

На правах рукописи



**СКРИПАЧЕВ Михаил Олегович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОФИДЕРНОГО КОНТРОЛЯ ИЗО-  
ЛЯЦИИ ЩИТОВ ПОСТОЯННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА**

Специальность:

2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Самара – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» на кафедре "Электрические станции".

- Научный руководитель: **Ведерников Александр Сергеевич**  
кандидат технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой "Электрические станции" ФГБОУ ВО  
СамГТУ, г. Самара
- Официальные оппоненты: **Куликов Александр Леонидович**  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры  
«Электроэнергетика, электроснабжение и силовая  
электроника»  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный  
технический университет им. Р.Е. Алексеева» (г. Н.  
Новгород)  
**Лебедев Владимир Дмитриевич**  
кандидат технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой «Автоматического управления  
электроэнергетическими системами»  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И. Ленина», г.  
Иваново
- Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет», г.  
Иркутск

Защита состоится 18 апреля 2023 года в 10 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.377.06, при ФГБОУВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ауд. № 200.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ», а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу <http://d24237706.samgtu.ru/node/2>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан: « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.377.06  
к.т.н., доцент



Стрижакова Е.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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**

- Тезисы докладов шестнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов в МЭИ «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика(Москва 2010);
- «Диспетчеризация в электроэнергетике: проблемы и перспективы» Материалы 4-й от-крытой молодежной научно-практической конференции филиала ОАО «СО ЕЭС» РДУ Татарстана и Казанского государственного энергетического университета(Казань 2009).
- Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности. «АСТИНТЕХ-20010» материалы международной конференции. Астрахань 2010.
- В сборнике: ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ. труды VI международной научно-технической конференции. 2015.
- Электроэнергетика глазами молодежи - 2016. Материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3-х томах. 2016.

- Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. Материалы докладов X открытой молодежной научно-практической конференции. Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. 2017.

- Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2020.

### 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

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обосновывается актуальность повышения точности прогнозирования электропотребления системой СН ТЭЦ. Определяются цели и задачи исследования. Выносятся полученные научные результаты диссертационной работы, представлена их практическая значимость.

**В первой главе** дается описание систем постоянного оперативного тока в составе электротехнических комплексов. Рассмотрены схемы питания цепей постоянного оперативного тока. Определяется принцип работы устройства.

**Во второй главе** проводится анализ существующих методов контроля изоляции присоединений щитов постоянного тока без отключения присоединений. Приводится вариант классификации методов контроля селективного и неселективного. Обосновывается вывод о необходимости применения способа с внешним опорным напряжением, позволяющим селективно определить присоединение с пониженным на землю сопротивлением изоляции 20 кОм и менее без отключения от щита постоянного тока.

Для применения выбранного метода с внешним опорным напряжением, разработана схема замещения щита постоянного оперативного тока для определения поврежденного на землю участка без отключения. Предлагается способ наложения опорного сигнала.

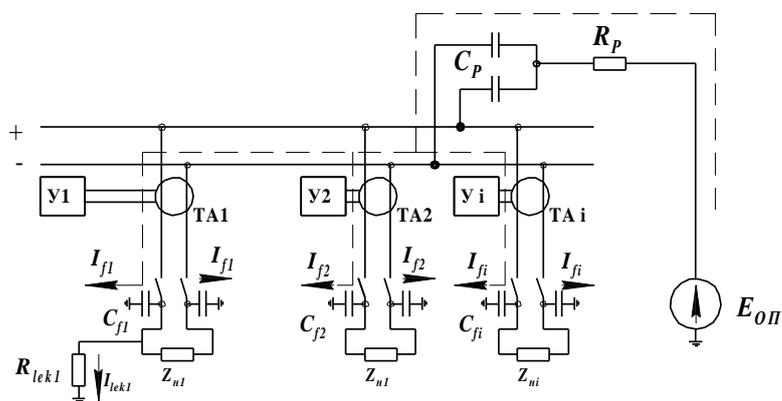


Рисунок 1 - Предлагаемая схема подачи опорного сигнала на щита постоянного тока для определения сопротивления утечки

Производить наложение внешнего опорного сигнала на шины щита постоянного тока производится через емкостную развилку (рис.1). Из-за низкого сопротив-

ления аккумуляторной батареи и наличия емкостной развилки, считаем, что для составляющей частоты 20 Гц оба полюса щита постоянного тока находятся под одним потенциалом. Схема замещения щита постоянного тока преобразуется к виду(рис2).

