НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина»

УДК 621.311:621.316.13(043)

На правах рукописи

КУРАБАЕВ ИСКАНДЕР КАЗБЕКОВИЧ

Разработка методов и средств повышения эффективности системы электроснабжения горных предприятий

8D07103 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD)

Научный консультант доктор технических наук, доцент Г.Г. Таткеева

Научный консультант кандидат технических наук, ассоциированный профессор А.Б. Утегулов

Зарубежный научный консультант доктор технических наук, профессор И.Ф. Суворов (Чита)

Республика Казахстан Астана, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СС	ЭКРАЩЕНИЯ	I		
ВВЕДЕНИЕ				5
	BOIIPUCA	VI	OCHOBHDIE	ЗАДАЧИ
исследования	·····	• • • • • • • • •	••••••	
1.2 Анализ методов опре	еделения параг	метрон	з изоляции	10 12
	вольтметра			12 14
1.2.2 Merod amnepmerpa	, вольтметра и	ваттм		14 15
1.2.3 Фазочувствительни	ый метод опре,	делени	ия параметров изо	ляции 15
1.2.4 Метод определен	ния характер	истик	изоляции, осно	ванный на 10
применении внешнего и	сточника напр	яжени	19	
1.5 Исследование устр	оиств непрер	ывног	о контроля тока	утечки на
горных предприятиях	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	• • • • • • • • •	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
1.4 задачи исследовании	1	• • • • • • • • •	•••••	
Выводы по первому разд	целу			23
2 PA3PABUIKA MI	етодов о	пред	ЕЛЕНИЯ ПАР.	AMETPUB
ИЗОЛЯЦИИ		•••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
2.1 Исходные положени	ЯЯ	• • • • • • • • •	••••••	
2.2 Георетические основ	вы метода опре	еделен	ия параметров из	оляции 27
2.3 Анализ погрешности	определения	парам	етров изоляции се	ли 31
2.4 Метод определен	ния парамет	pob 1	изоляции сети	с учетом
несимметрии	•••••	• • • • • • • • •		
2.5 Анализ погрешнос	ти определен	ия па	араметров изоляг	ции сети с
учетом несимметрии	•••••	• • • • • • • • •		41
2.6 Сравнительный а	анализ резул	ьтатон	в разработанног	о методов
определения параметров	в изоляции	•••••		
Выводы по второму разд	целу			
З РАЗРАБОТКА МЕТО	ЭДОВ ОПРЕ Д	TENE	НИЯ РАСЧЕТНО	DI O TOKA
ОДНОФАЗНОГО ЗАМ	ІЫКАНИЯ Н	IA 3E	млю, тока у	ТЕЧКИ И
НАПРЯЖЕНИЯ ПРИВ	СОСНОВЕНИ	l H		
3.1 Разработка методов	в определения	тока	однофазного зам	лыкания на
землю и тока утечки				
3.2 Анализ погрешност	и определения	я тока	и однофазного зам	мыкания на
землю			•••••••••••••••••••••••	
3.3 Анализ погрешности	определения	тока у	течки	
3.4 Методика определен	ия тока утечки	и и тон	ка однофазного за	мыкания на
землю		• • • • • • • • •		
3.5 Разработка мете	ода определ	ения	ожидаемого	напряжения
прикосновения		•••••		
Выводы по третьему раз	делу			
4 АПРОБАЦИЯ РАЗІ	РАБОТАННО	DIO N	иетода опре	ДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ИЗО.	ЛЯЦИИ СЕ	ТИ]	в условиях	ГОРНОИ
промышленност	И			

4.5Исследование эффективности работы устройств защитного отключения				
отключения				
4.5.1 Повышение чувствительность срабатывания УЗО путём				
подключения резисторов между фазами сети и землёй, которое				
повышает ток утечки выше порога срабатывания УЗО 84				
4.5.2 Повышения чувствительности срабатывания УЗО путём				
подключения конденсатора между нейтралью трансформатора и землёй.				
4.6 Результаты промышленного апробации разработанного метода				
Выводы по четвёртому разделу				
ЗАКЛЮЧЕНИЕ				
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ				
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Акты внедрения				
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Патенты				

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- *I*₀ ток однофазного замыкания на землю
- *I*_{ут} ток утечки
- U_L линейное напряжение
- *U*_{ph} напряжение фазы относительно земли
- *U_N* напряжение нулевой последовательности
- *Y* полная проводимость изоляции сети
- *G* активная проводимость изоляции сети
- В ёмкостная проводимость изоляции сети
- *G*₀ активная дополнительная проводимость
- *B*₀ ёмкостная дополнительная проводимость
- PV вольтметр
- РА амперметр
- QF выключатель нагрузки
- КТ класс точности
- ННП напряжение нулевой последовательности
- ОЗЗ однофазное замыкание на землю
- ОП относительная погрешность
- ПТБ правила техники безопасности
- УЗО устройство защитного отключения
- ЭП электроприемник

В диссертации использованы традиционные для литературы по электроэнергетики единицы измерения: А, В, Ом, См, кВ, с.

введение

Актуальность темы.

Современная горная промышленность сталкивается с рядом вызовов, эффективностью безопасностью. Интенсификация И связанных с производственных процессов ведёт к увеличению количества горных работ и повышению требований к их качеству и скорости выполнения. В этом внедрение эффективных и безопасных практик, контексте таких как использование новейших технологий добычи и мониторинга состояния оборудования, становится важным фактором для повышения эффективности и безопасности горных работ. Эффективность системы электроснабжения определяется её способностью обеспечивать потребности в электроэнергии с минимальными затратами на передачу и распределение. Для достижения эффективности системы, необходимо учитывать такие факторы, как надёжность, стабильность, гибкость, экономическую эффективность и другие.

Эффективность системы электроснабжения напрямую зависит ОТ надёжности и безопасности электрических сетей, включая сети напряжением до 1000 В, эти сети являются неотъемлемой частью электроснабжения и их функционирование необходимо для устойчивого надёжное развития электроэнергетики. Регулярное обслуживание трёхфазных электрических сетей и соблюдение высоких стандартов безопасности гарантируют увеличение уровня электробезопасности и надёжности электрических сетей, тем самым электроснабжения. улучшая эффективность системы Недостаточное обслуживание электрических сетей может привести к возникновению аварий, простоев и других проблем, что в свою очередь может привести к снижению эффективности системы электроснабжения. Простой оборудования может значительно снизить эффективность добычи минералов и других ресурсов, а также привести к дополнительным затратам на ремонт или замену вышедшего из строя оборудования. В результате компания может понести убытки и ограничить свои возможности для дальнейшего развития.

основе вышеизложенного исследования разработка методов Ha определения параметров изоляции, оценка состояния изоляции и устройств защиты являются важными аспектами эксплуатации электрических сетей, особенно в контексте повышения их эффективности и надёжности. Постоянный мониторинг и анализ состояния изоляции, помогут предотвратить аварии и обеспечить бесперебойную работу электрических сетей, таким образом электробезопасности повышает уровень И эффективности системы электроснабжения в целом.

Связь темы диссертации с государственными программами и планом работы университета. Работа выполнялась В HAO «Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина» в соответствии с «Научная бюджетной программой 217 и/или научно-техническая деятельность», подпрограммы 102 «Грантовое финансирование научных исследований» по теме АР05132692 «Разработка инновационных технологий

повышения эффективности электроснабжения электроприемников напряжением до 1000 В горных предприятий».

Объектом исследования являются трёхфазные электрические сети с изолированной нейтралью напряжением до и выше 1000 В.

Предметом исследования является определение параметров изоляции, тока однофазного замыкания на землю, тока утечки и напряжения прикосновения в электрических сетях с изолированной нейтралью.

Цель работы – повышение эффективности электроснабжения горных предприятий путём разработки методов определения параметров изоляции, тока однофазного замыкания на землю, тока утечки и напряжения прикосновения в электрических сетях с изолированной нейтралью.

Идея работы. Повышение эффективности электроснабжения горных предприятий путём разработки методов определения параметров изоляции, тока однофазного замыкания на землю, тока утечки и напряжения прикосновения в электрических сетях с изолированной нейтралью, на основе применения закономерностей изменения напряжений при искусственном смещении нейтрали.

Для достижения цели были поставлены следующие научные задачи:

– разработать математические зависимости определения параметров изоляции в несимметричной электрической сети с изолированной нейтралью;

– разработать методы определения параметров изоляции, токов утечки, однофазного замыкания на землю и напряжения прикосновения в несимметричной электрической сети с изолированной нейтралью;

 провести численное экспериментальное исследование предлагаемого метода определения параметров изоляции сети с целью сравнительного анализа результатов;

 провести численное экспериментальное исследование разработанных методов определения параметров изоляции, тока однофазного замыкания на землю, тока утечки и напряжения прикосновения в действующих электрических сетях с изолированной нейтралью горных предприятий;

– разработать средства повышения эффективности системы электроснабжения горных предприятий.

Научная новизна:

– установление математических зависимостей для определения параметров изоляции, токов однофазного замыкания на землю, тока утечки и напряжения прикосновения в трёхфазной электрической сети на основе измерения величин модулей напряжения нулевой последовательности, напряжения фазы относительно земли и их векторных углов, отличием которых является учёт несимметричных напряжений фаз и их симметричных составляющих;

– разработка методов определения параметров изоляции, токов однофазного замыкания на землю, тока утечки и напряжения прикосновения в трёхфазной электрической сети, которые позволяют определять параметры изоляции сетей горных предприятий с погрешностью не более 10%.

– впервые получены числовые значения параметров изоляции в электрической сети напряжением до 1000 В на роторном экскаваторе СРс(К)–2000 с применением разработанных методов.

Практическая значимость:

– разработка эффективных методик определения параметров изоляции, токов однофазного замыкания на землю, тока утечки и напряжения прикосновения в трёхфазной электрической сети с изолированной нейтралью;

 предложенные методики применимы при эксплуатации электрических сетей с изолированной нейтралью под рабочим напряжении путём регулярного мониторинга и анализа состояния изоляции, которые повышают уровень электробезопасности и эффективности системы электроснабжения в целом;

 полученные в работе аналитические зависимости фазных напряжений и параметров изоляции имеют универсальный характер и могут быть применены в электрических сетях с изолированной нейтралью других отраслей промышленности.

Методика выполнения работы. При разработке методов определения параметров изоляции сети, тока однофазного замыкания на землю и напряжения прикосновения в трёхфазных электрических сетях с изолированной нейтралью использовались: методы симметричных составляющих; теории ошибок; теоретических основ электротехники; математической статистики и теории вероятностей, программное обеспечение Maple, язык программирования Python с библиотеками Numpy, Scipy и Matplotlib.

Основные научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

1) математическое описание определения параметров изоляции в трёхфазной несимметричной электрической сети с изолированной нейтралью на основе применения закономерностей изменения напряжений при искусственном смещении нейтрали;

2) методы определения параметров изоляции, токов однофазного замыкания на землю, тока утечки, и напряжения прикосновения в трёхфазной электрической сети, основано на измерении величин модулей напряжения нулевой последовательности, напряжений фаз и их векторных углов, до и после подключения ёмкостной дополнительной проводимости между фазой электрической сети и землёй с учётом несимметричных напряжений фаз и их симметричных составляющих;

3) оценка электробезопасности горных предприятий базируется на новых экспериментальных данных показателей параметров изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью с учётом разработанных методов;

4) средства повышения эффективности системы электроснабжения путём повышения чувствительности устройства защитного отключения, основанные на комплексном анализе результатов экспериментальных исследований, проведённых в условиях реального функционирования системы электроснабжения горного предприятия.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается: учётом важных процессов, принятием адекватных уровней допущений для математического моделирования явлений, базированием исходных посылок на фундаментальных законах естественных наук и основах теории электрических цепей, сопоставлением качественных параметров результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными в действующих сетях, а также наличием достаточного объёма и результатов экспериментальных исследований.

Реализация результатов работы в промышленности. Методика определения параметров изоляции в электрической сети с изолированной нейтралью, основанная на измерении величин модулей напряжения нулевой последовательности, напряжения фазы относительно земли и их векторных углов, после подключения ёмкостной дополнительной проводимости между фазой электрической сети и землёй внедрена в научно-образовательный процесс Навоийского государственного горного и технологического университета, а также в технологический процесс горного предприятия ТОО «Богатырь Комир».

Внедрение результатов работы в ТОО «Богатырь Комир» приведёт к социальному эффекту в виде улучшения безопасности при работе с электричеством и повышения надёжности электроснабжения (Приложение A).

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной конференции по электрическим, компьютерным и энергетическим технологиям ICECET-2022.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 4 научных трудах, в том числе 1 публикация, входящие в информационную базу Scopus (процентиль – 83) и 2 публикации в изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК. Получены Евразийский патент на изобретение №041128 от 16.09.2022 г. и патент Республики Казахстан на изобретение №35922 от 21.10.2022 г. (Приложение Б).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, основной части из четырёх разделов, заключения. Объем диссертации составляет 94 страницах машинописного текста, содержит 7 таблиц, 32 рисунка, список использованных источников, включающий 64 наименований, 2 приложения.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Описание объекта исследования

Создания требуемого уровня электробезопасности электроустановок и обслуживающего персонала является основным условием труда в настоящее время, котором обеспечивается непрерывное развитие горного при производства, но несмотря на внедрение организационных и технических мероприятий, ориентированные на повышение состояния электробезопасности, проблемная ситуация электротравматизма сохраняется актуальной. Общая доля произволстве. обусловленная травм поражением человека, в током 0,5...3,0%, несущественная _ В свою очередь электротравматизм co смертельным и тяжёлым исходом формируется в их числе такого рода трагических происшествий 20...60% [1-3].

Эти проблемы делают горнодобывающую промышленность одной из самых опасных для выполнения рутинных задач по обслуживанию электрооборудования из-за чрезвычайно суровых условий, в которых работает персонал. Открытое расположение проводов и кабелей, а также эксплуатация электрооборудования в агрессивной среде требуют предельного внимания к мерам электробезопасности.

Снижение состояния изоляции электрооборудования и сетей, а также ненадлежащая постановка ремонтов эксплуатирующих электроустановок и профилактических осмотров служат источником опасности появления аварийных режимов, следствием чего возникает вероятность появления несчастных случаев, повреждением электроустановок с последующим простоем этого оборудования. Важно отметить, что персонал, который занимается эксплуатацией электроприемников, рассчитывает только на защиту от тока утечек на землю. Однако, в процессе эксплуатации, такая защита может быть повреждена или отключена, что может представлять опасность для персонала.

Обеспечение надёжности электрических сетей и оборудования является важным фактором для гарантирования бесперебойной работы производства. Даже небольшой перерыв в работе оборудования может привести к существенному снижению производительности и вызвать значительные экономические потери. Поэтому повышение надёжности электрических сетей и оборудования является ключевым аспектом для обеспечения стабильности производства и эффективности бизнеса.

В случае простоя оборудования, не только производительность страдает, но и возможно повреждение других систем и оборудования в результате перегрузок, коротких замыканий и других аварийных ситуаций. Это может привести к ещё более длительным простоям, а также к дополнительным экономическим потерям. Кроме того, простой оборудования может привести к серьёзным последствиям для безопасности персонала, особенно если это связано с простоями систем автоматического управления и контроля.

Безопасные критерии электробезопасности при эксплуатации системы горного электроснабжения обеспечивается путём правильной организации

профилактических мер безопасности и гарантированной эффективной защиты от аварийных режимов работы электроустановок, посредством разработки новых технических средств. На сегодняшний день в целях защиты от поражения током человека на горном производстве применяются устройства защитного отключения.

Важными требованиями электробезопасности в электрических сетях с изолированной нейтралью значится предельно допустимые значения токов утечки, ОЗЗ и напряжения прикосновения, при котором УЗО должно защитить персонал и оборудование при аварийных режимах [4-6].

1.2 Анализ методов определения параметров изоляции

Состояние изоляции имеет важное значение для обеспечения безопасной и надёжной работы электрических сетей с напряжением до и выше 1000 В. Информация о реальных параметрах изоляции позволяет определить расчётные значения тока ОЗЗ и настроить релейную защиту, а также разработать соответствующие организационные и технические мероприятия. Снижение тока ОЗЗ приводит к уменьшению напряжения прикосновения и расширяет зону безопасной эксплуатации электрооборудования в аварийных ситуациях, что помогает снизить частоту электротравматизма и его последствия.

Полная проводимость изоляции сети определяет ток ОЗЗ [7].

$$Y = \frac{I_o}{U_{ph}};\tag{1.1}$$

$$I_o = Y U_{ph}, \tag{1.2}$$

где *Y* – комплексная проводимость изоляции сети;

 I_o – ток ОЗЗ;

*U*_{ph} – напряжение фазы относительно земли.

Полная проводимость изоляции сети представляется двумя составляющими:

G – «активная проводимость изоляции сети характеризует изолирующие свойства диэлектрика, величину тока утечки» [8].

B – «Емкостная проводимость изоляции сети характеризует емкость сети, то есть количество подключённых потребителей электроэнергии, а также длину воздушных и кабельных линий» [8, р. 282].

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2}.$$
 (1.3)

Соотношение между активной – *G* и емкостной – *B* составляющими зависит от качества и состояния материала диэлектрика и определяется тангенсом угла диэлектрических потерь

$$\tan \delta = \frac{G}{B}.\tag{1.4}$$

В сетях с изолированной нейтралью возможно выполнить измерения сопротивления изоляции, как при наличии, так и при отсутствии рабочего напряжения.

Методы измерения параметров изоляции сети при отсутствии рабочего напряжения обладают простотой и сравнительной безопасностью производство измерений, но имеют немаловажный недостаток, а именно несоответствие полученных данных измерений с реальными значениями параметров изоляции сети.

В целях измерений параметров изоляции сети без снятия рабочего напряжения имеет два варианта осуществления: прямой или косвенный метод. Наиболее простым является прямой метод (метод прямого замыкания на землю), где, искусственно создав ОЗЗ, замеряется ток ОЗЗ с последующими вычислениями по формуле (1.1). Однако само производство измерений имеют ряд трудностей организационного характера, помимо этого, искусственное однофазное замыкание может стать причиной появления на землю перенапряжений в сети и, как следствие, многоместных замыканий на землю. Соответственно, надёжность снижается электроснабжения И уровень электробезопасности для персонала, производящими измерения, вдобавок из-за прикосновения создаются повышения напряжения риски обслуживания электрооборудования.

Различаются косвенные методы по способу смещения нейтральной точки:

1. Подключения дополнительной проводимости.

2. Использование напряжения постороннего источника питания.

Исследование состояния изоляции в трёхфазных фазных электрических сетях с изолированной нейтралью тесно связано с созданием средств измерении и контроля приводимости изоляции, а также устройств защиты при повреждении изоляции. Этим исследованиям посвящены работы [9-31] и др.

Ю.Г. Бацежев разработал «средства обеспечения электробезопасности на горных предприятиях», а также создал «методы для определения параметров изоляции» [32, 33] и «устройства для контроля сопротивления изоляции» [34, 35] с его помощью.

Б.Б. Утегулов занимался научными исследованиями в области «развития теории и разработки способов и средств повышения эффективности систем электроснабжения на горных предприятиях» [10, с. 22]. В результате его участия были созданы методы определения параметров изоляции [36-38] и «устройство направленной защиты линии от однофазного замыкания на землю» [39].

Научные исследования В.И. Петурова и его коллег были направлены на «разработку способов и средств контроля параметров изоляции в рудничных электрических сетях, в том числе устройство контроля сопротивления изоляции трансформаторов отключения на основе тока нулевой зашитного И последовательности, а также на изучение влияния нестационарных режимов на электробезопасность. Были предложены новые способы И средства

оперативного контроля изоляции в электрических сетях горных предприятий, а также средства защиты от токов утечки и опасного воздействия обратной ЭДС выбега электродвигателей» [18, с. 3; 19, с. 1; 21, с. 25; 22, с. 10; 23, с. 142; 24, с.68; 25, с. 10].

1.2.1 Метод амперметра-вольтметра

Метод амперметра – вольтметра (далее – метод AB) является базовым способом определения проводимости изоляции сети [40]. Этот метод был подробно изучен в Московском горном институте при содействии заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, профессора Л.В. Гладилина. Другие методы, описанные в [40, с. 23], нашли ограниченное применение по ряду причин, основной из которых является сложность схемных решений или сложность самих измерений, а в некоторых случаях вышеизложенные сложности совмещены.

Метод АВ объясняется схемой (Рисунок 1.1), имеющей в составе: 3-х сеть с фазами A, B и C; вольтметр PV, регистрирующий фазное напряжение; коммутирующие устройство QF1, создающие металлическое замыкания фазы на землю; коммутирующие устройство QF2, используемый для присоединения дополнительного резистора – G_0 ; коммутирующие устройство QF3, используемый для присоединения дополнительного конденсатора – B_0 ; амперметр PA, измеряющий величину тока O33; B_A, B_B, B_C – ёмкостные проводимости изоляции фаз; G_A, G_B, G_C – активные проводимости изоляции фаз [40, с. 23].



Рисунок 1.1 – Принципиальная электрическая схема применяемая методом АВ

Для вычисления абсолютной величины комплексной проводимости изоляции сети, первым шагом является измерение фазного напряжение вольтметром PV, после записи показаний создаётся металлическое замыкание фазы на землю коммутирующим устройством QF1 и измеряется ток O33 амперметром PA.

Для вычисления абсолютной величины комплексной проводимости изоляции сети, коммутирующим устройством QF1 создаём металлическое замыкание фазы на землю и измеряем ток O33 амперметром PA. Отключаем выключатель нагрузки и вольтметром PV измеряем величину напряжения фазное напряжение.

Результаты измерения служат для вычисления полной проводимости изоляции сети по формуле (1.1):

$$Y = \frac{I_o}{U_{ph}}.$$

В целях нахождения суммарной проводимости изоляции сети вводим дополнительный резистор или конденсатор посредством включения выключателей QF2 или QF3 соответственно, измеряя при этом фазное напряжение вольтметром PV, величину тока амперметром PA.

Полученные результаты измерений позволяют определить суммарную проводимость изоляции сети по формуле:

$$Y_{\Sigma} = \frac{I_{PA}}{U_{ph1}},$$
(1.5)

где *I*_{*PA*} – величина тока, протекающий через подключенный дополнительный резистор или конденсатор;

*U*_{*ph*1} – величина фазного напряжения при присоединении дополнительного резистора или конденсатора.

Путём учёта дополнительной проводимости, вызванной наличием резистора или конденсатора, можно рассчитать полную и суммарную проводимости изоляции в сети. Затем можно определить вещественную и мнимую часть комплексной проводимости изоляции сети.

1. Если в сеть подключён резистор, то можно рассчитать вещественную часть комплексной проводимости изоляции с помощью выражения

$$G = \frac{Y_{\Sigma}^2 - Y^2 - G_0^2}{2G_0},\tag{1.6}$$

и мнимую часть комплексной проводимость изоляции сети

$$B=\sqrt{Y^2-G^2}.$$

2. Если в сеть подключён конденсатор, то можно рассчитать мнимую часть комплексной проводимости изоляции с помощью выражения

$$B = \frac{Y_{\Sigma}^2 - Y^2 - B_0^2}{2B_0},\tag{1.7}$$

и вещественную часть комплексной проводимость изоляции сети

$$G = \sqrt{Y^2 - B^2}.$$

Метод АВ весьма прост, требует минимального времени на проведение измерений и простейшую измерительную аппаратуру. Погрешность вычисления зависит только от применяемых измерительных устройств и не требует дополнительных вычислений с погрешностью.

Основным недостатком метода AB при замыкании на землю считается повышение фазных напряжения до линейных напряжений и риск образования многофазных замыканий на землю.

Отмеченные выше недостатки при измерении полной проводимости состояния изоляции сети методом прямого замыкания на землю, обуславливают в ряде случаев необходимость применения других методов измерения, исключающих прямое замыкание на землю.

1.2.2 Метод амперметра, вольтметра и ваттметра

В работе [6, с. 55] рассмотрен метод амперметра, вольтметра и ваттметра (далее метод ABB), заключающийся в определении параметров изоляции в подземных горных электрических сетях. Метод ABB основан на пофазном подключении конденсаторов звезду в нейтраль, к которому подключается вольтметр, а также производится присоединение конденсаторов, соединённых в звезду, и амперметра с токовыми цепями ваттметра, а цепи напряжения подключены между нейтралью конденсаторной цепи и землёй, где величина модуля тока, проходящего через дополнительную ёмкостную проводимость, а также активная мощность замыкания на землю этой проводимости измеряются в процессе измерений.

Измерения абсолютных величин напряжения – U₀ в нейтральной точке звездообразно соединённых конденсаторов, тока – І, протекающего через дополнительную реактивную проводимость, и активной мощности – P_0 дополнительной реактивной проводимости, проводятся при заданных параметрах УЗО с учётом внутреннего сопротивления измерительных приборов. Затем, используя математические зависимости, определяются параметры изоляции сети:

- входная проводимость изоляции сети

$$Y_{\rm BX} = \frac{I}{U_0};\tag{1.8}$$

- активная составляющая входной проводимости

$$G_{\rm BX} = \frac{P_0}{U_0^2}; \tag{1.9}$$

- ёмкостная составляющая входной проводимости

$$B_{\rm BX} = \sqrt{Y_{\rm BX}^2 - G_{\rm BX}^2}; \tag{1.10}$$

- вещественная часть комплексной проводимости изоляции сети

$$G = G_{\rm BX} - G_{\rm 3y} - G_{\rm BT} - G_{\rm B}, \tag{1.11}$$

где G_{3y} – активная проводимость относительно земли УЗО;

*G*_{вт} – проводимость параллельной цепи ваттметра;

*G*_в – проводимость вольтметра.

