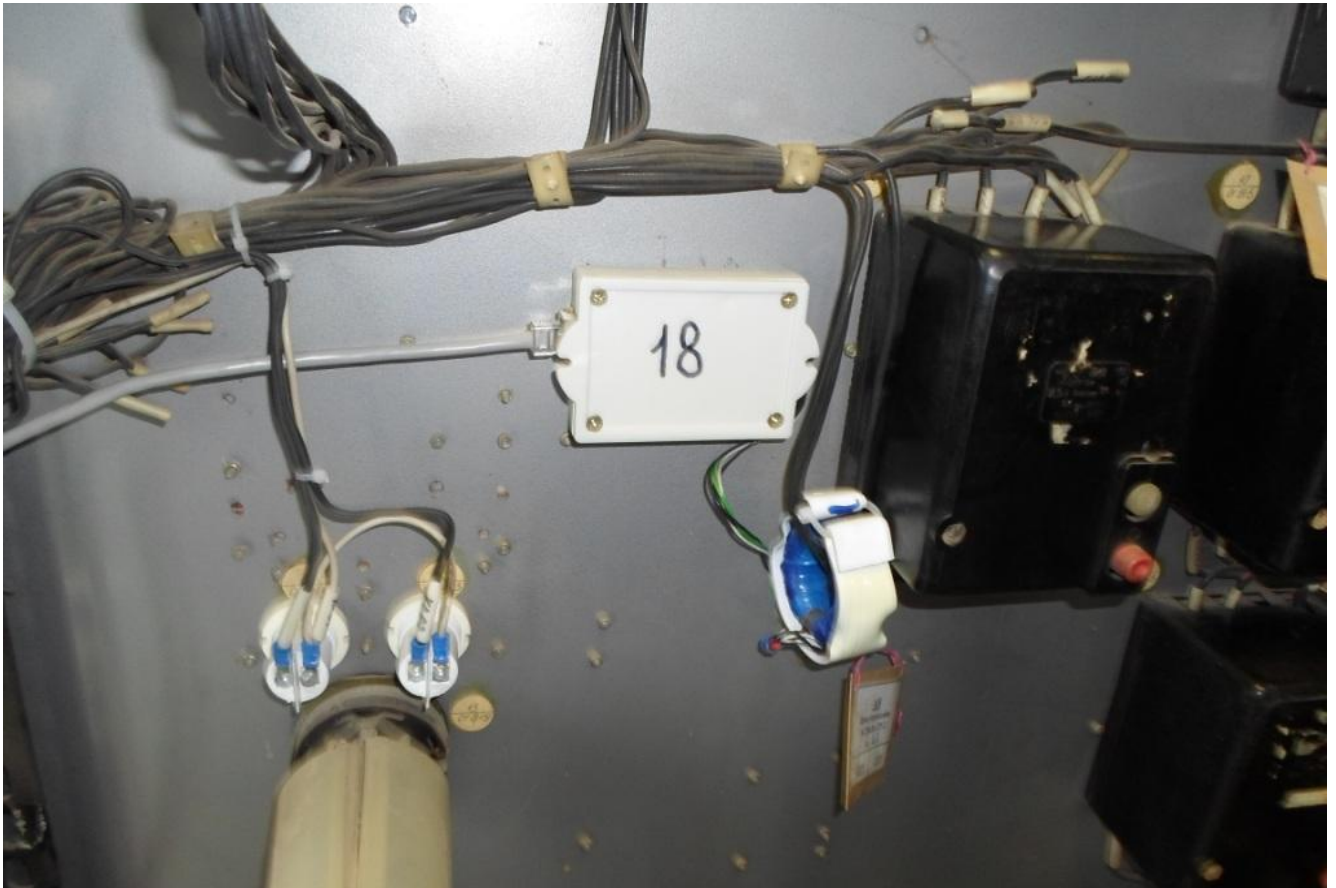


Рисунок 4.27 — Установка внешнего усилителя и электромагнитного датчика тока на реальном энергообъекте

Фрагмент схемы реального ЩПТ энергообъекта с местами подключения генератора опорного сигнала 20 Гц и двух опытных внешних усилителей приведена на рис. 4.28.