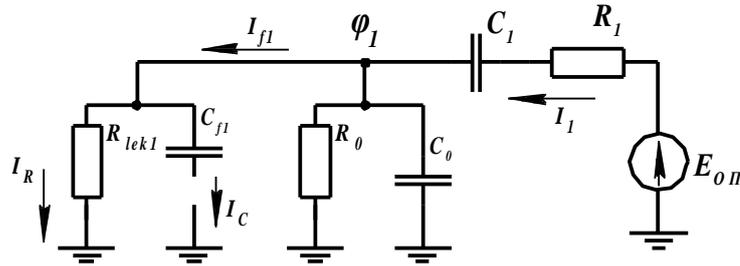


Рисунок 2 - Схема замещения щита постоянного тока для определения сопротивления изоляции фидера на землю.  $R_0$ - активное сопротивление утечки щита постоянного тока(при наличии);  $C_0$ -емкость щита постоянного тока; $\varphi_1$ - переменная составляющая потенциала шин щита от источника опорного напряжения

Параллельное соединение  $R_{lek1}$  и  $C_{fl}$  являются моделью контролируемого в данный момент присоединения. Для определения сопротивления утечки  $R_{lek1}$  в составе контролируемого фидера необходимо выделить активную составляющую тока  $I_{f1}$  относительно потенциала  $\varphi_1$  (рис.2):

$$P_s = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \varphi_1(t) \cdot i_{f1}(t) dt \quad (1)$$

Где  $\varphi_1(t)$  и  $i_{f1}(t)$  представляют собой непрерывные функции времени величин переменной составляющей потенциала шин и составляющей тока контролируемого фидера от опорного источника. Величина  $P_s$  является так же скалярным произведением векторов  $\varphi_1(t)$  и  $i_{f1}(t)$ .

Чтобы на работу устройства контроля изоляции не влияли режимные параметры щита постоянного тока, в главе 2 устанавливается, что искомая величина сопротивления активной утечки представляет собой отношение:

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

Где  $T$  – интервал наблюдения, кратный периоду сигнала опорной частоты.

Числитель выражения (2) представляет собой квадрат нормы потенциала шин от опорного источника. Косвенно позволяет судить о состоянии изоляции щита постоянного тока в целом.

Для реализации цифровой части и составления алгоритма работы цифровой части устройства выражение(2) преобразуется к виду:

$$R_{lek1} = \frac{1}{T} \cdot \frac{\sum_{n=0}^N \varphi_n^2}{\sum_{n=0}^N [\varphi_n \cdot i_{fn}]} \quad (3)$$

Где  $\varphi_n^2$  и  $i_{fn}$  – дискретные замеры значений сигналов, пропорциональных  $\varphi_1(t)$  и  $i_{f1}(t)$ .

Для работы устройства контроля изоляции принимаем параметры генератора опорной частоты: синус частотой 20 Гц, амплитуда 20 В на емкостной нагрузке до 50 мкФ.

Для работы устройства селективного контроля изоляции присоединения щитов постоянного тока необходимо в начале каждого присоединения установить специальные внешние усилители с электромагнитными датчиками тока, передающие аналоговый сигнал в виде тока, пропорционального  $i_{fl}(t)$  в основной терминал. Число усилителей равно числу контролируемых присоединений щита. В каждый момент времени опрашивается только один внешний усилитель.

Так же в главе рассмотрено влияние работы выпрямительно-подзарядных агрегатов на работу системы пофидерного контроля изоляции. Сделан вывод, что несимметрия емкостей полюсов относительно земли, как контролируемого фидера, так и щита постоянного тока в целом, является причиной создания помех работе системы селективного контроля изоляции. Разработана схема замещения для расчета влияния помех, создаваемым выпрямительным агрегатом.

**В третьей главе** предлагается структурная схема составных частей устройства контроля изоляции. Устройство состоит из трех блоков:

- генератора опорного сигнала, частотой 20 Гц;
- цифрового терминала;
- внешнего усилителя с датчиком тока.

Обработка сигналов и измерение сопротивления утечки осуществляется в терминале устройства. Структурная схема терминала представлена на рис.3.

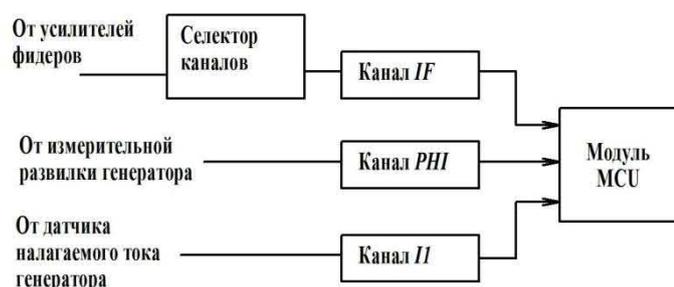


Рисунок 3 - Структурная схема терминала

Терминал состоит из трех входных каналов, названных соответственно:

- канал тока фидера (канал ІF)
- канал потенциала (канал РНІ)
- канал налагаемого тока (канал ІІ)

Все три аналоговых канала осуществляют функции согласования сигналов с датчиков тока, датчика потенциала шин, датчика налагаемого тока с уровнем работы цифровых устройств. Вычисления выполняются в цифровом модуле МСU.

Рассмотрены основные функциональные узлы, на основании которых строятся входные цепи терминала устройства контроля изоляции.

Для уменьшения влияния помех, как наведенных, так и инжектируемых в сеть выпрямительно-подзарядным агрегатом, фильтрация сигналов осуществляется в 2 этапа:

- входные каналы осуществляют функции аналоговой неселективной фильтрации;
- цифровая селективная фильтрация в модуле МСU.