– реактивная проводимости изоляции сети

$$B = B_{\rm BX} + B_{\rm 3V},\tag{1.12}$$

где B_{3y} – реактивная проводимость относительно земли УЗО.

ABB Достоинством метода является простота И относительная безопасность при производстве измерений величин модулей напряжения, тока и мощности, а измерительные приборы и дополнительные ёмкости с выключателями имеются службе эксплуатации электроснабжения В предприятия.

Метод ABB имеет существенный недостаток, которым является измерение активной мощности в ёмкостной дополнительной проводимости, что приводит к значительной погрешности, так как дополнительная ёмкостная проводимости значительно превышает вещественную часть комплексного сопротивления изоляции в электрической сети.

1.2.3 Фазочувствительный метод определения параметров изоляции

В работе [41] был разработан фазочувствительный способ определения параметров изоляции в симметричной сети с изолированной нейтралью. Данный способ основывается на измерениях абсолютной величины линейного напряжения, абсолютной величины фазного напряжения после подключения дополнительного резистора и угла сдвига фаз между вектором фазного напряжения и вектором линейного напряжения. Для расчёта параметров изоляции сети необходимо учитывать сопротивление дополнительного резистора, который подключается к сети.

Фазочувствительный способ определения параметров изоляции, иллюстрирован электрической схемой (Рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Принципиальная электрическая схема фазочувствительного способа

Принципиальная электрическая схема, реализующая фазочувствительный способ, имеет в составе:

– 3-х электрическую сеть, с фазами А, В и С;

– вольтметр PV1, регистрирующий фазное напряжения при введении дополнительного сопротивления;

- вольтметр PV2, регистрирующий показания линейного напряжения;

– измерение угла сдвига фаз между вектором фазного напряжения и вектором линейного напряжения используется измерительного прибора PV3;

– коммутационное устройство QF1, присоединяющий дополнительный резистор;

– активная дополнительная проводимость G_0 ;

— ёмкостные проводимости изоляции фаз B_A, B_B, B_C ;

– активные проводимости изоляции фаз G_A , G_B , G_C .

В целях реализации данного метода на действующих электроустановках, первым этапом является коммутация QF1, тем самым присоединяется резистор к фазе «А». Впоследствии коммутации QF1 изменяется состояние сети и вольтметрами PV1, PV2, PV3 регистрируются показания фазного напряжения – U_{ph} , линейного напряжение – U_L и их угол сдвига – α .

Располагая результатами измерений и учитывая величину дополнительного резистора – G_0 , можно вычислить следующие параметры по математическим формулам:

- вещественная часть комплексной проводимость изоляции сети

$$G = \frac{U_L U_{ph} G_0 \cos \alpha}{U_L^2 + 3U_{ph}^2 - 2\sqrt{3} U_L U_{ph} \sin \alpha};$$
(1.13)

- ёмкостная проводимость изоляции сети

$$B = \frac{U_L (U_L - \sqrt{3}U_{ph} \sin \alpha) G_0}{U_L^2 + 3U_{ph}^2 - 2\sqrt{3}U_L U_{ph} \sin \alpha}.$$
 (1.14)

Абсолютная величина комплексной проводимости будет равна квадратному корню из суммы активной и ёмкостной проводимостей.

Путём исключения источника ННП фазочувствительный способ обеспечивает удовлетворительную точность и неприхотливое производство измерений.

Реализация этого способа в несимметричных сетях, предопределяет повреждение изоляции фазы к образованию дополнительной проводимости G_0 , то есть

$$G_A + G_0 \neq G_B \neq G_C \neq G. \tag{1.15}$$

Для определения параметров изоляции сети при соотношениях активных проводимостей $G_A + G_0 \neq G_B \neq G_C \neq G$, на пример при неисправности целостности изоляции фазы в работе [9], разработан фазочувствительный способ для несимметричных сетей.

Осуществления фазочувствительного метода в несимметричных сетях заключается на смещение нейтральной точки и измерений показаний фазного напряжения – U_{ph} , U_{ph1} , линейного напряжения – U_L , и угла сдвига фаз между фазным напряжением и линейным напряжением – α, α_1 , до и после присоединения резистора G_1 . Зафиксированные вышеупомянутые показания с учетом величина проводимости дополнительного резистора рассчитываются:

– активная проводимость повреждения изоляции фазы

$$G_{0} = \frac{U_{ph1}G_{1}\cos\alpha_{1}\left(U_{L}^{2} + 3U_{ph}^{2} - 2\sqrt{3}U_{L}U_{ph}\sin\alpha\right)}{U_{ph}\cos\alpha\left(U_{L}^{2} + 3U_{ph1}^{2} - 2\sqrt{3}U_{L}U_{ph1}\sin\alpha_{1}\right) - U_{ph1}\cos\alpha_{1}\left(U_{L}^{2} + 3U_{ph}^{2} - 2\sqrt{3}U_{L}U_{ph}\sin\alpha\right)},$$
(1.16)

– мнимая часть комплексной проводимости изоляции сети

$$B = \frac{\sqrt{3}U_{L}U_{ph1}\cos\alpha_{1}G_{1}(U_{L} - U_{ph}\sin\alpha)}{U_{ph}\cos\alpha(U_{L}^{2} + 3U_{ph1}^{2} - 2\sqrt{3}U_{L}U_{ph1}\sin\alpha_{1}) - U_{ph1}\cos\alpha_{1}(U_{L}^{2} + 3U_{ph}^{2} - 2\sqrt{3}U_{L}U_{ph}\sin\alpha);}$$
(1.17)

- вещественная часть комплексной проводимости изоляции сети

$$G = \frac{\sqrt{3}U_{L}U_{ph}U_{ph1}G_{1}\cos\alpha\cos\alpha_{1}}{U_{ph}\cos\alpha\left(U_{L}^{2} + 3U_{ph1}^{2} - 2\sqrt{3}U_{L}U_{ph1}\sin\alpha_{1}\right) - U_{ph1}\cos\alpha_{1}\left(U_{L}^{2} + 3U_{ph}^{2} - 2\sqrt{3}U_{L}U_{ph}\sin\alpha\right).}$$
(1.18)

Несимметрия напряжений фаз негативно влияет на точность вычисление, а также из-за применения специального устройства для регистрации угла сдвига фаз, рассмотренные фазочувствительные методы имеют потенциальный недостаток.

1.2.4 Метод определения характеристик изоляции, основанный на применении внешнего источника напряжения

В.И. Петуров разработал математические зависимости проводимостей изоляции и симметричных составляющих токов, протекающих под действием независимого источника питания, которые в свою очередь позволяет рассчитать искомые характеристики изоляции [18, с. 2].

Принципиальная схема (Рисунок 1.3) содержит «источник питания 1 с заземлителем, в выходную цепь которого включён токоограничивающий элемент 2 с параметрами \vec{z}_0 , который другим концом подключен к общей точке фильтра 3 напряжения нулевой последовательности (ФННП), образованного соединёнными в звезду сопротивлениями $\vec{z}_1, \vec{z}_2, \vec{z}_3$, причем $\vec{z}_1 = \vec{z}_2 = \vec{z}_3$. В качестве этих сопротивлений, а также токоограничивающего элемента \vec{z}_0 могут использоваться резисторы, емкости или индуктивности. Последовательно с сопротивлениями $\vec{z}_1, \vec{z}_2, \vec{z}_3$ включены амперметры 4,5,6 и токовые обмотки фазометров 7,8,9. Обмотки напряжения фазометров 7,8,9 и вольтметр 10 включены параллельно источнику питания 1. В свою очередь ФИНП 3 подключается к фазам сети» [18, с. 2]. На схеме Рисунок 1.3) показаны также «полные сопротивления изоляции фаз сети относительно земли $\vec{z}_A, \vec{z}_B, \vec{z}_C,$ параллельно соединённых активных R_A, R_B, R_C , складывающиеся ИЗ емкостных сопротивления C_A , C_B , C_C » [18, с. 2].

В процессе измерений регистрируются значения «токов I_1, I_2, I_3 в ветвях ФННП и их фазы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ относительно напряжения источника питания, после чего определяются искомые параметры сопротивления изоляции по следующим соотношениям:

$$\vec{z}_A = \frac{\vec{E}\vec{Y}_0 - I_1 e^{j\varphi_1} - I_2 e^{j\varphi_2} - I_3 e^{j\varphi_3}}{I_1 e^{j\varphi_1} \vec{y}_0} - \vec{z}_1,$$
(1.19)

$$\vec{z}_{B} = \frac{\vec{E}\vec{Y}_{0} - I_{1}e^{j\varphi_{1}} - I_{2}e^{j\varphi_{2}} - I_{3}e^{j\varphi_{3}}}{I_{2}e^{j\varphi_{2}}\vec{y}_{0}} - \vec{z}_{2},$$
$$\vec{z}_{C} = \frac{\vec{E}\vec{Y}_{0} - I_{1}e^{j\varphi_{1}} - I_{2}e^{j\varphi_{2}} - I_{3}e^{j\varphi_{3}}}{I_{3}e^{j\varphi_{3}}\vec{y}_{0}} - \vec{z}_{3},$$

где $\vec{E} = Ee^{j\varphi}$ – напряжение источника питания 1 (начальную фазу которого полагаем равной нулю, $\varphi = 0$), B;

 $\vec{y}_0 = \frac{1}{\vec{z}_0}$ – комплекс проводимости токоограничивающего элемента 2, См» [18, с. 2].



Рисунок 1.3 – Принципиальная электрическая схема Петурова В.И.

Данный метод основан на декомпозиции комплексных полных сопротивлений фаз на активную и ёмкостную составляющие. Это позволяет определить параметры сопротивления изоляции отдельных фаз сети и увеличивает надёжность эксплуатации электроустановок с изолированной нейтралью, позволяя быстрее выявлять и устранять повреждения. Одним из главных преимуществ разработанного метода является его безопасность, так как отсутствуют дополнительные коммутации в процессе измерений [18, с. 2].

Несмотря на достоинства, способ также обладает недостатками, такими как необходимость дополнительного источника питания, ухудшение качества

электрической энергии и невозможность контроля изоляции, когда ёмкостное сопротивление ниже активной.

1.3 Исследование устройств непрерывного контроля тока утечки на горных предприятиях

Растущие требования по охране труда и технике безопасности к электроустановкам горных предприятий требуют комплексных мер по защите человека и электроустановок от возможных опасностей. Например, нарушение изоляции в системе не должно приводить к непреднамеренным действиям электроустановок. В этих целях используются различные виды УЗО напряжением до 1 кВ.

Первый монитор постоянной изоляции основывается на принципе использования трех ламп, включённые между фазами и землёй (Рисунок 1.4). В надёжной электрической сети три лампы образуют сбалансированную трёхфазную нагрузку, все они горят одинаково ярко. При нарушении целостности изоляции, одна из трех ламп замыкается накоротко из-за нарушения полного сопротивления изоляции. На клеммах этой лампы снижается напряжение, и яркость лампы уменьшается. Однако напряжение на клеммах двух других ламп увеличивается до тех пор, пока не будет достигнуто линейное напряжение и их светимость также увеличивается [42].

Эта система проста в установке и использовании. Однако, учитывая, что его практический порог срабатывания низок, были быстро предприняты попытки обнаружить на принципе снижения полного сопротивления изоляции, чтобы предвидеть неисправность [42].



Рисунок 1.4 – Первый монитор постоянной изоляции

Использования вентильных схем для контроля проводимости изоляции впервые была продемонстрирована Харьковским электромеханическим заводом в 1939 г, где выпрямленные токи трёхфазной сети образовывали дифференцируемый ток, который имел порог срабатывания устройства (Рисунок 1.5). В дальнейшем было разработано большое количество различных устройств на принципе вентильных схем, где отличается разнообразием электронных подсистем.



Рисунок 1.5 – Контроль выпрямленных токов сети

Наиболее широкое применение нашли устройства контроля изоляции с измерением изоляции путём наложения постоянного тока (Рисунок 1.6). требует использования измерение изоляции сопротивление Постоянное активных систем вместо ранее использовавшихся пассивных систем. Это сопротивление может быть точно измерено в сетях с постоянным напряжением, поэтому первые устройства контроля изоляции, имели расположение между фазами и землёй, где накладывается слабый постоянный ток, который протекает через место повреждения. Эта простая и надёжная техника до сих пор широко используется, по сей день, но не позволяет отслеживать неисправности. Недостаток этих устройств, когда они используются в смешанных сетях (содержащие выпрямители без гальванической развязки), устройства могут ложно срабатывать или находится в слепой зоне, если неисправность присутствует в сети постоянного тока. За ними последовали устройства контроля изоляции с переменным током, где рабочий ток накладывался на низкой частоте (<10 Гц), по тому же принципу. Хотя эти устройства контроля изоляции позволяют отслеживать неисправности в

реальном времени, они могут срабатывать ложно, из-за кабельных ёмкостей, которые рассматриваются как неисправность изоляция и помехи от преобразователей частоты [42].



Рисунок 1.6 – Наложение на сеть постоянного оперативного тока

Так же в электрических сетях нашло применения устройств защитного отключения, использующие метод симметричных составляющих, а именно в симметричном режиме эксплуатации, напряжение и токи нулевой последовательности равны 0.

В настоящее время, учитывая, что частое использования смешанных сетей типа переменный / постоянный, а также применения изменяемой частоты, новые устройства контроля изоляции способны следить за изоляцией на всех типах сетей. Некоторые устройства используют импульсы прямоугольной формы на очень малой частоте ($\approx 1 \ \Gamma$ ц), что обеспечивает помехоустойчивость от ёмкостных токов утечек на землю, так как сравнивается стробирующие противоположных знаков. Помимо этого, устройства импульсы ЭТИ универсальны в использовании и легко адаптируется к современным сетям, в частности, питание электронных устройств, которые часто деформируют переменный ток. Однако их время отклика в зависимости на способность сети к утечке на землю, может достигать целых несколько минут и не позволяет выявление периодически возникающих неисправностей. Чтобы компенсировать ограничения использования этих устройств контроля изоляции для очень

длинных сетей и сети с большим количеством ёмкостных фильтров, низкочастотный внедрение переменного тока техника была усовершенствована путём «синхронной демодуляция».

Рудничные устройства защитного отключения типа РУ-330.1М, УАКИ, АЗАК, АЗУР и др., обладающими дополнительными возможностями снижения ёмкостной составляющей тока утечки, начали серийно выпускаться промышленностью с 1963 года [43-45].

В горнодобывающих предприятиях широко используются реле утечки типа УАКИ («устройства автоматического контроля изоляции» [43, с. 90]), которые отслеживают ток утечки и при его превышении порога срабатывания, отключают питание сети, а также выполняют функцию компенсации ёмкостного тока утечки с помощью дросселя.

Устройства АЗАК типа («аппарат зашиты с автоматической [44, с. 84]), работающие на компенсацией» вентильной схеме, были разработаны как замена устройств типа УАКИ. Они также компенсируют ёмкостные токи утечки, но в отличие от УАКИ используют индуктивность управляемого дросселя насыщения, которая автоматически настраивается в резонанс с ёмкостью сети. Однако устройства АЗАК были сняты с производства без достаточного объяснения, и вместо них было запущено производство устройства типа АЗШ («аппарат защиты шахтный» [45]). Это устройство накладывает оперативный ток на электрическую сеть и управляется регулятором дросселя, который резонансно соотносится с ёмкостью изоляции недостатком этого устройства является более сети. Однако, сложное исполнение схемы по сравнению с предыдущими устройствами.

На сегодняшний день производство шахтных УЗО типа АЗУР было успешно налажено. Они по своей сути неотличимы от устройств типа АЗШ.

Исследования автора [46] демонстрируют, что применяемые реле утечки типа АЗАК, УАКИ, АЗШ и др. для компенсации токов утечек до безопасных величин не только не обеспечивают защиту, но и, к сожалению, становятся причиной аварий на горнодобывающем производстве. Поэтому, в настоящее время на горных предприятиях предложенные ранее методы не нашли применения профилактики, основное средство обеспечивающее как бесперебойность электроснабжения безопасность И эксплуатации электроустановок.

Зарубежные производители устройств защитного отключения на принципе наложения оперативного тока, являются такие компании как ABB, Eaton, Littelfuse, Mitsubishi Electric, Schneider Electric, Hakel, Bender GmbH@Co.KG, Legrand, Dold, Criprotec, Megacon и др.

С помощью системы поиска повреждений изоляции неисправные участки сети и/или устройства могут быть обнаружены во время работы, т.е. нет необходимости отключать всю систему. В целях устранения неполадок электрическую измерительные импульсы накладываются на сеть с которые, в свою очередь, улавливаются изолированной нейтралью, И измерительными трансформаторами тока и с помощью анализируются

использования измерительного трансформатора тока/выхода можно легко идентифицировать неисправный участок (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Иллюстрация устройств защитного отключения компании Bender.

На основе вышеизложенного, существующие устройства защитного отключения обеспечивают требуемую безопасность, но имеют и недостаток, связанный с наложением оперативного тока. Так на сегодняшний день, в горнодобывающем производстве применяются нелинейные активно сопротивления, которые загрязняют сеть гармоническими колебаниями. Эти колебания могут привести к ложным срабатываниям или отказу вышеупомянутых устройств.

1.4 Задачи исследований

диссертационной работы заключается в Основная задача данной получении новых научных результатов, которые направлены на повышение эффективности системы электроснабжения горнодобывающих предприятий. Для достижения этой цели проводится разработка методов определения параметров изоляции в электрических сетях на основе научных исследований. быть Эти результаты могут применены В практике эксплуатации электроустановок И обеспечивают повышение уровня безопасности И надёжности электроснабжения горнодобывающих предприятий.

Для того чтобы достичь основной цели исследования - повышение эффективности системы электроснабжения, были определены и успешно решены следующие задачи:

1 Установить математические зависимости для определения параметров изоляции в несимметричной электрической сети с изолированной нейтралью.

2 Разработать методы определения параметров изоляции, токов однофазного замыкания на землю, тока утечки и напряжения прикосновения в трёхфазной несимметричной сети с изолированной нейтралью.

3 Провести численное экспериментальное исследование предлагаемого метода определения параметров изоляции, чтобы сравнить его результаты.

4 Провести экспериментальное исследование состояния изоляции и тока однофазного замыкания на землю при добыче полезных ископаемых открытым способом в сети напряжением до 1 кВ на экскаваторах.

5 Провести экспериментальные исследования существующих УЗО по критериям электробезопасности при нормальном и аварийном режимах в трёхфазной электрической сети с изолированной нейтралью.

6 Разработать средства для повышения эффективности системы электроснабжения горных предприятий.

Выводы по первому разделу

В данном разделе был проанализирован ряд исследований, касающихся методов определения параметров изоляции в электрических сетях, а также рассмотрены УЗО, применяемые в горной промышленности.

Представлена систематизированная классификация методов, используемых для определения параметров изоляции в электрической сети. Это позволяет лучше понять и сравнить различные подходы, применяемые в исследованиях по этой теме. Такие исследования являются важными для обеспечения безопасной и бесперебойной работы электроустановок на предприятиях.

Приводятся общие характеристики УЗО и их основные принципы работы, а также описываются различные методы измерения параметров изоляции, их преимущества и недостатки.

На основании проведённых исследований и публикаций, как в нашей стране, так и за рубежом, можно сделать вывод, что разработка новых методов определения параметров изоляции сети является важной задачей, поскольку она способствует повышению уровня электробезопасности и обеспечению бесперебойности системы электроснабжения предприятий.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ

2.1 Исходные положения

Развитие горнодобывающих производств непрерывно связано с увеличением единичных мощностей вскрышных и добывающих машин, внедрением более современных технологических процессов на карьерах, что свою очередь, по требованиям обеспечения безопасности и бесперебойности системы внутреннего электроснабжения усиливаются.

Обеспечение бесперебойности питания электрической энергии электрифицированного горнодобывающего оборудования и безопасности его относится вопросов эксплуатации к комплексу повышения энергоэффективности, особое гле место предъявляется к созданию современных методик мониторинга и контроля состояния изоляции.

эффективной эксплуатации электрических сетей с системой Для заземления IT желательно владеть информацией о расчётном значений тока ОЗЗ, на основании чего, разрабатываются организационно-технические обеспечения безопасности бесперебойности мероприятия для И электроснабжения горнотранспортного оборудования. Все организационнотехнические мероприятия заключаются к уменьшению значение тока замыкания на землю.

Важность разработки метода определения параметров изоляции сети определяется также тем, что, он может быть использован в других отраслях промышленности, где эксплуатируются электрические сети с системой заземления IT.

К способам измерения характеристик изоляции сети предъявляется целый ряд требований, а именно:

1. Измерения должны проводиться без перерывов в подаче электрической энергии потребителям.

2. Процедура измерений не должна вызывать повреждений изоляции электроустановок.

3. Измерения необходимо производить с использованием небольшого количества электрооборудования и приборов.

4. Производство работ по определению параметров изоляции сети должно быть безопасным как для исследователей, так и для персонала, обслуживающего электроустановки.

5. Измерения исходных величин должны быть достаточно точными и по возможности иметь малую продолжительность производства работ по измерению.

6. Погрешность метода не должна превышать 10%.

7. Возможность измерения при несимметричных напряжениях.

На основании анализа существующих методов, указанных в разделе 1, с учётом перечисленных требований, для экспериментальных исследований характеристик изоляции в сетях с системой заземления IT был получен вывод, что разработанные ранее методы далеко не полностью отвечают основным требованиям.

В связи с этим требуется дальнейшего развития средств контроля параметров изоляции в совокупности с осуществлением профилактических процедур и периодических измерений.

2.2 Теоретические основы метода определения параметров изоляции

С целью вычислений проводимостей изоляции сети и её составляющих без отключения потребителей электроэнергии предлагаем осуществить по новому разработанному методу, путём искусственного смещения нейтральной точки вследствие присоединения дополнительной проводимости.

Из теоретических основ курса электротехники [47] хорошо известное соотношение между напряжением нулевой последовательности и напряжением между фазой и землёй через изоляцию сети:

$$\overline{U}_N = \frac{\overline{U}_A y_A + \overline{U}_B y_B + \overline{U}_C y_C}{y_A + y_B + y_C + y_N},$$
(2.1)

где *у_N* – полная проводимость изоляции сети, и рассчитывается геометрической суммой активной проводимости и реактивной проводимости

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \, .$$

Используя метод симметричных составляющих, преобразуем (2.1) в

$$\overline{U}_N = \frac{(\overline{U}_1 + \overline{U}_2 + \overline{U}_0)y_A + (\alpha^2\overline{U}_1 + \alpha\overline{U}_2 + \overline{U}_0)y_B + (\alpha\overline{U}_1 + \alpha^2\overline{U}_2 + \overline{U}_0)y_C}{y_A + y_B + y_C + y_N}, \quad (2.2)$$

где *α* – оператор поворота вектора, который поворачивает вектор против часовой стрелки на 120°;

 \overline{U}_1 , \overline{U}_2 , \overline{U}_0 – прямая, обратная и нулевая последовательности фазовых напряжений.

Предполагаем симметричную трёхфазную электрическую сеть, в которой проводимость изоляции сети между фазами и землёй равна $y_a = y_b = y_c$; соответственно, напряжение смещения нейтрали равно нулю.

Для расчёта проводимостей изоляции сети по предложенному способу подключаем дополнительную проводимость G_0 ; в нашем случае подключаем его к фазе «А», где

$$y_N = G - jB. \tag{2.3}$$

Подключив дополнительную проводимость G_0 к фазе «А» и подставив значение проводимости из (2.3) в (2.2), после преобразования, зная при этом $1 + \alpha + \alpha^2 = 0$, мы получаем

$$\overline{U}_N = U_{A1}G_0 \frac{(\cos \alpha + j \sin \alpha)}{G + G_0 - jB},$$
(2.4)

где U_{A1} – напряжение фазы «А» после присоединения дополнительного резистора;

α – фазовый угол напряжения фаза «А».

Поскольку формула напряжения смещения нейтрали выражена в комплексной форме, то разложим её на вещественную и мнимую часть, для чего числитель и знаменатель (2.4) умножаются на $G + G_0 + jB$. Затем (2.4) примет форму:

$$\overline{U}_N = U_{A1}G_0 \left[\frac{(G+G_0)\cos\alpha - B\sin\alpha}{(G+G_0)^2 + B^2} + j \frac{B\cos\alpha + (G+G_0)\sin\alpha}{(G+G_0)^2 + B^2} \right].$$
 (2.5)

Обозначим левую часть формулы (2.5) через

$$U_N \cos \varphi = U_{A1} G_0 \left(\frac{(G + G_0) \cos \alpha - B \sin \alpha}{(G + G_0)^2 + B^2} \right), \tag{2.6}$$

где $U_N \cos \varphi$ – активная составляющая НПП.

Правая часть (2.5) это:

$$U_N \sin \varphi = U_{A1} G_0 \left(\frac{B \cos \alpha + (G + G_0) \sin \alpha}{(G + G_0)^2 + B^2} \right), \tag{2.7}$$

где $U_N \sin \varphi$ – мнимая составляющая НПП;

ф – фазовый угол напряжения нулевой последовательности.