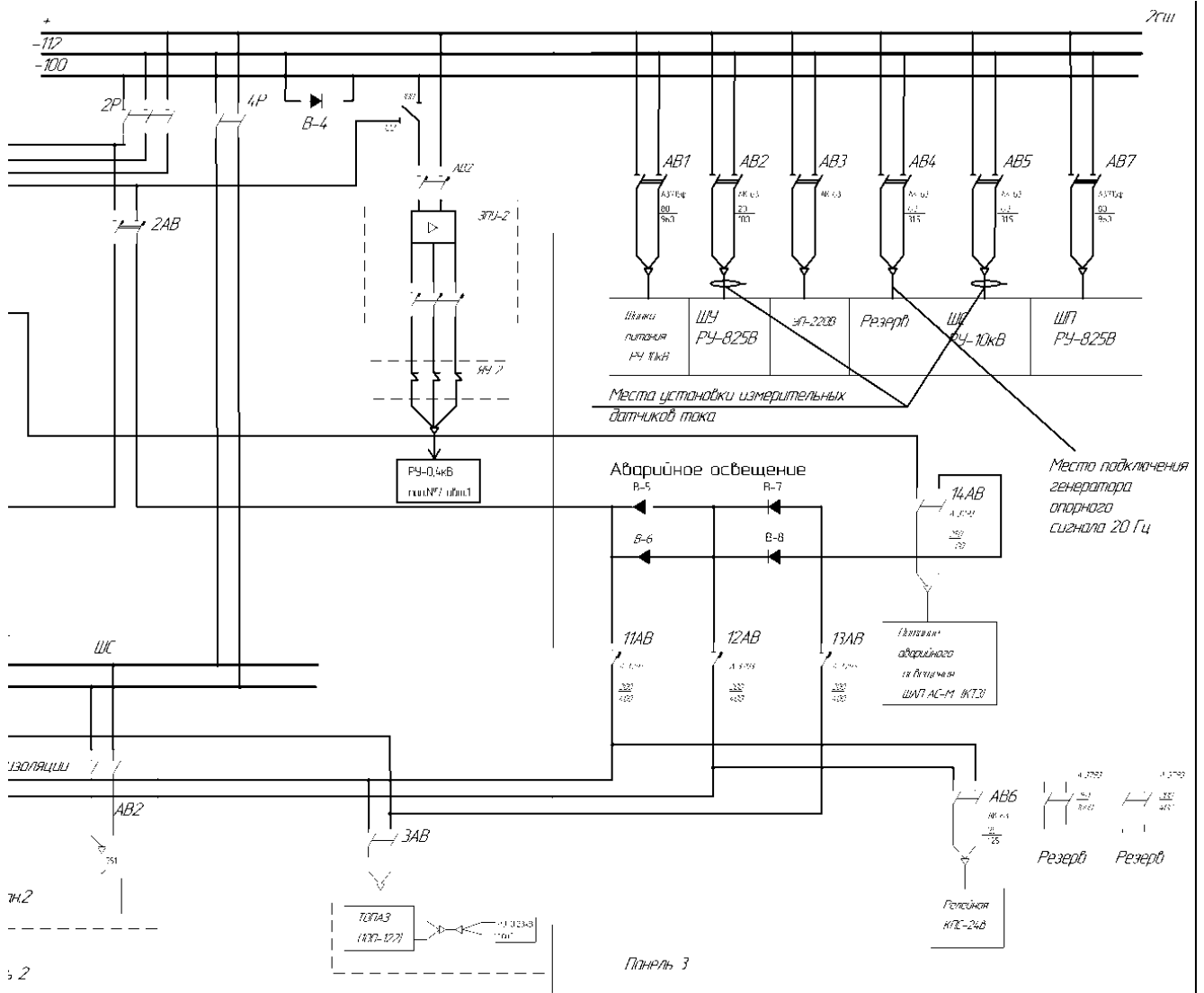


Рисунок 4.28 — Подключение системы контроля изоляции на землю в ЩПТ

Как было указано выше, подключение не потребовало обесточивания контролируемых в опыте фидеров. Электрическая схема подключения для проведения опыта замыкания на отходящих присоединениях ЩПТ «ШУ РУ-825В» и «ШС РУ-10кВ» приведены на рис. 4.29.

В схеме на рис. 4.18 включение автоматов осуществляется в порядке SF1, SF2, не менее чем через 2 секунды SF3. Только после этого можно подавать питание на генератор и терминал.

Осциллограммы сигналов с выходов аналоговых каналов терминала устройства приведены на рис.4.30 – 4.34.

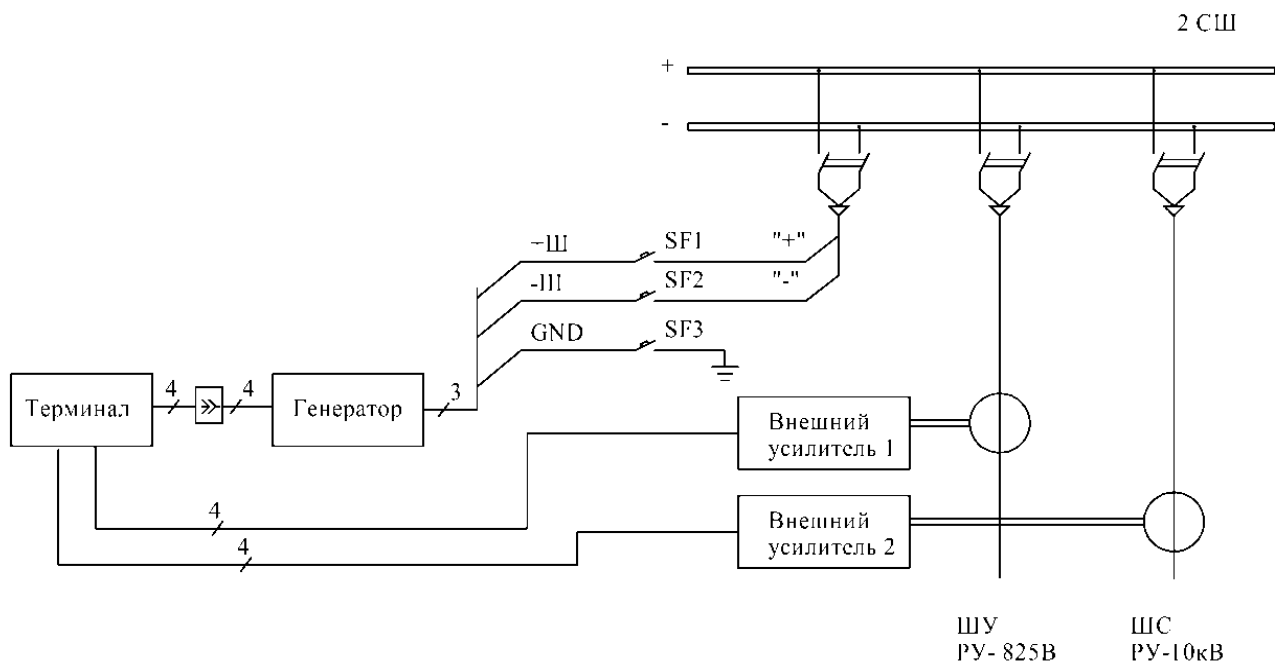


Рисунок 4.29 — Электрическая схема подключения устройства контроля изоляции на землю ЩПТ для моделирования повреждений на землю присоединений

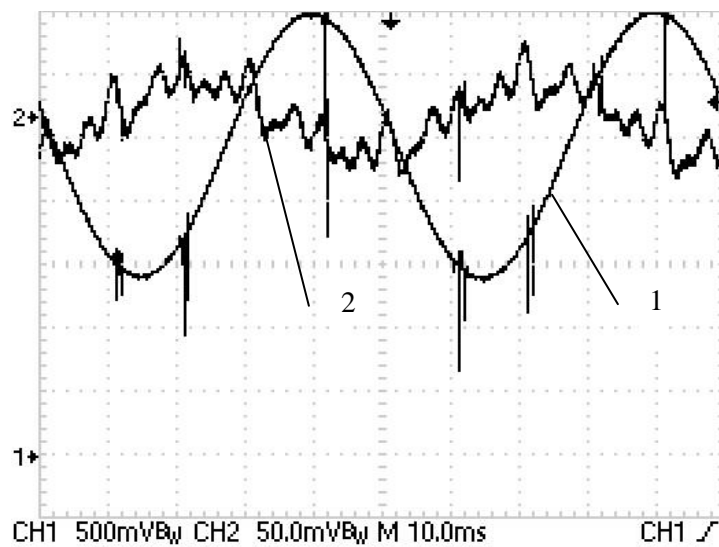


Рисунок 4.30 — Осциллограммы выходов аналоговых каналов РНИ и IF при наложении опорного сигнала и отсутствии утечки для фидера «ШС РУ-10кВ» 1 – сигнал выхода канала РНИ, 2 – сигнал выхода канала тока IF

Как видно из рис. 4.30, при наложении на щит постоянного тока внешнего опорного сигнала, в случае обладания фидером значительной паразитной

емкостью на землю, в сигнале выхода канала IF, будут помимо составляющей 20 Гц иметь место значительные помехи высших гармонических составляющих.