Функции аналоговой фильтрации – подавление помех с частотами 50 Гц и кратными, порожденными работой подзарядного агрегата. Наибольший интерес представляет построение канала тока фидера IF, структурная схема которого приведена на рисунке 4.

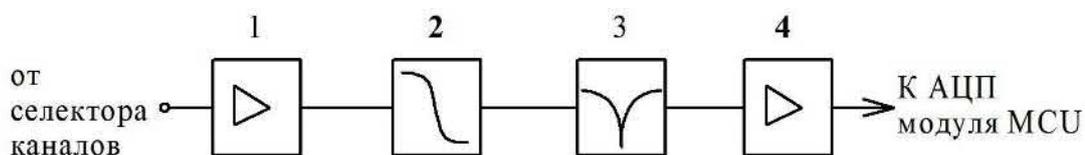


Рисунок 4 - Структурная схема канала тока фидера. 1-входной усилитель- преобразователь; 2-ФНЧ с частотой среза 25 Гц; 3- режекторный фильтр на частоту 50 Гц; 4- выходной буферный каскад

Неселективная фильтрация осуществляется линейными аналоговыми фильтрами, соединенными каскадно. Непрерывное описание канала IF имеет вид:

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

Результирующие АЧХ канала IF приведено на рисунке 5.

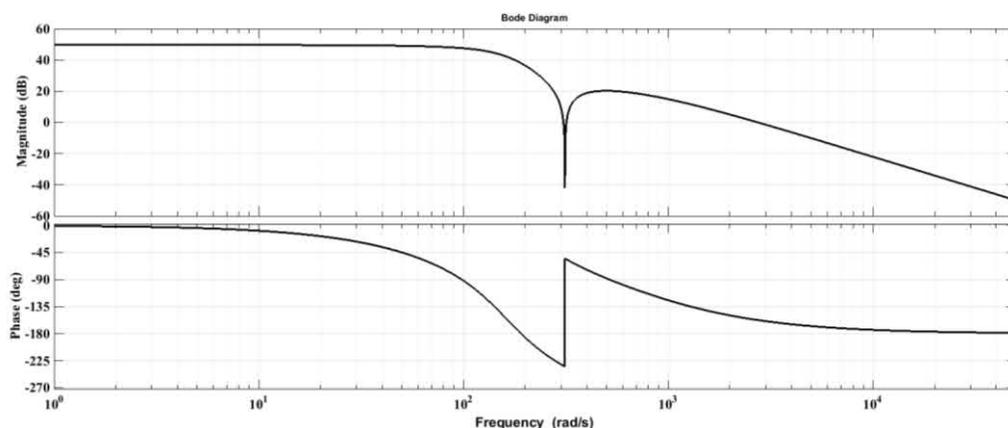


Рисунок 5 - АФЧХ канала налагаемого тока терминала

Характеристики каналов потенциала шин РН и налагаемого тока имеют сходное описание, различие имеется только в схемах входных цепей.

Аналоговая неселективная фильтрация позволяет значительно подавить помехи, возникающие в сети постоянного оперативного тока.

Функции селективной фильтрации позволяют дополнительно подавить помехи с высшими гармоническими составляющими и обработать сигнал частотой 20 Гц от источника опорного сигнала.

Цифровой фильтр построен на основе описания аналогового фильтра-прототипа 2-го порядка, имеющего описание:

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

ЛАФЧХ фильтра-прототипа (4) приведена на рис. 6.

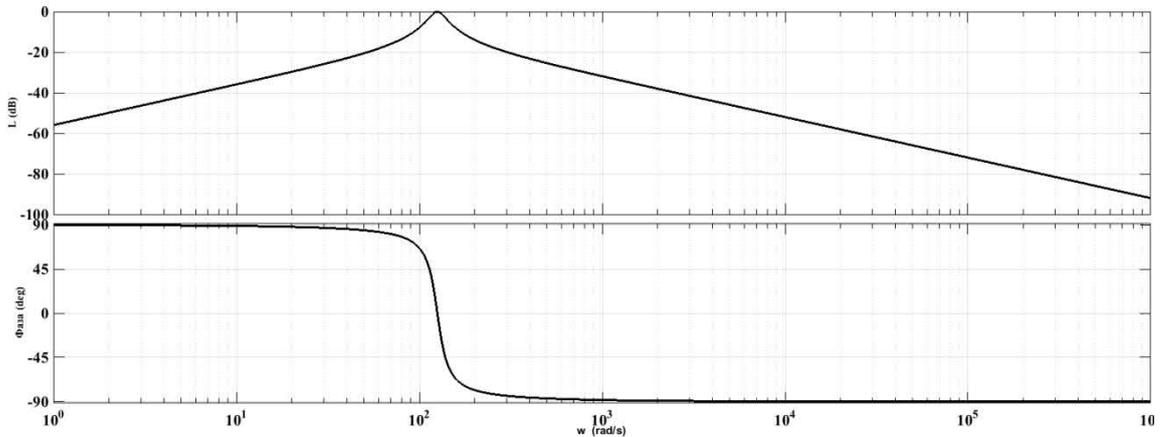


Рисунок 6 - АФЧХ аналогового фильтра-прототипа для осуществления селективной фильтрации

Реализован цифровой фильтр в виде БИХ-фильтра прямой формы 1 (рис. 7). Фильтр имеет частоту дискретизации  $F_S=200$  Гц. Применяя билинейное преобразование определены коэффициенты цифрового фильтра.