Решая совместно (2.6) и (2.7) вместе, мы находим:

Активную проводимость изоляции сети:

$$G = G_0 \left(\frac{U_{A1} \cos(\varphi - \alpha)}{U_N} - 1 \right); \tag{2.8}$$

Ёмкостную проводимость изоляции сети:

$$B = \frac{U_{A1}G_0 \sin(\varphi - \alpha)}{U_N}.$$
(2.9)

Подставляя значения выражений (2.8) и (2.9) в уравнение (1.3), получаем полную проводимость изоляции сети



Рисунок 2.1 – Трёхфазная векторная диаграмма напряжений для первого квадранта

Для первого квадранта, как показано на векторной диаграмме (Рисунок 2.1), угол α изменяется между $3\pi/2 < \alpha < 2\pi$, тогда угол $\alpha - \varphi - \pi$ определяется теоремой косинуса измеренными значениями величин напряжения U_{ph} , U_{A1} , U_N :

$$\cos(\alpha - \varphi - \pi) = -\cos(\varphi - \alpha) = \frac{U_{A1}^2 + U_N^2 - U_{ph}^2}{2U_{A1}U_N}.$$
(2.11)

Решая уравнение(2.10), используя формулу (2.11), получаем выражение, по которому находим полную проводимость изоляции сети

$$Y = \frac{G_0}{U_N} \sqrt{2U_{A1}^2 + 2U_N^2 - U_{ph}^2}.$$
 (2.12)

По полученным данным определяются: – ёмкость электрической сети

$$C = \frac{B}{2\pi f}; \tag{2.13}$$

- тангенс угла диэлектрических потерь

$$\tan \delta = \frac{B}{G}.$$

Разработанный метод иллюстрируется электрической схемой (Рисунок 2.2), где в составе: трёхфазная электрическую сеть TR с фазами A, B и C; анализатор качества электроэнергии PQA, регистрирующий значение фазного напряжения – U_{A1} , векторный угол фазы «А» по отношению к земле – α , величину ННП – U_N , векторный угол ННП – φ при присоединении дополнительного резистора; коммутирующий аппарат QF1, присоединяющий дополнительный резистор; проводимость резистора – G_0 ; реактивные проводимости изоляции фаз B_A , B_B , B_C ; активные проводимости изоляции фаз G_A , G_B , G_C .



Рисунок 2.2 – Принципиальная электрическая схема разработанного метода при присоединении резистора

Для того чтобы вычислить проводимости изоляции сети в первую очередь следует произвести регистрацию действующих величин напряжений фазы «А» относительно земли и нулевой последовательности, а также их фазовых углов. После регистрации данных, коммутирующим аппаратом QF1 присоединяется дополнительная активная проводимость G_0 , благодаря этому показатели электрической сети изменяются, и все эти изменения также регистрируются анализатором качества электроэнергии PQA.

По полученным данным измерений показателей фазного напряжения – U_{A1} и ННП – U_N , векторного угла фазы «А» по отношению к земле – α и векторного угла ННП – φ , а также с учетом проводимости резистора – G_0 ,

рассчитываются значения проводимости изоляции сети по формулам (2.8), (2.9) и (2.12).

2.3 Анализ погрешности определения параметров изоляции сети

На первом месте к предъявляемым требованиям метода определения параметров изоляции сети считается точность измерений. В добавок к этому, измерения проводимости изоляции сети невозможно выполнить на прямую, тем самым возникает необходимость в оценке точности полученных данных при косвенном измерениях величин. В результате анализа погрешности выводятся практические рекомендации, содержащие требуемую точность измерений, безопасную эксплуатации электроустановок при производстве измерений.

Реализация анализа погрешности разработанного метода, сводящиеся в раскрытии соотношений величин проводимостей изоляции сети, от измеряемых показаний приборов, которыми в нашем случае являются максимальные мгновенные значения фазного напряжения и ННП до и после присоединения дополнительной проводимости. Конечным результатом точности определения искомых величин по предложенным выше способам будет отношение относительной погрешности измеряемой величины к погрешности измеряемой величины к погрешности измеряемой.

Используя основные положения теории ошибок и математического анализа, выполним анализ погрешностей [47-50].

Пусть искомая величина определяется выражением:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$
 (2.14)

где $x_1, x_2, ..., x_n$ – величины, определяющие *у* и подвергаемые прямым измерениям.

При этом среднеквадратичная погрешность косвенного измерения будет определяться согласно выражению в общем виде:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\Delta x_n\right)^2},$$
(2.15)

где $\frac{\partial y}{\partial x_1}, \frac{\partial y}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial y}{\partial x_n}$ – частные производные функции $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n);$ $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ – абсолютные погрешности прямых измерений x_1, x_2, \dots, x_n .

Относительная среднеквадратичная погрешность определяется по формуле:

$$\Delta y_* = \Delta y \cdot y^{-1}. \tag{2.16}$$

По формулам (2.14), (2.15), (2.16) вычисляем относительные и абсолютные погрешности разработанного метода.

Относительная погрешность определения активной проводимости

Использую формулу (2.8) вычисляем относительную погрешность определения вещественной части комплексной проводимости:

$$G = G_0 \left(\frac{U_{A1} \cos(\varphi - \alpha)}{U_N} - 1 \right),$$

где $U_{A1}, U_N, \varphi - \alpha = z, G_0$ – регистрируемые данные при прямых измерениях.

ОП функции определения активной проводимости вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_{G} = \frac{\Delta G}{\Delta} = \frac{1}{G} \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial G}{\partial U_{A1}} \Delta U_{A1}\right)^{2} + \left(\frac{\partial G}{\partial U_{N}} \Delta U_{N}\right)^{2} + \left(\frac{\partial G}{\partial \cos(z)} \Delta \cos(z)\right)^{2} + \left(\frac{\partial G}{\partial G_{0}} \Delta G_{0}\right)^{2}}, \qquad (2.17)$$

где $\partial G \partial U_{A1}^{-1}$; $\partial G \partial U_N^{-1}$; $\partial G \partial \cos(z)^{-1}$; $\partial G \partial G_0^{-1}$ – частные производные функции $G = f(U_{A1}, U_N, \cos(z), G_0)$.

Определяем частные производные функции $G = f(U_{A1}, U_N, cos(z), G_0)$ по переменным $U_{A1}, U_N, cos(z), G_0$:

$$\partial G \partial U_{A1}^{-1} = \frac{G_0 \cos(z)}{U_N};$$

$$\partial G \partial U_N^{-1} = -\frac{G_0 U_{A1} \cos(z)}{U_N^2};$$

$$\partial G \partial \cos(z)^{-1} = -\frac{G_0 U_{A1} \sin(z)}{U_N};$$

$$\partial G \partial G_0 = \frac{U_{A1} \cos(z)}{U_N} - 1.$$
(2.18)

Абсолютные погрешности прямых измерений величин U_{A1} , U_N , cos(z), G_0 представляют собой – ΔU_{A1} , ΔU_N , $\Delta cos(z)$, ΔG_0 которые детерминируются зависимостями:

$$\Delta U_{A1} = U_{A1} \Delta U_{A1*};$$

$$\Delta U_N = U_N \Delta U_{N*};$$

$$\Delta \cos(z) = \cos(z) \Delta \cos(z_*);$$

$$\Delta G_0 = G_0 \Delta G_{0*},$$

(2.19)

где ΔU_{A1*} ; ΔU_{N*} ; $\Delta cos(z_*) - O\Pi$ измерительных цепей напряжения;

 ΔG_{0*} – ОП измерительного устройства, которое регистрирует дополнительную проводимость, введённую в фазу «А».

При этом полагаем $\Delta U_{A1*} = \Delta U_{N*} = \Delta \cos(z_*) = \Delta G_{0*} = \Delta$ с целью вычисления ОП измерительных устройств.

После замены в уравнении (2.17) переменных на их частные производные (2.18) и частные абсолютные погрешности (2.19), при этом полагаем $\Delta U_* = \Delta G_0 = \Delta$, полученное уравнение может быть дополнительно упрощено и приведено к более простому виду:

$$\varepsilon_G = \Delta \sqrt{\frac{2U_{A1}^2 \cos(z)^2 + U_{A1}^2 \cos(z)^2 \sin(z)^2 + (U_{A1} \cos(z) - U_N)^2}{(U_{A1} \cos(z) - U_N)^2}}.$$
 (2.20)

Сформулированное выражение (2.20) отобразим в относительных единицах, и используя программное обеспечение MS Excel, построим график:

$$\varepsilon_{G} = \Delta \sqrt{\frac{2U_{A*}^{2}\cos(z)^{2} + U_{A*}^{2}\cos(z)^{2}\sin(z)^{2} + (U_{A*}\cos(z) - 1)^{2}}{(U_{A*}\cos(z) - 1)^{2}}},$$
 (2.21)

где $U_{A*} = U_{A1} * U_N^{-1}$.

Относительная погрешность определения ёмкостной проводимости

Использую формулу (2.9) вычисляем ОП определения ёмкостной проводимости:

$$B = \frac{U_{A1}G_0\sin(\varphi - \alpha)}{U_N},$$

где U_{A1} , U_N , $\varphi - \alpha = z$, G_0 – регистрируемые данные при прямых измерениях.

Относительная среднеквадратичная погрешность функции определения ёмкостной проводимости вычисляется по уравнению:

$$\varepsilon_{B} = \frac{\Delta B}{\Delta} = \frac{1}{B} \sqrt{ \left(\frac{\partial B}{\partial U_{A1}} \Delta U_{A1} \right)^{2} + \left(\frac{\partial B}{\partial U_{N}} \Delta U_{N} \right)^{2} + \left(\frac{\partial B}{\partial \cos(z)} \Delta \cos(z) \right)^{2} + \left(\frac{\partial B}{\partial G_{0}} \Delta G_{0} \right)^{2}}, \qquad (2.22)$$

где $\partial B \partial U_{A1}^{-1}$; $\partial B \partial U_N^{-1}$; $\partial B \partial \cos(z)^{-1}$; $\partial B \partial G_0^{-1}$ – частные производные функции $B = f(U_{A1}, U_N, \cos(z), G_0)$.

Определяем частные производные функции $B = f(U_{A1}, U_N, cos(z), G_0)$ по переменным $U_{A1}, U_N, cos(z), G_0$:

$$\partial B \partial U_{A1}^{-1} = \frac{G_0 \sin(z)}{U_N};$$

$$\partial B \partial U_N^{-1} = -\frac{G_0 U_{A1} \sin(z)}{U_N^2};$$

$$\partial B \partial \cos(z)^{-1} = \frac{G_0 U_{A1} \cos(z)}{U_N};$$

$$\partial B \partial G_0 = \frac{U_{A1} \sin(z)}{U_N}.$$

(2.23)

Абсолютные погрешности прямых измерений величин U_{A1} , U_N , cos(z), G_0 представляют собой – ΔU_{A1} , ΔU_N , $\Delta cos(z)$, ΔG_0 , которые детерминируются математическими зависимостями:

$$\Delta U_{A1} = U_{A1} \Delta U_{A1*};$$

$$\Delta U_N = U_N \Delta U_{N*};$$

$$\Delta \cos(z) = \cos(z) \Delta \cos(z_*);$$

$$\Delta G_0 = G_0 \Delta G_{0*},$$

(2.24)

где ΔU_{A1*} ; ΔU_{N*} ; $\Delta cos(z_*)$ – ОП измерительных цепей напряжения;

 $\Delta G_{0*} - O\Pi$ измерительного устройства, которое регистрирует дополнительную проводимость, введённую в фазу «А».

При этом полагаем $\Delta U_{A1*} = \Delta U_{N*} = \Delta cos(z_*) = \Delta G_{0*} = \Delta$ с целью вычисления ОП измерительных устройств.

После замены в уравнении (2.22) переменных на их частные производные (2.23) и частные абсолютные погрешности (2.24), при этом полагаем $\Delta U_* = \Delta G_0 = \Delta$, полученное уравнение может быть дополнительно упрощено и приведено к более простому виду:

$$\varepsilon_B = \Delta \sqrt{\frac{\cos(z)^4 + 3\sin(z)^2}{\sin(z)^2}}.$$
(2.25)

Сформулированное уравнение (2.25) отобразим в относительных единицах, и используя программное обеспечение MS Excel, построим график.

Относительная погрешность определения полной проводимости

Использую формулу (2.12) вычисляем ОП определения полной проводимости:

$$Y = \frac{G_0}{U_N} \sqrt{2U_{A1}^2 + 2U_N^2 - U_{ph}^2} ,$$

где U_{A1} , U_N , U_{ph} , G_0 – регистрируемые данные при прямых измерениях.

Относительная среднеквадратичная погрешность функции определения полной проводимости вычисляется по уравнению:

$$\varepsilon_{Y} = \frac{\Delta Y}{\Delta} = \frac{1}{Y} \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial Y}{\partial U_{A1}} \Delta U_{A1}\right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial U_{N}} \Delta U_{N}\right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial U_{ph}} \Delta U_{ph}\right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial G_{0}} \Delta G_{0}\right)^{2}}, \qquad (2.26)$$

где $\partial Y \partial U_{A1}^{-1}$; $\partial Y \partial U_N^{-1}$; $\partial Y \partial U_{ph}^{-1}$; $\partial Y \partial G_0^{-1}$ – частные производные функции $Y = f(U_{A1}, U_N, U_{ph}, G_0)$.

Определяем частные производные функции $Y = f(U_{A1}, U_N, U_{ph}, G_0)$ по переменным U_{A1}, U_N, U_{ph}, G_0 :

$$\partial Y \partial U_{A1}^{-1} = \frac{G_0 \cos(z)}{U_N};$$

$$\partial Y \partial U_N^{-1} = -\frac{G_0 U_{A1} \cos(z)}{U_N^2};$$

$$\partial Y \partial U_{ph} = -\frac{G_0 U_{A1} \sin(z)}{U_N};$$

$$\partial Y \partial G_0 = \frac{U_{A1} \cos(z)}{U_N} - 1.$$
(2.27)

Абсолютные погрешности прямых измерений величин U_{A1} , U_N , cos(z), G_0 представляют собой – ΔU_{A1} , ΔU_N , $\Delta cos(z)$, ΔG_0 которые детерминируются математическими зависимостями:

$$\Delta U_{A1} = U_{A1} \Delta U_{A1*};$$

$$\Delta U_N = U_N \Delta U_{N*};$$

$$\Delta U_{ph} = U_{ph} \Delta U_{ph*};$$

$$\Delta G_0 = G_0 \Delta G_{0*}.$$

(2.28)

где ΔU_{A1*} ; ΔU_{N*} ; $\Delta cos(z_*)$ – ОП измерительных цепей напряжения;

 $\Delta G_{0*} - O\Pi$ измерительного устройства, которое регистрирует дополнительную проводимость, введённую в фазу «А».

При этом полагаем $\Delta U_{A1*} = \Delta U_{N*} = \Delta \cos(z_*) = \Delta G_{0*} = \Delta$ с целью вычисления ОП измерительных устройств.

После замены в уравнении (2.26) переменных на их частные производные (2.27) и частные абсолютные погрешности (2.28), при этом полагаем $\Delta U_* = \Delta G_0 = \Delta$, полученное уравнение может быть дополнительно упрощено и приведено к более простому виду:

$$\Delta \varepsilon_{Y} = \Delta \sqrt{\frac{12U_{A1}^{4} + 8U_{A1}^{2}U_{N}^{2} - 8U_{A1}^{2}U_{ph}^{2} + 4U_{N}^{4} - 4U_{N}^{2}U_{ph}^{2} + 3U_{ph}^{4}}{\left(2U_{A1}^{2} + 2U_{N}^{2} - U_{ph}^{2}\right)^{2}}}.$$
 (2.29)

Сформулированное уравнение (2.29) отобразим в относительных единицах и используя программное обеспечение MS Excel, построим график:

$$\varepsilon_Y = \Delta \sqrt{\frac{12U_{A*}^4 + 8U_{A*}^2U_{N*}^2 - 8U_{A*}^2 + 4U_{N*}^4 - 4U_{N*}^2 + 3}{(2U_{A*}^2 + 2U_{N*}^2 - 1)^2}},$$
(2.30)

где $U_{A*} = U_{A1} * U_{ph}^{-1}, U_{N*} = U_N * U_{ph}^{-1}.$

На основании результатов расчёта случайных ОП при измерении комплексной проводимости изоляции сети и её составляющих, создаём графические представления зависимостей:

$$\varepsilon_{g} = \frac{\Delta g}{\Delta} = f(U_{A*}, \cos(\varphi - \alpha));$$

$$\varepsilon_{b} = \frac{\Delta b}{\Delta} = f(\cos(\varphi - \alpha));$$

$$\varepsilon_{Y} = \frac{\Delta Y}{\Delta} = f(U_{A*}, U_{N*}),$$

представленные на графиках (Рисунок 2.3, Рисунок 2.4, Рисунок 2.5)



Рисунок 2.3 – Относительные среднеквадратичные погрешности нахождения активной проводимости


Рисунок 2.4 – Относительные среднеквадратичные погрешности нахождения ёмкостной проводимости

Рисунок 2.3, Рисунок 2.4, Рисунок 2.5 иллюстрируют влияние вводимой активной дополнительной проводимости на изменение относительных среднеквадратичных погрешностей активной проводимости – ε_G , емкостной проводимости – ε_B и полной проводимости – ε_Y с учетом от достоверности искомых значений.

Иллюстрация математических зависимостей, представленных на графиках (Рисунок 2.3, Рисунок 2.4), случайных ОП вещественной и мнимой части комплексной проводимости изоляции сети, определяемых по значениям $cos(\varphi - \alpha)$ и по величине вводимой активной дополнительной проводимости, влияющей на напряжения нулевой последовательности и фазы «А», которые приведены в относительных единицах, позволяют определить минимум погрешности при производстве измерений. Характеры изменения случайных вещественной и мнимой части комплексной проводимости изоляции сети отличаются между собой, и величина их отличия зависит от изменения диапазона значений $cos(\varphi - \alpha)$.

Графическая иллюстрация анализа случайной относительной среднеквадратичной погрешности (Рисунок 2.3, Рисунок 2.4) определения активной и ёмкостной проводимости демонстрирует, что присоединённая дополнительная активная проводимость на всем диапазоне изменения $cos(\varphi - \alpha)$ несущественно оказывает влияние на погрешность, которая ниже 10% при применениях измерительных средств с КТ 1.0, в случае применения измерительного средства с КТ 0.5 погрешность меньше 5%, и при КТ 0.2 измерительного прибора, обеспечивается погрешность не более 2%.



Рисунок 2.5 – Относительные среднеквадратичные погрешности нахождения полной проводимости

При измерении проводимостей изоляции сети на основании изменения погрешностей, представленных на графике (Рисунок 2.5), подбирается такое значений дополнительной активной проводимости, чтобы при: относительном напряжении нулевой последовательности $U_{N*} = 0,2$ и напряжение фазы «А» в относительных единицах находилось в пределах $U_{A*} = 0 - 0,64$ или $U_{A*} =$ 0,73 - 0,9; относительном напряжении нулевой последовательности $U_{N*} = 0,4$ и напряжение фазы «А» в относительных единицах находилось в пределах $U_{A*} = 0 - 0,53$ или $U_{A*} = 0,53 - 0,9;$ относительном напряжении нулевой последовательности $U_{N*} = 0,6$ и напряжение фазы «А» в относительных единицах находилось в пределах $U_{A*} = 0 - 0.27$ или $U_{A*} = 0,45 - 0,9;$ напряжении нулевой последовательности $U_{N*} = 0,8$ и относительном напряжение фазы «А» в относительных единицах находилось в пределах U_{A*} = 0,0-0,9.

Данные результаты свидетельствуют, что метод, разработанный для вычисления комплексной проводимости изоляции сети, показал удовлетворительную точность. Это означает, что результаты вычислений, полученные с помощью данного метода, довольно близки к реальным значениям комплексной проводимости изоляции сети.

2.4 Метод определения параметров изоляции сети с учётом несимметрии

Несимметрия в сетях в основном возникает из-за повреждений целостности изоляции фаз, что способствуют увеличению токов утечек. В случае подключения дополнительной активной проводимости при этом имея повреждения изоляции, есть вероятность появления многофазного короткого замыкания из-за шунтирования проводимости [51]. Допустим ситуацию, когда образовалось повреждение изоляции фазы относительно земли, тогда уравнения (2.8), (2.9) воспроизводит состояния сети, причём G_0 – активная проводимость изоляции, которая описывает то самое повреждение изоляции. В целях нахождения активной проводимости повреждения изоляции фазы используем смещение нейтральной точки путём подключения конденсатора [52].

При вводе дополнительного конденсатора выражение (2.9) примет вид:

$$B + B_0 = \frac{U_{A2}G_0 \sin(\varphi_1 - \alpha_1)}{U_{N1}},$$
(2.31)

где U_{A2} , U_{N1} – фазное напряжение и ННП после подключения конденсатора;

 φ_1 , α_1 – углы векторов ННП и фазного напряжения после подключения конденсатора;

*G*₀ – активная проводимость повреждения изоляции фазы;

*B*₀ – дополнительная ёмкостная проводимость.

Решая вместе математические зависимости (2.9) и (2.31) выводим математические зависимости нахождения:

– величину активной проводимости повреждения изоляции фазы

$$G_0 = \frac{B_0 U_N U_{N1}}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)};$$
(2.32)

– величину ёмкостной проводимости изоляции сети

$$B = \frac{B_0 U_{N1} U_{A1} \sin(\varphi - \alpha)}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)}.$$
 (2.33)

Решая вместе математические зависимости (2.8) и (2.32) выводим математические зависимости нахождения величины активной проводимости изоляции в несимметричной сети

$$G = \frac{B_0 U_{N1} (U_{A1} \cos(\varphi - \alpha) - U_N)}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)}.$$
 (2.34)

Подставив значения выражений (2.33) и (2.34) в (1.3), получим абсолютную величину комплексной проводимости изоляции в несимметричной сети

$$Y = \frac{b_0 U_{N1} \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(\varphi - \alpha)}}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)}.$$
(2.35)

Разработанный метод иллюстрируется электрической схемой (Рисунок 2.6), где в составе: 3-х электрическую сеть с фазами A, B и C; анализатор качества электроэнергии PQA, регистрирующий показания фазного напряжения – U_{A1}, U_{A2} , векторный угол фазного напряжения – α, α_1 , величину ННП – U_N, U_{N1} , фазовый угол ННП – φ, φ_1 до и после присоединения дополнительного конденсатора; коммутирующий аппарат QF1, подключающий дополнительный конденсатор; дополнительная ёмкостная проводимость B_0 ; активная проводимость повреждения изоляции фазы G_0 ; ёмкостные проводимости изоляции фаз B_A, B_B, B_C ; активные проводимости изоляции фаз G_A, G_B, G_C .



Рисунок 2.6 – Принципиальная электрическая схема разработанного метода при присоединении дополнительного конденсатора

Для того чтобы вычислить параметры изоляции сети в первую очередь следует произвести регистрацию фазного напряжения – U_{A1} и ННП – U_N , а также их векторных углов – α, φ . После регистрации данных, коммутирующим аппаратом *QF1* присоединяется дополнительная емкостную проводимость B_0 , благодаря этому показатели электрической сети изменяются и все эти изменения также регистрируются анализатором качества электроэнергии PQA, где фазное напряжения будет – U_{A2} , векторный угол фазного напряжения – α_1 , величина ННП – U_{N1} , векторный угол ННП – φ_1 .

По вышеперечисленным сохранённых данных рассчитывается параметры изоляции сети по математическим формулам (2.33), (2.34) и (2.35).

2.5 Анализ погрешности определения параметров изоляции сети с учётом несимметрии

В этом разделе приводится определение относительных и абсолютных погрешностей разработанного метода с учётом не симметрии.

Использую уравнение (2.32) вычисляем ОП определения вещественной части комплексной проводимости повреждения изоляции фазы:

$$G_{0} = \frac{B_{0}U_{N}U_{N1}}{U_{A2}U_{N}\sin(\varphi_{1} - \alpha_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(\varphi - \alpha)},$$

где U_{A1} , U_N , U_{A2} , U_{N1} , $\varphi - \alpha = z$, $\varphi_1 - \alpha_1 = z_1$, B_0 – регистрируемые данные при прямых измерениях.