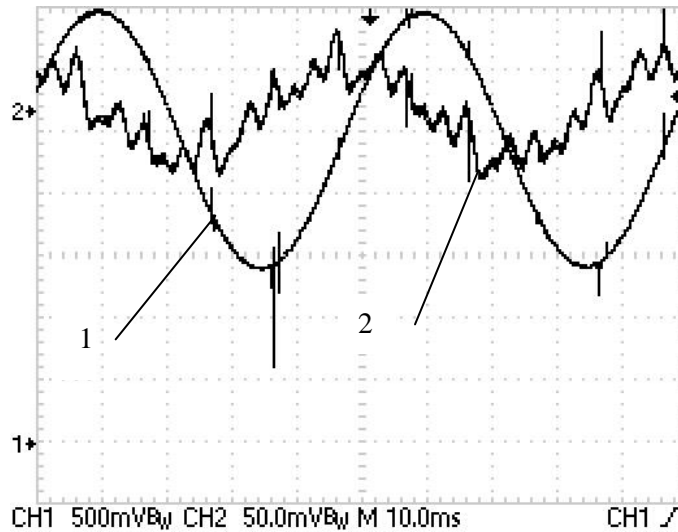


Рисунок 4.31 — Осциллограммы выходов аналоговых каналов РНІ и ІF при наложении опорного сигнала для фидера «ШС РУ-10кВ» при наличии утечки 20 кОм в зоне фидера и 4.3 кОм вне зоны. 1 – сигнал выхода канала РНІ, 2 – сигнал выхода канала тока ІF

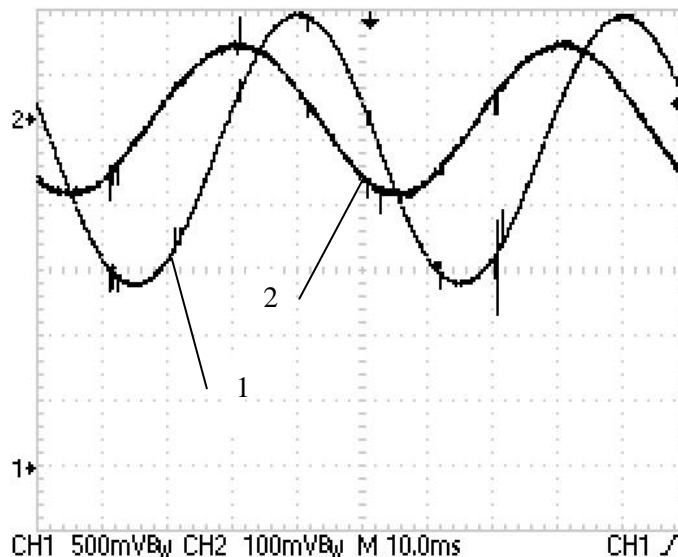


Рисунок 4.32 — Осциллограммы выходов аналоговых каналов РНІ и ІF при наложении опорного сигнала для фидера «ШУ РУ-825В» при наличии утечки 4.3 кОм в зоне фидера и 20 кОм вне зоны. 1 – сигнал выхода канала РНІ, 2 – сигнал выхода канала тока ІF

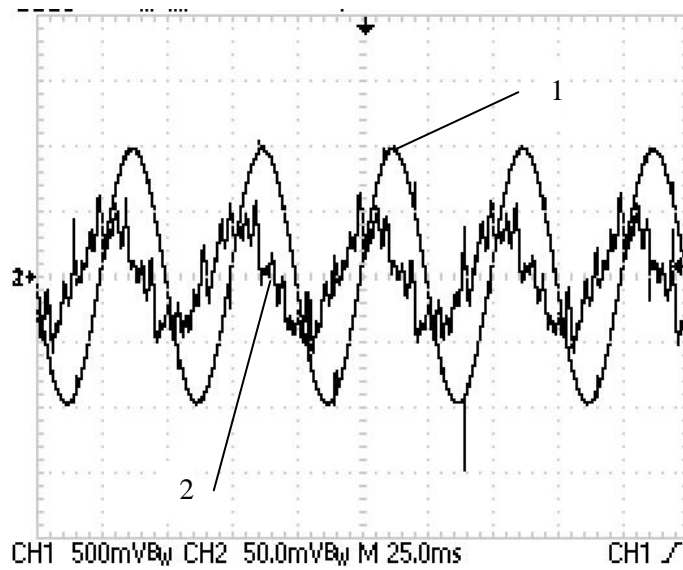


Рисунок 4.33 — Осциллограммы выходов аналоговых каналов РНІ и ІF при наложении опорного сигнала для фидера «ШС РУ-10кВ» при наличии утечки 20 кОм в зоне фидера и металлического замыкания вне зоны. 1 – сигнал выхода канала РНІ, 2 – сигнал выхода канала тока ІF

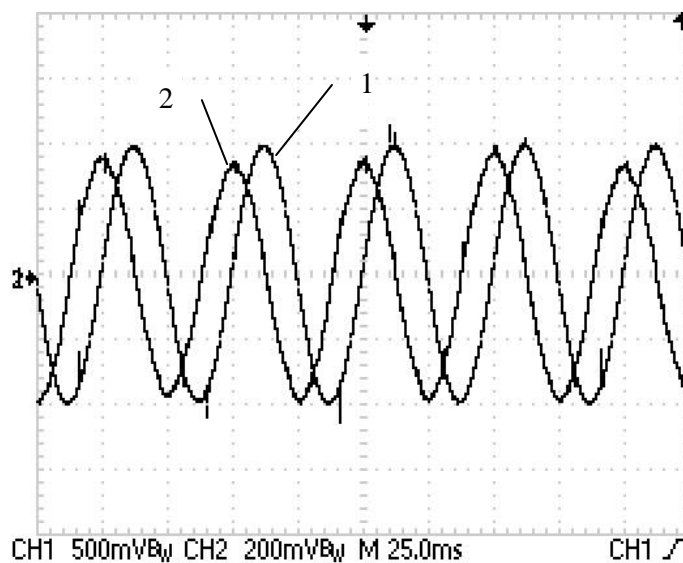


Рис 4.34. Осциллограммы выходов аналоговых каналов РНІ и ІІ при наличии металлического замыкания на землю в ЩПТ. 1 – сигнал выхода канала РНІ, 2 – сигнал выхода канала налагаемого тока ІІ