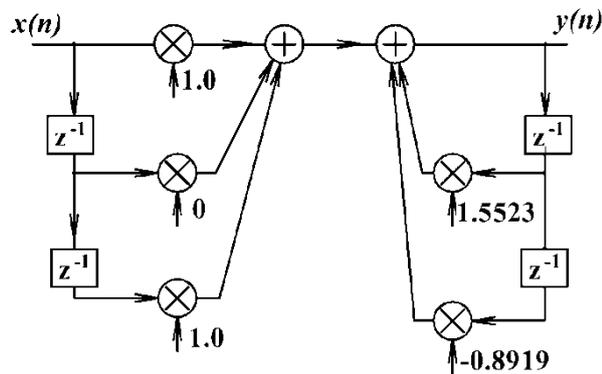


Рисунок 7 - Структурная схема цифрового фильтра селективной фильтрации

Цифровой фильтр имеет описание в виде разностного уравнения:

$$y(n) = 1 \cdot x(n) + 0 \cdot x(n-1) + 1 \cdot x(n-2) + 1.5523 \cdot y(n-1) - 0.8919 \cdot y(n-2) \quad (6)$$

где  $y(n)$  - выходная последовательность фильтра;  $x(n)$  - входная последовательность.

На основании разработанного цифрового фильтра и реализации устройства (2) и (3), разработана функциональная схема цифровой части терминала (рисунок 8).

Модуль 1(рисунок 8) представляет аналоговую часть терминала, формирующую сигналы напряжения для работы АЦП.

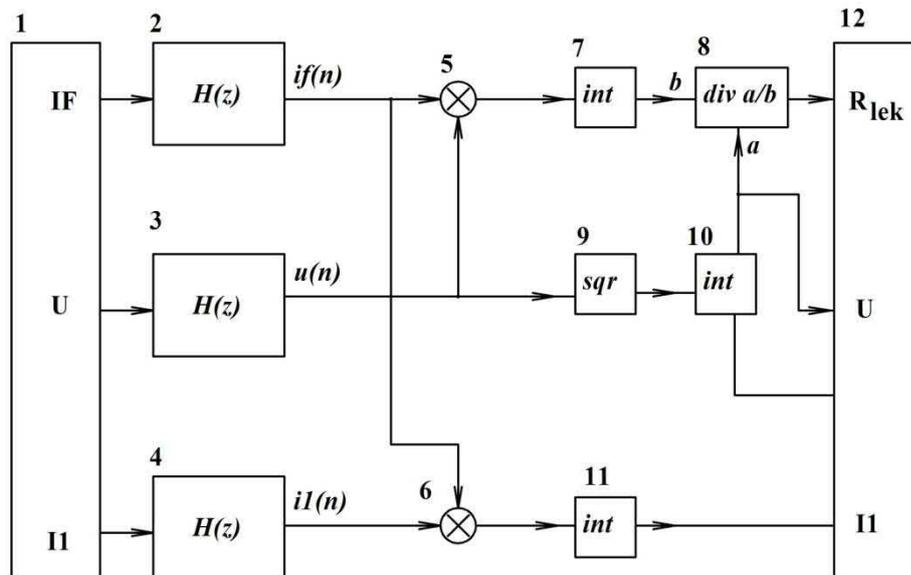


Рисунок 8 - Функциональная схема обработки измерительной информации

Модули 2, 3, 4, являются цифровыми фильтрами основной селекции и имеют одинаковые передаточные функции; 5 и 6 – умножители; 7,10,11 – интеграторы;8 – делитель; 9 – возведение в квадрат; 12 – дисплей.

Работает схема (рисунок 8) следующим образом. Выбирается нужный канал для измерения, сбрасываются в 0 интеграторы 7,10, 11 и выходы цифровых фильтров 2-4.

После выбора фидера для измерения, сигналы с выхода аналогового модуля поступают на входы цифровых фильтров. Фильтры формируют дискретные последовательности  $if(n)$ ,  $u(n)$  и  $il(n)$  с частотой  $F_s=200$  Гц. Сигналы  $if(n)$  и  $u(n)$  умножаются в модуле 5 и подаются на вход интегратора 7. С течением времени наблюдения сигнал «b» на выходе интегратора увеличивается, формируя в конце интервала значение скалярного произведения  $if(n)$  и  $u(n)$ . Это значение соответствует знаменателю формулы(3). Одновременно, сигнал  $u(n)$  возводится в квадрат модулем 9 и подается на вход интегратора 10, формируя сигнал «a». Этот сигнал представляет квадрат нормы последовательности  $u(n)$  и соответствует числителю выражения (3). Модулем 8 осуществляется деление. Получившаяся величина пропорциональна только активному сопротивлению утечки в контролируемой зоне и не зависит от системных параметров контролируемого щита.