Относительная среднеквадратичная погрешность функции определения активной проводимости повреждения изоляции фазы вычисляется по уравнению:

$$\varepsilon_{G_{0}} = \frac{\Delta G_{0}}{\Delta} = \frac{1}{G_{0}} \left\{ \begin{cases} \frac{\partial G_{0}}{\partial U_{A1}} \Delta U_{A1} \end{pmatrix}^{2} + \left(\frac{\partial G_{0}}{\partial U_{A2}} \Delta U_{A2} \right)^{2} + \left(\frac{\partial G_{0}}{\partial U_{N}} \Delta U_{N} \right)^{2} + \left(\frac{\partial G_{0}}{\partial U_{N1}} \Delta U_{N1} \right)^{2} + \left(\frac{\partial G_{0}}{\partial \sin(z)} \Delta \sin(z) \right)^{2} + \\ + \left(\frac{\partial G_{0}}{\partial \sin(z_{1})} \Delta \sin(z_{1}) \right)^{2} + \left(\frac{\partial G_{0}}{\partial B_{0}} \Delta B_{0} \right)^{2} \end{cases}$$
(2.36)

где $\partial G_0 \partial U_{A1}^{-1}$; $\partial G_0 \partial U_{A2}^{-1}$; $\partial G_0 \partial U_N^{-1}$; $\partial G_0 \partial U_{N1}^{-1}$; $\partial G_0 \partial \sin(z)^{-1}$; $\partial G_0 \partial \sin(z_1)^{-1}$; $\partial G_0 \partial B_0^{-1}$ – частные производные функции $G_0 = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, \sin(z), \sin(z_1), B_0)$. Определяем частные производные функции

 $G_0 = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0)$ по переменным $U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0$:

$$\partial G_{0} \partial U_{A1}^{-1} = \frac{B_{0} U_{N} U_{N1}^{2} \sin(z)}{(U_{A2} U_{N} \sin(z_{1}) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^{2}};$$

$$\partial G_{0} \partial U_{A2}^{-1} = -\frac{B_{0} U_{N1} U_{N}^{2} \sin(z_{1})}{(U_{A2} U_{N} \sin(z_{1}) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^{2}};$$

$$\partial G_{0} \partial U_{N}^{-1} = -\frac{B_{0} U_{A1} U_{N1}^{2} \sin(z)}{(U_{A2} U_{N} \sin(z_{1}) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^{2}};$$

$$\partial G_{0} \partial U_{N1}^{-1} = \frac{B_{0} U_{A2} U_{N}^{2} \sin(z_{1})}{(U_{A2} U_{N} \sin(z_{1}) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^{2}};$$

$$\partial G_{0} \partial \sin(z)^{-1} = \frac{B_{0} U_{N} U_{A1} U_{N1}^{2} \cos(z)}{(U_{A2} U_{N} \sin(z_{1}) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^{2}};$$

(2.37)

$$\partial G_0 \partial \sin(z_1)^{-1} = -\frac{B_0 U_{A2} U_{N1} U_N^2 \cos(z_1)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};$$

$$\partial G_0 \partial B_0^{-1} = \frac{U_N U_{N1}}{U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z)}.$$

Здесь ΔU_{A1} , ΔU_{A2} , ΔU_N , ΔU_{N1} , $\Delta sin(z)$, $\Delta sin(z_1)$, ΔB_0 – абсолютные погрешности прямых измерений величин U_{A1} , U_{A2} , U_N , U_{N1} , sin(z), $sin(z_1)$, B_0 которые определяются следующими выражениями:

$$\Delta U_{A1} = U_{A1} \Delta U_{A1*};$$

$$\Delta U_{A2} = U_{A2} \Delta U_{A2*};$$

$$\Delta U_N = U_N \Delta U_{N*};$$

$$\Delta U_{N1} = U_{N1} \Delta U_{N1*};$$

$$\Delta sin(z) = sin(z) \Delta sin(z_*);$$

$$\Delta sin(z_1) = sin(z_1) \Delta sin(z_{1*});$$

$$\Delta B_0 = B_0 \Delta B_{0*},$$

(2.38)

где $\Delta U_{A1*}, \Delta U_{A2*}, \Delta U_{N*}, \Delta U_{N1*}, \Delta sin(z_*), \Delta sin(z_{1*}) - O\Pi$ измерительных цепей напряжения;

 ΔB_{0*} – ОП измерительного устройства, которое регистрирует дополнительную ёмкостную проводимость, введённую в фазу «А».

При этом полагаем $\Delta U_{A1*} = \Delta U_{A2*} = \Delta U_{N*} = \Delta U_{N1*} = \Delta sin(z_*) = \Delta sin(z_{1*}) = \Delta B_{0*} = \Delta с$ целью вычисления ОП измерительных устройств.

После замены в уравнении (2.36) переменных на их частные производные (2.37) и частные абсолютные погрешности (2.38), при этом полагаем $\Delta U_* = \Delta B_0 = \Delta$, полученное уравнение может быть дополнительно упрощено и приведено к более простому виду:

$$\varepsilon_{G_0} = \Delta \sqrt{\frac{U_{A2}^2 U_N^2 \cos(z_1)^2 \sin(z_1)^2 + U_{A1}^2 U_{N1}^2 \cos(z)^2 \sin(z)^2 + \\ + 3U_{A2}^2 U_N^2 \sin(z_1)^2 + 3U_{A1}^2 U_{N1}^2 \sin(z)^2 - \\ - 2U_{A1} U_{A2} U_N U_{N1} \sin(z_1) \\ (U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2}}.$$
(2.39)

Сформулированное уравнение (2.39) отобразим в относительных единицах и используя программное обеспечение Maple и Python. Matplotlib построим график:

$$\varepsilon_{G_0} = \Delta \sqrt{\frac{4U_{A*}^2 \sin(z_*)^2 + U_{A*}^2 \sin(z_*)^4 + 3U_{N*}^2 - 2U_{A*}U_{N*} \sin(z_*)}{(U_{N*} - U_{A*} \sin(z_*))^2}}, \qquad (2.40)$$

где $U_{A*} = U_{A1} * U_{A2}^{-1}, U_{N*} = U_N * U_{N1}^{-1}, sin(z_*) = sin(z) * sin(z_1)^{-1}.$

Использую формулу (2.34) вычисляем ОП определения вещественной части комплексной проводимости:

$$G = \frac{B_0 U_{N1} (U_{A1} \cos(\varphi - \alpha) - U_N)}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)},$$

где U_{A1} , U_N , U_{A2} , U_{N1} , $\varphi - \alpha = z$, $\varphi_1 - \alpha_1 = z_1$, B_0 – регистрируемые данные при прямых измерениях.

Относительная среднеквадратичная погрешность функции определения активной проводимости вычисляется по уравнению:

$$\varepsilon_{G} = \frac{\Delta G}{\Delta} = \frac{1}{G} \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial G}{\partial U_{A1}} \Delta U_{A1}\right)^{2} + \left(\frac{\partial G}{\partial U_{A2}} \Delta U_{A2}\right)^{2} + \left(\frac{\partial G}{\partial U_{N}} \Delta U_{N}\right)^{2} + \left(\frac{\partial G}{\partial U_{N1}} \Delta U_{N1}\right)^{2} + \left(\frac{\partial G}{\partial \sin(z)} \Delta \sin(z)\right)^{2} + , \quad (2.41) \\ + \left(\frac{\partial G}{\partial \sin(z_{1})} \Delta \sin(z_{1})\right)^{2} + \left(\frac{\partial G}{\partial B_{0}} \Delta B\right)^{2} \end{bmatrix}$$

где $\partial G \partial U_{A1}^{-1}$; $\partial G \partial U_{A2}^{-1}$; $\partial G \partial U_{N}^{-1}$; $\partial G \partial U_{N1}^{-1}$; $\partial G \partial sin(z)^{-1}$; $\partial G \partial sin(z_1)^{-1}$; $\partial G \partial b_0^{-1} -$ частные производные функции $G = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0)$.

Определяем частные производные функции $G = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0)$ по переменным $U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0$:

$$\partial G \partial U_{A1}^{-1} = \frac{B_0 U_N U_{N1} (U_{A2} \cos(z) \sin(z_1) - U_{N1} \sin(z))}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2}; \\ \partial G \partial U_{A2}^{-1} = -\frac{B_0 U_N U_{N1} \sin(z_1) (U_{A1} \cos(z) - U_N)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2}; \\ \partial G \partial U_N^{-1} = -\frac{B_0 U_{A1} U_{N1} (U_{A2} \cos(z) \sin(z_1) - U_{N1} \sin(z))}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2}; \\ \partial G \partial U_{N1}^{-1} = \frac{B_0 U_N U_{A2} \sin(z_1) (U_{A1} \cos(z) - U_N)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2}; \\ (2.42) \\ \partial G \partial \sin(z)^{-1} = \frac{B_0 U_{A1} U_{N1} \left(\frac{U_{A2} U_N \sin(z) \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z)^2}{(U_{A2} U_N \sin(z) \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2}; \\ \partial G \partial \sin(z_1)^{-1} = -\frac{B_0 U_N U_{N1} U_{A2} \cos(z_1) (U_{A1} \cos(z) - U_N)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2}; \\ \partial G \partial B_0^{-1} = \frac{U_{N1} (U_{A1} \cos(z) - U_N)}{U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2}; \\ \partial G \partial B_0^{-1} = \frac{U_{N1} (U_{A1} \cos(z) - U_N)}{U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z)}. \\ \end{pmatrix}$$

Здесь ΔU_{A1} , ΔU_{A2} , ΔU_N , ΔU_{N1} , $\Delta sin(z)$, $\Delta sin(z_1)$, ΔB_0 – абсолютные погрешности прямых измерений величин $U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}$, sin(z), $sin(z_1)$, B_0 которые определяются следующими выражениями:

$$\Delta U_{A1} = U_{A1} \Delta U_{A1*};$$

$$\Delta U_{A2} = U_{A2} \Delta U_{A2*};$$

$$\Delta U_N = U_N \Delta U_{N*};$$

$$\Delta U_{N1} = U_{N1} \Delta U_{N1*};$$

$$\Delta sin(z) = sin(z) \Delta sin(z_*);$$

$$\Delta sin(z_1) = sin(z_1) \Delta sin(z_{1*});$$

$$\Delta B_0 = B_0 \Delta B_{0*},$$

(2.43)

где $\Delta U_{A1*}, \Delta U_{A2*}, \Delta U_{N*}, \Delta U_{N1*}, \Delta sin(z_*), \Delta sin(z_{1*}) - O\Pi$ измерительных цепей напряжения;

 ΔB_{0*} – ОП измерительного устройства, которое регистрирует дополнительную ёмкостную проводимость, введённую в фазу «А».

При этом полагаем $\Delta U_{A1*} = \Delta U_{A2*} = \Delta U_{N*} = \Delta U_{N1*} = \Delta sin(z_*) = \Delta sin(z_{1*}) = \Delta B_{0*} = \Delta c$ целью вычисления ОП измерительных устройств.

После замены в уравнении (2.41) переменных на их частные производные (2.42) и частные абсолютные погрешности (2.43), при этом полагаем $\Delta U_* = \Delta B_0 = \Delta$, полученное уравнение может быть дополнительно упрощено и приведено к более простому виду:

$$\varepsilon_{G} = \Delta \begin{bmatrix} 1 + \frac{2U_{N}^{2}U_{A1}^{2}(U_{A2}\cos(z)\sin(z_{1}) - U_{N1}\sin(z))^{2}}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}(U_{A1}\cos(z) - U_{N})^{2}} + \\ + \frac{2U_{N}^{2}U_{A2}^{2}\sin(z_{1})^{2}}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}} + \\ + \frac{U_{A1}^{2}\sin(z)^{2} \left(\frac{U_{A2}U_{N}\sin(z)\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z)^{2}}{+U_{N1}\cos(z)(U_{A1}\cos(z) - U_{N})} \right)^{2} + \\ + \frac{U_{N2}^{2}U_{N}^{2}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z)^{2}(U_{A1}\cos(z) - U_{N})^{2}}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}(U_{A1}\cos(z) - U_{N})^{2}} + \\ + \frac{U_{N2}^{2}U_{A2}^{2}\sin(z_{1})^{2}\cos(z_{1})^{2}}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}} \end{bmatrix}^{1/2}$$

$$(2.44)$$

Сформулированное уравнение (2.44) отобразим в относительных единицах, и используя программное обеспечение Maple и Python. Matplotlib построим график:

$$\varepsilon_{G} = \Delta \begin{bmatrix} 1 + \frac{2U_{N*}^{2}U_{A*}^{2} \left(\sqrt{1 - \sin(z_{*})^{2}} - \sin(z_{*})\right)^{2}}{(U_{N*} - U_{A*}\sin(z_{*}))^{2} \left(U_{A*}\sqrt{1 - \sin(z_{*})^{2}} - U_{N*}\right)^{2}} + \frac{2U_{N*}^{2}}{(U_{N*} - U_{A*}\sin(z_{*}))^{2}} + \frac{U_{A*}^{2}\sin(z_{*})^{2} \left(U_{N*} - U_{A*}\sin(z_{*}) - U_{A*}\sin(z_{*})^{2} + U_{A*}\sin(z_{*})^{2} - U_{N*}\right)^{2}}{(U_{A*}\sqrt{1 - \sin(z_{*})^{2}} - U_{N*})^{2}} \end{bmatrix}^{1/2}, (2.45)$$

где $U_{A*} = U_{A1} * U_{A2}^{-1}, U_{N*} = U_N * U_{N1}^{-1}, sin(z_*) = sin(z) * sin(z_1)^{-1}.$ Использую формулу (2.33) вычисляем ОП определения мнимой части

Использую формулу (2.33) вычисляем ОП определения мнимои части комплексной проводимости

$$B = \frac{B_0 U_{N1} U_{A1} \sin(\varphi - \alpha)}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)}$$

где U_{A1} , U_N , U_{A2} , U_{N1} , $\varphi - \alpha = z$, $\varphi_1 - \alpha_1 = z_1$, B_0 – регистрируемые данные при прямых измерениях.

Относительная среднеквадратичная погрешность функции определения ёмкостной проводимости вычисляется по уравнению:

$$\varepsilon_{B} = \frac{\Delta B}{\Delta} = \frac{1}{B} \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial B}{\partial U_{A1}} \Delta U_{A1}\right)^{2} + \left(\frac{\partial B}{\partial U_{A2}} \Delta U_{A2}\right)^{2} + \left(\frac{\partial B}{\partial U_{N}} \Delta U_{N}\right)^{2} + \left(\frac{\partial B}{\partial U_{N1}} \Delta U_{N1}\right)^{2} + \left(\frac{\partial B}{\partial \sin(z)} \Delta \sin(z)\right)^{2} + , \quad (2.46) \\ + \left(\frac{\partial B}{\partial \sin(z_{1})} \Delta \sin(z_{1})\right)^{2} + \left(\frac{\partial B}{\partial B_{0}} \Delta B_{0}\right)^{2} \end{bmatrix}$$

где $\partial B \partial U_{A1}^{-1}$; $\partial B \partial U_{A2}^{-1}$; $\partial B \partial U_{N}^{-1}$; $\partial B \partial U_{N1}^{-1}$; $\partial B \partial sin(z)^{-1}$; $\partial B \partial sin(z_1)^{-1}$; $\partial B \partial B \partial B_0^{-1}$ – частные производные функции $B = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0)$.

Определяем частные производные функции $B = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0)$ по переменным $U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0$:

$$\partial B \partial U_{A1}^{-1} = \frac{B_0 U_N U_{N1}^2 \sin(z)^2}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};$$

$$\partial B \partial U_{A2}^{-1} = -\frac{B_0 U_{N1} U_N^2 \sin(z) \sin(z_1)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};$$
(2.47)

$$\begin{aligned} \partial B \partial U_{N}^{-1} &= -\frac{B_{0}U_{A1}U_{N1}^{2}\sin(z)^{2}}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}};\\ \partial B \partial U_{N1}^{-1} &= \frac{B_{0}U_{A2}U_{N}^{2}\sin(z)\sin(z_{1})}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}};\\ \partial B \partial \sin(z)^{-1} &= \frac{B_{0}U_{N1}U_{A2}U_{N}^{2}\cos(z)\sin(z_{1})}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}};\\ \partial B \partial \sin(z_{1})^{-1} &= -\frac{B_{0}U_{N1}U_{A2}U_{N}^{2}\cos(z_{1})\sin(z)}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}};\\ \partial B \partial B_{0}^{-1} &= \frac{U_{N}U_{N1}\sin(z)}{U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}};\end{aligned}$$

Здесь ΔU_{A1} , ΔU_{A2} , ΔU_N , ΔU_{N1} , $\Delta sin(z)$, $\Delta sin(z_1)$, ΔB_0 – абсолютные погрешности прямых измерений величин U_{A1} , U_{A2} , U_N , U_{N1} , sin(z), $sin(z_1)$, B_0 которые определяются следующими выражениями:

$$\Delta U_{A1} = U_{A1} \Delta U_{A1*};$$

$$\Delta U_{A2} = U_{A2} \Delta U_{A2*};$$

$$\Delta U_{N} = U_{N} \Delta U_{N*};$$

$$\Delta U_{N1} = U_{N1} \Delta U_{N1*};$$

$$\Delta sin(z) = sin(z) \Delta sin(z_{*});$$

$$\Delta sin(z_{1}) = sin(z_{1}) \Delta sin(z_{1*});$$

$$\Delta B_{0} = B_{0} \Delta B_{0*}.$$

(2.48)

где $\Delta U_{A1*}, \Delta U_{A2*}, \Delta U_{N*}, \Delta U_{N1*}, \Delta sin(z_*), \Delta sin(z_{1*}) - O\Pi$ измерительных цепей напряжения;

 ΔB_{0*} – ОП измерительного устройства, которое регистрирует дополнительную ёмкостную проводимость, введённую в фазу «А».

При это полагаем $\Delta U_{A1*} = \Delta U_{A2*} = \Delta U_{N*} = \Delta U_{N1*} = \Delta sin(z_*) = \Delta sin(z_{1*}) = \Delta B_{0*} = \Delta с$ целью вычисления ОП измерительных устройств.

После замены в уравнении (2.46) переменных на их частные производные (2.47) и частные абсолютные погрешности (2.48), при этом полагаем $\Delta U_* = \Delta B_0 = \Delta$, полученное уравнение может быть дополнительно упрощено и приведено к более простому виду:

$$\varepsilon_{B} = \Delta \begin{bmatrix} 1 + \frac{2U_{N1}^{2}U_{A1}^{2}\sin(z)^{2}}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}} + \\ + \frac{2U_{N}^{2}U_{A2}^{2}\sin(z_{1})^{2}}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}} + \\ + \frac{U_{N}^{2}U_{A2}^{2}\sin(z_{1})^{2}\cos(z)^{2}}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}} + \\ + \frac{U_{N}^{2}U_{A2}^{2}\sin(z_{1})^{2}\cos(z_{1})^{2}}{(U_{A2}U_{N}\sin(z_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(z))^{2}} \end{bmatrix}^{1/2} .$$

$$(2.49)$$

Сформулированное уравнение (2.49) отобразим в относительных единицах, и используя программное обеспечение Maple и Python. Matplotlib построим график:

$$\varepsilon_B = \Delta \left[\frac{3U_{A*}^2 \sin(z_*)^2 + 4U_{N*}^2 - U_{N*}^2 \sin(z_*)^2 - 2U_{N*}U_{A*} \sin(z_*)}{(U_{N*} - U_{A*} \sin(z_*))^2} \right]^{1/2}, \quad (2.50)$$

где $U_{A*} = U_{A1} * U_{A2}^{-1}, U_{N*} = U_N * U_{N1}^{-1}, sin(z_*) = sin(z) * sin(z_1)^{-1}.$

Использую формулу (2.35) вычисляем ОП определения абсолютной величины комплексной проводимости:

$$Y = \frac{B_0 U_{N1} \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(\varphi - \alpha)}}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)}$$

где U_{A1} , U_N , U_{A2} , U_{N1} , $\varphi - \alpha = z$, $\varphi_1 - \alpha_1 = z_1$, B_0 – регистрируемые данные при прямых измерениях.

Относительная среднеквадратичная погрешность функции определения полной проводимости вычисляется по уравнению:

$$\varepsilon_{Y} = \frac{\Delta Y}{\Delta} = \frac{1}{Y} \left\{ \begin{array}{c} \left(\frac{\partial Y}{\partial U_{A1}} \Delta U_{A1} \right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial U_{A2}} \Delta U_{A2} \right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial U_{N}} \Delta U_{N} \right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial U_{N1}} \Delta U_{N1} \right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial \sin(z)} \Delta \sin(z) \right)^{2} + \right. \right.$$

$$\left. + \left(\frac{\partial Y}{\partial \sin(z_{1})} \Delta \sin(z_{1}) \right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial B_{0}} \Delta B_{0} \right)^{2} \right\}$$

$$\left. + \left(\frac{\partial Y}{\partial \sin(z_{1})} \Delta \sin(z_{1}) \right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial B_{0}} \Delta B_{0} \right)^{2} \right\}$$

$$\left. + \left(\frac{\partial Y}{\partial \sin(z_{1})} \Delta \sin(z_{1}) \right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial B_{0}} \Delta B_{0} \right)^{2} \right\}$$

$$\left. + \left(\frac{\partial Y}{\partial \sin(z_{1})} \Delta \sin(z_{1}) \right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial B_{0}} \Delta B_{0} \right)^{2} \right\}$$

$$\left. + \left(\frac{\partial Y}{\partial \cos(z_{1})} \Delta \sin(z_{1}) \right)^{2} + \left(\frac{\partial Y}{\partial B_{0}} \Delta B_{0} \right)^{2} \right\}$$

где $\partial Y \partial U_{A1}^{-1}$; $\partial Y \partial U_{A2}^{-1}$; $\partial Y \partial U_{N}^{-1}$; $\partial Y \partial U_{N1}^{-1}$; $\partial Y \partial sin(z)^{-1}$; $\partial Y \partial sin(z_1)^{-1}$; $\partial Y \partial B_0^{-1}$ — частные производные функции $Y = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0)$. Определяем частные производные функции $Y = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0)$ по переменным $U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial U_{A1}} &= -\frac{B_0 U_N U_{N1} \begin{pmatrix} U_{A2} (U_N \cos(z) - U_{A1}) \sin(z_1) - \\ -U_{N1} \sin(z) (U_N - U_{A1} \cos(z)) \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} (U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2 \times \\ \times \sqrt{U_{A1}^2} + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z) \end{pmatrix}};\\ \frac{\partial Y}{\partial U_{A2}} &= -\frac{B_0 U_N U_{N1} \sin(z_1) \sqrt{U_{A1}^2} + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};\\ \frac{\partial Y}{\partial U_N} &= \frac{B_0 U_{A1} U_{N1} \begin{pmatrix} U_{A2} (U_N \cos(z) - U_{A1}) \sin(z_1) - \\ -U_{N1} \sin(z) (U_N - U_{A1} \cos(z)) \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} (U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2 \times \\ \times \sqrt{U_{A1}^2} + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z) \end{pmatrix}};\\ \frac{\partial Y}{\partial U_{N1}} &= \frac{B_0 U_N U_{A2} \sin(z_1) \sqrt{U_{A1}^2} + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};\\ \frac{\partial Y}{\partial \sin(z)} &= \frac{B_0 U_{A1} U_{N1} \begin{pmatrix} \sin(z_1) \sin(z) U_{A2} U_N^2 - U_{A1} U_N \cos(z) \\ U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z) \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} (U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2 \times \\ \times \sqrt{U_{A1}^2} + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z) \cos(z) \end{pmatrix}};\\ \frac{\partial Y}{\partial \sin(z_1)} &= -\frac{B_0 U_{A2} U_N U_{N1} \cos(z_1) \sqrt{U_{A1}^2} + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2 \times};\\ \frac{\partial Y}{\partial B_0} &= \frac{U_{N1} \sqrt{U_{A1}^2} + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};\\ \frac{\partial Y}{\partial B_0} &= \frac{U_{N1} \sqrt{U_{A1}^2} + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}{U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2}. \end{aligned}$$

Здесь ΔU_{A1} , ΔU_{A2} , ΔU_N , ΔU_{N1} , $\Delta sin(z)$, $\Delta sin(z_1)$, Δb_0 – абсолютные погрешности прямых измерений величин $U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}$, sin(z), $sin(z_1)$, B_0 которые определяются следующими выражениями:

$$\Delta U_{A1} = U_{A1} \Delta U_{A1*};$$

$$\Delta U_{A2} = U_{A2} \Delta U_{A2*};$$

$$\Delta U_N = U_N \Delta U_{N*};$$

$$\Delta U_{N1} = U_{N1} \Delta U_{N1*};$$

$$\Delta \sin(z) = \sin(z) \Delta \sin(z_*);$$

$$\Delta \sin(z_1) = \sin(z_1) \Delta \sin(z_{1*});$$

$$\Delta B_0 = B_0 \Delta B_{0*},$$
(2.53)

где $\Delta U_{A1*}, \Delta U_{A2*}, \Delta U_{N*}, \Delta U_{N1*}, \Delta sin(z_*), \Delta sin(z_{1*}) - O\Pi$ измерительных цепей напряжения;

 $\Delta B_{0*} - O\Pi$ измерительного устройства, которое регистрирует дополнительную ёмкостную проводимость, введённую в фазу «А».

При этом полагаем $\Delta U_{A1*} = \Delta U_{A2*} = \Delta U_{N*} = \Delta U_{N1*} = \Delta sin(z_*) = \Delta sin(z_{1*}) = \Delta B_{0*} = \Delta с$ целью вычисления ОП измерительных устройств.