Как показывает эксперимент, сигнал тока  $I_F$  сильно распределенного фидера подвержен наводкам, возникающим из-за протяженности контролируемого участка. Дополнительные помехи дает выпрямительно-подзарядный агрегат, создающий помехи при выпрямлении и имеющий блокировочные емкости между полюсами и землей.

### **Выводы по 4 главе**

1. В соответствии с рассмотренной моделью устройства контроля изоляции присоединений ЩПТ был разработан алгоритм функционирования основной управляющей программы вычислительного модуля, была написана программа на языке высокого уровня С.

2. Созданы прототипы терминала устройства контроля изоляции на землю оперативных цепей постоянного тока и генератора опорного сигнала. Для работы устройства контроля изоляции был создан разъемный датчик тока, обеспечивший приемлемую точность работы системы контроля изоляции в широком диапазоне емкостей контролируемого фидера от 0 до 5 мкФ на присоединение.

3. Проведенные лабораторные и практические испытания созданного устройства показали работоспособность в реальных электротехнических комплексах в условиях сложной электромагнитной обстановки уверенно обнаруживалась активная утечка 20 кОм в зоне контролируемого фидера.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработана схема замещения для селективного контроля изоляции щита постоянного оперативного тока, основанного на наложении внешнего опорного напряжения, не вносящего помех в работу других устройств, вне зависимости от режима работы щита и не способного вызвать ложную работу защит.

Установлены следующие параметры внешнего опорного напряжения: синус амплитудой 20 В частотой 20 Гц.

2. Разработана математическая модель функционирования устройства пофидерного контроля изоляции в цепях постоянного оперативного тока, основанная на приведенных описаниях функциональных звеньев, как непрерывных линейных моделей, позволяющая селективно определить повреждение изоляции на землю величиной 20 кОм и ниже, вне зависимости от системных параметров контролируемого щита.
3. Разработана динамическая модель датчика тока для устройства контроля изоляции цепей постоянного оперативного тока, включающая в себя рабочую и компенсационную обмотку как линейное непрерывное звено.
4. Создан прототип измерительного датчика тока, позволяющий подключаться к действующим цепям постоянного оперативного тока без отключения и обеспечивающий гальваническую развязку с входными цепями устройства контроля, способный на частоте 20 Гц фиксировать малые токи амплитудой до 50 мкА.
5. Создан прототип устройства контроля изоляции цепей постоянного оперативного тока, имеющий составные части: генератор опорного сигнала, датчики тока и цифровой терминал. Разработана методика настройки аналоговой части прототипа устройства.
6. Для цифровой части терминала разработан алгоритм и написана программа на высокоуровневом языке, выполняющая необходимые арифметические и логические операции.
7. Созданное устройство успешно протестировано в электротехнических комплексах на объектах энергетической и транспортной инфраструктуры.



**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.40.262-2018. / Руководство по проектированию систем оперативного постоянного тока (СОПТ) ПС ЕНЭС. Типовые проектные решения, утвержденное приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 18.12.2018 № 476.
2. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.40.102-2011 / Методические указания по инженерным расчетам в системах оперативного постоянного тока для предотвращения неправильной работы дискретных входов микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, при замыканиях на землю в цепях оперативного постоянного тока подстанций ЕНЭС, утвержденные приказом ОАО "ФСК ЕЭС" от 11.10.2011 N 619.
3. РД 34.50.502-91 [Электронный ресурс]. – режим доступа <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294844/4294844790.pdf> (дата обращения 20.01.2022)
4. Электрическая часть станций и подстанций. / А. А. Васильев [и др.]; под ред. А. А. Васильева. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Энергоатомиздат, 1990. - 576 с.: ил.
5. Беркович. М.А. и др. Основы техники релейной защиты. / М.А. Беркович, В.В. Молчанов, В.А. Семенов - 6-е изд., перераб. и доп. - М. Энергоатом издат, 1984. - 376с., ил.
6. ГОСТР. 51317.6.5-. 2006. (МЭК 61000-6-5: 2001). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний.
7. Гуревич В.И. Оперативные цепи постоянного тока. Проблемы контроля изоляции. // Новости ЭлектроТехники. 2012. - № 1(73) – С. 30-32.
8. Белоконев, П. М. Устройства контроля изоляции цепей системы оперативного постоянного тока / П. М. Белоконев, М. С. Размахнин //

Гидроэлектростанции в XXI веке: Сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов, Саяногорск, Черемушки, 26–27 мая 2016 года. – Саяногорск, Черемушки: Сибирский федеральный университет, Саяно-Шушенский филиал, 2016. – С. 348-352.

9. Справочник по наладке вторичных цепей электростанций и подстанций/ А.А. Антошин, А.Е. Гомберг, В.П. Караваев и др.; Под ред. Э.С. Мусаэляна. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 384 с.: ил.

10. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации/ М-во топлива и энергетики РФ, РАО “ЕЭС России”: РД 34.20.501-95.— 15-е изд., перераб. и доп.— М.: СПО ОРГРЭС, 1996.—160 с.

11. Герасимова В.Г. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Герасимова В. Г. - Москва: Издательский дом МЭИ, 2017.

12. Ольшовец, П. Контроль изоляции цепей выпрямленного оперативного тока / П. Ольшовец // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 3(24). – С. 35-38.

13. Алимов, Ю. Н. Система контроля изоляции и поиска поврежденного фидера в цепях оперативного постоянного тока 220 В "ЭКРА-СКИ" / Ю. Н. Алимов, И. А. Галкин, Н. И. Шаварин // Новое в российской электроэнергетике. – 2011. – № 1. – С. 44-52.