Для корректной работы устройства в случае металлического замыкания служат модули 6 и 11. Они формируют скалярное произведение последовательностей  $if(n)$  и  $il(n)$ , которые отображают ток контролируемого фидера и налагаемого на щит тока. Если произойдет металлическое замыкание в контролируемой зоне, то величина II на выходе интегратора 11 будет максимальной.

Самым ответственным узлом всей системы контроля является датчик тока, установленный в начале контролируемого фидера. В главе 3 разработана структура датчика тока и внешнего усилителя, подключаемого к входу канала тока фидера IF терминала(рисунок 9).

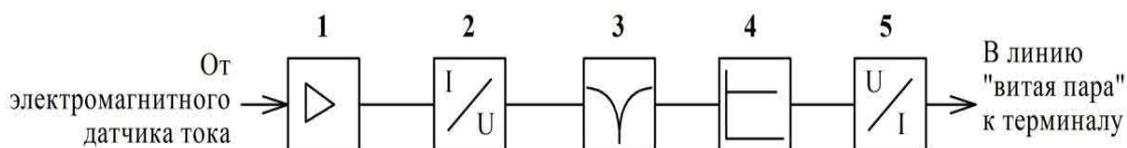


Рисунок 9 - Функциональная схема внешнего усилителя канала тока фидера.  
 1 - входной усилитель с ООС; 2- преобразователь «ток-напряжение»; 3- режекторный фильтр с частотой подавления 50 Гц; 4- фазовый фильтр; 5 – выходной преобразователь «напряжение-ток»

Электромагнитная часть датчика тока имеет разъемную конструкцию, что позволяет осуществить подключение системы контроля изоляции на рабочем объекте без выведения в ремонт.

Конструкция приведена на рис 10.

Особенностью разработанного датчика тока является необходимость достижения чувствительности к токам до 1 мА частотой 20 Гц. Дополнительным требованием является линейность в динамическом диапазоне первичных токов в десятки мА, чтобы сохранить работоспособность системы в условиях сложной электромагнитной обстановки. Этот факт требует применения измерительных обмоток с большим числом витков рабочих полуобмоток. Требования к линейности определяет необходимость применения компенсационной обмотки. Принципиальная схема входного каскада датчика тока внешнего усилителя приведена на рисунке 11

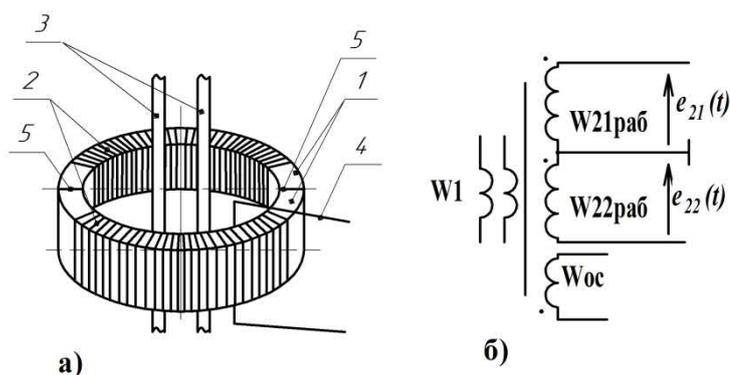


Рисунок 10 - Конструкция электромагнитной части датчика тока а) и его принципиальная схема б); 1-ферритовое полукольцо; 2 – рабочие полуобмотки  $W_{21раб}$  и  $W_{22раб}$ ; 3- проводники первичной обмотки  $W_1$ ; 4 – компенсационная обмотка  $W_{oc}$ ; 5 – соединение полуколец

Наличие большого числа витков рабочих полуобмоток сопровождается появлением значительной паразитной межвитковой емкостью, создающей неустойчивую работу каскада ввиду превращения электромагнитного датчика в колебательную систему 2-го порядка. В главе предлагаются способы повышения устойчивости компенсационного датчика тока с применением двух петель ООС.

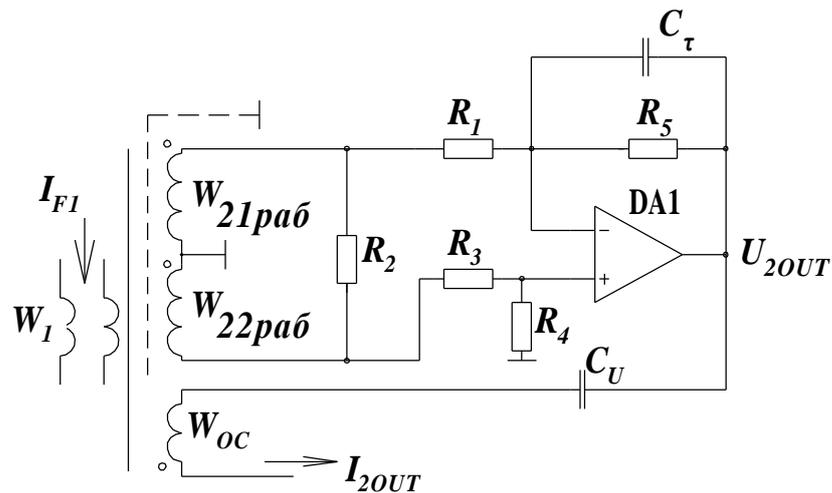


Рисунок 11 - Схема входного каскада внешнего усилителя и электромагнитного датчика тока