После замены в уравнении (2.51) переменных на их частные производные (2.52) и частные абсолютные погрешности (2.53), при этом полагаем $\Delta U_* = \Delta B_0 = \Delta$, полученное уравнение может быть дополнительно упрощено и приведено к более простому виду:

$$\varepsilon_{Y} = \Delta \begin{bmatrix} U_{N}^{2} U_{A2}^{2} \begin{pmatrix} U_{A2} (U_{N} \cos z - U_{A1}) \sin z_{1} \\ -U_{N1} \sin z (U_{N} - U_{A1} \cos z) \end{pmatrix}^{2} \\ (U_{A2} U_{N} \sin z_{1} - U_{A1} U_{N1} \sin z)^{2} (U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1} U_{N} \cos z)^{2} \\ \frac{2U_{N}^{2} U_{A2}^{2} \sin(z_{1})^{2}}{(U_{A2} U_{N} \sin z_{1} - U_{A1} U_{N1} \sin z)^{2}} + \\ U_{N}^{2} U_{A1}^{2} \begin{pmatrix} U_{A2} (U_{N} \cos z - U_{A1}) \sin z_{1} \\ -U_{N1} \sin z (U_{N} - U_{A1} \cos z) \end{pmatrix}^{2} \\ \frac{U_{A2}^{2} U_{N} \sin z_{1} - U_{A1} U_{N1} \sin z)^{2} (U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1} U_{N} \cos z)^{2}}{(U_{A2} U_{N} \sin z_{1} - U_{A1} U_{N1} \sin z)^{2} (U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1} U_{N} \cos z)^{2}} + \\ \frac{U_{A1}^{2} \sin z^{2} \begin{pmatrix} \sin z_{1} \sin z U_{A2} U_{N}^{2} - U_{A1} U_{N} U_{N1} \sin z^{2} + \\ +U_{N1} (U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1} U_{N} \cos z) \cos z \end{pmatrix}^{2}}{(U_{A2} U_{N} \sin z_{1} - U_{A1} U_{N1} \sin z)^{2} (U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1} U_{N} \cos z)^{2}} + \\ \frac{U_{N}^{2} U_{A2}^{2} \sin z_{1}^{2} \cos z_{1}^{2}}{(U_{A2} U_{N} \sin z_{1} - U_{A1} U_{N1} \sin z)^{2} (U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1} U_{N} \cos z)^{2}} + \\ \end{bmatrix}$$

Сформулированное уравнение (2.54) отобразим в относительных единицах, и используя программное обеспечение Maple и Python. Matplotlib построим график:

$$\varepsilon_{Y} = \Delta \begin{bmatrix} U_{N*}^{2} (U_{A*}^{2} + 1) \begin{pmatrix} U_{N*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}} - U_{A*} - \\ \sin z_{*} (U_{N*} - U_{A*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}}) \end{pmatrix}^{2} \\ \hline (U_{N*} - U_{A*}\sin z_{*})^{2} (U_{A*}^{2} + U_{N*}^{2} - 2U_{A*}U_{N*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}})^{2} + \\ \frac{2U_{N*}^{2}}{(U_{N*} - U_{A*}\sin z_{*})^{2}} + 1 + \\ U_{A*}^{2}\sin z_{*}^{2} \begin{pmatrix} \sin z_{*} U_{N*}^{2} - U_{A*}U_{N*}\sin z_{*}^{2} + \\ (U_{A*}^{2} + U_{N*}^{2} - 2U_{A*}U_{N*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}})\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}} \end{pmatrix}^{2} \\ \hline (U_{N*} - U_{A*}\sin z_{*})^{2} (U_{A*}^{2} + U_{N*}^{2} - 2U_{A*}U_{N*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}})^{2} \end{bmatrix}^{1/2}$$

где $U_{A*} = U_{A1} * U_{A2}^{-1}, U_{N*} = U_N * U_{N1}^{-1}, sin(z_*) = sin(z) * sin(z_1)^{-1}.$

На основании результатов расчёта случайных ОП при измерении комплексной проводимости изоляции сети и её составляющих, создаём графические представления зависимостей:

$$\varepsilon_{G_0} = \frac{\Delta G_0}{\Delta} = f(U_{A*}, U_{N*}, sin(z_*));$$

$$\varepsilon_G = \frac{\Delta G}{\Delta} = f(U_{A*}, U_{N*}, sin(z_*));$$

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta B}{\Delta} = f(U_{A*}, U_{N*}, sin(z_*));$$

$$\varepsilon_Y = \frac{\Delta Y}{\Delta} = f(U_{A*}, U_{N*}, sin(z_*)),$$

представленных на графиках (Рисунок 2.7, Рисунок 2.8, Рисунок 2.9, Рисунок 2.10).

Рисунок 2.7, Рисунок 2.8, Рисунок 2.9, Рисунок 2.10 иллюстрируют влияние присоединения конденсатора на изменение ОП активной проводимости повреждения изоляции фазы – ε_{G_0} , активной проводимости изоляции сети – ε_G , ёмкостной проводимости изоляции сети – ε_B и проводимости изоляции сети – ε_Y с учетом от достоверности искомых значений.



Рисунок 2.7 – ОП определения активной проводимости повреждения изоляции фазы

При расчёте активной проводимости повреждения изоляции фазы на основе построенного графика (Рисунок 2.7) относительной среднеквадратичной погрешности подбирается конденсатор, чтобы при: $sin(z_*) = 0,2$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,8$; $sin(z_*) = 0,4$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,38 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,8$; $sin(z_*) = 0,6$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,38 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,8$; $sin(z_*) = 0,6$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,61 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,8$; $sin(z_*) = 0,8$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,52$ и $U_{A*} = 0,33 - 0,8$. Данные интервалы напряжения нулевой последовательности и фазного напряжения обеспечивают требуемую погрешность при косвенных измерениях активной проводимости повреждения изоляции фазы, которая не превышает 10% при применениях измерительных средств с КТ 1.0, в случае применения измерительного средства с КТ 0.5 погрешность меньше 5%, и при КТ 0.2 измерительного прибора, обеспечивается погрешность не более 2%.

Вдобавок при снижении относительного значения разности углов векторов фазного напряжения «А» и нулевой последовательности точность измерения повышается.



Рисунок 2.8 – ОП определения активной проводимости

При расчёте активной проводимости на основе построенного графика (Рисунок 2.8) относительной среднеквадратичной погрешности подбирается конденсатор, чтобы при: $sin(z_*) = 0,2$ ННП в относительных единицах

находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,62$: и $U_{A*} = 0,3 - 0,8$; $sin(z_*) = 0,4$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N_*} = 0.48 - 0.8$ и $U_{A_*} =$ 0,2-0,54; $sin(z_*) = 0,6$ ННП в относительных единицах находилось в $U_{N*} = 0.51 - 0.8$ и $U_{A*} = 0.2 - 0.49;$ $sin(z_{*}) = 0.8$ пределах ΗΗΠ В относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0.2 - 0.33:0.5 - 0.8$ и $U_{\rm A*} = 0.6 - 0.8: 0.2 - 0.5.$ Данные интервалы напряжения нулевой фазного напряжения обеспечивают требуемую последовательности И погрешность при косвенных измерениях активной проводимости, которая не превышает 10% при применениях измерительных средств с КТ 1.0, в случае применения измерительного средства с КТ 0.5 погрешность меньше 5%, и при КТ 0.2 измерительного прибора, обеспечивается погрешность не более 2%.

При увеличении синуса относительной разницы между углами вектора НПП и фазного напряжения до и после подключения дополнительного конденсатора, точность измерений снижается.



Рисунок 2.9 – ОП определения ёмкостной проводимости изоляции сети

С целью оптимального выбора ёмкости подключаемого конденсатора на основе полученного графика (Рисунок 2.9) подбирается такая ёмкость, чтобы при: $sin(z_*) = 0,2$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,8$: и $U_{A*} = 0,2 - 0,8$; $sin(z_*) = 0,4$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,31 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,68$; $sin(z_*) = 0,6$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,31 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,44 - 0,8$ и

 $U_{A*} = 0,2 - 0,53; sin(z_*) = 0,8$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0.2 - 0.4: 0.51 - 0.8$ и $U_{A*} = 0.6 - 0.8: 0.2 - 0.5.$ Данные интервалы напряжения нулевой последовательности и фазного напряжения обеспечивают требуемую погрешность при косвенных измерениях ёмкостной проводимости, которая не превышает 10% при применениях измерительных средств с КТ 1.0, в случае применения измерительного средства с КТ 0.5 меньше 5%. КΤ 0.2 измерительного погрешность И при прибора, обеспечивается погрешность не более 2%.

Помимо этого, при снижении относительного значения разности углов векторов фазного напряжения «А» и нулевой последовательности точность измерения повышается.



Рисунок 2.10 – ОП определения полной проводимости изоляции сети

С целью оптимального выбора ёмкости подключаемого конденсатора на основе полученного графика (Рисунок 2.10) подбирается конденсатор, чтобы при: $sin(z_*) = 0,2$ НПП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,8$: и $U_{A*} = 0,2 - 0,8$; $sin(z_*) = 0,4$ НПП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,33 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,69$; $sin(z_*) =$ 0,6 НПП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,2$ $U_{A*} = 0.72 - 0.8: 0.2 - 0.6;$ $sin(z_*) = 0.8$ 0,34:0,46-0,8И ΗΠΠ в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0.2 - 0.38:0.48 - 0.8$ и $U_{\rm A*} = 0.6 - 0.8: 0.2 - 0.52.$ Данные интервалы напряжения нулевой

последовательности и фазного напряжения обеспечивают требуемую погрешность при косвенных измерениях полной проводимости, которая не превышает 10% при применениях измерительных средств с КТ 1.0, в случае применения измерительного средства с КТ 0.5 погрешность меньше 5%, и при КТ 0.2 измерительного прибора, обеспечивается погрешность не более 2%.

Графоаналитические исследования случайной относительной среднеквадратичных погрешностей демонстрируют, что точность косвенных измерений в разработанном методе позволяет эффективно регулировать не только подбором конденсатора, но и подбором измерительных приборов по классу точности.

Результаты демонстрируют, что разработанный метод обладает удовлетворительной точностью при вычислениях параметров изоляции сети.

2.6 Сравнительный анализ результатов разработанного методов определения параметров изоляции

В настоящей главе исследуется достоверность разработанного метода путём расчёта случайных относительных среднеквадратических погрешностей разработанного метода и сравнения его с классическим методом амперметравольтметра. Это делается для того, чтобы проверить точность разработанного метода и определить, можно ли считать его достоверным для практических целей. Сравнение осуществляется посредством экспериментальных исследований, в котором два метода проверяются в одинаковых условиях, а их результаты анализируются и сравниваются друг с другом. Результаты этих экспериментов помогут установить точность И достоверность вновь разработанного метода и определить его пригодность для практического применения.

Сравнительный анализ результатов двух методов проводился на лабораторном комплексе «Контроль изоляции в электрических установках с незначительными токами замыкания на землю» КИЭУ.001.1 РБЭ (2921.1) -Челябинск: ИПЦ «Учебная техника» с дополнительными блоками других комплексов, представленный на схеме (Рисунок 2.11). Лабораторных измерений выполнялись в период апрель – май 2022 года в научноисследовательской лаборатории №B414 «Электроэнергетика» кафедры Навоийского государственного горного и технологического университета, Республика Узбекистан.

Используя сборно-разборную структуру стендов ИПЦ «Учебная техника» со сменными блоками, построена структурная электрическая схема, необходимая для экспериментальных исследований, которая содержит:

1. Блок – 3-х источник питания типа 201.4.1 с параметрами ~3х220В/6А.

2. Блок – модель линии электропередачи типа 313.2 с параметрами ~380B; 3x0,5A.

3. Блок – 3-х трансформаторная группа 347.3 с параметрами 3х80 ВА (звезда) 220, 225, 230 В / 133, 220, 225, 230, 235, 240, 245 В.

4. Блок – модель участка электрической сети типа 303 с параметрами ~380В; 3х0,5А.

5. Блок мультиметров типа 508.2.1 с параметрами 3 мультиметра 0...1000 В / 0...10 А/ 0...20 МОм.

6. Блок – модель замыкания на землю типа 310 с параметрами ~380В; 3x0,5А.

7. Блок конденсаторов типа 315.2 с параметрами 6х16 мкФ.

8. QF1 выключатель нагрузки, подключающий дополнительный конденсатор;

9. Блоки типа 301.2, 330.2, 331.1 для преобразования аналоговых сигналов в цифровые сигналы в составе блок измерительных трансформаторов тока и напряжения с параметрами 3х (~0,3A в ~3B); 3х (~660B в ~3B); блок коннекторов и блок ввода-вывода цифровых сигналов.



Рисунок 2.11 – Структурная электрическая схема лабораторной установки ИПЦ «Учебная техника»

Для демонстрации ключевых компонентов и их взаимодействие, представлена упрощённая схема собранного лабораторного комплекса.



Рисунок 2.12 – Принципиальная электрическая схема двух методов определения параметров изоляции сети

Электрическая схема (Рисунок 2.12), представленная выше, используемая для сравнительного анализа двух методов, которая содержит следующие элементы:

– трёхфазная электросеть;

– регистрирующие устройство PQA (Power quality analyzer), сохраняющий показания фазных напряжений и их векторные углы (в нашем случае блоки 301.2, 331.1 и 330.2 ИПЦ «Учебная техника» и программное обеспечение LabVIEW National Instruments Corp.);

— QF1 выключатель нагрузки, коммутирующий фазу и землю в целях создания искусственного ОЗЗ;

– QF2 выключатель нагрузки, присоединяющий конденсатор;

– амперметр РА, сохраняющий показания тока, протекающий через конденсатор при коммутации QF2 и ток O33 при коммутации QF1;

— ёмкостная дополнительная проводимость *B*₀;

– активные проводимости изоляции фаз G_A , G_B , G_C ;

— ёмкостные проводимости изоляции фаз B_A, B_B, B_C .

В качестве подключаемой между фазой и землёй дополнительной ёмкостной проводимости используется блок №315.2 ИПЦ «Учебная техника» ёмкостью 2,7 мкФ (последовательное подключение 6 конденсаторов ёмкостью 16 мкФ).

Ниже представлена программа выполнения лабораторного эксперимента:

1. В первую очередь проверяется нормальный режим лабораторного комплекса на функциональность.

2. Следующим этапом, осуществляется регистрация показания фазных напряжений и их векторных углов с помощью устройства PQA.

3. После сохранения показаний по пункту 2 выключателем нагрузки QF1 коммутируется фаза с землёй, для создания искусственного O33, и регистрируются показания амперметра PA, фазных напряжений и их векторных углов с помощью устройства PQA.

4. После регистрации показаний амперметра РА, фазных напряжений и их векторных углов с помощью устройства РQA, отключается искусственное ОЗЗ.

5. Далее выключателем нагрузки QF2 присоединяется дополнительный конденсатор и осуществляется регистрация показаний аналогично пункта 3.

6. Отключаем все выключатели и питание всего лабораторного комплекса.

С интервалом времени в 30 минут и количеством измерений n=8 производятся измерения фазных напряжений, векторных углов и токов O33 [52, p. 230].

Результаты лабораторного эксперимента для сопоставления разработанного метода с классическим методом амперметра-вольтметра показаны ниже (Таблица 2.1, Таблица 2.2).

Таблица 2.1 – Результаты метода АВ

Показатели	Номер измерения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Полная проводимость изоляции сети <i>Y</i> × 10 ⁻³ , См	0,609	0,609	0,615	0,615	0,613	0,61	0,61	0,612
Ёмкостная проводимость изоляции сети <i>В</i> × 10 ⁻³ , См	0,452	0,454	0,454	0,458	0,456	0,454	0,454	0,456
Активная проводимость изоляции сети <i>G</i> × 10 ⁻³ , См	0,407	0,407	0,438	0,41	0,41	0,408	0,408	0,408

Таблица 2.2 – Результаты разработанного метода

Показатели	Номер измерения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Полная проводимость изоляции сети <i>Y</i> × 10 ⁻³ , См	0,589	0,588	0,589	0,589	0,589	0,588	0,588	0,59
Ёмкостная проводимость изоляции сети $B \times 10^{-3}$, См	0,551	0,551	0,551	0,551	0,551	0,551	0,551	0,551
Активная проводимость изоляции сети $G \times 10^{-3}$, См	0,209	0,207	0,21	0,209	0,211	0,207	0,207	0,212

Ниже на осциллограммах фазных напряжений (Рисунок 2.13, Рисунок 2.14) показаны изменения величин напряжений после подключения дополнительной ёмкостной проводимости, в нашем случае в фазу «А» (красный цвет линии осциллограмм).



Рисунок 2.13 – Осциллограмма фазных напряжений до подключения дополнительной ёмкостной проводимости



Рисунок 2.14 – Осциллограмма фазных напряжений после подключения дополнительной ёмкостной проводимости

В соответствии условии обеспечения достоверности оценки погрешностей, описанный в [53-56], требуется выполнить как минимум четыре измерения. В нашем случае выполняем 8 измерений, и интервал между измерениями составляет 30 минут.

Инструкция вычислений, изложена в [49, с. 9; 53, р. 241; 54, р. 245; 55, р. 128; 56, р. 195], и по которой осуществляется оценка погрешности сравниваемых результатов измерений разработанного метода и базового метода.

1. Рассчитываются средние значения полученных данных

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^{n} X_i \times n^{-1}.$$
(2.56)

2. Рассчитываются среднеквадратичной погрешности

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}.$$
(2.57)

В целях оценки достоверности разработанного метода, определяется значение *α* – доверительной вероятности, соответствующая доверительному интервалу, которая исчисляется в долях среднеквадратичной ошибки *ε*.

Принимаем «доверительную вероятность $\alpha = 0.95$ при котором относительная среднеквадратичная ошибка не должна быть больше значения $\varepsilon = 5\%$ » [54, р. 245] согласно рекомендациям в труде.

3. Абсолютную погрешность параметров изоляции сети рассчитывается с учётом принятого коэффициент Стьюдента $t_{\alpha n} = 2,4$ (по таблице 2 в [54, р. 245]), где количество измерений равно 8 и доверительная вероятность составляет 0.95, тогда

$$\Delta X = t_{\alpha n} \times S_n \times n^{-0.5}. \tag{2.58}$$

4. Относительная погрешность сопоставляемых методов рассчитывается по выражению

$$\Delta X_* = \frac{\Delta X}{\bar{X}} \times 100\%.$$
(2.59)

Статистические показатели параметров изоляции сети сравниваемых методов рассчитаны по полученным данным в ходе лабораторного эксперимента и обработки результатов методом малой выборки.

Выполняется сопоставление результатов двух методов, сведённых в таблице 2.3.

В проведённых исследованиях сравнивались вероятностно-статистические свойства параметров изоляции сети, используя два метода – разработанный метод и классический метод амперметр-вольтметр. Для этого вычислялись случайные относительные среднеквадратические погрешности обоих методов и проводилось сравнение. Если величины среднеквадратичных погрешностей и относительных среднеквадратичных погрешностей сравниваемых методов хорошо совпадают, то это указывает на удовлетворительную точность разработанного метода. Таким образом, результаты сопоставления подтверждают удовлетворительную точность разработанного метода.

59

Наименование метода	п	\overline{X}	\overline{X} S_n		ΔX_*
	Параметры	10 ⁻³ См	10 ⁻³ См	10 ⁻³ См	%
Метод амперметра- вольтметра	Y	0,612	0,003	0,002	0,35%
	В	0,455	0,002	0,002	0,34%
	G	0,412	0,011	0,009	2,18%
Разработанный метод	Y	0,589	0,001	0,001	0,10%
	В	0,551	0,000	0,000	0,00%
	G	0,209	0,002	0,002	0,78%

Таблица 2.3 – Вероятностно-статистические свойства параметров изоляции сети

Разработанный метод характеризуется как более безопасный по сравнению с классическим методом AB, в связи с отсутствием искусственного O33. Это означает, что новый метод снижает риск проблем с безопасностью, которые могут возникнуть из-за искусственных перенапряжений. В добавок, предложенный метод выгодно отличается от других методов контроля состояния изоляции тем, что обладает простым алгоритмом расчёта, что облегчает его использование в электрических сетях с изолированной нейтралью.

Выводы по второму разделу

В разделе решены важные научные задачи, содержащие новые научно обоснованные следующие результаты:

1) разработаны методы определения параметров изоляции в несимметричной сети, заключающиеся в измерении величин фазного напряжения, НПП и их векторных углов до и после присоединения дополнительного конденсатора;

2) гарантировать удовлетворительную точность расчёта параметров изоляции сети при применениях разработанных методов с учётом анализа погрешности для конкретной сети подбирается требуемый конденсатор и при расчёте:

– полной проводимости изоляции сети подбирается конденсатор, чтобы при: $sin(z_*) = 0,2$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,8$: и $U_{A*} = 0,2 - 0,8$; $sin(z_*) = 0,4$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,33 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,69$; $sin(z_*) = 0,6$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,34:0,46 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,72 - 0,8:0,2 - 0,6$; $sin(z_*) = 0,8$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,34:0,46 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,72 - 0,8:0,2 - 0,6$; $sin(z_*) = 0,8$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,34:0,46 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,72 - 0,8:0,2 - 0,6$; $sin(z_*) = 0,8$ напряжение нулевой последовательности в относительных

– ёмкостной проводимости изоляции сети подбирается конденсатор, чтобы при: $sin(z_*) = 0,2$ напряжение нулевой последовательности в

относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,8$: и $U_{A*} = 0,2 - 0,8$; $sin(z_*) = 0,4$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,31 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,68$; $sin(z_*) = 0,6$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,44 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,53$; $sin(z_*) = 0,8$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,44 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,53$; $sin(z_*) = 0,8$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,4$: 0,51 - 0,8 и $U_{A*} = 0,6 - 0,8$: 0,2 - 0,5, тогда погрешность будет менее 10%;

– активной проводимости изоляции сети подбирается конденсатор, $sin(z_{*}) = 0,2$ напряжение нулевой последовательности чтобы при: В относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0.2 - 0.62$: и $U_{A*} =$ 0.3 - 0.8: $sin(z_{*}) = 0.4$ напряжение нулевой последовательности В относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,48 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,2$ 0,54; $sin(z_*) = 0,6$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,51 - 0,8$ и $U_{A*} = 0,2 - 0,49$; $sin(z_*) =$ 0,8 напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0.2 - 0.33:0.5 - 0.8$ и $U_{A*} = 0.6 - 0.8:0.2 - 0.5$, тогда погрешность будет менее 10%;

– активной проводимости повреждения изоляции фазы подбирается $sin(z_{*}) = 0.2$ конденсатор, чтобы при: напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах U_{N*} = 0,2-0,8И $U_{A*} = 0,2 - 0,8;$ $sin(z_{*}) = 0.4$ напряжение нулевой последовательности в относительных единицах находилось в пределах U_{N*} = $sin(z_{*}) = 0.6$ 0,38 - 0,8 $U_{\rm A*} = 0.2 - 0.8;$ напряжение нулевой И последовательности в относительных единицах находилось в пределах U_{N*} = нулевой $sin(z_{*}) = 0.8$ напряжение 0,61 - 0,8 $U_{\rm A*} = 0.2 - 0.8;$ И последовательности в относительных единицах находилось в пределах U_{N*} = 0,2 - 0,52 и $U_{A*} = 0,33 - 0,8$, тогда погрешность будет менее 10%;

3) проведённый анализ погрешности методов показал, что они обладают достаточно высокой точностью, а также имеют преимущество в том, что для их проведения не требуется изобретение специальных приборов. Для регистрации данных используется анализатор качества электроэнергии или цифровой прибор учёта, который оборудован модулями для измерения фазных углов напряжений фаз.

4) выполнен лабораторный эксперимент, сравнивающий разработанный метода с классическим методом амперметра-вольтметра. В результате осуществлён вероятностно-статистический анализ погрешности измерений, которые показывает хорошую сходимость относительных среднеквадратичных погрешностей. Сравнительный анализ показал, что разработанный метод обеспечивает более точные результаты измерений, чем метод, основанный на использовании амперметра и вольтметра.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНОГО ТОКА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ, ТОКА УТЕЧКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ

На предприятиях, занимающиеся добычей горных пород, предъявляются высокие требования к надёжности электроснабжения и электробезопасности при эксплуатации электроустановок, где наиболее распространяемыми авариями, представляют собой однофазные замыкания на землю из-за более быстрого старения изоляции.

Величина тока ОЗЗ и тока утечки описывают требуемые критерии электробезопасности, к ним относятся напряжение прикосновения и напряжение шага, соответственно задача повышения качества способов определения напряжения прикосновения и устройств контроля являются актуальными. Большего всего это необходимо для электрических сетей горнодобывающих предприятий, поскольку тяжёлые условия эксплуатации обусловлены перемещением фронта горных работ, влиянием атмосферных осадков, вибрацией, запылённостью, влажностью, и т.д. [57-59].

При нарушении целостности изоляции между фазой и землёй возникает напряжение прикосновения и шага. Поскольку напряжение прикосновения является образующим напряжения шага, то в дальнейшем используется термин напряжения прикосновения. Напряжение прикосновения считается одним из главных критерием электробезопасности и в большинстве государствах в целях создания безопасных условий эксплуатации электрооборудования, оно является нормируемым. Соответственно, величину напряжения прикосновения важно контролировать и на её основе планировать организационные и технические мероприятия, которые обеспечат повышения уровня электробезопасности на производстве.

Для разработки метода определения напряжения прикосновения требуется использовать методы определения тока утечки и тока ОЗЗ, которые основаны на измерении абсолютных величин фазного напряжения, НПП и их векторных углов до и после введения конденсатора.

3.1 Разработка методов определения тока однофазного замыкания на землю и тока утечки

В эксплуатации электроустановок горного производство очень важно иметь представление о возможных опасностях, связанных с напряжением шага и прикосновения из-за того, что удельное сопротивление земли не равно нулю. В случае возникновения ОЗЗ, протекающий ток вблизи места замыкания возрастает потенциал земли, а также способствует к разрушению целостности изоляции других фаз, что чревато появлению иных замыканий по причине повышения фазного напряжения до линейных значений.

К примеру, ранее описанному в разделе 1, метод амперметра – вольтметра, не отвечающий требованиям безопасности, демонстрирует металлическое ОЗЗ, и как вследствие, напряжение прикосновения в месте ОЗЗ достигает максимальных значений. Общеизвестные способы определения тока ОЗЗ не нашли широкого применения в несимметричных сетях с изолированной нейтралью, оттого что, характеризуются существенными погрешностями.

В целях разработки методов определения тока утечки и тока O33 задействуется ранее разработанный метод определения параметров изоляции сети и полагаем, что имеет место повреждения изоляции фазы «А» по отношению к земле.

Согласно разработанному методу, осуществляем присоединение дополнительного конденсатора, с последующим вычислением искомых величин:

– абсолютная величина комплексной проводимость изоляции сети по формуле (2.35):

$$Y = \frac{B_0 U_{N1} \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(\varphi - \alpha)}}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)};$$

– активная проводимость повреждения изоляции фазы по формуле (2.32)

$$G_{0} = \frac{B_{0}U_{N}U_{N1}}{U_{A2}U_{N}\sin(\varphi_{1} - \alpha_{1}) - U_{A1}U_{N1}\sin(\varphi - \alpha)}.$$

Применив закон Ома, сформулированный через полную проводимость, к уравнению (2.35), находим расчётный ток ОЗЗ:

$$I_o = Y \cdot U_N = \frac{B_0 U_N U_{N1} \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(\varphi - \alpha)}}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)}.$$
(3.1)

Для того, чтобы рассчитать ток утечки через активную проводимость повреждения изоляции фазы, используется математическая зависимость:

$$I_{\rm yT} = G_0 \cdot U_{A1}. \tag{3.2}$$

Подставив выражение (2.32) в (3.2), получаем математическую зависимость расчёт тока утечки через активную проводимость повреждения изоляции фазы:

$$I_{\rm yT} = \frac{B_0 U_N U_{N1} U_{A1}}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)}.$$
(3.3)

Полученные математические зависимости вычисления тока утечки и тока ОЗЗ правомерны в случае нарушение целостности изоляции фазы «А», для других фаз возникает необходимость учитывать чередование фаз.