14. Алимов, Ю. Н. Особенности контроля изоляции в цепях оперативного постоянного тока 220 В / Ю. Н. Алимов, И. А. Галкин, Н. И. Шаварин // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – № 3(4). – С. 36-41.

15. Контроль изоляции в цепях оперативного постоянного тока электрических станций и подстанций / Ю. Н. Алимов, К. В. Быков, И. А. Галкин, Н. И. Шаварин // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – № 3(12). – С. 38-45.

16. Патент № 2381513 С1 Российская Федерация, МПК G01R 27/18. Способ определения сопротивлений изоляции присоединений в сети постоянного тока с изолированной нейтралью, устройство для его осуществления и

дифференциальный датчик для этого устройства: № 2008129234/28: заявл. 16.07.2008: опубл. 10.02.2010 / Ю. Н. Алимов, И. А. Галкин, Н. И. Шаварин; заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие "ЭКРА".

17. Патент № 2310211 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/11. Способ поиска элемента с пониженным сопротивлением изоляции в разветвленной электрической сети постоянного оперативного тока : № 2006126946/28: заявл. 24.07.2006: опубл. 10.11.2007 / Р. А. Вайнштейн, В. В. Шестакова, И. С. Исаев, С. М. Юдин; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский политехнический университет.

18. Авторское свидетельство № 978082 А1 СССР, МПК G01R 31/02. Устройство для оперативного контроля изоляции цепей постоянного тока : № 2772931: заявл. 23.04.1979: опубл. 30.11.1982 / А. А. Овсянников, В. А. Файбисович, В. В. Шлык ; заявитель белорусское производственное ремонтно-наладочное предприятие "БЕЛЭНЕРГОРЕМНАЛАДКА".

19. Савельев, В. А. Способ контроля состояния изоляции цепей постоянного оперативного тока электростанций и подстанций / В. А. Савельев, С. А. Словесный // Повышение эффективности работы энергосистем: Труды ИГЭУ / Министерство науки и образования Российской Федерации. Федеральное агентство по образованию. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина". – Москва: Энергоатомиздат, 2004. – С. 466-478.

20. Савельев, В. А. Контроль состояния изоляции цепей постоянного оперативного тока с компенсацией тока утечки / В. А. Савельев, С. А. Словесный // Повышение эффективности работы энергосистем: Труды ИГЭУ. – Москва: Энергоатомиздат, 2002. – С. 418-429.

21. Контроль состояния изоляции цепей постоянного оперативного тока с компенсацией тока утечки. Савельев В.А., Словесный С.А. В сборнике:

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ. Труды ИГЭУ. Москва, 2002. С. 418-429.

22. Способ контроля состояния изоляции цепей постоянного оперативного тока электростанций и подстанций. Савельев В.А., Словесный С.А.В сборнике: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ. Труды ИГЭУ. Министерство науки и образования Российской Федерации. Федеральное агентство по образованию. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина". Москва, 2004. С. 466-478.

23. К78-36. Конденсаторы с металлизированными обкладками с полипропиленовым диэлектриком [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://po-nzk.ru/wp-content/themes/twentyfourteen/files/k78-36-informatsiya-o-kondensatore.pdf> (дата обращения 20.01.2022)

24. Микропроцессорное устройство для определения фидера с замыканием на землю в системе оперативного постоянного тока на основе электромагнитных преобразователей // Кулаков П.А., Скрипачев М.О. Известия высших учебных заведений «Электромеханика». Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт). 2009г. Новочеркасск, 2009. – С. 153.

25. Скрипачев, М. О. Определение участков щита постоянного оперативного тока с пониженной на землю изоляцией цепей / М. О. Скрипачев, А. С. Ведерников // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 21–24 апреля 2020 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2020. – С. 298-301.

26. Устройство пофидерного поиска повреждения изоляции присоединений щитов постоянного оперативного тока / М. О. Скрипачев, А. С. Ведерников, Д. А. Гнетова, А. А. Щобак // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике :

Материалы докладов X открытой молодежной научно-практической конференции, Казань, 28–30 октября 2015 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2017. – С. 155-161.

27. Ведерников, А. С. Измерение сопротивления изоляции на землю в цепях постоянного оперативного тока электрических станций и подстанций / А. С. Ведерников, М. О. Скрипачев, Е. А. Балуква // Электроэнергетика глазами молодежи - 2016 : Материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3-х томах, Казань, 19–23 сентября 2016 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. – С. 303-306.

28. Устройство селективного контроля изоляции присоединений цепей постоянного оперативного тока на станциях и подстанциях / М. О. Скрипачев, А. С. Ведерников, Д. А. Гнетова, А. А. Щобак // Электроэнергетика глазами молодежи : труды VI международной научно-технической конференции, Иваново, 09–13 ноября 2015 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015. – С. 71-74.

29. Способ контроля изоляции присоединений щита постоянного тока / Мигунова Л.Г. Кулаков П.А. Скрипачев М.О. // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности. «АСТИНТЕХ-20010» материалы международной конференции. Астрахань 2010. – С 19-21.

30. Скрипачев, М. О. Контроль изоляции присоединений цепей постоянного тока без отключения / М. О. Скрипачев, А. С. Ведерников // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 7. – С. 47-50.

31. Патент № 2612751 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/11. Способ поиска присоединений с пониженным сопротивлением изоляции на землю в цепях постоянного оперативного тока электрических станций и подстанций: № 2015148293: заявл. 10.11.2015: опубл. 13.03.2017 / А. С. Ведерников, М. О. Скрипачев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего профессионального образования "Самарский государственный технический университет".

32. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: «Высшая школа», 1996. – 638 с.

33. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерений электрических величин. / Э.Г. Атамалян. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1989. - 384 с.

34. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 1983. - 536 с.: ил.

35. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. Пер. с франц. - М.: Мир, 1983. - Том1. 312с., ил.

36. Скрипачев, М. О. Влияние параметров сети оперативного постоянного тока на работу системы контроля изоляции на землю / М. О. Скрипачев, А. С. Ведерников // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – Т. 30. – № 1(73). – С. 130-142.

37. Силовая электроника. / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. 2-е изд., стереотипное. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. — 632 с.

38. Чиженко И.М, Руденко В.С., Сенько В.И. Основы силовой преобразовательной техники. - М.: Высшая школа, 1974. - 430с.

39. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики. / Под ред. В.А. Веникова - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1981.- 288с., ил.

40. Беркович Е.И. и др. Полупроводниковые выпрямители, М., Энергия 1967

41. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров: пер с франц. под ред. К.С. Шифрина. - М.: «Наука», - 1967. - 780 с.

42. Дьяконов В.П. Matlab и Simulink для радиоинженеров. - М.: ДМК Пресс, 2011. - 976 с.: ил.

43. Рудаков П.И., Сафонов В.И., Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.X. / Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. - 416с.

44. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций. / А.И. Хальясмаа [и др.]. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. - 64с.

45. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Ключев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др.: под общ. ред. В.В. Ключева. -М.: Машиностроение, 1989. 672 с.
46. Вахромов, А. С. Моделирование электромагнитного датчика тока с компенсационной обмоткой / А. С. Вахромов, А. С. Ведерников, М. О. Скрипачев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 6. – С. 72-76.
47. Прецизионный датчик для измерения малых токов в схемах контроля изоляции на землю цепей постоянного оперативного тока / Е. А. Балуква, А. С. Ведерников, М. О. Скрипачев, А. С. Вахромов // Электроэнергетика глазами молодежи - 2016 : Материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3-х томах, Казань, 19–23 сентября 2016 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. – С. 295-298.
48. Ведерников, А. С. Измерительная часть компенсационного датчика малых токов в схемах контроля изоляции на землю цепей постоянного оперативного тока / А. С. Ведерников, Д. Д. Муталова, А. С. Вахромов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 21–24 апреля 2020 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2020. – С. 58-62.
49. Уилмсхерст Т. Разработка встроенных систем с помощью микроконтроллеров PIC. Принципы и практические примеры: Пер. с англ. - К.: «МК-Пресс», СПб.: «КОРОНА-ВЕК», - 2008. - 544 с., ил.
50. Кёниг А., Кёниг М., Полное руководство по PIC-микроконтроллерам.: Пер. с нем. - К.: «МК-Пресс», 2007. - 256с.
51. Катцен С. PIC-микроконтроллеры. Все, что вам необходимо знать / С. Катцен; пер с англ. Евстифеева А.В. - М.: Додека-XXI, 2008. - 656 с.

52. Предко М. PIC микроконтроллеры: архитектура и программирование. Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 512 с.: ил.
53. Трамперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров.: Пер. с нем.-К.: «МК-Пресс», 2006. - 208 с.
54. Знаменский А.С. Активные RC-фильтры. / Знаменский А.С., Теплюк И.Н. - М.: Изд-во "Связь", 1970. - 280с.
55. Усилитель мощности TDA7294. Техническое описание. [электронный ресурс].- режим доступа: <https://www.st.com/en/audio-ics/tda7294.html> (дата обращения 20.01.2022).
56. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1982. - 504 с., ил.
57. Белов Г.А. Теория Автоматического управления: линейные непрерывные системы. - Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. -282 с.
58. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования. / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 368 с.
59. Пейтон А. Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях: практическое руководство / Пейтон, А.Дж., Волш, В. - М.: Бином, 1994. - 352с.
60. Проектирование и применение операционных усилителей. Под редакцией Дж. Грэма, Дж. Тоби, Л. Хьюлсмана. Перевод с английского В.Л. Левина и И.М. Хейфеца. Под редакцией канд. техн. наук И.Н. Теплюка. - М: Издательство «Мир», 1974. - 509 с.
61. Лачин, В. И. Электроника. / В. И. Лачин,. Н. С. Савёлов. – Ростов на-Дону: Феникс, 2000. – 448 с.
62. Горшков Б.И. Радио-электронные устройства: Справочник.-М.: Радио и связь, 1984.- 400с., ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып 1076).
63. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер.с нем. - М.: ДМК Пресс, 2007. - 942с.: ил.



64. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Пер. с англ.- Изд.2-е. - М.: БИНОМ. - 2014. - 704 с.
65. Патент на полезную модель № 203217 U1 Российская Федерация, МПК G01R 19/32. Первичный преобразователь тока : № 2020123285 : заявл. 14.07.2020 : опубл. 26.03.2021 / А. А. Яблоков, В. Д. Лебедев, А. В. Наумов [и др.] ; заявитель Публичное акционерное общество "Межрегиональная распределительная сетевая компания Центра и Приволжья".
66. Кольцевые сердечники [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.ferropribor.ru/produkcija/ferrity-ot-proizvoditelya/magnitomyagkie-ferrity/kolcevye-serdechniki> (дата обращения 20.01.2022)
67. Лейтман М.Б. Компенсационные измерительные преобразователи электрических величин / М.Б. Лейтман, А.М. Мелик-Шахназаров. – М.: Энергия. – 1978. – 224 с.
68. М.О. Скрипачев. Устройство питания измерительных датчиков, расположенных на воздушной линии электропередачи / Е.А. Кротков, Я.В. Макаров, М.О. Скрипачев // Электротехника. – 2022. – № 1. – С. 41-46. – DOI 10.53891/00135860\_2021\_1\_41.
69. Бернас С., Цёк З. Математические модели элементов электроэнергетических систем: Пер. с польск. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 312 с., ил.
70. Фолкенберри Л. Применения операционных усилителей и линейных ИС: Пер. с англ.-М.Ж Мир, 1985.-572с., ил.
71. AS-100. Техническое описание.[электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://talema.com/wp-content/uploads/datasheets/AS.pdf> (дата обращения 20.01.2022)
72. Карташов Б.А. и др. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech.М.:ДМК Пресс, 2017. -424с.
73. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1978. 736 с.