Линейная модель датчика тока, охваченного двумя петлями ООС, приведена на рисунке 12. Первым контуром ООС является звено Н12, образованное внутренними параметрами рабочих полуобмоток и активным сопротивлением R2 (рисунок 11), повышающим коэффициент демпфирования колебательной системы, образованной с участием паразитной межвитковой емкости. Второй контур образован ОУ DA1 и компенсационной обмоткой, включенной через емкость  $C_U$ .

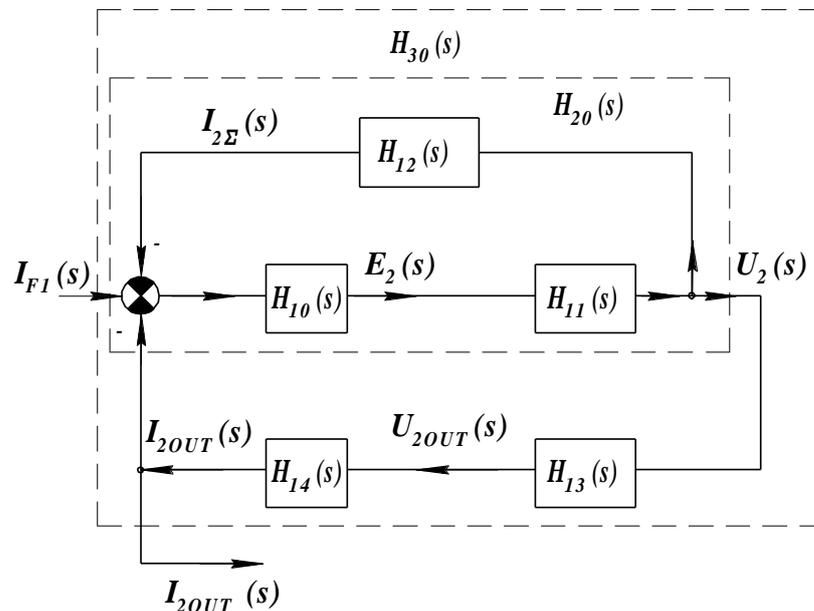


Рисунок 12 - Линейная модель входного каскада внешнего усилителя электромагнитного датчика тока.  $H_{10}$  – взаимная индукция между первичной обмоткой  $W_1$  и вторичной рабочей  $W_{2РАБ}$ ;  $H_{11}$  – собственные параметры вторичной рабочей обмотки;  $H_{12}$  – местная ООС, характеризующая нагрузку вторичной рабочей обмотки;  $H_{13}$  – каскад на ОУ;  $H_{14}$  – цепь компенсирующей обмотки

На линейной модели каскад ОУ с компенсационной обмоткой представлен звеньями  $H_{13}$  и  $H_{14}$ . Выходной величиной датчика тока является ток компенсирующей обмотки.

Передаточная функция разработанного датчика тока в численном виде имеет вид:

$$H_{DT}(s) = \frac{1.907 \cdot 10^{-3} s^2}{2.223 \cdot 10^{-13} s^4 + 5.466 \cdot 10^{-8} s^3 + 1.998 \cdot 10^{-3} s^2 + 3.219 \cdot 10^{-2} s + 1} \quad (7)$$

АЧХ и ФЧХ датчика тока, описываемого (7), приведены на рисунке 13.

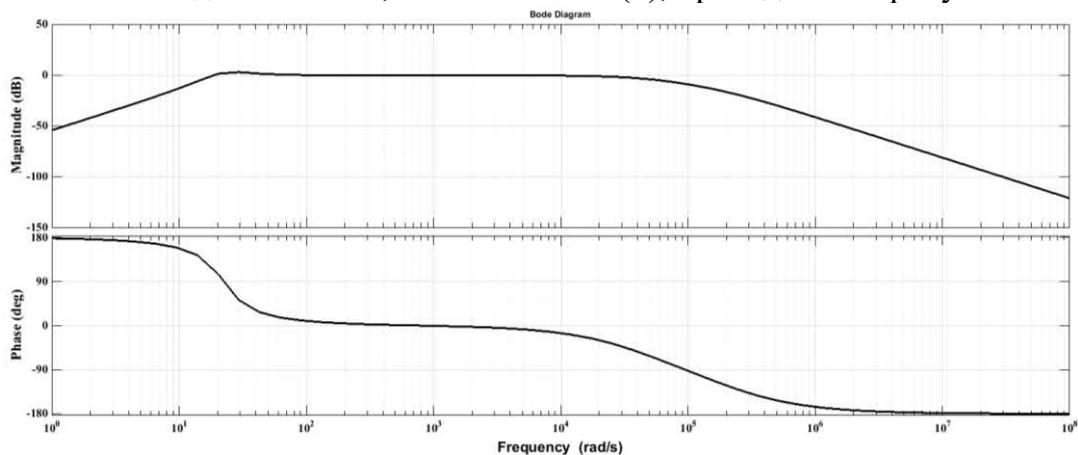


Рисунок 13 - АЧХ и ФЧХ разработанного датчика тока

Разработанный датчик тока имеет плоскую АЧХ и ФЧХ в широком диапазоне частот, достигающей сотен Гц, включая опорную частоту и возможные помехи кратные 50 Гц.