В независимости от состояния изоляции всегда присутствуют токи утечки и со временем из-за ухудшения изоляционных свойств, эти токи возрастают. Информированность о токе утечки позволяет своевременно диагностировать не исправность участка сети, с последующим производством организационнотехнических мероприятий.

Осведомлённость значениями расчётного тока O33 обеспечивает правильную конфигурацию защиты, и несомненно снижает риски электротравматизма.

Разработанные методы определения тока утечки и тока O33 обеспечивают безопасную эксплуатацию электроустановок и обладают достаточной точностью для определения требуемых величин.

3.2 Анализ погрешности определения тока однофазного замыкания на землю

Вычисление расчётного тока O33 по любой форме уравнения имеет погрешность и с целью достоверности разработанного метода определения тока O33 необходимо выполнить анализ погрешности. При этом используются анализ погрешности при косвенных измерениях, так как на прямую выполнить измерение по разработанной математической зависимости расчёта тока O33 не представляется возможным.

Использую уравнение (3.1) вычисляем относительную среднеквадратичную погрешность определения тока ОЗЗ:

$$I_{o} = \frac{B_{0}U_{N}U_{N1}\sqrt{U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1}U_{N}cos(\varphi - \alpha)}}{U_{A2}U_{N}sin(\varphi_{1} - \alpha_{1}) - U_{A1}U_{N1}sin(\varphi - \alpha)},$$

где U_{A1} , U_N , U_{A2} , U_{N1} , $\varphi - \alpha = z$, $\varphi_1 - \alpha_1 = z_1$, B_0 – регистрируемые данные при прямых измерениях.

Относительная среднеквадратичная погрешность функции определения тока ОЗЗ вычисляется по уравнению (3.4):

$$\varepsilon_{Y} = \frac{\Delta I_{o}}{\Delta} = \frac{1}{I_{o}} \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial U_{A1}} \Delta U_{A1} \right)^{2} + \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial U_{A2}} \Delta U_{A2} \right)^{2} + \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial U_{N}} \Delta U_{N} \right)^{2} + \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial U_{N1}} \Delta U_{N1} \right)^{2} + \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial \sin(z)} \Delta \sin(z) \right)^{2} + \right)^{2} + \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial \sin(z)} \Delta \sin(z) \right)^{2} + \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial B_{0}} \Delta B_{0} \right)^{2} \right)^{2} + \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial B_{0}} \Delta B_{0} \right)^{2} \right)^{2} + \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial B_{0}} \Delta B_{0} \right)^{2} + \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial B_{0} - \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial B_{0} - \left(\frac{\partial I_{o}}{\partial$$

где $\partial I_o \partial U_{A1}^{-1}$; $\partial I_o \partial U_{A2}^{-1}$; $\partial I_o \partial U_N^{-1}$; $\partial I_o \partial U_{N1}^{-1}$; $\partial I_o \partial \sin(z)^{-1}$; $\partial I_o \partial \sin(z_1)^{-1}$; $\partial I_o \partial B_0^{-1}$ – частные производные функции $I_o = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, \sin(z), \sin(z_1), B_0)$. Определяем частные производные функции $I_o = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0)$ по переменным $U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0$, равнение (3.5):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial U_{A1}} &= -\frac{B_0 U_{N1} U_N^2 \left(\bigcup_{A2} \sin(z_1) \left(\bigcup_N \cos(z) - \bigcup_{A1} \right) - \right)}{\left(\bigcup_{A2} U_N \sin(z_1) - \bigcup_{A1} U_{N1} \sin(z) \right)^2 \sqrt{\bigcup_{A1}^2 + \bigcup_N^2 - 2\bigcup_{A1} U_N \cos(z)}}; \\ &\frac{\partial}{\partial U_{A2}} = -\frac{B_0 U_N^2 U_{N1} \sin(z_1) \sqrt{\bigcup_{A1}^2 + \bigcup_N^2 - 2\bigcup_{A1} U_N \cos(z)}}{\left(\bigcup_{A2} U_N \sin(z_1) - \bigcup_{A1} U_{N1} \sin(z) \right)^2}; \\ &\frac{\partial}{\partial U_N} = \frac{B_0 U_{N1}^2 \left(\frac{\sin(z_1) U_N^2 U_{A2} (U_N - \bigcup_{A1} \cos(z)) + \right)}{\left(\bigcup_{A2} U_N \sin(z_1) - \bigcup_{A1} U_{N1} \sin(z) \right)^2 \sqrt{\bigcup_{A1}^2 + U_N^2 - 2\bigcup_{A1} U_N \cos(z)}; \\ &\frac{\partial}{\partial U_N} = \frac{B_0 U_N^2 U_{A2} \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z) \right)^2 \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}; \\ &\frac{\partial}{\partial U_N} = \frac{B_0 U_N^2 U_{A2} \sin(z_1) \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}; \\ &\frac{\partial}{\partial U_N} = \frac{B_0 U_N^2 U_{A2} \sin(z_1) \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}; \\ &\frac{\partial}{\partial U_N} = \frac{B_0 U_{A1} U_N U_{N1} \left(\frac{\sin(z_1) \sin(z) U_{A2} U_N^2 - U_{A1} U_N U_{N1} \sin(z) \right)^2}{\left(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z) \right)^2 \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}; \\ &\frac{\partial}{\partial \sin(z_1)} = -\frac{B_0 U_{A2} U_N^2 U_{N1} \cos(z_1) \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}}{\left(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z) \right)^2 \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}; \\ &\frac{\partial}{\partial B_0} = \frac{U_N U_{N1} \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}}{\left(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z) \right)^2}, \\ &\frac{\partial}{\partial B_0} = \frac{U_N U_{N1} \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(z)}}{\left(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z) \right)^2}. \end{aligned}$$

Здесь ΔU_{A1} , ΔU_{A2} , ΔU_N , ΔU_{N1} , $\Delta sin(z)$, $\Delta sin(z_1)$, ΔB_0 – абсолютные погрешности прямых измерений величин U_{A1} , U_{A2} , U_N , U_{N1} , sin(z), $sin(z_1)$, B_0 которые определяются следующими выражениями, формула (3.6):

$$\Delta U_{A1} = U_{A1} \Delta U_{A1*};$$

$$\Delta U_{A2} = U_{A2} \Delta U_{A2*};$$

$$\Delta U_N = U_N \Delta U_{N*};$$

$$\Delta U_{N1} = U_{N1} \Delta U_{N1*};$$

$$\Delta \sin(z) = \sin(z) \Delta \sin(z_*);$$

$$\Delta \sin(z_1) = \sin(z_1) \Delta \sin(z_{1*});$$

$$\Delta B_0 = B_0 \Delta B_{0*},$$

(3.6)

где $\Delta U_{A1*}, \Delta U_{A2*}, \Delta U_{N*}, \Delta U_{N1*}, \Delta sin(z_*), \Delta sin(z_{1*}) - O\Pi$ измерительных цепей напряжения;

 ΔB_{0*} — ОП измерительного устройства, которое регистрирует дополнительную емкостную проводимость, введенную в фазу «А».

При этом полагаем $\Delta U_{A1*} = \Delta U_{A2*} = \Delta U_{N*} = \Delta U_{N1*} = \Delta sin(z_*) = \Delta sin(z_{1*}) = \Delta B_{0*} = \Delta c$ целью вычисления ОП измерительных устройств.

После замены в уравнении (3.4) переменных на их частные производные (3.5) и частные абсолютные погрешности (3.6), при этом полагаем $\Delta U_* = \Delta B_0 = \Delta$, полученное уравнение может быть дополнительно упрощено и приведено к более простому виду, равнение (3.7):

$$\varepsilon_{I_{o}} = \Delta \begin{bmatrix} U_{N}^{2}U_{A1}^{2} \begin{pmatrix} U_{A2} \sin(z_{1}) (U_{N} \cos(z) - U_{A1}) - \\ -U_{N1} \sin(z) (U_{N} - U_{A1} \cos(z)) \end{pmatrix}^{2} \\ \hline (U_{A2}U_{N} \sin z_{1} - U_{A1}U_{N1} \sin z)^{2} (U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1}U_{N} \cos z)^{2} \\ \hline \frac{2U_{N}^{2}U_{A2}^{2} \sin z_{1}^{2}}{(U_{A2}U_{N} \sin z_{1} - U_{A1}U_{N1} \sin z)^{2}} + \\ \begin{pmatrix} \sin(z_{1}) U_{N}^{2}U_{A2}(U_{N} - U_{A1} \cos(z)) + \\ + U_{A1}U_{N1} \sin(z) (3U_{A1}U_{N} \cos(z) - 2U_{N}^{2} - U_{A1}^{2}) \end{pmatrix}^{2} \\ \hline (U_{A2}U_{N} \sin z_{1} - U_{A1}U_{N1} \sin z)^{2} (U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1}U_{N} \cos z)^{2}} + \\ \frac{U_{A1}^{2} \sin z^{2} \begin{pmatrix} \sin z_{1} \sin z U_{A2}U_{N}^{2} - U_{A1}U_{N}U_{N1} \sin z^{2} + \\ + U_{N1}(U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1}U_{N} \cos z) \cos z \end{pmatrix}^{2}}{(U_{A2}U_{N} \sin z_{1} - U_{A1}U_{N1} \sin z)^{2} (U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1}U_{N} \cos z)^{2}} + \\ \frac{U_{N}^{2}U_{A2}^{2} \sin z_{1}^{2} \cos z_{1}^{2}}{(U_{A2}U_{N} \sin z_{1} - U_{A1}U_{N1} \sin z)^{2} (U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1}U_{N} \cos z)^{2}} + 1 \end{bmatrix}^{2}$$

$$(3.7)$$

Сформулированное уравнение (3.7) отобразим в относительных единицах, и используя программное обеспечение Maple и Python.Matplotlib построим график, равнение (3.8):

$$\varepsilon_{I_{o}} = \Delta \begin{bmatrix} U_{N*}^{2} U_{A*}^{2} \begin{pmatrix} U_{N*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}} - U_{A*} - \\ -\sin z_{*} (U_{N*} - U_{A*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}}) \end{pmatrix}^{2} \\ \hline (U_{N*} - U_{A*}\sin z_{*})^{2} (U_{A*}^{2} + U_{N*}^{2} - 2U_{A*}U_{N*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}})^{2} \\ \hline \frac{2U_{N*}^{2}}{(U_{N*} - U_{A*}\sin z_{*})^{2}} + 1 \\ \hline \begin{pmatrix} U_{N*}^{2} (U_{N*} - U_{A*}\sin z_{*})^{2} \\ +U_{A*}\sin z_{*} (3U_{A*}U_{N*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}}) + \\ +U_{A*}\sin z_{*} (3U_{A*}U_{N*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}} - 2U_{N*}^{2} - U_{A*}^{2}) \end{pmatrix}^{2} \\ \hline (U_{N*} - U_{A*}\sin z_{*})^{2} (U_{A*}^{2} + U_{N*}^{2} - 2U_{A*}U_{N*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}})^{2} \\ \hline U_{A*}^{2}\sin z_{*}^{2} \begin{pmatrix} \sin z_{*}U_{N*}^{2} - U_{A*}U_{N*}\sin z_{*}^{2} + \\ (U_{A*}^{2} + U_{N*}^{2} - 2U_{A*}U_{N*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}}) \sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}} \end{pmatrix}^{2} \\ \hline (U_{N*} - U_{A*}\sin z_{*})^{2} (U_{A*}^{2} + U_{N*}^{2} - 2U_{A*}U_{N*}\sqrt{1 - \sin z_{*}^{2}})^{2} \end{bmatrix}^{2}$$

где $U_{A*} = U_{A1} * U_{A2}^{-1}, U_{N*} = U_N * U_{N1}^{-1}, sin(z_*) = sin(z) * sin(z_1)^{-1}.$

Ниже иллюстрируется 3D график (Рисунок 3.1) ОП определения тока ОЗЗ по $\varepsilon_{I_0} = \frac{\Delta I_0}{\Delta} = f(U_{A*}, U_{N*}, sin(z_*))$, полученная по математическому выражению (3.8).

Очевидно, что смещение нулевой точки из-за подключения дополнительного конденсатора сказывается на результатах построения ОП определения тока ОЗЗ.



Рисунок 3.1 – Относительные среднеквадратичные погрешности определения тока ОЗЗ

При расчёте тока ОЗЗ на основе построенного графика (Рисунок 3.1) относительной среднеквадратичной погрешности подбирается конденсатор, чтобы при: $sin(z_*) = 0,2$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,8$ и фазное напряжение $U_{A*} = 0,2 - 0,8$; $sin(z_*) = 0,4$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,3 - 0,8$ и фазное напряжение $U_{A*} = 0,2 - 0,6$; $sin(z_*) = 0,6$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,3 - 0,8$ и фазное в пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,54$; $sin(z_*) = 0,8$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,4 - 0,8$ и н фазное напряжение $U_{A*} = 0,2 - 0,54$; $sin(z_*) = 0,8$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,4 - 0,8$ и фазное напряжение $U_{A*} = 0,2 - 0,4$. Данные интервалы напряжения нулевой последовательности и фазного напряжения обеспечивают требуемую погрешность при косвенных измерениях тока ОЗЗ, которая не превышает 10% при применениях измерительных средств с КТ 1.0, в случае применения измерительного средства с КТ 0.5 погрешность меньше 5%,

и при КТ 0.2 измерительного прибора, обеспечивается погрешность не более 2%.

3.3 Анализ погрешности определения тока утечки

Надёжное обнаружение и ограничение токов утечки на землю имеет решающее значение для безопасности при горных работах. С этой целью разработан метод определения тока утечки, основанный на измерениях следующих показателей электрической сети: напряжение нулевой последовательности – U_N , U_{N1} , фазное напряжение – U_{A1} , U_{A2} , и их векторных углов – α , α_1 , φ , φ_1 до и после присоединения дополнительного конденсатора. Математический аппарат справедлив если имеется повреждение изоляции между фазой А и землей, в случае повреждения изоляции других фаз, необходимо осуществить чередование фаз.

Использую уравнение (3.3) вычисляем относительную среднеквадратичную погрешность определения тока утечки:

$$I_{\rm yT} = \frac{B_0 U_N U_{N1} U_{A1}}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)}.$$

где U_{A1} , U_N , U_{A2} , U_{N1} , $\varphi - \alpha = z$, $\varphi_1 - \alpha_1 = z_1$, b_0 – регистрируемые данные при прямых измерениях.

Относительная среднеквадратичная погрешность функции определения тока утечки вычисляется по уравнению (3.9):

$$\varepsilon_{I_{yT}} = \frac{\Delta I_{yT}}{\Delta} = \frac{1}{I_{yT}} \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial I_{yT}}{\partial U_{A1}} \Delta U_{A1} \right)^2 + \left(\frac{\partial I_{yT}}{\partial U_{A2}} \Delta U_{A2} \right)^2 + \left(\frac{\partial I_{yT}}{\partial U_N} \Delta U_N \right)^2 + \left(\frac{\partial I_{yT}}{\partial U_N} \Delta U_N \right)^2 + \left(\frac{\partial I_{yT}}{\partial \sin(z)} \Delta \sin(z) \right)^2 + \right. , \qquad (3.9)$$

$$\left. + \left(\frac{\partial I_{yT}}{\partial \sin(z_1)} \Delta \sin(z_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial I_{yT}}{\partial B_0} \Delta B_0 \right)^2 \right\}$$

где $\partial I_{yT} \partial U_{A1}^{-1}$; $\partial I_{yT} \partial U_{A2}^{-1}$; $\partial I_{yT} \partial U_{N}^{-1}$; $\partial I_{yT} \partial U_{N1}^{-1}$; $\partial I_{yT} \partial sin(z)^{-1}$; $\partial I_{yT} \partial Sin(z)^{-1}$; $\partial I_{yT} \partial B_0^{-1}$ – частные производные функции $I_{yT} = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0)$.

Определяем частные производные функции $I_{yT} = f(U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0)$ по переменным $U_{A1}, U_{A2}, U_N, U_{N1}, sin(z), sin(z_1), B_0, формула (3.10):$

$$\partial I_{yT} \partial U_{A1}^{-1} = \frac{B_0 U_{N1} U_N^2 U_{A2} \sin(z_1)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};$$
(3.10)

$$\begin{split} \partial I_{\rm yT} \partial U_{A2}^{\ -1} &= -\frac{B_0 U_{N1} U_N^2 U_{A1} \sin(z_1)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};\\ \partial I_{\rm yT} \partial U_N^{\ -1} &= -\frac{B_0 U_{A1}^2 U_{N1}^2 \sin(z)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};\\ \partial I_{\rm yT} \partial U_{N1}^{\ -1} &= \frac{B_0 U_{A1} U_{A2} U_N^2 \sin(z_1)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};\\ \partial I_{\rm yT} \partial \sin(z)^{-1} &= \frac{B_0 U_N U_{A1}^2 U_{N1}^2 \cos(z)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};\\ \partial I_{\rm yT} \partial \sin(z_1)^{-1} &= -\frac{B_0 U_{A1} U_{A2} U_{N1} U_{N1}^2 \cos(z_1)}{(U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2};\\ \partial I_{\rm yT} \partial B_0 &= \frac{U_N U_{N1} U_{A1}}{U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z)}. \end{split}$$

Здесь ΔU_{A1} , ΔU_{A2} , ΔU_N , ΔU_{N1} , $\Delta sin(z)$, $\Delta sin(z_1)$, ΔB_0 – абсолютные погрешности прямых измерений величин U_{A1} , U_{A2} , U_N , U_{N1} , sin(z), $sin(z_1)$, B_0 которые определяются следующими выражениями, формула (3.11):

$$\Delta U_{A1} = U_{A1} \Delta U_{A1*};$$

$$\Delta U_{A2} = U_{A2} \Delta U_{A2*};$$

$$\Delta U_N = U_N \Delta U_{N*};$$

$$\Delta U_{N1} = U_{N1} \Delta U_{N1*};$$

$$\Delta sin(z) = sin(z) \Delta sin(z_*);$$

$$\Delta sin(z_1) = sin(z_1) \Delta sin(z_{1*});$$

$$\Delta B_0 = B_0 \Delta B_{0*}.$$

(3.11)

где $\Delta U_{A1*}, \Delta U_{A2*}, \Delta U_{N*}, \Delta U_{N1*}, \Delta sin(z_*), \Delta sin(z_{1*}) - O\Pi$ измерительных цепей напряжения;

 $\Delta B_{0*} - O\Pi$ измерительного устройства, которое регистрирует дополнительную ёмкостную проводимость, введённую в фазу «А».

При этом полагаем $\Delta U_{A1*} = \Delta U_{A2*} = \Delta U_{N*} = \Delta U_{N1*} = \Delta sin(z_*) = \Delta sin(z_{1*}) = \Delta B_{0*} = \Delta$ с целью вычисления ОП измерительных устройств.

После замены в уравнении (3.9) переменных на их частные производные (3.10) и частные абсолютные погрешности (3.11), при этом полагаем $\Delta U_* = \Delta B_0 = \Delta$, полученное уравнение может быть дополнительно упрощено и приведено к более простому виду, формула (3.12):

$$\varepsilon_{I_{\rm yT}} = \Delta \sqrt{\frac{U_{A2}^2 U_{A1}^2 U_N^2 \cos(z_1)^2 \sin(z_1)^2 + U_{A1}^4 U_{N1}^2 \cos(z)^2 \sin(z)^2 + \\ + 3U_{A2}^2 U_{A1}^2 U_N^2 \sin(z_1)^2 + 2U_{A1}^4 U_{N1}^2 \sin(z)^2 + \\ U_{A2}^2 U_N^2 \sin(z_1)^2 - 2U_{A1}^3 U_{A2} U_N U_{N1} \sin(z_1) \sin(z) \\ (U_{A2} U_N \sin(z_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(z))^2}$$
(3.12)

Сформулированное уравнение (3.12) отобразим в относительных единицах, и использую программное обеспечение Maple и Python.Matplotlib построим график, формула (3.13):

$$\varepsilon_{I_{\rm yT}} = \Delta_{\sqrt{\frac{U_{A*}^4 \sin(z_*)^2 (1 - \sin(z_*)^2) + 3U_{A*}^2 U_{N*}^2 + U_{A*}^2 \sin(z_*)^2 + U_{N*}^2 - 2U_{A*}^3 U_{N*} \sin(z_*)}{(U_{N*} - U_{A*} \sin(z_*))^2}},$$
(3.13)

где $U_{A*} = U_{A1} * U_{A2}^{-1}$, $U_{N*} = U_N * U_{N1}^{-1}$, $sin(z_*) = sin(z) * sin(z_1)^{-1}$ Ниже иллюстрируется 3D график (Рисунок 3.2) ОП определения тока O33

ниже иллюстрируется 3D график (Рисунок 3.2) ОП определения тока ОЗЗ по $\varepsilon_{I_{yT}} = \frac{\Delta I_{yT}}{\Delta} = f(U_{A*}, U_{N*}, sin(z_*)),$ полученная по математическому выражению (3.8).

Очевидно, что смещение нулевой точки из-за подключения дополнительного конденсатора сказывается на результатах построения ОП определения тока ОЗЗ.



Рисунок 3.2 – ОП определения тока утечки

При расчёте тока утечки на основе построенного графика (Рисунок 3.2) относительной среднеквадратичной погрешности подбирается конденсатор, чтобы при: $sin(z_*) = 0,2$ ННП в относительных единицах находилось в

пределах $U_{N*} = 0,2 - 0,8$ и фазное напряжение $U_{A*} = 0,2 - 0,8$; $sin(z_*) = 0,4$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,28 - 0,8$ и фазное напряжение $U_{A*} = 0,2 - 0,55$; $sin(z_*) = 0,6$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,4 - 0,8$ и фазное напряжение $U_{A*} = 0,2 - 0,5$; $sin(z_*) = 0,8$ ННП в относительных единицах находилось в пределах $U_{N*} = 0,4 - 0,8$ и фазное напряжение $U_{A*} = 0,2 - 0,4$. Данные интервалы напряжения нулевой последовательности и фазного напряжения обеспечивают требуемую погрешность при косвенных измерениях тока утечки, которая не превышают 10% при применениях измерительных средств с КТ 1.0, в случае применения измерительного средства с КТ 0.5 погрешность меньше 5%, и при КТ 0.2 измерительного прибора, обеспечивается погрешность не более 2%.

3.4 Методика определения тока утечки и тока однофазного замыкания на землю

В электросетях горной промышленности, как и на любых других электрических сетях, возникают аварии, где большую часть, которых составляют однофазные замыкания на землю. Для эффективной работы релейной защиты необходимо знать не проектную величину тока однофазного замыкания, имеющую значительную погрешность вследствие принимаемых упрощений в ходе решения задачи, а значение, полученное опытным путём. Кроме того, возникают повреждения изоляции фаз, обуславливающие утечку тока и дополнительную потерю мощности. Для предотвращения перехода тока утечки в ОЗЗ землю, необходимо контролировать состояние изоляции.

Величина тока ОЗЗ напрямую зависит от ёмкости сети, которая в основном образовывается из-за протяжённости сети. А также предельное значение тока ОЗЗ нормируется, и в случае его превышения необходимо его компенсировать. В то же время в коротких сетях из-за малой ёмкости сети устройства защитного отключения не функционируют должным образом, так как ток ОЗЗ не превышает порог чувствительности УЗО. Помимо этого, ёмкость сети – не постоянная величина, обусловленная атмосферными изменениями, прерывистой работой электроприемников, блуждающими токами и различными перенапряжениями.

С целью практической реализации разработанного метода разработана методика выполнения измерений с последующим вычислением тока утечки и тока ОЗЗ, которая иллюстрируется электрической схемой (Рисунок 3.3).

В качестве ёмкостной дополнительной проводимости используется разные номинальные ёмкости конденсаторов типа КБГ-МП, которые подбираются на основе проведённого анализа погрешности измерения.



Рисунок 3.3 – Принципиальная электрическая определения тока утечки и тока ОЗЗ

На принципиальной электрической схеме (Рисунок 3.3) изображено следующее:

- 3-х электрическая сеть с изолированной нейтралью;

– анализатор качества электроэнергии PQA, регистрирующий показания фазного напряжения – U_{A1} , U_{A2} , напряжения нулевой последовательности – U_N , U_{N1} , и их векторных углов – α , α_1 , φ , φ_1 до и после присоединения дополнительного конденсатора;

— QF1 — коммутационное устройство, присоединяющий дополнительный конденсатор;

– ёмкостная дополнительная проводимость – B_0 , которая вводится в фазу «А»;

— активная проводимость повреждения изоляции фазы «А» – G_0 ;

– ёмкостные проводимости изоляции фаз – B_A , B_B , B_C ;

– активные проводимости изоляции фаз – G_A , G_B , G_C .

Методика определения тока утечки и тока O33 выполняется по следующей алгоритму:

1. В первую очередь проверяется цепи и приборы на функциональность.