74. Микроконтроллер PIC18F452. Техническое описание. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39564c.pdf> (дата доступа 20.01.2022)
75. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. - М.: ООО "Бином-Пресс", 2006. - 656 с.: ил.
76. Гадзиковский, В.И. Методы проектирования цифровых фильтров / В.И. Гадзиковский. - М. : Горячая линия - Телеком, 2012. - 413 с. : ил.
77. Куликов А.Л. Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП / Куликов А.Л.; под ред. М.Ш. Мисриханова. – Н.Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2006. – 315 с.
78. Васильев А.Е. Микроконтроллеры. Разработка встраиваемых приложений. / А.Е. Васильев. – СПб.: БХВ - Петербург, 2008. – 304с.
79. Шпак Ю.А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. / Сост. Ю.А. Шпак - К.: «МК-Пресс», СПб.: «КОРОНА-ВЕК», 2011. - 544 с., ил.
80. МТ-16S2D. Жидкокристаллический индикатор Буквенно-цифровой 16 символов 2 строки. Техническое описание. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.melt.com.ru/docs/MT-16S2D.pdf> (дата обращения 20.01.2022)

## **Приложения**

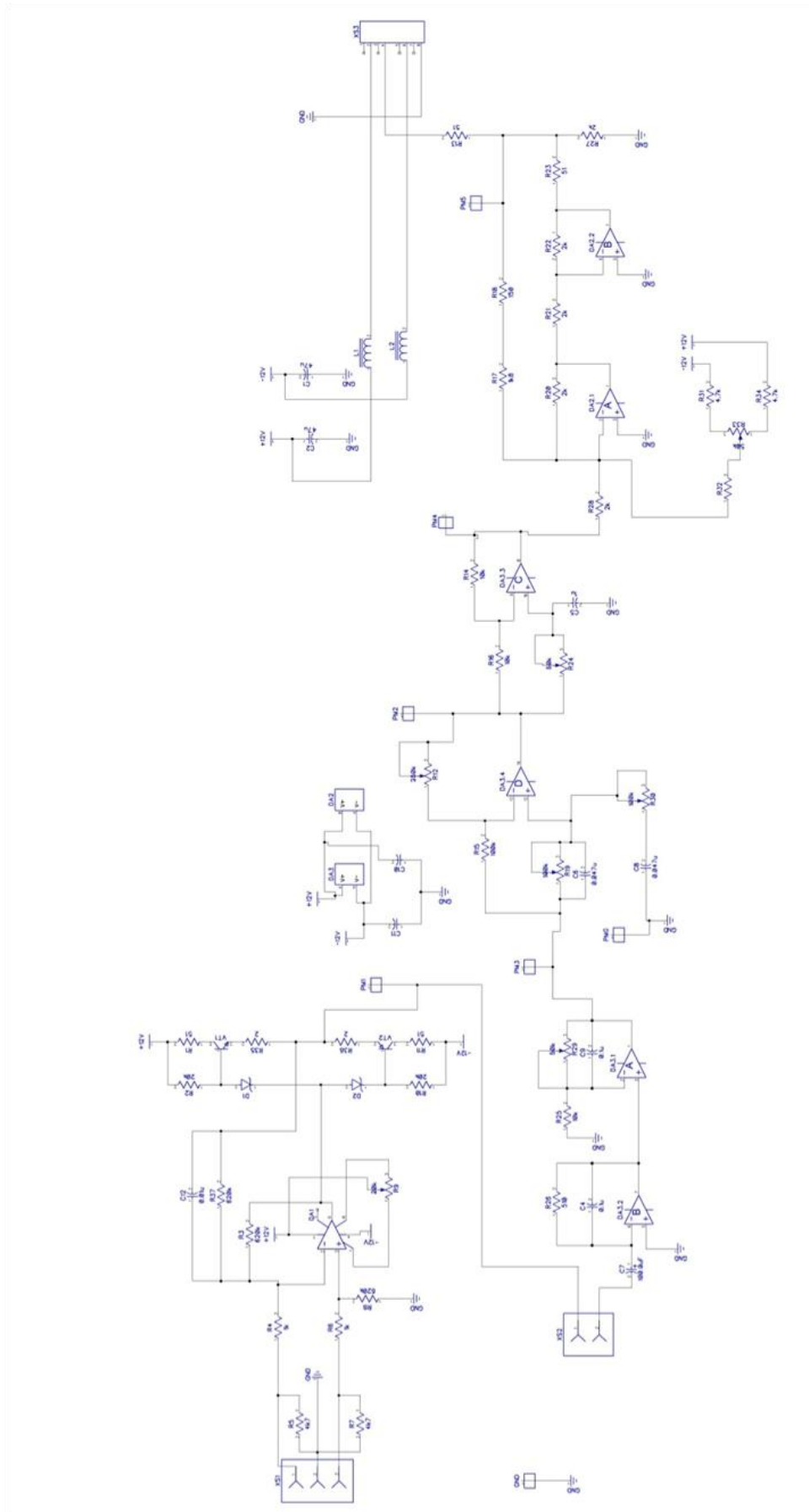
### Приложение 1

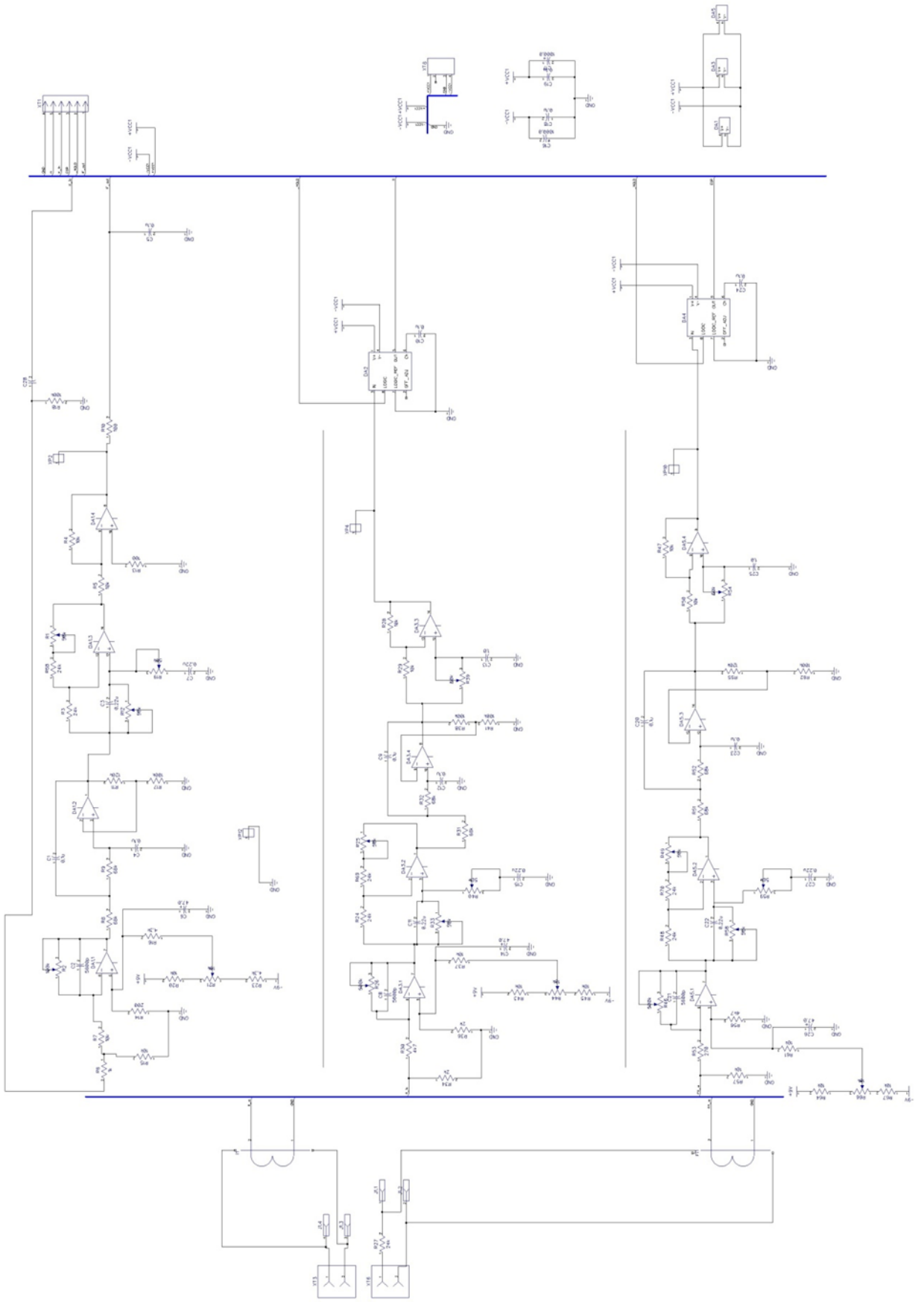
Схемы электрические принципиальные внешнего усилителя, аналогового, цифрового модулей терминала устройства контроля изоляции.