В четвертой главе рассмотрена физическая реализация устройства контроля изоляции на землю. Разработан алгоритм основной управляющей программы на языке С. Алгоритм, реализующий вычислительные функции (рис.8) приведен на рисунке 14.

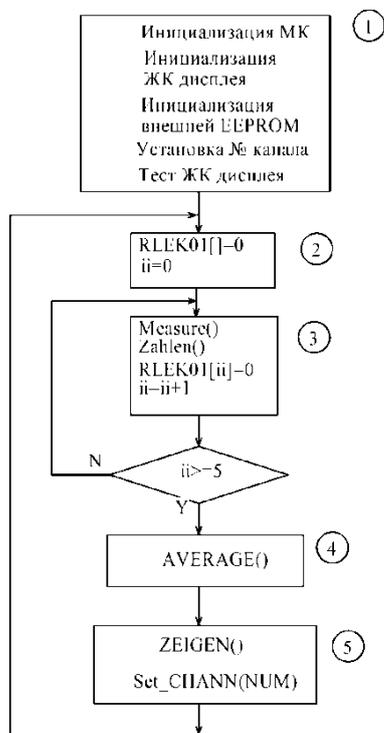


Рисунок 14 - Упрощенный алгоритм функционирования основной управляющей программы микроконтроллера устройства контроля изоляции

Был изготовлен терминал системы контроля изоляции на землю, внешний вид которого приведен на рисунке 15.



а)

б)

Рисунок 15 - Внешний вид терминала системы контроля изоляции  
а) внешний вид со стороны лицевой панели; б) вид сверху

Произведен эксперимент замера сопротивления утечки на действующем электротехническом комплексе.

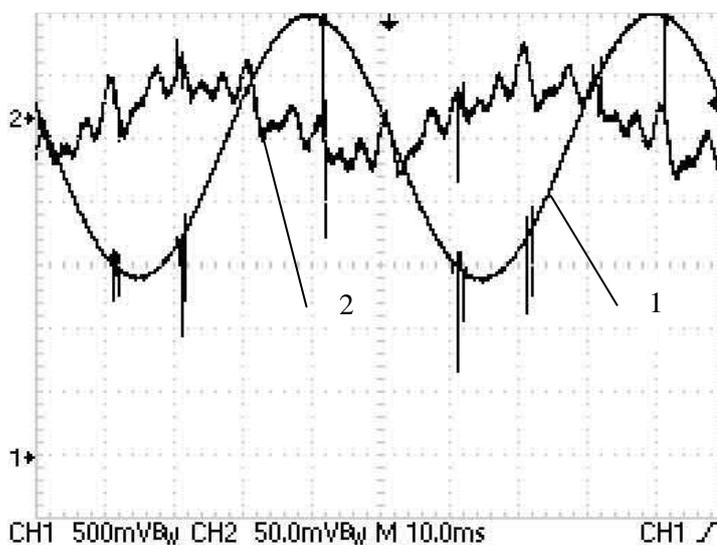


Рисунок 16. Осциллограммы выходов аналоговых каналов PH1 и IF при наложении опорного сигнала и отсутствии утечки для фидера реального щита постоянного тока:  
1 – сигнал выхода канала PH1, 2 – сигнал выхода канала тока IF

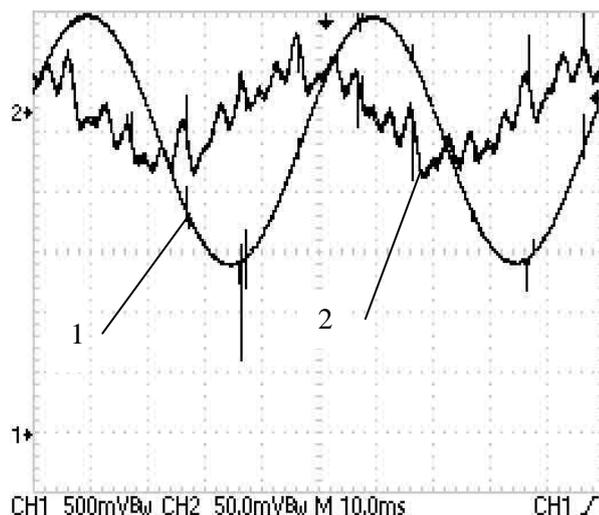


Рисунок 17 - Осциллограммы выходов аналоговых каналов РИ и ИФ при наложении опорного сигнала для фидера при наличии утечки 20 кОм в зоне фидера и 4.3 кОм вне зоны для реального щита постоянного тока: 1 – сигнал выхода канала РИ, 2 – сигнал выхода канала тока ИФ

В обоих случаях устройство обеспечило селективную работу и устойчиво фиксировало наличие понижения изоляции на землю в зоне контролируемого фидера. Влияние множественных повреждений и системных параметров контролируемого щита постоянного тока на работу устройства не выявлено.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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 и вне зависимости от режима работы щита и не способного вызвать ложную работу защит. Установлены следующие параметры внешнего опорного напряжения: чистый 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.