2. Следующим этапом осуществляется регистрация показаний фазных напряжений, напряжения нулевой последовательности и их векторных углов.

3. После сохранения показаний по пункту 1 коммутирующим устройством QF1 присоединяется дополнительный конденсатор и осуществляется повторная регистрация показаний анализатором качества электроэнергии.
4. По завершению измерений восстанавливается первичная схема участка цепи.

Использую сохранённый данные показаний фазного напряжения – U_{A1}, U_{A2} , напряжения нулевой последовательности – U_N, U_{N1} , и их векторных углов – $\alpha, \alpha_1, \varphi, \varphi_1$ рассчитываются ток утечки и ток ОЗЗ по математическим зависимостям:

- ток утечки (3.3):

$$I_{\rm yT} = \frac{B_0 U_N U_{N1} U_{A1}}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)};$$

- ток ОЗЗ (3.1):

$$I_{o} = \frac{B_{0}U_{N}U_{N1}\sqrt{U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1}U_{N}cos(\varphi - \alpha)}}{U_{A2}U_{N}sin(\varphi_{1} - \alpha_{1}) - U_{A1}U_{N1}sin(\varphi - \alpha)}$$

Результаты исследования описывают состояние конкретного участка электрической сети, и в случае необходимости, принимаются организационнотехнические меры, направленные на улучшение эффективности системы электроснабжения горнодобывающего предприятия.

3.5 Разработка метода определения ожидаемого напряжения прикосновения

В горных предприятиях нарушение целостности изоляции одной из фаз сети относительно земли является распространённой проблемой, которая может привести к срабатыванию защитных устройств и увеличению рисков электротравматизма. Неработоспособность или отсутствие усовершенствованных устройств защитного отключения могут также способствовать данной проблеме.

Поскольку напряжение прикосновения напрямую имеет зависимость от величины тока ОЗЗ, то для разработки метода определения ожидаемого напряжения прикосновения используем математическую зависимость (3.1):

$$I_{o} = \frac{B_{0}U_{N}U_{N1}\sqrt{U_{A1}^{2} + U_{N}^{2} - 2U_{A1}U_{N}cos(\varphi - \alpha)}}{U_{A2}U_{N}sin(\varphi_{1} - \alpha_{1}) - U_{A1}U_{N1}sin(\varphi - \alpha)}$$

При аварийном режиме, когда имеет место повреждение целостности изоляции, ожидаемое напряжение прикосновения вычисляется по формуле (3.14) [60]

$$U_{\rm np} = \beta I_o R_{\rm s} \,, \tag{3.14}$$

где R_3 – сопротивление заземления;

β – коэффициент напряжения прикосновения.

Подставив уравнение (3.1) в уравнение (3.14), получим математическую зависимость определения ожидаемого напряжения прикосновения в не симметричной сети, формула (3.15):

$$U_{\rm np} = \frac{\beta R_3 B_0 U_N U_{N1} \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(\varphi - \alpha)}}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)} .$$
(3.15)

Анализ погрешности метода определения ожидаемого напряжения прикосновения не требуется, так как используется уравнение (3.1), где определение тока ОЗЗ и определение ожидаемого напряжения прикосновения имеют схожие ОП, поскольку коэффициент напряжения прикосновения и сопротивление заземления являются постоянными величинами.

Разработанный метод определения ожидаемого напряжения прикосновения характеризуется достаточной точностью, несложностью и электробезопасным производством измерений.

Выводы по третьему разделу

По результатам исследований в настоящей главе получены следующие результаты:

1. Разработан метод безопасного определения тока утечки и тока O33 в несимметричной сети с изолированной нейтралью, который характеризуется достаточной точностью, несложностью и электробезопасным производством измерений.

2. Разработана методика безопасного определения тока утечки и тока O33 в несимметричной сети с изолированной нейтралью. Результаты измерений служат принятием при решении о необходимости внедрении организационнотехнические мероприятия, которые способствуют улучшению эффективности системы электроснабжения.

3. Разработан метод определения ожидаемого напряжения прикосновения в не симметричной сети с изолированной нейтралью горной промышленности характеризуется достаточной точностью, несложностью и электробезопасным производством измерений.

4 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ СЕТИ В УСЛОВИЯХ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

4.1 Исходные положения

На сегодняшний день накоплен значительный объем информации по изучению состояния изоляции карьерных сетей, что нашло отражение в повышении уровня электробезопасности при производстве открытых горных работ. Однако эти исследования не могут служить стандартом для всех типов карьеров, по таким причинам, как расположение карьеров в различных климатических зонах, количество и мощность электроустановок, длина ЛЭП.

В силу своего специфичного режима работ электрической сети горного производства, который обусловлен применением повторно-кратковременного задействования энергоёмких двигателей, где токи холостого хода повышаются в кратчайшее время до токов стопорения. Все эти колебательные процессы сказываются на отклонениях величин фазных напряжения относительно земли от номинальных значений.

По правилам эксплуатации горных машин и комплексов необходимо использовать устройства защитного отключения. Исследования полноценной функциональности УЗО по отношению к защищаемой электрической сети не проводятся, только лишь проверка срабатывания путём опробования дополнительной функции устройство, которая имитирует металлическое ОЗЗ.

Исходя из вышеизложенного, необходимо провести исследования параметров изоляции сети на различных участках горнодобывающего производства. Целесообразность применение УЗО в защищаемой области электрической сети без должных экспериментальных исследований не имеет смысла. Оценка работы УЗО на различных участках производства может выполнена на основаниях полученных числовых значений параметров изоляции сети, тока ОЗЗ и угла диэлектрических потерь.

4.2 Числовые значения параметров изоляции сети

Апробация разработанного метода на эксплуатирующихся экскаваторах компании ТОО "Богатырь Комир" с использованием всех необходимых дополнительных устройств позволило получить актуальные данные о состоянии изоляции.

Измерение параметров изоляции сети было проведено в соответствии с разработанной методикой, основанной на методе определения параметров изоляции сети. Данный метод заключается в измерении фазовых напряжений– $U_{A1}, U_{A2}, \text{ НПП} - U_N, U_{N1}, \text{ и их векторных углов} - \alpha, \alpha_1, \varphi, \varphi_1$ до и после присоединения дополнительного конденсатора. Результаты измерения служат для вычисления [61]:

– полная проводимость изоляции сети (2.35):

$$Y = \frac{b_0 U_{N1} \sqrt{U_{A1}^2 + U_N^2 - 2U_{A1} U_N \cos(\varphi - \alpha)}}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)};$$

– ёмкостная проводимость изоляции сети(2.33):

$$B = \frac{B_0 U_{N1} U_{A1} \sin(\varphi - \alpha)}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)};$$

– активная проводимость изоляции сети (2.34):

$$G = \frac{B_0 U_{N1} (U_{A1} \cos(\varphi - \alpha) - U_N)}{U_{A2} U_N \sin(\varphi_1 - \alpha_1) - U_{A1} U_{N1} \sin(\varphi - \alpha)}$$

Для выполнения измерений фазных напряжений использован анализатор качества электроэнергии SATEC EDL175XR с классом точности 0.2S, а в качестве дополнительной ёмкостной проводимости используется магазин ёмкостей, показанный на схеме (Рисунок 4.1).



QF1÷QF7 – переключатели; C1,C2 – 0,1 мкФ; C3, C4 – 2 мкФ; C5, C6 – 4 мкФ

Рисунок 4.1 – Принципиальная электрическая схема магазина конденсаторов с конденсаторами типа КБГ-МП

Для добавления ёмкостной проводимости к одной из фаз используется магазин конденсаторов, при этом конденсаторы подключаются параллельно, что позволяет суммировать их ёмкость и достигать требуемых изменений фазных напряжений для более точного расчёта.

В мае 2022 года проведены численные измерения параметров изоляции сети по разработанной методике в соответствии с правилами техники безопасности, с участием инженерно-технического персонала ТОО «Богатырь Комир». Анализатор качества электроэнергии и конденсаторная батарея были подключены к шинам 0,4 кВ после вводного автоматического выключателя экскаватора. Постепенное увеличение подключаемой дополнительной ёмкости гарантировало контролируемое изменение фазных напряжений без каких-либо

неблагоприятных воздействий на электрическую сеть, в нашем случае для достижения необходимой точности выполнения расчётов достаточно 0,2 мкФ дополнительной ёмкости.



Рисунок 4.2 – Схема подключения магазина конденсаторов и анализатора качества электроэнергии SATEC EDL175XR

Ниже на осциллограммах (Рисунок 4.3) наглядно отображается изменения фазного напряжения до и после подключения дополнительной ёмкостной проводимости (использована ёмкость 0,2 мкФ) к фазе «А» (жёлтый цвет) экскаватора ЭКГ-5 щебёночного разреза ТОО «Богатырь Комир».

– а(1) – до подключения дополнительной проводимости; – б(2) – после подключения дополнительной проводимости

Рисунок 4.3 – Осциллограммы фазных напряжений экскаватора ЭКГ-5

Из первой осциллограммы на рисунке 4.3 можно сделать вывод, что фазные напряжения несимметричны, а амплитудное значение напряжения фазы «А» превышает номинальное значение фазного напряжения. При этом действующее значение линейного напряжения составляет около 240 В. Вторая осциллограмма на рисунке 4.3, показывает изменения фазных напряжении после присоединения дополнительной ёмкостной проводимости, при этом напряжение фазы «А» уменьшилось, соответственно осуществлено смещение нулевой точки, что отражено в таблице 4.1.

Поликоновонно	Количество измерений								
Наименование	1	2	3	4	5	6	7	8	
До подключения	До подключения дополнительной емкостной проводимости								
Фазное напряжение U _A , В	196,6	194,1	196,1	195,3	196,2	194,1	195,3	196,1	
Фазовый угол U _A , °	0	0	0	0	0	0	0	0	
Фазное напряжение U _B , В	120	119,5	119,1	121	119,1	119,5	121	119,1	
Фазовый угол U _B , °	98,7	98,6	98,7	98,4	98,8	98,2	99,8	98,8	
Фазное напряжение U _C , В	126,1	125,5	125,4	127,1	125,3	125,5	127,1	125,4	
Фазовый угол U _C , °	-95,1	-95,1	-95,1	-95,2	-94,9	-95,6	-96,3	-95	
Напряжение нулевой последовательности U ₀ , В	55,8	55,1	55,7	55,4	55,8	55	53,6	55,7	
Фазовый угол U ₀ , °	-2,4	-2,4	-2,5	-2,4	-2,4	-2,3	-2,5	-2,5	
После подключени	я допо.	лнител	ьной е.	мкост	ной про	эводим	ости		
Фазное напряжение U _A , В	138,4	138,1	138,1	138,2	136,5	137,4	126,5	125,4	
Φ азовый угол U_{A} , °	0	0	0	0	0	0	0	0	
Фазное напряжение U _B , В	104,8	104,8	104,8	104,3	103,4	104,2	120,5	119,7	
Фазовый угол U _B , °	175,1	175,8	175,6	174,3	174	174,5	-166,1	-166,1	
Фазное напряжение U _C , В	206,1	204,8	204,8	205	204,1	204,8	195,1	190,9	
Фазовый угол U _C , °	-86,6	-86,9	-86,9	-87,1	-86,7	-86,8	95,1	95,1	
Напряжение нулевой последовательности U ₀ , В	67,4	67,3	67,2	66,5	66,1	66,6	55,2	53,9	
Фазовый угол U ₀ , °	-76,8	-77,2	-77,2	-77,0	-76,8	-76,9	-87,3	-87,2	

Таблица 4.1 – Измеренные данные экскаватора ЭКГ-5 анализатором качества электроэнергии SATEC EDL175XR

Ниже на осциллограммах (Рисунок 4.4) наглядно отображается изменения фазных напряжений до и после подключения дополнительной ёмкостной проводимости (использована ёмкость 0,2 мкФ) к фазе «А» (жёлтый цвет) роторного экскаватора СРс(К) - 2000 угольного разреза «Северный» ТОО «Богатырь Комир.

– а(1) – до подключения дополнительной проводимости; б(2) – после подключения дополнительной проводимости

Рисунок 4.4 – Осциллограмма фазных напряжений роторного экскаватора СРс(К)–2000

Из первой осциллограммы на рисунке 4.4 можно сделать вывод, что фазные напряжения несимметричны, а амплитудное значение напряжения фазы «А» превышает номинальное значение фазного напряжения. При этом действующее значение линейного напряжения составляет около 390 В. Вторая осциллограмма на рисунке 4.4, показывает изменения фазных напряжении после присоединения дополнительной ёмкостной проводимости, при этом напряжение фазы «А» уменьшилось, соответственно осуществлено смещение нулевой точки, что отражено в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Измеренные данные роторного экскаватора СРс(К)–2000 анализатором качества электроэнергии SATEC EDL175XR

Наименорание	Количество измерений								
Паименование	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
До подключения	дополн	ителы	ной емі	костно	й пров	одимос	сти		
Фазное напряжение U _A , В	152,4	153,1	151,9	154,3	152,6	154,5	152,6	156	
Фазовый угол U _A , °	0	0	0	0	0	0	0	0	
Фазное напряжение U _B , В	242,8	242,3	239	243,5	246	246,9	239,4	238,6	
Фазовый угол $\mathrm{U}_{\mathrm{B}},$ °	176,7	177,1	177,5	177	176,8	177	177,8	179,5	
Фазное напряжение U _C , В	350,4	349,9	345,2	350,7	350,2	354,3	343,8	344,2	
Фазовый угол U _C , °	95,1	95,3	95,4	95,4	94,8	95,2	95,8	96,3	
Напряжение нулевой последовательности U ₀ , В	127,6	126,8	124,6	127,3	127,6	128,8	123,9	121,5	
Φ азовый угол U $_0$, °	-71,5	-71,4	-71,4	-71,4	-71,4	-71,2	-70,9	-70,7	
После подключени	После подключения дополнительной емкостной проводимости								
Фазное напряжение U _A , В	113,7	112,9	111,7	110,3	111,8	110,8	109,9	109,4	

Продолжение таблице 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фазовый угол U _A , °	0	0	0	0	0	0	0	0
Фазное напряжение U _B , В	283,1	284,4	283,7	285,9	286	286,1	286,2	285,6
Φ азовый угол $\mathrm{U}_\mathrm{B},^{\mathrm{o}}$	-160,2	-161,7	-163	-165,4	-163	-164,3	-165,5	-165,9
Фазное напряжение U _C , В	322	324,8	326,5	331,4	328,9	330,7	331	331
Фазовый угол U _C , °	119,4	118,4	117,4	115,9	117,5	116,7	116,1	115,7
Напряжение нулевой последовательности U ₀ , В	120,5	122,8	124,2	128,2	125,5	127,2	128,6	128,7
Фазовый угол U ₀ , °	-30,7	-32,2	-33,7	-36	-33,6	-34,8	-35,8	-36,3

Для определения комплексной проводимостей изоляции сети экскаватора ЭКГ-5 и роторного экскаватора СРс(К)-2000 используются измеренные данные, полученные с помощью анализатора качества электроэнергии. Расчёты выполняются согласно разработанному методу с учётом малой выборки, которые сведены ниже (Таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Результаты определения параметров изоляции сети

Номер измерения							\overline{X}		
Показатели	1	2	3	Δ	5	6	7	8	среднее
	1	2	5	+	5	0	7	0	значение
	Экскаватор ЭКГ-5 щебёночного разреза								
$Y \cdot 10^{-5}$, CM	8,56	8,55	8,55	8,44	8,5	8,51	7,80	7,29	8,28
$B \cdot 10^{-5}$, См	0,5	0,49	0,51	0,49	0,51	0,48	0,47	0,44	0,49
$G \cdot 10^{-5}, CM$	8,55	8,54	8,53	8,43	8,48	8,5	7,78	7,28	8,26
Роторн	Роторный экскаватор СРс(К) - 2000 угольного разреза «Северный»								
$Y \cdot 10^{-5}$, CM	12,47	12,48	12,51	12,72	12,66	12,71	12,38	11,9	12,48
$B \cdot 10^{-5}$, CM	10,93	10,99	11,07	11,22	11,12	11,18	11,01	10,75	11,03
$G \cdot 10^{-5}$, См	6	5,91	5,85	5,99	6,06	6,04	5,65	5,11	5,83

Результаты апробации разработанного метода экскаватора ЭКГ-5 и роторного экскаватора СРс(К)-2000 в единицах измерения "Ом" (сопротивление) и тока ОЗЗ, сведены ниже (Таблица 4.4).

Параметры изоляции сети	Экскаватор ЭКГ-5	Роторный экскаватор СРс(К) - 2000
$\prod_{\alpha \in \mathcal{A}} \sum_{\alpha \in \mathcal{A}} \sum_{$	12122	8016
полное сопротивление 2, Ом	$11679 \div 13715$	$7860 \div 8401$
Λ	12101	3738
Активное сопротивление к, ом	$11659 \div 13690$	$3609 \div 3857$
ËMKOCTUGE COUDOTUBLELIJE V. OM	713,7	7089
Емкостное сопротивление х, Ом	657,7 ÷ 828,83	6923 ÷ 7586
Ёмиость сети С миФ	0,015	0,35
	$0,14 \div 0,016$	$0,34 \div 0,36$
Тангенса угла диэлектрических	0,059	1,9
потерь <i>tan</i> б	0,056 ÷ 0,061	1,82 ÷ 2,1
Ток однофазного замыкания I _o ,	10,92	27,67
мА	9,62 ÷ 11,3	26,39 ÷ 28,21

Таблица 4.4 – Данные параметров изоляции сети и тока ОЗЗ

В таблице 4.4 выше числитель демонстрирует средние значение, а в знаменателе – размах изменения при работающем экскаваторе ЭКГ-5 щебёночного разреза и роторном экскаваторе СРс(К)-2000 угольного разреза «Северный».

На основе расчёта, можно сделать вывод, что измерения параметров изоляции сети и ток ОЗЗ изменяются в малых пределах и так как электрическая сеть экскаватора не имеет разветвлённых по длине электроприемников, соответственно ёмкость сети обладает малыми значениями. Диапазон изменения вышеуказанных значений обусловлен колебаниями напряжения.

В связи с этим, где результаты апробации разработанного метода наглядно показывают на востребованность дальнейшего, более обстоятельного исследования состояния изоляции электроустановок путём построения 3D карты карьеров распределения проводимости сети с учётом установленного карьерного электрооборудования.

4.5 Исследование эффективности работы устройств защитного отключения

В целях контроля состояния изоляции в горнорудной промышленности применяются различные устройства защитного отключения типа УАКИ, РУ, АЗШ, АЗПБ, АЗАК, АРГУС и др.

Устройства семейства УАКИ, РУ широко используются на экскаваторах, когда как они были созданы для защиты электрооборудования в шахтах с учётом разветвлённых по длине КЛ, которые образовывали необходимую ёмкость сети. Таким образом, полное сопротивление сети соизмеримо с ёмкостью сети и малыми значениями активного сопротивление сети, тем самым обеспечивает соответствующий контроль состояния изоляции, потому что, ток ОЗЗ превышает порог срабатывания этих устройств.

В свою очередь использование аппаратов УАКИ, РУ на экскаваторе имеет ограниченную работоспособность из-за отсутствия протяжённых кабельных линий, так как преимущественно сопротивление изоляции состоит из активного сопротивления сети. Помимо этого, в ходе модернизации электрооборудования в горных предприятиях устанавливают электрооборудование с нелинейными сопротивлениями, что приводит к появлению различных гармоник, которые негативно влияют на работу реле утечек [62].

В результате апробации разработанного метода для экскаватора ЭКГ-5 и роторного экскаватора СРс(К)-2000 производилось экспериментальное подключение дополнительных ёмкостей между фазой и землёй, начиная от 0,1 мкФ до 12,2 мкФ. При дальнейшем увеличении дополнительной ёмкости, напряжение на фазе «А» уменьшалось ещё больше и при ёмкостях более 4 мкФ достигало практически нулевых значений. Одновременно, напряжение на других фазах увеличивалось до значений, близких к линейным напряжениям, что вызывало аварийный режим работы электрической сети.

На осциллограммах (Рисунок 4.5, Рисунок 4.6) отчётливо виден аварийный режим электрической сети при подключении дополнительной ёмкости 4 мкФ, а применённое устройство защитного отключения типа УАКИ не реагировало на образовавшийся ток утечки. Результат такого аварийного режима, при котором возникают перенапряжения фаз, негативно сказывается на состоянии изоляции фаз, что может привести к пробою изоляции и её повреждению, а также выходу из строя оборудования.

Анализ устройств защитного отключения выявил возможные причины несрабатывания при аварийном режиме работы электрической сети:

1. Неисправность устройств защитного отключения на момент апробации разработанного метода.

2. Отсутствия требуемого дополнительного заземления согласно руководству эксплуатации УЗО типа УАКИ, которое должно располагаться не менее 5 метров от основного заземления. Так как экскаваторы постоянно передвигаются, то для заземления используются контур заземления передвижного высоковольтного выключателя путём задействования четвертой жилы кабельной линии 6 кВ.

3. Недостаточная чувствительность устройств защитного отключения, так согласно ГОСТ 31612-2012 ток срабатывания УЗО напряжением 220 В составляет 22 мА, когда как расчётный ток ОЗЗ экскаватора ЭКГ-5 составил 11 мА.

Рисунок 4.5 – Осциллограмма фазных напряжений на экскаваторе ЭКГ-5

Рисунок 4.6 – Осциллограмма фазных напряжений на роторном экскаваторе СРс(К)-2000

Обстоятельство малой величины тока ОЗЗ связано с небольшой ёмкостью сети, обусловленное короткими кабельными линиями экскаватора. К тому же

УЗО типа УАКИ разрабатывались для шахтного оборудования, в которых имеется дополнительная функция компенсации ёмкостных токов.

По причине того, что задействованные реле утечки на экскаваторах не функционируют должным образом, которые приводят к невыполнению требований правил безопасности при эксплуатации электрооборудования в горнорудной промышленности, тем самым создают риск поражением тока эксплуатирующий персонал, а также выход из строя других электроприемников, что влечёт за собой простой дорогостоящего горнорудного оборудования.

На основе вышеизложенного, предлагается выбор средств, направленных на повышение чувствительности УЗО на экскаваторах:

1. Повышение чувствительность срабатывания УЗО путём подключения резисторов между фазами сети и землёй, которое повышает ток утечки выше порога срабатывания УЗО.

2. Повышения чувствительности срабатывания УЗО путём подключения конденсатора между нейтралью трансформатора и землёй

4.5.1 Повышение чувствительность срабатывания УЗО путём подключения резисторов между фазами сети и землёй, которое повышает ток утечки выше порога срабатывания УЗО

Разработанное средство повышения эффективности УЗО в сети с изолированной нейтралью, которое заключается в подключении дополнительного сопротивления между фазами сети и землёй для обеспечения дополнительного тока утечки в каждой фазе. Этот способ повышает эффективность работы УЗО, обеспечив наличие дополнительных токов утечек в каждой фазе, что способствует более эффективному реагированию в случае ОЗЗ, которое будет превышать порог срабатывания этих устройств.

эффективности работы Средство повышения существующих У3О поясняется электрической схемой (Рисунок 4.7), в составе: 3-х электрическую сеть; вводное коммутирующие устройство – QF1; электрооборудование экскаватора; коммутирующие устройство – QF2, предназначенное для УЗО; устройство защитного отключения – УЗО; коммутирующие устройство – QF3, дополнительные резисторы R_A , присоединяющий $R_{\rm B}$, $R_{\rm C};$ ёмкостные проводимости изоляции фаз B_A, B_B, B_C; активные проводимости изоляции фаз G_A, G_B, G_C .

Рисунок 4.7 – Принципиальная электрическая схема защитного отключения на экскаваторах с добавочными резисторами

При аварийном режиме, когда происходит O33, устройство защитного отключения экскаватора не реагирует на ток O33, вследствие не превышения уставки срабатывания УЗО экскаватора. С целью прекращения подачи питания на электроприемники экскаватора, тем самым обезопасив эксплуатирующий персонал и электрооборудования, производится повышение тока утечки выше порога срабатывания УЗО путём коммутации выключателя QF3, присоединяющий дополнительные резисторы, и тем самым осуществляется автоматическое отключение выключателя QF1.

Согласно техническим характеристика РУ-127/220 [63], максимальное сопротивление срабатывание при однофазной утечке составляет не более 8 кОм, при действующем фазном напряжении 132 В, ток срабатывания составит Экспериментальное 16,5 мА. исследование параметров изоляции сети экскаватора ЭКГ-5 показало, расчётный ток ОЗЗ 11 мА. что равен соответственно применяемое УЗО типа РУ-127/220 не функционирует должным образом. Для повышения чувствительности УЗО типа РУ-127/220 необходимо дополнительное сопротивление, которое составит:

$$Z_{\text{доп}} = \frac{U_{ph}}{I_{\text{доп. ут}}} = \frac{132}{5,5 \cdot 10^{-3}} = 24 \text{ кОм},$$

где *I*_{доп. ут} – дополнительный ток утечки;

*U*_{*ph*} – фазное напряжение.

В качестве дополнительного сопротивления применимы резисторы керамические проволочные цементные типа 5W24KJ с сопротивлением 24 кОм,

рассеиваемая мощность – 5 Вт, предельное рабочее напряжение составляет 750 В. При подключении трех дополнительных резисторов сопротивлением 24 кОм между фазами и землёй, максимальный ток утечки составит 16,5 мА, тем самым обеспечит эффективную работу УЗО.

4.5.2 Повышения чувствительности срабатывания УЗО путём подключения конденсатора между нейтралью трансформатора и землёй

Электрическая энергия для карьерных экскаваторов поступает от трёхфазной сети напряжением 6 кВ. Внутри экскаватора находится специальный трансформатор, который способен выдерживать временные перегрузки, а также работу в условиях вибрации, толчков, влажности, пыли и грязи.