### Приложение 2

Акты об использовании результатов диссертационной работы Скрипачева М.О.

Приложение 1







## Приложение 2

МП г.о. Самара «Самарский метрополитен»

Утверждаю  
Директор

С.В. Шамин

« 11 \_\_\_\_\_ 2022 г.

**АКТ**

об использовании результатов диссертационной работы  
Скрипачёва Михаила Олеговича на тему  
«Совершенствование системы пофидерного контроля изоляции щитов  
постоянного оперативного тока»  
в МП г.о. Самара «Самарский метрополитен»

Комиссия в составе: начальника службы электроснабжения Лабунского А.Л., главного инженера службы электроснабжения Целых А.С., ведущего инженера технического отдела службы электроснабжения Кулаковой О.С.

провела анализ технических мероприятий, направленных на повышение надежности работы цепей оперативного постоянного тока, заключающихся в совершенствовании способов поиска поврежденного направления в щите постоянного тока совмещенных тягово-понижительных и понижительных подстанций.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Считать целесообразным использование метода селективного контроля изоляции без отключения присоединений щитов постоянного оперативного тока, рассмотренный в данной диссертационной работе в щите постоянного тока совмещенных тягово-понижительных и понижительных подстанций МП г.о. Самара «Самарский метрополитен»:

1. Сокращение времени поиска поврежденного участка сети постоянного тока.
2. Возможность определения комбинации повреждений в цепях оперативного тока.
3. Возможность работы совместно с имеющимися штатными системами не-селективного контроля изоляции на землю.

Начальник службы  
электроснабжения

А.Л. Лабунский

Главный инженер службы  
электроснабжения

А.С. Целых

Ведущий инженер технического отдела  
службы электроснабжения

О.С. Кулакова

«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор-главный

Инженер Новокуйбышевской

ТЭЦ-1 филиала «Самарский»

ПАО «Т Плюс»



А.В. Кузнецов

2022 г.

г. Новокуйбышевск 2022 г.

### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Скрипачёва Михаила Олеговича на тему «Совершенствование системы пофидерного контроля изоляции щитов постоянного оперативного тока» на предприятии НкТЭЦ-1 филиала «Самарский» ПАО «Т Плюс».

Комиссией в составе: заместителя начальника электрического цеха Нечай И.И., начальника лаборатории Накрайникова Р.А., ведущего инженера ЭТЛ Щецяк А.В. было проведено экспериментальное исследование работы на действующем электрооборудовании устройства пофидерного контроля изоляции на землю присоединений щита постоянного тока РУСН ЩПТ. Были имитированы различные режимы повреждения на землю в контролируемых цепях ЩПТ, а так же комбинированные режимы из нескольких повреждений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода селективного контроля изоляции без отключения присоединений щитов постоянного оперативного тока на предприятии Нк ТЭЦ-1 филиала «Самарский» ПАО «Т Плюс», рассмотренный в данной диссертационной работе в РУ постоянного тока РУСН ЩПТ позволяет:

1. Сократить время поиска поврежденного участка сети постоянного тока.
2. Определять комбинации из нескольких повреждений в цепях оперативного тока.
3. Обеспечить точность работы измерительной части устройства 5%
4. Возможность установки на действующем оборудовании без снятия напряжения.

Заместитель начальника электрического цеха

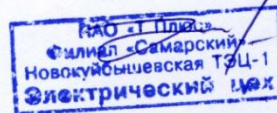
Начальник лаборатории

Ведущий инженер ЭТЛ

И.И. Нечай

Р.А. Накрайников

А.В. Щецяк







МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»  
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по УР ФГБОУ ВО  
«СамГТУ», д.п.н.

Юсупова О.В.

«09» 09 2022 г.

### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
Скрипачева Михаила Олеговича

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Скрипачева Михаила Олеговича на тему «Совершенствование системы пофидерного контроля изоляции щитов постоянного оперативного тока» внедрены и используются в учебном процессе Самарского государственного технического университета при подготовке магистров по направлению 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника» и бакалавров по направлению 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» на Электротехническом факультете на кафедре «Электрические станции». Результаты диссертационной работы Скрипачева М.О. использованы в учебном процессе по курсам:

1. Монтаж и наладка устройств релейной защиты.
2. Источники и схемы оперативного тока электрических станций и подстанций.

Заведующий кафедрой «Электрические станции»  
к.т.н., доцент Ведерников А.С.