3. Разработана динамическая модель датчика тока для устройства контроля изоляции цепей постоянного оперативного тока, включающая в себя рабочую и компенсационную обмотку и линейное непрерывное безынерционное звено.

4. Создана физическая модель измерительного датчика тока, позволяющая подключаться к действующим цепям постоянного оперативного тока без отключения и обеспечивающая гальваническую развязку с входными цепями устройства контроля.

5. Создана физическая модель устройства контроля изоляции цепей постоянного оперативного тока, состоящая из следующих составляющих частей: генератора опорного сигнала, датчика тока и цифрового терминала.

6. Для цифровой части терминала разработан алгоритм и написана программа на высокоуровневом языке, выполняющая необходимые арифметические и логиче-

ские операции.

7. Созданное устройство успешно протестировано в электротехнических комплексах на объектах энергетической и транспортной инфраструктуры.

## **РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Основные научные результаты диссертации отражены:**

**-в работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях  
(из перечня Минобрнауки России):**

1. Контроль изоляции присоединений цепей постоянного тока без отключения / **М.О. Скрипачев**, А.С. Ведерников // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015. № 7. С. 47-50.

2. 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.

3. Микропроцессорное устройство для определения фидера с замыканием на землю в системе оперативного постоянного тока на основе электромагнитных преобразователей / **М.О. Скрипачев**, П.А. Кулаков // Известия высших учебных заведений «Электромеханика». Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт). 2009г. Новочеркасск, 2009. – С – 153-154

4. Влияние параметров сети оперативного постоянного тока на работу системы контроля изоляции на землю./ **М.О. Скрипачев**, А.С. Ведерников.// Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2022 Т. 30 № 1 –С.130-142. -doi: 10.14498/tech.2022.1.7

**-патент:**

5. Патент на изобретение RU 2612751 С1, 13.03.2017./ Способ поиска присоединений с пониженным сопротивлением изоляции на землю в цепях постоянного оперативного тока электрических станций и подстанций / А.С. Ведерников, **М.О. Скрипачев**, Заявка № 2015148293 от 10.11.2015.

**-публикации в других изданиях:**

6. Определение участков щита постоянного оперативного тока с пониженной на землю изоляцией цепей. / **М.О. Скрипачев**, А.С. Ведерников // В сборнике: Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2020. С. 298-301.

7. Устройство пофидерного поиска повреждения изоляции присоединений щитов постоянного оперативного тока. / **М.О Скрипачев.**, А.С. Ведерников, Д.А. Гнетова, А.А. Щобак // В сборнике: Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. Материалы докладов X открытой молодежной научно-практической конференции. Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. 2017. С. 155-161.

8. 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 // В книге: Электроэнергетика глазами молодежи - 2016. Материалы VII Международной молодёжной научно-технической

конференции. В 3-х томах. 2016. С. 295-298.

9. Измерение сопротивления изоляции на землю в цепях постоянного оперативного тока электрических станций и подстанций / А.С. Ведерников, **М.О. Скрипачев**, Е.А. Балуква // В книге: Электроэнергетика глазами молодежи - 2016. Материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3-х томах. 2016. С. 303-306.

10. 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 // В сборнике: «электроэнергетика глазами молодежи». Труды VI международной научно-технической конференции. 2015. С. 71-74.

11. Устройство для определения фидера с пониженной изоляцией относительно земли в системе оперативного постоянного тока / //Тезисы докладов шестнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов в МЭИ «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», том 3. - Москва, 2010.-С-524-525.

12. Микропроцессорное устройство контроля изоляции в системе оперативного постоянного тока электростанций / «Диспетчеризация в электроэнергетике: проблемы и перспективы». Материалы 4-й открытой молодежной научно-практической конференции филиала ОАО «СО ЕЭС» РДУ Татарстана и Казанского государственного энергетического университета.

13. Способ контроля изоляции присоединений щита постоянного тока / Мигунова Л.Г. Кулаков П.А. // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности. «АСТИНТЕХ-20010» материалы международной конференции. Астрахань 2010. – С 19-21.

**Вклад автора.** Результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором. Автору принадлежит разработка схемы замещения щита постоянного тока [1, 3, 6, 12], разработка динамической модели датчика тока [2, 7], разработка алгоритма функционирования устройства контроля изоляции [1, 6, 10], апробация устройства на объектах энергетики [1].

Подписано в печать \_\_\_\_\_.

Выходные данные типографии

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

(протокол № 6 от 31.01.2023 г.)

Заказ № \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244