Ёмкость сети экскаватора незначительна, поскольку в ней нет протяжённых кабельных линий. В результате ток утечки генерируется главным образом за счёт активного сопротивления, и при возникновении неисправности изоляции максимальный ток утечки не превышает уставки, на которую настроены существующие УЗО.

Предлагаемое средство повышения эффективности УЗО является подключение конденсатор между нейтралью трансформатора и землёй, так как это приводит к возникновению высоких токов утечки, что повлечёт за собой эффективность срабатывания УЗО экскаваторов.

Рисунок 4.8 – Принципиальная электрическая схема защитного отключения на экскаваторах с подключённым конденсатором

Средство повышения эффективности работы существующих УЗО поясняется электрической схемой (Рисунок 4.8), в составе: 3-х электрическую

сеть; вводное коммутирующие устройство – QF1; электрооборудование экскаватора; коммутирующие устройство – QF2, предназначенное для УЗО; устройство защитного отключения – УЗО; B_N – дополнительная проводимость, подключаемая к нейтрали трансформатора; ёмкостные проводимости изоляции фаз B_A , B_B , B_C ; активные проводимости изоляции фаз G_A , G_B , G_C .

Согласно техническим характеристика УАКИ-380 [64], максимальное сопротивление срабатывание при однофазной утечке составляет не более 6,85 кОм, при действующем фазном напряжении 226 В, ток срабатывания составит 33 мА. Экспериментальное исследование параметров изоляции сети роторного экскаватора СРс(К) - 2000 показало, что максимальный ток утечки равен 27,67 мА, соответственно применяемое УЗО типа УАКИ-380 не функционирует должным образом. Для повышения чувствительности УЗО типа УАКИ-380 необходимо дополнительное ёмкостное сопротивление, которое составит:

$$X_N = \frac{U_{ph}}{I_{\text{доп. ут}}} = \frac{226}{5,5 \cdot 10^{-3}} = 41,1$$
 кОм,

где I_{доп. ут} – дополнительный ток утечки;

*U*_{*ph*} – фазное напряжение.

Для расчёта ёмкости конденсатора принимаем промышленную частоту $f = 50 \ \Gamma$ ц, тогда С = $\frac{1}{2\pi f X_N} = 0,08 \ \text{мк}\Phi$.

В качестве дополнительной проводимости применим конденсатор типа КБГ-МП ёмкостью 0,1 мкФ, рабочее напряжение 600 В. При подключении конденсатора ёмкостью 0,1 мкФ между нейтралью трансформатора и землёй, максимальный ток утечки составит 34,8 мА, которое выше уставки УЗО.

4.6 Результаты промышленного апробации разработанного метода

1. В действующих электроприемниках производство измерений разработанным метод соответствует действующим пунктам ПТБ.

2. Измерения производятся без нарушения нормальной работы электроустановок, то есть без снятия рабочего напряжения и отключения электроприемников.

3. Разработанный метод исключает необходимость в прямом подключении на землю какой-либо фазы, чем обеспечивается безопасность измерений и исключается возможность аварийных ситуаций.

4. Данный метод относится к сфере техники безопасности в эксплуатации электрооборудования и обеспечивает определение всех параметров изоляции сети, при этом характеризуется простотой, удобством и безопасностью проведения измерений.

5. Разработанный метод не требует создания опытного образца, так как измерительные приборы и вводимые дополнительные конденсаторы имеются в наличии у инженерно-технических работников предприятия

6. Испытания показали достаточную точность, быстродействие и простоту измерения.

Выводы по четвёртому разделу

В настоящей главе получены следующие результаты:

1. В процессе экспериментальных исследований получены числовые значения параметров изоляции сети на экскаваторе ЭКГ-5 щебёночного разреза ТОО «Богатырь Комир», где величина расчётного тока однофазного замыкания варьируется в пределах 9,62 ÷ 11,3 мА. Активное сопротивление намного выше, чем ёмкостное сопротивление в электрической сети, связанное с отсутствием протяжённых кабельных линий.

2. В процессе экспериментальных исследований получены числовые значения параметров изоляции сети на роторном экскаваторе СРс(К) - 2000 угольного разреза «Северный» ТОО «Богатырь Комир», где расчётные ток ОЗЗ находится в диапазоне 26,19 ÷ 27,99 мА.

3. Выявлено, что установленные УЗО на экскаваторах не срабатывают при подключении дополнительной большой ёмкости в 4 мкФ и более. При этом напряжение фазы относительно земли снижается практически до нулевых значений, что свидетельствует о возникновении искусственного ёмкостного замыкания на землю.

4. Разработано средство повышения эффективности работы задействованных УЗО с целью повышения их чувствительности путём подключения резисторов между фазами сети и землёй.

5. Разработано средство повышения эффективности работы задействованных УЗО с целью повышения их чувствительности путём подключения конденсатора между нейтралью трансформатора и землёй.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные и практические результаты, полученные в работе, заключается в следующем:

1. Получены новые математические зависимости вычисления параметров изоляции в несимметричной электрической сети с изолированной нейтралью напряжением до и выше 1000 В.

2. Разработаны методы определения параметров изоляции, тока утечки, тока однофазного замыкания не землю и напряжения прикосновения в электрической сети с изолированной нейтралью, основанные на измерениях фазного напряжения, напряжения нулевой последовательности и их векторных углов до и после присоединения дополнительного конденсатора.

3. Выполнены численные экспериментальные исследования разработанного метода с целью сравнительного анализа результатов, где относительная погрешность выборок составило не более 10%.

4. Произведена апробация разработанного метода определения состояния изоляции сети в условиях горной промышленности.

5. На базе разработанных методик осуществлена оценка электробезопасности горных предприятиях в электрических сетях.

6. Разработаны средства повышения эффективности системы электроснабжения с целью повышения чувствительности устройства защитного отключения, которые основаны на комплексном анализе результатов экспериментальных исследований, проведённых В условиях реального функционирования системы электроснабжения горного предприятия.

7. Полученные в работе аналитические зависимости фазных напряжений и параметров изоляции имеют универсальный характер и могут быть применены в электрических сетях с изолированной нейтралью отраслей промышленности.

8. Результаты диссертационной работы внедрены в научнообразовательный процесс Навоийского государственного горного и технологического университета.

9. Результаты диссертационной работы внедрены в технологический процесс горного предприятия ТОО «Богатырь Комир».

10. Основные научные положения диссертации защищены патентом Республики Казахстан и Евразийским патентом (Приложение Б).

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Щуцкий В.И., Сидоров А.И., Ситчихин Ю.В. и др. Электробезопасность на открытых горных работах: справ. пос. – М.: Недра, 1996. – 266 с.

2 Правила устройства электроустановок Республики Казахстан: утв. приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 20 марта 2015 года, №230 //http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851. 03.04.2020.

3 Волотковский С.А., Николайчук А.З., Стецюк Н.Ф. Статистическое исследование повреждения в электрических сетях карьеров // Электробезопасность на предприятиях горнорудной промышленности: сб. тр. науч.-техн. конф. – Кривой Рог, 1970. – С. 178-183.

4 Цапенко Е.Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В. – Изд. 2-е, перер. – М.: Энергия, 1972. – 152 с.

5 Колосюк В.П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электроустановок. – М.: Недра, 1987. – 406 с.

6 Гладилин Л.В., Щуцкий В.И., Бацежев Ю.Г. и др. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности. – М.: Недра, 1977. – 327 с.

7 Бессонов Л.А., Бессонов В.Л. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. – Изд. 12-е, испр. и доп. – М.: Юрайт, 2016. – 701 с.

8 Utegulov B.B., Utegulov A.B., Uakhitova A.B. Modeling method for measuring the admittance of insulation in a network with an isolated neutral voltage up to 1000 V in mines using Matlab // Simulink. – 2017. – Vol. 53, Issue 2. – P. 282-290.

9 Бацежев Ю.Г. Обоснование схемы и разработка средств электробезопасности на горных предприятиях: автореф. ... док. техн. наук: 05.26.01. – М.: МГИ, 1986. – 31 с.

10 Утегулов Б.Б. Развитие теории, разработка способов и средств повышения эффективности систем электроснабжения горных предприятий: дис. ... док. техн. наук: 05.09.03. – М.: МГИ, 1991. – 305 с.

11 Белюстин О.Н. Исследование условий эксплуатации и совершенствование аппаратов защиты от утечек тока на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В. – М.: МГИ, 1981. – 216 с.

12 Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. – М.: Недра, 1980. – 334 с.

13 Нагорных В.В. Система непрерывного контроля сопротивлений изоляции отдельных фаз электрической сети с изолированной нейтралью // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – №2. – С. 16-23.

14 Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. – М.: Недра, 1982. – 152 с.

15 Машкин А.Г. Разработка способов и средств обеспечения электробезопасности в рудничных электрических сетях напряжением до 1000 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. – М.: МГИ, 1987. – 140 с.

16 Нагорных В.В., Бабичев Ю.Е. Непрерывный контроль сопротивлений изоляции отдельных фаз низковольтных электрических сетей с изолированной нейтралью // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 3. – С. 59-64.

17 Сидоров А.И., Петуров В.И., Пичуев А.В., Суворов И.Ф. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения // Успехи современного естествознания. – 2010. – № 2. – С. 114.

18 Петуров В.И. Исследование и разработка способов и средств контроля параметров изоляции рудничных электрических сетей: автореф. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – М., 1992. – 18 с.

19 А.с. 1780044 А1 СССР, МПК G01R 27/18. Способ определения параметров изоляции фаз сети с изолированной нейтралью / В.И. Петуров, А.В. Пичуев, Ю.Г. Бацежев и др.; опубл. 07.12.92, Бюл. №45. – 4 с.

20 Петуров В.И. Классификация способов определения параметров сопротивления изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью // Электробезопасность. – 2008. – №1. – С. 20-24.

21 Петуров В.И. Устройство контроля сопротивления изоляции и защитного отключения в сетях с изолированной нейтралью // Электробезопасность. – 2010. – №2-3. – С. 25-31.

22 Петуров В.И., Чуйко А.Д. Классификационный анализ способов определения параметров сопротивления изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью // Транспортная инфраструктура сибирского региона. – 2017. – Т. 1. – С. 736-740.

23 Пичуев А.В., Петуров В.И., Компенсация емкостных токов утечки в рудничных участковых электрических сетях // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: ст. в сб. тр. конф. – Томск, 2012. – С. 142-143.

24 Пичуев А.В. Принципы создания устройств контроля и защиты в рудничных высоковольтных сетях // Интенсификация горнорудного производства: тез. докл. 4-й всесоюзной конф. – Свердловск, 1989. – С. 68-69.

25 Пичуев А.В., Петуров В.И., Суворов И.Ф. Влияние нестационарных режимов на электробезопасность при эксплуатации электрооборудования горных предприятий. – М.: Горная кн., 2011. – 323 с.

26 Сапунков М.Л. Способ контроля сопротивления изоляции в рудничных электрических сетях 6...10 кВ под рабочим напряжением // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – №12 (109). – С. 3-7.

27 Суворов И.Ф. Развитие теории, разработка методов и средств обеспечения электробезопасности в системах электроснабжения напряжением до 1000 В: автореф. ... док. техн. наук: 05.26.01. – Челябинск, 2006. – 42 с.

28 Цапенко Е.Ф., Случевский Ю.Н. Использование вольтметра для определения параметров изоляции фаз в сети с изолированной нейтралью до 1000 В // Измерительная техника. – 1983. – №2. – С. 33-35.

29 Щуцкий В.И., Белюстин О.Н., Буралков А.А. Защитное отключение электроустановок потребителей. – М.: Знергоатомиздат, 1994. – 272 с.

30 Щуцкий В.И., Волощенко Н.И., Плащанский Л.А Электрификация подземных горных работ: учебник для вузов. – М.: Недра, 1986. – 364 с.

31 Щуцкий В.И., Забиров А. Устройства защиты и сигнализации от замыканий на землю в шахтных электросистемах напряжением до 1000 В. – М.: ВНИИЭМ, 1966. – 117 с.

32 А.С. 1822985 А1 СССР, МПК G01R 27/18. Способ определения параметров изоляции сети с изолированной нейтралью относительно земли / Ю.Г. Бацежев, О.Л. Дудченко, В.И. Петуров; опубл. 23.06.93, Бюл. №23. – 3 с.

33 А.с. 1239635 А1 СССР, МПК G01R 27/18. Способ определения активных параметров изоляции электрических сетей с изолированной нейтралью / Ю.Г. Бацежев, А.Г. Машкин; опубл. 23.06.1986, Бюл. №23. – 3 с.

34 А.С. 1653060 А1 СССР, МПК Н02Н 3/17. Устройство для контроля сопротивления изоляции и защитного отключения в сетях с изолированной нейтралью / Ю.Г. Бацежев, Г.Ф. Горбачев, В.И. Петуров; опубл. 30.05.91, Бюл. №20. – 4 с.

35 А.С. 1406522 А1 СССР, МПК G01R 27/18. Устройство для контроля активных параметров фазной изоляции электрической сети с изолированной нейтралью / А.Г. Машкин, Ю.Г. Бацежев, В.Ф. Кузин; опубл. 30.06.1988, Бюл. №24. – 3 с.

36 А.С. 917127 А1 СССР, МПК G01R 27/18. Способ определения параметров изоляции трехфазных электрических сетей с изолированной нейтралью напряжением выше 1000в / В.И. Щуцкий, Б.Б. Утегулов; опубл. 30.03.82, Бюл. №12. – 3 с.

37 А.С. 1215057СССР МКИ G01 R 27/18. Способ определения параметров изоляции трехфазных эл. сетей с изолированной нейтралью до 1000 В. / Б.Б. Утегулов; опубл. 28.02.86, Бюл. №8. – 2 с.

38 А.С. 1347038 А1 СССР, МПК G01R 27/18. Способ определения параметров изоляции трехфазных электрических сетей с изолированной нейтралью напряжением выше 1000В / Б.Б. Утегулов; опубл. 23.10.87, Бюл. №39. – 2 с.

39 А.С. 1403189 А1 СССР, МПК Н02Н 3/16, Н02Н 3/38. Устройство для направленной защиты линии от однофазного замыкания на землю в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью / Б.Б. Утегулов; опубл. 15.06.88, Бюл. №22. – 2 с.

40 Гладилин Л.В., Утегулов Б.Б. Способ определения тока замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В // Промышленная энергетика, 1981. – №7. – С. 23-24.

41 Утегулов А.Б. Разработка фазочувствительных методов повышения уровня электробезопасности и надежности эксплуатации электрических сетей с изолированной нейтралью напряжением до и выше 1000 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Павлодар, 2003. – 120 с.

42 Jullien F., Héritier I. The IT earthing system (unearthed neutral) in LV // https://www.academia.edu/34863423/The_IT_earthing_system_unearthed (дата обращения 02.02.2023)

43 Руководство по ревизии, наладке и испытанию ленточных конвейеров и конвейерных линий угольных и сланцевых шахт / М. С. Глухов, Е. А. Колядин, В. А. Чумаков и др. – М.: Недра, 1983. –205 с.

44 Чеботаев Н. И. Электрификация горного производства: [учеб. пособие] / Н. И. Чеботаев. - М. : Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2006. – 138 с.

45 Аппарат защитного отключения шахтный АЗШ: паспорт. – М., 1986. – 18 с.

46 Цапенко Е.Ф. Резонансные перенапряжения в шахтных сетях вследствие применения аппаратов защиты типа уаки, азак, Азш, азур // ГИАБ. – 2000. – №3. – С. 106-109.

47 Круг К.А. Основы электротехники: в 2 т. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1946. – Т. 1. – 472 с.; 1946. – Т. 2. – 634 с.

48 Гладилин Л.В., Утегулов Б.Б. Анализ погрешности метода определения параметров изоляции в трехфазных электрических сетях с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В // Известия вузов. Горный журнал. – 1980. – № 8. – С. 94-97.

49 Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. – Л.: Наука, 1968. – 96 с.

50 Корн Г., Корн Т. Справочник по математике / пер. с англ. – М., 1973. – 832 с.

51 Utegulov B.B. Analysis of the error of the developed method of determination the active conductivity reducing the insulation level between one phase of the network and ground, and insulation parameters in a non-symmetric network with isolated neutral with voltage above 1000 v // IOP Conference Series: mater. Science and Engineering. -2018. -Vol. 313. -P. 012015-1-012015-15.

52 Fedorova S.V., Utegulov B.B., Utegulov A.B. et al. Experimental studies of a developed method for determining the insulation parameters in a network with isolated neutral voltage up to 1000 v // Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University. -2019. -Vol. 1, No100. -P. 230-238.

53 Biemer P.P. et al. Measurement Errors in Surveys. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. – 760 p.

54 Rabinowich S. Measurement errors and uncertainties: theory and practice. – NY.: Springer Science & Business Media, 2005. – 308 p.

55 Carroll R.J. et al. Measurement error in nonlinear models: a modern perspective. – London: Chapman and Hall/CRC, 2006. – 455 p.

56 Abur A., Exposito A.G. Power system state estimation: theory and implementation. – New York: CRC press, 2004. – 327 p.

57 Ягудаев Б.М., Шишкин Н.Ф., Назаров В.В. Защита от электропоражения в горной промышленности. – М.: Недра, 1982. – 152 с.

58 ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – Введ 2019-01-01. – М., 2018. – 16 с.

59 Клюев Р.В., Голик В.И., Босиков И.И. и др. Разработка методики обеспечения электробезопасности электрических сетей карьеров // Известия Тульского гос. университета. Науки о Земле. – 2020. – № 3. – С. 74-91.

60 Привалов Е.Е. Электробезопасность: учеб. пос. – Ставрополь: Ставропольский госуд. аграр. унив., 2013. – Ч. 3. – 154 с.

61 Kurabayev I., Utegulov G., Tatkeyeva I. Mathematical description of the method for ungrounded AC systems to determine the network insulation // IET Generation, Transmission & Distribution. -2022. - Vol. 16, No 11. - P. 2223-2227.

62 Утегулов Б.Б., Утегулов А.Б., Уахитова А.Б. Повышение эффективности устройства защитного отключения горных машин // Физикотехнические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 2. – С. 102-108.

63 Дегтярев В.В., Седаков Л.В. Руководство по ревизии, наладке и испытанию подземных электроустановок шахт. – М.: Недра, 1989. – 614 с.

64 Светличный П.Л. Электропривод и электроснабжение горных машин. – М.: Недра, 1968. – 312 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения

7

УТВЕРЖДАЮ

Директор по энергоснабжению – главный энергетик ТОО «Богатырь Комир» А.П. Зубченко «25 Добрание 2022 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ (ИСПОЛЬЗОВАНИЯ)

результатов научно-исследовательской работы, выполненной в рамках диссертационной работы, докторантом кафедры «Электроснабжения» НАО «Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина» Курабаевым Искандером Казбековичем

Мы, нижеподписавшиеся Огай В.С. – начальник ПТО ДЭ, Беллер Е.В. – главный технолог ДЭ, Антикеев Д.Г. – начальник участка по наладке электрооборудования ДЭ, составили настоящий Акт внедрения (использования) в том, что на горнодобывающем предприятии ТОО «Богатырь Комир» по теме диссертационной работы Курабаева И.К. внедрена методика определения параметров изоляции, величины проводимости, снижающей уровень изоляции между одной из фаз электроустановки и землей, токов однофазного замыкания на землю и утечки в несимметричной сети напряжением до 1000 В на основе измерений величин напряжения фазы «А» относительно земли – U_{A1}, U_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{N}, U_{N1} , фазового угла напряжения нулевой последовательности – U_N, U_{N1} , фазового угла напряжения нулевой оследовательности – φ, φ_1 до и после подключения между фазой электрической сети и землей дополнительной емкостной проводимости.

В соответствии с разработанной методикой, в которой использовались расчетные методы для определения параметров изоляции, были разработаны рекомендации по предупреждению отказов электрооборудования, и, соответственно, сокращению ремонтов оборудования в целом. Внедрение данной методики обеспечивают удовлетворительную точность, безопасность при производстве измерений и при эксплуатации электроустановок, обладают достаточной простотой.

Социальный эффект от внедрения результата работы заключается в повышении уровня электробезопасности при эксплуатации сетей напряжением до 1000 В.

Начальник ПТО ДЭ

Главный технолог ДЭ

Огай В.С.

Беллер Е.В.

Начальник участка по наладке электрооборудования ДЭ

Антикеев Д.Г.

УТВЕРЖДАЮ ектор Навоийского государственного орного и технологического Санакулов К.С. 2022 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ (ИСПОЛЬЗОВАНИЯ)

результатов научно-исследовательской работы, выполненной в рамках диссертационной работы, докторантом кафедры «Электроснабжения» НАО «Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина» Курабаевым Искандером Казбековичем в научно-образовательный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, Н.О. Атауллаев – заведующий кафедрой «Электроэнергетика», PhD, доцент, А.О. Атауллаев – доцент кафедры «Электроэнергетика», PhD, и Х.Ш. Муродов – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика», составили настоящий Акт внедрения (использования) результатов научно-исследовательской работы, выполненной докторантом И.К. Курабаевым в рамках диссертационной работы на тему: «Разработка методов и средств повышения эффективности системы электроснабжения горных предприятий».

<u>Основные результаты работы:</u> применяемые в научно-образовательном процессе лабораторные занятия «Контроль изоляции в электрических установках с малым током замыкания на землю» КИЭУ.001.1 РБЭ (2921.1) – Челябинск: ИПЦ «Учебная техника» имеет три лабораторных эксперимента: 1. Контроль изоляции методом трех вольтметров; 2.Контроль изоляции с помощью специализированного устройства; 3.Неселективная сигнализация о замыкании на землю. Данные эксперименты демонстрируют только состояние изоляции, без их количественных значений параметров изоляции. В результате была предложена методика определения параметров изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В, на основе измерений величин напряжения фазы «А» относительно земли – U_{A1} , U_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A1} , u_{A2} , фазового угла фазы «А» относительно земли – u_{A2} , u_{A3} , u_{A3} , u_{A3} , u_{A3} , u_{A3} , u_{A3} , u

Эффект от внедрения (использования) результатов: научно-технические результаты по проблеме исследования параметров изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000В, а также методика определения данных параметров, в частности полной, активной и емкостной проводимости изоляции сети, имеют важное значение в обеспечения электробезопасности при производстве. Заключающиеся в расчете ожидаемого тока однофазного замыкания на землю, токов утечки, напряжения прикосновения и настройки уставок устройств защитного отключения, тем самым значительно позволяет улучшить качество подготовки специалистов по специальностям 60710600 - «Электроэнергетика» и 60710500 - «Энергетика».

Указанная работа внедрена (использована) в научно-образовательном процессе с использованием лабораторных стендов «Контроль изоляции в электрических установках с малым током замыкания на землю» КИЭУ.001.1 РБЭ (2921.1) – Челябинск: ИПЦ «Учебная техника».

Заведующий кафедрой «Электроэнергетика» PhD, доцент

Атауллаев Н.О.

Атауллаев А.О.

Доцент кафедры «Электроэнергетика» PhD, доцент

Старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика»

Муродов Х.Ш.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патенты

ЕВРАЗИЙСКИЙ ПАТЕНТ на изобретение № 041128

Название изобретения:

«СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО И ВЫШЕ 1000 В С УЧЕТОМ КВАДРАНТОВ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛОСКОСТИ»

Патентовладельцы:

КУРАБАЕВ ИСКАНДЕР КАЗБЕКОВИЧ (КZ)

Изобретатели:

Дата подачи заявки:

Дата выдачи патента:

Курабаев Искандер Казбекович (KZ)

Заявка Nº:

202090923

08 мая 2020 г.

16 сентября 2022 г.

Настоящим удостоверяется, что евразийский патент выдан на изобретение с формулой, опубликованной в Бюллетене Евразийского патентного ведомства «Изобретения (евразийские заявки и патенты)» № 9 / 2022 год.

При уплате установленных годовых пошлин патент действует на территории государств-участников Евразийской патентной конвенции – Азербайджанской Республики, Кыргызской Республики, Республики Армения, Республики Беларусь, Республики Казахстан, Республики Таджикистан, Российской Федерации, Туркменистана.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат:1650024017000 Владелец: Ивлиев Григорий Петрович Действителен:е 15.04.2022 по 14.04.2027

ИВЛИЕВ Григорий Петрович Президент Евразийского патентного ведомства

Дерек азақстан рек	спубликасы республика каз.	р-С
	REPUBLIC OF KAZAKHSTAN	
	ΠΑΤΕΗΤ	
A	₩ <u>33922</u> Энертабыска / на изобретение / for invention	
	(21) 2021/0571.1	
	(22) 22.09.2021	
	(45) 21.10.2022	
(54) Симметриялык окшауланған бо Способ измере напряжением д Method for mea voltage up to an	к компоненттерді ескере отырып кернеуі 1000 В дейін және ейтарап электр желілерінің окшаулау параметрлерін өлшеу тәсіл ения параметров изоляции электрических сетей с изолированно до и выше 1000 В с учетом симметричных составляющих easuring the insulation parameters of electrical networks with an is nd above 1000 V, taking into account symmetrical components	одан жоғары i эй нейтралью solated neutral
(73) Курабаев Иская	ндер Казбекович (KZ)	
(72) Курабаев Искан Утегулов Арма	индер Казбекович (KZ) ан Болатбекович (KZ) Utegulov Arman Bolatbekovich (KZ)	(Z))
	ЭЦҚ кол койылды Подписано ЭЦП Signed with EDS Y.0	Оспанов Оспанов Оспанов Оspanov
*		